

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508260034

甘肃大店沟金矿床中脆硫锑铅矿的发现与成矿启示

樊 荣¹, 司明扬^{2,3}, 刘家军^{2,3,*}, 张 斌^{2,3}, 曹瑞荣¹, 来 召¹, 艾忠林¹,
于 谦¹, 杜佰松⁴

(1. 甘肃中金黄金矿业有限责任公司, 甘肃 陇南 742400; 2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 中国黄金集团有限公司, 北京 100011)

摘要: 甘肃两当县大店沟金矿床中新发现的脆硫锑铅矿, 与辉锑矿、方铅矿、黄铁矿及石英密切共生。详细的矿物学与电子探针和X射线粉晶衍射分析揭示, 其化学成分(平均分子式 $\text{Fe}_{1.02}\text{Pb}_{4.51}\text{Sb}_{5.92}\text{S}_{14.00}$)与晶体结构(单斜晶系, $a = 1.5383 \text{ nm}$, $b = 1.8716 \text{ nm}$, $c = 0.3937 \text{ nm}$)与理论值高度吻合, 成分特征指示其为中低温热液环境中高硫逸度流体的产物。该矿物在垂向上呈现明显的产出分带特征: 浅部以针状、毛发状为主, 随深度增加逐渐过渡为束状及不规则粒状, 反映结晶环境由不稳定向相对稳定转变。本研究在准确鉴定该矿物的基础上, 进一步认为其特定的产状与成分, 对金的成矿作用过程有着重要的指示意义。其形成明确指示金成矿末期存在硫逸度极高且富Pb、Sb的岩浆流体注入, 这一发现为矿床在浅成、多变地质环境下有岩浆热液参与提供了坚实的矿物学证据, 深化了对该区域成矿机理的认识。

关键词: 脆硫锑铅矿; 矿物学特征; 成因意义; 大店沟金矿; 甘肃

中图分类号: P571; P575 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1023-11

Discovery of Jamesonite from the Dadiangou Gold Deposit, Gansu Province and Its Genetic Significance

FAN Rong¹, SI Mingyang^{2,3}, LIU Jiajun^{2,3,*}, ZHANG Bin^{2,3}, CAO Ruihong¹, LAI Zhao¹, AI Zhonglin¹,
YU Qian¹, DU Baisong⁴

(1. Gansu Zhongjin Gold Mining Co., Ltd., Longnan, Gansu 742400, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. China National Gold Group Corporation Limited, Beijing 100011, China)

Abstract: The newly identified jamesonite in the Dadiangou gold deposit, Liangdang County, Gansu Province, is closely associated with stibnite, galena, pyrite, and quartz. Detailed mineralogical, electron probe microanalysis (EPMA) and X-Ray Powder Diffraction (XRPD) reveal that its chemical composition (average formula $\text{Fe}_{1.02}\text{Pb}_{4.51}\text{Sb}_{5.92}\text{S}_{14.00}$) and crystal structure (monoclinic system, $a = 1.5383 \text{ nm}$, $b = 1.8716 \text{ nm}$, $c = 0.3937 \text{ nm}$) are in good agreement with theoretical values. This study not only identifies the mineral itself but, more importantly, we use its specific occurrence and composition as key geochemical indicators. The formation

收稿日期: 2025-08-26; 修回日期: 2025-10-09; 编辑: 李龚健。

基金项目: 中国黄金集团地质有限公司项目“西秦岭地区李子园一大店沟一带金矿成矿规律与找矿预测研究”(2024-09); 国家自然科学基金重点项目“秦岭造山带金矿床中低熔点亲铜元素对金的超常富集作用与成矿机制”(42430813)。

作者简介: 樊荣, 男, 助理工程师, 1996年出生, 从事金矿勘查研究工作。Email: 1253403217@qq.com。

***通信作者:** 刘家军, 男, 教授, 1963年出生, 从事矿床学、矿床地球化学与区域成矿学的教学与科研工作。
Email: liujiajun@cugb.edu.cn。

引用格式: 樊荣, 司明扬, 刘家军, 等. 甘肃大店沟金矿床中脆硫锑铅矿的发现与成矿启示 [J]. 现代地质, 2026, 40 (4): 1023-1033. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508260034.

FAN Rong, SI Mingyang, LIU Jiajun, et al. Discovery of Jamesonite from the Dadiangou Gold Deposit, Gansu Province and Its Genetic Significance [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (4): 1023-1033. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508260034.

of jamesonite clearly indicates the injection of magma-derived fluids with high sulfur fugacity and enriched in Pb and Sb during the late stage of gold mineralization. This discovery provides robust mineralogical evidence for the involvement of magmatic-hydrothermal processes in the formation of the deposit under the shallow, variable geological conditions, thereby deepening the understanding of the mineralization mechanisms in this region.

Key words: jamesonite; mineralogy; genetic significance; Dadiangou Gold Deposit; Gansu

0 引言

作为一种复合硫盐矿物,脆硫锑铅矿是以英国地质学家 Robert. Jameson 的姓氏命名的,其在自然界中多表现出块状-羽毛状的形态,因此又称为羽毛矿^[1-5]。脆硫锑铅矿常大量产于铅锌矿床、锑矿床中,而在金矿床中并不普遍产出^[6]。作者在甘肃两当县大店沟金矿床中发现了较多的脆硫锑铅矿。大店沟金矿是近年来在西秦岭地区商丹缝合带附近发现的一个较为典型的造山型金矿^[8-9],其形成于印支期陆陆碰撞造山过程中,受深大断裂控制,成矿流体来源于变质脱水及岩浆热液。现已探明的金矿床储量近 18 t,平均金品位为 3.91 g/t^[10-11]。脆硫锑铅矿作为一种常见的硫盐矿物,广泛分布于各类中低温热液矿床中,其形成通常与特定的物理化学条件密切相关。该矿物主要在中低温及中低硫逸度环境下稳定存在,是成矿流体中富集 Pb、Sb、S 等元素的直接产物^[6]。因此,脆硫锑铅矿被视为揭示成矿流体性质、元素迁移行为及矿床形成环境的重要指示矿物^[3, 6]。

在铅锑硫盐矿物中,与脆硫锑铅矿结构相似且常相伴生的成员包括纤硫锑铅矿、针硫锑铅矿及特硫锑铅矿等。然而,这些矿物在此类矿床中

的成分变化规律、其产出形态是否随深度呈现系统性分带等这些问题尚不明确。因此,系统研究这些矿物的共生组合与相互转化关系,对精细刻画热液成矿过程具有关键意义。同时,研究矿床中产出的 Pb-Sb 硫盐矿物,不仅丰富了造山型金矿的矿物组合类型,还对金矿床的成因示踪具有重要的指示意义。

1 地质背景

大店沟金矿产出于商丹缝合带北侧的上元古代—早古生代裂陷火山沉积带内,受到该地区极为复杂的碰撞造山构造体系的影响,区内存在大量印支期酸性岩体并拥有非常发育的构造,这些因素对该地区金的成矿过程发挥了重要作用^[11-17]。矿区主要出露地层包括下元古界秦岭岩群和震旦系—奥陶系丹凤群木其滩组,同时有两条印支期花岗岩脉产出在矿区东西两侧,其中震旦系—奥陶系为主要的赋矿地层(图 1)^[15-16, 18-20];同时,受强烈的构造运动影响,矿区也具有极为发育的构造,主要以 NE 向和 NW 向两种类型为主;矿区范围内岩浆活动频繁且十分强烈,从加里东期到燕山期都受到岩浆活动的影响,在其附近出露有天子山、太白山等典型岩体,其中与大店沟金矿的成矿作用关系较为密切的为印支期中-酸性的岩浆侵入活

