



引文格式: 姚卓森. 岩浆铜镍矿床中硫化物的垂向物理运移机制[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 1–22. DOI: 10.12401/j.nwg.2024132

Citation: YAO Zhuosen. Vertical Transfer of Sulfide in the Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 1–22. DOI: 10.12401/j.nwg.2024132

岩浆铜镍矿床中硫化物的垂向物理运移机制

姚卓森

(中国地质大学(武汉)资源学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 硫化物作为亲硫元素的主要载体, 其在动态多级岩浆系统内的物理运移和聚集是岩浆铜镍硫化物矿床的关键成矿过程。但目前人们对相关动力学过程的理解停留于经验认识阶段, 即便仅是硫化物在多级系统内的垂向物理运移方向也仍未达成共识。小岩体成大矿模式强调富矿岩浆及矿浆的向上贯入, 而岩浆通道式成矿则认为硫化物的向下渗滤和重力回流是主导机制。笔者归纳了硫化物动力学过程的全新研究手段, 系统梳理了多级岩浆系统内硫化物液滴、混合液滴以及矿浆等的垂向运移过程及相关物理机制, 并细致阐明了岩浆铜镍硫化物矿床中珠滴状、稀疏浸染状、稠密浸染状、豹纹网脉状、斑杂网脉状、块状、角砾状等典型矿石构造的形成过程。本研究旨在查明硫化物的垂向运移规律和物理机制, 刻画成矿物质的物理富集过程, 以期能达到高效圈定成矿有利部位, 科学指导深边部找矿勘查的最终目的。

关键词: 铜镍硫化物矿床; 关键金属的超常富集; 硫化物的垂向迁移; 典型矿石结构; 成矿动力学过程
中图分类号: P611.1+1; P616 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2025)04-0001-22

Vertical Transfer of Sulfide in the Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits

YAO Zhuosen

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Resources,
China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: In the dynamic, multistage magmatic systems, the particularly important processes in forming magmatic Ni-Cu sulfide deposits are the transport and accumulation of dense sulfide liquid that is the main carrier of chalcophile elements. However, the dynamic behaviors of sulfide liquids in magmatic systems, remain largely empirical and poorly constrained. Even now, the well-know, ore-forming models have polarized viewpoints toward the direction of sulfide vertical transfer in a dynamic magmatic system. The "Small Intrusion Forming Large Deposits" model highlights upward transfer of sulfide-rich magmas and pulses of pure sulfide liquids, while the downward percolation, injection and gravitational back-flow of sulfide liquids play a major role in the

收稿日期: 2024-11-15; 修回日期: 2024-12-28; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“岩浆铜镍矿床中硫化物的垂向物理运移机制——以喀拉通克矿床为例”(42272084), 国家重点研发计划课题“大陆裂解过程中圈层相互作用与成矿物质循环”(2021YFF0804204)联合资助。

作者简介: 姚卓森(1990–), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩浆矿床成矿动力学过程与关键金属超常富集机制的研究。E-mail: yaozhuosen@cug.edu.cn。

formation of "Conduit-type Deposits". In this paper, we summarize the novel methods for studying sulfide's dynamic processes, systematically review the vertical migration processes and associated physical mechanisms of sulfide droplets, compound droplets and pure sulfide liquids within multistage magmatic systems, and elaborate on the formation processes of typical ore textures in magmatic Ni-Cu sulfide deposits, including the sulfide globules, fine disseminated, dense disseminated, leopard net-textures, patchy net-textures, massive, and sulfide matrix breccia ores. This work is aimed at revealing the vertical migration and physical mechanisms of sulfides, outlining the physical enrichment processes of ore-forming materials, and ultimately achieving efficient delineation of favorable areas for mineralization and scientifically guiding the prospecting in depth and outside of orebodies in the future.

Keywords: magmatic sulfide deposits; extreme enrichment of critical metals; vertical transfer of sulfides; typical ore texture; ore-forming dynamics

岩浆铜镍矿床是指与镁铁-超镁铁质岩浆作用有关的富含镍(Ni)、铜(Cu)、钴(Co)和铂族元素(PGE)的硫化物矿床,是世界上相关金属资源的重要来源,亦用于区域构造演化和岩浆过程的示踪研究,具有重要的经济意义和科学价值(Naldrett, 2004, 2010; 柴凤梅等, 2005; 吕林素等, 2007; 秦克章等, 2016; 宋谢炎, 2019; 张照伟等, 2023a; 赵达成等, 2023)。钴、镍、铂族元素广泛应用于新能源汽车、电子通讯、航空航天、高端装备制造等领域,属于对国民经济和科技发展具有重要意义的关键金属矿产(翟明国等, 2019; 蒋少涌等, 2019; 侯增谦等, 2020; 王焰等, 2020; 王亚磊等, 2023; 张照伟, 2023b)。随着新能源革命的蓬勃发展,中国对镍钴的需求大幅增长,但国内相关资源储量十分有限,保障程度低,且主要赋存于岩浆铜镍矿床(其Ni、Co、PGE储量分别占全国同类金属资源储量的86%、50%和95%)(汤中立等, 1995; 叶天竺等, 2017)。因此,开展岩浆铜镍硫化物矿床成因机制和成矿模式的研究不仅是创新成矿理论的需求,亦可为Ni、Co、PGE等关键矿产资源的找矿勘查提供重要的科技支撑。

岩浆铜镍硫化物矿床是幔源岩浆上侵地壳并经历结晶分异、同化混染、硫化物饱和熔离及汇聚成矿等一系列地质-物理-化学过程的最终产物。Ni、Cu、Co和PGE等金属元素在岩浆体系中呈强亲硫性,其在硫化物与硅酸盐熔体间的分配系数分别可达130~1300, 100~1700, 20~130和 $10^2 \sim 10^6$ (Naldrett, 2004, 2010; Kiseeva et al., 2013, 2015; Mungall et al., 2014; Brenan et al., 2016; Zhang et al., 2021; Wang et al., 2024)。故这些元素在岩浆作用中的地球化学行为主要受控于硫化物,最终也赋存于贱金属硫化物而形成矿体。

由于熔体中硫达到饱和时的硫含量(SCSS)随压力降低而呈指数上升(Mavrogenes et al., 1999),地幔高程度部分熔融产生的硫不饱和原始岩浆(Yao et al., 2018)上侵至浅部地壳后,需借助其他岩浆过程方能触发硫化物饱和熔离,包括大规模结晶、岩浆混合、围岩(长英质、碳酸盐、或还原性有机质)混染和外源硫直接加入(Maier et al., 1998; Ripley et al., 2013; 宋谢炎, 2019; Xue et al., 2021)。其中,后两者能高效快速地触发岩浆硫饱和,属于最主要的成矿机制。熔离出的硫化物不断与岩浆发生反应平衡,萃取大量成矿元素,并最终汇聚形成高品位矿体(Campbell et al., 1979; Lesher et al., 1993)。上述针对岩浆作用中关键金属化学富集过程的研究已日臻完善,并取得了广泛共识。

镁铁-超镁铁质岩浆由于具有较低粘度($0.01 \sim 300 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)(Lesher et al., 2015)而易于发生显著的快速流动、对流,乃至火山喷发等,即铜镍硫化物矿床形成于动态的岩浆系统。硫化物作为金属元素的主要载体,其在动态岩浆体系内所经历的物理运移和汇聚过程却并未受到过多关注,已有研究往往将硫化物的汇聚归因于概念性的“流体动力学陷阱(Fluid Dynamic Trap)”而一笔带过。由于岩浆中硫元素含量偏低($1000 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$),即使赋矿岩体内所有熔离的硫化物均汇聚于一处,也很难形成较大规模的硫化物矿体。因此,岩浆铜镍硫化物矿床中关键金属的超常富集不仅需要硫化物对金属元素的化学萃取富集,也要求多级岩浆系统内不同位置处熔离的硫化物经历长距离运移并最终汇聚于赋矿岩体的特定部位,即关键金属的物理富集过程。此外,随着成矿过程的进行,物理富集在其中所发挥的作用会日益重要,并在很大程度上决定了最终矿体的矿石类型、成分特征和

空间分布规律,对构建成矿模型和开展找矿勘探均有着重要意义。然而,地球化学的分析手段和测试结果对于解读岩浆和硫化物的物理过程仍存在较大局限性和多解性(宋谢炎, 2019),有待更多的物理视角和研究手段加以解决。

1 现有模型与认识

中国岩浆铜镍硫化物矿床具有鲜明特征:含矿岩体小,其最大变化截面积一般在 1 km^2 (km^3) 左右或更小;岩相分带明显,一般从中心向外岩石基性程度降低,常呈多阶段侵入特征;矿体通常产出于最基性岩相;矿石品位较富,常见致密块状矿石,岩体矿化率(矿体体积/岩体体积)高(汤中立等, 1995, 2006, 2015; 秦克章等, 2012, 2016; 姚卓森等, 2014; 叶天竺等, 2017; 宋谢炎等, 2018)。小型赋矿岩体与其蕴含的巨量金属之间存在着质量平衡悖论,即熔离形成相应硫化物矿体所需岩浆量远远大于赋矿岩体规模。为了解释这一矛盾,汤中立院士基于对金川铜镍矿的深入研究,并于20世纪80年代提出了“小岩体成矿”模型(图1a):成矿母岩浆在地壳深部岩浆房经历了初步分异和硫化物的预富集,自上而下形成了不含矿岩浆、含矿岩浆和矿浆;上部的不含矿岩浆先期喷出地表或侵入浅部空间,形成喷发岩或侵入岩体群;随后,残余的贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆多次贯入同一空间成岩成矿,或不同空间形成矿集区(汤中立, 1990, 1996; 汤中立等, 1995; 汤中立等, 2006, 2011, 2012, 2015)。这一“深部熔离(预富集)→脉动式贯入→终端岩浆房聚集成矿”模型根植于中国大量岩浆矿床的矿石结

构和矿体空间分布规律的总结,突显了小型侵入体的重要性,对该类矿床的找矿勘探工作具有科学指导意义(李世金等, 2012; 李文渊等, 2015, 2023; 刘伟栋等, 2024)。但硫化物密度远大于岩浆和上地壳,导致人们对富矿岩浆乃至矿浆的上侵能力心存疑虑(罗照华等, 2009),使得该模型所提倡的硫化物矿浆向上贯入过程缺乏理论支撑,极大限制了其在世界范围内的推广。

俄罗斯 Noril'sk 矿床和加拿大 Voisey's Bay 矿床也表现出类似特征,即小型镁铁-超镁铁质岩体内赋存世界级的超大型铜镍硫化物矿床(Naldrett et al., 1992, 1995, 2000; Czamanske et al., 1995; Li et al., 1999; Evans-Lamswood et al., 2000)。从成矿物质质量平衡的角度出发,很多国外学者认为其矿体形成于开放岩浆通道系统,硫化物在其中不断与动态补给的岩浆反应平衡,萃取金属元素,获得很高 R 值,并最终在通道的宽大部位抑或是上部岩体喇叭状入口部位发生沉淀汇聚形成矿体(图1b)(Naldrett, 1997; Evans-Lamswood et al., 2000; Li et al., 2001; Maier et al., 2001)。这一“岩浆通道式成矿”模型更多近似于一个理论框架(宋谢炎, 2019),成矿过程的诸多细节不甚清晰,如通道内硫化物可能源于岩浆的原位混染和就地熔离(Li et al., 2009),抑或是深部岩浆房早期熔离硫化物的向上运移(Li et al., 2000)。Barnes 等(2016)经过系统总结归纳,刻画了一个相对详细的岩浆通道系统:次级构造控制的岩床-岩墙组合构成了岩浆通道的最初样式,携带部分硫化物的岩浆持续注入并不断混染围岩,就地熔离出大量硫化物;这些硫化物受流体动力学控制陆续汇聚于通道的漩涡和浅滩等部位,形成

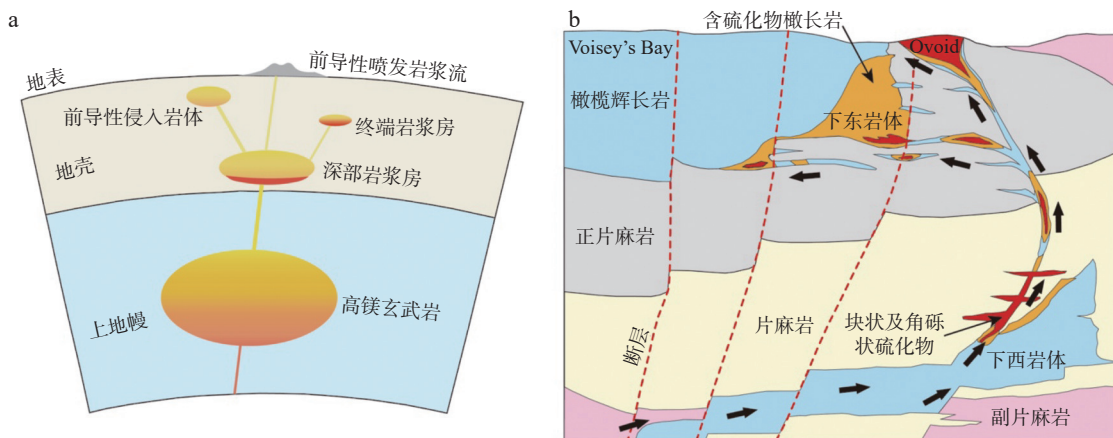


图1 小岩体成大矿模型(a)和岩浆通道式成矿模型(b)(据汤中立等, 2015; Yao et al., 2019 修改)

Fig. 1 (a) "Small Intrusion Forming Large Deposit" model and (b) "Magmatic Conduit-style Mineralization" model

的硫化物熔体矿浆达到一定厚度后因自身重力而向下渗滤、回流进入通道边缘的杂岩体,形成角砾状矿石,甚至压裂下覆围岩并贯入形成块状矿石;随着通道内岩浆动力减弱,硫化物矿浆还可能回流、倒灌至体系最下方的通道开口处。该模型突出强调了硫化物向下渗滤、重力回流的重要性,能够解释铜镍硫化物矿床的各类矿石结构学特征(Barnes et al., 2017, 2018),但同时弱化了深部岩浆房过程(围岩混染、硫化物深部熔离)对成矿作用的贡献,与很多已有的、基于野外观察和地球化学特征所建立的成矿模型并不完全契合(Czamanske et al., 1995; Evans-Lamswood et al., 2000; De Waal et al., 2004; Ding et al., 2012; Song et al., 2012)。俄罗斯 Noril'sk 矿床作为岩浆通道式成矿模型的典型案例,其 Kharaelakh 岩体西北端被长期认为是与上覆西伯利亚溢流玄武岩相连的岩浆通道(Rad'ko, 1991; Naldrett et al., 1995; Naldrett, 2004),但近期矿业公司的大量钻探结果表明,该岩体尖灭于地层内,属于封闭的小型侵入岩体,而并非岩浆通道(Krivolutskaya et al., 2019)。故通道式成矿模型是否普适于所有岩浆铜镍硫化物矿床,仍存疑虑。

