

# 西南天山中新生代盆地成矿流体运移规律

贾润幸<sup>1,2</sup>, 方维萱<sup>1,2</sup>

JIA Runxing<sup>1,2</sup>, FANG Weixuan<sup>1,2</sup>

1. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012;

2. 有色金属矿产地质调查中心矿山生态环境资源创新实验室, 北京 100012

1. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China;

2. Innovation Laboratory of Mine, Environment and Mineral, China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China

**JIA R X, FANG W X, 2021. The migration rule of the ore-forming fluids in the Meso-Cenozoic Basins, Southwestern Tianshan, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 529 - 441. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.046**

**Abstract:** The Wulagen pb-zn deposit and the Sareke copper deposit, two most representative strata-bound glutinite deposits in the Meso-Cenozoic Basins in Southwestern Tianshan, are the subjects of our study. The Wulagen pb-zn deposit occurred in the coarse sandy fine conglomerates in the Section 5 of the Lower Cretaceous Kizilsu group ( $K_1 kz^5$ ) and have underwent weak tectonic reworking in the late period; The Sareke copper deposit occurred in anagenites in the upper section of Upper Jurassic Kuzigongsu formation ( $J_3 k^2$ ), and the northern part shows obvious tectonic reworking and enrichment mineralization, while the southern part shows discoloration and superposition mineralization after magmatic hydrothermal alteration. In order to study the migration law of ore-forming fluids and magmatic hydrothermal fluids in rocks, the porosity and permeability of the representative rocks dominated by sedimentation, tectonic reworking and magmatic hydrothermal alteration in the two mining areas were measured respectively. The test results show that the rocks in the Wulagen deposit area generally have low porosity and permeability than those in the Sareke deposit; the rocks in the Wulagen lead-zinc deposit and the northern part of the Sareke copper deposit have low porosity and permeability than their footwall rocks; the porosity and permeability of the rocks subjected to magmatic hydrothermal alteration in the southern part of the Sareke copper deposit are obviously lower than those not subjected to magmatic alteration, and the porosity and permeability of the footwall rocks of diabase dike are significantly lower than those of the upper rocks. According to the analysis of rock (ore) fabric, the changes of porosity and permeability after diagenesis and mineralization are closely related to the action of ore-forming fluids or magmatic hydrothermal fluids. In the Meso-Cenozoic strata-bound deposits in the southwestern Tianshan Mountains, rock strata with high porosity and permeability are preferred to be permeated, diffused, filled and metasomatized when ore-forming fluids rise along the cutting layer faults. The larger the gravel diameter is in the rock, the larger the gravel gap is; the greater the hardness of the rock, the easier it is to form structural cracks in the later tectonic deformation, and the more favorable it is for mineralization. This is also the important reason that the metal sulfide particles in the northern part of the Sareke copper deposit are obviously larger than those in the Wulagen lead-zinc deposit. In the process of magma intrusion, the alteration of the footwall

基金项目: 中国地质调查局项目 (121201004000150017-47, 121201004000160901-67); 国土资源部公益性行业科研专项项目 (201511016)  
This research is financially supported by the Projects of China Geological Survey (Grant No. 121201004000150017-47, 121201004000160901-67), and the Research Project of Public Welfare Industry from Ministry of Land and Resources of China (Grant No. 201511016)

第一作者简介: 贾润幸 (1969—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为金属矿床地球化学。E-mail: chookdog@163.com

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2021-05-10; 责任编辑: 范二平

引用格式: 贾润幸, 方维萱, 2021. 西南天山中新生代盆地成矿流体运移规律 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 529-541. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.046

quartz sandstone by the magmatic hydrothermal fluids is stronger than that of the hanging wall. The above results indicate that the stronger the mineralization of ore-forming fluids or magmatic hydrothermal fluids are in sedimentary basins, the lower the porosity and permeability of affected rocks will be after diagenesis and mineralization. The porosity and permeability of rocks can indirectly reflect the strength of mineralization and provides a theoretical basis for searching for ore shoots.

**Key words:** Meso-Cenozoic Basin; voidage and permeability; tectonic deformation of basin; ore-forming fluid; Southwestern Tianshan

**摘要：**乌拉根铅锌矿床和萨热克铜矿床是西南天山中新生代盆地最有代表性的两个层控砂砾岩型矿床，乌拉根铅锌矿床产于下白垩统克孜勒苏群第五岩性段 ( $K_1 kz^5$ ) 的粗砂质细砾岩中，后期经历了弱的构造改造作用；萨热克铜矿床产于上侏罗统库孜贡苏组上段 ( $J_3 k^2$ ) 杂砾岩中，其北矿段后期经历了强烈的构造改造作用，南矿段可见岩浆热液蚀变作用后的褪色化及叠加成矿作用。为了研究成矿流体和岩浆热液在岩石中的运移规律，分别对上述两个矿区以沉积作用、构造改造作用和岩浆作用为主的代表性岩石测定了孔隙度和渗透率。测试结果表明乌拉根矿区岩（矿）石的孔隙度和渗透率总体比萨热克矿区岩石的孔隙度和渗透率要小；乌拉根铅锌矿区和萨热克铜矿区北矿段矿石的孔隙度和渗透率均小于下盘围岩的孔隙度和渗透率；萨热克铜矿区南矿段经历了岩浆热液蚀变，岩石的孔隙度和渗透率明显小于未受岩浆作用的岩石孔隙度和渗透率，且辉绿岩脉下盘岩石的孔隙度和渗透率明显小于上盘。同时通过岩（矿）石组构分析，上述岩（矿）石在成岩和成矿后孔隙度和渗透率的变化均与成矿流体或岩浆热液的作用密切相关。在西南天山中新生代层控型矿床中，当成矿流体沿切层断裂上升后会优先选择孔隙度和渗透率高的岩层进行渗滤、扩散、充填和交代作用。岩石中的砾石砾径越大，砾石间隙越大；岩石的硬度越大，其在后期构造变形中越容易形成构造裂隙，对成矿越有利，这也是造成萨热克铜矿北矿带中的金属硫化物颗粒明显大于乌拉根铅锌矿中金属硫化物的重要原因。上述结果表明沉积盆地中成矿流体或岩浆热液的成矿作用越强，岩石受其影响在成岩成矿后的孔隙度和渗透率越会变小，从岩石的孔隙度和渗透率可间接反映成矿过程中成矿作用的强弱，为寻找富矿体提供理论依据。

**关键词：**中新生代沉积盆地；孔隙度和渗透率；盆地构造变形；成矿流体；西南天山

**中图分类号：**P612     **文献标识码：**A

沉积盆地是金属矿产和能源矿产重要的赋存空间，成矿流体的富集及运移方向与矿藏的形成密切相关，关于成矿流体与沉积盆地之间的关系，相关学者已进行了大量的研究（邓军等，2000；王震亮，2000；刘建明等，2000；杨庆杰等，2000；顾家裕等，2001；邹华耀等，2005；王国芝等，2002；欧光习等，2006；薛春纪等，2007，2008；赵重远和靳久强，2009；解习农等，2009；吴根耀等，2012），总体上，从事油气等能源矿产的研究者对岩石的孔隙度和渗透率关注较多（刘建军和刘先贵，2001；冯建伟等，2011；尚春江等，2019；曾治平等，2019；俞雨溪等，2020），而从事金属矿产的研究者对岩石的孔隙度和渗透率关注较少（周利敏等，2008），然而现在越来越多的流体包裹体证据显示沉积盆地中的油气等有机质参与了金属矿产的成矿作用，部分还起到了决定性的作用（方维萱等，2016；贾润幸等，2017）。由于沉积盆地通常经

