

小秦岭金矿田 S60 矿脉控矿断裂特征及控矿作用分析

孙保花^{1,2}, 丁培超^{1,2*}, 冯绍平^{1,2}, 李晶晶^{1,2}, 王鹏飞^{1,2}, 沈瑞峰^{1,2}, 薛志强^{1,2}
(1. 河南省第一地质矿产调查院有限公司; 2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室)

摘要:小秦岭金矿田是中国重要的金矿集区, S60 矿脉作为其中大型金矿脉典型代表, 对区域矿产分布具有决定性作用, 研究其控矿断裂特征及控矿作用意义重大。采用三维地质建模技术, 对 S60 矿脉控矿断裂的形态、产状、分期及成矿规律展开研究。结果显示, 该断裂呈北西西向展布, 具多期多阶段活动特征, 先后经历韧性、脆脆性、脆性等变形阶段。断裂形态走向上呈舒缓波状, 倾向上具有规律性变化特征, 构造形态的规律性变化与矿体的赋存关系密切, 主矿体主要赋存于倾角 30°~46°的区段。断裂控矿机理与矿质的运移、沉淀关系密切, 张性结构面利于含矿流体迁移和聚集, 最终富集成矿, 且控矿断裂的多期变形对 S60 矿脉的形成和保存影响各异。本研究可为小秦岭金矿田成矿机制、演化过程研究及深部找矿突破提供重要依据。

关键词: S60 矿脉; 控矿断裂; 控矿作用; 三维地质建模; 小秦岭; 金矿田; 金矿集区

中图分类号: TD11 P618.51

文章编号: 1001-1277(2025)08-0071-10

文献标志码: A

doi: 10.11792/hj20250814

引言

小秦岭金矿田地处华北陆块南缘、秦岭造山带北部^[1-3]。截至目前, 在该金矿田的河南段已发现金矿脉及含金蚀变构造带共计 600 余条, 其中, 赋存工业矿体 180 余条, 累计查明金资源量 600 余 t, 占全省已查明金资源量的 55 % 以上。查明金资源量达大型以上的矿脉 6 条、中型矿脉 19 条, 大、中型矿脉查明金资源量占该金矿田总查明金资源量的 80 % 以上。

S60 矿脉位于小秦岭金矿田南部, 为小秦岭金矿田大型金矿脉的典型代表。该矿脉内已圈定矿体 25 个, 其中, 大型矿体 4 个, 中型矿体 7 个, 累计查明金资源量 77.2 t。S60 矿脉控矿断裂历经多期次构造运动, 完整展现了金矿形成与断裂之间的紧密联系, 研究 S60 矿脉控矿断裂对确定小秦岭金矿田的成矿机制和演化过程意义重大, 同时也是进行深部找矿预测的关键因素。

本文采用三维地质建模技术, 通过建立 S60 矿脉控矿断裂的三维地质模型, 在分析控矿断裂的形态、产状、构造变形及空间变化规律基础上, 研究断裂的变形期次及运动学特征, 并综合矿体品位、厚度分布规律, 分析构造变形与成矿的关系, 总结构造的控矿作用及控矿机理。

1 区域地质概况

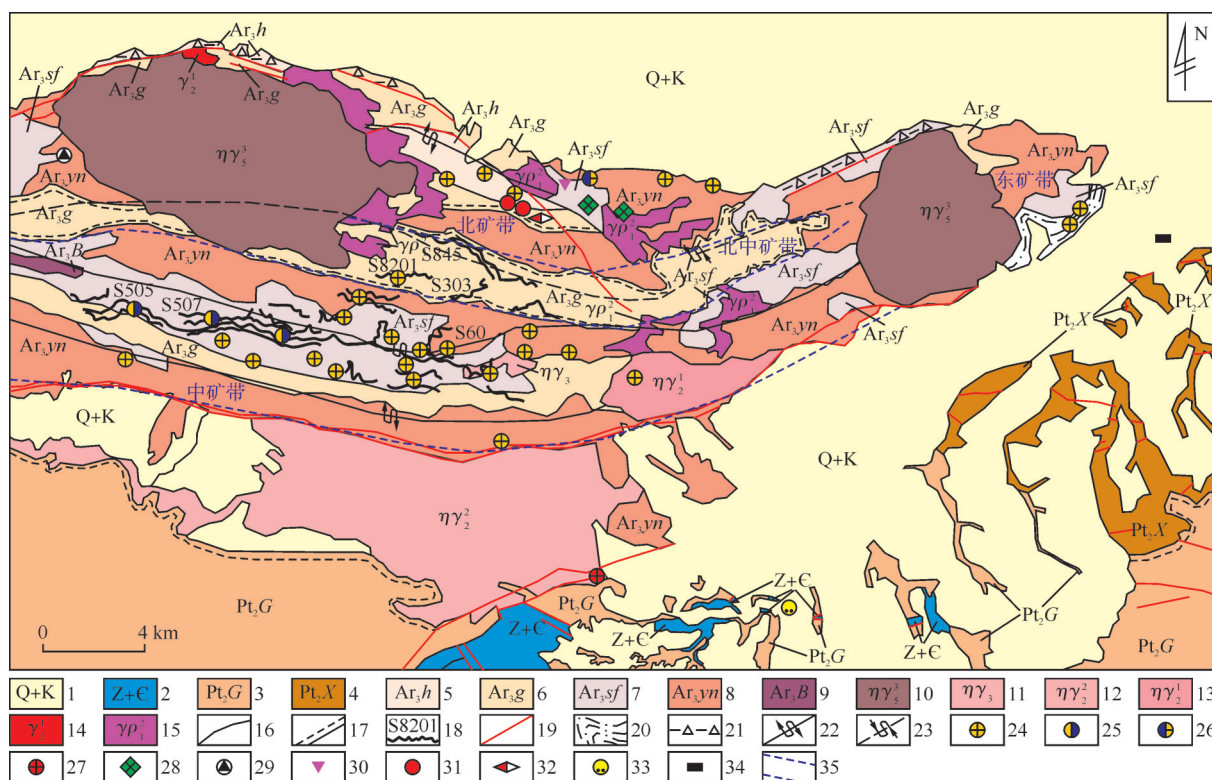
小秦岭金矿田位于华北陆块南缘华熊隆起的中西部, 横跨陕西和河南两省, 西起陕西省兰田县, 东到河南省灵宝市。东西长 150 余 km, 南北宽 15 ~ 20 km, 总面积大于 1 000 km², 地层区划属于华北陆块区豫西分区熊耳山小区, 地层具结晶基底和盖层的双层结构。结晶基底为一套中深变质岩系, 岩性主要为片麻岩、变粒岩及大理岩。盖层主要由中元古界熊耳群火山岩、中元古界官道口群沉积岩、中生界侏罗系沉积岩及新生界砂砾岩组成。区域构造主体为南北两侧边界断裂围限的复式背斜(老鸦岔复背斜), 自北向南可划分为五里村背斜、七树坪向斜、老鸦岔背斜、庙沟向斜、上杨砦背斜^[4-5]。受不同时期、不同方向应力影响, 区域内形成复杂的断裂体系, 小秦岭金矿田北缘为太要断裂, 南缘为小河断裂(见图 1)。依据成因或性质, 断裂可大体分为 2 类: 一类是在区域拆离背景下形成的一系列拆离滑脱带; 另一类是以脆脆性多期活动为主要特征的脆脆性断裂, 这类断裂是含金断裂的主体。岩浆活动频繁, 自太古代至中生代均有分布^[6], 以中生代最为发育, 侵入时代主要为晚侏罗世和晚白垩世, 主要形成中深成复式岩体, 如老牛山、华山、文峪、娘娘山等岩体, 岩性以二长花岗岩为主。