笔者认为“小岩体成大矿”与“岩浆通道式成矿”两个经典成矿模型间的差异主要体现在对岩浆动力学过程的认识上:前者认为含矿岩体是封闭体系,属于岩浆通道的终点,强调硫化物深部熔离和预富集,以及后续岩/矿浆的脉动式向上运移;后者认为成矿过程发生于岩浆连续上侵的动态开放体系,就地的围岩混染和硫化物熔离占主导地位,硫化物在通道内特殊的流体动力学环境发生汇聚,以硫化物矿浆的重力回流为主。两者的核心矛盾在于:高密度硫化物能否随着岩浆向上运移、侵位,还是仅在重力作用下发生向下渗滤和回流?两个模型均仅从密度角度来理解硫化物的运移过程,但是密度差异所引起的浮力效应并非驱动岩浆上侵或下渗的唯一动力,岩浆的压力梯度和区域构造应力等亦发挥着重要作用(徐兴旺等, 2006; Xu et al., 2016)。故上述成矿模型中涉及硫化物动力学过程的理论基础难免略显单薄,亟待提高。此外,上述模型在指导找矿预测和勘探工作方面所发挥的作用也不尽相同:由于中国很多岩浆铜镍硫化物矿床的勘探程度有限,很多钻孔未打穿岩体即终孔,若判定某矿床符合“小岩体成大矿”模型,后续勘查工作应努力向深部寻找可能的岩浆通道及深层次矿体(如金川第二矿区隐伏矿体的发现),有望打开“第二

找矿空间”;若其遵循“岩浆通道式成矿”模型,后续勘查工作应更多关注于赋矿岩体底部及周缘围岩中可能存在的贯入矿体。因此,探究硫化物在多级岩浆成矿系统内的垂向物理运移规律,并查明其主要控制因素,刻画硫化物运移的动力学过程,显得尤为迫切和重要。

2 硫化物动力学过程的新兴研究手段

由于硫化物的物理富集更多借助成矿物质的机械性搬运和汇聚过程,较少体现在矿物或岩石的成分特征上,导致成熟的地球化学分析手段难以限定或存在较大多解性。因此,近年来涌现出很多新兴研究手段,目前主要体现在以下 3 个方面。

(1) 岩矿石中硫化物的形态、粒径、展布方式以及空间上的相互关系是硫化物经历一系列物理运移、汇聚和堆叠过程后的最终产物,蕴含了丰富的动力学信息。岩浆铜镍硫化物矿床中发育多种矿石构造类型,包括稀疏浸染状、稠密浸染状、网脉状、海绵陨铁状、斑杂状(或豹纹状)、乳化状、角砾状、半块状-块状矿石以及粗粒硫化物珠滴等。以往研究更多关注于矿石的金属元素含量及成分特征,却很少思考不同类型矿石是如何形成的,其多样性和差异性的主控因素是什么?近年来,随着 X 射线荧光扫面和断层扫描技术(三维 CT 扫描)技术的发展和普及,人们能够定量获取硫化物的形态特征、粒径分布、连通性、定向性及空间分布规律等结构学参数(图 2a)(Godel, 2013a; Kyle et al., 2015),进而反向解译出重要的成矿过程,如硫化物的原位结晶、水平运移、在晶粥中的渗滤及矿浆贯入围岩等(Godel et al., 2013b; Barnes et al., 2017, 2018; Mao et al., 2018, 2022; Vukmanovic et al., 2019)。但当前人们对硫化物在动态岩浆体系内迁移聚集过程及矿石结构形成机制的认识非常欠缺,导致矿石结构构造的反向解译较少以正向推演为依据,相关结论更多源于研究人员朴素的定性分析和推测。此外,多数研究聚焦于硫化物的粒度分布特征(Crystal Size Distribution, CSD),该理论最早形成于化学工程领域(Randolph et al., 1977),后续被引入并应用于火山岩斑晶(Marsh, 1988; Cashman et al., 1988; Cashman, 2020),但其在堆晶岩中的适用性存在一定疑虑和局限性(Marsh, 1998)。更重要的是,硫化物具有很低的结晶温度,其冷却固结发生于中低温晶粥体系,使得

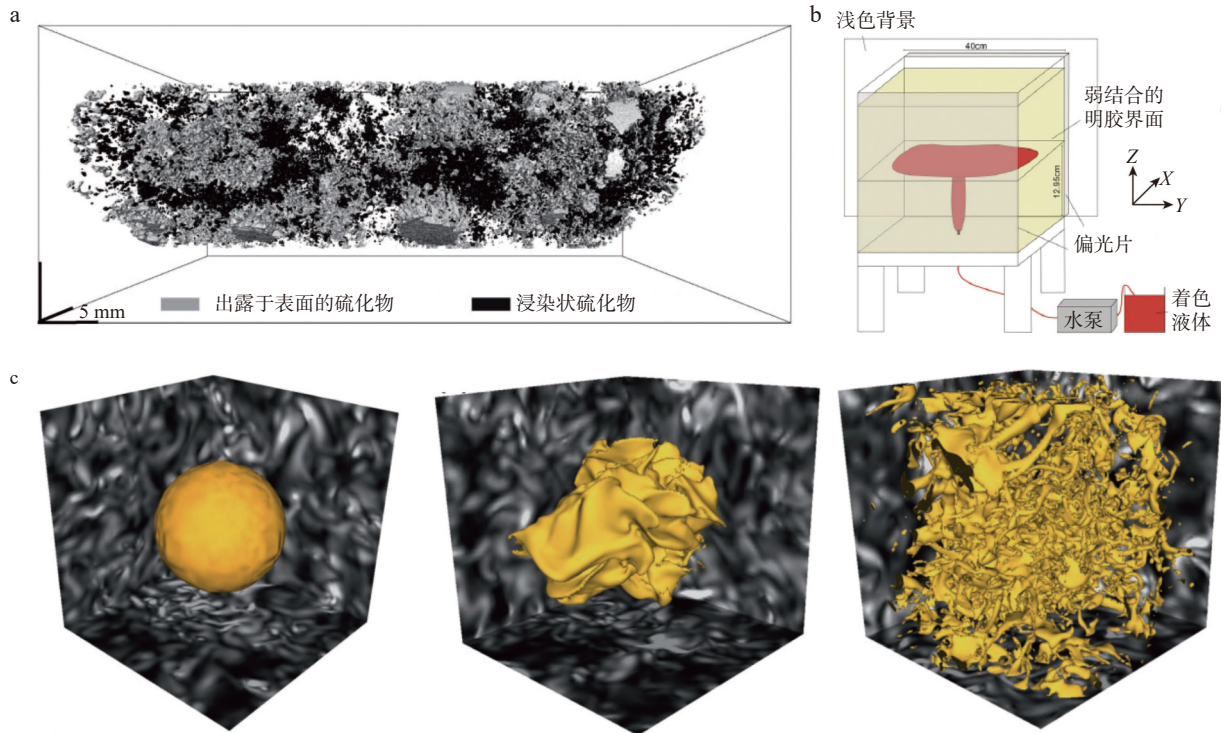


图2 硫化物三维 CT 扫描结果(a)、类比模拟实验示意图(b)、硫化物液滴在岩浆湍流中发生撕裂破碎的流体动力学数值模拟结果(c)(据 Robertson et al., 2015; Barnes et al., 2019a, 2019b; Williams et al., 2022 修改)

Fig. 2 (a) High resolution XRCT image of sulfide ore, (b) schematic illustration of analogue experiment, and (c) fluid dynamic numerical modeling result of the break-up of sulfide droplet in a turbulent magma flow

它的粒径、形态等特征受限于晶粥孔隙的有限空间和分布规律,并非像主要矿物在熔体中依据结晶特性而自主形成的,那么堆晶岩内硫化物的粒度特征是否满足熔体火山岩体系的 CSD 理论,又能否与硫化物的早期熔离和搬运等动力学过程建立成因联系?笔者对相关问题的疑虑,期望今后硫化物 CSD 特征的解译能够更加严谨可靠。

(2)由于难以通过实验来重现高温环境下硫化物在动态岩浆中的迁移汇聚过程,人们对相关过程的初步认识均源自于相对简化的类比模拟实验,即在实验室设计并搭建小尺度的实验装置,选取物理属性类似的物质组合来近似模拟硫化物在相关岩浆系统内的流体动力学过程,将所观察到的实验现象、相关规律和结论按照尺度类比原则回溯至岩浆系统。类比模拟实验并非要完全还原相关岩浆动力学过程,而是将其简化以便于查明其背后的物理规律和主要控制因素,该方法常用于火山系统动力学过程的研究,如明胶的注入通常被用于类比地壳中的岩墙增殖和岩体侵位过程(图 2b)(Di Giuseppe et al., 2013; Kavanagh et al., 2016, 2017, 2018; Urbani et al., 2018; Sili et al., 2019;

Galetto et al., 2021; Poppe et al., 2022)。目前为止,仅有两例与岩浆铜镍硫化物矿床密切相关的类比实验:将硅油液滴在垂直导管内的运移类比于硫化物液滴在岩浆通道系统内的物理运移过程,归纳得出液滴的沉降规律(De Bremond d'Ars et al., 2001);将葡萄糖与葵花油组成的溶液体系类比于熔体岩浆房内的硅酸盐-硫化物熔体二元分层系统,根据实验观察论证上侵岩浆抽取、裹挟硫化物矿浆的物理机制及可行性(Saumur et al., 2015)。类比模拟实验结果的进一步推广往往受限于可选取的类比材料的物理属性难以完美契合于硫化物、硅酸盐熔体等岩浆产物,导致实验体系与自然岩浆体系间可能存在难以避免的偏差。

(3)岩浆是以硅酸盐熔体为主,但通常又含有硅酸盐矿物、硫化物液滴、氧化物、流体及挥发分气泡的混合物,属于多相流体系,遵循非稳态流动特性。岩浆的流动受挥发分气泡及硅酸盐矿物的体积比例、粒径、相对速度、物理属性以及相互之间的热量和能量传递的影响,使得整个岩浆体系的动力学过程复杂多变。这些因素无法体现在类比模拟实验中,而硫化物在动态岩浆体系内的物理迁移汇聚过程也难以通

过简单的流体力学理论分析求解,但这些复杂过程在计算机算力允许的情况下,可通过计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟而得到部分重现。因此,流体动力学数值模拟工作是对类比模拟实验及流体力学基础理论的深化和拔高,近年来越来越广泛地运用于岩浆动力学过程和火山喷发作用的研究。近期工作已经证明流体动力学数值模拟方法能够很好地诠释挥发分气泡在岩浆通道和晶粥体系内的运移规律(Huber et al., 2014; Parmigiani et al., 2016),以及硫化物液滴在动态岩浆内的破碎(图 2c)、运移和汇聚过程(Robertson et al., 2015; Yao et al., 2020, 2022)。但是 CFD 方法具备数值模拟的通病,即可能会因某一参数或边界条件的设定偏差而使模拟结果大幅偏离真实物理过程。因此,该模拟结果往往还需要得到类比模拟实验结果的补充印证。

3 硫化物在多级岩浆系统内垂向运移的物理机制

多级镁铁-超镁铁质岩浆体系内,硫化物的垂向运移过程受控于硫化物和硅酸盐熔体的物理属性(如密度和动态粘度)、岩浆的流动状态、硫化物的形态和粒径等因素。笔者接下来将首先介绍硫化物的物理属性,随后刻画单颗粒硫化物、硫化物液滴群、硫化物-气泡混合液滴以及矿浆的垂向运移过程。

3.1 硫化物的物理属性

相比于镁铁-超镁铁质岩浆,高温的硫化物熔体具有极其独特的物理属性。

(1)硫化物熔体的密度与其成分和温度密切相关,常压高温(1 200 °C)条件下,富铁硫化物熔体(类似 FeS)的密度约为 3 960 kg/m³,而富镍硫化物熔体的密度则上升至 5 330 kg/m³(Dobson et al., 2000; Kress et al., 2008; Robertson et al., 2015)。因此,高温硫化物熔体的密度远高于同期的镁铁-超镁铁质岩浆(2 550~2 950 kg/m³)(Leshner et al., 2015),晶出的硅酸盐矿物(橄榄石, 3 200~4 400 kg/m³; 辉石, 3 200~4 000 kg/m³)(Niu et al., 1991),以及周缘的地壳围岩(2 500~2 800 kg/m³)。

(2)硫化物熔体具有极低的动力学粘度(0.008~0.036 Pa·s)(Dobson et al., 2000; Terasaki et al., 2001),远小于超镁铁质(0.1~10 Pa·s)和镁铁质(10~300 Pa·s)熔体(Robertson et al., 2015; Leshner et al., 2015; Yao et

al., 2019)。

(3)硫化物熔体的热导率(~60 W/(m·°C))(Stacey et al., 2001)比硅酸盐熔体及周缘围岩高一个数量级以上(Saumur et al., 2017)。

(4)硫化物熔体的结晶温度(1 030~1 130 °C)要比镁铁质岩浆低 100~150 °C(Ballhaus et al., 2001; Robertson et al., 2015)。

硫化物熔体因自身的高密度而在岩浆体系内天然具有向下沉降的趋势,而较低的结晶温度保障了其在岩浆冷却演化的大多数阶段均处于熔体状态。同时,极低的动力学粘度使得硫化物熔体在运移过程中较少受到粘滞力的阻碍和损耗,而高热导率则导致矿浆贯入的过程中会向围岩传导更多热量,伴随着一定程度的热侵蚀作用。因此,硫化物熔体的独特物理属性决定了其在动态多级岩浆系统内的物理运移汇聚过程。