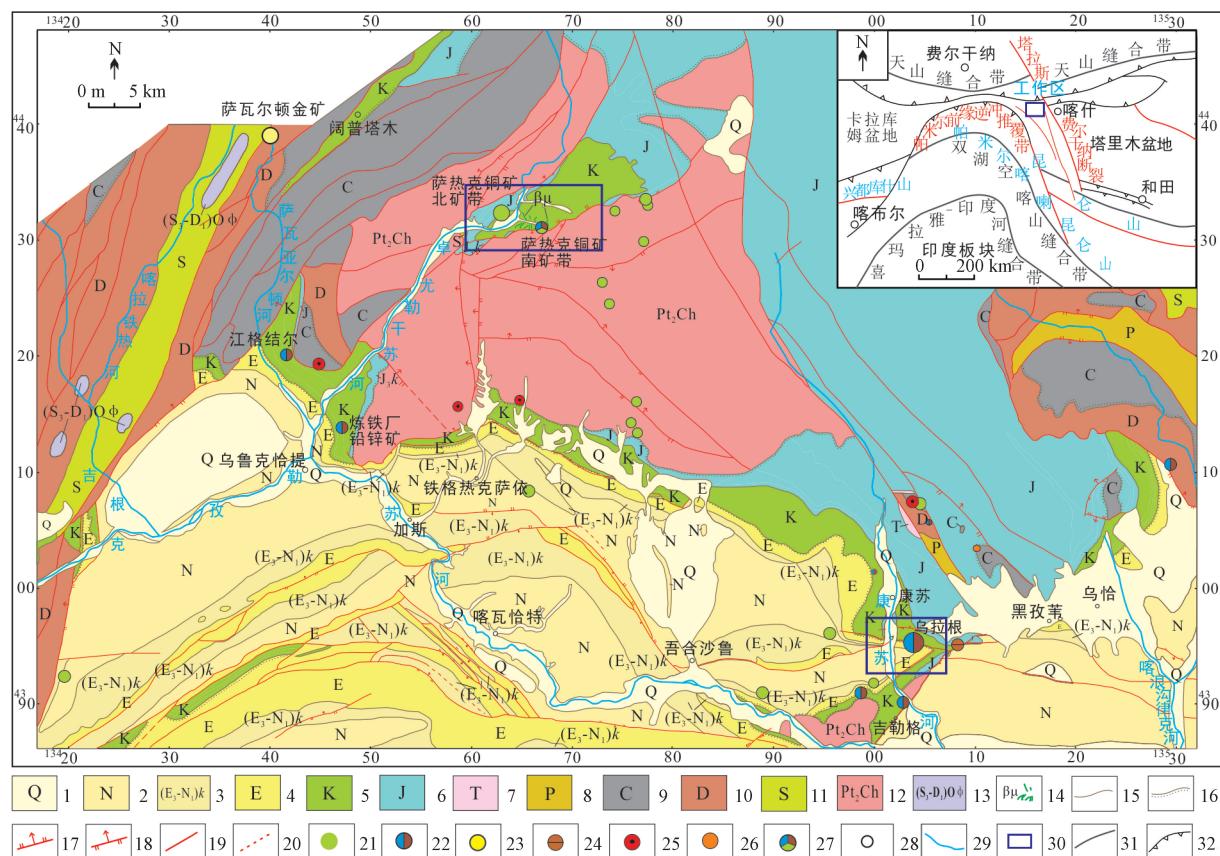
历了漫长的构造演化过程，对于沉积盆地在不同地质背景下（如沉积环境、盆地构造变形和岩浆侵入等）成矿流体的运移规律缺乏对比研究。乌拉根铅锌矿和萨热克铜矿是近十多年来在西南天山中新生代沉积盆地中发现的层控型超大型-大型矿床，相关学者对其物质来源、流体包裹体特征和成矿模式等已进行了较多的研究（刘增仁等，2011；李志丹等，2011；韩凤彬等，2013；贾润幸等，2016，2018；方维萱等，2017a，2017b），从其成矿背景来看，乌拉根铅锌矿以沉积作用为主，后期变形相对较弱；而萨热克铜矿北矿段则发生过强烈的构造变形和碎裂岩化，在其南矿段还有岩浆的叠加成矿作用，这种特殊的成矿环境为对比研究沉积盆地中成矿流体的运移规律提供了良好的条件，文章重点以乌拉根铅锌矿床和萨热克铜矿床不同岩（矿）石为研究对象，探讨沉积盆地在沉积成岩成矿作用、盆地构造变形过程及岩浆热液叠加改造过程中，成矿流

体与岩石抗压变形强度及其孔隙度和渗透率之间的耦合关系, 进而研究成矿流体在沉积盆地中的运移轨迹, 为在沉积盆地中寻找富矿体提供理论依据。

## 1 地质概况

工作区大地构造位置处于塔里木盆地西缘塔拉斯-费尔干纳断裂带边部(李向东和王克卓, 2000)。区域出露中元古代至新生代地层, 中元古代阿克苏群( $Pt_2ak$ )黑云母片岩、二云母片岩等构成沉积盆地基底, 目前已发现多处铜、铁等矿(化)点; 志留系为一套浅变质含破碎屑岩建造,

包括千枚岩、变质砂岩、大理岩夹石英岩等, 目前在该地层中已发现萨瓦尔顿大型金矿(金属储量近100 t); 其次为泥盆系碳酸盐岩、砂岩和页岩等, 石炭系碎屑岩夹碳酸盐岩等, 二叠系砾岩、含砾砂泥岩等, 三叠系碳酸盐岩仅零星出露; 中—新生代地层以陆相碎屑岩建造为主, 夹有少量含煤建造和碳酸盐岩建造, 发育有大量沉积型矿床, 目前已发现有乌拉根超大型铅锌矿、萨热克铜矿和多处铜、铅锌、铁、铝土和锶等矿(化)点。区域深大断裂主要以北东向和北西向为主, 少数断裂为近南北向和近东西向; 区域岩浆活动不强烈, 出露的岩浆岩主要有晚志留世—早泥盆世超镁铁质岩和晚白垩世辉绿岩脉(图1)。



1—第四系; 2—新近系; 3—渐新统—中新统克孜洛依组; 4—古近系; 5—白垩系; 6—侏罗系; 7—三叠系; 8—二叠系; 9—石炭系; 10—泥盆系; 11—志留系; 12—中元古代长城系阿克苏群; 13—晚志留世—早泥盆世超铁镁质岩石; 14—辉绿岩脉; 15—地质界线; 16—角度不整合; 17—正断层; 18—逆断层; 19—性质不明断层; 20—推断断层; 21—铜矿点; 22—铅锌矿点; 23—金矿; 24—锶矿点; 25—铁矿点; 26—铝土矿点; 27—铅锌铜矿点; 28—地名; 29—水系; 30—矿区; 31—构造缝合带; 32—逆冲推覆构造带

图1 西南天山区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of the southwestern Tianshan area

1—Quaternary system; 2—Neogene system; 3—Oligocene-Miocene Keziluoyi formation; 4—Paleogene system; 5—Cretaceous system; 6—Jurassic system; 7—Triassic system; 8—Permian system; 9—Carboniferous system; 10—Devonian system; 11—Silurian system; 12—Mesoproterozoic Changcheng system Akesu group; 13—Late Silurian-Early Devonian ultramafic rocks; 14—Diabasic dike; 15—Geological boundary; 16—Angular unconformity; 17—Fault; 18—Copper occurrence; 19—Lead-Zinc occurrence; 20—Gold deposit; 21—Strontium occurrence; 22—Iron occurrence; 23—Bauxite occurrence; 24—Copper polymetallic occurrence; 25—Place name; 26—River; 27—Mine area; 28—Structural suture zone; 29—Thrust nappe belt

区内乌拉根铅锌矿和萨热克铜矿均为层控型矿床。从乌拉根铅锌矿的成矿地质特征来看(刘增仁等, 2011), 乌拉根铅锌矿主要受控于下白垩统克孜勒苏群( $K_1kz$ ; 图2a), 该层依据岩性组合可划分出5个岩性段, 从下至上依次为: ①下白垩统克孜勒苏群第一岩性段( $K_1kz^1$ )为一套辫状河相褐红色粉砂质泥岩夹砂岩及砾岩; ②下白垩统克孜勒苏群第二岩性段( $K_1kz^2$ )为一套辫状河三角洲平原亚相紫灰色、暗褐红色岩屑砂岩与粉砂质泥岩互层, 岩屑砂岩中发育大型斜层理及板状交错层理和平行层理, 可见沙纹层理及波痕;