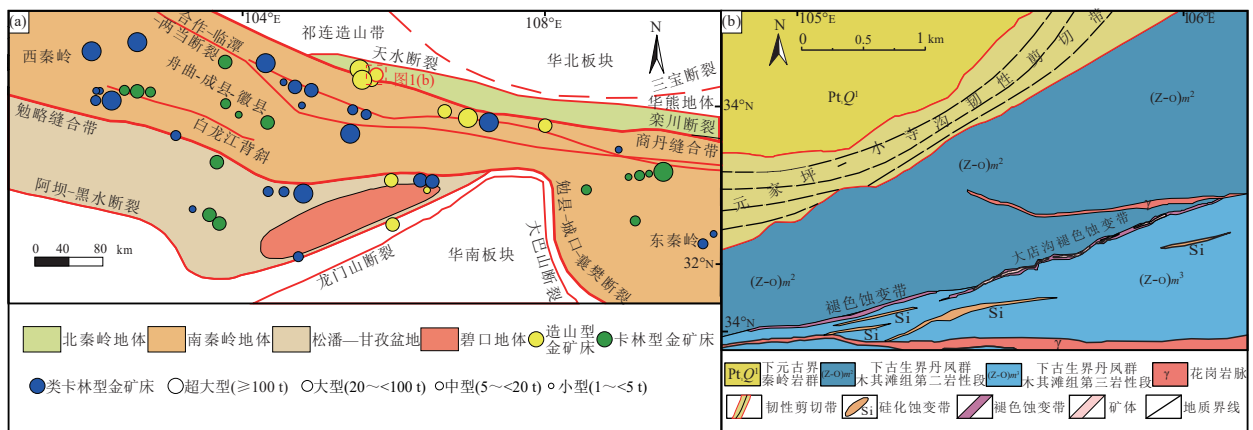


图 1 大店沟金矿区大地构造图 (a) 和地质简图 (b) (据文献 [18] 修改)

Fig. 1 Tectonic map (a) and simplified geological map (b) of the Dadiangou gold deposit (modified after reference [18])

动, 但大店沟金矿区域内仅可见部分中基性和中、酸性岩脉, 岩浆岩并不发育^[9-10, 18, 20-21]。

矿体均产出在矿区内元家坪一小寺沟韧性剪切带南侧的次级构造(即褪色蚀变韧性剪切带)中, 总体呈NEE向顺层产出, 多以似层状、透镜状的形态分布, 目前已圈定矿体14条, 其中1号矿体的规模最大, 其次为4号、5号、9号矿体, 成矿后的构造较弱, 对矿体的破坏作用不强, 没有破坏矿体^[11, 15], 其赋矿围岩较为单一, 是绢云绿泥石英片岩^[22-23]。

大店沟金矿床的围岩蚀变以褪色蚀变为主要特征, 发育绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、钾长石化, 在局部硅化强烈。其中黄铁矿化、绢云母化与金成矿联系紧密^[10-11, 14-16, 18-19, 24]。矿区金属硫化物发育, 主要的载金矿物为黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿等, 金矿物以自然金为主, 可观察到少量银金矿和针碲金银矿, 此外, 还可观察到辉碲铋矿、针硫铋铅矿、碲铅矿、碲镍矿等碲铋类矿物。主要的脉石矿物为石英和铁白云石, 同时还观察到绢云母、绿泥石、方解石等。矿石结构以结晶结构、包含结构、交代结构为主, 矿石构造主要为脉状、浸染状构造等。金矿石工业类型主要为石英脉型, 蚀变岩型次之。

大店沟金矿床的形成过程可以划分为热液成矿时期和表生氧化期。其中热液成矿期又可划分为黄铁矿-石英、多金属硫化物-碲铋化物-石英和石英-碳酸盐等3个成矿阶段^[20]。前人研究认为, 大店沟金矿是一个与岩浆热液活动密切相关的造山型金矿床^[15]。

2 矿物特征

2.1 矿物形态

两当县大店沟金矿床中新发现的脆硫锑铅矿(图2)产出于含浸染状、细脉状黄铁矿的石英脉金矿石中, 与同为针状矿物的辉锑矿以及铅灰色的方铅矿共同产出(图2和3)。脆硫锑铅矿主要呈毛发状、针状分布于石英脉裂隙和空洞中(图2(a)和(b)), 说明其为成矿热液晚期的产物。在反光显微镜下, 脆硫锑铅矿主要呈针状、柱状、不规则粒状分布在辉锑矿、方铅矿等矿物中, 共生矿物有方铅矿、辉锑矿、黄铁矿以及硫锑铅矿、纤硫锑铅矿、特硫锑铅矿等(图2(c)-(1))。

2.2 物理性质

脆硫锑铅矿的新鲜面呈现铅灰色, 具有灰黑色的条痕色, 其风化面则多呈浅紫、浅蓝等锈色, 晶体为单斜晶系, 显金属光泽, 是一种不透明矿物, 解理为一组{001}中等解理。较大的颗粒可达5 mm, 小者仅在显微镜下才能观察到, 一般为0.05~3 mm。质地较为柔软, 摩氏硬度介于2.5~3.5之间, 比重为6.5。

脆硫锑铅矿在反光显微镜下呈现灰白色的反射色, 具有中等偏高的反射率, 矿物双反射清晰, 呈灰白色-绿黄白色。正交偏光镜下则具有强非均质性(灰蓝色-灰褐色)、无内反射特点(图2(g)-(j))。

3 样品信息与测试方法

作者选取了6颗脆硫锑铅矿、1颗纤硫锑铅矿、2颗针硫锑铅矿和4颗特硫锑铅矿样品在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行了电子探针分析(EPMA)。仪器型号为JXA-8230型电子探针; 工作条件选用加速电压15 kV和电流20 nA, 束斑直径5 μm , 元素收集时间为15 s。分析元素及其标样为Pb. 方铅矿, Sb. 辉锑矿, Fe和S. 黄铁矿, Cu. 黄铜矿, Ni. 针镍矿, Zn. 闪锌矿, As. 毒砂, Au. 自然金。使用ZAF修正法对获得的数据进行处理, 其分析数据结果保留至小数点后三位, 简化后的数据见表1。

同时, 选取1件脆硫锑铅矿样品在中国地质大学(北京)实验中心X射线单晶衍射实验室中进行X射线粉晶衍射分析。实验仪器为XtaLAB PRO 007HF单晶X射线衍射仪, 实验条件: $\text{MoK}\alpha$ ($0.71037 \times 10^{-1} \text{ nm}$), 电压为50 kV, 电流24 mA, 环境温度23 $^{\circ}\text{C}$, 湿度为35%, 处理实验数据得到的样品的衍射数据和粉晶衍射图谱(表2和图4), 并通过比对标准脆硫锑铅矿的晶体结构^[25], 以及ICDD卡片中42-1391号标准脆硫锑铅矿的衍射特征峰值^[26], 得出不同的 2θ 对应的晶面及其所包含的主要键位(表2)。