3.2 单颗粒硫化物液滴

岩浆中熔离出的硫化物主要以液滴形式存在,且实验最初几小时内的熔离液滴平均粒度仅有 1.6~2.5 μm(Holzheid, 2010)。动力学运移过程中,硅酸盐熔体内的硫还可通过对流扩散作用进入硫化物液滴,促使其持续生长(Zhang, 2015),模拟结果表明硫化物从初始半径增长至 1 mm 需在超镁铁质岩浆中经历~7 300 m(~42 d)的自由沉降过程(Yao et al., 2021a)。另一方面,由于硫化物与硅酸盐熔体之间的表面张力(Mungall et al., 2005),毫米尺度乃至更细粒硫化物液滴在动态岩浆中的物理行为类似于刚性固体小球(图 3b),它在静止熔体的最终沉降速率(U)遵循斯托克斯定律(Stokes, 1981)。

$$U = \frac{2g\Delta\rho r^2}{9\eta_{melt}} \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度; $\Delta\rho$ 为硫化物与硅酸盐熔体间的密度差; r 为硫化物液滴的半径; η_{melt} 为硅酸盐熔体的粘度。类比模拟实验结果表明硫化物液滴可能更多类似于气泡在硅酸盐熔体中的运移,其最终沉降速率应遵循 Hadamard-Rybczynski 公式(De Bremond d' Ars et al., 2001)。

$$U = \frac{2g\Delta\rho r^2}{3\eta_{melt}} \cdot \frac{\eta_{melt} + \eta_{sulfide}}{2\eta_{melt} + 3\eta_{sulfide}} \quad (2)$$

式中: $\eta_{sulfide}$ 为硫化物熔体的粘度。岩浆中往往同时晶出大量高密度矿物,相对于硅酸盐熔体,相邻矿物的沉降会增强熔体对硫化物液滴的拖曳力,从而降低其最终沉降速率(图 3c),被称为“阻碍沉降效应”

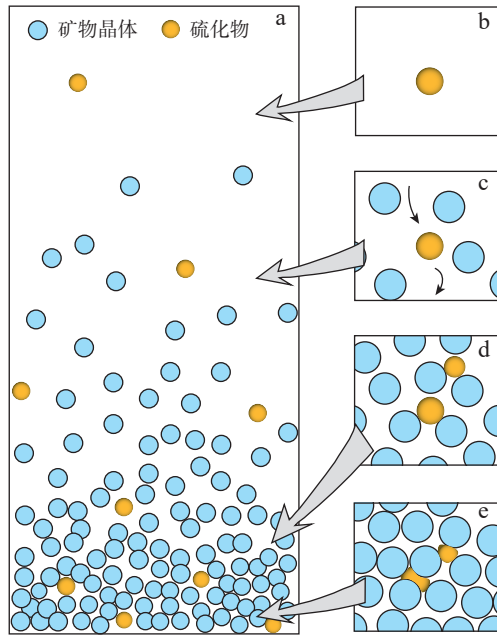


图3 岩浆体系内硫化物液滴与矿物沉降过程的示意图
(据 Chung et al., 2009 修改)

Fig. 3 Schematic diagram for the settling of sulfide droplets and minerals in the magmatic system

(Richardson et al., 1954), 对应硫化物液滴的沉降速率与岩浆中矿物的体积比例(ϕ)的关系可表示为 (Gar-side et al., 1977):

$$U' = U \cdot (1 - \phi)^{5.1} \quad (3)$$

因此, 岩浆自身熔离出的硫化物液滴通常具有很小的粒径以及沉降速率($10^{-3} \sim 10^{-8}$ m/s), 而围岩混染过程所释放的或从别处搬运而来的粗粒硫化物液滴则可能具有相对高的沉降速率。

上述公式得到的是硫化物液滴在静止硅酸盐熔体内的沉降速率, 但自然界中多级岩浆系统内发生的岩浆补给、混合以及围岩混染等作用均会触发强烈而嘈杂的岩浆对流 (Huppert et al., 1982; Huppert et al., 1984; Jaupart et al., 1984; Campbell, 1996)。若对流岩浆具有垂直向上的流速分量, 且该分量的值大于硫化物液滴的相对沉降速率, 那么从静止的围岩参照系来看, 大多数细粒液滴并不会发生向下沉降, 反而会被岩浆对流所裹挟而共同运移。对流岩浆的底部靠近静止围岩时, 其流速会快速降至 0, 故存在一个低流速薄层, 当粗粒硫化物液滴进入此区域时, 重力沉降重新占据主导而促使液滴停滞于此 (Martin et al., 1988, 1989)。多级岩浆系统之间往往通过板状的岩浆通道相连, 镁铁质成矿母岩浆在其中的上侵运移速率通常为

0.001~0.1 m/s (Rutherford, 2008; Chavrit et al., 2012; Chen et al., 2013)。这一速度区间也远远高于大多数硫化物液滴在硅酸盐熔体中的相对沉降速率, 故硫化物相对于静止围岩而言, 也理应随上侵岩浆而运移 (Yao et al., 2019)。因此, 岩浆熔离产生的大多数细粒硫化物液滴并不会发生显著的重力分异, 反而会随着对流岩浆持续运移, 并且还能够被上侵岩浆携带至上覆的动态岩浆成矿系统。

硫化物液滴间的合并增粗以及围岩内硫化物的混染释放均可能导致岩浆系统中出现粗粒硫化物液滴, 具有更强的沉降趋势, 其垂向运移更多以向下沉降为主。这些粗粒硫化物液滴易于受周缘熔体流动所施加应力的影响而发生一定程度的变形, 甚至破碎成多个细粒液滴 (图 4), 即动态岩浆体系内能够稳定存在的硫化物液滴, 其粒径存在上限值。粗粒硫化物液滴快速沉降时, 硫化物与硅酸盐熔体间的密度差异会导致液滴表面的不稳定性, 即瑞利-泰勒不稳定性 (Rayleigh-Taylor Instability), 促使液滴表面变形, 甚至破碎。衡量这一过程的无量纲参数为邦德数 (Bond Number, Bo), 可表示为 (Robertson et al., 2015):

$$Bo = \frac{\Delta \rho g r^2}{\sigma} \quad (4)$$

式中: σ 为硫化物与硅酸盐熔体间的表面张力, 通常为 0.21~0.24 N/m (Mungall et al., 2015)。邦德数 (Bo) 代表液滴负浮力与界面表面张力之间的比值, 其值越小, 则表面张力占主导, 硫化物易于保持球状液滴而难以变形; 反之, 液滴易于变形破碎。已有研究表明, 液滴发生破碎的临界邦德数约为 100 (Suckale et al., 2010; Yao et al., 2019), 对应的 r 值 (~ 4 cm) 即为硫化物液滴稳定存在的最大半径。硫化物与硅酸盐熔体之间显著的速度差异可能会导致界面失稳, 即开尔

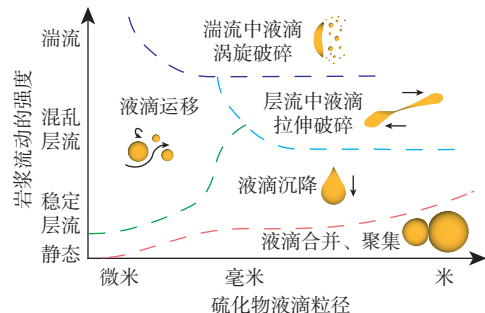


图4 硫化物液滴动力学过程与自身粒径、岩浆流动强度的示意图

Fig. 4 Schematic diagram for the dynamics of sulfide droplet in relation to its size and the intensity of magma flow

文-亥姆霍兹不稳定性(Kelvin-Helmholtz Instability),而衡量该过程的无量纲参数则为液滴的雷诺数(Reynolds Number, Re)(Robertson et al., 2015)。

$$Re = \frac{2\rho_{melt}\Delta U r}{\eta_{melt}} \quad (5)$$

式中: $\Delta\rho_{melt}$ 是硅酸盐熔体的密度; ΔU 为硫化物与硅酸盐熔体之间的相对运移速率。模拟结果表明, 当 Re 值超过 ~ 10 时, 液滴受开尔文-亥姆霍兹不稳定性影响而发生破碎(Suckale et al., 2010), 对应的最大硫化物液滴粒径随熔体粘度升高而增大, 而当超镁铁质熔体粘度小于 1 Pas 时, 液滴最大粒径降低至 7 mm 以下。此外, 流动熔体的粘滞剪切应力还会使粗粒硫化物液滴周缘产生速率梯度, 导致液滴发生变形直至破碎, 该过程能否发生取决于粘滞剪切应力与表面张力之间的比值, 即毛细数(Capillary Number, Ca)(Robertson et al., 2015)。

$$Ca = \frac{r\eta_{melt} \cdot \dot{\gamma}}{\sigma} \quad (6)$$

式中: $\dot{\gamma}$ 为熔体流中硫化物液滴附近的剪切速率。已有实验和理论结果表明, 拉伸剪切或简单剪切流中液滴破碎所对应的临界毛细数分别为 $0.3 \sim 0.6$ 或 $1 \sim 10$ (Bentley et al., 1986; Khakhar et al., 1986), 对应的 r 值即为硫化物液滴能够在相应动力学环境中稳定运移的最大半径。板状岩墙内稳定岩浆流的剪切速率最大值位于靠近两侧围岩的边部, 而中心区域的剪切速率则降至零。因此, 当粗粒硫化物液滴接近围岩时, 可能会因突然升高的剪切应力而发生明显变形甚至破碎。

3.3 硫化物液滴群

以上理论分析证实了单颗粒硫化物液滴在多级岩浆系统内垂向上移的能力, 但对于成矿物质的物理迁移富集而言, 更重要的是硫化物液滴群的垂向运移过程。同时, 当流动的硅酸盐熔体内含有大量硫化物液滴时, 岩浆的密度和粘度会快速上升, 反之会消耗更多岩浆动能, 从而改变其流动状态。因此, 单颗粒硫化物液滴的动力学过程更多是单方面耦合于岩浆的流动, 而硫化物液滴群与岩浆流之间是相互影响的, 属于双向耦合。

Barnes 等(2016)认为硫化物液滴群会导致岩浆密度升高, 从而降低岩浆自身浮力以及上侵的动力, 因此当镁铁质岩浆中硫化物含量超过 5% 时, 其整体密度已超过围岩密度, 从而失去上升所需浮力。此时, 硫化物的含量对应于上侵岩浆对其的最大荷载能力。

但是, 浮力并非岩浆向上运移的唯一驱动力, 构造挤压、岩浆房超压、上覆岩体断裂引起通道减压或垮塌造成的挤压作用等过程均可使得岩浆在外力驱动下向上运移。岩浆上侵过程中, 岩墙两侧围岩对岩浆的粘滞阻力同样会消耗上侵动能, 进而影响岩浆对高密度硫化物液滴群的荷载能力。从物理角度而言, 板状岩墙内岩浆的动力学过程主要受控于深部岩浆房超压及通道内岩浆压强变化规律(即压力降), 其与围岩的密度差及相应的浮力效应仅是引起岩浆流中压强变化的众多因素之一。因此, 笔者以岩浆超压作为衡量指标, 构建了垂直板状岩墙内岩浆上侵的动力学模型, 查明岩浆浮力和粘滞阻力对通道内压力降的影响, 发现在不考虑外力驱动的情况下, 干的玄武质岩浆最多能携带 3% 左右的硫化物液滴向上运移, 若岩浆中同时含有等体积的橄榄石, 则硫化物液滴的最大荷载进一步降至 2% 左右(Yao et al., 2019)。此外, 挥发分的增加会显著降低岩浆密度和粘度(Hui et al., 2007; Giordano et al., 2008; Leshner et al., 2015), 增强岩浆上侵的浮力及动能, 并减弱其所受到的粘滞阻力消耗, 从而显著提升了岩浆对硫化物液滴群的荷载能力。当岩浆含有较高挥发分以及上侵至近地表时, 会触发挥发分气泡的饱和析出(Gonnermann et al., 2012), 进一步降低了岩浆的整体密度, 增强其对硫化物液滴群的荷载能力。模拟结果表明, 当上侵的玄武质岩浆含有 $1 \text{ wt.}\%$ 、 $2 \text{ wt.}\%$ 、 $3 \text{ wt.}\%$ 的 H_2O 时, 其对硫化物液滴群的最大荷载能力分别上升至 $9 \text{ vol.}\%$ 、 $17 \text{ vol.}\%$ 、 $31 \text{ vol.}\%$ (Yao et al., 2019)。因此, 多级岩浆系统内镁铁-超镁铁质岩浆能够携带一定量的硫化物液滴群沿板状岩墙上侵至地壳浅部(图 5a)。

上述模拟还未考虑外力驱动的情形, 若深部岩浆房内因为围岩塑性变形、晶粥堆晶压实及后续岩浆补给等过程而导致岩浆房超压快速升高(Gudmundsson, 2012; Gonnermann et al., 2015), 使得岩浆获得更多动能而裹挟大量硫化物液滴群向上侵位。世界级的俄罗斯 Noril'sk 铜镍矿集区长期属于岩浆通道式成矿的典型案列, 其成矿过程被证实与上覆西伯利亚溢流玄武岩有密切的成因联系(Naldrett et al., 1992, 1995; Lightfoot et al., 1994; Arndt et al., 2003; Lightfoot et al., 2005), 是刻画成矿物质在多级岩浆系统内运移的理想对象。笔者通过已有地球化学数据和热力学模拟证实, 矿集区内出现的 Tuklonsky 组苦橄质岩浆在深部岩浆房内经历了显著的围岩混染, 触发了硫化物的

早期熔离和预富集, 后续大规模的 Morongovsky-Mokulaevsky 组玄武岩补给进入有限空间的深部岩浆房, 产生了高达~22 MPa 的岩浆超压 (Yao et al., 2021b)。这些额外的岩浆超压驱动着 Morongovsky-Mokulaevsky 组玄武岩在携带了 8% 橄榄石和 1% 斜长石之余, 仍能荷载 10% 的硫化物液滴群而向上运移 (Yao et al., 2021b)。这一硫化物运移模型能很好地解释巨量成矿物质与小型含矿岩体间的质量平衡悖论, 尤其是考虑到近期钻探结果证实 Noril'sk 矿集区赋矿岩体属于封闭岩浆体系, 而非传统认为的开放岩浆通道系统 (Krivolutskaya et al., 2019)。

硫化物液滴群在深部岩浆房内的动力学过程存在两种端元形式: 当液滴的相对沉降速率远小于对流岩浆流速的方均根时, 硫化物会悬浮于岩浆流中并随之运移, 仅在进入靠近围岩的低流速薄层时发生沉降, 整个硫化物液滴群在对流岩浆中的平均滞留时间等于岩浆房厚度除以液滴的相对沉降速率; 当液滴的相对沉降速率远大于对流岩浆流速的方均根时, 硫化物液滴会无视岩浆对流的影响, 而近似于自由沉降至岩浆房底部, 液滴群的平均滞留时间等于岩浆房厚度的一半除以液滴的相对沉降速率。当速度比值 (0.02~2.0) 处于两端元之间时, 稳定的岩浆对流会部分延长硫化物液滴群的平均滞留时间, 尤其是当岩浆对流程度相对较弱而在岩浆房内形成持续的大规模环流时, 部分硫化物液滴甚至可能长期保持悬浮状态而不发生沉降 (Patočka et al., 2022)。