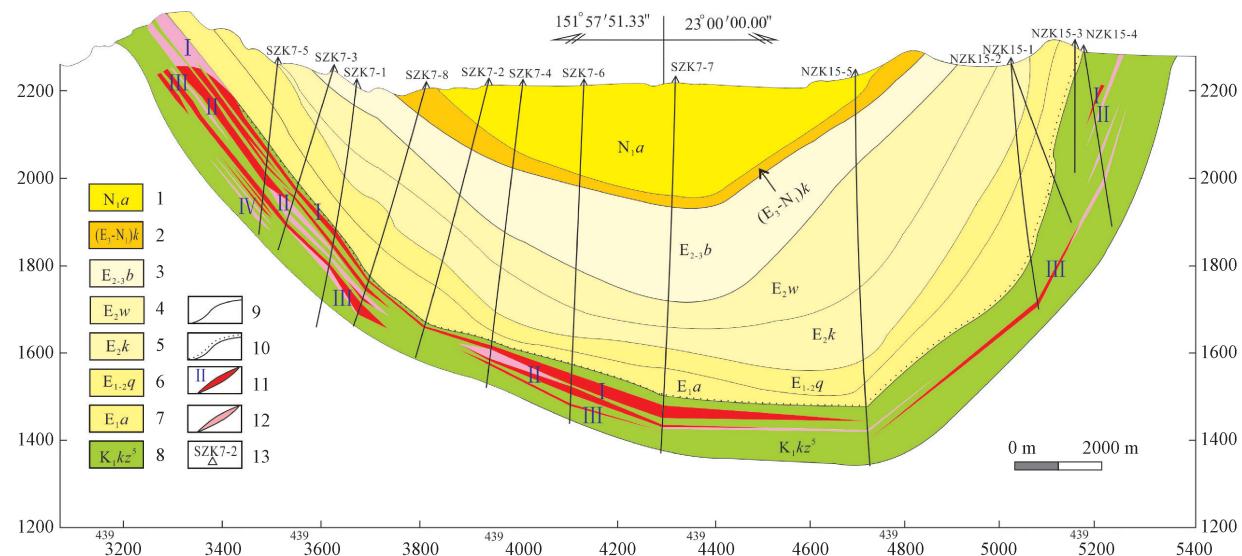
③下白垩统克孜勒苏群第三岩性段( $K_1kz^3$ )为一套辫状河三角洲前缘亚相灰白色厚层状含砾砂岩、岩屑石英砂岩、长石石英砂岩夹少量褐红色粉砂质泥岩, 局部为砂砾岩、砾岩; ④下白垩统克孜勒苏群第四岩性段( $K_1kz^4$ )为褐红色砂岩与粉砂质泥岩互层夹含砾砂岩、砾岩; ⑤下白垩统克孜勒苏群第五岩性段( $K_1kz^5$ )为灰白色、褐红色砂、砾岩夹砂岩与泥岩, 为乌拉根式铅锌矿的赋矿层位(图2b, 图3)。矿体在宽缓的乌拉根向斜南北两翼对称产出, 铅锌矿体呈层状、似层状, 总体产状与地层产状基本一致。



a—乌拉根露天采场; b—乌拉根含矿粗砂质细砾岩; c—萨热克铜矿北矿带含矿杂砾岩与上覆紫红色泥岩界线; d—萨热克铜矿北矿带含矿杂砾岩; e—萨热克铜矿南矿带辉绿岩脉切层侵入; f—萨热克铜矿南矿带辉绿岩脉顺层侵入

图2 乌拉根铅锌矿床和萨热克铜矿床岩不同(矿)石特征

Fig. 2 The characteristics of different rocks (ores) in the Wulagen Pb-Zn deposit and the Sareke copper deposit. (a) Open pit of the Wulagen deposit. (b) Ore-bearing coarse sandy fine conglomerate of the Wulagen deposit. (c) The boundary between the ore-bearing anagenite and the overlying purplish mudstone in the northern part of the Sareke copper deposit. (d) The boundary between the ore-bearing anagenite and the overlying purplish mudstone in the southern part of the Sareke copper deposit. (e) Cutting layer intrusion of the diabasic dike in the southern part of the Sareke deposit. (f) Concordant intrusion of the diabasic dike in the southern part of the Sareke deposit.



1—中新统安居安组; 2—渐新统—中新统克孜洛伊组; 3—始新统—渐新统巴什布拉克组; 4—始新统乌拉根组; 5—始新统卡拉塔尔组; 6—古新统—始新统齐姆根组; 7—古新统阿尔塔什组; 8—下白垩统克孜勒苏群五段; 9—地质界线; 10—角度不整合界线; 11—铅锌矿体; 12—铅锌矿化体; 13—钻孔

图3 乌拉根铅锌床S7-N15号勘探线剖面图 (据王勃等, 2013修改)

Fig. 3 Section of the exploration line S7-N15 in the Wulagan Pb-Zn deposit (Modified after Wang et al., 2013)

1—Miocene Anju'an formation; 2—Oligocene-Miocene Keziluoyi formation; 3—Eocene-Oligocene Bashibulake formation; 4—Eocene Wulagen formation; 5—Eocene Kalataer formation; 6—Palaeocene-Eocene Qimugen formation; 7—Palaeocene Aertashi formation; 8—The fifth section of the Kezilesu Group in the Lower Cretaceous; 9—Geological boundary; 10—Angular unconformity; 11—Pb-Zn orebody; 12—Pb-Zn mineralized body; 13—borehole

从萨热克铜矿的成矿地质特征来看 (贾润幸等, 2017, 2018), 萨热克铜矿体主要受控于萨热克巴依盆地中的上侏罗统库孜贡苏组 ( $J_3k$ ), 根据岩性组合及矿化特征进一步划分为库孜贡苏组上段 ( $J_3k^2$ ) 和下段 ( $J_3k^1$ ), 上侏罗统库孜贡苏组下段 ( $J_3k^1$ ) 岩石组合为砾岩、岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩、泥质细粒岩屑粉砂岩、泥质粉砂岩等; 上侏罗统库孜贡苏组上段 ( $J_3k^2$ ) 为紫红色—灰绿色, 岩石组合为砾岩、岩屑石英砂岩、泥质细砂岩, 该层可进一步划分为 5 个岩性段 (贾润幸等, 2016); 上侏罗统库孜贡苏组上段 ( $J_3kz^2$ ) 杂砾岩层为萨热克铜矿的赋矿层位 (图 4)。受萨热克盆地南北两侧逆冲推覆作用影响使萨热克盆地成为了一个近北东向分布的复式向斜盆地, 分布于萨热克向斜盆地北矿带的矿体倾角也随之变陡 (图 2c) 并发生层间滑动, 在铜矿体砾石中可见明显的碎裂岩化和沿砾石裂隙充填的细网脉化 (图 2d)。在萨热克巴依盆地南部辉绿辉长岩脉较为发育, 多呈岩脉的形式出露于白垩系第二岩性段 ( $K_1kz^2$ ) 地层中, 顺层和切层均有产出 (图 2e、2f), 辉绿辉长岩脉及上下盘砂岩发育退色蚀

变并常伴有明显的铜矿化现象。

## 2 样品采集与测试

为了研究含矿围岩的孔隙度和渗透率特征, 分别选取乌拉根铅锌矿和萨热克铜矿不同类型的含矿围岩样品进行采集, 采集的样品包括乌拉根铅锌矿 5 件和萨热克铜矿 25 件不同地层样品; 其中乌拉根铅锌矿主要为沉积成因的岩石样品, 而萨热克铜矿床的北矿带在成矿过程中受到过强烈的构造变形, 其南矿带经历了岩浆热液的叠加成矿作用, 分别对萨热克铜矿床的北矿带构造变形中含有胶结物的杂砾岩采集了 8 件样品, 萨热克铜矿床南矿带下白垩统克孜勒苏群第二岩性段 ( $K_1kz^2$ ) 经受岩浆蚀变作用的石英砂岩采集了 8 件样品。同时为了便于对比, 在萨热克铜矿床的北矿带采集了 6 件沉积成因的样品, 其中上侏罗统库孜贡苏组上段 ( $J_3k^1$ ) 采集了 3 件石英砂岩样品, 下白垩统克孜勒苏群第一岩性段 ( $K_1kz^1$ ) 采集了 3 件粉砂质泥岩样品; 在萨热克铜矿床南矿带下白垩统克孜勒苏群第二岩性段 ( $K_1kz^2$ ) 采集了 3 件

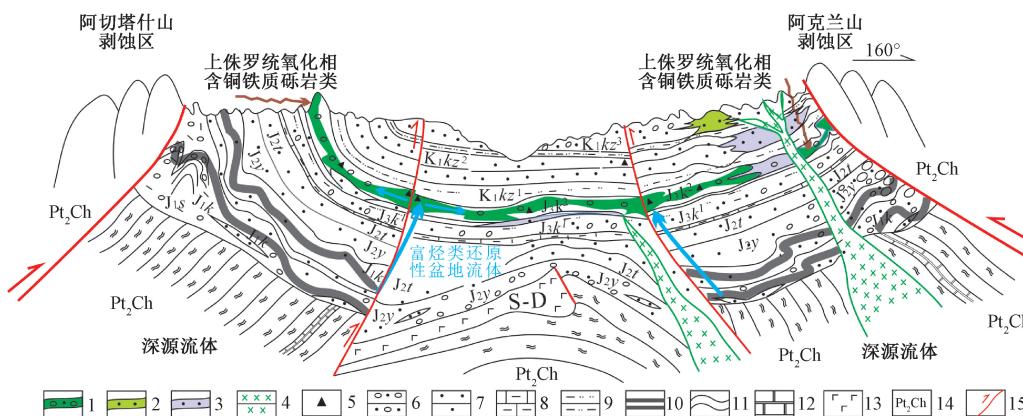


图 4 萨热克铜矿床成矿地质模型  
Fig. 4 Metallogenic model of the Sareke copper deposit

1—Glutenite-type copper mineralization; 2—Sandstone-type copper mineralization; 3—Sandstone-type Pb-Zn mineralization; 4—Diabasic dike; 5—Bituminization; 6—Glutenite; 7—Quartz Sandstone; 8—Argillaceous limestone; 9—Silty mudstone; 10—Coal bed; 11—Metamorphic schist; 12—Marble; 13—Basic volcanic rock; 14—Mesoproterozoic Changcheng system Akesu group; 15—Fault

