

中国石墨资源及晶质石墨典型矿集区矿物学特征

郭理想^{1,2,3}, 刘磊^{1,2,3*}, 王守敬^{1,2,3}, 张然^{1,2,3}, 魏付帅^{1,2,3}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006;
3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054

中图分类号: TD91; P619.25+2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)06-0009-11
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.06.002

摘要 随着高新技术产业尤其是新能源产业的迅猛发展, 带动了石墨资源尤其是晶质石墨资源的巨大需求。总结了我国石墨矿床的分类、成矿机制以及成矿规律, 概述了我国石墨资源概况, 对比分析了我国晶质石墨主要产地黑龙江萝北、内蒙古阿拉善、山东平度、甘肃阿克塞、新疆奇台等等典型矿床的矿物学特征, 以期为今后石墨资源尤其是晶质石墨资源的勘查开发和综合利用提供指导, 进而保障我国战略性关键矿产的安全供给, 巩固我国作为石墨资源大国的战略地位。

关键词 石墨; 成矿规律; 矿物学特征; 黑龙江萝北; 内蒙古阿拉善; 山东平度; 甘肃阿克塞; 新疆奇台

引言

石墨是一种主要由碳元素组成的具有层状结构的非金属矿物, 因其具有耐高温、耐腐蚀、强度高、润滑性好、防辐射以及不逊于金属材料的导电性能等诸多优良的物理化学性质, 使其兼具非金属、金属和有机材料等的性能, 被广泛应用于钢铁、冶金、机械、化工、电气、高新技术产业以及核能等多个支撑国民经济发展的重点领域^[1]。近年来随着全球新能源行业尤其是电动汽车行业的迅猛发展, 锂离子电池等储能产品的需求量剧增, 而石墨作为各种储能产品中负极材料的核心原材料, 其需求量也随之呈现急增趋势, 加之石墨属于不可再生型资源, 全球各主要经济体对石墨原材料都高度重视。

2011—2021年, 欧盟委员会共发布了四版关键原材料清单(List of Critical Raw Materials), 四个版本均将石墨列为关键原材料。2016年, 我国原国土资源部发布《全国矿产资源规划(2016—2020年)》, 首次将晶质石墨等24种矿产列入战略性矿产目录, 作为国家矿产资源宏观调控和管理的重点对象。2018年, 美国内政部根据美国地质调查局提供的清单, 发布了对美国国家安全和经济发展需要至关重要的35种关键矿物清单(List of Critical Minerals), 该清单是美国实施国家战略的重点矿产, 其中也包含天然石墨(graphite(natu-

ral))。从上述世界各主要经济体的举措可以看出天然石墨几乎已被视为全球经济发展的一种重要战略资源。

本文旨在介绍目前我国主要石墨产地的资源禀赋特征并进行对比分析, 以期提高对石墨资源的研究程度和勘查开发力度, 提升石墨资源的开发利用水平, 为我国石墨资源的勘查开发和产业规划提供有益参考。

1 石墨矿床基本特征

1.1 矿床分类

目前, 石墨矿床类型的划分方案较多, 各种方案的划分依据各有侧重, 不尽相同。

石墨具有典型的层状结构, 自然界中常呈鳞片状产出, 根据石墨结晶片径的大小可将其分为晶质石墨和隐晶质石墨, 由此可将石墨矿床分为晶质石墨矿和隐晶质石墨矿。其中晶质石墨的晶体片径大于1 μm, 常呈鳞片状产出, 故又称为鳞片状石墨。隐晶质石墨的晶体片径小于1 μm, 常呈微晶状集合体的形式产出, 故又称微晶、土状或无定形石墨^[2]。晶质石墨在可浮性、膨胀倍率以及润滑性能等方面均优于隐晶质石墨, 因而具有更高的经济价值。

矿床是在地壳中由各类地质作用形成在一定的经济技术条件下具有开采利用价值的综合地质体。因此

收稿日期: 2021-11-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190186)

作者简介: 郭理想(1989-), 男, 河南新安人, 博士, 助理研究员, 主要从事固体矿产资源工艺矿物学研究, E-mail: guolixiang@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 刘磊(1984-), 男, 山东新泰人, 博士, 研究员, 主要从事战略性矿产资源综合利用研究及评价工作, E-mail: liulei_9910@163.com。

根据石墨成矿过程的地质作用可将其划分为以下成因类型:区域变质型、接触变质型和岩浆热液型^[2-4]。其中区域变质型石墨矿主要受区域变质作用的控制,多赋存于前寒武纪古老的中-高级变质岩中;矿体多呈层状、似层状或透镜状产出,多属晶质石墨矿,是石墨矿最主要也最常见的成因类型;如黑龙江鸡西柳毛、鹤岗工农村、山东青岛莱西南墅、内蒙古乌兰察布兴和、新疆温泉苏鲁别珍^[5]等。接触变质岩型石墨矿的成矿过程与接触变质作用密切相关,赋矿地层岩性多为石墨质板岩,矿体多呈层状产出,多产出隐晶质石墨;如湖南郴州鲁塘、娄底石巷里^[6]、吉林磐石、福建三明和永安地区^[7]等。岩浆热液型石墨矿的形成与岩浆活动关系密切,常产出于岩浆岩体的接触带部位,矿体规模一般较小,产状多不规则;矿石中常发育独特的球状构造,石墨集合体呈大小不一的球状,部分“石墨球体”中可见圈层状结构;石墨晶体尺寸多以细小鳞片为主,也可见呈隐晶质者^[3];此类矿床最典型的代表为新疆昌吉奇台县黄羊山和苏吉泉石墨矿^[8]。该成因分类方案是目前划分石墨矿床类型时应用最广泛的方案。

此外,自然界中矿床的形成过程离不开成矿物质来源,根据成矿物质来源类型可划分为有机成因类型、无机成因类型和混合成因类型^[9]。根据石墨矿床赋矿岩石建造的差异可将石墨矿床分为片麻岩大理岩透辉岩变粒岩混合岩化型晶质石墨矿、片岩区域变质型晶质石墨矿、花岗岩混染同化型晶质石墨矿和含煤碎屑岩接触变质型土状石墨矿四类^[10]。

1.2 成矿机制

碳在地球各圈层中的分布是不均匀的,在地球中的丰度为 730×10^{-6} ,地幔中的丰度为 100×10^{-6} ,陆壳中的丰度为 $1\,990 \times 10^{-6}$,而上地壳中的丰度为 $3\,240 \times 10^{-6}$ 。在大气圈对流层中 CO_2 的浓度为 356×10^{-6} ,而平均海水中非有机态碳的含量为 $2\,200 \mu\text{mol/L}$ ^[11]。按晶质石墨矿矿石最低可采品位为 2.5% 计算,晶质石墨矿中碳的浓集系数为 12.6。

碳元素的原子容积很小, C^{4+} 四次配位的离子半径仅有 0.015 nm ^[12]。在元素的地球化学分类中,碳元素属岩浆射气类元素,在岩浆结晶时期,碳原子一般不进入硅酸盐晶格中,只有当其浓度很高且具备适当的热动力条件时才能单独地组成自己的晶格形成金刚石或石墨。当碳原子不单独构成晶格时,经常以 CO_2 的形式存在于岩浆的气体相中或经火山孔道逸出到大气层中或在岩浆期后流体中呈配阴离子(CO_3^{2-})的形式存在,最后形成碳酸盐类矿物^[11]。