4 结 果

4.1 电子探针分析

电子探针分析数据结果(表1)显示: 脆硫锑铅矿中Sb质量分数约为32.69%~33.55%, 平均值为32.98%; Pb的质量分数约为42.38%~

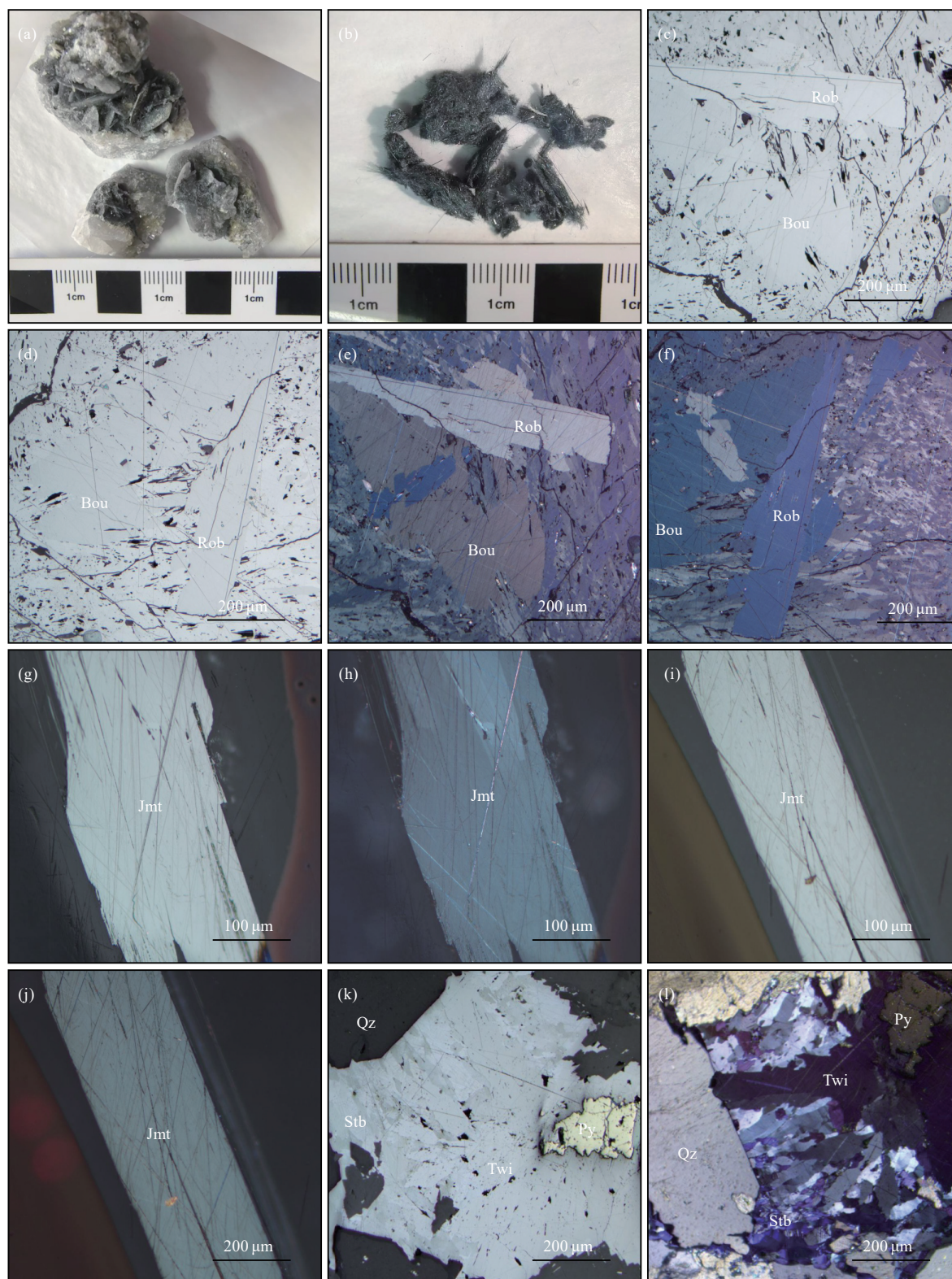


图2 脆硫锑铅矿及共生矿物的手标本及镜下特征

Fig. 2 Hand specimen and microscopic characteristics of jamesonite and associated minerals

(a) 石英脉空洞及裂隙中的脆硫锑铅矿样品;(b) 毛发状及针状的脆硫锑铅矿样品;(c和d) 砂光片中的硫锑铅矿以及纤硫锑铅矿,反射光(-);(e和f)砂光片中的硫锑铅矿以及纤硫锑铅矿,反射光(+);(g) 柱状脆硫锑铅矿晶体,反射光(-);(h) 柱状脆硫锑铅矿晶体,反射光(+);(i) 针状脆硫锑铅矿晶体,反射光(-);(j) 针状脆硫锑铅矿晶体,反射光(+);(k) 与辉锑矿共生并包裹黄铁矿的特硫锑铅矿,反射光(-);(l) 与辉锑矿共生并包裹黄铁矿的特硫锑铅矿,反射光(+);Bou. 硫锑铅矿;Twi. 特硫锑铅矿;Jmt. 脆硫锑铅矿;Py. 黄铁矿;Qz. 石英;Rob. 纤硫锑铅矿;Stb. 辉锑矿

矿物	黄铁矿-石英阶段	碲铋化物-硫化物-铁白云石-石英阶段	辉锑矿-石英-碳酸盐阶段
石英			
钾长石			
绢云母			
绿泥石			
毒砂			
黄铁矿			
磁黄铁矿			
黄铜矿			
铁白云石			
方铅矿			
闪锌矿			
自然金			
碲铅矿			
碲镍矿			
辉锑矿			
针硫锑铅矿			
自然铋			
银金矿			
方解石			
辉锑矿			
特硫锑铅矿			
硫锑铅矿			
脆硫锑铅矿			
纤硫锑铅矿			
针硫锑铅矿			

图 3 大店沟金矿矿物生成顺序（修改自文献 [20]）

Fig. 3 Mineral formation sequence of the Dadiangou gold deposit (modified from reference [20])

43.00%，平均值为 43.74%；Fe 的质量分数约为 2.54% ~ 2.65%，平均值为 2.60%；S 的质量分数约为 20.28% ~ 20.74%，平均值 20.54%，并含有微量的 Zn、As、Cu、Co、Ni 等元素。根据电子探针分析结果的平均值计算得到脆硫锑铅矿的化学分子式为 $\text{Fe}_{1.02}\text{Pb}_{4.51}\text{Sb}_{5.92}\text{S}_{14.0}$ 。与脆硫锑铅矿的标准化学分子式 $\text{FePb}_4\text{Sb}_6\text{S}_{14}$ 相比，本次研究的脆硫锑铅矿样品中 Pb 含量略高于正常水平。

纤硫锑铅矿中 Sb 质量分数为 34.47%；Pb 的质量分数为 43.77%；S 的质量分数为 20.38%，并含有微量的 Zn、As、Cu、Ni 等元素。根据电子探针分析结果的平均值计算得到纤硫锑铅矿的化学分子式为 $\text{Pb}_{4.32}\text{Sb}_{5.79}\text{S}_{13.00}$ 。与纤硫锑铅矿的标准化学分子式 $\text{Pb}_4\text{Sb}_6\text{S}_{13}$ 相比，本次研究的纤硫锑铅矿样品中 Pb 含量也略高于正常水平。

针硫锑铅矿中 Sb 质量分数为 24.11% ~ 24.57%；Pb 的质量分数为 58.42% ~ 58.62%；S 的质量分数为 17.91% ~ 18.08%，并含有微量的 Fe、As、Ni 等元素。根据电子探针分析结果的平均值计算得到针硫锑铅矿的化学分子式为 $\text{Pb}_{3.01}\text{Sb}_{2.11}\text{S}_{6.00}$ 。与针硫锑铅矿的标准化学分子式 $\text{Pb}_3\text{Sb}_2\text{S}_6$ 相比，本次研究的针硫锑铅矿样品中 Sb 含量略高于正常水平。

特硫锑铅矿中 Sb 质量分数约为 43.15% ~ 43.33%，平均值为 43.23%；Pb 的质量分数约为 33.25% ~ 33.97%，平均值为 33.54%；As 的质量分数约为 0.54% ~ 0.73%，平均值为 0.61%；S 的

表 1 大店沟金矿中铅锑硫盐矿物的电子探针分析数据及晶体化学式计算（wt.%）

Table 1 Electron microprobe analyses of Pb-Sb-bearing sulfosalts and their corresponding to the chemical formula (wt.%)