沉积成因的岩石样品。样品重量一般 1000~2000 g 左右，样品加工前先切掉氧化或蚀变膜，选择新鲜的岩块磨制电子探针片后，孔隙度和渗透率测试由中国石油大学（北京）石油工程研究中心

实验室完成，测量方法按照中华人民共和国国家标准《岩心分析方法》(SY/T 5336-2006) 执行。测量仪器为 CoreLab 公司生产的 HPP 孔渗仪，分析结果见表 1。

表 1 乌拉根-萨热克不同岩（矿）石渗透率和孔隙度测试结果

Table 1 Test results of permeability and porosity for different rocks (ores) from the Wulagen deposit and the Sareke deposit

序号	采样位置	样号	地质特征简述	地层代号	气测渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%	备注
1	乌拉根	A01	粗砂质细砾岩	$K_1 kz^5$	2.9138	10.100	矿化蚀变
2		A02	岩屑砂岩		0.0395	10.920	
3		A03	浅紫红色含砾砂岩		71.1967	23.880	
4		A04	灰绿色含砾粗砂岩		80.3025	23.450	
5		A05	深紫红色砂质泥岩		10.4536	18.120	
6	萨热克铜矿北矿带	B01	褐红色粉砂质泥岩	$K_1 kz^1$	0.00212	1.555	沉积成因
7		B02	褐红色粉砂质泥岩		0.00311	1.409	
8		B03	褐红色粉砂质泥岩		0.00295	1.212	
9		B04	杂砾岩		0.04306	2.662	
10		B05	杂砾岩		0.09354	2.423	盆地改造 弱碳酸盐化胶结
11		B06	杂砾岩		0.04786	2.140	
12	萨热克铜矿南矿带	B08	含铜砾岩	$J_3 k^2$	0.01010	1.798	盆地改造
13		B09	含铜砾岩		0.00353	1.552	
14		B10	含铜砾岩		0.06578	1.767	
15		B11	含铜砾岩	$J_3 k^1$	0.00815	1.331	强碳酸盐-硅化-硫化物胶结
16		B12	含铜砾岩		0.02900	1.750	
17		B13	灰绿色石英砂岩		0.01364	3.212	沉积成因
18		B14	灰绿色石英砂岩		0.01454	3.129	
19		B15	灰绿色石英砂岩		0.02514	4.819	
20		C01	紫红色石英砂岩	$K_1 kz^2$	2.33821	9.080	沉积成因
21		C02	浅灰绿色石英砂岩		0.18142	8.950	
22		C03	灰白色石英砂岩		0.06108	7.700	
23		C04	灰白色石英砂岩 (辉绿岩脉上盘)	$K_1 kz^2$	0.01599	6.340	岩浆热液蚀变
24		C05	灰白色石英砂岩 (辉绿岩脉下盘)		0.02333	3.460	
25		C06	灰白色石英砂岩 (辉绿岩脉上盘)		0.08403	5.890	
26		C07	灰白色含铜石英砂岩 (辉绿岩脉下盘)		0.02381	2.500	
27		C08	灰白色石英砂岩 (辉绿岩脉上盘)		0.15856	6.710	
28		C09	灰白色石英砂岩 (辉绿岩脉下盘)		0.02705	3.790	
29		C10	灰白色石英砂岩 (辉绿岩脉上盘)		0.04870	5.250	
30		C11	灰白色石英砂岩 (辉绿岩脉下盘)		0.03250	4.270	

### 3 岩(矿)石特征

#### 3.1 岩(矿)石组构特征

##### 3.1.1 乌拉根矿区主要岩(矿)石特征

粗砂质细砾岩(铅锌矿石):构造主要有块状构造、浸染状、条带状、草莓状;结构以粒状结晶结构为主,少数为胶状、结核状、圆球状结构;岩石主要有砾石(10%~30%)、砂质(70%~80%)及少量金属硫化物(<10%)和胶结物组成;砾石以石英、硅质岩等为主,磨圆度中等,粒径0.2~0.5 cm,个别可达1 cm以上;砂质主要为石英和长石,粒径在0.2~0.5 mm之间;金属硫化物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿等多呈微细粒浸染状分布于砾间胶结物中,尤其是沿砾石边部分布;胶结物主要为石膏、方解石、白云石等(刘增仁等,2011)。

##### 3.1.2 萨热克矿区主要岩(矿)石组构特征

杂砾岩(铜矿石):块状构造、网脉状构造,砂砾状结构,主要由砾石(85%~90%)、少量砂屑(含量<5%)和填隙胶结物组成(5%~10%),可见明显碎裂化;砾石成分主要为泥岩、铁质碳酸盐岩、石英砂岩、泥质细砂岩、基性火山岩、石英岩、硅质板岩等,分选性较差,粒径一般在0.3~5 cm之间,个别达到7 cm以上,磨圆度中等,多呈次圆状;填隙胶结物主要为方解石(1%~5%)、辉铜矿(0.5%~5%)和少量次生石英(0.5%~1%)等,部分矿石中的胶结物主要为白云石;胶结物多沿砾石间隙充填分布,少数沿砾石碎裂隙充填分布,其中辉铜矿呈半自形—他形粒状集合体,粒径0.06~1.2 mm,与方解石、白云石或次生石英伴生(贾润幸等,2018)。

沉积成因石英砂岩:块状构造,细粒砂状结构,主要由石英石(50%~55%)、长石(30%~35%),岩屑(10%)、填隙物(5%)等组成;其中石英以次棱角状为主,部分为次圆状,主要粒径在0.06~0.25 mm之间,砂屑分选性较好,磨圆度中等—较差;长石呈次棱角状—次圆状,粒径为0.05~0.25 mm;岩屑成分主要为微晶石英集合体构成,磨圆度一般较好;填隙物主要在砂屑之间呈接触式—压嵌式胶结;在砂屑间隙分布有少量粉砂、碳酸盐矿物白云石,其粒径0.05~0.1 mm,呈稀散状分布,可见少量星点状金属矿物,主要为