关于石墨的形成过程,目前的共识是通常情况下石墨为高温变质作用的产物,但也存在岩浆热液成因形成的石墨,它是从热液流体中沉淀形成的,可以没有变质作用的参与。自然界环境中石墨的形成过程大体

可以分为以下两个阶段:(1)碳化阶段:自然界中的植物尤其是高等植物的遗体经过一系列的物理、化学和生物作用会产生碳氢化合物(如石油和天然气等)和含碳固体残留物,随着固体残留物中绝大多数非碳组分的去除,其逐渐富集碳元素,并开始形成六方环状骨架结构,即芳香族骨架。(2)严格的石墨化阶段:结构上,芳香族骨架通过聚合和结构重排等方式向热力学上稳定的石墨层序结构转变,而化学成分上,经历碳化阶段之后的剩余物质进一步向纯碳相组成富集^[13]。简单理解上述两个阶段就是碳化阶段会先在单层结构上向石墨的层状结构转变,而严格石墨化阶段则是在单层结构的层间堆叠方式上向石墨的层状结构转变,并且在这两个阶段都有去除非碳杂质成分、在化学成分上向纯碳相富集的过程。通常情况下石墨矿床的形成需要具备以下两个主要条件:(1)大量的碳,即碳质要富集,其是形成石墨的物源;(2)合适的热力学条件,例如相当高的温度等^[4]。

1.3 成矿规律

我国石墨资源十分丰富且分布广泛,矿床的分布总体上呈现出一定的规律性。从全国范围来看,空间上石墨资源分布呈现出“分布广泛、北多南少、东多西少、局部富集”的特征。目前已发现的石墨矿床在我国的各大主要构造单元上均有分布,但主要分布于华北、扬子两大克拉通周缘,秦岭-祁连-昆仑造山系和天山-兴蒙造山系。其中在华北克拉通的阿拉善隆起、胶北隆起、辽吉裂谷以及华北克拉通与秦祁昆造山系的结合部,扬子克拉通的康滇基底断隆、黄陵断穹等区域分布较集中^[14]。

时间上,石墨矿的赋矿地层形成时代相对较老,主要分布于新太古代至早寒武世,其中元古代时期尤其是古元古代时期最为重要,产出了大量规模较大的石墨矿床,如黑龙江柳毛^[15]、山东南墅和张舍^[9]、湖北三岔垭^[16]等。其中北方的石墨矿多为新太古代至新元古代,南方的则多为新元古代至早寒武世,总体呈现出北方早于南方的规律^[4,14]。我国石墨矿的成矿时代主要集中于三个时期:晚太古代时期、早元古代时期和侏罗-早白垩时期。其中前两个成矿期主要形成区域变质型的晶质石墨矿,侏罗-早白垩时期主要形成接触变质型和岩浆热液型石墨矿^[17]。

区域变质型石墨矿是石墨矿床最主要的矿床类型,我国的矿床实例众多,且分布广泛,研究程度也最高。前人研究发现区域变质型矿床主要产于古老克拉通的边缘,可能与该区域板块汇聚活动中与板块升降过程有关的变质作用关系密切^[18]。王力等人^[1]将晶质石墨的成矿规律概括为“构造定区、沉积控源、变质限量、热液提质”,即大地构造格局决定晶质石墨矿床的有利区分布,富有机质陆源碎屑沉积体系控制碳

源供给和赋矿层位分布,变质作用程度及期次限定石墨矿体总量,混合岩化过程对矿石品质具有提质的作用。将典型的区域变质型晶质石墨矿床的成矿过程归纳为三个阶段:沉积成岩作用阶段、区域变质作用阶段和混合岩化的重结晶作用阶段^[1,14]。张艳飞等^[19]通过对石墨矿物学、矿石及围岩碳同位素以及矿床学的研究成果的概况,提出了“有机碳热结晶—碳硅有机热液交代”的石墨成矿模式,即石墨的形成会经历原生碳富集→高温热变质无定形碳成核结晶形成石墨核晶→碳硅有机热液氧化还原交代石墨核晶形成鳞片状晶质石墨三个阶段。总之,目前已取得的共识都遵从早期碳源富集,之后经历变质成矿和后期热液活动改造的模式。接触变质型石墨矿床主要分布于中国东部的活动大陆边缘,常形成于早期挤压环境下的中酸性岩浆活动阶段,此类石墨矿床的产出主要与中酸性岩浆侵入活动关系密切。而仅在我国新疆地区发现的发育典型“球状石墨”团块的岩浆热液型石墨矿则与碱性花岗岩有关^[18]。

2 中国石墨资源概况

中国是石墨生产和消费的大国,石墨是我国的优势矿种之一。据美国地质调查局(USGS)最新发布的《Mineral Commodity Summaries 2021》,我国石墨储量为 7 300 万 t,约占全球石墨总储量的 22.8%,居世界第二位,仅次于土耳其。我国石墨资源分布广泛,矿床种类多样,矿石品质较好,易采易选^[4]。目前已在全国的 25 个省(自治区、直辖市)内发现了石墨矿点^[20]。2021 年 10 月 21 日,自然资源部发布《中国矿产资源报告 2021》,其中根据 2020 年国家最新发布的《固体矿产资源储量分类》标准对我国主要矿种的矿产储量进行了统计计算,晶质石墨储量为 5 231.85 万 t。我国石墨资源主要分布在黑龙江、山东、内蒙古自治区、吉林和湖南 5 个省(区),上述五省(区)保有储量占全国近 90%,形成了黑龙江省鹤岗市萝北县、鸡西市密山市、山东省青岛市平度市和内蒙古乌兰察布市兴和县四个晶质石墨开发基地以及吉林省吉林市磐石市和湖南省郴州市北湖区鲁塘镇两个隐晶质石墨基地^[14]。我国石墨矿床以大、中型为主,其中大型矿床(资源储量≥100 万 t)占比约 23%,中型矿床(20 万 t≤资源储量<100 万 t)占比约 44%,小型矿床(资源储量<20 万 t)占比约 33%。晶质石墨矿石品位变化范围较大,矿石主要以中等品位(矿石平均固定碳含量在 5%~10%之间)为主^[17]。据原国土资源部发布的国土资源储量通报中的统计数据显示,截止到 2016 年,我国已查明的石墨矿产地中区域变质型矿床数量占比约 80.66%,接触变质型矿床数量占比约 18.78%,岩浆热液型矿床数量占比约 0.56%。可见区域变质型石墨矿是我国石墨矿床的主要类型,该类型石墨矿床的资源储量

占我国石墨总资源储量的 82%^[14]。

表 1 我国石墨资源分布

晶质石墨		隐晶质石墨	
省(自治区)	资源占比/%	省(自治区)	资源占比/%
黑龙江	42.98	内蒙古	58.00
内蒙古	27.36	吉林	13.70
四川	6.99	湖南	14.70
山西	6.52	广东	5.90
山东	5.40	陕西	2.90
其他	10.75	其他	4.80

