

# 会理市某矿区钒钛磁铁矿矿物与资源潜力评价

何军<sup>1</sup> 武亮<sup>2\*</sup> 杨延林<sup>1</sup> 杨然庆<sup>1</sup>

1 四川省三岩地质勘查有限公司 2 四川省西南大地集团有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2184

**[摘要]** 本研究基于系统的光学显微镜鉴定、X射线衍射分析及化学组分测试,对某钒钛磁铁矿床的矿石开展了矿物学研究。结果表明,该矿石主要金属矿物为磁铁矿,次为赤铁矿及含钛矿物,含少量钛磁铁矿、褐铁矿、黄铁矿等;脉石矿物以黑云母、绢云母、石英及斜长石为主。矿石具典型浸染状构造、片状构造,发育半自形粒状结构、变晶结构及交代结构。化学分析显示矿石富含Fe、Ti、V。V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量达工业综合利用标准。研究揭示了该矿床兼具铁、钒、钛资源潜力。

**[关键词]** 钒钛磁铁矿; 矿物学; 浸染状构造; 资源潜力评价

中图分类号: P57 文献标识码: A

## Evaluation of mineral resources and potential of vanadium titanite magnetite in a mining area of Huili City

Jun He<sup>1</sup> Liang Wu<sup>2\*</sup> Yanlin Yang<sup>1</sup> Ranqing Yang<sup>1</sup>

1 Sichuan San Yan Geological Exploration Co., LTD. 2 Southwest Land Group Co., LTD.

**[Abstract]** This study conducted mineralogical analysis on a vanadium-titanium magnetite deposit using systematic optical microscopy, X-ray diffraction analysis, and chemical composition testing. Results indicate that magnetite constitutes the primary metal mineral in the ore, followed by hematite and titanium-bearing minerals, with minor amounts of titanium magnetite, limonite, and pyrite. Gangue minerals mainly consist of biotite, phlogopite, quartz, and plagioclase. The ore exhibits typical interstitial and foliated structures, along with well-developed semi-regular granular, metamorphic, and alteration structures. Chemical analysis reveals abundant Fe, Ti, and V content, with V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> levels meeting industrial utilization standards. The study demonstrates the deposit's potential as a source of iron, vanadium, and titanium resources.

**[Key words]** vanadium titanite magnetite; mineralogy; infiltrated structure; resource potential evaluation

### 引言

钒钛磁铁矿作为重要的战略资源,其矿物组成、结构构造及元素地球化学行为直接决定了矿石的选冶工艺与经济价值。本研究依托详实的地质勘查数据,综合利用矿相学、X射线衍射及化学分析手段,系统剖析某典型钒钛磁铁矿床的矿物组合特征、元素赋存状态及资源可利用性,旨在为矿床成因研究与资源高效开发提供科学依据<sup>[1]</sup>。

### 1 样品与方法

研究样品采自勘查区代表性矿体。分析方法包括:

#### 1.1 光学显微镜鉴定

采用反射光与透射光显微镜,系统观察金属矿物与脉石矿物的光性特征(反射率、颜色、多色性、内反射、均质性、解理、干涉色等)、粒度分布、嵌布关系及结构构造(德国蔡司Axio Imager A2m)。

#### 1.2 X射线衍射分析(XRD)

采用日本理学SmartLab型衍射仪(Cu靶, K $\alpha$  辐射,扫描范围5°~70°,步长0.02°)辅助鉴定细粒及相似矿物(如金红石与锐钛矿)。

#### 1.3 化学组分分析

结合28件定性半定量全分析、8件化学全分析及66件组合分析数据,系统测定主量元素(Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, TiO<sub>2</sub>, LOI)、有害元素(S, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, As, Cu, Pb, Zn, Sn)及有益伴生元素(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni, Co, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Pt)含量。

### 2 矿物学特征

#### 2.1 矿石矿物组成与特征

2.1.1 磁铁矿(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): 最主要的矿石矿物(8%~12%)。呈半自形粒状(粒度0.01mm~0.15mm为主),均匀浸染分布于脉石中(见图1~2)。反射色灰白微棕(R $\approx$ 21),均质,强磁性。普遍遭受赤铁矿化,沿裂隙或边缘被交代,形成反应边结构、残余结构及假象结构<sup>[2]</sup>。