收稿日期: 2025-03-13; 修回日期: 2025-06-05

基金项目: 河南省地矿局管地地质勘查项目(豫地矿[2022]03 号); 河南省自然资源科研项目(豫自然资函[2022]07 号); 河南省财政项目(豫自然资发[2020]18 号)

作者简介: 孙保花(1988—), 男, 工程师, 硕士, 从事成矿规律与成矿预测研究工作; E-mail: 790450046@qq.com

*通信作者: 丁培超(1989—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事找矿预测研究及勘查开发工作; E-mail: dingpeichao1314@163.com



1—中—新生界 2—震旦系—寒武系 3—官道口群 4—熊耳群 5—焕池峪组 6—观音堂组 7—四范沟组片麻状花岗岩 8—杨砦峪组灰色片麻岩 9—变质表壳岩 10—燕山期二长花岗岩 11—加里东期二长花岗岩 12—中岳期二长花岗岩 13—五台期二长花岗岩 14—五台期花岗岩 15—阜平期花岗岩伟晶岩 16—地质界线 17—不整合地质界线 18—矿脉及编号 19—断裂 20—糜棱岩带 21—碎裂岩带 22—背斜轴 23—向斜轴 24—金矿床 25—金铅矿床 26—金钼矿床 27—银矿床 28—石墨矿床 29—水晶矿床 30—蛭石矿床 31—磁铁矿床 32—钾长石矿床 33—砂金矿床 34—煤矿床 35—矿带

图1 小秦岭金矿田地质矿产简图^[3]

Fig. 1 Sketch map for geology and minerals in the Xiaoqinling Gold Field

2 研究区地质概况

杨砦峪金矿床位于老鸦岔背斜中段,地层主要为太华群中高级变质岩系,岩性包括斜长角闪(片麻)岩、四范沟片麻状花岗岩、杨砦峪组灰色片麻岩、观音堂组变粒岩等(见图2)。矿区内火成岩种类较多,规模不等,多呈岩脉产出,岩性由酸性岩至超基性岩均有发育,且以酸性岩为主。褶皱主要为老鸦岔背斜,两翼呈北缓南陡不对称状,核部以四范沟片麻状花岗岩为主体,两翼主要为杨砦峪组灰色片麻岩,轴面近直立。北翼倾向 $325^{\circ}\sim 31^{\circ}$,倾角 $48^{\circ}\sim 80^{\circ}$,南翼倾向 $183^{\circ}\sim 213^{\circ}$,倾角 $54^{\circ}\sim 76^{\circ}$ 。断裂发育,以东西向断裂为主^[7-8],也是最主要的控矿构造。矿脉受断裂控制,往往成群成带分布,大致以老鸦岔背斜轴为分界,南部多南倾,倾角多为 45° ;北部多北倾,倾角一般小于 35° 。南倾组以S60矿脉为代表,也是矿区内最主要的矿脉,走向长度超过5 km;北倾组以S201、S202矿脉为代表,走向长度一般小于5 km。各矿脉沿走向、倾向呈舒缓波状延伸,形态简单、延伸稳定,局部呈分支复合、膨大狭缩变化,主矿脉之间存在规模不

等的支脉或平行复脉。

S60矿脉为中等倾斜单脉状大型含金黄铁矿石英脉,全长约6 600 m,厚度一般为7 m,最厚可达20 m。走向 $76^{\circ}\sim 125^{\circ}$,平均 105° ,倾向 $170^{\circ}\sim 215^{\circ}$,倾角 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,平均倾角 45° 。矿脉内含石英脉的形态及空间分布严格受断裂控制,多呈脉状、透境状、细脉状产出,矿脉沿走向和倾向呈舒缓波状变化,多呈尖灭再现和尖灭侧现特征。单条石英脉走向最长400 m,一般10~100 m。矿带内矿石类型以石英脉型为主,蚀变岩型极少,多位于石英脉的两侧或其延长部分。石英脉中的矿体多呈似层状、透镜状、饼状及长条状产出,矿石构造一般为细脉浸染状构造、条带状构造、团块状构造,矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等金属硫化物。金赋存状态以自然金为主,其次为含银自然金、银金矿、金银矿、碲金矿、碲金银矿等,自然金以包裹金、裂隙金、粒间金形式产出。

3 控矿断裂特征

S60矿脉受 F_3 断裂控制^[9],该断裂呈北西西向展布,西起文峪金矿床,经东闯、老鸦岔等金矿床,地表

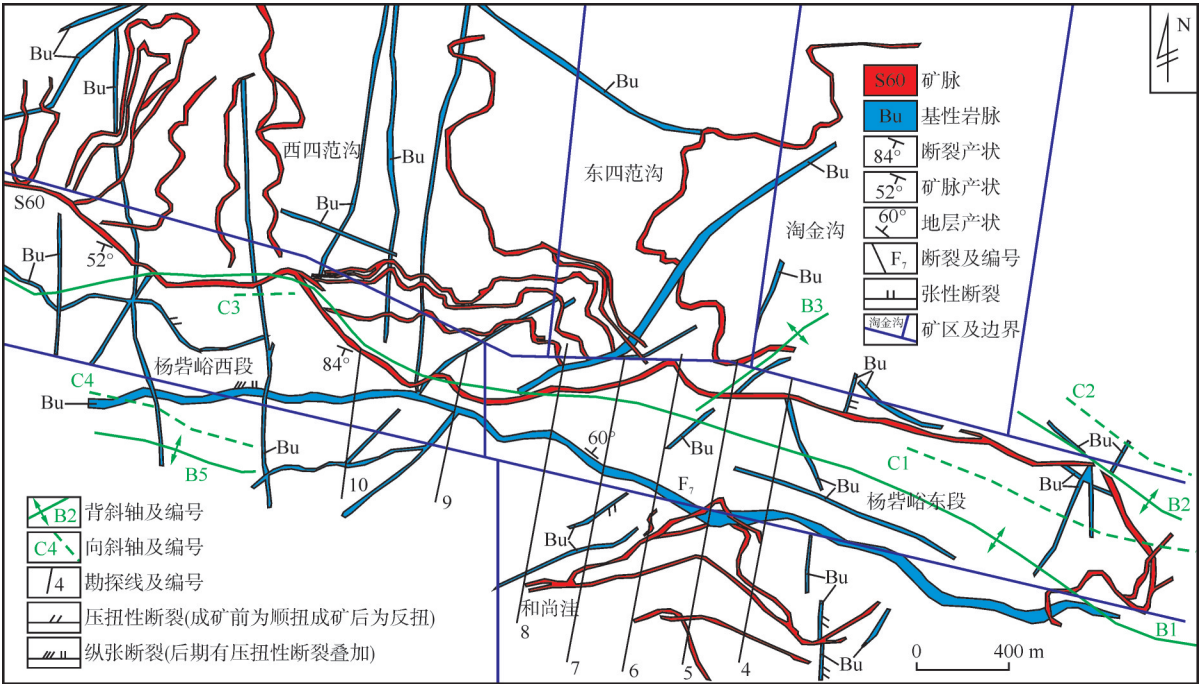


图2 杨砦峪金矿区S60矿脉地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the S60 vein in the Yangzhaiyu Gold District