3.4 硫化物-气泡混合液滴

近期实验证实, 当沉浸于岩浆中的不混溶挥发分气泡和硫化物液滴相遇时, 受控于气体-硫化物-硅酸盐熔体间表面张力的相互影响, 硫化物液滴极易附着于气泡形成混合液滴 (Mungall et al., 2015)。类似结果也在其他实验中得到印证 (Iacono-Marziano et al., 2017; Virtanen et al., 2021), 气泡-硫化物混合液滴也被证实广泛存在于俄罗斯 Noril'sk 铜镍矿中 (Le Vaillant et al., 2017; Barnes et al., 2019a, 2019b)。由于挥发分气泡的密度 (100~400 kg/m³) 远小于镁铁-超镁铁质岩浆和硫化物熔体, 气泡-硫化物混合液滴的密度在绝大多数情况下均低于围岩岩浆 (Yao et al., 2020), 即气泡的浮力克服了硫化物液滴的重力而使得混合液体整体具有了自发向上浮动的能力, 进而对上侵岩浆提供了正向的浮力效应。热力学模拟证实, 当玄武质岩浆含有 3 wt.% 的水时, 其可在 3.5 km 深度处发生挥发分出

溶, 形成气泡 (Yao et al., 2019)。若玄武岩中含水量继续升高或同时含有 CO₂ 等其它挥发分时, 气泡出溶的深度会进一步增加, 如玄武岩含有 3% H₂O 和 4 100×10⁻⁶ CO₂, 那么会在约 15 km 深度处达到挥发分的饱和而形成气泡 (Iacono-Marziano et al., 2012), 因此气泡-硫化物的混合液滴能够形成于深部岩浆房 (Yao et al., 2020)。数值模拟结果表明, 混合液滴在缓慢上侵的岩浆流中可以稳定存在, 并且大部分细粒液滴能够通过改变自身几何学形态的方式而穿过晶粥内矿物所形成的窄缝, 进而重新回到晶粥层上覆的动态岩浆体系, 并参与后续的成矿过程 (Yao et al., 2020)。目前, 该模型已逐渐得到认可, 被广泛运用于深部硫化物向上运移的理论模型中 (Blanks et al., 2020; Park et al., 2021; Virtanen et al., 2021; Holwell et al., 2022; Iacono-Marziano et al., 2022; Heinrich et al., 2022; Patten et al., 2024; Cherdantseva et al., 2024)。当混合液滴向上运移至通道系统浅部时, 高速的岩浆流在液滴周缘的剪切应力会导致气泡与硫化物液滴间发生解耦 (即混合液滴的毛细数超过临界值: 0.112) (Rosenfeld et al., 2011), 释放大量的硫化物液滴, 使其能够在浅部通道口汇聚成矿 (Yao et al., 2019)。因此, 多级岩浆系统内, 挥发分气泡可以作为向上运移硫化物液滴的“小火箭”, 将硫化物从深部岩浆房携带至通道系统的浅部 (图 5a), 最终发生解耦并卸载大量硫化物液滴, 从而极大地提高了岩浆对成矿物质的向上运移能力 (Yao et al., 2019)。

3.5 硫化物熔体矿浆

动态岩浆系统中, 硫化物液滴群还可能沉降并汇聚于某些特定部位, 最终形成硫化物熔体池, 即“小岩体成大矿”模型中提及的硫化物熔体矿浆。由于硫化物熔体的密度远高于硅酸盐熔体及围岩, 因此矿浆天然具有向下运移的趋势, 而岩浆系统内具有一定厚度 (h) 的硫化物矿浆会在其底部产生偏应力, 其值等于静液压力差 ($\Delta\rho gh$) (图 5b), 如 10 m 厚矿浆对应的偏应力约为 0.2 MPa。若底部围岩有先存的薄弱带 (细微裂隙、断裂、破碎带或角砾岩等), 硫化物矿浆所产生的偏应力能够轻易克服注入裂隙/断裂窄口所需的毛细压强, 从而实现向下渗滤过程, 形成细脉状硫化物矿体 (Barnes et al., 2016; Saumur et al., 2017)。全球各地水力压裂测试结果表明, 围岩的原位抗张强度多分布于 0.5~6 MPa 之内 (Gudmundsson, 2012)。因此, 厚度超过 20~30 m 的硫化物矿浆有可能仅凭借

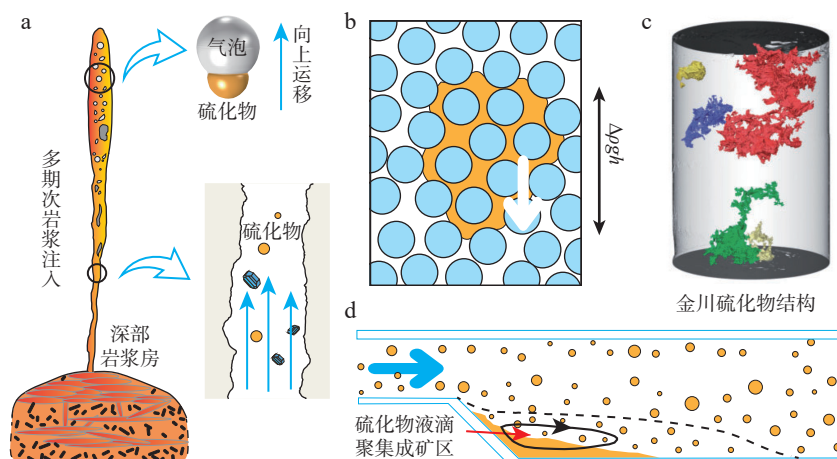


图5 硫化物液滴在通道中运移(a)、连通硫化物熔体在晶粥总渗滤(b)、相应的硫化物三维结构(c)及硫化物液滴在岩浆流动突扩处聚集成矿示意图(d)(据 Chung et al., 2009; Mao et al., 2018 修改)

Fig. 5 (a) Upward transport of sulfide droplets in conduit, (b) percolation of connected sulfides in crystal mush, (c) the associated ore texture, and (d) accumulation of sulfide droplets in expansion part of magma flow

自身重力所产生的偏应力而压裂底部脆性围岩,产生大量裂隙并向下贯入其中。硫化物熔体具有较低的结晶温度和动力学粘度,从而确保其在很长时间内保持熔体状态,并可能发生长距离的渗滤运移。世界上众多岩浆铜镍矿内块状矿体的底部常见密集硫化物矿脉、围岩压裂所形成的富矿角砾岩,均可视为硫化物矿浆运移的产物,其运移距离甚至可达到150~250 m(加拿大Voisey's Bay矿床)(Barnes et al., 2016, 2018; Saumur et al., 2017)。因此,不可否认的是,高密度硫化物矿浆在多级岩浆系统内易于发生向下的重力回流、渗滤并贯入围岩薄弱破碎带内。

然而,“小岩体成大矿”模式认为,深部岩浆房内早期熔离的硫化物矿浆需要发生上侵才能提供足够的成矿物质。为了尝试解决高密度硫化物矿浆上侵所需的浮力或动力难题,王俊(2013)、苏尚国等(2014)认为深部岩浆房中的硫化物矿浆混合大量挥发分流体(>30%)后,该富流体矿浆的密度迅速降低,获得了足够的浮力及动能,从而快速活化、上升并侵位,最终发生硫化物熔体与挥发分流体的相分离,形成块状矿体。透岩浆流体的作用可能极大促进了矿浆的向上运移(罗照华等, 2009),而很多岩体和矿床中也发现了大量流体自生矿物(流体晶)的存在,侧面印证了流体在岩浆成矿过程中的积极作用(苏尚国等, 2019)。此外,中国岩浆铜镍硫化物矿床中常见的含水矿物、矿石自蚀变特征、矿物含水量和Li同位素、以及稀有气体同位素等地球化学特征均表明,矿体形成于一个相对富含流体的岩浆环境中(Zhang et al.,

2013, 2017; 张铭杰等, 2015; Tang et al., 2017)。但是,上述推论存在若干无法回避的问题,即相对于硫化物熔体,岩浆中的挥发分更倾向于进入硅酸盐熔体,而且目前并不知晓硫化物熔体中最多能溶解多少挥发分(能否达到30%),因此对高温环境中超临界流体/挥发分在硫化物矿浆中的存在形式、饱和溶解度以及后续的相分离等成矿过程的认识很模糊,仍处于定性猜测阶段。

硫化物矿浆上侵的外界驱动力也可能来自于深部岩浆房过程。部分学者猜测,当深部岩浆房上部或周缘围岩中的断裂发生膨胀和扩展时,可能会出现瞬时的低压强区域,从而向上抽取高密度矿浆,但这一过程在物理上是不稳定的,也无法长期持续(Saumur et al., 2017)。近期的类比模拟实验表明,当深部岩浆房中仅存硅酸盐和硫化物熔体,且两者因密度差异而分成上下两层时,硅酸盐熔体上侵的同时能够选择性地抽取并裹挟一定量的硫化物矿浆,该过程在物理上是可行的(Saumur et al., 2015)。但是,该实验中熔体抽取的方向是垂直向下的,与拟类比的矿浆运移方向是不相符的。此外,该工作并没有考虑岩浆房中存在晶出矿物乃至晶粥的影响,但近期的众多研究逐渐凝聚共识,认为深部岩浆房应主要表现为大规模晶粥体,仅存在局部以熔体为主的小型区域(Bachmann et al., 2016; Cashman et al., 2017; Jackson et al., 2018; Edmonds et al., 2019),而晶粥中硫化物矿浆能否在外力驱动下发生上侵仍属于研究空白。

已有数值模拟表明,当脉冲式岩浆流经下覆硫化

物熔体池时,能够破坏两者间界面,将硫化物熔体裹挟进入岩浆流,并使其进一步破碎形成一系列细粒硫化物液滴(图6)(Barnes et al., 2019a; 2019b)。但该作者仅展示了一个数值模拟结果,并未细究其中蕴含的物理机制。笔者认为该现象的发生遵循物理学上的开尔文-亥姆霍兹不稳定性(Kelvin-Helmholtz Instability),即当相互接触且不混溶的两种流体间(硫化物与硅酸盐熔体)存在切向速度差且足够大时,作用于界面的剪切力所产生的不稳定效应超过两熔体重力及表面张力所产生的双熔体层稳定效应,导致两者间界面发生失稳现象。这一界面失稳现象受控于两熔体间的表面张力、密度比值、相对速率等参数,衡量该现象的主要无量纲参数(Shadloo et al., 2011; Fatehi et al., 2014)。

$$Ri = \frac{\rho_{melt} + \rho_{sulfide}}{k\rho_{melt}\rho_{sulfide}(\Delta U)^2} \cdot [g(\rho_{sulfide} - \rho_{melt}) + k^2\sigma] \quad (7)$$

式中: ρ_{melt} 和 $\rho_{sulfide}$ 分别是硅酸盐和硫化物熔体的密度; ΔU 为两者间的相对速度, k 为界面中存在扰动的波数。该 Ri 值表征着系统的势能与动能间的比值,当 $Ri < 1$ 时,界面间剪切力占主导,高密度的硫化物熔体逐渐隆起,向上覆硅酸盐熔体层延伸发展(图6a、图6b),达到一定高度后,界面会一边向内卷一边延伸,最终形成“猫眼”状“海浪”(图6c)。在此过程中,若体系具有较高的 Bo 数,则表明表面张力的影响较弱,那么两熔体间界面就很容易被破坏,导致硫化物熔体分解成一系列子液滴(图6d)(Fatehi et al., 2014)。若硫化物以矿浆形式发生上侵,则要求多级岩浆系统

内有着非常大的动能,但快速运移的岩浆流又可以轻易破坏其与硫化物矿浆间的稳定界面,导致矿浆破碎成一系列硫化物液滴。因此,以物理学理论为基础,笔者认为动态岩浆体系内硫化物矿浆的上侵很可能是难以成立的,而成矿物质更多是以硫化物液滴群的形式随着上侵岩浆运移。

4 硫化物矿石构造及成因的初步认识

前已述及,岩浆铜镍硫化物矿床发育有多种类型的矿石构造,可能蕴含有大量的成矿动力学信息。但前人研究更多聚焦于不同矿石类型的地球化学成分特征,而较少关注对应矿石的成因机制和形成过程。部分已有认识也多偏向于定性解释,笔者在此归纳梳理,尝试从物理角度对部分原生硫化物的矿石结构构造作出初步的成因解释,以期能引起大家的重视和讨论。

4.1 硫化物珠滴状构造

早期研究在大洋玄武岩中发现了大量椭圆状或近圆状的粗粒硫化物,呈显著的硫化物熔体冷却分异现象,被认为是硫化物自硅酸盐熔体中熔离的最好证明,通常称其为硫化物珠滴(Sulfide Globules)(Czarnansky et al., 1977; Distler et al., 1983; Francis, 1990; Roy-Barman et al., 1998)。后续在岩浆铜镍硫化物矿床中也发现了粗粒硫化物珠滴(图7a),如科马提岩型铜镍矿床(澳大利亚西部的 Kambalda、Marriott's、

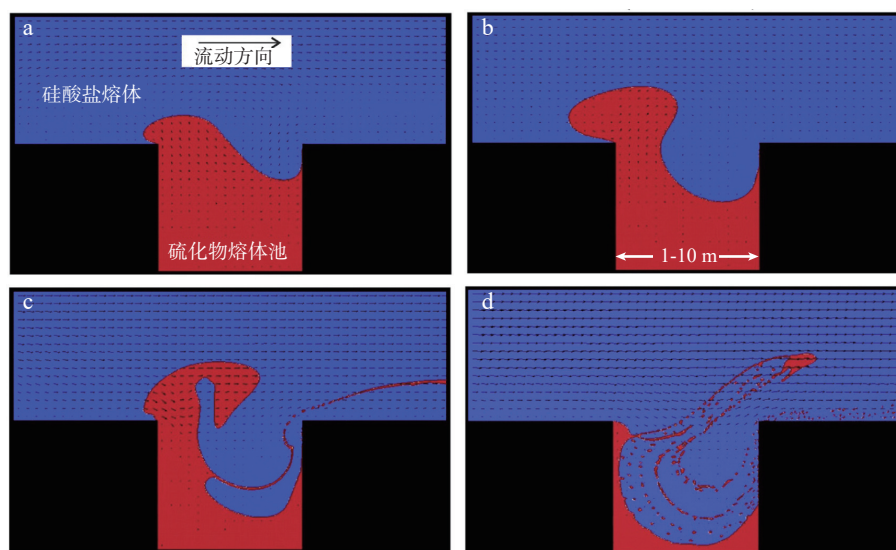


图6 动态岩浆流经硫化物熔体池所引起的界面失稳破碎过程(据 Barnes et al., 2019a, 2019b 修改)