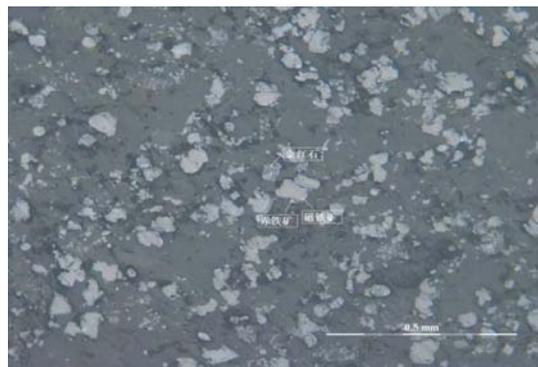


图1 钒钛磁铁矿镜下照片

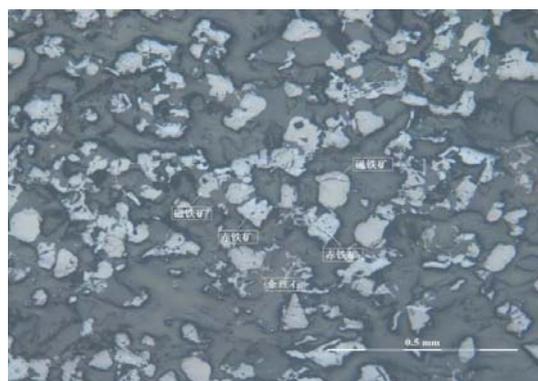


图2 钒钛磁铁矿镜下照片

①赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ): 含量约10%。主要呈磁铁矿的交代产物出现, 构成前述交代结构。反射色灰白微蓝 ( $R=25-30$ ), 弱双反射, 深红色内反射明显, 非均质性中-强 (蓝灰-灰黄)。

②金红石 ( $\text{TiO}_2$ ): 含量1%~4.45%, 少量其同质多象变体锐钛矿。呈粒状、板状或集合体 (粒度 $<0.15\text{mm}$ ), 或散布于不透明矿物间, 或从钛磁铁矿中出溶。金红石: 灰白微棕, 具多色性 ( $R\approx 23$ ), 褐红色内反射, 中-强非均质性。锐钛矿: 灰色, 无双反射及反射多色性 ( $R\approx 20$ ), 蓝色内反射显著。

③钛磁铁矿: 微量, 为磁铁矿含钛变种。

④褐铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ): 含量 $<1\%$ , 偶见。粒状 ( $<0.05\text{mm}$ ), 为针铁矿、纤铁矿等集合体。灰白微蓝褐, 褐红-黄褐内反射, 弱-中非均质性。

⑤硫化物: 总量极低 ( $<1\%$ ), 偶见。

⑥黄铁矿 ( $\text{FeS}_2$ ): 他形-半自形 ( $<0.025\text{mm}$ ), 黄白色 ( $R\approx 54$ ), 均质。

⑦黄铜矿 ( $\text{CuFeS}_2$ )、磁黄铁矿 ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ): 偶见, 特征未详述。

⑧钛铁矿 ( $\text{FeTiO}_3$ ): 偶见。

## 2.2 脉石矿物组成与特征

①层状硅酸盐: 黑云母 ( $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$ ): 含量变化大 (1%~30%)。片状 ( $<0.35\text{mm}$ ), 显微-细粒变晶。黄褐-绿褐色, 一组极完全解理, 干涉色三级 (被自身色掩盖)。定向排列明显 (沿千枚理), 边缘常见绿泥石化 (见图3~4)。

绢云母/白云母 ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ): 绢云母局部富集

(达52%), 鳞片/片状 ( $<0.1\text{mm}$ ), 常呈条带状聚集, 无色, 平行消光, 二级干涉色。白云母 (近2%) 形态、粒度、分布与黑云母相似, 常混杂出现, 无色, 平行消光, 三级干涉色。

绿泥石 ( $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ): 近1%, 片状 ( $<0.3\text{mm}$ ), 混杂于云母间。淡黄绿/绿色, 多色性, 平行-近平行消光, 低或异常干涉色。

②石英 ( $\text{SiO}_2$ ): 10%~35%。粒状 ( $0.05\sim 0.3\text{mm}$ ), 常与斜长石混杂, 局部条带状聚集。无色, 正低突起, 一级白干涉色。

③斜长石 ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8-\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ): 近2%。粒状 (与石英相似), 无色, 双晶发育, 一级灰白干涉色。

④碳酸盐: 近3% (主要为方解石  $\text{CaCO}_3$  / 白云石  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )。粒状 ( $<0.35\text{mm}$ ), 无色, 闪突起, 菱形解理, 高级白干涉色。局部见次生碳酸盐脉。

