

中国有色金属学会

# 第一届全国选矿学术讨论会 论文集

(上册)

中国有色金属学会选矿学术委员会

中国选矿科技情报网

一九八六年十一月

## 前 言

中国有色金属学会定于1986年11月17日至21日在北京召开第一届全国选矿学术讨论会。在各单位和同行们的大力支持下，我们收到了近百篇论文和论文摘要。为了尊重作者的辛勤劳动成果，有利于广泛交流经验，提高学术水平，对应征论文，经过选矿学术委员会评审，大多数予以录取。这次会议的论文，数量多，水平较高。

本届会议讨论的主题，将参照十六届国际选矿会议(1988年6月5日至10日在瑞典的斯德哥尔摩举行)主题拟定，将围绕矿物工程学的近期新进展的有关课题进行讨论，主题为“选矿领域的扩展”。为此，参照国际会议的内容，根据录取的论文的具体情况，将这次会议论文分为七个部分。即：矿物工程与新工艺；磨矿；浮选和其它方法；非金属矿物的选矿；细颗粒矿物处理；数模及计算机应用；选矿工艺和下一步工艺的综合。

为了便于会议交流，减少大量的油印工作，我们将论文汇编成册印刷出版。

为保持论文的原貌，本着“文责自负”的原则，对论文没有做大的修改。“参考文献”略去。

本会议论文集的编辑出版工作由选矿学术委员会和中国选矿科技情报网共同完成。

1986年8月

# 目 录

## 第一部份：矿物工程与新工艺

1. 攀—西地区钒钛磁铁矿工艺矿物学研究……………  
地矿部矿产综合利用研究所 洪秉信 傅文章 (1)
2. 攀—西地区钒钛磁铁矿工艺性质的研究……………  
地矿部矿产综合利用研究所 吴本美 执笔 (13)
3. 圆锥选矿机在攀枝花选钛工艺上的应用及展望……………  
广州有色金属研究院 靳玉荣 (25)
4. 含铜黄铁矿选矿最佳铜精矿品位的确定……………武山铜矿 曾月丰 (31)
5. 我国氧化铜矿的研究和生产现状综述……………赣州有色冶金研究所 林鸿珍 (36)
6. 关于篦子沟矿伴生元素回收的研究……………  
中条山有色公司设计研究所 孙 皎 (46)
7. 会泽硫化铅锌矿石工艺矿物学特征及其对矿石可处理性的影响……………  
广州有色金属研究院 许志华 (53)
8. 会泽铅锌矿七〇厂硫化铅锌矿石等可浮——高碱介质优先浮选分离的研究……………  
广州有色金属研究院 盛有准 执笔 (57)
9. 云南会泽七〇厂硫化铅锌矿选矿工艺流程的评述……………会泽铅锌矿 吴助仕 (64)
10. 凡口铅锌硫化矿的选矿生产实践……………长沙有色冶金设计研究院 曹永稀 (69)
11. 青海锡铁山铅锌矿中氧化铅矿选矿方法探讨……………青海地质中心实验室 姜有才 (74)
12. 毕家山铅锌矿选矿的生产实践……………西北矿冶研究院 彭宗凯 (81)
13. 湿式磁选机在锡锌多金属硫化矿选厂流程改造中应用的试验……………  
广西平桂矿务局试验所 刘瑞林 (87)
14. 略谈柿竹园多金属矿选矿工艺流程与矿石性质的研究……………  
长沙有色冶金设计研究院 刘见训 (93)
15. 锆英石海滨砂矿选矿及伴生组分综合回收……………  
中南冶金地质研究所 吕世海 (107)
16. 湿式强磁场磁选工艺在我国黑钨选矿中的应用……………  
赣州有色冶金研究所 林海清 周若瑾 (113)
17. 云英——矽卡岩型钨钼铋多金属矿选矿流程探讨……………  
长沙有色冶金设计研究院 彭寿清 (120)
18. 锡石硫化矿的综合回收……………云南锡业公司研究所 刘思国 (131)
19. 行洛坑钨矿硫化矿综合回收的探讨……………北京有色冶金设计研究总院 陈 旭 (139)
20. 中国锡矿山铋矿选矿厂生产经验及最新技术成就……………  
锡矿山矿务局 郭振勋 中南工业大学 胡熙庚 (145)
21. 低位水喷射泵的生产实践……………南京九华山铜矿安基山矿区 沈之和 (146)