Fig. 6 Numerical modeling result for the destabilization and breakup of interface between sulfide melt pool and dynamic magma flow

Black Swan 矿床等; Barnes et al., 2009, 2017), 俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 矿集区 (Barnes et al., 2017), 中国的漂河川 (Wei et al., 2015)、喀拉通克 (Mao et al., 2022)、图拉尔根 (刘平等, 2010) 等小型侵入岩型铜镍硫化物矿床。动态多级岩浆系统内粗粒硫化物液滴受瑞利-泰勒不稳定性、开尔文-亥姆霍兹不稳定性及流体中剪切应力的控制 (图 4), 稳定存在液滴的最大半径可能要小于 5~7 mm (Yao et al., 2019)。因此, 粒径超过 2 cm 的硫化物珠滴能否代表深部携带而来的原生硫化物液滴, 尚存疑问。粗粒硫化物液滴在镁铁质岩浆水平层流中的运动轨迹遵循平抛运动, 会快速沉降至岩浆流底部, 其水平运移距离十分有限 (Yao et al., 2022)。因此, 部分学者推测, 当动态岩浆流途径硫化物矿浆池时, 开尔文-亥姆霍兹不稳定性导致熔体间界面破碎产生了粗粒硫化物珠滴 (图 6), 或者围岩中粗粒硫化物在混染过程中释放进入岩浆形成硫化物珠滴, 这些珠滴随岩浆运移有限距离后便快速沉降到底部形成堆晶岩 (Barnes et al., 2017)。所以, 矿石中的硫化物珠滴状构造可能暗示其出露位置靠近硫化物矿浆池 (即块状矿石) 或者富硫化物围岩混染区域, 有

可能作为矿床深部勘查的定性标识。

已有研究还曾详细统计图拉尔根铜镍矿床中硫化物珠滴发育的位置、形状和产出状态, 认为珠滴形态可以反映含矿岩体的局部形态, 拉长方向指示了陡倾通道状矿化岩体的延伸方向。因此, 推测硫化物珠滴受岩浆流动的控制, 其形态能够很好地指示通道式成矿硫化物熔体运移方向 (刘平等, 2010)。笔者认为该推论可能适用于大洋玄武岩、岩墙的冷凝边、熔岩流型铜镍矿等情形, 因为岩浆的快速淬火使得其所含有的硫化物珠滴能够保持原有的形态学特征, 从而反推岩浆的流动状态和运移方向。但是, 对于小型侵入岩型铜镍硫化物矿床, 岩浆冷凝边是极难找到的, 岩/矿石均属于堆晶或补堆晶结构, 即矿物和硫化物发生沉淀并形成初始晶粥后, 还会经历一系列堆晶压实、重结晶等后堆晶作用, 那么硫化物珠滴很难免受相关影响而保持其形态、长轴方向等原始结构特征。因此, 应谨慎看待小型侵入体堆晶岩中孤立硫化物珠滴的形态及其对成矿物质运移方向的指示作用。

4.2 稀疏浸染状构造

当磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等细粒硫化物均

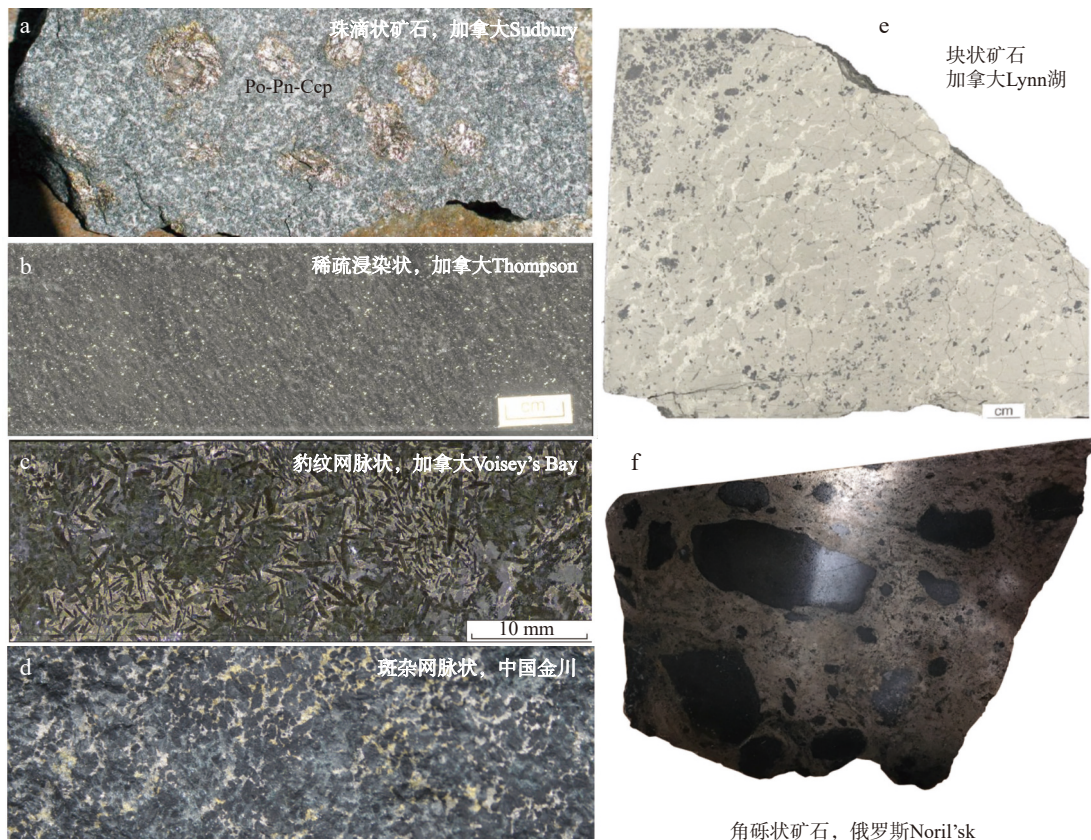


图7 岩浆铜镍硫化物矿床中的典型矿石构造 (部分据 Barnes et al., 2017 修改)

Fig. 7 Typical ore textures from magmatic Ni-Cu sulfide deposits

匀分布于堆晶岩中,且含量少于10%(通常处于0.5%~2.5%)时,称为稀疏浸染状构造(图7b)(Barnes et al., 2017)。成矿岩浆中硅酸盐矿物结晶和硫化物液滴熔离通常前后或近同时发生,两者共同沉降所形成的堆晶岩中硫化物液滴的体积比例很小(图3a)。因此,稀疏浸染状构造是岩浆铜镍硫化物矿床中最常见的矿石构造,如中国黄山西铜镍硫化物矿床即以浸染状矿化为主。近年来,开展的三维CT扫描结果表明,稀疏浸染状矿石中硫化物多以孤立、细粒、球形液滴的形式存在于晶粥内矿物三联点所形成的孔隙内,硫化物液滴间的连通性差,仅当硫化物含量超过3%~5%时,部分粗粒液滴沿矿物边界形成了连通的硫化物通道(Barnes et al., 2017)。

先前的实验岩石学证实,若硅酸盐熔体存在,硫化物熔体与硅酸盐矿物间的接触角超过 160° ,即当晶粥中存在硅酸盐粒间熔体时,硫化物熔体并不湿润硅酸盐矿物,而更倾向于以液滴形式存在于孔隙中,其与硅酸盐矿物之间隔着一层薄薄的硅酸盐熔体薄膜(Mungall et al., 2005)。即使硫化物熔体含量超过3%~5%,导致形成了部分连通的硫化物,该连通部分与相邻硅酸盐矿物间仍可能以硅酸盐熔体薄膜分隔。晶粥中所含有的硫化物液滴的粒径通常大于硅酸盐矿物间窄缝的宽度,同时又小于矿物框架所提供的孔隙空间。虽然硫化物液滴因其自身的高密度而具有向下运移的倾向,但当它逐渐挤入矿物间窄缝时会产生额外的毛细压强,从而阻碍硫化物的运移(图3d、图3e)。理论计算表明,孔隙内硫化物液滴难以仅通过自身重力而克服窄缝所产生的毛细压强(Chung et al., 2009),只能滞留于孔隙内并随着岩体冷却而最终形成由磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿等贱金属硫化物组成的稀疏浸染状矿石。该类矿石中的细粒硫化物液滴自岩浆熔离并沉降至堆晶层后,可能并未经历显著的运移或渗滤过程,故硫化物的平均成分特征(矿石的金属元素含量经过100%硫化物反算后的结果)通常被用于近似表征岩浆中熔离的初始硫化物。此外,部分浸染状矿石中发现黄铜矿与云母、氧化物等胶结共生的现象,表明晚期的堆晶压实和冷却固结过程中,硫化物熔体晶出单硫化物固溶体后残余的富铜熔体与粒间熔体共同发生了一定程度的运移过程(Barnes et al., 2017)。

4.3 稠密浸染状、网脉状构造

当矿石中硫化物的比例升高至30%以上时,称其

为稠密浸染状构造,若比例继续升高至50%~70%,则硫化物成为最主要矿物,并包裹了硅酸盐矿物,通常称为网脉状矿石(Net-textured Ore)。这些矿石构造常见于科马提岩型铜镍硫化物矿床,并且从底部到顶端形成了“块状-网脉状-稠密浸染状-稀疏浸染状”等矿石结构的规律性变化(Houle et al., 2011)。常见的网脉状矿石还可以细分为两种类型:豹纹网脉状(Leopard Net-textures)和斑杂网脉状(Patchy Net-textures)(Barnes et al., 2017)。前者主要表现为网脉状连通的硫化物矿石中存在粗粒的、半自形的硅酸盐矿物主晶(呈嵌晶状),而该主晶内几乎不含硫化物,使得矿石呈豹纹状,常见于加拿大Raglan、Voisey's Bay矿床(图7c)(Barnes et al., 2017)。后者则表现为矿石中硫化物的不均匀分布,存在贫硫化物的正堆晶岩区域(含有明显的粒间熔体晶出矿物)和纯网脉状硫化物区域(几乎不含有粒间熔体产物),导致矿石整体呈斑驳状(图7d)。这类矿石构造在铜镍硫化物矿床中相对普遍,中国金川矿床即以斑杂网脉状矿石为主导。

基于矿石的三维CT扫描结果,人们推测稠密浸染状及网脉状矿石形成于晶粥内具有一定厚度的连通硫化物熔体向下渗滤,驱替粒间硅酸盐熔体并使其向上运移的过程。由于晶粥内可能含有早先形成的粗粒硅酸盐矿物主晶,后续硫化物熔体的渗滤只能驱替现有孔隙内的硅酸盐熔体,而无法进入已固结的硅酸盐主晶之中,因此形成了豹纹状矿石(Barnes et al., 2017)。虽然晶粥中的硫化物液滴难以凭借自身重力向下穿过晶体间窄缝而实现渗滤,但当晶粥中硫化物的含量持续上升($>30\%$)时,原先孤立的硫化物液滴相互汇聚,形成具有一定高度(h)且连通的硫化物熔体柱(图5b)。由于硫化物与粒间熔体之间的密度差异($\Delta\rho$),硫化物熔体柱会在底部产生静液压强差($\Delta\rho gh$)(图5b),其值通常会大于通过晶体间孔隙窄口处所需的毛细压强,从而使得硫化物熔体能够克服晶体框架的阻碍而向下渗滤,并驱替粒间硅酸盐熔体(Chung et al., 2009)。但该研究仅考虑了毛细压强,并未涉及粒间熔体和硫化物间粘度差异可能带来的影响。流体力学经典理论明确指出,不混溶流体驱替多孔介质内粒间流体时,不仅需要克服介质中窄缝所产生的毛细压强,还需要弥补两个流体界面间存在的粘度压强差。晶粥内晚期演化的粒间熔体往往具有非常高的动态粘度,同时硫化物熔体仍表现出极低粘度。因此,接触界面两侧的粘度压强差可能会很高,甚至

超过毛细压强而主导了硫化物熔体的向下渗滤驱替过程。笔者认为,前述研究高估了硫化物的渗滤能力,矿浆可能无法轻易地驱替所有的粒间熔体,而只是选取最容易路径穿过晶粥,形成类似于粘性指进(Viscous Fingering)的现象,与金川矿床中的现象相一致(图 5c)(Mao et al., 2018),诠释了斑杂网脉状矿石结构的成因机制。

4.4 半块状、块状、角砾状、脉状构造

当硫化物含量处于 65%~90% 区间时,相应矿石称为半块状构造,若硫化物含量高于 90%,则矿石中硅酸盐矿物的比例很低,称其为块状矿石构造(图 7e)。如果半块状、块状矿石中含有大量的、形状不规则、边界分明的围岩或岩体的捕虏体角砾,则称其为角砾状矿石(图 7f)。半块状、块状矿石周缘的围岩中还常见硫化物细脉。这些矿石均以硫化物为主要矿物,其构造特征则清晰地指示硫化物矿浆流入或贯入先存的岩体或围岩角砾,以及周缘裂隙中(Barnes et al., 2018)。此外,块状矿石中还常见以黄铜矿为主的细脉,这是源于硫化物矿浆先结晶单硫化物固溶体后的残余富铜熔体仍可继续迁移和渗滤,形成脉状产出,甚至有学者认为其可以迁移十几千米(Blanks et al., 2022)。