样品号	矿物名称	化学分子式	Sb	Pb	Fe	S	As	Ni	Cu	Co	Zn	Au	总量
23DDG-S1-1	脆硫锑铅矿 (Jamesonite)	$\text{Fe}_{1.01}\text{Pb}_{4.48}\text{Sb}_{6.04}\text{S}_{14.00}$	33.55	42.38	2.56	20.49	0.23	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	99.28
23DDG-S1-3		$\text{Fe}_{1.02}\text{Pb}_{4.54}\text{Sb}_{5.93}\text{S}_{14.00}$	33.02	43.00	2.59	20.54	0.12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	99.29
23DDG-S1-4		$\text{Fe}_{1.02}\text{Pb}_{4.48}\text{Sb}_{5.81}\text{S}_{14.00}$	32.71	42.92	2.63	20.74	0.14	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	99.16
23DDG-S1-5		$\text{Fe}_{1.04}\text{Pb}_{4.48}\text{Sb}_{5.94}\text{S}_{14.00}$	33.12	42.52	2.65	20.56	0.16	0.08	0.03	0.00	0.01	0.00	99.13
23DDG-S1-7		$\text{Fe}_{1.04}\text{Pb}_{4.57}\text{Sb}_{5.96}\text{S}_{14.00}$	32.79	42.79	2.62	20.28	0.20	0.00	0.05	0.02	0.06	0.00	98.82
23DDG-S1-8		$\text{Fe}_{0.99}\text{Pb}_{4.50}\text{Sb}_{5.85}\text{S}_{14.00}$	32.69	42.80	2.54	20.61	0.12	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	98.79
平均值		$\text{Fe}_{1.02}\text{Pb}_{4.51}\text{Sb}_{5.92}\text{S}_{14.00}$	32.98	43.74	2.60	20.54	0.16	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	100.09
23DDG-S2-1	纤硫锑铅矿 (Robinsonite)	$\text{Pb}_{4.32}\text{Sb}_{5.79}\text{S}_{13.00}$	34.47	43.77	0.00	20.38	0.31	0.17	0.08	0.00	0.02	0.00	99.20
23DDG-S2-2	针硫锑铅矿 (Falkmanite)	$\text{Pb}_{3.03}\text{Sb}_{2.17}\text{S}_{6.00}$	24.57	58.42	0.05	17.91	0.15	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	101.19
23DDG-S2-3		$\text{Pb}_{3.01}\text{Sb}_{2.11}\text{S}_{6.00}$	24.11	58.62	0.01	18.08	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.99
平均值		$\text{Pb}_{3.02}\text{Sb}_{2.14}\text{S}_{6.00}$	24.34	58.52	0.03	18.00	0.16	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	101.09
23DDG-82-1	特硫锑铅矿 (Twinnite)	$\text{Pb}_{0.94}(\text{Sb}, \text{As})_{2.13}\text{S}_{4.00}$	43.15	33.25	0.06	21.83	0.57	0.10	0.21	0.00	0.02	0.00	99.19
23DDG-82-2		$\text{Pb}_{0.94}(\text{Sb}, \text{As})_{2.11}\text{S}_{4.00}$	43.21	33.70	0.01	22.12	0.59	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	99.80
23DDG-82-3		$\text{Pb}_{0.97}(\text{Sb}, \text{As})_{2.14}\text{S}_{4.00}$	43.33	33.97	0.05	21.70	0.54	0.12	0.21	0.00	0.04	0.00	99.95
23DDG-82-4		$\text{Pb}_{0.95}(\text{Sb}, \text{As})_{2.15}\text{S}_{4.00}$	43.24	33.25	0.01	22.76	0.73	0.00	0.21	0.03	0.00	0.00	99.22
平均值		$\text{Pb}_{0.95}(\text{Sb}, \text{As})_{2.13}\text{S}_{4.00}$	43.23	33.54	0.03	21.85	0.61	0.05	0.20	0.01	0.03	0.00	99.54

表 2 脆硫锑铅矿的 X 射线粉晶衍射数据与标准矿物卡片对比

Table 2 Comparison of the X-ray powder diffraction data of jamesonite with the standard mineral card

样品号			23DDG-1		ICDD 42-1391 ^[25]	
2θ/°	晶面参数 (h k l)	原子键位/配位关系	d/nm	I/I ₀	d/nm	I/I ₀
8.064	(-3 1 0)	Fe-Fe	0.5044	1	0.5047	6
10.082	(-3 3 0)	Pb1-Sb2	0.4036	1	0.4050	3
10.361	(4 0 0)	S3-S4-S7	0.3928	2	0.3927	13
10.614	(-4 1 0)	Fe-Fe	0.3835	4	0.3847	26
10.982	(0 2 1)	Fe-S5-S7	0.3706	1	0.3713	9
11.359	(1 2 1)	Fe-Pb2	0.3584	2	0.3588	8
11.919	(-2 5 0)	S4-S6	0.3416	1	0.3437	100
12.230	(2 2 1)	Fe-S1	0.3329	1	0.3317	2
12.909	(-2 3 1)	Fe-Fe-Sb1	0.3155	1	0.3157	8
13.190	(-3 5 0)	Fe-Fe-S5	0.3088	2	0.3089	19
13.684	(3 2 1)	Fe-Sb1-S1	0.2977	1	0.2986	4
14.475	(3 3 1)	Fe-Pb1	0.2815	2	0.2823	17
14.923	(-4 2 1)	Pb1-S3-Fe	0.2731	2	0.2738	13
17.280	(2 6 1)	Fe-S2	0.2361	0	0.2365	4
17.844	(5 3 1)	Fe-Fe-S1-S2	0.2287	1	0.2296	10
19.368	(6 2 1)	Fe-Pb2	0.2108	0	0.2104	1
20.257	(0 0 2)	Fe-Pb2	0.2020	2	0.2023	7
20.911	(-8 1 0)	S2-S2	0.1954	1	0.1953	2
22.391	(-6 6 1)	Fe-Fe	0.1827	1	0.1826	4
23.554	(-9 1 0)	Fe-Fe	0.1738	0	0.1739	2
26.149	(-10 1 0)	Fe-Fe	0.1568	1	0.1565	1
29.111	(-9 8 0)	Pb2-Sb1	0.1411	1	0.1409	2

注：大店沟脆硫锑铅矿的晶胞参数： $a = 1.5383 \text{ nm}$ ， $b = 1.8716 \text{ nm}$ ， $c = 0.3937 \text{ nm}$ (计算方法：最小二乘法)。

质量分数约为 21.70% ~ 22.76%，平均值 21.85%，本次研究的特硫锑铅矿样品中 Sb 和 As 的总含量略并含有微量的 Fe、Zn、Cu、Co、Ni 等元素。根据 高于正常水平。

电子探针分析结果的平均值计算得到特硫锑铅矿的化学分子式为 $\text{Pb}_{0.95}(\text{Sb}, \text{As})_{2.13}\text{S}_{4.00}$ 。与特硫锑铅矿的标准化学分子式 $\text{Pb}(\text{Sb}, \text{As})_2\text{S}_4$ 相比，