注:表中数据引自文献[14]。

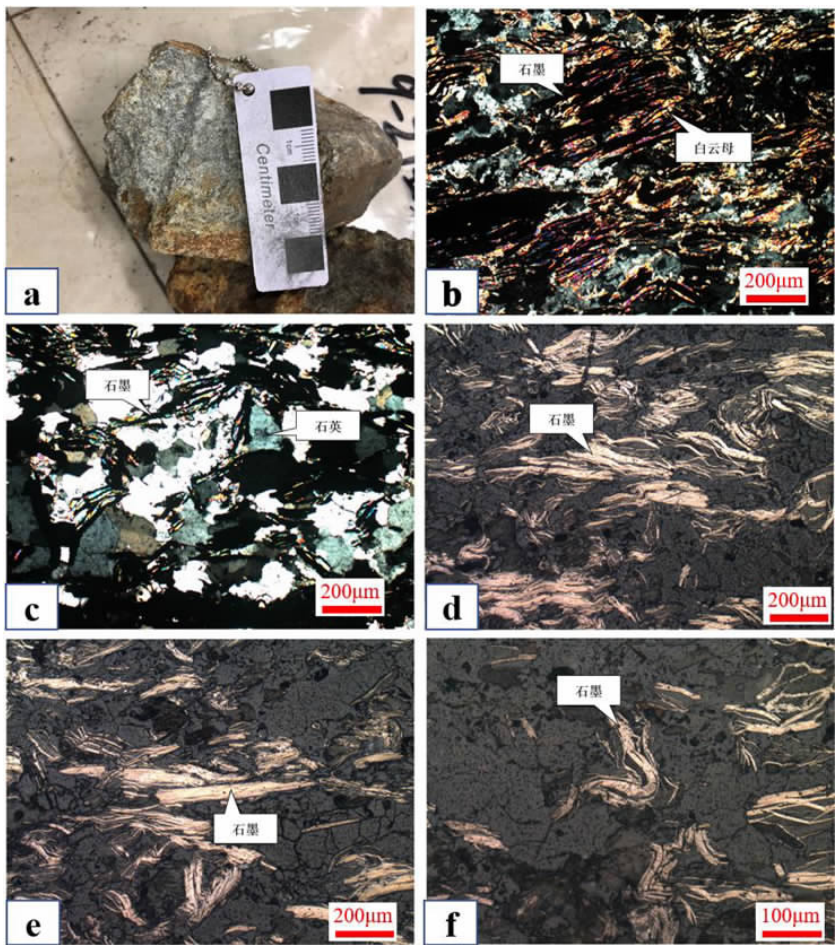
3 中国晶质石墨主要产地的资源禀赋特征

本次研究主要对我国黑龙江、内蒙古和山东三处晶质石墨主要产地以及近些年来呈现出巨大找矿潜力的甘肃和新疆两处产地的典型晶质石墨矿床的矿石特征进行了研究,同时利用 ZEISS Axioskop 40 光学显微镜对样品光片进行详细观察且拍摄大量显微照片,采用普瑞赛司显微图像分析系统(MIAPS)软件对石墨鳞片片径进行了测量,依据《DZ/T 0326—2018 石墨、碎云母矿产地地质勘查规范》中规定的片度分界值 147 μm、175 μm 和 287 μm 对片径测量值进行了统计。

3.1 黑龙江萝北矿集区

黑龙江省是我国的石墨资源大省,石墨资源储量居全国之首,其中晶质石墨储量占全国储量的 40% 以上。省内石墨矿主要产于佳木斯地体中,大致可分为鸡西—勃利、桦南—双鸭山和萝北—嘉荫三个集中区。石墨矿床主要产于变质岩地层中,以上太古界麻山群和中元古界黑龙江群为主。岩性主要为片岩、片麻岩,此外还可见大理岩、变粒岩、麻粒岩和混合岩等。矿体多呈层状、似层状和透镜状产出。矿床成因类型为区域变质型晶质石墨矿,矿石品位一般在 4%~17% 之间,最高可达 30%^[21-23]。此外,该省还产出接触变质型石墨矿,石墨类型主要为隐晶质石墨,此类石墨矿主要产于伊春市铁力市至哈尔滨市尚志市一带,矿石品位一般在 65% 左右^[22,24]。

本次研究采集了鹤岗市萝北县工农村石墨矿的典型矿石样品,矿石岩性为白云母片岩,固定碳含量为 18.24%。对其进行了显微镜下观察鉴定发现其矿物组成主要为石英(45%~50%)、石墨(10%~15%)、白云母(10%~15%)、钾长石(5%~10%)和高岭石(1%~3%)等(图 1b、c),金属矿物主要为褐铁矿(5%~8%),其次还可见少量的黄铁矿。矿石中石墨片状晶形发育较好(图 1e),整体呈浸染状分布,且具有弱定向(图 1d)。石墨与石英、长石、云母等矿物密切共生,



(a) 石墨矿石手标本; (b)、(c) 为矿石薄片, 可见其矿物组成有石英、白云母、石墨等, 其中 (b) 图中可见石墨与白云母互层共生, (b)、(c) 为正交偏光; (d) 矿石光片, 可见石墨片状晶形发育较好, 整体呈浸染状分布, 可见定向性, 反射光; (e) 矿石光片, 可见石墨鳞片片径大小不一, 部分鳞片片径较长, 边缘齐整, 反射光; (f) 矿石光片, 可见部分石墨鳞片发生弯曲变形, 反射光

图 1 鹤岗市萝北县工农村石墨矿矿石特征

Fig. 1 Ore characteristics of Gongnongcun graphite deposit in Luobei, Hegang

局部可见与褐铁矿接触共生。石墨鳞片内部分层明显, 且常与白云母呈互层状夹杂共生。此外, 部分石墨鳞片可见发育弯曲变形 (图 1f)。

对样品光片中石墨鳞片片径的测量统计结果表明, 该矿床中石墨鳞片主要分布于 20 ~ 603 μm, 平均值为 141 μm。其中 + 147 μm (+ 100 目) 占比 56.20%, 147 ~ 175 μm (100 ~ 80 目) 占比 13.09%, 175 ~ 287 μm (80 ~ 50 目) 占比为 28.64%, 大于 287 μm (+ 50 目) 占比 14.48%。

表 2 鹤岗萝北工农村石墨矿石墨鳞片原生片径统计表
Table 2 Statistics of primary diameter of graphite flake in ore of Gongnongcun graphite deposit in Luobei, Hegang