岩浆体系内,硫化物矿浆的形成过程长期属于未解之谜。围岩混染等过程导致镁铁-超镁铁质岩浆中硫化物熔离早于硅酸盐矿物的结晶,析出的硫化物液滴有可能在短暂的时间窗口内快速沉降并在底部汇聚形成矿浆。深部岩浆房熔离的硫化物液滴随岩浆流上侵或水平侵位过程中,途经突然扩展区域,并可能进入相应的岩浆低速环流区,进而不断与流经的岩浆反应,萃取成矿金属,最终发生沉降汇聚(图 5d)(Yao et al., 2022)。此外,汇聚的硫化物矿浆携带很高热量,还可以持续向下熔蚀底部围岩,增加扩展区域,从而进一步增强岩浆低速环流区对硫化物的汇聚效应,形成正向反馈。岩浆演化过程中熔离的细粒硫化物液滴,若其粒径小于下覆晶粥层中矿物间窄缝宽度,则它们可以轻易穿过晶粥层并汇聚于底部(Chung et al., 2009)。晶粥层内连通的硫化物熔体不断向下渗滤驱替,也能够运移至晶粥底部,并与围岩接触。上述过程均可以在岩体底部形成具有一定规模的硫化物矿浆,其在自身重力作用下可能会压裂岩体及围岩并贯入其中,形成角砾岩,或者直接贯入已有的构造薄弱带(如断层、裂隙、破碎带等)形成半块状、块状矿

石,甚至还可以沿现存的岩浆通道回流至深部岩浆通道系统。

5 模型总结

岩浆铜镍硫化物矿床中关键金属超常富集所涉及的物理过程更多落脚于硫化物在多级岩浆系统内的垂向迁移和聚集成矿,笔者在此从物理视角初步总结了相关的成矿动力学机理。

在动态成矿系统中,硫化物矿浆与流动岩浆之间的表面张力值较低,导致两者间界面并不稳定,很容易受开尔文-亥姆霍兹不稳定性的影响而发生界面的失稳、变形直至破碎,从而形成一系列硫化物液滴。因此,即使深部岩浆房发生了硫化物的早期熔离和预富集,并形成了矿浆层,后续岩浆补给、构造抽取等过程触发岩浆快速上侵时,矿浆难以保持连续界面而破碎形成了硫化物子液滴群。

动态多级岩浆系统内,绝大多数的成矿物质是以硫化物液滴的形式发生迁移,而非“小岩体成大矿”模型所提倡的硫化物矿浆。硫化物液滴的大小受自身的瑞利-泰勒不稳定性、开尔文-亥姆霍兹不稳定性、周缘岩浆流的剪切应力等因素控制,导致粗粒液滴会持续破碎,直至形成毫米级甚至更细粒的硫化物液滴。较小的粒径进而又导致这些硫化物液滴在硅酸盐熔体中的相对沉降速率远小于上侵岩浆的流动速率,最终被裹挟着发生向上运移。大量高密度硫化物液滴的加入会显著升高岩浆的密度和粘度,减小岩浆的浮力效应,同时增大粘滞阻力的损耗。因此,上侵岩浆流对所能携带的硫化物液滴存在最大荷载极限。岩浆中所含有的挥发分会显著降低岩浆的密度和粘度,从而增强岩浆上侵的动能,以及其对硫化物液滴的最大荷载能力。岩浆上侵至浅部后会发生挥发分饱和而析出气泡,进一步降低岩浆的整体密度,而气泡还易与硫化物液滴组成低密度的混合液滴,使其发生大规模上浮,并在通道出口处发生解耦,释放大量的硫化物液滴,促使其汇聚成矿。因此,含矿岩浆能够携带一定量的硫化物液滴在多级岩浆系统内发生向上迁移,而挥发分则在其中发挥了重要的促进作用。

后续成矿岩浆的浅部就位过程中,来自原位围岩混染过程所释放的粗粒硫化物液滴会“无视”周围的岩浆流动而直接沉降于岩体底部。但是,岩浆自身熔离出的或从深部岩浆房携带而来的大量细粒硫化

物液滴会随动态岩浆流而发生持续运移,而仅在靠近底部低流速薄层时才可能发生沉降。因此,岩浆中结晶的硅酸盐矿物与细粒硫化物液滴间并不会发生显著的重力分异,两者会近同期沉降于岩浆底部而形成初始的晶体框架。硫化物液滴在该晶粥层内的比例很低,主要以孤立的液滴形式存在于晶体框架的孔隙内,且不湿润于硅酸盐矿物。由于硫化物液滴无法仅凭借自身重力而克服向下覆矿物间窄缝渗滤所遇到的毛细压强,液滴会停留于孔隙,直至最终冷却,形成稀疏浸染状矿石。局部区域内硫化物含量的升高,会导致硫化物液滴相互连通并形成具有一定高度的硫化物熔体柱,并在其底部产生一定的静液压强差,高于矿物窄缝所产生的毛细压强,促使硫化物熔体发生向下渗滤,并驱替粒间熔体。由于硫化物熔体与演化的粒间熔体之间存在极大的粘度差异,使得界面两侧的粘度压力降主导了硫化物的向下渗滤过程,使其更多以粘性指进的方式进行,导致仅局部区域内的粒间熔体被完全驱替,而剩余区域则保留原有的晶粥形态,形成了常见的斑杂网脉状矿石。伴随着硫化物的持续渗滤,最终可能在岩体底部形成一定规模的硫化物矿浆,其依靠自身重力和极低粘度,能够轻易地贯入底部的围岩或岩体角砾,以及周围的断层、裂隙及破碎带等构造薄弱带,甚至回流至深部的岩浆通道系统,形成了半块状、块状、角砾状及脉状矿石。

虽然“小岩体成大矿”和“岩浆通道式成矿”这两个成熟的成矿模型在硫化物垂向运移方向上的认识“看似对立”,但笔者认为两者可能“实则统一”于同一岩浆铜镍成矿系统的不同阶段:早期阶段(或周期性岩浆体系的活跃阶段),成矿母岩浆可能在深部岩浆房经历了围岩混染等过程,触发了硫化物的饱和熔离和预富集,相关硫化物以液滴群的形式被携带至浅部就位,以硫化物的向上运移为主;而晚期阶段(或周期性岩浆体系的停滞阶段),岩浆体系的动力减弱,硫化物与硅酸盐矿物沉降于岩浆底部,逐渐在晶粥层内发生汇聚并形成局部连通的硫化物熔体柱,进而触发向下渗滤过程,驱替晶粥内的粒间熔体,直至在底部形成硫化物矿浆,并最终贯入围岩角砾、断层、裂隙和破碎带,甚至回流至深部通道系统。当然,上述模式仅是笔者的推测,两种经典成矿模型的融合统一,还需要建立在对矿石结构学特征的定量描述和硫化物物理运移过程的进一步深入认识之上,进而能够阐明硫化物矿体的空间分布规律,有助于圈定找矿有

利部位,对已知矿床的深边部找矿勘查亦有重要指导意义。因此,笔者借助本次专辑的机会“抛砖引玉”,以期能引起大家讨论和思考,最终促进岩浆铜镍硫化物矿床的理论完善和勘查突破。

致谢:感谢新疆有色集团喀拉通克矿床张雷、张民强工程师,黄山矿床陈寿波、张学文、杜其中工程师,图拉尔根矿床王虎强、曹雪伟、王胜强工程师等地质技术人员在野外工作和坑道观察过程中的大力支持和积极交流,论文评审专家给予了很好的建议和具体修改意见,在此一致深表感谢。

参考文献(References):

- 柴凤梅,张招崇,毛景文,等. 岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床研究的几个问题探究[J]. 矿床地质, 2005, 24(3): 325-335.
- CHAI Fengmei, ZHANG Zhaochong, MAO Jingwen, et al. Discussion on Some Problems Concerning Magmatic Copper-Nickel-PGE Sulfide Deposits[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(3): 325-335.
- 侯增谦,陈骏,翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3651-3652.
- HOU Zengqian, CHEN Jun, ZHAI Mingguo. Current Status and Frontiers of Research on Critical Mineral Resources[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3651-3652.
- 蒋少涌,温汉捷,许成,等. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 112-118.
- JIANG Shaoyong, WEN Hanjie, XU Cheng, et al. Earth Sphere Cycling and Enrichment Mechanism of Critical Metals: Major Scientific Issues for Future Research[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 112-118.
- 李世金,孙丰月,高永旺,等. 小岩体成大矿理论指导与实践——青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 185-191.
- LI Shijin, SUN Fengyue, GAO Yongwang, et al. The Theoretical Guidance and the Practice of Small Intrusions Forming Large Deposits: The Enlightenment and Significance for Searching Breakthrough of Cu-Ni Sulfide Deposit in Xiarihamu, East Kun Lun, Qinghai[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 185-191.
- 李文渊,高永宝,张照伟,等. 镁铁-超镁铁质岩与花岗岩-伟晶岩“小岩体成大矿”对比——以昆仑成矿带夏日哈木和大红柳滩超大型矿床为例[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(5): 1036-1048.
- LI Wenyuan, GAO Yongbao, ZHANG Zhaowei, et al. Comparison of Mafic-ultramafic and Granite-pegmatite "Small Intrusion

- Forming Large Deposit": Taking Xiarihamu and Dahongliutan Super-large Deposits in Kunlun Metallogenic Belt, China as Examples[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(5): 1036–1048.
- 李文渊, 张照伟, 陈博. 小岩体成大矿的理论与找矿实践意义——以西北地区岩浆铜镍硫化物矿床为例[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(2): 29–34.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, CHEN Bo. The Theory on Small Intrusions Forming Large Deposits and its Exploration Significance[J]. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(2): 29–34.
- 刘平平, 秦克章, 苏尚国, 等. 新疆东天山图拉尔根大型铜镍矿床硫化物珠滴构造的特征及其对通道式成矿的指示[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 523–532.
- LIU Pingping, QIN Kezhang, SU Shangguo, et al. Characteristics of Multiphase Sulfide Droplets and Their Implications for Conduit-style Mineralization of Tulargen Cu-Ni Deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 523–532.
- 刘伟栋, 王硕, 魏翔, 等. 小岩体叠加作用在新一轮找矿突破战略行动中的应用: 以勉略宁矿集区为例[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 40–52.
- LIU Weidong, WANG Shuo, WEI Xiang, et al. Application of Super-imposed Mineralization of Small Intrusions in the New Round of Prospecting Breakthrough Action: A Case Study of Mian-Lue-Ning Ore Concentration Area[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 40–52.
- 吕林素, 刘珺, 张作衡, 等. 中国岩浆型 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床的时空分布及其动力学背景[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2561–2594.
- LV Linsu, LIU Jun, ZHANG Zuoheng, et al. Temporal-spatial Distribution and Geodynamic Settings of Magmatic Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposits in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2561–2594.
- 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 透岩浆流体成矿作用导论[M]. 北京: 地质出版社, 2009, 1–177.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋. 造山带岩浆铜镍硫化物矿床: 研究进展与展望[A]. 翟明国, 肖文交. 板块构造、地质事件与资源效应-地质科学若干新进展[M]. 北京: 科学出版社, 2016, 328–361.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 等. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 83–116.
- QIN Kezhang, TANG Dongmei, SU Benxun, et al. The Tectonic Setting, Style, Basic Feature, Relative Erosion Deep, Ore-bearing Evaluation Sign, Potential Analysis of Mineralization of Cu-Ni-bearing Permian Mafic-ultramafic Complexes, Northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 83–116.
- 宋谢炎. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 699–710.
- SONG Xieyan. Current Research Status and Important Issue of Magmatic Sulfide Deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 699–710.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列猛. 中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2018, 54(2): 221–235.
- SONG Xieyan, HU Ruizhong, CHEN Liemeng. Characteristics and Inspirations of the Ni-Cu Sulfide Deposits in China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2018, 54(2): 221–235.
- 苏尚国, 崔晓亮, 罗照华, 等. 流体晶、流体晶矿物组合、流体岩及其研究意义[J]. *地质前缘*, 2019, 25(6): 283–289.
- SU Shangguo, CUI Xiaoliang, LUO Zhaohua, et al. Fluid Minerals, Mineral Assemblages, Fluid Rocks: Significance in the Studies of Rocks and Ore Deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 25(6): 283–289.
- 苏尚国, 汤中立, 罗照华, 等. 岩浆通道成矿系统[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3120–3130.
- SU Shangguo, TANG Zhongli, LUO Zhaohua, et al. Magmatic Conduit Metallogenic System[J]. 2014, 30(11): 3120–3130.
- 汤中立. 金川硫化铜镍矿床成矿模式[J]. *现代地质*, 1990, 4: 55–64.
- TANG Zhongli. Minerogenetic Model of the Jinchuan Copper and Nickel Sulfide Deposit[J]. *Geoscience*, 1990, 4: 55–64.
- 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. *地质学报*, 1996, 70(3): 237–243.
- TANG Zhongli. The Main Mineralization Mechanism of Magma Sulfide Deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(3): 237–243.
- 汤中立, 焦建刚, 闫海卿, 等. 小岩体成(大)矿理论体系[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(2): 4–18.
- TANG Zhongli, JIAO Jiangang, YAN Haiqing, et al. Theoretical System for (Large) Deposit formed by Smaller Intrusion[J]. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(2): 4–18.
- 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995, 1–209.
- TANG Zhongli, LI Wenyuan. Metallogenic Model and Geological Comparison of Jinchuan Copper-Nickel-(Platinum-bearing) Sulfide Deposit[M]. Beijing: Geology Press, 1995, 1–209.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 1–9.
- TANG Zhongli, QIAN Zhuangzhi, JIANG Changyi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(1): 1–9.
- 汤中立, 徐刚, 王亚磊, 等. 岩浆成矿新探索——小岩体成矿与