至杨砦峪金矿床以东尖灭,全长约18 km,宽1.2~26 m,整体走向北西西,南倾,倾角40°~55°。断裂具有多期多阶段活动特点,早期为韧性变形,晚期为脆性变形,是南中矿带重要的控矿断裂。

3.1 控矿断裂形态特征

结合杨砦峪金矿区S60矿脉由地表(2 100 m标高)至地下540 m中段的29个中段地质资料,利用3Dmine软件对矿体和构造进行对比连接,形成S60矿脉控矿断裂三维模型图,结果见图3。由图3可知:断裂在走向上具明显舒缓波状特点,沿走向自西向东大体可划分出3个波峰、3个波谷。波峰间距1 031~1 200 m,平均间距1 070 m,波谷间距1 020~1 305 m,平均间距1 184 m,波峰与波谷的脊线总体近平行,且与S60矿脉的勘探线方向一致,即13°。沿断裂倾向,倾角具陡缓相间的变化特征。

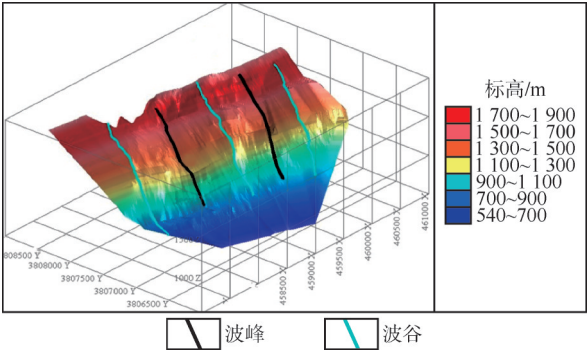


图3 小秦岭金矿田S60矿脉控矿断裂三维模型

Fig. 3 3D model of ore-controlling faults in the S60 vein of the Xiaoqinling Gold Field

为研究F₅断裂产状变化规律,将控矿断裂三维模型中位面划分为10 m×10 m的网格,并统计每个网格内断裂的倾向和倾角,F₅断裂倾角分布直方图见图4, F₅断裂倾向分析图见图5, F₅断裂倾向分布直方图见图6, F₅断裂倾向分析图见图7。由图4可知:F₅断裂倾角为20°~65°,其中,30°~60°占80%,倾角具双峰分布特征,峰值分别对应32°~42°与42°~56°。为凸显倾角的微小变化,将倾角采用非等步长色阶,重点突出倾角为30°~56°构造的空间变化情况。由图5可知:倾角沿倾向呈明显陡缓相间的分布特征,由地表至540 m中段大体可分出3个缓倾区和2个陡倾区,缓倾区倾角在32°~44°,陡倾区倾角在46°~65°。

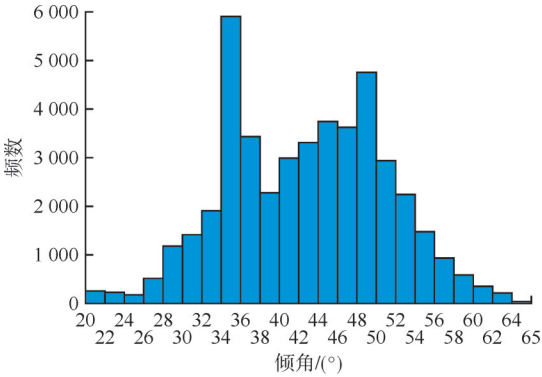


图4 F₅断裂倾角分布直方图

Fig. 4 Histogram of dip angle distribution of the F₅ fault

由图6可知:倾向为155°~235°,80%以上分布在180°~213°,数据分布明显具双峰分布特征,峰值分别对应186°~194°与195°~205°,2个峰值分别代

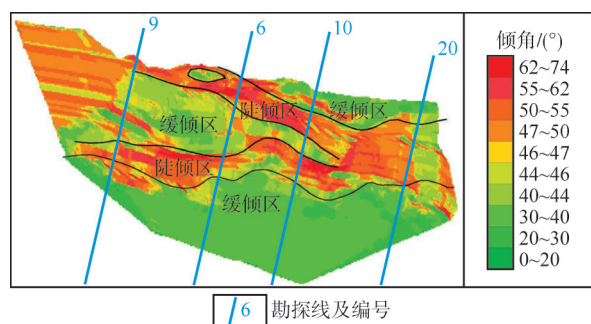


图5 F₅断裂倾角分析图

Fig. 5 Dip angle analysis of the F₅ fault

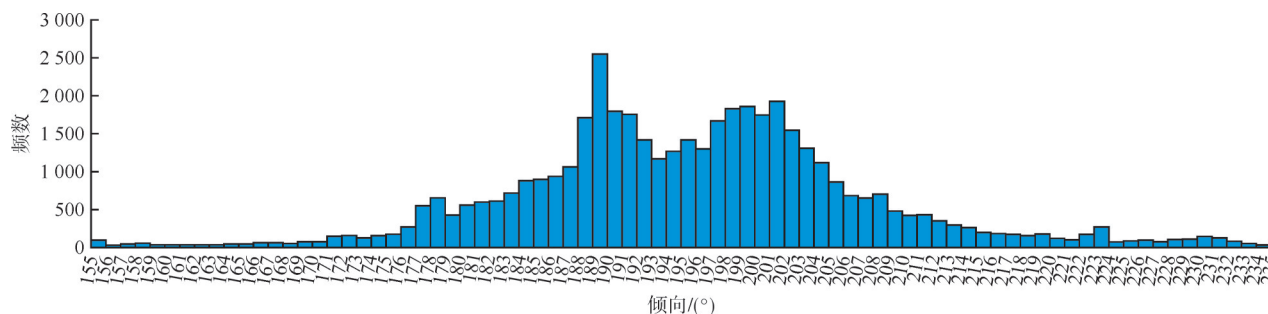


图6 F₅断裂倾向分布直方图

Fig. 6 Histogram of dip distribution of the F₅ fault

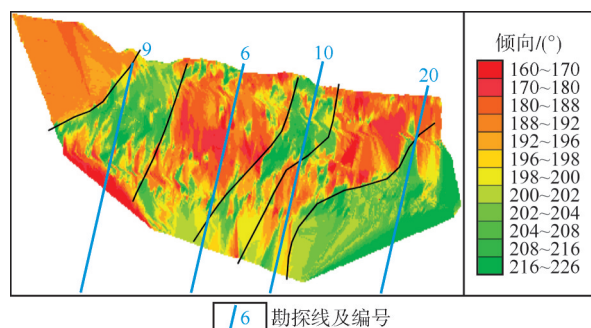


图7 F₅断裂倾向分析图

Fig. 7 Dip analysis of the F₅ fault

成矿期,早期韧性剪切带两盘发生左行逆冲剪切,在原韧性剪切带基础之上叠加脆韧性变形,原韧性剪切带重新活化,形成总体沿糜棱岩带展布的裂隙系统,这些裂隙系统控制了不同阶段的金矿化,构成含矿热液迁移和沉淀的通道和场所。该期构造活动直接制约成矿元素的迁移、富集和分带,使得构造变形及成矿均显示出多期多阶段叠加特点。按照矿脉之间的穿插、改造关系及矿物组合,可大致将热液活动分为4个阶段:黄铁矿-石英阶段(Ⅰ)、石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)、石英多金属硫化物阶段(Ⅲ)、石英-碳酸盐阶段(Ⅳ)。