## 第二部份：磨矿

22. 刚性破碎的理论与实践……………武汉工业大学 欧阳希云 (152)
23. 再磨磨机的选择与计算……………北京有色冶金设计研究总院 何方箴 (155)

24. 柿竹园白钨矿石磨矿功耗的研究及其粗选流程的探讨……中南工业大学 许德明(170)  
 25. 矿石细磨及其工艺特征研究……昆明工学院 段希祥(181)  
 26. 助磨剂作用机理的初步探讨……

昆明工学院 吴明珠 翁诚兴 刘全军 毕兆鸣(188)

27. 采取综合措施提高磨矿经济效益的实践……云南大姚铜矿二选厂 欧 扬(191)  
 28. 金刚石原生矿磨矿……蒙阴金刚石矿 程殿民(193)

### 第三部份：浮选和其它选矿方法

29. 金川镍黄铁矿和叶蛇纹石的浮选特性及有关机理研究……

北京矿冶研究总院 东乃良 崔保滨 关 杰(200)

30. 硫化铜矿石无捕收剂浮选的研究……中南工业大学 黄开国 王淀佐(214)

31. 方铅矿与黄铜矿的无捕收剂浮选及分离研究……

中南工业大学矿物工程系 陈 蓁 冯其明 李世棍(215)

32. 多金属硫化铅锌矿石无调整剂浮选的研究……

冶金部长沙矿冶研究院 梁经冬 邹玉芝 邱良邦 易发云(225)

33.  $\gamma$ 射线辐照 $2^\circ$ 油对锡石浮选作用的研究……

北京矿冶研究总院 孙铁民 幸伟中(232)

34. 大厂锡矿主要硫化矿矿物基本性质及浮选行为的研究……

北京有色金属研究总院 张秀华(243)

35. 黄铁矿的半导性和可浮性的关系……中南工业大学 胡熙庚 凌竞宏(247)

36. 云南兰坪氧化锌矿浮选特性研究……昆明工学院采选系 邓 鸿 钱 鑫(248)

37. 含褐铁矿的氧化铅锌矿浮选工艺研究……

北京矿冶研究总院 张心平 贺飞丽 周秀英 邵亚瑞(258)

38. 利用重—浮联合流程处理氧化铅锌矿石……

昆明冶金研究所 严小凌 陈学兰 汪兆龙等(264)

39. 毒砂与硫化矿物的分选……北京矿冶研究总院 宣道中 吴玉今 姜成良(266)

40. 氧化对砷黄铁矿和黄铁矿可浮性的影响……

昆明工学院选矿研究室 钱 鑫 李广明(276)

41. 有机调整剂在锡石——赤铁矿体系中的浮选作用机理研究……

昆明工学院 罗建中 杨 敦(290)

42. 巯基乙酸钠抑制黄铜矿研究……西安有色金属研究所 张文钰(292)

43. 论辉锑矿与黄铁矿的浮选分离……广州有色金属研究院 郭庆华 陈淑娟(300)

44. 用二丁基二硫代磷酸盐和活化剂—SCP台浮硫化矿的研究……

广西冶金研究所 吴多才(304)

45. 高纯度黄铁矿精矿工艺富集的研究……化工部化工矿山设计研究院 杨乃纯(311)

46. 金川露采贫矿石矿泥与水溶性盐对浮选过程的影响及排除方案的探讨……

金川有色金属公司选矿厂 李建军(333)

47. 论采矿胶结冲填料对金川硫化镍富矿可浮性的影响及消除……

金川有色金属公司选矿厂 李建军(333)

48. 铜、铁、和硫酸根离子体系的沉淀浮选研究……

中南工业大学矿物工程系 陈 蓁 周志良 薛玉兰(334)

49. 广西大厂91号富矿合理选矿的工艺研究.....广州有色金属研究院 董天颂(344)

50. 电化学浮选工艺的研究.....西安冶金建筑学院 何剑华(349)

51. 硫铁矿浮选经济效益分析.....北京地质研究测试中心 崔连甲(352)

52. 跳汰周期曲线的研究.....东北工学院 孙玉波 张维庆 魏德洲(359)

53. 螺旋溜槽中的二次环流和矿粒运动轨迹的研究.....

中南工业大学 黄尚安 黄 枢 唐玉白(371)

54. 表面电性对矿泥重选影响的研究.....