粒级/μm	< 147	147 ~ 175	175 ~ 287	> 287
相对占比/%	43.80	13.09	28.64	14.48

3.2 内蒙古阿拉善矿集区

内蒙古自治区品质石墨矿资源储量仅次于黑龙

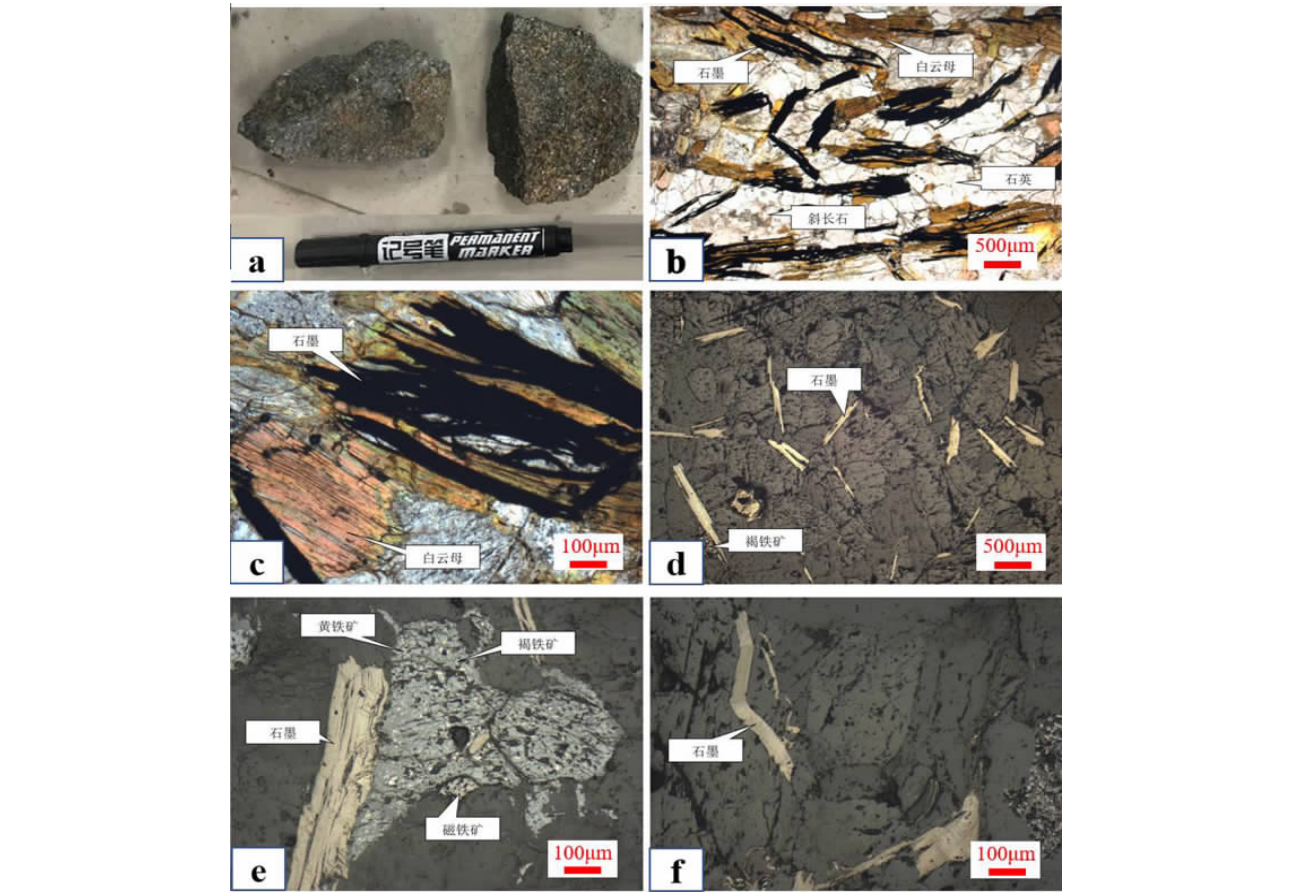
江, 位居全国第二位。自治区石墨矿成矿大地构造位置主要位于华北地台北缘狼山—白云鄂博台缘拗陷, 主要集中产出于华北陆块北缘中、东段石墨成矿带和阿拉善陆块石墨矿区^[25], 主要分布于乌兰察布市、巴彦淖尔市、阿拉善盟和包头市等地。赋矿地层主要有太古界集宁群、中太古代乌拉山岩群、新太古界色尔腾山岩群和中新元古界白云鄂博群等。矿石岩性主要为片麻岩和片岩等。矿体产状主要呈层状、似层状产出, 少量呈透镜状产出^[26-27]。自治区品质石墨矿矿石固定碳含量平均为 3% ~ 6%^[28]。成因类型主要为区域变质型品质石墨矿 (如兴和石墨矿和依肯脑包石墨矿等)^[26,29] 和接触变质型品质石墨矿 (如大乌淀石墨矿等)^[30]。

本次采集了阿拉善盟某石墨矿典型矿石样品, 矿石岩性为含透辉石斜长片麻岩, 矿石固定碳含量为 4.18%。对其进行显微镜下观察鉴定发现其主要矿物组成为石墨 (5% ~ 8%)、石英 (10% ~ 15%)、斜长石 (30% ~ 40%)、透辉石 (10% ~ 20%)、云母 (10% ~

15%)、褐铁矿(~3%),还可见少量的磁铁矿、黄铁矿和楣石等(图 2b、c、e)。

镜下可见石墨片状晶形发育较好,整体呈浸染状分布,弱定向性(图 2d)。鳞片边缘较齐整,片径普遍较长,厚度不均匀,变化较大。部分鳞片内部分层较明

显,层间夹杂物主要为石英和长石,局部可见褐铁矿和磁铁矿等。与石墨共生关系密切的褐铁矿中普遍发育呈浸染状分布的细小的黄铁矿颗粒(图 2e)。部分石墨鳞片发生弯曲变形(图 2f)。粒径大小不一,粒径约 50 ~4 120 μm。



(a) 石墨矿石手标本;(b)、(c) 矿石薄片,可见其矿物组成有石英、斜长石、黑云母、白云母、石墨等,其中(c)中可见石墨与白云母互层夹杂共生,(b)、(c)均为单偏光;(d) 矿石光片,可见石墨鳞片片状晶形发育完好,边缘齐整,整体呈浸染状分布,片径较长,反射光;(e) 矿石光片,可见褐铁矿与石墨接触共生,褐铁矿中发育呈浸染状分布的细小黄铁矿颗粒,反射光;(f) 矿石光片,可见石墨鳞片发生弯曲变形,反射光

图2 内蒙古阿拉善石墨矿矿石特征

Fig. 2 Ore characteristics of Alxa League graphite deposit

对样品光片中石墨鳞片片径的测量统计结果表明,该矿床中石墨鳞片片径主要分布于 15 ~2 146 μm,平均值为 327 μm。其中 + 147 μm (+ 100 目) 占比 93.35% ,147 ~ 175 μm (100 ~ 80 目) 占比为 3.27% ,175 ~ 287 μm (80 ~ 50 目) 占比 16.86% ,大于 287 μm (+ 50 目) 占比 73.22% ,大于 500 μm 占比 40.35% ,属特大鳞片石墨矿。

表3 阿拉善石墨矿石墨鳞片原生片径统计表

Table 3 Statistics of primary diameter of graphite flake in ore of Alxa League graphite deposit

粒级/μm	<147	147 ~ 175	175 ~ 287	>287
相对占比/%	6.65	3.27	16.86	73.22

3.3 山东平度矿集区

山东省是我国重要的石墨产地,辖区内已查明的矿物资源储量位居全国第五。早期以山东青岛平度南墅石墨矿为代表的一批大规模品质石墨矿奠定了山东省石墨资源大省的地位,之后随着矿石的长期消耗以及环保政策的调整,目前已成功转型为我国重要的石墨深加工产业基地,辖区范围内分布有众多石墨下游产品的生产研发企业。