1)黄铁矿-石英阶段。该阶段剪切带主要发生左行逆冲剪切运动,强度较大,是叠加在糜棱岩带上的剪裂隙和张裂隙。与此同时,早期的富硅热液开始活动,在剪切带内的引张部位充填交代形成厚大的石英脉,脉体呈透镜状、脉状、扁豆状(见图8、图9),在构

造带中尖灭再现或侧现,在产状变缓、分支复合处石英脉厚度增大。该阶段的石英脉厚度大、连续性较好,脉体呈纯白色,由于该阶段黄铁矿含量低,黄铁矿含量少,一般不构成独立的工业矿体。

3.2 控矿断裂分期

F₅断裂变形先后经历了韧性变形→韧脆性变形→脆性变形3个阶段。成矿前的韧性变形阶段形成了大规模的糜棱岩系岩石,主要分布于矿体顶底板附近,原岩中矿物被明显定向拉长,形成条带状或条纹状构造,该期变形形成的韧性剪切带构成F₅断裂的雏形。

造带中尖灭再现或侧现,在产状变缓、分支复合处石英脉厚度增大。该阶段的石英脉厚度大、连续性较好,脉体呈纯白色,由于该阶段黄铁矿含量低,黄铁矿含量少,一般不构成独立的工业矿体。

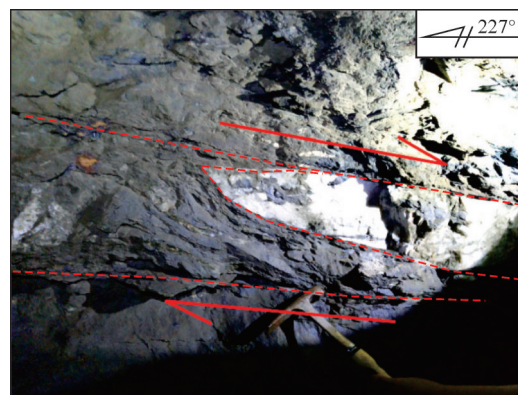


图8 S60矿脉糜棱岩带中张性结构面(石英透镜体)显示左行剪切特征(王家峪金矿床540 m中段)

Fig. 8 Tensional structural planes (quartz lenses) in the mylonite zone of the S60 vein showing sinistral shear characteristics (540 m level, Wangjiayu Gold Deposit)

2)石英-黄铁矿阶段。石英-黄铁矿阶段为本区主成矿阶段之一,主要沿早期形成的石英脉和糜棱岩带发生左行逆冲剪切(见图10、图11),主应力方向358°~178°。在此应力下,近东西向南倾矿脉的上盘向北东逆冲,局部形成张性裂隙,之后被含矿热液充填交代,形成浸染状或条带状石英-黄铁矿脉(见图10~13),呈脉状、透镜状,常分布在成矿Ⅰ阶段石英脉中部或靠近顶底板处。该阶段石英多呈烟灰

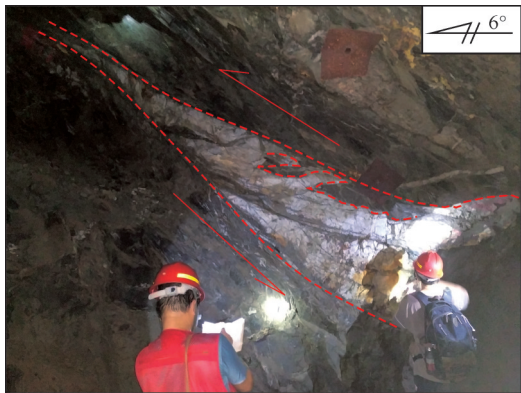


图9 S60矿脉中早期石英脉及伴生的张性结构面显示逆冲剪切运动特征(王家峪金矿床540 m中段)

Fig. 9 Early quartz veins and associated tensional structural planes in the S60 vein showing characteristics of thrust shear movement (540 m level, Wangjiayu Gold Deposit)

色细脉状,穿插早期的纯白色石英脉。成矿Ⅲ阶段黄铁矿多具细脉状构造或浸染状构造,含金性好,局部含少量黄铜矿和磁黄铁矿,金矿物主要为自然金和银金矿。

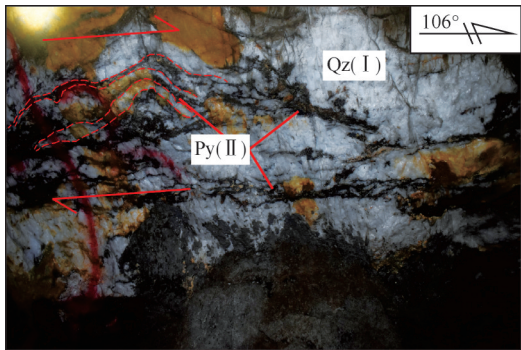


图10 成矿Ⅱ阶段黄铁矿穿插成矿Ⅰ阶段石英脉并显示左行剪切运动特征(杨砦峪金矿床S60矿脉1 220 m中段)

Fig. 10 Stage II pyrite crosscutting through Stage I quartz veins and showing sinistral shear characteristics (1 220 m level, S60 vein, Yangzhaiyu Gold Deposit)

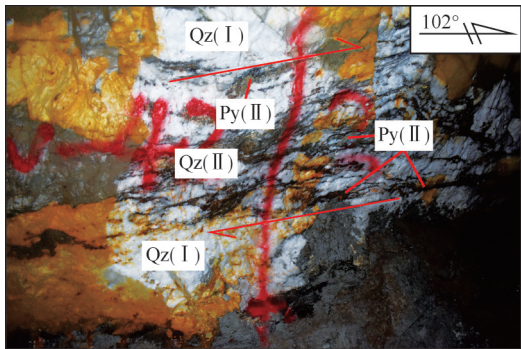


图11 成矿Ⅱ阶段黄铁矿穿插成矿Ⅰ阶段石英脉并显示左行逆冲运动特征(杨砦峪金矿床S60矿脉860 m中段)

Fig. 11 Stage II pyrite crosscutting through Stage I quartz veins and showing characteristics of sinistral thrust movement (860 m level, S60 vein, Yangzhaiyu Gold Deposit)

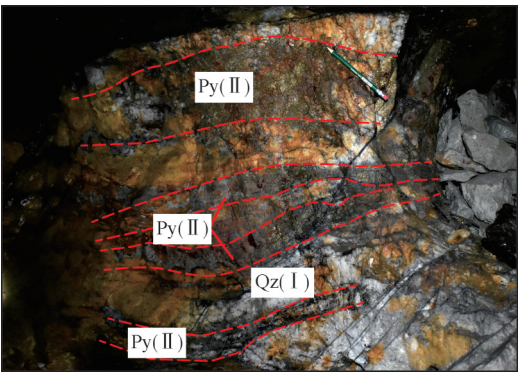


图12 成矿Ⅱ阶段黄铁矿穿插成矿Ⅰ阶段石英脉(杨砦峪金矿床S60矿脉1 340 m中段)

Fig. 12 Stage II pyrite crosscutting through Stage I quartz veins (1 340 m level, S60 vein, Yangzhaiyu Gold Deposit)