⑤不透明矿物: 含量高 (近55%), 粒状, 散乱分布, 部分近半透明 (黑/黑褐色), 主要为铁质矿物。

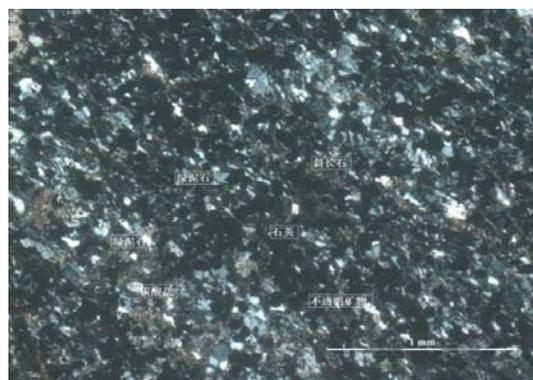


图3 脉石矿物镜下照片

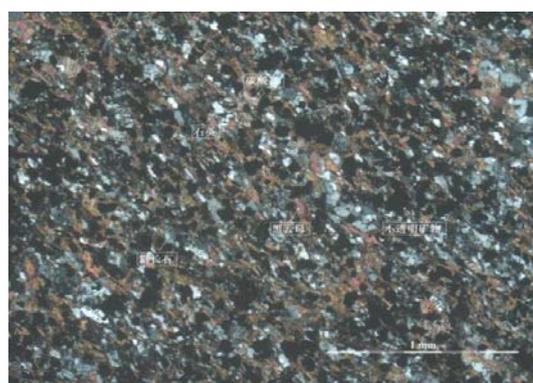


图4 脉石矿物镜下照片

## 2.3 矿石结构与构造

①结构。结晶结构: 半自形晶粒状结构 (磁铁矿等)、片状粒状变晶结构 (云母类)。

交代结构: 反应边结构 (赤铁矿交代磁铁矿)、残余结构、假象结构。

②构造。主要构造: 稀疏浸染状构造 (金属矿物散点分布)、稠密浸染状构造 (金属矿物较密集)、片状构造 (脉石矿物定向排列)。

次要构造: 星点状构造、细脉状构造(如次生碳酸盐脉)。

### 3 矿石化学特征

#### 3.1 主量元素组成

化学分析结果显示矿石化学组分相对简单:

SiO<sub>2</sub>: 含量高且稳定(37.23%~49.04%, avg: 42.26%), 与石英、云母等脉石矿物含量正相关。

TFe: 含量稳定(12.05%~19.26%, avg: 15.78%), 受磁铁矿、赤铁矿含量控制。

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: (6.78%~16.41%, avg: 13.23%)与FeO(6.08%~10.59%, avg: 8.40%): 分别反映赤铁矿/褐铁矿/黄铁矿和磁铁矿/部分赤铁矿/褐铁矿/黄铁矿的含量。

TiO<sub>2</sub>: 含量较高且稳定(3.63%~8.34%, avg: 5.94%), 主要赋存于金红石-锐钛矿及钛磁铁矿中。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: (8.22%~11.78%, avg: 10.17%)、K<sub>2</sub>O: (1.46%~2.77%, avg: 1.97%)、Na<sub>2</sub>O: (0.19%~3.05%, avg: 1.88%): 与云母类、斜长石等铝硅酸盐矿物相关, K<sub>2</sub>O普遍高于Na<sub>2</sub>O。

MgO: (3.57%~6.96%, avg: 5.40%)、CaO: (2.27%~6.83%, avg: 3.23%): 与黑云母、绿泥石、碳酸盐矿物含量有关。

烧失量(LOI): 变化较大(3.61%~8.37%, avg: 5.25%), 反映含水矿物(云母、绿泥石、褐铁矿)及碳酸盐含量。

#### 3.2 伴生有害组分

硫(S): 含量极低(0.001%~0.082%, avg: 0.02%), 主要源于微量黄铁矿、磁黄铁矿, 远低于一般工业允许含量。

磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>): 含量低(0.18%~0.54%, avg: 0.32%), 对冶炼影响较小。

二氧化硅(SiO<sub>2</sub>): 含量高(37.23%~49.04%, avg: 42.26%), 是主要的有害脉石组分, 增加选矿难度和冶炼能耗。

铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、砷(As)、锡(Sn): Cu、Pb、Sn含量极低或未检出; Zn含量相对略高(0.02%~0.15%, avg: 0.07%), 但仍属低水平。

#### 3.3 伴生有益组分

钒(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>): 含量稳定(0.053%~0.13%, avg: 0.1%), 平均含量达到《DZ/T0200-2020 铁、锰、铬矿地质勘查规范》规定的工业综合利用指标(≥0.1%V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 主要赋存于磁铁矿晶格中。