中南工业大学矿物工程系 张泽强 吉千芳 黄 枢(380)

55. 煤系沉积硫铁矿重选法研讨.....武汉化工学院矿山系 郭秉文 肖 云(391)

56. 硫化矿浮选混合精矿振动高梯度磁选的研究.....

中南工业大学 袁学敏 孙仲元 何平波(399)

57. SOC型磁选机在一个选矿新领域的应用.....

赣州有色冶金研究所 刘国瑞 钟诚学 王兆元(410)

58. 光选分选指标以及对影响指标主因素的分析探讨.....

赣州有色冶金研究所 谭维文 钟国黄 赖登阳(413)

# 第一部分：矿物工程与新工艺

## 攀—西地区钒钛磁铁矿工艺矿物学研究

地矿部矿产综合利用研究所 洪秉信 傅文章

我国攀—西地区大型钒钛磁铁矿矿床，共生有铁、钛、钒、钴、镍、铜、镓、钨等多种有益组分。为开发这一资源，制定合理的选矿工艺流程，充分利用矿石中的有益组份，进行了工艺矿物学研究。

### 一、矿石的矿物成分和结构构造

攀西钒钛磁铁矿赋存于川滇南北向构造带中段的基性超基性岩体中，共有攀枝花、红格、白马、太和四大矿区，为晚期岩浆矿床，含矿母岩主要有辉长岩、辉石岩、橄榄辉长岩和橄榄岩。矿石矿物种类详见表1。

由表1可以看出，本矿区矿物种类较多，可划分为铁的工业矿物（主要为钛磁铁矿），铁的工业矿物（主要是钛铁矿），钴镍铜的工业矿物（硫化物类）和脉石矿物。

表1 矿石的矿物成分

|     | 金 属 矿 物                  |                                                                                                      | 非金属矿物                                                                                 |
|-----|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 氧化物                      | 硫(砷)化物                                                                                               |                                                                                       |
| 主要的 | 钛磁铁矿<br>钛铁矿              | 磁黄铁矿<br>黄铁矿                                                                                          | 普通辉石、斜长石<br>橄榄石                                                                       |
| 次要的 | 磁铁矿<br>磁赤铁矿              | 黄铜矿<br>镍黄铁矿                                                                                          | 蛇纹石、普通角闪石、<br>黑云母                                                                     |
| 少量的 | 赤铁矿<br>金红石<br>白钛石<br>钙钛矿 | 紫硫镍矿、硫铁镍矿、辉钴矿、<br>马基诺矿、哈伯莱矿、硫钴矿、<br>硫镍钴矿、闪锌矿、方铅矿、<br>方黄铜矿、辉钼矿、墨铜矿、辉铜<br>矿、黝铜矿、针镍矿、白铁矿、<br>砷铂矿、硫钼矿、铜兰 | 磷灰石、绿泥石、方解石、<br>透闪石、绢云母、镁铝尖晶石、<br>铁铝尖晶石、榍石、伊丁石、<br>锆石、石榴石、电气石、<br>黝帘石、黑柱石、白云母、<br>滑石、 |

矿石的主要结构构造类型如下：

1. 海绵陨铁结构。先结晶的脉石矿物自形程度较好，结晶较晚的金属矿物以它形粒状充填于脉石矿物颗粒之间（照片1）。这种结构中，金属矿物和脉石矿物之间界面一般较平直，属简单散布，较利于解离。

2. 自形一半自形晶结构。由结晶较好的钛磁铁矿和钛铁矿紧密镶嵌形成(照片2), 钛磁铁矿和钛铁矿粒度较均匀, 之间呈简单嵌布。

3. 交代结构。常见的有钛磁铁矿被绿泥石交代(照片3), 钛磁铁矿和钛铁矿被斜石、钙钛矿、白钛石交代, 橄榄石绿泥石化或蛇纹石化等。交代结构发育对矿物分选不利。钛磁铁矿绿泥石化, 一方面使矿物中有益组份分散, 另一方面将钛磁铁矿分割, 给矿物单体解离带来困难。但在热液阶段, 交代作用往往促进硫化物形成和钴镍富集。

4. 固熔体分解结构。该结构在本矿区矿石中广泛发育。例如钛磁铁矿的晶架状结构(照片3.5), 盒子状结构(照片4), 钛铁矿的线状结构, 普通辉石的砂钟结构、闪光结构等。