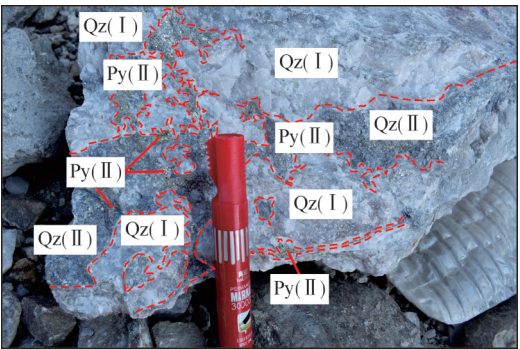
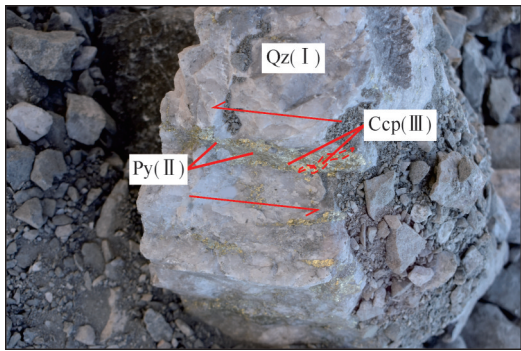


图13 成矿Ⅱ阶段烟灰色石英-黄铁矿脉穿插成矿Ⅰ阶段石英脉(杨砦峪金矿床S60矿脉1 220 m中段)

Fig. 13 Stage II smoky quartz-pyrite veins crosscutting through Stage I quartz veins (1 220 m level, S60 vein, Yangzhaiyu Gold Deposit)

3)石英-多金属硫化物阶段。该阶段,S60矿脉上盘向北西方向逆冲,逆冲方向约340°,具有右行剪切性质,整体为压扭性。在成矿Ⅰ、Ⅱ阶段形成石英脉、黄铁矿脉的基础上,形成网格裂隙系统,成矿Ⅲ阶段成矿作用在这些裂隙中充填交代,形成黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等金属硫化物,矿石往往具网格状、云朵状、细脉状及条带状(见图14、图15)。手标本上和镜下均可看到黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等多金属硫化物呈团块状或网脉状充填在碎裂黄铁矿、石英脉中(见图15~17)。该阶段形成的方铅矿自形程度较高,多呈自形立方体状。黄铜矿则主要呈他形粒状、乳滴状或不规则状(见图14、图17)。该阶段黄铁矿金含量较高,黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等也可赋金矿物。

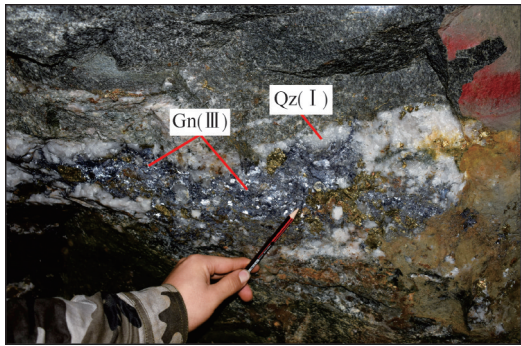
4)石英-碳酸盐阶段。该阶段构造活动较弱,力学性质以压性为主,具左行剪切特征,属于脆性变形,



Ccp(III)—成矿Ⅲ阶段黄铜矿 Py(II)—成矿Ⅱ阶段黄铁矿
Qz(I)—成矿Ⅰ阶段石英脉

图 14 成矿Ⅲ阶段黄铜矿沿张性裂隙穿插成矿Ⅱ阶段黄铁矿(杨砦峪金矿床 S60 矿脉 1 220 m 中段)

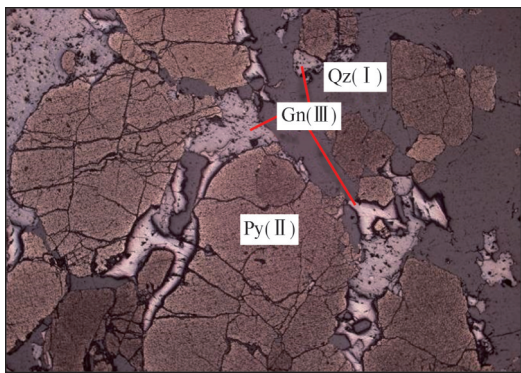
Fig. 14 Stage III chalcopyrite crosscutting Stage II pyrite along tensional fractures (1 220 m level, S60 vein, Yangzhaiyu Gold Deposit)



Gn(III)—成矿Ⅲ阶段方铅矿 Qz(I)—成矿Ⅰ阶段石英脉

图 15 成矿Ⅲ阶段方铅矿穿插成矿Ⅰ阶段石英脉(杨砦峪金矿床 S60 矿脉 1 340 m 中段)

Fig. 15 Stage III galena crosscutting through Stage I quartz veins (1 340 m level, S60 vein, Yangzhaiyu Gold Deposit)

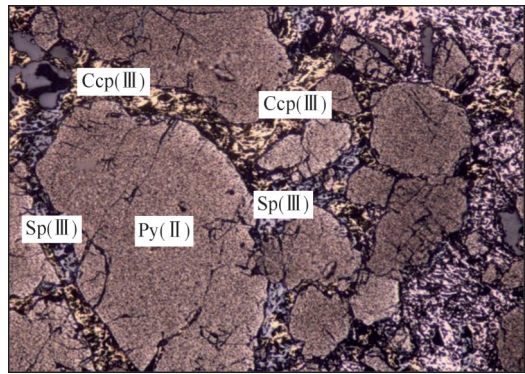


Gn(III)—成矿Ⅲ阶段方铅矿 Py(II)—成矿Ⅱ阶段黄铁矿
Qz(I)—成矿Ⅰ阶段石英脉

图 16 成矿Ⅲ阶段方铅矿穿插成矿Ⅱ阶段黄铁矿(樊岔金矿床 S60 矿脉 540 m 中段)

Fig. 16 Stage III galena crosscutting through Stage II pyrite (540 m level, S60 vein, Fancha Gold Deposit)

热液的温度、动力及活动强度均明显降低,形成的矿脉规模小,长数十厘米至数米,宽 0.2~5 cm,形成方



Ccp(III)—成矿Ⅲ阶段黄铜矿 Sp(III)—成矿Ⅲ阶段闪锌矿
Py(II)—成矿Ⅱ阶段黄铁矿

图 17 成矿Ⅲ阶段黄铜矿、闪锌矿沿裂隙穿插成矿Ⅱ阶段黄铁矿(杨砦峪金矿床 S60 矿脉 860 m 中段)

Fig. 17 Stage III chalcopyrite and sphalerite crosscutting through Stage II pyrite along fractures (860 m level, S60 vein, Yangzhaiyu Gold Deposit)

解石、白云石、铁白云石等碳酸盐细脉,分布于含金石英脉和糜棱岩带的碎裂裂隙内及两侧围岩中。该阶段为成矿尾声,强度最弱,一般不能构成工业矿体。

成矿期后,小秦岭金矿田构造运动主要表现为岩浆-变质杂岩整体垂直隆升,断裂活动相对较弱,主要见于中矿带的 S505~S60 矿脉中,可以分为 2 类:一类是位于成矿期的剪切带内,与矿脉产状近于平行性的断裂;另一类是横切或斜切矿体并使矿体发生一定相对位移的断裂,常导致矿体的连续性遭到破坏。