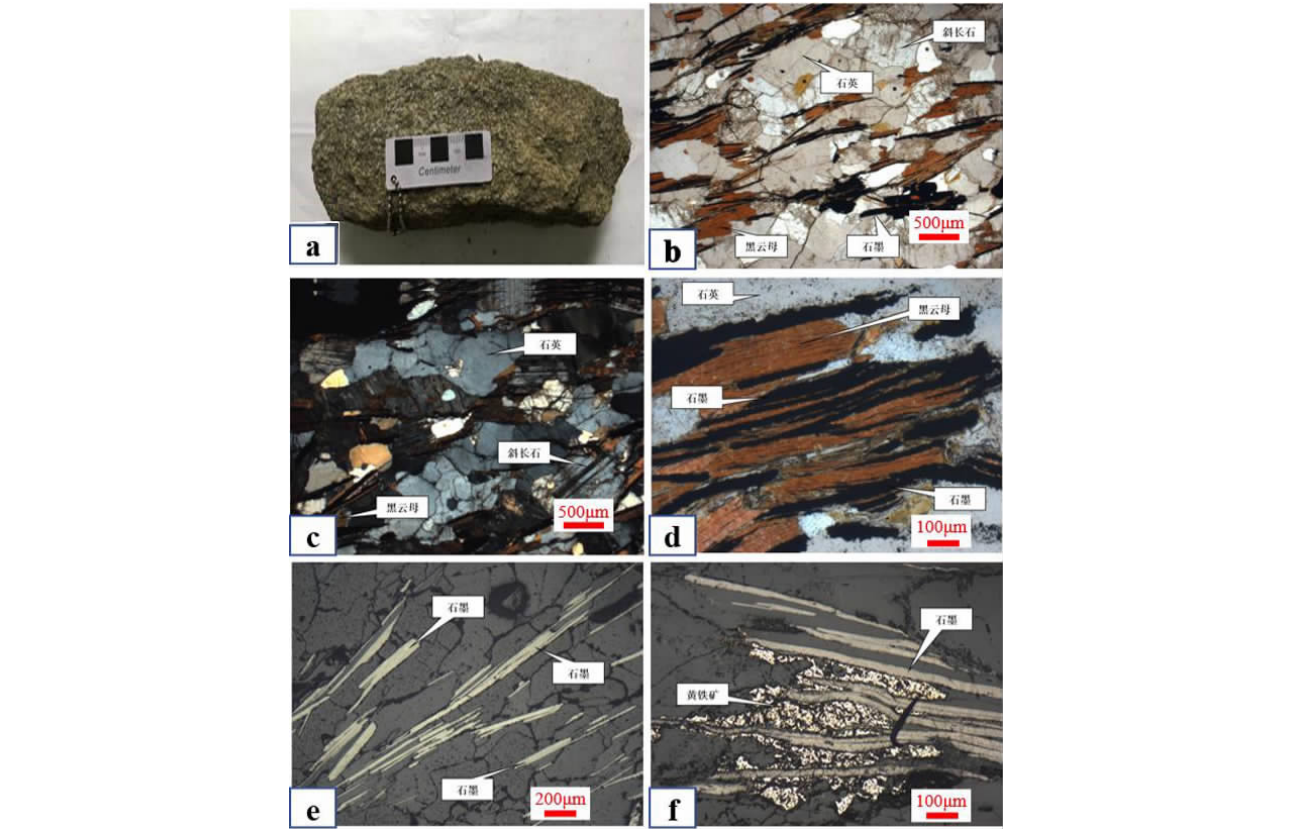
山东省目前已发现的石墨矿的大地构造位置主要位于华北克拉通胶辽隆起区内的胶北隆起内,主要集中在平度云山镇、平度刘戈庄和莱西南墅三个石墨矿集区内,主要分布于青岛平度,其次为莱西、莱阳、牟平、海阳等地,此外在威海田村、蓉城、乳山等地也有晶

质石墨矿点分布。其中具有工业开采价值的大都分布于平度和莱西境内^[28,31]。主要的赋矿地层为古元古代荆山群和新太古代泰山岩群,岩性主要有片麻岩、变粒岩、透辉岩、透闪岩、大理岩和斜长角闪岩等。含晶质石墨矿的岩石主要为斜长片麻岩,其次为透闪透辉岩,此外还可见少数含石墨的大理岩。矿体主要呈层状、似层状产出。晶质石墨矿石固定碳含量平均为 3.76%。矿床成因类型主要为区域变质型晶质石墨矿,矿石中石墨鳞片片径大,易采易选^[31]。

本次研究采集了青岛市平度市田庄石墨矿的典型矿石样品,矿石岩性为黑云角闪斜长片麻岩,矿石固定

碳含量为 3% ~ 6%。对其进行了显微镜下观察鉴定发现其主要矿物组成为石墨(5% ~ 10%)、石英(20% ~ 25%)、斜长石(30% ~ 35%)、黑云母(10% ~ 15%)、角闪石(5% ~ 10%)、绿泥石(~ 3%)、黄铁矿(~ 3%)、极少量的锆石等(图 3b、c、f)。

镜下可见石墨片状晶形发育较好,整体呈浸染状分布,定向性较明显(图 3e)。鳞片边缘较齐整,片径普遍较长,但厚度薄。部分鳞片内部分层较明显,层间夹杂物主要有黑云母、黄铁矿、石英等,可见石墨与黑云母呈互层状密切共生(图 3d),局部还可见石墨片层间发育呈脉状的黄铁矿颗粒(图 3f)。部分石墨鳞片



(a) 石墨矿石手标本;(b)、(c) 矿石薄片,可见其矿物组成有石英、斜长石、黑云母、石墨等,其中(b)为单偏光、(c)为正交偏光;(d) 矿石光片,可见石墨与黑云母互层共生,单偏光;(e) 矿石光片,可见石墨鳞片片状晶形发育完好,边缘齐整,整体呈浸染状分布,片径较长,厚度较薄,反射光;(f) 矿石光片,可见石墨鳞片之间发育有不规则状黄铁矿,反射光

图3 青岛平度田庄石墨矿矿石特征

Fig. 3 Ore characteristics of Tianzhuang graphite deposit in Pingdu, Qingdao

发生弯曲变形。粒径大小不一,粒径约 60 ~ 2 100 μm。

对样品光片中石墨鳞片片径的测量统计结果表明,该矿床中石墨鳞片片径主要分布于 50 ~ 2 100 μm,平均值为 438 μm。其中 + 147 μm (+ 100 目) 占比 98.03%, 147 ~ 175 μm (100 ~ 80 目) 占比 1.75%, 175 ~ 287 μm (80 ~ 50 目) 占比 11.51%, 大于 287 μm (+ 50 目) 占比 84.77%, 大于 500 μm 占比 55.10%, 属超

大鳞片石墨矿。但厚度普遍很小,片径/厚度比值大。

表4 青岛平度田庄石墨矿石石墨鳞片原生片径统计表

Table 4 Statistics of primary diameter of graphite flake in ore of Tianzhuang graphite deposit in Pingdu, Qingdao