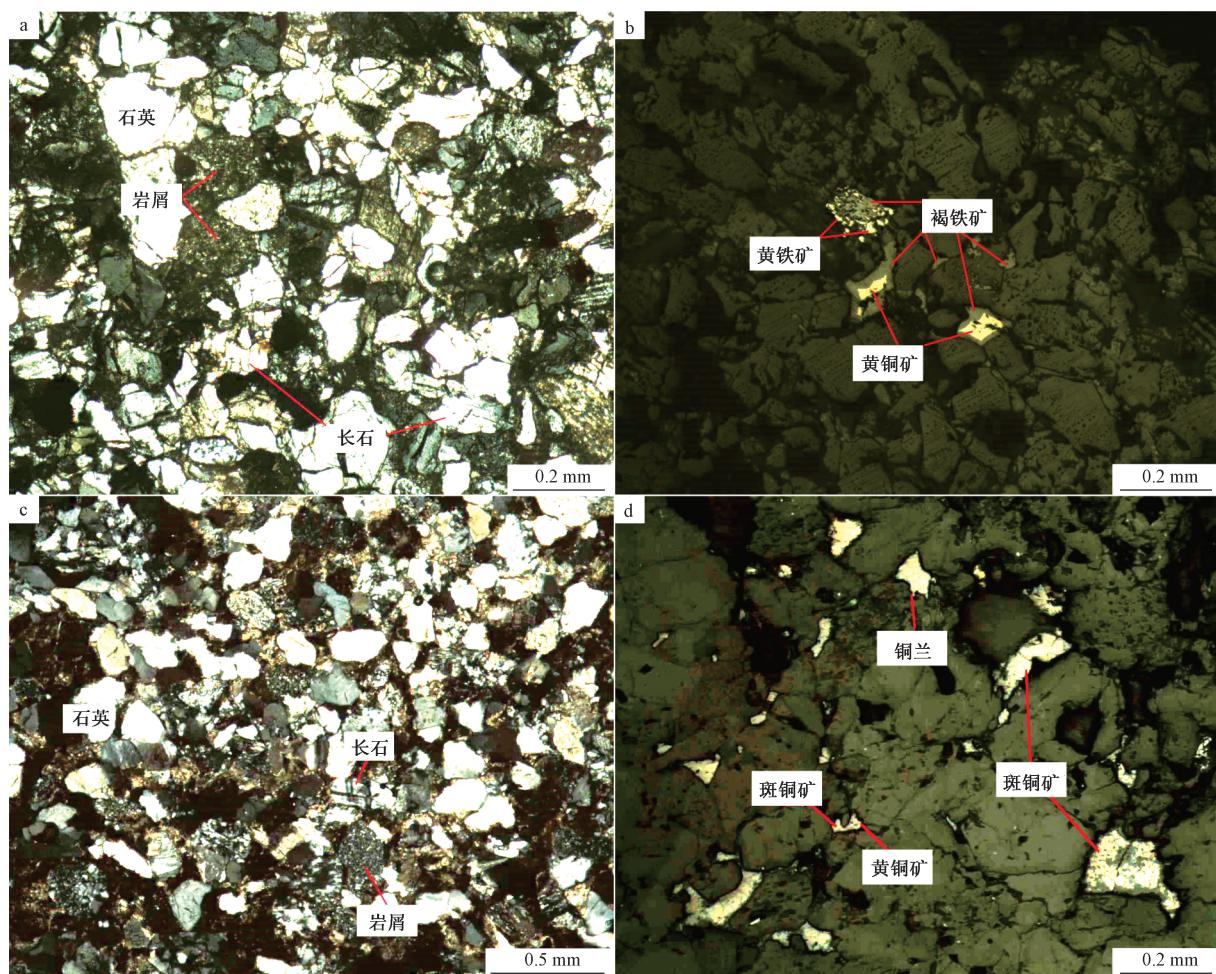
微细粒黄铜矿和黄铁矿等(图5a、5b)。

岩浆热液蚀变石英砂岩:块状构造,细粒砂状结构,岩石主要由石英(45%~50%)、长石(20%~25%)、岩屑(15%)、胶结物(10%~15%)等组成;其中石英以次棱角状为主,部分为次圆状,主要粒径在0.06~0.25 mm之间,砂屑分选性较好,磨圆度中等—较差;长石主要为正长石、斜长石,含少量微斜长石,次棱角状—次圆状,粒径为0.05~0.25 mm;岩屑成分主要由微晶石英集合体构成,分选性、磨圆度一般较好;胶结物成分为铁白云石、绿泥石等充填于砂屑间隙,呈孔隙式胶结,可见金属矿物具星点状构造,其中黄铜矿微量,不规则状,粒径0.01~0.15 mm;斑铜矿少量,不规则状,粒径0.05~0.4 mm;铜蓝微量,沿斑铜矿晶粒边缘或裂理中对其进行交代(图5c、5d)。

#### 3.2 孔隙度与渗透率特征

从样品测试结果(表1)来看,乌拉根铅锌矿沉积成因的岩石孔隙度和渗透率相对最大,孔隙度为10.12%~23.88%,平均为21.82%;渗透率为 $10.4536 \times 10^{-3}$ ~ $80.3025 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $53.9843 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;总体上含砾粗砂岩大于含砾砂岩,含砾砂岩大于砂质泥岩。在乌拉根铅锌矿主要的含矿层下白垩统克孜勒苏群第一岩性段( $K_1kz^5$ )中,发生铅锌矿化蚀变后粗砂质细砾岩和岩屑砂岩的孔隙度分别10.100%和10.920%;渗透率分别为 $0.0395 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $2.9138 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。上述结果表明岩石的孔隙度和渗透率与岩石中的砾石含量、砂质粗细和后期的蚀变作用密切相关。

萨热克铜矿北矿带下白垩统克孜勒苏群第一岩性段( $K_1kz^1$ )3件沉积成因的褐红色泥质粉砂岩孔隙度为1.212%~1.555%,平均为1.393%;渗透率为 $0.00212 \times 10^{-3}$ ~ $0.00311 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.00273 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。上侏罗统库孜贡苏组上段( $J_3k^2$ )3件经历盆地改造弱碳酸盐化胶结后的杂砾岩孔隙度为2.140%~2.662%,平均为2.408%;渗透率为 $0.04306 \times 10^{-3}$ ~ $0.09354 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.06149 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;其下部5件经历盆地改造发生强碳酸盐—硅化—硫化物胶结后的杂砾岩孔隙度为1.331%~1.798%,平均为1.640%;渗透率为 $0.00353 \times 10^{-3}$ ~ $0.06578 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.02331 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。上侏罗统库孜贡苏组下段( $J_3k^2$ )3件沉积成因的灰绿色砂岩孔隙度为3.129%~4.819%,平



a—沉积成因石英砂岩（正交光）；b—沉积成因石英砂岩（反射光）；c—岩浆热液蚀变石英砂岩（正交光）；d—岩浆热液蚀变石英砂岩（反射光）

图 5 萨热克铜矿岩矿石显微组构特征

Fig. 5 Feature of micro-fabric for the rocks (ores) of the Sareke copper deposit. (a) Sedimentary quartz sandstone (orthogonal polarized light). (b) Sedimentary quartz sandstone (reflected light). (c) Magmatic hydrothermal alteration of quartz sandstone (orthogonal polarized light). (d) Magmatic hydrothermal alteration of quartz sandstone (reflected light)

均为  $3.720\%$ ；渗透率为  $0.01364 \times 10^{-3} \sim 0.02514 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为  $0.01778 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

萨热克铜矿南矿带下白垩统克孜勒苏群第二岩性段 ( $K_1 kz^2$ ) 3 件沉积成因的石英砂岩孔隙度为  $7.770\% \sim 9.080\%$ ，平均为  $8.577\%$ ；渗透率为  $0.06108 \times 10^{-3} \sim 2.33821 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为  $0.86024 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。萨热克铜矿南矿带 4 组辉绿岩脉的上下盘围岩石英砂岩样品的孔隙度为  $2.500\% \sim 6.710\%$ ，平均为  $4.776\%$ ；渗透率为  $0.01599 \times 10^{-3} \sim 0.15896 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为  $0.05175 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此外，对比 4 组辉绿岩上下盘围岩石英砂岩样品的孔隙度和渗透率发现，4 件上盘围岩样品的孔隙度为  $5.250\% \sim 6.710\%$ ，平均为  $6.048\%$ ；渗透率为  $0.01599 \times 10^{-3} \sim 0.15896 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为  $0.07682 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；4 件下盘样品孔隙度为  $2.500\% \sim 4.270\%$ ，平均为  $3.505\%$ ；渗透率为  $0.02333 \times 10^{-3} \sim 0.02705 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为  $0.02667 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，上盘围岩的孔隙度和渗透率通常明显高于下盘围岩的孔隙度和渗透率。上述结果表明，在萨热克铜矿南矿带下白垩统克孜勒苏群第二岩性段 ( $K_1 kz^2$ ) 的石英砂岩在岩浆热液蚀变后，其渗透率和孔隙度都明显小于远离辉绿岩脉未蚀变的石英砂岩样品，同时随着岩浆热液蚀变强度的增强，岩石的孔隙度和渗透率具有变小的趋势。

### 3.3 岩（矿）石力学参数

乌拉根砂砾岩型铅锌矿和萨热克杂砾岩型铜矿不同岩（矿）石力学参数见表 2。从表 2 中可知，乌拉根铅锌矿床顶板为白云岩，单轴抗压强度在饱

和状态下为 20.0 MPa、烘干状态下为 38.8 MPa, 抗拉强度在饱和状态下为 1.46 MPa、烘干状态下为 2.6 MPa, 单轴压缩变形的弹性模量为 5.59 MPa、变形模量为 8.14 MPa, 泊松比为 0.22, 属于较软岩, 岩体基本质量级别按照《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001) 划分为Ⅱ—Ⅲ级。乌拉根铅锌矿床矿体为砂砾岩, 单轴抗压强度在饱和状态下为 2.43 MPa、烘干状态下为 7.24 MPa, 抗拉强度在饱和状态下为 0.08 MPa、烘干状态下为 0.22 MPa,

单轴压缩变形的弹性模量为 0.36 MPa、变形模量为 0.198 MPa, 泊松比为 0.35, 属于极软岩, 岩体基本质量级别为V级。乌拉根铅锌矿床矿体底板为砂岩, 单轴抗压强度在饱和状态下为 2.6 MPa、烘干状态下为 10.9 MPa, 抗拉强度在饱和状态下为 0.28 MPa、烘干状态下为 1.07 MPa, 单轴压缩变形的弹性模量为 0.23 MPa、变形模量为 0.24 MPa, 泊松比为 0.35, 属于极软岩, 岩体基本质量级别为V级。

表 2 乌拉根-萨热克不同岩(矿)石力学参数

Table 2 Mechanical parameters of different rocks (ores) from the Wulagen deposit and the Sareke deposit