3.3 断裂成矿规律

1) 成矿结构面空间分布规律。S60 矿脉控矿断裂的成矿结构面在垂向上及走向上具有明显的分带富集规律。

在垂向上,根据不同标高段金富集规律,可将 S60 矿脉划分出 3 个富矿段,2 个贫矿段(见图 18)。其中,Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ标高段为富矿段,Ⅱ、Ⅳ标高段为贫矿段。

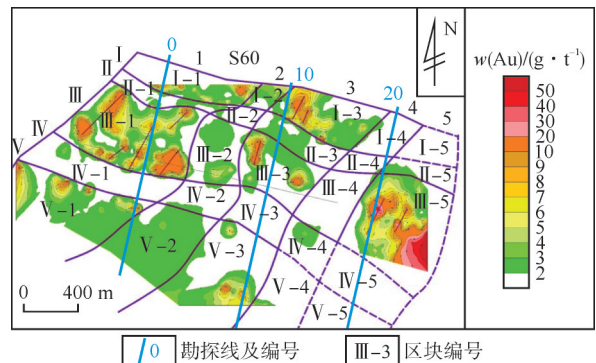


图 18 南中矿带 S60 矿脉金品位变化规律

Fig. 18 Variation pattern of gold grade in the S60 vein of the southern central ore belt

在走向上,根据金的分段富集规律,也可划分出

3个富矿段,2个贫矿段。其中,1,3,5为富矿段,2,4为贫矿段。1,3富矿段为杨砦峪金矿床主要工业矿体赋存部位,5富矿段为樊盆金矿床主要工业矿体赋存部位。除在1 220 m中段少量矿体品位稍高外,2贫矿段在其余中段多为贫矿。除在980 m中段有少量工业矿体外,4贫矿段其余中段基本无工业矿体。

依据金在走向和倾向上的富集规律,可将区内S505~S60矿脉划分成5行、5列,共计25个区段,并统计出各区段在走向和倾向方向的延伸距离,结果见表1。由表1可知:各富矿段和贫(无)矿段在走向和倾向上的延伸距离,可以为深部找矿预测提供依据。

表1 南中矿带S60矿脉不同区段延伸距离统计结果

Table 1 Statistical results of extension lengths in different sections of the S60 vein in the southern central ore belt

编号	1		2		3		4		5	
	走向/m	倾向/m	走向/m	倾向/m	走向/m	倾向/m	走向/m	倾向/m	走向/m	倾向/m
I	970	230	193	214	760	340	300	350	400	260
II	840	125	260	170	695	190	350	179	540	150
III	900	550	370	490	630	390	360	500	730	770
IV	1 100	240	465	240	420	310	410	290	685	340
V	960	—	570	—	585	—	385	—	680	—
富矿段平均	943	390	—	—	658	365	—	—	603	515
贫矿段平均	970	183	372	279	558	250	361	330	613	245

2)成矿断裂的产状变化与赋矿规律。为系统研究S60矿脉控矿断裂产状变化与成矿的关系,统计绘制了S60矿脉金品位与断裂倾角关系(见图19)及金品位与断裂倾向关系(见图20)。

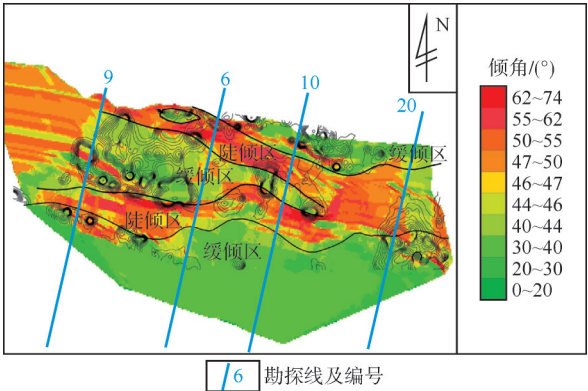


图19 南中矿带S60矿脉金品位与断裂倾角的关系
Fig. 19 Relationship between gold grade and fault dip angle of the S60 vein in the southern central ore belt

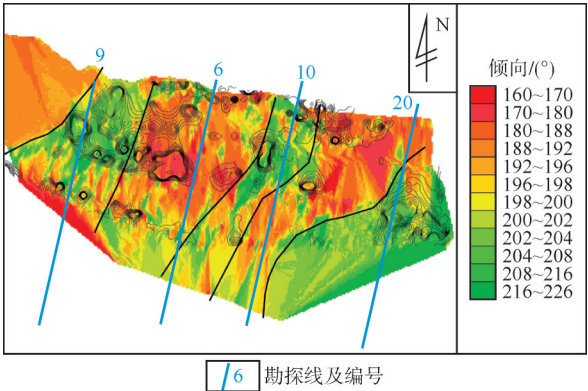


图20 南中矿带S60矿脉金品位与断裂倾向的关系
Fig. 20 Relationship between gold grade and fault dip of the S60 vein in the southern central ore belt

由图19可知:大于2 g/t的矿体主要赋存于倾角为30°~46°的区段,且随着断裂倾角由陡变缓,金品位呈指数式急剧增加,表现为赋存矿体的缓倾斜区段多被陡倾的区段“包围”。这可能是因为成矿期断裂两盘发生左行逆冲运动,倾角较陡的区段为压扭性结构面,其往往是不透水面,在成矿过程中起“屏蔽”作用,很好地充当了含矿热液运移的通道;而倾角较缓的区段为张性结构面,当含矿热液由封闭的压扭性结构面进入开放的张性结构面时,由于压力、温度急剧降低,含矿热液中的成矿物质发生过饱和沉淀卸载,使得成矿物质聚集成矿,因此S60矿脉控矿断裂的成矿结构面为断裂内陡倾的压扭性结构面之间的引张性部位。

由图20可知:金品位变化与断裂倾向关系不甚明显。倾向为200°~226°的金品位高值区面积与倾向为160°~200°的金品位高值区面积近似相等,金品位相差不大,表明在杨砦峪金矿床S60矿脉控矿断裂内,倾向对矿体的金品位影响不大。

4 讨论

4.1 断裂控矿机理

前人对断裂中矿质的运移及成矿作用进行了大量的研究,提出了不同的观点。CLINE等^[10]认为,热液金矿床中沸腾作用引起流体流动—硅质运输—矿质沉淀;RICHARDS等^[11-12]认为,“断裂阀—地震泵吸—周期性破裂—闭合”而成矿;杨巍然等^[13-14]认为,断裂活动为流体循环、水岩相互作用提供了必要条件;LOUCKS等^[15]认为,矿体主要产于韧性剪切带中

韧脆性转换部位,在此部位压力降低导致金发生沉淀;郭涛等^[16]认为,构造作用对流体的运移起主导作用,通过压缩、扩容、破裂等方式改变固体介质的渗透性能,从而影响流体的运移速率、方向和方式。热液体系中金的存在形式主要取决于温度、压力、pH、Cl⁻浓度、H₂S逸度,在温度高于400℃体系中,金主要以[AuCl₄]⁻的形式存在,在较低温度(小于400℃)下以[Au(HS)₂]⁻形式存在。温度、压力、氧逸度降低及酸碱度等物理化学条件的变化导致金络合物分解和沉淀成矿^[17]。

前人系统搜集并整理小秦岭地区金矿脉内石英流体包裹体显微测温数据(共计899个数据),显示流体包裹体完全均一温度为116℃~462℃,平均值270.6℃,集中分布在160℃~340℃,小于400℃,因此区内热液体系中金主要以[Au(HS)₂]⁻形式存在。在[Au(HS)₂]⁻热液体系中,金从流体中结晶沉淀析出过程中存在的主要化学反应见文献^[17]。