- 地质找矿突破[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 1–16.
- TANG Zhongli, XU Gang, WANG Yalei, et al. The New Exploration of Magmatic Mineralization: Small Intrusion Mineralization and Geological Prospecting Breakthrough[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 1–16.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. *矿床地质*, 2006, 25(1): 1–9.
- TANG Zhongli, YAN Haiqing, JIAO Jiangang, et al. New Classification of Magmatic Sulfide Deposits in China and Ore-forming Processes of Small Intrusive Bodies[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(1): 1–9.
- 王俊. 岩浆通道成矿系统中铜镍硫化物矿浆上升机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013, 1–41.
- WANG Jun. Magmatic Conduit Metallogenic System of Jinchuan Cu-Ni (PGE) Sulfide Deposit: Evidence from Mineralogy[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013, 1–41.
- 王亚磊, 李文渊, 林艳海, 等. 金川超大型铜镍矿床钴的赋存状态与富集过程研究[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 133–150.
- WANG Yalei, LI Wenyuan, LIN Yanhai, et al. Study on the Occurrence State and Enrichment Process of Cobalt in Jinchuan Giant Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 133–150.
- 王焰, 钟宏, 曹勇华, 等. 我国铂族元素、钴和铬主要矿产类型的分布特征及成矿机制[J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3825–3838.
- WANG Yan, ZHONG Hong, CAO Yonghua, et al. Genetic Classification, Distribution and Ore Genesis of Major PGE, Co and Cr Deposits in China: A Critical Review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(33): 3825–3838.
- 徐兴旺, 王杰, 张宝林, 等. 岩浆运移动力学及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21: 361–371.
- XU Xingwang, WANG Jie, ZHANG Baolin, et al. Transport Dynamics of Magma and Its Advances[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21: 361–371.
- 姚卓森, 秦克章. 造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的地球物理勘探: 现状、问题与展望[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(6): 2800–2817.
- YAO Zhuosen, QIN Kezhang. Geophysical Exploration for Magmatic Cu-Ni Sulfide Deposits in the Orogenic Belt: Current Status, Problems and Vistas[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2800–2817.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉往, 等. 勘查区找矿预测理论与方法(各论)[M]. 北京: 地质出版社, 2017, 253–273.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. *中国科学基金*, 2019, 33(2), 106–111.
- ZHAI Mingguo, WU Fuyuan, HU Ruizhong, et al. Critical Metal Mineral Resources: Current Research Status and Scientific Issues[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2019, 33(2): 106–111.
- 张铭杰, 汤庆艳, 李文渊, 等. 岩浆镍铜铂族矿床成矿过程中流体的作用——对小岩体超大型矿床的启示[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(2): 40–49.
- ZHANG Mingjie, TANG Qingyan, LI Wenyuan, et al. The Roles of Volatiles in Mineralizations of Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits: Implications for Potential Metallogenic Mechanism of Super-large Scale Magmatic Deposits in Small Magma[J]. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(2): 40–49.
- 张照伟, 谭文娟, 杜辉, 等. 金川岩浆镍钴硫化物矿床深部找矿勘查技术研究[J]. *西北地质*, 2023a, 56(6): 242–253.
- ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, DU Hui, et al. Study on Exploration Techniques of Deep Ore Prospecting in Jinchuan Magmatic Co-Ni Sulfide Deposit, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2023a, 56(6): 242–253.
- 张照伟, 张江伟, 王亚磊, 等. 准噶尔北缘成矿带蕴都卡拉钴矿成矿特征[J]. *西北地质*, 2023b, 56(1): 1–10.
- ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, WANG Yalei, et al. Metallogenic Characteristics of Yundukala Co Deposit in Northern Margin of Junggar Metallogenic Belt, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2023b, 56(1): 1–10.
- 赵达成, 王美乐, 李章志贤, 等. 夏日哈木岩浆硫化物矿床中钴和镍关键金属的赋存状态及分布规律[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 17–40.
- ZHAO Dacheng, WANG Meile, LI Zhangzhixian, et al. The Occurrence and Distribution of Cobalt and Nickel Key Metals in the Xiarihamu Magmatic Sulfide Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 17–40.
- Arndt N T, Czamanske G K, Walker R J, et al. Geochemistry and Origin of the Intrusive Hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE Sulfide Deposits[J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 495–515.
- Bachmann O, Huber C. Silicic Magma Reservoirs in the Earth's Crust[J]. *American Mineralogist*, 2016, 101: 2377–2404.
- Ballhaus C, Tredoux M, Späth A. Phase Relations in the Fe-Ni-Cu-PGE-S at Magmatic Temperature and Application to Massive Sulfide Ores of the Sudbury Igneous Complex[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 1911–1926.
- Barnes S J, Cruden A R, Arndt N, et al. The Mineral System Approach Applied to Magmatic Ni-Cu-PGE Sulphide Deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 76: 296–316.
- Barnes S J, Le Vaillant M, Godel B, et al. Droplets and Bubbles: Solidification of Sulfide-rich Vapour-saturated Orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-PGE Ore-bearing Intrusions[J]. *Journal of Petrology*, 2019a, 60: 269–300.
- Barnes S J, Mungall J E, Le Vaillant M, et al. Sulfide-silicate Textures in Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfide Ore Deposits: Disseminated and Net-textured Ores[J]. *American Mineralogist*, 2017,

- 102: 473–506.
- Barnes S J, Robertson J C. Time Scales and Length Scales in Magma Flow Pathways and the Origin of Magmatic Ni-Cu-PGE Ore Deposits[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019b, 10(1): 77–87.
- Barnes S J, Staude S, Le Vaillant M, et al. Sulfide-silicate Textures in Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfide Ore Deposits: Massive, Semi-massive and Sulfide-matrix Breccia Ores[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 101: 629–651.
- Barnes S J, Wells M A, Verrall M R. Effects of Magmatic Processes, Serpentinization and Talc Carbonate Alteration on Sulfide Mineralogy and Ore Textures in the Black Swan Disseminated Nickel Sulfide Deposit, Yilgarn Craton[J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 539–562.
- Bentley B J, Leal L G. An Experimental Investigation of Drop Deformation and Break-up in Steady, Two-Dimensional Linear Flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 167: 241–283.
- Blanks D E, Holwell D A, Barnes S J, et al. Mobilization and Fractionation of Magmatic Sulfide: Emplacement and Deformation of the Munali Ni-(Cu-Platinum Group Element) Deposit, Zambia[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(8): 1709–1729.
- Blanks D E, Holwell D A, Fiorentini M L, et al. Fluxing of Mantle Carbon as a Physical Agent for Metallogenic Fertilization of the Crust[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4342.
- Brenan J M, Bennett N R, Zajacz Z. Experimental Results on Fractionation of the Highly Siderophile Elements (HSE) at Variable Pressures and Temperatures during Planetary and Magmatic Differentiation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2016, 81: 1–87.
- Campbell I H. Fluid Dynamic Processes in Basaltic Magma Chambers[J]. *Developments in Petrology*, 1996, 15: 45–76.
- Campbell I H, Naldrett A J. The Influence of Silicate: Sulphide Ratios on the Geochemistry of Magmatic Sulphides[J]. *Economic Geology*, 1979, 74: 1503–1506.
- Cashman K. Crystal Size Distribution (CSD) Analysis of Volcanic Samples: Advances and Challenges[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 291.
- Cashman K, Marsh B D. Crystal Size Distribution (CSD) in Rocks and the Kinetics and Dynamics of Crystallization. II. Makaopuhi Lava Lake[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99(3): 292–305.
- Cashman K, Sparks R S J, Blundy J D. Vertically Extensive and Unstable Magmatic Systems: A Unified View of Igneous Processes[J]. *Science*, 2017, 355: eaag3055.
- Chavrit D, Humler E, Morizet Y, et al. Influence of Magma Ascent Rate on Carbon Dioxide Degassing at Oceanic Ridges: Mesage in a Bubble[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 357–358: 376–385.
- Chen Y, Provost A, Schiano P, et al. Magma Ascent Rate and Initial Water Concentration Inferred from Diffusive Water Loss from Olivine-hosted Melt Inclusions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 165: 525–541.
- Cherdantseva M, Anenburg M, Fiorenini M, et al. Carbonated Magmatic Sulfide Systems: Still or Sparkling[J]. *Science Advances*, 2024, 10: ead13127.
- Chung H Y, Mungall J E. Physical Constraints on the Migration of Immiscible Fluids Through Partially Molten Silicates, with Special Reference to Magmatic Sulfide Ores[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286: 14–22.
- Czamanske G, Moore J G. Composition and Phase Chemistry of Sulfide Globules in Basalt from the Mid-Atlantic Ridge Rift Valley near 37°N Lat[J]. *GSA Bulletin*, 1977, 88(4): 587–599.
- Czamanske G, Zen'ko T E, Fedorenko V A, et al. Petrographic and Geochemical Characterization of Ore-bearing Intrusions of the Noril'sk Type, Siberia: With Discussion and Their Origin[J]. *Resource Geology Special Issue*, 1995, 18: 1–48.
- De Bremond d'Ars J, Arndt N T, Hallot E. Analog Experimental Insights into the Formation of Magmatic Sulfide Deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 186: 371–381.
- De Waal S A, Xu Z, Li C S, et al. Emplacement of Viscous Mushes in the Jinchuan Ultramafic Intrusion, Western China[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2004, 42: 371–392.
- Di Giuseppe E, Funicello F, Corbi F, et al. Gelatins as Rock Analogs: A Systematic Study of Their Rheological and Physical Properties[J]. *Tectonophysics*, 2013, 473: 391–403.
- Ding X, Ripley E M, Shirey S B, et al. Os, Nd, O and S Isotope Constraints on Country Rock Contamination in the Conduit-related Eagle Cu-Ni-(PGE) Deposit, Midcontinent Rift System, Upper Michigan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 89: 10–30.
- Distler V V, Pertsev N N, Boronikin V A. Sulfide Petrology of Basalts from Deep Sea Drilling Project Holes 504B and 505B[J]. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 1983, 69: 607–617.
- Dobson D P, Crichton W A, Vocablo L, et al. In Situ Measurement of Viscosity of Liquids in the Fe-FeS System at High Pressures and Temperatures[J]. *American Mineralogist*, 2000, 85: 1838–1842.
- Edmonds M, Cashman K V, Holness M, et al. Architecture and Dynamics of Magma Reservoirs[J]. *Philosophical Transactions A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, 377: 20180298.
- Evans-Lamswood D M, Butt D P, Jackson R S, et al. Physical Controls Associated with the Distribution of Sulfides in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co Deposit, Labrador[J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 749–769.
- Fatehi R, Shadloo M S, Manzari M E. Numerical Investigation of

- Two-Phase Secondary Kelvin-Helmholtz Instability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(11): 913–924.
- Francis R D. Sulfide Globules in Mid-Ocean Ridge Basalts (MORB), and the Effect of Oxygen Abundance in Fe-S-O Liquids on the Ability of Those Liquids to Partition Metals from MORB and Komatiite Magmas[J]. Chemical Geology, 1990, 85(3–4): 199–213.
- Galetto F, Bonaccorso A, Acocella V. Relating Dike Geometry and Injection Rate in Analogue Flux-driven Experiments[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 665865.
- Garside J, Al-Dibouni M R. Velocity-voidage Relationships for Fluidization and Sedimentation in Solid-liquid Systems[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1977, 16: 206–214.
- Giordano D, Russell J K, Dingwell D B. Viscosity of Magmatic Liquids: A Model[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 271: 123–134.
- Godel B M. High-resolution X-Ray Computed Tomography and Its Application to Ore Deposits: From Data Acquisition to Quantitative Three-dimensional Measurements with Case Studies from Ni-Cu-PGE Deposits[J]. *Economic Geology*, 2013a, 108: 2005–2019.
- Godel B M, Barnes S J, Barnes J. Deposition Mechanisms of Magmatic Sulphide Liquids: Evidence from High-resolution X-Ray Computed Tomography and Trace Element Chemistry of Komatiite-hosted Disseminated Sulphides[J]. *Journal of Petrology*, 2013b, 54: 1455–1481.
- Gonnermann H, Manga M. Dynamics of Magma Ascent in the Volcanic Conduit[A]. Fagents S A, Gregg T K P, Lopes R M C. Modeling Volcanic Processes: the Physics and Mathematics of Volcanism[M]. Cambridge University Press, 2012, 55–84.
- Gonnermann H, Taisne B. Magma Transport in Dykes[A]. Sigurdsson H, Houghton B, McNutt S R, et al. The Encyclopedia of Volcanoes, 2nd edn[M]. London, Academic Press, 2015, 215–224.
- Gudmundsson A. Magma Chambers: Formation, Local Stresses, Excess Pressures, and Compartments[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2012, 237–238: 19–41.
- Heinrich C A, Connolly J A D. Physical Transport of Magmatic Sulfides Promotes Copper Enrichment in Hydrothermal Ore Fluids[J]. *Geology*, 2022, 50(10): 1101–1105.
- Holzheid A. Separation of Sulfide Melt Droplets in Sulfur Saturated Silicate Liquids[J]. *Chemical Geology*, 2010, 274: 127–135.
- Holwell D A, Fiorentini M L, Knott T R, et al. Mobilisation of Deep Crustal Sulfide Melts as a First Order Control on Upper Lithospheric Metallogeny[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 573.
- Houle M G, Leshner C M. Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) Deposits, Abitibi Greenstone Belt, Superior Province, Canada[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2011, 17: 89–121.
- Huber C, Su Y, Nguyen C T, et al. A New Bubble Dynamics Model to Study Bubble Growth, Deformation, and Coalescence[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119: 216–239.
- Hui H J, Zhang Y X. Toward a General Viscosity Equation for Natural Anhydrous and Hydrous Silicate Melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71: 403–416.
- Huppert H E, Sparks R S T. Double-diffusive Convection Due to Crystallization in Magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1984, 12: 11–37.
- Huppert H E, Turner J S, Sparks R S J. Replenished Magma Chambers: Effects of Compositional Zonation and Input Rates[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 57: 345–357.
- Iacono-Marziano G, Ferraina C, Gaillard F, et al. Assimilation of Sulfate and Carbonaceous Rocks: Experimental Study, Thermodynamic Modeling and Application to the Noril'sk-Talnakh Region (Russia)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 399–413.
- Iacono-Marziano G, Le Vaillant M, Godel B M, et al. The Critical Role of Magma Degassing in Sulphide Melt Mobility and Metal Enrichment[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2359.
- Jackson M D, Blundy J, Sparks R S J. Chemical Differentiation, Cold Storage and Remobilization of Magma in the Earth's Crust[J]. *Nature*, 2018, 564: 405–409.
- Iacono-Marziano G, Morizet Y, Le Trong E, et al. New Experimental Data and Semi-empirical Parameterization of H₂O-CO₂ Solubility in Mafic Melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 97: 1–23.
- Jaupart C, Brandeis G, Allègre C J. Stagnant Layers at the Bottom of Convecting Magma Chambers[J]. *Nature*, 1984, 308: 535–538.
- Kavanagh J L, Engwell S L, Martin S A. A Review of Laboratory and Numerical Modelling in Volcanology [J]. *Solid Earth*, 2018, 9: 531–571.
- Kavanagh J L, Menand T, Sparks R. An Experimental Investigation of Sill Formation and Propagation in Layered Elastic Media[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 245: 799–813.
- Kavanagh J L, Rogers B D, Boutelier D, et al. Controls on Sill and Dyke-sill Hybrid Geometry and Propagation in the Crust: The Role of Fracture Toughness[J]. *Tectonophysics*, 2017, 698: 109–120.
- Khakhar D V, Ottino J M. Deformation and Break-up of Slender Drops in Linear Flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 166: 265–285.
- Kiseeva K S, Wood B J. A Simple Model for Chalcophile Element