序号	采样位置	样号	岩石名称	地层代号	单轴抗压强度/MPa		抗拉强度/MPa		单轴压缩变形/MPa		泊松比	资料来源
					饱和	烘干	饱和	烘干	弹性模量	变形模量		
1	乌拉根 铅锌矿	R10-岩-719	(顶板) 白云岩	E <sub>1</sub> a	20.0	38.8	1.46	2.6	5.59	8.14	0.22	王勃等, 2013
2		R10-岩-720	(矿体) 粗砂质细砾岩	K <sub>1</sub> kz <sup>5</sup>	2.43	7.24	0.08	0.22	0.36	0.198	0.35	
3		R10-岩-721	(底板) 砂岩	K <sub>1</sub> kz <sup>1</sup>	2.6	10.9	0.28	1.07	0.23	0.24	0.35	
4	萨热克 铜矿	Y1、Y2、Y6、Y10	(顶板) 粉砂岩	K <sub>1</sub> kz <sup>1</sup>	64.3	96.1	4.56	8.89	19.8	15.6	0.24	陈和焰 等, 2012
5		Y3、Y4、Y7、Y8	(矿体) 杂砾岩	J <sub>3</sub> k <sup>2</sup>	39.0	117.0	2.69	8.39	14.6	11.0	0.25	
6		Y5、Y9、Y11、Y12	(底板) 含砾砂岩	J <sub>3</sub> k <sup>1</sup>	34.7	106.0	3.74	10.9	7.83	6.12	0.25	

萨热克铜矿床矿体顶板岩石主要为粉砂岩, 单轴抗压强度在饱和状态下平均为 64.3 MPa、烘干状态下为 96.1 MPa, 抗拉强度在饱和状态下平均为 4.56 MPa、烘干状态下为 8.89 MPa, 单轴压缩变形的弹性模量为 19.8 MPa、变形模量为 15.6 MPa, 泊松比为 0.24, 属于坚硬岩岩体基本质量级别为Ⅱ—Ⅲ级。萨热克铜矿床矿体为杂砾岩, 单轴抗压强度在饱和状态下平均为 39.0 MPa、烘干状态下为 117 MPa, 抗拉强度在饱和状态下平均为 2.69 MPa、烘干状态下为 8.39 MPa, 单轴压缩变形的弹性模量平均为 14.6 MPa、变形模量为 11.0 MPa, 泊松比为 0.25, 属于较坚硬岩, 岩体基本质量级别为Ⅲ级。萨热克铜矿床矿体底板为含砾砂岩, 单轴抗压强度在饱和状态下平均为 34.7 MPa、烘干状态下为 106 MPa, 抗拉强度在饱和状态下平均为 3.74 MPa、烘干状态下为 10.9 MPa, 单轴压缩变形的弹性模量平均为 7.83 MPa、变形模量为 6.12 MPa, 泊松比为 0.25, 属于较坚硬岩, 岩体基本质量级别为Ⅲ级。

## 4 讨论

### 4.1 盆地沉积-改造成矿作用

沉积盆地中岩石的孔隙度和渗透率对成矿流体的运移具有非常大的影响作用 (杨瑞琰等,

2005), 因而岩石的孔隙度和渗透率也是影响成矿作用的重要因素之一。在不同的成矿背景 (环境) 下, 由于岩石孔隙度和渗透率的不同, 矿体往往也会表现为不同的产出方式和矿石组构特征。从表 1 可以看出, 乌拉根层控型铅锌矿床中的下白垩统克孜勒苏群各层 (K<sub>1</sub>kz<sup>1</sup>、K<sub>1</sub>kz<sup>3</sup>、K<sub>1</sub>kz<sup>4</sup>) 岩石总体为沉积成因, 由于不同沉积层理中岩(矿)石组构的不同, 其孔隙度和渗透率也存在明显的差异, 总体上含砾越多、砂质越粗的岩石孔隙度和渗透率相对越大。在乌拉根层控型铅锌矿床中的含矿层下白垩统克孜勒苏群第五段 (K<sub>1</sub>kz<sup>5</sup>) 含粗砂质细砾岩以沉积作用为主, 在受后期弱改造作用后表现为铅锌矿体在宽缓的乌拉根向斜南北两翼对称产出, 由于岩石经历后期的铅锌矿化蚀变后其成岩成矿后的孔隙度和渗透率则具有明显变小的趋势, 铅锌矿多呈细粒状沿砂砾石孔隙进行胶结, 肉眼很难见到细脉状胶结物。

萨热克层控型铜矿带的成矿作用先后经历了晚侏罗世的沉积成矿作用和喜马拉雅运动的改造成矿作用, 萨热克巴依盆地受喜马拉雅运动影响发生南北向挤压作用而呈复式向斜构造, 在赋矿的上侏罗统库孜贡苏组上段杂砾岩中可见明显的碎裂岩化和由硅化-碳酸盐化-辉铜矿等形成的细网脉状充填胶结物。从表 1 中可见到萨热克铜矿带下白垩统克孜勒苏群第一岩性段 (K<sub>1</sub>kz<sup>1</sup>)

褐红色粉砂质泥岩的孔隙度和渗透率最小, 王环玲等(2015)通过实验证明对于低渗透岩石, 随着围压的增大, 孔隙率和渗透率呈指数函数关系递减, 所以上部的褐红色粉砂质泥岩对其下部的成矿流体具有明显的圈闭作用。上侏罗统库孜贡苏组上段( $J_3k^2$ )杂砾岩从理论上讲, 因为该组段杂砾岩中的砾石颗粒粗大, 砾石间的孔隙度和渗透率应该相对较大, 但由于受构造作用和后期成矿流体沿该组段砾石裂隙的充填和胶结作用(贾润幸等, 2017), 该组段杂砾石中的孔隙度和渗透率反而明显小于上覆下白垩统克孜勒苏群中砂砾岩类岩石的孔隙度和渗透率, 同时充填和胶结作用越强烈, 其孔隙度和渗透率越小。如同为上侏罗统库孜贡苏组上段( $J_3k^2$ )的杂砾岩, 其下部经历强烈碳酸盐化-硅化-硫化物胶结的含铜杂砾岩孔隙度(平均1.640%)和渗透率(平均 $0.0233 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )均小于其上部经历弱碳酸盐化胶结杂砾岩的孔隙度(平均为2.408%)和渗透率(平均 $0.0615 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 表明随着成矿流体蚀变胶结强度的增强, 蚀变胶结后的岩(矿)石孔隙度和渗透率具有变小的趋势。

对比乌拉根铅锌矿床与萨热克铜矿床的岩石孔隙度与渗透率(表1), 乌拉根铅锌矿床岩(矿)石中的孔隙度和渗透率明显大于萨热克铜矿中对应的下白垩统岩石, 陈占清和缪协兴(2001)通过研究影响岩石渗透率的因素后认为岩石的内部结构是决定岩石渗透率分散的根本原因。通常在沉积成岩作用情况下, 岩石中的砾石砾径越大, 砾间间隙越大, 岩石的孔隙度和渗透率也越大。从两者含矿岩石中砾石砾径和抗压变形强度来看(表2), 乌拉根铅锌矿床赋矿岩石的砾石砾径和抗压变形强度均小于萨热克铜矿的赋矿岩石, 同时乌拉根铅锌矿床赋矿岩石的泊松比大于萨热克铜矿的赋矿岩石, 当岩石在后期遭受构造应力发生变形后, 岩石硬度越大, 越容易发生碎裂岩化而形成较多的微裂隙, 随着其孔隙度和渗透率的增大, 也越有利于成矿流体在岩石中的渗透、充填和沉淀。

从乌拉根层控型铅锌矿和萨热克层控型铜矿赋矿层位的岩石组构特征来看, 矿体主要赋存在含砾砂岩(乌拉根铅锌矿)或杂砾岩层(萨热克铜矿)中, 且都与切层断裂带有关。该切层断裂带是成矿流体主要的运移通道, 上述含砾砂岩

(乌拉根铅锌矿)或杂砾岩层(萨热克铜矿)是成矿流体主要的储存场所。当沉积盆地在构造应力作用驱动下发生变形, 成矿流体沿着切层断裂带上升后, 会有选择性地沿着孔隙度和渗透率相对较大的含砾砂岩(乌拉根铅锌矿)或杂砾岩层(萨热克铜矿)进行渗滤、扩散、充填和交代作用, 岩石中的孔隙度和渗透率越大, 形成的脉状胶结物越明显, 生成的金属硫化物颗粒越大。其上下盘孔隙度和渗透率相对较小的岩层(如粉砂质泥岩、砂岩等)则形成天然的圈闭层(图4)。

#### 4.2 盆地沉积-岩浆叠加成矿作用

在萨热克层控型铜矿南矿带的成矿作用先后经历了明显的早白垩世沉积成矿作用和晚白垩世以后的岩浆叠加成矿作用。晚白垩世以后侵入的辉绿辉长岩脉产状在萨热克巴依盆地南部的下白垩统第二段( $K_1kz^2$ )石英砂岩地层具有多样化, 可见单个大脉切层侵入或顺层侵入, 也可见多条细脉带沿石英砂岩层间裂隙顺层侵入, 并在辉绿岩脉两侧形成了明显的褪色化蚀变相带。从萨热克巴依盆地南部辉绿岩脉群岩浆热液蚀变围岩及远离岩脉沉积成因岩石的孔隙度和渗透率的分析结果来看(表1), 3件沉积成因石英砂岩的孔隙度平均为8.577%, 渗透率平均 $0.8602 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 8件岩浆热液蚀变后的石英砂岩的孔隙度平均4.776%, 渗透率平均为 $0.0518 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 岩浆热液蚀变后石英砂岩的孔隙度和渗透率明显小于沉积成因的石英砂岩的孔隙度和渗透率。从辉绿岩脉上下盘蚀变围岩孔隙度和渗透率的对比来看, 4件上盘石英砂岩的孔隙度和渗透率平均值分别为6.048%和 $0.0768 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 4件下盘石英砂岩的孔隙度和渗透率平均值分别为3.505%和 $0.0267 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 辉绿岩脉下盘石英砂岩的孔隙度和渗透率明显小于上盘石英砂岩的孔隙度和渗透率。