反应向右进行的程度主要取决于H₂S的活动性,减压沸腾作用导致的H₂S含量降低将促进含黄铁矿结晶和固溶体金的进入。对于受断裂控矿的热液型金矿(石英脉型和蚀变岩型),含矿流体沿断裂从源区由高压区向低压区运移,其驱动力主要为热动力和构造动力,运移方式主要为扩散作用和渗滤作用,扩散作用运移的距离相对较短,主要发生于断裂(运移通道)两侧及顶底板围岩中,而渗滤作用则可实现较大距离的迁移,是含矿流体运移的重要方式。除了流体本身的性质外,断裂内构造岩的渗透率是影响渗透作用的主要因素。COX等^[18]将岩石断裂中的流体流动近似看作稳定状态下平板间的层流,得到渗透率的约束方程($K=a^2/12$, K 为渗透率, a 为断裂张开度),该方程指出了断裂张开度在影响流体流动方面的重要作用。如果断裂张开度增加1倍,则渗透率增加3倍^[19],流体会大量聚集于断裂面上的膨胀区域。对于已形成的断裂(成矿前构造),应力是影响渗透率最直接因素,当应力缓慢施加于岩石上时,孔隙发生收缩或塌陷,喉道缩小甚至消失,原先连通的孔隙相互隔绝,渗透率降低。或者在围压作用下,断裂张开度缩小引起渗透率的快速衰减^[19]。因此,同一条断裂中引张性结构面较压性结构面的渗透率要高,孔隙度更大,更利于含矿流体的迁移和聚集。此外,由于引张性结构面较压性结构面的渗透率高,孔隙度大,流体由压性结构面进入张性结构面中,流体的压力会迅速减小,[Au(HS)₂]⁻热液体系中H₂S的分压减小,反应向右进行,含矿流体中的金会同黄铁矿一起从热液体系

中沉淀析出。这就可以解释本区成矿元素倾向于在含矿断裂的引张性结构面富集,同时也可解释金的富集程度(金品位)与矿体厚度呈现明显的正相关关系,矿体厚度则是断裂张开度的宏观表现。

4.2 控矿断裂形成演化及控矿作用分析

依据断裂与成矿作用在时间和空间上的关系,可将S60矿脉控矿断裂的变形过程划分为3个阶段:成矿前韧性变形阶段→成矿期韧脆性变形阶段→成矿后脆性变形阶段。

成矿前韧性变形可分为2期^[20],第一期韧性变形发生北西向逆冲,总体表现为S60矿脉控矿断裂上盘向西或北西逆冲剪切,具有右行剪切的运动学特征。该期线理可能是在古元古代(1 840~1 863 Ma),小秦岭金矿田东部陆块与西部陆块碰撞过程中所形成右行逆冲剪切性的韧性变形,该期变形遍及整个小秦岭金矿田的透入性韧性线理,且具有高度一致的运动学特征。第二期韧性变形以正向滑移为主,断裂上盘总体向南西方向正向滑移,形成以南西向为主的倾向线理,倾伏角中等偏陡,该期变形形成韧性剪切带主体,变形可能与本区中生代燕山期大规模伸展有关^[20]。

成矿期S60矿脉控矿断裂主要发生韧脆性变形,叠加在早期韧性变形之上,断裂两盘发生左行逆冲运动,上盘向北东向逆冲,在糜棱岩带内形成断裂裂隙,其形成、发展、演化过程(见图21)可概括为:断裂活动初期,在糜棱岩带中形成张性微裂隙(T型张性断裂),倾角较糜棱岩带缓,这些裂隙大多呈雁行排列。随着上下盘相对剪切位移不断增大,呈雁行排列的张裂隙不断扩展并转向,最后贯通形成S60矿脉控矿断裂,雁行张裂隙之间的“墙壁”在变形过程中被旋转进而剪断,断裂宽度取决于单个张裂隙的长度及其与主断面的夹角,夹角越大,断裂宽度越大^[21]。成矿流体沿着主断裂由深部向浅部运移,当流体由陡倾的压扭性结构面进入缓倾的张性结构面时,流体发生减压沸腾,流体中H₂O、CO₂、H₂S从流体中逃散,进入气相形成富含挥发分的石英脉,同时导致流体中金属离子浓度、还原S浓度、pH增大,流体温度降低,流体中的Au、Ag、Pb、Zn等元素发生沉淀,形成矿体。研究表明:沸腾主要发生在300℃左右,5%流体转化为蒸汽就会引起大多数金属元素发生沉淀^[18]。

成矿后,在区域性隆升的背景下,S60矿脉整体由深部抬升至地表,该期构造运动对S60矿脉的破坏较小,主要表现为沿矿脉方向碎裂或斜切矿脉,整体位移较小,一般在断裂两侧可以找到相对应的矿体。

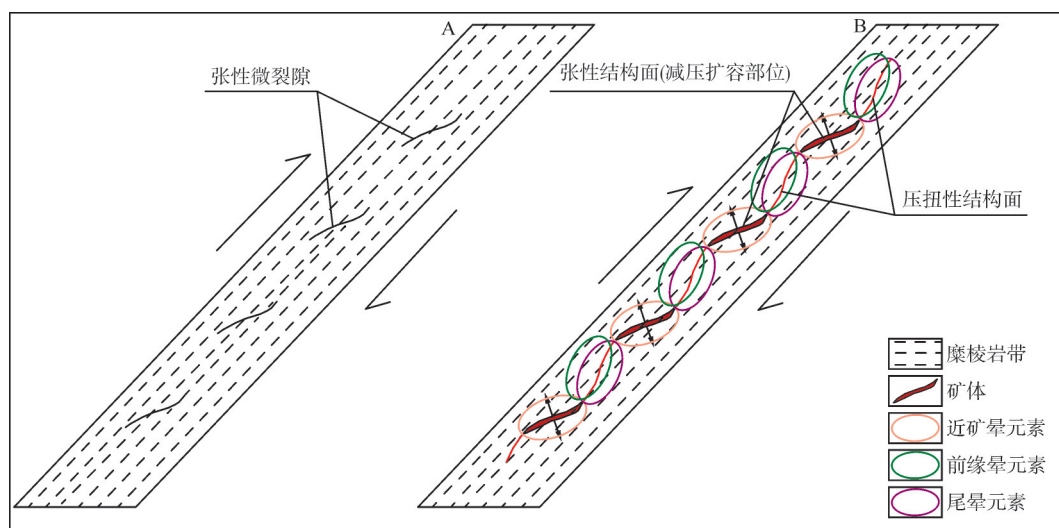


图21 成矿期S60矿脉断裂控矿模型

Fig. 21 Ore-controlling fault model of the S60 vein during the mineralization stage

5 结论

1) S60矿脉断裂形态在走向上呈舒缓波状起伏,具3个波峰和3个波谷,波峰、波谷间距有一定规律。倾角主体在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$,沿倾向呈陡缓相间分布;倾向主体在 $180^{\circ} \sim 213^{\circ}$,2组优势倾向相间分布且整体向南南西向侧伏。

2) S60矿脉控矿断裂内成矿结构面在垂向和走向上均具有分段富集规律,据此可划分出富矿段和贫(无)矿段,为深部成矿预测提供依据。矿体主要赋存于倾角为 $30^{\circ} \sim 46^{\circ}$ 的区段,倾向对矿体品位影响不大。