5. 致密块状构造。金属矿物(钛磁铁矿、钛铁矿、硫化物)含量大于85%。

6. 稠密浸染构造。金属矿物含量50~80%。

7. 中等浸染构造。金属矿物含量30~50%。

8. 稀疏浸染构造。金属矿物含量20~30%。

9. 星散浸染构造。金属矿物含量少于20%。

10. 条带状构造。金属矿物或暗色矿物(普通辉石、角闪石等)相对集中, 定向排列, 与浅色矿物(斜长石等)相间成层。

在第8,9,10类构造中, 脉石矿物常聚集成圆块(十几毫米至几百毫米), 或呈厚薄不等的条带(几毫米至几百毫米), 有利于块砂预选, 抛弃合格尾矿, 使矿石从贫砂升格为中富矿石, 进入下一段选别作业。

## 二、钛磁铁矿的物质组成及其工艺特征

1. 钛磁铁矿是由固熔体分解形成的复合矿物。其主晶为含钛的磁铁矿(Mt), 容晶有钛铁矿(Il)、钛铁晶石(USP) 和镁铝尖晶石(SP)。

磁铁矿: 表2列出红格矿区钛磁铁矿主晶磁铁矿的电子探针分析结果。表3列出部分钛磁铁矿结构分析以及根据晶胞参数和秋本(Akimoto, et al., 1957)的试验结果, 计算得到的主晶磁铁矿和客晶钛铁晶面成分。

表2 钛磁铁矿主晶磁铁矿探针分析部分结果

| 化学成分<br>样号 | TiO <sub>2</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MgO  |
|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|------|
| 94—100     | 5.21             | 0.53                           | 1.83                           | 0.81                          | 57.09                          | 34.70 | 1.28 |
| 220—16     | 4.38             | 2.92                           | 2.29                           | 0.89                          | 55.38                          | 33.65 | 1.21 |
| 64—247     | 9.65             | 5.06                           | 3.64                           | 0.96                          | 40.56                          | 38.59 | 1.09 |
| 668—56     | 9.79             | 9.13                           | 4.67                           | 0.79                          | 35.45                          | 36.36 | 2.42 |

由上可知, 钛磁铁矿固熔体分解不完全, 其中仍固熔有钛铁晶石分子(0~14%), 钒尖晶石、铬铁矿和镁铝尖晶石分子, 是有益组份钒和铬的载体矿物。只要选出铁精矿, 也就同时回收了钒、铬和部分钛。

钛铁晶石: 除少量固熔于主晶磁铁矿中, 大部分以客晶形式存在, 其成分见表3。钛铁晶石一般沿主晶的(100)方向分布, 形成盒子状结构(照片4)和网状结构。其宽度一般在0.2~0.5微, 其含量随矿石品位变化, 并因矿区而异, 在0~60%之间。攀枝花矿区富砂中

表3

含钛磁铁矿和钛铁晶石的晶胞大小及相应固熔体成分

| 矿区  | 样号   | 磁铁矿晶胞( $a_0$ ) | 钛铁晶石晶胞( $a_0$ ) | 磁铁矿、钛铁晶石成分          |
|-----|------|----------------|-----------------|---------------------|
| 攀枝花 | M27  | 8.404 Å        | 8.512 Å         | Mt90USp10—Mt16USp84 |
|     | M61  | 8.401 Å        | 8.513 Å         | Mt92USp8—Mt15USp85  |
| 白马  | 1026 | 8.410 Å        | 8.505 Å         | Mt86USp14—Mt20USp80 |
|     | 1031 | 8.390 Å        | 8.475 Å         | Mt100USp0—Mt41USp59 |
| 红格  | NE14 | 8.399 Å        |                 | Mt94USp6            |
|     | NE24 | 8.398 Å        |                 | Mt94USp6            |

最高,红格矿区低品位矿石最低。

钛铁矿:一般呈厚薄不等的板状,沿钛磁铁矿的(111)方向分布,形成页片状结构或晶架状结构(照片3.5.7),页片厚度一般3~20微米,厚者达50~100微米,长30~600微米。在红格矿区贫砂中含量较高,攀枝花矿区富矿石中含量较低。

镁铝尖晶石:呈片状,串珠状和粒状,以粒状为主。含量一般1~2%,个别达5%。片状者,片宽1~2微米;粒状者,粒径一般5~50微米,少数达100微米以上(照片4.6)。

钛磁铁矿主容晶含量的变化,导致钛磁铁矿化学成分和物理性质的差异。表4表明,钛磁铁矿的 $TiO_2$ 含量和容晶矿物含量增高而增大。这一结果与T.Б.наифонов等的结果相似。正是这一原因,使攀枝花矿石的工艺性质、选别性能不如其它矿区。