对比沉积成因和遭受岩浆热液蚀变后两类石英砂岩的矿物组构特征发现, 遭受岩浆热液蚀变后石英砂岩中的胶结物和金属硫化物明显增多, 胶结物主要成分为铁白云石、绿泥石, 充填于砂屑间隙, 呈孔隙式胶结。金属硫化物主要为细粒黄铜矿、斑铜矿等呈星点状沿石英等间隙充填分布。上述结果表明靠近辉绿辉长岩脉石英砂岩中孔隙度和渗透率的变小与岩浆热液的蚀变密切相关。岩浆在侵入过程中岩浆含矿热液对围岩的热蚀变作用主要发生在岩石构造裂隙和矿物间隙等,

热液蚀变作用产生的绿泥石化、碳酸盐化和沿石英矿物间隙充填的金属硫化物等是导致围岩的孔隙度和渗透率明显变小的主要原因, 同时正是由于岩浆含矿热液对下盘的蚀变作用强度和矿化强度明显高于上盘, 也造成了蚀变后下盘围岩中的孔隙度和渗透率小于上盘围岩。该区的钻探结果也证明了下盘的矿化要明显高于上盘。因此, 岩浆热液蚀变围岩的孔隙度和渗透率变低, 也是萨热克巴依盆内岩浆热液叠加成岩作用的构造岩相学标志。从下盘矿化强度高于上盘矿化强度的特征来看, 表明随着深度增加, 矿化强度具有增强的趋势。在萨热克巴依盆地南部辉绿辉长岩脉群的大量出现, 预示着深部可能存在重要的岩浆成矿物质来源, 因而深部可能具有进一步的找矿潜力。

## 5 结论

(1) 从西南天山中新生代乌拉根铅锌矿床和萨热克铜矿床岩石的特征来看, 以沉积成岩成矿作用为主并赋存于下白垩统克孜勒苏群岩石中的乌拉根铅锌矿体及上下围岩属于极软岩, 以沉积成岩-后期改造成矿作用为主赋存于上侏罗统库孜贡苏组杂砾岩中的萨热克铜矿体及上下盘围岩属于较坚硬岩。总体上, 乌拉根铅锌矿床成岩成矿后岩石的孔隙度和渗透率比萨热克相应岩石的孔隙度和渗透率明显要小。

(2) 在西南天山中新生代层控型矿床中, 当深部的成矿流体沿切层断裂上升后, 成矿流体会优先选择孔隙度和渗透率最大的岩层(如乌拉根地区的粗砂质细砾岩和萨热克地区的杂砾岩)进行渗滤、扩散、充填和交代作用, 岩石中孔隙度和渗透率越大, 形成的金属硫化物颗粒越大, 胶结的脉体越粗大; 成矿流体的蚀变胶结强度越强, 导致成岩成矿后岩(矿)石中的孔隙度和渗透率越小。

(3) 在萨热克巴依盆地南部有辉绿岩脉成群产出, 岩浆热液的蚀变作用使上下盘围岩的孔隙度和渗透率明显变小, 同时下盘围岩的孔隙度和渗透率明显小于上盘, 这主要与岩浆热液的蚀变作用和强度有关。岩浆热液蚀变后石英砂岩中的胶结物和金属硫化物明显增多, 且下盘的蚀变作用强度明显要高于上盘。

## References

- CHEN H Y, WANG H B, WU K Q, et al., 2012. The exploration report of North part of Sareke copper deposit in Wuqia, Xinjiang Xinjiang [R]. Kashi: Huixiang Yongjin Mining Co., Ltd. (in Chinese)
- CHEN Z Q, MIAO X X, 2001. The influenced factors of rock permeability [J]. Ground Pressure and Strata Control (2): 83-84, 86. (in Chinese) DENG J, CHEN X M, FANG Y, et al., 2000. Characteristics of late Paleozoic fluid system of the Yuebei sedimentary basin [J]. Earth Science Frontiers, 7 (3): 95-102. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, JIA R X, GUO Y Q, et al., 2016. Hydrocarbon-rich basin fluid with reductibility and metallogenetic mechanism for Glutenite-type Cu-Pb-Zn-U deposits in the western of Tarim basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 38 (6): 727-752. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, WANG L, LU J, et al., 2017a. Chloritization facies and restoration of heat flux for tectonic-magmatic-thermal events of sareke copper mine in the Xinjiang Uygur autonomous region, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 37 (5): 661-675. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, JIA R X, WANG L, 2017b. Types of basin fluids, mechanism of discolored alterations and metal mineralizations of Glutenite-type Cu-Pb-Zn-U deposits in intercontinental Red-Bed basin of the Western Tarim basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 39 (5): 585-619. (in Chinese with English abstract)
- FENG J W, DAI J S, LIU M L, 2011. Theoretical model about fracture porosity, permeability and stress field in the low-permeability sandstone [J]. Journal of Geomechanics, 17 (4): 303-311. (in Chinese with English abstract)
- GU J Y, FAN T Z, FANG H, et al., 2001. Fluid migration and oil reservoirs in the Tarim Basin [J]. Geological Review, 47 (2): 201-206. (in Chinese with English abstract)
- HAN F B, CHEN Z L, LIU Z R, et al., 2013. Organic geochemistry of Wulagen Pb-Zn deposit in Southwest Tianshan Mountains and its implications [J]. Mineral Deposits, 32 (3): 591-602. (in Chinese with English abstract)
- JIA R X, FANG W X, WANG L, et al., 2016. Mineral prediction methods in Sareke copper polymetallic deposit, Xinjiang [J]. Mineral Exploration, 7 (6): 965-970. (in Chinese with English abstract)
- JIA R X, FANG W X, WANG L, et al., 2017. Hydrocarbon-rich reducing basin fluid with in Sareke Glutenite type copper deposit, Wuqia, Xinjiang [J]. Geotectonica et Metallogenesis, 41 (4): 721-733. (in Chinese with English abstract)
- JIA R X, FANG W X, LI J X, et al., 2018. Re-Os isotopic dating and its geological significance from Sareke copper deposit in Wuqia, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 37 (1): 151-162. (in Chinese with English abstract)
- LI X D, WANG K Z, 2000. The Tethys framework and its tectonic