3) 在小秦岭金矿田热液体系中,金主要以 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 形式存在。含矿流体沿断裂从高压区向低压区运移,引张性结构面渗透率高、孔隙度大,利于含矿流体迁移和聚集,金品位与矿体厚度呈正相关关系。

4) S60矿脉控矿断裂变形过程分4期,成矿前2期韧性变形分别与古元古代陆块碰撞和中生代燕山期大规模伸展有关;成矿期脆性变形时,断裂两盘左行逆冲,成矿流体运移并在特定结构面发生减压沸腾,导致金元素沉淀成矿;成矿后脆性变形对矿脉破坏较小,主要表现为沿矿脉方向碎裂或斜切,整体位移较小。

[参考文献]

[1] 郭晓,李重阳,王红军,等.小秦岭地区樊岔金矿基性岩脉年代学特征及地质意义[J].地质找矿论丛,2024,39(3):334-343.
[2] 孙卫志,李磊,谢劲松,等.豫西地区变质核杂岩的基本特征及其对金矿床的控制[J].黄金,2013,34(8):10-16.
[3] 刘玉刚,丁培超,孙保花,等.河南省小秦岭金矿田剪切带特征及其控矿规律研究[J].黄金,2023,44(8):76-83.

[4] 杨梅珍,李建威,赵新福,等.小秦岭大湖矿床石英脉组和黄铁矿微量元素地球化学对金铜独立成矿作用及其成脉构造环境的制约[J].大地构造与成矿学,2019,43(3):447-472.
[5] 郝建瑞,王义天,刘俊辰,等.小秦岭金矿田桐沟金矿床黄铁矿微量元素组成及其成因意义[J].黄金,2021,42(8):8-16.
[6] 郭新,张灯堂,赵春勇.小秦岭金矿田控矿因素浅析[J].黄金,2014,35(10):34-38.
[7] 张为民,王禹,蔡焕花,等.小秦岭金矿田F₅断裂带基本特征、控矿作用及找矿前景[J].黄金,2015,36(6):14-19.
[8] 颜正信,孙卫志,薛成.小秦岭金矿田中深部构造控矿规律及盲矿预测——以文峪矿区S505矿脉为例[J].黄金,2007,28(12):17-21.
[9] 黎世美,瞿伦全,苏振邦,等.小秦岭金矿地质和成矿预测[M].北京:地质出版社,1996.
[10] CLINE J S, BONDNAR R J, RIMSTIDT J D. Numerical simulation of fluid flow and silica transport and deposition in boiling hydrothermal solutions: Application to epithermal gold deposits[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(B6): 9 085-9 103.
[11] RICHARDS J P, TOSDAL R M. Seismogenic framework for hydrothermal transport and ore deposition[J]. Society of Economic Geologists, 2001, 14: 25-50.
[12] ROBERT F, BOULLIER A M, FIRDAOUS K. Gold-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting[J]. Journal of Geophysical Research B, 1995, 100(7): 12 861-12 879.
[13] 杨巍然,张文淮. 构造流体——一个新的研究领域[J]. 地学前缘, 1996, 3(3/4): 124-130.
[14] 解习农,李思田. 断裂带流体作用及动力学模型[J]. 地学前缘, 1996, 3(3/4): 145-151.
[15] LOUCKS R, MAVROGENES J A. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions[J]. Science, 1999, 284: 2 159-2 163.
[16] 郭涛,邓军,吕古贤,等. 焦家金矿床成矿流体运移的通道、方式及驱动机制[J]. 地球学报, 2008, 29(1): 81-88.
[17] 朱永峰,安芳. 热液成矿作用地球化学:以金矿为例[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 45-52.

[18] COX S F, KNACKSTEDT M A, BRAUN J. Principles of structural control of permeability and fluid flow in hydrothermal systems[M]// RICHARDS J M, TOSDAL R M. Structural controls on ore genesis. Littleton: Society of Economic Geologists, 2001: 1-22.

[19] 周利敏, 张德会, 席斌斌. 岩石中的渗透率、流体流动及热液成矿作用[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 299-310.

[20] 李云剑. 小秦岭地区构造演化与动力学背景研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.

[21] 张均. 隐伏矿体定位预测方法——以脉状金矿为例[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

Characteristics and ore-controlling effect of the ore-controlling fault in the S60 vein of the Xiaoqinling Gold Field

Sun Baohua^{1,2}, Ding Peichao^{1,2}, Feng Shaoping^{1,2}, Li Jingjing^{1,2}, Wang Pengfei^{1,2}, Shen Ruifeng^{1,2}, Xue Zhiqiang^{1,2}

(1. Henan First Geological and Mineral Survey Institute Co., Ltd.;

2. Key Laboratory of Au-Ag-Polymetallic Deposit Series and Deep-seated Metallogenic Prognosis of Henan Province)

Abstract: The Xiaoqinling Gold Field is one of the major gold mineralization clusters in China. The S60 vein, a typical representative of large-scale gold veins in the area, plays a decisive role in the regional mineral distribution. Investigating the characteristics and ore-controlling effect of the ore-controlling fault is of great significance. Using 3D geological modeling technology, this study examines the morphology, orientation, evolutionary stages, and metallogenic patterns of the ore-controlling fault in the S60 vein. Results show that the fault trends NWW and has experienced multiple stages of activity, including ductile, brittle-ductile, and brittle deformation. The fault displays a gently undulating geometry along strike and shows systematic variations in dip direction. These regular structural changes are closely related to orebody occurrence, with the main orebody mainly hosted in segments with dip angles ranging from 30° to 46°. The ore-controlling mechanism is closely linked to the migration and precipitation of ore-forming materials. Tensile structural planes facilitated the migration and accumulation of ore-bearing fluids, ultimately leading to mineral enrichment. The multi-stage deformation of the ore-controlling fault had varying impacts on the formation and preservation of the S60 vein. This study provides critical insights for understanding the metallogenic mechanism and evolutionary process of the Xiaoqinling Gold Field and offers guidance for deep ore prospecting breakthroughs.

Keywords: S60 vein; ore-controlling fault; ore-controlling effect; 3D geological modeling; Xiaoqinling; gold field; gold province

(上接第54页)

Comparative study on beneficiation test of a gold mine in Qinghai

Zhang Guocun, Liu Yuchuan, Xiong Xin, Chen Pan, Ying Yongpeng, Zhang Xinyu

(Qinghai Provincial Geological Resources Testing and Application Center)

Abstract: The gold grade of a certain gold deposit in Qinghai is 2.67 g/t, with exposed and semi-exposed gold accounting for 84.27 %. Based on ore characteristics, whole ore leaching, flotation-flotation tailings leaching, and gravity separation-gravity separation tailings leaching were tested comparatively. After comprehensive evaluation of environmental and economic benefits, the gravity separation-gravity separation tailings leaching combined process was selected as optimal. The raw ore was subjected to Nelson gravity separation, yielding a gold concentrate with a grade of 139 g/t and a gold recovery rate of 57.74 %. Direct leaching of gravity separation tailings achieved a gold leaching rate of 37.13 % on the raw ore. The total gold recovery of the entire process reached 94.87 %, indicating favorable beneficiation performance.

Keywords: whole ore leaching; environmentally friendly gold leaching agent; flotation; Nelson gravity separation; combined process; total recovery