4.2 X 射线粉晶衍射分析

通过对样品的衍射数据和粉晶衍射图谱（表 2 和图 4）分析可以看出，样品衍射图谱的最强峰值

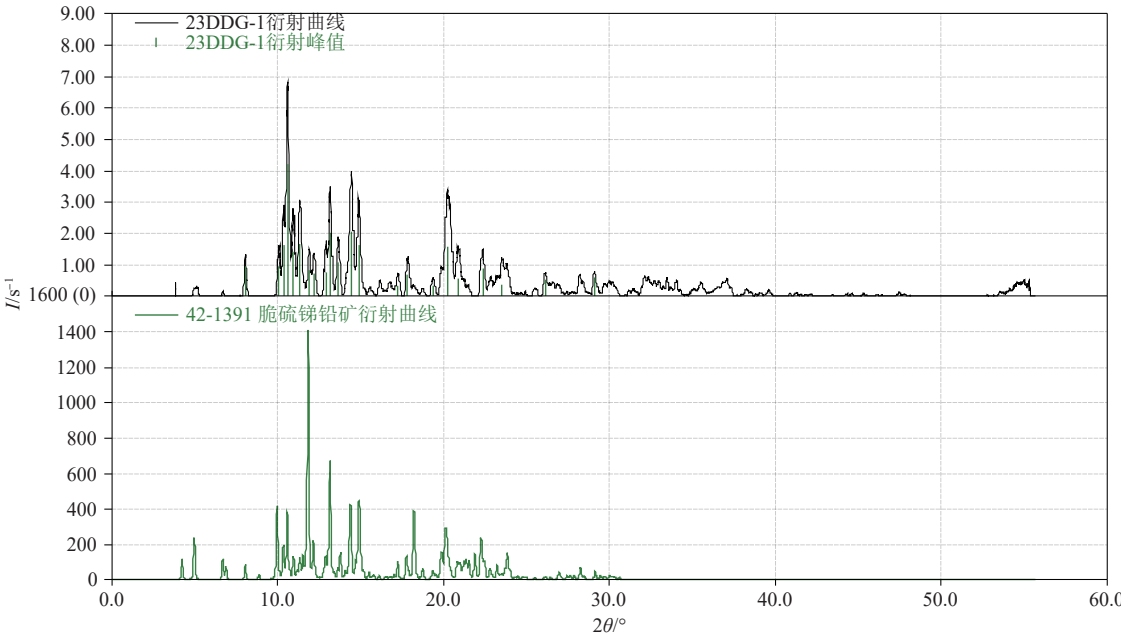


图 4 大店沟金矿床中脆硫锑铅矿与 ICDD 卡片 42-1391 号^[26] 衍射图对比

Fig. 4 The diffractogram on the jamesonite in the Dadiangou deposit compared with ICDD No. 42-1391^[26]

为0.3835 nm, 第二强的峰值为0.2815 nm, 实验所得的样品衍射图谱的峰值与ICDD卡片中42-1391号标准脆硫锑铅矿的衍射特征峰值^[26]基本吻合。

运用最小二乘法处理实验数据, 得到矿物的晶胞参数: $a = 15.383 \text{ nm}$, $b = 18.716 \text{ nm}$, $c = 3.937 \text{ nm}$, 与ICDD卡片中42-1391号标准单斜晶系脆硫锑铅矿的晶胞参数值 ($a = 15.7200 \text{ nm}$, $b = 19.1000 \text{ nm}$, $c = 4.0336 \text{ nm}$)^[26] 近于相同, 可以确定样品的晶胞结构与已知典型的脆硫锑铅矿一致。此外, 本次研究中所得到的Fe原子之间及Fe原子与其他元素之间所在平面的X射线衍射峰值较高, 而与Pb1、S6和S1有关的平面X射线衍射与标准42-1391号卡片相比具有一定的峰值位移(表2)。

5 讨论

5.1 成矿地质背景与流体来源成矿地质条件

锑作为电负性偏高的亲铜离子, 离子半径较小, 普遍具有在残余岩浆中富集的倾向, 大多在岩浆前期的分异作用中就开始富集, 其在火成岩中含量极少, 属于分散元素, 但在沉积岩中可观察到锑的富集现象, 锑矿物通常产出的矿床类型

主要包括与花岗岩有关的硫化物矿床、赋存在碎屑岩-碳酸盐中的钨-锑-汞层控矿床、热液铅锌矿床和辉长质深成岩相关的岩浆硫化物矿床等, 而本次研究的大店沟金矿恰好属于与花岗岩有关的硫化物矿床^[27]。

前人研究认为, 锑的成矿与岩浆活动以及深部的动力作用可能存在重要联系^[28-30], 而在研究区内, 发现脆硫锑铅矿及辉锑矿等矿物的位置恰好位于观察到的煌斑岩脉附近, 根据张全才等^[13]进行的岩石化学全分析(表3)以及本次研究和缪广等^[15]进行的H-O同位素与S同位素分析(图5和6)所得结果可以看出, 大店沟金矿的金与钙、硫等元素近于正相关, 且成矿流体以变质流体为主, 同时岩浆水以及大气降水都参与了成矿过程, 且矿石成矿过程中的S主要是来自深部的幔源S^[13, 15, 20, 31-38], 这都表明了大店沟金矿的成矿过程有岩浆活动的参与, 矿床中的脆硫锑铅矿以及辉锑矿等锑矿物为岩浆活动参与成矿的产物。大店沟金矿位于西秦岭地区, 地处三大板块的碰撞区域, 学术界普遍认为其形成与印支期-燕山期勉略洋壳的俯冲、碰撞等一系列构造运动以及岩浆的频繁活动密切相关^[9], 这也为岩浆参与成矿、成矿物质富集以及流体运移提供了条件。

表3 矿石中岩石化学全分析资料相关系数矩阵(引自文献[13])

Table 3 Correlation coefficient matrix of whole-rock geochemical analysis data in ore (cited from reference [13])

	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量	Au × 10 ⁻⁶
K ₂ O	1	0.269	0.129	0.564	0.813	0.552	0.288	0.068	-0.695	0.842	0.348	0.350	0.001
Na ₂ O		1	0.460	0.665	0.570	0.262	0.378	0.539	-0.648	0.476	0.452	0.360	-0.118
CaO			1	0.640	-0.058	0.321	-0.317	0.946	-0.731	-0.150	-0.529	0.881	0.406
MgO				1	0.582	0.474	0.443	0.719	-0.890	0.441	0.162	0.696	0.053
Al ₂ O ₃					1	0.524	0.620	-0.020	-0.606	0.950	0.741	0.074	-0.346
Fe ₂ O ₃						1	0.140	0.376	-0.673	0.484	-0.005	0.383	-0.326
FeO							1	-0.086	-0.193	0.571	0.750	-0.095	-0.478
MnO								1	-0.722	-0.134	-0.424	0.840	0.210
SiO ₂									1	-0.530	-0.026	-0.810	-0.106
TiO ₂										1	0.733	0.047	-0.248
P ₂ O ₅											1	-0.433	-0.438
烧失量												1	0.422
Au/10 ⁻⁶													1

5.2 矿物生成顺序与物理化学条件

在大店沟金矿床中, 发育有晶洞状构造、脉状构造、放射状构造等以充填为主的多种典型矿石构造, 其成矿热液沿构造破碎带或构造裂隙充填沉淀的结果, 说明成矿前曾有构造活动, 经成矿热液充填后形成^[39]。脆硫锑铅矿等铅锑硫盐矿

物发育于断层构造破碎带内, 该断层部分切穿矿体, 说明锑矿物的形成稍晚于金成矿, 也证明了其为岩浆热液晚期的产物。与此同时, 可以观察到脆硫锑铅矿包裹先期生成的黄铁矿, 从电子探针结果中可以看出, 大店沟金矿中的脆硫锑铅矿几乎不含金(表1), 其周围也未发现有自然金或