铬(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): (0.02%~0.055%, avg: 0.034%)、镍(Ni): (0.0028%~0.0089%, avg: 0.0041%)、钴(Co): (0.0030%~0.0045%, avg: 0.0035%)、铜(Cu): (0.0006%~0.0094%, avg: 0.0025%): 含量均较低, 未达综合利用指标。

铂族元素(Pt): 组合分析显示含量极低((0.30~30.30)×10<sup>-9</sup>, avg: 2.26×10<sup>-9</sup>)。

稀有金属: 铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>): (0.0026%~0.0130%, avg: 0.0067%)、钽(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>): (0.0001%~0.0006%, avg: 0.0003%), 含量低未达工业品位。金(Au)、银(Ag)、钼(Mo)未检出。

### 4 讨论

(1) 矿物组合与成因指示: 主要矿石矿物磁铁矿+赤铁矿+含钛矿物(金红石/锐钛矿), 脉石以富黑云母、绢云母、石英为

特征, 结合普遍发育的片状构造、千枚理及定向组构, 表明矿床经历了显著的变质变形作用。磁铁矿被赤铁矿交代的现象, 可能反映了成矿后氧化事件或热液活动的影响<sup>[3]</sup>。(2) 钛的赋存状态与利用挑战: 钛主要以独立矿物金红石、锐钛矿形式存在(1%~4.45%), 少量赋存于钛磁铁矿中。其粒度细微(多<0.15mm, 单晶<0.03mm)且分散, 增加了选矿回收难度。TiO<sub>2</sub>含量(5.94%)是重要资源, 但需研发高效的钛矿物分选技术。(3) 钒的资源潜力: V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>平均含量达到0.10%的工业综合利用下限, 且赋存于主要矿石矿物磁铁矿中, 预示着在选铁过程中钒可得到一定程度的富集, 具备综合回收价值。(4) 高硅的影响: 高SiO<sub>2</sub>含量(42.26%)是主要的不利因素, 不仅降低了铁品位, 更显著增加了冶炼能耗和成本。高效脱硅(如细磨、强磁选、浮选结合)是选矿工艺的关键。(5) 有害元素与环境安全性: 极低的S、P含量对冶炼是有利的, 更重要的是, 矿石天然放射性水平远低于国家标准限值, 保障了开采利用的环境安全性。

### 5 结论

(1) 研究区矿石为典型的变质成因钒钛磁铁矿。金属矿物以磁铁矿(8%~12%)为主, 遭受赤铁矿(近10%)交代形成反应边等结构; 钛主要赋存于金红石-锐钛矿(1%~4.45%)集合体中, 粒度细微。脉石矿物以黑云母(1%~30%)、绢云母(局部达52%)、石英(10%~35%)为主, 具明显定向构造(片状构造、千枚理)。(2) 矿石具稀疏-稠密浸染状构造及半自形粒状结构、变晶结构、交代结构。主量元素显示TFe(15.78%)、TiO<sub>2</sub>(5.94%)、SiO<sub>2</sub>(42.26%)及V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.10%)特征。(3) 伴生有害元素S(0.02%)、P(0.32%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)含量低, Zn(0.07%)等其它有害元素含量极低或无。(4) 关键有益组分V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>平均含量(0.10%)达到工业综合利用标准, 是可回收资源。钛(TiO<sub>2</sub>5.94%)资源潜力巨大, 但回收受限于其细微分散的赋存状态。其它伴生有益元素含量低, 经济意义有限。(5) 矿床具备铁、钒、钛综合开发利用潜力。后续工作应重点优化选矿流程, 攻克高硅脉石脱除与细粒钛矿物高效回收的技术瓶颈, 并加强铂族元素的查定。

#### [参考文献]

[1]王登红, 李健康, 赵正. 中国钒钛磁铁矿成矿规律与资源潜力[J]. 地质学报, 2013, 87(5): 623-641.

[2]Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, et al. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China[J]. Journal of Petrology, 2005, 46(11): 2253-2280.

[3]张招崇, 李承东, 李立兴. 钒钛磁铁矿矿床成矿作用与研究进展[J]. 岩石学报, 2015, 31(2): 311-326.

#### 作者简介:

何军(1989—), 男, 甘肃张掖人, 本科, 中级工程师; 工作领域: 矿产勘查。

#### \*通讯作者:

武亮(1982—), 男, 汉族, 四川达州人, 本科, 中级地质工程师, 研究方向地质调查与矿产勘查。