粒级/μm	< 147	147 ~ 175	175 ~ 287	> 287
相对占比/%	1.97	1.75	11.51	84.77

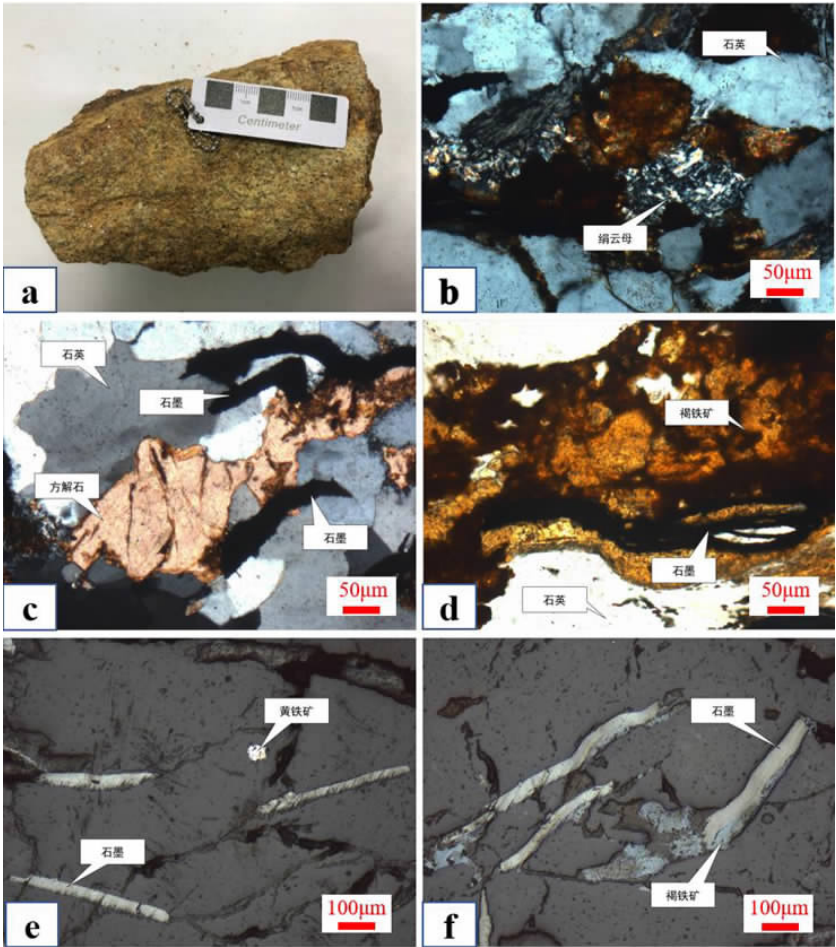
3.4 甘肃阿克塞矿集区

甘肃省地处塔里木、华北和扬子三大克拉通的交汇部位,经历了漫长且复杂的地质构造演化过程,区域内发育敦煌、阿拉善等地块,中祁连、鄂尔多斯隆起以及北秦岭褶皱带等众多构造单元,沉积环境多样,岩浆活动广泛,变质作用强烈,具备十分有利的成矿条件^[32-33]。早期该省仅在武威市民勤县发现唐家鄂博山一处大型石墨矿,但近些年来,在该省酒泉市的肃北、阿克塞和瓜州等地陆续发现众多石墨矿床,如敖包山、红柳峡、大敖包、白台沟、白石头沟、梧桐井、大案盆沟、豺狼沟、大水峡等^[34]。此外在张掖市临泽县以及天水市麦积区也有石墨矿产出。总体上,该省的晶质石墨矿床主要分布于敦煌地块以及龙首山地块,区域上构成了中祁连隆起石墨成矿带^[14,32]。该区石墨矿主要为区域变质型晶质石墨矿,主要产出于中太古代龙首山岩群和古元古代敦煌岩群中,矿石岩性为斜长片

麻岩、石英片岩,局部可见含石墨大理岩等。矿体呈层状或似层状产出,矿石固定碳含量 1.36% ~ 30.31%^[32]。

本次研究采集了甘肃省酒泉市阿克塞县石墨矿的矿石样品,该矿主要赋存于太古宇-古元古界敦煌岩群中,矿石岩性为斜长片麻岩,固定碳含量为 3.35%。对其进行显微镜下观察鉴定发现其主要矿物组成为石墨(~5%)、石英(55%~60%)、斜长石(25%~30%)、方解石(~3%)、绢云母(~1%)、白云母、褐铁矿(~3%)、黄铁矿等(图4b、c、e、f)。

石墨反射光下呈土黄色,片状晶形发育较好,整体呈浸染状分布,基本无定向(图4e)。鳞片边缘较齐整,片径普遍较长,厚度较厚。鳞片内部几乎无分层,可见石墨与石英、褐铁矿和方解石的密切共生,尤其是褐铁矿,石墨鳞片周围常有褐铁矿出现,局部可见石墨鳞片与褐铁矿呈互层状共生(图4d、f)。部分石墨鳞片发生弯曲变形。粒径大小不一,粒径约 20~1 600 μm。



(a) 石墨矿石手标本;(b)、(c)、(d)为矿石薄片,可见其矿物组成有石英、石墨、方解石、绢云母、褐铁矿等,其中(b)、(c)为正交偏光,(d)为单偏光;(e)矿石光片,可见石墨鳞片片状晶形发育完好,边缘齐整,整体呈浸染状分布,局部可见有细小的黄铁矿颗粒,反射光;(f)矿石光片,可见石墨鳞片周围发育有不规则状的褐铁矿,反射光

图4 酒泉阿克塞石墨矿矿石特征

Fig. 4 Ore characteristics of Aksay graphite deposit in Jiuquan

对样品光片中石墨鳞片片径的测量统计结果表明,该矿床中石墨鳞片片径主要分布于 20 ~ 1 470 μm,平均值为 380 μm。其中 + 147 μm (+ 100 目) 占比 96.16%, 147 ~ 175 μm (100 ~ 80 目) 占比 2.17%, 175 ~ 287 μm (80 ~ 50 目) 占比 12.49%, 大于 287 μm (+ 50 目) 占比 81.51%, 大于 500 μm 占比 47.65%, 属特大鳞片石墨矿。

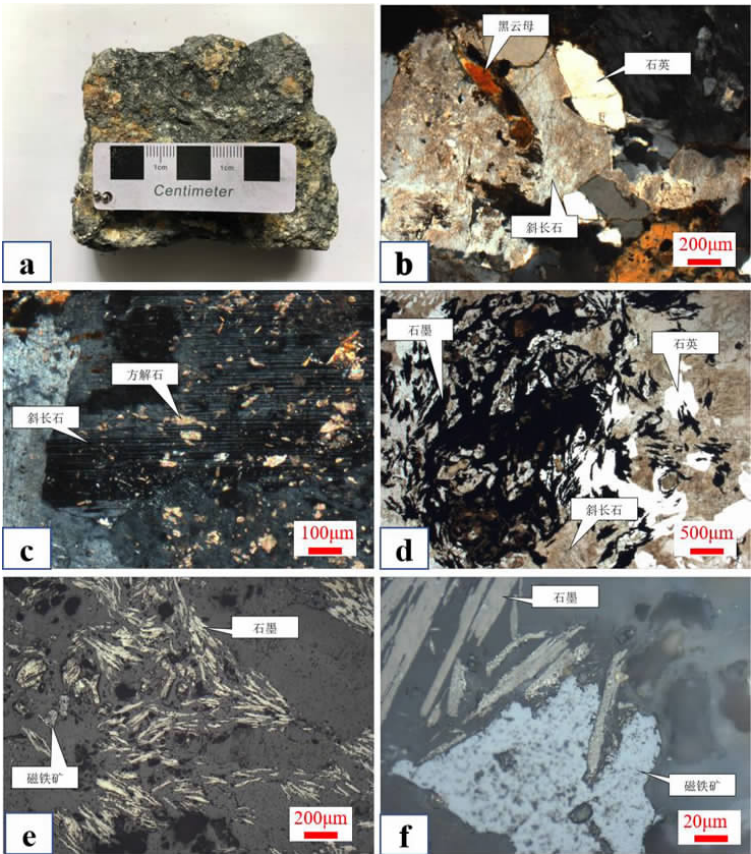
表 5 酒泉阿克塞石墨矿石墨鳞片原生片径统计表
Table 5 Statistics of primary diameter of graphite flake in ore of Aksay graphite deposit in Jiuquan

粒级/μm	<147	147 ~ 175	175 ~ 287	>287
相对占比/%	3.84	2.17	12.49	81.51

3.5 新疆奇台矿集区

新疆维吾尔自治区受限于所辖面积大、地形复杂以及资源勘查程度低的影响,早期鲜有石墨矿的找矿成果报道。近些年来,随着国家及地方对资源勘查工作的持续投入,在新疆东准噶尔、天山等地区陆续发现多处石墨矿,如奇台县黄羊山、苏吉泉,青河县阿拉托