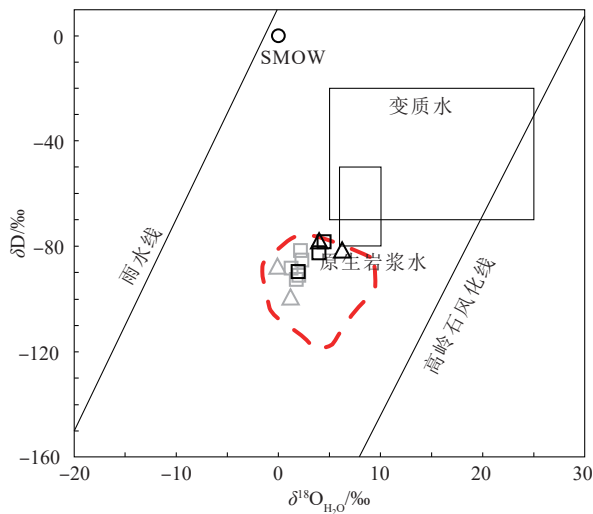


图5 大店沟金矿成矿流体 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 图解 (修改自文献 [15])

Fig. 5 $\delta^{18}\text{O}$ - δD diagram of the Dadiangou gold ore-forming fluid (modified after reference [15])

灰色数据点来源于文献[15],黑色数据点为本文研究补充

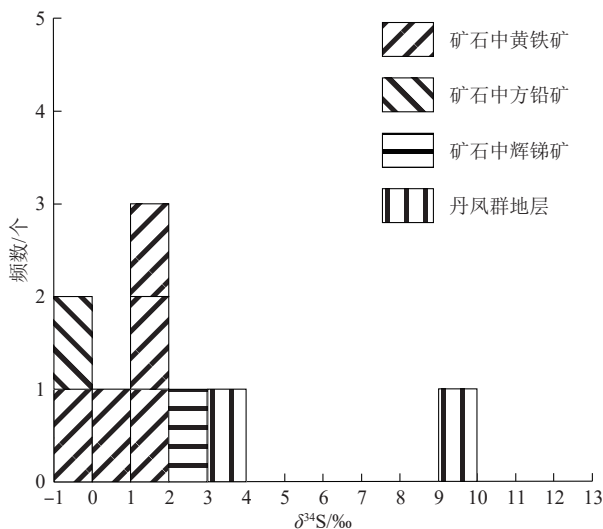


图6 大店沟金矿硫同位素分布直方图 (修改自文献 [15])

Fig. 6 Sulfur isotope histogram of the Dadiangou gold deposit (modified after reference [15])

其他金矿物的产出,而之前的研究表明,黄铁矿常与自然金共生,同时也是主要的载金矿物^[15]。因此进一步证明了锑的形成稍晚于金矿化。

通过镜下观察和电子探针分析发现,在脆硫锑铅矿周围还产出有针硫锑铅矿、特硫锑铅矿、纤硫锑铅矿和辉锑矿等一系列的Pb-Sb-S体系矿物(图7(a))。值得一提的是,在Pb-Sb-S体系中,存在20多种铅锑硫盐矿物(图7(b))^[40-41],这

些矿物作为典型的低温热液矿物,其产出证明了在大店沟金矿的金成矿末期有硫逸度较高的含Pb、Sb成矿流体的参与,由此证明了岩浆流体参与了成矿,反映了矿床是在浅成多变条件下生成的。

铅锑矿物生成顺序一般取决于介质的pH值、温度和硫的活度等因素^[42]。在锑矿床中,铅锑硫盐矿物按照Pb/Sb比值由高到低的顺序晶出;但在铅锌矿床和某些金矿床中,铅锑硫盐矿物晚于方铅矿结晶,但顺序往往取决于是否有附加阳离子的加入(如As、Fe等),而含As的铅锑硫盐矿物往往按照Sb/As比值增高的次序晶出^[42]。大店沟金矿床中的铅锑硫盐矿物包括针硫锑铅矿、纤硫锑铅矿、脆硫锑铅矿和特硫锑铅矿(图7(a)),其平均Pb/Sb原子比值分别为1.41、0.76、0.75和0.46,且分别产于1700、1700、1700和1650中段。同时,特硫锑铅矿与辉锑矿共生发育(图2(k)和(1))。浅部的针硫锑铅矿、纤硫锑铅矿和脆硫锑铅矿以针柱状和束状为主,含少量粒状集合体(图2(a)-(j)),而深部特硫锑铅矿呈粒状集合体状,与辉锑矿共生(图2(k)和(1))。说明浅部成矿空间更大,反映张性构造条件下快速结晶的环境;向深部逐渐过渡为物质来源充足的压性构造条件,结晶条件逐渐趋于稳定。因此大店沟金矿床中硫盐矿物的Pb/Sb比值和产状的变化表明,深部仍有一定的Sb(-Au)成矿潜力。

大店沟金矿中脆硫锑铅矿的电子探针数据表明,其Pb含量要高于标准值,且Fe原子之间及Fe原子与其他元素之间所在平面的X射线衍射峰值较高,说明随着Pb含量的升高,Fe原子位置受到Pb原子的挤压而发生更强烈的振动。除此以外,Pb1, S6和S1有关的平面X射线衍射发生峰值位移表明,Pb含量的上升还导致了Pb和S原子周围的电负性下降,从而引起这些原子电子密度增加,进一步表现为在X射线衍射图谱中发生了正位移^[43]。

5.3 对矿床成因的启示

(1) 成矿流体性质的指示。

脆硫锑铅矿的形成需要富Sb、Pb的流体环境,其出现表明成矿流体中Sb和Pb的浓度较高,且处于还原-弱还原条件^[44]。刘子安等^[45]通过对西藏扎西康锑铅锌银矿床中硫锑铅矿等金属硫化物、硫盐矿物的微量元素特征综合研究,认为其有效地示踪了中低温热液的成矿作用。测试得出

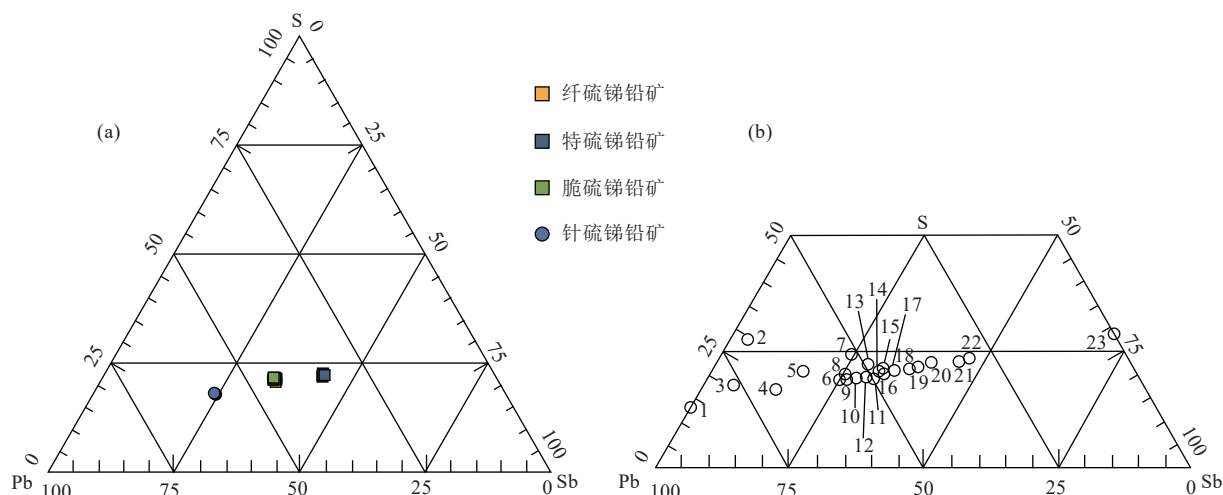


图7 实测大店沟金矿床铅锑硫盐矿物的组成 (a) 及 Pb-Sb 标准系列硫盐矿物 Pb-Sb-S 体系三角图解 (b, 根据文献 [40] 修改)

Fig. 7 The Pb-Sb-S compositional diagram showing (a) the analyzed Pb-Sb sulfosalt in the Dadiangou gold deposit and (b) the standard Pb-Sb sulphosalt series (modified after reference [40])