- Partitioning Between Sulphide and Silicate Liquids with Geochemical Applications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 383: 68–81.
- Kiseeva K S, Wood B J. The Effects of Composition and Temperature on Chalcophile and Lithophile Element Partitioning into Magmatic Sulphides[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 424: 280–294.
- Kress V, Greene L E, Ortiz M D, et al. Thermochemistry of Sulfide Liquids IV: Density Measurements and the Thermodynamics of O-S-Fe-Ni-Cu Liquids at Low to Moderate Pressures[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 156: 785–797.
- Krivolutskaya N A, Gongalsky B I, Kedrovskaya T B, et al. Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia: Evidence of a Closed Magmatic System[J]. *Mineralium Deposita*, 2019, 54: 611–630.
- Kyle J R, Ketcham R A. Application of High Resolution X-ray Computed Tomography to Mineral Deposit Origin, Evaluation, and Processing[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 821–839.
- Leshner C M, Campbell I H. Geochemical and Fluid Dynamic Modeling of Compositional Variations in Archean Komatiite-hosted Nickel Sulfide Ores in Western Australia[J]. *Economic Geology*, 1993, 88: 804–816.
- Leshner C E, Spera F J. Thermodynamic and Transport Properties of Silicate Melts and Magma[A]. Sigurdsson H, Houghton B, McNutt S R, et al. *The encyclopedia of volcanoes*, 2nd edn[M]. London, Academic Press, 2015, 113–142.
- Le Vaillant M, Barnes S J, Mungall J M. Role of De-gassing of the Noril'sk Nickel Deposits in the Permo-Triassic Mass Extinction Event[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114: 2485–2490.
- Li C S, Lightfoot P C, Naldrett A J. Contrasting Petrological and Geochemical Relationships in the Voisey's Bay and Mushuan Intrusions, Labrador, Canada: Implications for Ore Genesis[J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 771–799.
- Li C S, Naldrett A J. Geology and Petrology of the Voisey's Bay Intrusion: Reaction of Olivine with Sulfide and Silicate Liquids[J]. *Lithos*, 1999, 47: 1–31.
- Li C S, Naldrett A J, Ripley E M. Critical Factors for the Formation of a Nickel-copper Deposit in an Evolved Magma System: Lessons from a Comparison of the Pants Lake and Voisey's Bay Sulfide Occurrences in Labrador, Canada[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36: 85–92.
- Li C S, Ripley E M, Naldrett A J. A new Genetic Model for the Giant Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits Associated with the Siberian Flood Basalts[J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 291–301.
- Lightfoot P C, Keays R. R. Siderophile and Chalcophile Metal Variations in Flood Basalts from the Siberian Trap, Noril'sk Region: Implications for the Origin of the Ni-Cu-PGE Sulfide Ores. *Economic Geology*, 2005, 100: 439–462.
- Lightfoot P C, Naldrett A J, Gorbachev N S, et al. Chemostratigraphy of Siberian Trap Lavas, Noril'sk District: Implications for the Source of Flood Basalt Magmas and Their Associated Ni-Cu Mineralization[J]. *Ontario Geological Survey Special Publication*, 1994, 5: 283–312.
- Maier W D, Barnes S J, De Waal S A. Exploration for Magmatic Ni-Cu-PGE Sulphide Deposits: A Review of Recent Advances in the Use of Geochemical Tools, and Their Application to Some South African Ores[J]. *South African Geology*, 1998, 101: 237–253.
- Marsh B D. Crystal Size Distribution (CSD) in Rocks and the Kinetics and Dynamics of Crystallization. I. Theory[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99(3): 277–291.
- Marsh B D. On the Interpretation of Crystal Size Distributions in Magmatic Systems[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(4): 553–599.
- Maier W D, Li C S, De Waal S A. Why Are There No Major Ni-Cu Sulfide Deposits in Large Layered Mafic-ultramafic Intrusions[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2001, 39: 547–556.
- Mao Y J, Barnes S J, Duan J. Morphology and Particle Size Distribution of Olivines and Sulphides in the Jinchuan Ni-Cu Sulphide Deposits: Evidence for Sulphide Percolation in a Crystal Mush[J]. *Journal of Petrology*, 2018, 59: 1701–1730.
- Mao Y J, Barnes S J, Godel B, et al. Sulfide Ore Formation of the Kalatongke Ni-Cu Deposit as Illustrated by Sulfide Textures[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(8): 1761–1778.
- Martin D, Nokes R. Crystal Settling in a Vigorously Convecting Magma Chamber[J]. *Nature*, 1988, 332: 534–536.
- Martin D, Nokes R. A Fluid-dynamical Study of Crystal Settling in Convecting Magmas[J]. *Journal of Petrology*, 1989, 30: 1471–1500.
- Mavrogenes J, O'Neil H S C. The Relative Effects of Pressure, Temperature and Oxygen Fugacity on the Solubility of Sulfide in Mafic Magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 1173–1180.
- Mungall J E, Brenan J M. Partitioning of Platinum-group Elements and Au Between Sulfide Liquid and Basalt and the Origins of Mantle-crust Fractionation of the Chalcophile Elements[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 125: 265–289.
- Mungall J E, Brenan J M, Godel B, et al. Transport of Metals and Sulphur in Magmas by Flotation of Sulphide Melt on Vapour Bubbles[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 216–219.
- Mungall J E, Su S G. Interfacial Tension between Magmatic Sulfide and Silicate Liquids: Constraints on Kinetics of Sulfide Liquidation and Sulfide Migration Through Silicate Rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234: 135–149.

- Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration[M]. Berlin: Springer, 2004.
- Naldrett, A. J. From the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit[J]. *South African Journal of Geology*, 2010, 113: 1–32.
- Naldrett A J. Key Factors in the Genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and Other World-class Ni-Cu-PGE Deposits: Implications for Exploration[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1997, 44: 283–315.
- Naldrett A J, Asif M, Krstic S. The Composition of Mineralization at the Voisey's Bay Ni-Cu Sulfide Deposit, with Special Reference to Platinum-group Elements[J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 845–865.
- Naldrett A J, Fedorenko V A, Lightfoot P C, et al. Ni-Cu-PGE Deposits of Noril'sk Region, Siberia: Their Formation in Conduits for Flood Basalt Volcanism[J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 1995, 104: 18–36.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V A, et al. Geology and Geochemistry of Intrusions and Flood Basalts of the Noril'sk Region, USSR, with Implications for the Origin of the Ni-Cu Ores. *Economic Geology*, 1992, 87: 975–1004.
- Niu Y L, Batiza R. In Situ Densities of MORB Melts and Residual Mantle: Implications for Buoyancy Forces Beneath Mid-Ocean Ridges[J]. *The Journal of Geology*, 1991, 99(5): 767–775.
- Park J W, Campbell I H, Chiaradia M, et al. Crustal Magmatic Controls on the Formation of Porphyry Copper Deposits[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2021, 2: 542–557.
- Parmigiani A, Faroughi S, Huber C, et al. Bubble Accumulation and Its Role in the Evolution of Magma Reservoirs in the Upper Crust. *Nature*, 2016, 532: 492–495.
- Patočka V, Tosi N, Calzavarini E. Residence Time of Inertial Particles in 3D Thermal Convection: Implications for Magma Reservoirs[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 591: 117622.
- Patten C G C, Hector S, Kilias S, et al. Transfer of Sulfur and Chalcophile Metals via Sulfide-volatile Compound Drops in the Christiana-Santorini-Kolumbo Volcanic Field[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 4968.
- Poppe S, Gilchrist J, Breard E C P, et al. Analog Experiments in Volcanology: Towards Multimethod, Upscaled and Integrated Models[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2022, 84: 52.
- Rad'ko V A. Model of the Dynamic Differentiation of Intrusive Traps in the Northwestern Siberian Platform[J]. *Geologiya I Geofizika*, 1991, 11: 19–27.
- Randolph A, Beckman J, Kraljevic Z. Crystal Size Distribution Dynamics in a Classified Crystallizer: Part I. Experimental and Theoretical Study of Cycling in a Potassium Chloride Crystallizer[J]. *AIChE Journal*, 1977, 23(4): 500–510.
- Richardson J F, Zaki W N. Sedimentation and Fluidisation, Part I [J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1954, 32: 35–53.
- Ripley E M, Li C S. Sulfide Saturation in Mafic Magmas: Is External Sulfur Required for Magmatic Ni-Cu-(PGE) Ore Genesis[J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 45–58.
- Robertson J C, Barnes S J, Le Vaillant M. Dynamics of Magmatic Sulphide Droplets during Transport in Silicate Melts and Implications for Magmatic Sulphide Ore Formation[J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56: 2445–2472.
- Rosenfeld L, Lavrenteva O M, Spivak R, et al. Deformation of a Partially Engulfed Compound Drop Slowly Moving in an Immiscible Viscous Fluid[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23: 023101.
- Roy-Barman M, Wasserburg G J, Papanastassiou D A, Chaussidon M. Osmium Isotopic Compositions and Re-Os Concentrations in Sulfide Globules from Basaltic Glasses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 154(1–2): 331–347.
- Rutherford M J. Magma Ascent Rates[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2008, 69: 241–271.
- Saumur B M, Cruden A R. Ingress of Magmatic Ni-Cu Sulphide Liquid into Surrounding Brittle Rocks: Physical & Structural Controls[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 439–445.
- Saumur B M, Cruden A R, Boutelier D. Sulfide Liquid Entrainment by Silicate Magma: Implications for the Dynamics and Petrogenesis of Magmatic Sulfide Deposits[J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56: 2473–2490.
- Shadloo M S, Yildiz M. Kelvin-Helmholtz Instability by SPH[A]. In: Oñate E, Owen D R J (Eds). *International Conference on Particle-based Methods-Fundamentals and Applications*[C]. 2011, 831–842.
- Sili G, Urbani S, Acocella V. What Controls Sill Formation: An Overview from Analogue Models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124: 8205–8222.
- Song X Y, Danilushkevsky L V, Keays R R, et al. Structural, Lithological and Geochemical Constraints on the Dynamic Magma Plumbing System and the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 277–297.
- Stacey F D, Anderson O L. Electrical and Thermal Conductivities of Fe-Ni-Si Alloy under Core Conditions[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 124: 153–162.
- Stokes G G. On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums[J]. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1981, 9: 8–106.
- Suckale J, Hager B H, Elkins-Tanton L, et al. It Takes Three to Tango: 2. Bubble Dynamics in Basaltic Volcanoes and Ramifications for Modelling Normal Strombolian Activity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: B07410.
- Tang Q Y, Zhang M J, Wang Y K, et al. The Origin of the Zhubu

- Mafic-ultramafic Intrusion of the Emeishan Large Igneous Province, SW China: Insights from Volatile Compositions and C-Hf-Sr-Nd Isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2017, 469: 47–59.
- Terasaki H, Kato T, Urakawa S, et al. The Effect of Temperature, Pressure, and Sulfur Content on Viscosity of the Fe-FeS Melt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 190: 93–101.
- Urbani S, Acocella V, Rivalta E. What Drives the Lateral Versus Vertical Propagation of Dikes? Insights from Analogue Models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123: 3680–3697.
- Virtanen V J, Heinonen J S, Molnar F, et al. Fluids as Primary Carriers of Sulphur and Copper in Magmatic Assimilation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6609.
- Vukmanovic Z, Fiorentini M L, Reddy S M, et al. Microstructural Constraints on Magma Emplacement and Sulfide Transport Mechanisms[J]. *Lithosphere*, 2019, 11: 73–90.
- Wang W Y, Li Y. Redox Control of the Partitioning of Platinum and Palladium into Magmatic Sulfide Liquids[J]. *Communications Earth and Environment*, 2024, 5: 190.
- Wei B, Wang C Y, Arndt N T, et al. Textural Relationship of Sulfide Ores, PGE, and Sr-Nd-Os Isotope Compositions of the Triassic Paohechuan Ni-Cu Sulfide Deposit in NE China[J]. *Economic Geology*, 2015, 110: 2041–2062.
- Williams K M, Kavanagh J L, Dennis D J C. Focused Flow during the Formation and Propagation of Sills: Insights from Analogue Experiments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 584: 117492.
- Xu X W, Peters S G, Liang G H, et al. Elastic Stress Transmission and Transformation (ESTT) by Confined Liquid: A New Mechanics for Fracture in Elastic Lithosphere of the Earth[J]. *Tectonophysics*, 2016, 672–673: 129–138.
- Xue S C, Deng J, Wang Q F, et al. The Redox Conditions and C Isotopes of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in Convergent Tectonic Settings: The Role of Reduction Process in Ore Genesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 306: 210–225.
- Yao Z S, Mungall J E. Flotation Mechanism of Sulphide Melt on Vapour Bubbles in Partially Molten Magmatic Systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 542: 116298.
- Yao Z S, Mungall J E. Transport and Deposition of Immiscible Sulfide Liquid during Lateral Magma Flow[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 227: 103964.
- Yao Z S, Mungall J E. Kinetic Controls on the Sulfide Mineralization of Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) Deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021a, 305: 185–211.
- Yao Z S, Mungall J E. Linking the Siberian Flood Basalts and Giant Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits at Norilsk[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021b, 126: e2020JB020823.
- Yao Z S, Mungall J E, Qin K Z. A Preliminary Model for the Migration of Sulfide Droplets in a Magmatic Conduit and the Significance of Volatiles[J]. *Journal of Petrology*, 2019, 60: 2281–2316.
- Yao Z S, Qin K Z, Mungall J. E. Tectonic Controls on Ni and Cu Contents of Primary Mantle-derived Magma for the Formation of Magmatic Sulfide Deposits[J]. *American Mineralogist*, 2018, 103: 1545–1567.
- Zhang M D, Li Y. Breaking of Henry's Law for Sulfide Liquid-basaltic Melt Partitioning of Pt and Pd[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5994.
- Zhang M J, Tang Q Y, Cao C H, et al. The Origin of Permian Pobei Ultramafic Complex in the Northeastern Tarim Craton, Western China: Evidences from Chemical and C-He-Ne-Ar Isotopic Compositions of Volatiles[J]. *Chemical Geology*, 2017, 469: 85–96.
- Zhang M J, Tang Q Y, Hu P Q, et al. Noble Gas Isotopic Constraints on the Origin and Evolution of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Sulfide Ore-bearing Ultramafic Intrusion, Western China [J]. *Chemical Geology*, 2013, 339: 301–312.
- Zhang Y X. Toward a Quantitative Model for the Formation of Gravitational Magmatic Sulfide Deposits[J]. *Chemical Geology*, 2015, 391: 56–73.