别、孔可热和达布逊、鄯善县玉泉山以及温泉县苏鲁别珍石墨矿等^[5],上述石墨矿主要分布与准噶尔盆地周边,尤其是其东北部的东准噶尔造山带。该造山带位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦准噶尔板块的结合部位,是中亚造山带的重要组成部分,也是新疆北部最重要的成矿带之一。该地区已发现的石墨矿类型齐全,涵盖了区域变质型、接触变质型和岩浆热液型三大成因类型,且是我国唯一一处发现大型岩浆热液型石墨矿的地区。其中区域变质型石墨矿主要赋存于元古界星星峡群、兴地塔格群、温泉群等古老变质岩地层中,矿石岩性主要为石英片岩、黑云斜长片麻岩以及大理岩等,矿体主要呈似层状或透镜体状产出,矿石固定碳含量为 2% ~ 10%^[5,35]。接触变质型石墨矿的赋矿地层为古生界志留纪至石炭纪的陆海过渡相、浅海相碎屑岩中,含矿岩系主要为二叠纪及侏罗纪的煤系地层,矿体呈似层状产出,此类石墨矿属隐晶质石墨,但固定碳含量较高,一般在 5% ~ 25%^[36-37]。岩浆热液型石墨矿均分布在东准噶尔卡拉麦里地区,主要是黄羊山和苏吉泉两处晶质石墨矿床。石墨矿赋存在晚石炭世的碱性花岗岩中,围岩主要为泥盆纪的火山碎屑沉积



(a) 石墨矿石手标本; (b)、(c)、(d) 为矿石薄片, 可见其矿物组成有石英、长石、石墨、黑云母、方解石、磁铁矿等, 其中 (b)、(c) 为正交偏光, (d) 为单偏光; (e) 矿石光片, 可见石墨鳞片整体呈浸染状发育, 局部可见有磁铁矿颗粒, 反射光; (f) 矿石光片, 可见石墨鳞片片状晶形发育好, 边缘较齐整, 部分与磁铁矿共生, 反射光

图 5 昌吉州奇台县黄羊山石墨矿矿石特征
Fig. 5 Ore characteristics of Huangyangshan graphite deposit in Qitai, Changji

岩。花岗岩中的石墨主要呈球状或团状的集合体发育,尺寸大小不一,整体在花岗岩中呈散点状分布。此类石墨矿石中石墨鳞片片径较小,固定碳含量 2% ~ 16%,平均在 5% 左右^[8,38]。

石墨反射光下呈土黄色,片状晶形发育较好,鳞片边缘较齐整(图 5f),呈球状或不规则团状集合体发育,集合体内部呈稠密浸染状或团状分布,无定向。可见石墨与石英、长石的密切共生(图 5d),局部可见石墨鳞片与黑云母和磁铁矿共生(图 5f)。石墨鳞片片径普遍较短,介于 10 ~ 600 μm ,通常在 100 μm 以下。

对样品光片中石墨鳞片片径的测量统计结果表明,该矿床中石墨鳞片片径主要分布于 5 ~ 665 μm ,平均值为 77 μm 。其中 + 147 μm (+ 100 目) 占比 20.58%, 147 ~ 175 μm (100 ~ 80 目) 占比 8.77%, 175 ~ 287 μm (80 ~ 50 目) 占比 10.29%, 大于 287 μm (+ 50 目) 占比 1.52%, 绝大多数小于 147 μm , 占比 79.42%, 属细小鳞片石墨矿。

表 6 昌吉州奇台县黄羊山石墨矿石石墨鳞片原生片径统计表
Table 6 Statistics of primary diameter of graphite flake in ore of Huangyangshan graphite deposit in Qitai, Changji

粒级/ μm	< 147	147 ~ 175	175 ~ 287	> 287
相对占比/%	79.42	8.77	10.29	1.52

3.6 小结

我国品质石墨矿床多为区域变质成因,仅在新疆产出有岩浆热液成因的品质石墨矿。区域变质型石墨矿矿床多产于前寒武纪的古老变质岩中,矿石岩性多为片麻岩或片岩,矿石品位普遍偏低,矿石中的石墨鳞片普遍呈浸染状发育。将上述五处石墨产地的典型矿床进行对比可以看出:(1)黑龙江的品质石墨矿石固定碳含量最高,内蒙古、山东的普遍较低。(2)黑龙江、内蒙古、山东产出的品质石墨矿石中普遍可见石墨鳞片与云母的互层共生现象,具体表现为石墨鳞片和云母相互夹杂叠生,此类嵌布特征对选矿过程中石墨的解离十分不利。(3)石墨矿石中发育的金属矿物种类表现出一定的差异。黑龙江、内蒙古和甘肃三地的石墨矿石中均发育有褐铁矿和少量的黄铁矿,山东的石墨矿石中则主要发育黄铁矿且含量较高,而新疆的石墨矿石中主要发育磁铁矿。(4)石墨鳞片的片径统计数据可以看出,内蒙古、山东和甘肃三地的品质石墨矿石石墨鳞片片径 > 287 μm 占比均超过 50%, 其中山东省的占比最高,而黑龙江和新疆两地的石墨鳞片片径则普遍 < 147 μm , 从矿石光片的镜下显微照片中可以看出,山东石墨矿的鳞片片径虽然很长,但厚度普遍很薄,此类矿石在选矿过程中对大鳞片的保护难度极大。相比之下,内蒙古、甘肃两地的石墨鳞片厚度较厚,在选矿过程中大鳞片的产率会较高。(5)新疆岩

浆热液型品质石墨矿矿石的鳞片片径普遍较小,且多呈球状或团块状集合体的形式产出,此类结构在选矿的粗磨粗选阶段易于对石墨进行富集,但后续再磨再选阶段对石墨的进一步分选提纯过程则相对较难。

4 结论与建议

(1)我国石墨资源量十分丰富,成因类型齐全。空间分布上呈现出“北多南少、东多西少”的特征,主要分布于华北、扬子两大克拉通周缘,秦岭 - 祁连 - 昆仑造山系和天山 - 兴蒙造山系。时间上,石墨矿赋地质体的形成时代跨度较大。区域变质型石墨矿的赋矿地层形成时代普遍较老,多在前寒武纪。接触变质型石墨矿的相对较晚,多在中生代。岩浆热液型石墨矿的含矿岩体的形成时代多在古生代。区域变质型石墨矿多产出品质石墨,是我国最主要也是产出矿床数量最多的石墨矿类型。

(2)我国品质石墨主要产地的矿石资源禀赋差异较大。黑龙江石墨矿石品位较高,但鳞片片径较小。山东石墨鳞片片径长,但厚度很薄。甘肃石墨矿鳞片片径较长,且厚度也较厚。新疆石墨矿鳞片片径最小,且厚度也较薄。同时,黑龙江、内蒙古、山东三地石墨矿石中普遍可见石墨鳞片与云母的互层共生现象,此类嵌布特征对选矿十分不利。

(3)石墨作为一种重要的非金属资源,其评价方式应与常用的大宗金属矿产资源的评价有所区别,除了关注其矿石品位(固定碳含量)之外,还应对其结构形态特征予以重视。结构决定性质,性质主导用途,用途影响价值。因此在后续的石墨研究评价工作中,应注意对石墨资源的多维度评价,尽可能做到分质分级评价利用,以提高其综合利用价值。

参考文献:

[1] 王力,樊俊雷,李雷,等. 中国石墨资源概况及品质石墨成矿规律[J]. 地质学刊,2017,41(2):310 - 317.
[2] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0326—2018 石墨、碎云母矿产地地质勘查规范[S]. 北京:地质出版社,2018.
[3] 莫如爵,刘绍斌,黄翠蓉,等. 中国石墨矿床地质[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
[4] 《中国矿床》编委会. 中国矿床(下册)[M]. 北京:地质出版社,1994.
[5] 白建科,陈隽璐,彭素霞,等. 新疆石墨资源特征及成矿规律[J]. 地质学报,2017,91(12):2828 - 2840.
[6] 李阔,刘钦甫,张帅,等. 煤系石墨显微组分与结构特征[J]. 矿物学报,2021,41(1):101 - 108.
[7] 林长青. 福建三明地区隐晶品质石墨矿成矿条件及找矿前景分析[J]. 能源与环境,2020(2):55 - 57.
[8] 白建科,陈隽璐,彭素霞. 新疆奇台县黄羊山岩浆热液型石墨矿床含矿岩体年代学与地球化学特征[J]. 岩石学报,2018,34(8):2327 - 2340.
[9] 李凯月,陈衍景,余振兵,等. 胶北荆山群张舍石墨矿碳同位素特征及其地质意义[J]. 地学前缘,2018,25(5):19 - 33.
[10] 邵厥年,陶维屏. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京:地质出版社,2010.

[11] 韩吟文,马振东.地球化学[M].北京:地质出版社,2003.

[12] SHANNON R D . Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. Acta Crystallographica Section A, 1976, 32(5): 751 – 767.

[13] BUSECK P R , BEYSSAC O . From Organic Matter to Graphite: Graphitization[J]. Elements, 2014, 10(6): 421 – 426.

[14] 颜玲亚,高树学,陈正国,等.中国石墨矿成矿特征及成矿区带划分[J].中国地质,2018,45(3):421 – 440.

[15] 李光辉,黄永卫,吴润堂,等.鸡西柳毛石墨矿碳质来源及铀、钒的富集机制[J].世界地质,2008,27(1):19 – 22.

[16] 张清平,田成胜.湖北三岔垭石墨矿地质特征及成因分析[J].中国非金属矿工业导刊,2011(S1):5 – 7.

[17] 沈毅 怀俊东,彭成龙,等.我国石墨资源特征与差异化应用进展[J].矿产保护与利用,2020,40(2):171 – 178.

[18] 李超,王登红,赵鸿,等.中国石墨矿床成矿规律概要[J].矿床地质,2015,34(6):1223 – 1236.

[19] 张艳飞,梁帅,赵青,等.石墨矿床类型及显晶质石墨矿床成矿模式(Ⅱ):矿石矿物及矿化特征[J].化工矿产地质,2020,42(2):97 – 105.

[20] 张福良,殷腾飞,周楠,等.我国石墨资源开发利用现状及优化路径选择[J].炭素技术,2013,32(6):31 – 35.

[21] 王东暄.黑龙江省晶质石墨资源特征概述[J].黑龙江科技信息,2014(4):23.

[22] 赵然然,宋守永.黑龙江省石墨矿成矿条件探究[J].产业与科技论坛,2013,12(6):64 – 65.

[23] 李光辉,黄永卫,吴润堂,等.鸡西柳毛石墨矿碳质来源及铀、钒的富集机制[J].世界地质,2008,27(1):19 – 22.

[24] 江志明.黑龙江省石墨成矿区带划分及其成矿作用的探讨[J].中国非金属矿工业导刊,2019(2):43 – 47.

[25] 肖克炎,孙莉,李思远,等.我国石墨矿产地质特征及资源潜力分析[J].地球学报,2016,37(5):607 – 614.

[26] 乔宝成,刘波,李海东.内蒙古乌拉特中旗依肯脑包石墨矿地质特征及成因[J].地质学刊,2018,42(1):46 – 51.

[27] 郑永涛,高洁,孙莉,等.内蒙古阿拉善左旗查汗木胡鲁晶质石墨矿地质特征及找矿标志[J].地质学刊,2016,40(4):695 – 700.

[28] 郭佳,张作伦,江伟华,等.我国典型晶质石墨产区鳞片石墨的特征及其开发利用[J].矿产保护与利用,2018(5):28 – 31 + 39.

[29] 王时麒.内蒙兴和石墨矿含矿建造特征与矿床成因[J].矿床地质,1989,8(1):85 – 96.

[30] 姜高珍,李以科,王安建,等.内蒙古乌拉特中旗大乌淀石墨矿成因特征分析[J].地学前缘,2017,24(5):306 – 316.

[31] 颜玲亚,高树学,刘海泉,等.山东石墨矿地质特征和成矿区带划分[J].中国非金属矿工业导刊,2020(4):24 – 30.

[32] 刘力,陈彦文.甘肃晶质石墨矿分布规律及成矿远景探讨[J].中国非金属矿工业导刊,2021(2):24 – 26.

[33] 赵茹石,周振环,毛金海,等.甘肃省板块构造单元划分及其构造演化[J].中国区域地质,1994(1):28 – 36.

[34] 王东升,刘强.甘肃省敖包山晶质石墨矿集区地质特征及地质经济意义[J].矿产与地质,2020,34(3):457 – 462 + 485.

[35] 邵勤国.新疆温泉县苏鲁别珍石墨矿地质特征及成因浅析[J].甘肃冶金,2016,38(4):33 – 36.

[36] 郭巧玲,王德明,魏军.新疆青河县达布逊石墨矿床地质特征及成矿条件分析[J].西部探矿工程,2013(6):119 – 122.

[37] 成飞,刘学清,黄静宇.新疆青河县阿拉托别石墨矿矿床成因分析[J].西部探矿工程,2012(8):177 – 178.

[38] 李作武,张小林,张磊,等.新疆奇台县黄羊山晶质石墨矿地质特征及资源潜力分析[J].中国非金属矿工业导刊,2019(S1):25 – 34.

Overview of Graphite Resources and Mineral Characteristics of the Typical Ore Concentration Areas of Crystalline Graphite in China

GUO Lixiang^{1,2,3}, LIU Lei^{1,2,3*}, WANG Shoujing^{1,2,3}, ZHANG Ran^{1,2,3}, WEI Fushuai^{1,2,3}

1. 1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, China;
2. 2. China National Engineering Research Center for Utilization of Industrial Minerals, Zhengzhou 450006, China;
3. 3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, China

Abstract: With the rapid development of high – tech industry, especially new energy industry, it has driven the huge demand for graphite resources, especially crystalline graphite resources. This paper summarizes the classification, metallogenic mechanism and metallogenic regularity of graphite deposits in China, gives a general overview about the survey of graphite resources in China, and contrasts the mineral characteristics of typical deposits in the ore concentration areas of crystalline graphite in China, in order to provide valuable guidance for the exploration, development and comprehensive utilization of graphite resources, especially crystalline graphite resources in the future, so as to ensure the safe supply of China’s strategic key minerals and consolidate China’s strategic position as a large country of graphite resources.

Key words: graphite; metallogenic regularity; mineral characteristics; Luobei; Alashan; Pingdu; Akesai; Qitai

引用格式:郭理想,刘磊,王守敬,张然,魏付帅. 中国石墨资源及晶质石墨典型矿集区矿物学特征[J]. 矿产保护与利用,2021,41(6):9 – 19.

GUO Lixiang, LIU Lei, WANG Shoujing, ZHANG Ran, WEI Fushuai. Overview of graphite resources and mineral characteristics of the typical ore concentration areas of crystalline graphite in China[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(6): 9 – 19.