- significance of southwest Tarim and the adjacent region [J]. Xinjiang Geology, 18 (2): 113-120. (in Chinese with English abstract)
- LI Z D, XUE C J, XIN J, et al., 2011. Geological characteristics and sulfur-lead-isotope geochemistry of Sareke copper deposit in Wuqia County, Xinjiang [J]. Geoscience, 25 (4): 720-729. (in Chinese with English abstract)
- LIU J J, LIU X G, 2001. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media [J]. Journal of Geomechanics, 7 (1): 41-44. (in Chinese with English abstract)
- LIU J M, YE J, LIU J J, et al., 2000. Oil accumulation and ore-forming mechanism [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 19 (3): 164-171. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z R, TIAN P R, ZHU X Y, et al., 2011. Ore-forming geological characteristics and metallogenic model on Wulagen lead-zinc deposit, Xinjiang [J]. Mineral Exploration, 2 (6): 669-680. (in Chinese with English abstract)
- OU G X, LI L Q, SUN Y M, 2006. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary basins [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 25 (1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- SHANG C J, KANG Y S, DENG Z, et al., 2019. The influence mechanism of filled natural fractures on the variation law of shale permeability in loading process [J]. Journal of Geomechanics, 25 (3): 382-391. (in Chinese with English abstract)
- WANG B, MO X H, YANG Z J, 2013. The exploration report of Wulugantashi lead-zinc deposit in Wuqia, Xinjiang [R]. Kashi: Zijin Mining Group Co., Ltd. (in Chinese)
- WANG G Z, HU R Z, SU W C, et al., 2003. Fluid flow and mineralization of Youjiang Basin in the Yunnan-Guizhou-Guangxi area, China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46 (1): 99-109.
- WANG H L, XU W Y, ZUO J, et al., 2015. Evolution law of the permeability and porosity for low-permeability rock based on gas permeability test [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 46 (2): 208-216. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z L, 2000. Development characteristics of fluid dynamics in reformed basins [J]. Oil & Gas Geology, 21 (1): 24-27, 37. (in Chinese with English abstract)
- WU G Y, LIANG J P, YANG J G, et al., 2012. Application of basin-tectonogeny coupling in study of abnormally high pressured basin fluids [J]. Petroleum Geology & Experiment, 34 (3): 223-233. (in Chinese with English abstract)
- WU W, GU B H, WANG K, et al., 2009. Code for investigation of geotechnical engineering/ (GB 50021-2001) [S]. Beijing: China building industry press. (in Chinese)
- XUE C J, CHI G X, CHEN Y C, et al., 2007. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping Basin, Yunnan, SW-China: evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling [J]. Earth Science Frontiers, 14 (5): 147-157. (in Chinese with English abstract)
- XUE C J, XUE W, KANG M, et al., 2008. The fluid dynamic processes and its uranium mineralization of sandstone-type in the Ordos Basin, China [J]. Geoscience, 22 (1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- XIE X N, CHENG J M, MENG Y L, 2009. Basin Fluid flow and associated diagenetic processes [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27 (5): 863-871. (in Chinese with English abstract)
- YANG Q J, LIU L, CHI Y L, et al., 2000. The basic type and drive mechanism of basins fluid [J]. World Geology, 19 (1): 15-19. (in Chinese with English abstract)
- YANG R Y, MA D S, PAN J Y, 2005. Effect of permeability on the thermal and fluid fields of ore-forming fluids: a case study from Xikuangshan Antimony deposit [J]. Geological Science and Technology Information, 24 (3): 80-84. (in Chinese with English abstract)
- YU Y X, WANG Z X, ZHANG K X, et al., 2020. Advances in quantitative characterization of shale pore structure by using fluid injection methods [J]. Journal of Geomechanics, 26 (2): 201-210. (in Chinese with English abstract)
- ZENG Z P, WANG Q J, LI J, et al., 2019. Study on seepage characteristics of tight reservoirs under multi-field coupling [J]. Journal of Geomechanics, 25 (6): 1068-1074. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO C Y, JIN J Q, 2009. Fluid drainage system of petrolierous basins and its hydrocarbon accumulation principle [J]. Acta Petrolei Sinica, 30 (5): 635-641. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU L M, ZHANG D H, XI B B, 2008. Rock permeability, fluid flow and hydrothermal ore-forming processes [J]. Earth Science Frontiers, 15 (3): 299-310. (in Chinese with English abstract)
- ZOU H Y, HAO F, ZHANG B Y, et al., 2005. Fluid-conduit framework and its control on petroleum accumulation in the Junggar Basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 30 (5): 609-616. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈和焰, 王华斌, 吴克强等, 2012. 新疆维吾尔自治区乌恰县萨热克铜矿床北矿段勘探报告 [R]. 喀什: 新疆汇祥永金矿业有限公司。
- 陈占清, 缪协兴, 2001. 影响岩石渗透率的因素分析 [J]. 矿山压力与顶板管理 (2): 83-84, 86.
- 邓军, 陈学明, 方云, 等, 2000. 粤北盆地流体系统及其矿化特征 [J]. 地学前缘, 7 (3): 95-102.
- 方维萱, 贾润幸, 郭玉乾, 等, 2016. 塔西地区富烃类还原性盆地流体与砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制 [J]. 地球科学与环境学报, 38 (6): 727-752.
- 方维萱, 王磊, 鲁佳, 等, 2017a. 新疆萨热克铜矿床绿泥石化蚀变相与构造-岩浆-古地热事件的热通量恢复 [J]. 矿物学报, 37 (5): 661-675.
- 方维萱, 贾润幸, 王磊, 2017b. 塔西陆内红层盆地中盆地流体类型、砂砾岩型铜铅锌-铀矿床的大规模褪色化围岩蚀变与金属成矿 [J]. 地球科学与环境学报, 39 (5): 585-619.
- 冯建伟, 戴俊生, 刘美利, 2011. 低渗透砂岩裂缝孔隙度、渗透率与应力场理论模型研究 [J]. 地质力学学报, 17 (4): 303-311.
- 顾家裕, 范土芝, 方辉, 等, 2001. 塔里木盆地流体与油气藏 [J].

- 地质论评, 47 (2): 201-206.
- 韩凤彬, 陈正乐, 刘增仁, 等, 2013. 西南天山乌拉根铅锌矿床有机地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿床地质, 32 (3): 591-602.
- 贾润幸, 方维萱, 王磊, 等, 2016. 新疆萨热克铜多金属矿成矿预测方法 [J]. 矿产勘查, 7 (6): 965-970.
- 贾润幸, 方维萱, 王磊, 等, 2017. 新疆萨热克砂砾岩型铜矿床富烃类还原性盆地流体特征 [J]. 大地构造与成矿学, 41 (4): 721-733.
- 贾润幸, 方维萱, 李建旭, 等, 2018. 新疆萨热克铜矿床铼-锇同位素年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 37 (1): 151-162.
- 李向东, 王克卓, 2000. 塔里木盆地西南及邻区特提斯格局和构造意义 [J]. 新疆地质, 18 (2): 113-120.
- 李志丹, 薛春纪, 辛江, 等, 2011. 新疆乌恰县萨热克铜矿床地质特征及硫、铅同位素地球化学 [J]. 现代地质, 25 (4): 720-729.
- 刘建军, 刘先贵, 2001. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响 [J]. 地质力学学报, 7 (1): 41-44.
- 刘建明, 叶杰, 刘家军, 等, 2000. 论盆地流体成矿/成烃作用的耦合关系 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 19 (3): 164-171.
- 刘增仁, 田培仁, 祝新友, 等, 2011. 新疆乌拉根铅锌矿成矿地质特征及成矿模式 [J]. 矿产勘查, 2 (6): 669-680.
- 欧光习, 李林强, 孙玉梅, 2006. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 25 (1): 1-11.
- 尚春江, 康永尚, 邓泽等, 2019. 充填天然裂缝对页岩受载过程中渗透率变化规律影响机理分析 [J]. 地质力学学报, 25 (3): 382-391.
- 王勃, 莫新华, 杨泽军, 2013. 新疆乌恰县乌鲁干塔什铅锌矿勘探报告 [R]. 喀什: 紫金矿业集团股份有限公司.
- 王国芝, 胡瑞忠, 苏文超等, 2002. 滇-黔-桂地区右江盆地流体流动与成矿作用 [J]. 中国科学 (D辑), 32 (S1): 78-86.
- 王环玲, 徐卫亚, 左婧, 等, 2015. 低渗透岩石渗透率与孔隙率演化规律的气渗试验研究 [J]. 水利学报, 46 (2): 208-216.
- 王震亮, 2000. 改造型盆地流体动力学的发育特点 [J]. 石油与天然气地质, 21 (1): 24-27, 37.
- 吴根耀, 梁江平, 杨建国等, 2012. “盆”“山”耦合在异常高压盆地流体研究中的应用 [J]. 石油实验地质, 34 (3): 223-233.
- 武威, 顾宝和, 王铠等, 2009. 岩土工程勘察规范/ (GB 50021-2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 薛春纪, CHI Guoxiang, 陈毓川等, 2007. 西南三江兰坪盆地大规模成矿的流体动力学过程: 流体包裹体和盆地流体模拟证据 [J]. 地学前缘, 14 (5): 147-157.
- 薛春纪, 薛伟, 康明, 等, 2008. 鄂尔多斯盆地流体动力学过程及其砂岩型铀矿化 [J]. 现代地质, 22 (1): 1-8.
- 解习农, 成建梅, 孟元林, 2009. 沉积盆地流体活动及其成岩响应 [J]. 沉积学报, 27 (5): 863-871.
- 杨庆杰, 刘立, 迟元林, 等, 2000. 盆地流体的基本类型及其驱动机制 [J]. 世界地质, 19 (1): 15-19.
- 杨瑞琰, 马东升, 潘家永, 2005. 地层渗透率对成矿流体热场和流场的影响: 以锡矿山锑矿床成矿流体为例 [J]. 地质科技情报, 24 (3): 80-84.
- 俞雨溪, 王宗秀, 张凯逊等, 2020. 流体注入法定量表征页岩孔隙结构测试方法研究进展 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 201-210.
- 曾治平, 王千军, 李静, 等, 2019. 多场耦合作用下致密储层渗流特性研究 [J]. 地质力学学报, 25 (6): 1068-1074.
- 赵重远, 靳久强, 2009. 含油气盆地流体流域系统及其油气聚集原理 [J]. 石油学报, 30 (5): 635-641.
- 周利敏, 张德会, 席斌斌, 2008. 岩石中的渗透率、流体流动及热液成矿作用 [J]. 地学前缘, 15 (3): 299-310.
- 邹华耀, 郝芳, 张柏桥, 等, 2005. 准噶尔盆地流体输导格架及其对油气成藏与分布的控制 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 30 (5): 609-616.

#### 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