图7(a)中黄色方块、绿色方块、蓝色方块和蓝色圆圈分别为大店沟金矿床实测纤硫锑铅矿、特硫锑铅矿、脆硫锑铅矿和针硫锑铅矿的投点;图7(b)中序号代表矿物如下:1. 方铅矿, PbS ; 2. 索硫锑铅矿, $\text{Pb}_{17}\text{Sb}_{22}\text{S}_{50}$; 3. 约硫锑铅矿: $\text{Pb}_{14}(\text{Sb}, \text{As})_6\text{S}_{23}$; 4. 硫锑锑铅矿, $\text{Pb}_{14}(\text{Sb}, \text{As})_6\text{S}_{13}$; 5. 维硫锑铅矿, $\text{Pb}_2(\text{Sb}, \text{As})_2\text{S}_5$; 6. 麦硫锑铅矿, $\text{Pb}_{17}(\text{Sb}, \text{As})_{16}\text{S}_{19}$; 7. 格硫锑铅矿, $\text{Pb}_9\text{Sb}_{16}\text{S}_{33}$; 8. 针硫锑铅矿, $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$; 9. 块硫锑铅矿, $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$; 10. 板硫锑铅矿, $\text{Pb}_9\text{Sb}_8\text{S}_{21}$; 11. 莫硫锑铅矿, $\text{Pb}_6\text{Sb}_6\text{S}_{14}$; 12. 羽毛矿, $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{S}_3$; 13. 达硫锑铅矿, $\text{Pb}_{11}\text{Sb}_{12}\text{S}_{29}$; 14. 普硫锑铅矿, $\text{Pb}_{16}\text{Sb}_{18}\text{S}_{43}$; 15. 异硫锑铅矿, $\text{Pb}_7\text{Sb}_8\text{S}_{19}$; 16. 劳硫锑铅矿, $\text{Pb}_{22}\text{Sb}_{26}\text{S}_{61}$; 17. 斯硫锑铅矿, $\text{Pb}_{12}\text{Sb}_{10}\text{S}_{27}$; 18. 纤硫锑铅矿, $\text{Pb}_4\text{Sb}_6\text{S}_{13}$; 19. 斜硫锑铅矿, $\text{Pb}_5\text{Sb}_8\text{S}_{17}$; 20. 特硫锑铅矿, $\text{Pb}(\text{Sb}, \text{As})_2\text{S}_4$; 21. 辉锑铅矿, $\text{Pb}_9\text{Sb}_{22}\text{S}_{42}$; 22. 柱辉锑铅矿, $\text{Pb}_3\text{Sb}_8\text{S}_{15}$; 23. 辉锑矿, Sb_2S_3

大店沟金矿床流体包裹体均一温度峰值范围(约 $160 \sim 220^\circ\text{C}$)^[15]与造山型金矿的中低温热液阶段成矿温度一致,进一步支持脆硫锑铅矿及大店沟金矿床形成于中低温热液环境。

(2) 多阶段成矿过程的证据。

结合镜下矿物共生组合特征,可以确定成矿过程中存在多期次流体活动:早期高温毒砂-黄铁矿阶段-中低温脆硫锑铅矿-辉锑矿阶段,反映了成矿流体的演化路径(如温度降低、硫逸度变化等)^[20, 45-46]。

(3) 构造-流体耦合的响应。

脆硫锑铅矿的纤维状结构可能受构造应力控制,指示成矿期存在强烈的剪切或张性裂隙活动,流体沿构造薄弱带运移并沉淀,进一步印证了造山型金矿的“构造控矿”特征^[30]。这与大店沟金矿床主要受韧性剪切带控制的特征相对应。

(4) 区域成矿规律的启示。

大店沟金矿位于北秦岭 As-Au-Ag-Sb-Pb-Zn-W-Mo 地球化学省、李子园-太阳寺 Au-Ag-Pb-Zn-Cd 地球化学带中^[47],区内发育有 Au、Ag、Pb、Zn、As、Sb、Hg 等一系列元素的富集异常^[48],也发育有李子园、红石等区域内重要的金

矿床^[49-50]。脆硫锑铅矿的发现为秦岭造山带西段的金-锑多金属成矿系统提供了新线索,暗示该区可能存在隐伏的 Sb-Pb 矿化。脆硫锑铅矿可作为金矿化的间接指示矿物,尤其在石英-硫化物脉发育区,对区域找矿工作具有指导意义。

总的来说,甘肃大店沟金矿床中脆硫锑铅矿的发现,不仅丰富了造山型金矿的矿物组合类型,还为理解成矿流体演化、元素迁移-沉淀机制提供了关键证据。未来研究可进一步结合流体包裹体分析、硫同位素示踪和年代学手段,揭示 Sb-Pb-Au 的源区及成矿动力学背景,为区域找矿模型建立提供科学依据,此外,还深化了对造山型金矿多金属成矿过程的认识,并为勘查 Sb-Au 共生矿床提供了新方向。

6 结 论

(1) 本研究表明,甘肃两当县大店沟金矿床中发现的脆硫锑铅矿研究意义主要体现在矿床成因与成矿过程等方面。该矿物主要与辉锑矿、方铅矿、黄铁矿及石英共生,形态以针状、毛发状、束状及不规则粒状为主,指示多期次流体活动的结晶特征。

(2) X射线粉晶衍射分析揭示脆硫锑铅矿的晶体结构 ($a = 15.383 \text{ nm}$, $b = 18.716 \text{ nm}$, $c = 3.937 \text{ nm}$) 与标准脆硫锑铅矿一致, 但电子探针成分分析揭示其Pb含量显著偏高, 平均分子式为 $\text{Fe}_{1.02}\text{Pb}_{4.51}\text{Sb}_{5.92}\text{S}_{14}$ 。成分偏差进一步在衍射图谱中表现为特定晶面(如含Fe、Pb等原子平面)的峰值强度变化与位移, 反映晶体结构中存在由Pb替代引起的局部晶格调整。

(3) 脆硫锑铅矿的形成指示了成矿末期存在高硫逸度、富Pb-Sb的岩浆热液流体参与。其形态组合在垂向上呈现规律性变化: 浅部以针状、毛发状为主, 反映快速结晶环境; 向深部逐渐过渡为束状与粗粒结构, 指示结晶条件趋于稳定。这一分带规律结合其成分特异性, 不仅为理解造山型金矿中多金属共生机制提供了矿物学证据, 也为区域深部Sb-Pb-Au资源的勘查提供了有效的矿物标志与空间预测依据。

参考文献:

- [1] LU X L, LU J S, CUI B T. Study on increase produce influence factors of antimony white in Ji Yuan Wanyang Smelting Co. LTD [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 295(5): 052029.
- [2] 武威. 脆硫锑铅矿低温熔盐冶炼新工艺及机理研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [3] 李锡林. 大厂矿田脆硫锑铅矿族矿物研究的新进展[J]. 矿物学报, 1986, 6(4): 371-374.
- [4] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209.
- [5] 王新雨, 王书来, 刘明, 等. 青海省祁漫塔格牛苦头铅锌矿床年代学与矿物微量元素特征研究[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 326-344.
- [6] 邓宗立. 广西珍珠坡矿床的脆硫锑铅矿研究[J]. 成都地质学院学报, 1987, 14(4): 42-49.
- [7] 孙杨, 周敖日格勒, 谢富伟, 等. 西藏龙玛拉砂卡岩型铅锌多金属矿床金属矿物特征及地质意义[J]. 矿床地质, 2024, 43(2): 304-318.
- [8] 曹瑞荣, 缪广, 曹雪峰, 等. 甘肃大店沟金矿床剥蚀程度及深部找矿方向[J]. 世界有色金属, 2023(11): 49-51.
- [9] 霍福臣. 西秦岭造山带的建造与地质演化[M]. 西安: 西北大学出版社, 1995: 121-157.
- [10] 李初平, 萧炬, 郭英廷, 等. 甘肃省两当县龙王沟地区大店沟金矿详查报告[R]. 西安: 核工业西北经济技术公司, 2009.
- [11] 孙腾飞. 西秦岭陇南地区大店沟金矿地质特征及找矿方向[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [12] 李亚东. 西秦岭—松潘金三角地区金矿带划分及特征[J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(1): 43-49.
- [13] 张全才, 王海岗, 张凯, 等. 大店沟金矿矿石化学成分及微量元素特征分析[J]. 科技创业月刊, 2011, 24(2): 187-189.
- [14] 吴金刚, 张圆, 杨绍虎. 甘肃两当县大店沟金矿地质特征及找矿标志[J]. 矿产与地质, 2015, 29(2): 163-167.
- [15] 缪广, 董国臣, 屈海浪, 等. 西秦岭大店沟金矿成矿流体演化及矿床成因[J]. 现代地质, 2021, 35(6): 1565-1575.
- [16] 王海岗, 胡希有, 宁站亮. 甘肃省两当县龙王沟地区金矿矿床成因及找矿标志[J]. 科技创业月刊, 2011, 24(1): 169-170, 172.
- [17] 刘家军, 刘冲昊, 王建平, 等. 西秦岭地区金矿类型及其成矿作用[J]. 地学前缘, 2019, 26(5): 1-16.
- [18] 曹瑞荣, 曹雪峰, 艾忠林, 等. 甘肃大店沟金矿控矿地质因素及成矿潜力[J]. 世界有色金属, 2022(5): 79-81.
- [19] 王海岗, 胡希有, 宁站亮. 甘肃省两当县龙王沟地区大店沟金矿矿石特征及金成矿阶段分析[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37(8): 8-10.
- [20] 司明扬, 刘家军, 张斌, 等. 甘肃大店沟金矿床金矿物的赋存状态及成因研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(1): 19-31.
- [21] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 854-865.
- [22] 毛景文. 西秦岭地区造山型与卡林型金矿床[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 11-13.
- [23] 张印飞. 大店沟金矿床探矿过程中的几点地质认识[J]. 世界有色金属, 2018(14): 157-160.
- [24] 曹雪峰, 韩彪, 缪广, 等. 甘肃大店沟金矿床蚀变矿物特征与金矿化的关系[J]. 矿产与地质, 2024, 38(2): 295-300.
- [25] NIIZEKI, BUERGER M J. The crystal structure of jamesonite, $\text{FePb}_4\text{Sb}_6\text{S}_{14}$ [J]. Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials, 1957, 109(1/2/3/4/5/6): 161-183.
- [26] ICDD. Powder Diffraction File (PDF) [S]. Card: 42-1391 ($\text{FePb}_4\text{Sb}_6\text{S}_{14}$, Jamesonite). PDF-4/Minerals 2025. Newtown Square, PA, USA: International Centre for Diffraction Data, 2025.
- [27] 孟郁苗, 胡瑞忠, 高剑峰, 等. 锑的地球化学行为以及锑同位素研究进展[J]. 岩矿测试, 2016, 35(4): 339-348.
- [28] 张志远, 谢桂青, 李惠纯, 等. 湖南龙山锑金矿床白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学及其意义初探[J]. 岩石学报, 2018, 34(9): 2535-2547.
- [29] 谢桂青, 彭建堂, 胡瑞忠, 等. 湖南锡矿山锑矿区煌斑岩的地球化学特征[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 629-636.
- [30] 郑有业, 王达, 易建洲, 等. 西藏北喜马拉雅成矿带锑金属成矿作用及找矿方向[J]. 地学前缘, 2022, 29(1): 200-230.
- [31] 孙杨, 周敖日格勒, 谢富伟, 等. 西藏龙玛拉砂卡岩型铅锌多金属矿床金属矿物特征及地质意义[J]. 矿床地质, 2024, 43(2): 304-318.
- [32] 刘杰, 唐甘宇, 陈赛, 等. 内蒙古花敖包特银铅锌矿床硫同位素和黄铁矿微量元素特征及对成矿作用的指示[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1483-1495.
- [33] 胡生平, 韩善楚, 张洪求, 等. 庐枞盆地西湾铅锌矿床黄铁

- 矿微量元素组成特征及成矿启示[J]. 现代地质, 2024, 38(1): 183–197.
- [34] 薛长军, 吕古贤, 吕承训, 等. 湘西花垣李梅铅锌矿田构造沉积岩相与断裂控矿特征[J]. 现代地质, 2025, 39(1): 146–157.
- [35] 盛夏, 张达, 阙朝阳, 等. 滇东南西钨铍矿床成矿流体来源和演化: 来自流体包裹体和H-O同位素证据[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 158–169.
- [36] 罗华, 郭盼, 刘力, 等. 湖北来凤革勒车地区铅锌-萤石矿流体包裹体与C-H-O-S-Pb同位素特征及其地质意义[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 39–50.
- [37] 严子清, 石文杰, 张鹏涛, 等. 胶东大尹格庄金矿成矿流体时空演化及矿床成因: 来自流体包裹体、成矿元素和H-O-S-Pb同位素证据[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 156–174.
- [38] 寇少磊, 刘基, 王占彬, 等. 后龙门山构造带辛家咀金矿床成矿流体特征及其演化: 来自流体包裹体与H-O同位素的证据[J]. 现代地质, 2025, 39(5): 1193–1208.
- [39] 李治芬. 广西河池某银多金属矿床矿石物质成分和成矿条件初步探讨[J]. 矿物岩石, 1988, 8(2): 11–25, 136.
- [40] RAMDOHR P. The ore minerals and their intergrowths [M]. Oxford New York: Pergamon Press, 1980: 770–774.
- [41] 刘家军, 邢永亮, 王建平, 等. 内蒙拜仁达坝超大型Ag-Pb-Zn多金属矿床中针硫锑铅矿的发现与成因意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(3): 565–572.
- [42] 徐国风, 邵洁涟. 难定矿物—铅锑复杂硫酸盐鉴定问题[J]. 矿物岩石, 1982, 2(4): 26–50.
- [43] LI C, ZHANG N, GAO P. Lessons learned: How to report XPS data incorrectly about lead-halide perovskites [J]. Materials Chemistry Frontiers, 2023, 7(18): 3797–3802.
- [44] 孙世强, 陈翠华, 赖翔, 等. 四川乌斯河铅锌矿床成矿流体特征及Ge富集物理化学条件[J]. 现代地质, 2025, 39(4): 931–946.
- [45] 刘子安, 王达, 马国桃, 等. 西藏扎西康锑铅锌银矿床金属硫化物微量元素特征及指示意义[J]. 现代地质, 2025, 39(1): 115–132.
- [46] 郑博, 李成禄, 于雷, 等. 黑龙江二道坎银铅锌矿床黄铁矿标型特征及其S、Pb同位素研究[J]. 现代地质, 2025, 39(3): 648–666.
- [47] 刘建宏, 张新虎, 牛洪斌, 等. 甘肃省区域地球化学场特征[J]. 甘肃地质, 2015, 24(4): 1–15.
- [48] 胡晓隆, 赵利利. 对北秦岭太阳寺矿集区金矿成矿特征的初步认识[J]. 甘肃地质, 2008, 17(1): 41–46.
- [49] 苏在辛, 刘家军, 王冠智, 等. 甘肃李子园金矿床中金的赋存状态与成因意义[J]. 现代地质, 2026, 40(2): 287–299.
- [50] 何进忠, 丁振举, 朱永新, 等. 甘肃西秦岭矿床成矿系列及其量化评价[J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 218–234.