表4

钛磁铁矿的矫顽力变化

| 矿区  | 样号              | $TiO_2\%$ | 容晶矿物含量% | 矫顽力( $H_c$ ) |
|-----|-----------------|-----------|---------|--------------|
| 攀枝花 | P <sub>1</sub>  | 13.25     | 38~45   | 145.7        |
| 太和  | T <sub>1</sub>  | 11.68     | 34~38   | 108.5        |
| 白马  | B <sub>6</sub>  | 9.97      | 26~30   | 92.4         |
| 红格  | T <sub>24</sub> | 7.28      | 19~22   | 63.8         |

## 2. 钛磁铁矿的铁钛品位问题

综上所述,钛磁铁矿中的钛有三种存在形式,一是以钛铁晶石分子状态固溶于主晶磁铁矿中;二是存在于固熔体分解产生的钛铁晶石容晶中;三是存在于固熔体分解形成的板片状钛铁矿中。由于钛磁铁矿不是均匀的单一矿物,在磨矿过程中就会产生内部主容晶成分的解离,形成矿物颗粒中主容晶比例的变化。前边两种通过细磨不可能被解离除掉,而板状钛铁矿通过细磨可部分被解离除掉。在细磨工艺中,粒状镁铝尖晶石由于硬度大,也容易解离除掉。板状钛铁矿的除去使钛磁铁矿含钛量下降;镁铝尖晶石的除去又使品位相对提高。所以钛磁铁矿的铁、钛品位变化(表5),取决于其中板状钛铁矿和粒状镁铝尖晶石的相对含量,其极限是 $M_t + U_{\rho}$  + 片状 $SP_{\rho}$ 。

表5

钛磁铁矿、钛品位与磨矿粒度的关系

| 矿 区   | 粒 度 (mm)    | I 品级矿石* |                    | II 品级矿石 |                    |
|-------|-------------|---------|--------------------|---------|--------------------|
|       |             | TFe%    | TiO <sub>2</sub> % | TFe%    | TiO <sub>2</sub> % |
| 攀 枝 花 | 0.1 —0.074  | 57.17   | 13.25              | 59.06   | 10.23              |
|       | 0.074—0.044 | 57.66   | 13.20              | 59.92   | 9.75               |
|       | 0.04 —0.02  | 58.36   | 13.20              | 60.28   | 9.31               |
|       | —0.02       | 59.24   | 12.40              | 60.90   | 9.04               |
| 红 格   | 0.1 —0.074  | 59.28   | 11.36              | 62.69   | 6.95               |
|       | 0.074—0.04  | 59.56   | 11.00              | 63.58   | 6.30               |
|       | 0.04 —0.02  | 60.48   | 10.78              | 64.35   | 6.05               |
|       | —0.02       | 60.94   | 10.52              | 65.85   | 5.13               |
| 白 马   | 0.10 —0.074 | 60.27   | 10.35              | 61.55   | 9.07               |
|       | 0.074—0.04  | 61.13   | 10.17              | 62.68   | 9.20               |
|       | 0.04 —0.02  | 61.53   | 10.02              | 61.88   | 8.44               |
|       | —0.02       | 61.94   | 9.67               | 62.79   | 7.92               |
| 太 和   | 0.1 —0.074  | 59.84   | 11.68              |         |                    |
|       | 0.074—0.04  | 60.30   | 11.64              |         |                    |
|       | 0.04 —0.02  | 60.85   | 11.43              |         |                    |
|       | —0.02       | 61.72   | 11.09              |         |                    |

\* I品级是TFe>20%的矿石, II品级是TFe<20%的矿石。

### 3. 钛磁铁矿的工艺粒度和磨矿粒度选择:

为选择恰当的磨矿粒度, 使其与外部粒状钛铁矿和脉石解离, 测定了各矿区钛磁铁矿的工艺粒度 (表6)。

磨矿试验表明, 各矿区矿石当磨矿粒度达到粒度分布累计曲线75~85%所对应的粒度时, 钛磁铁矿单体解离度均达90%以上。红格矿区一组样品的试验, 也说明了单体解离度与磨矿粒度和工艺粒度有关。将样品磨至0.2mm筛分, 求出各粒级中位值与样品钛磁铁矿平均粒径的比值( $x$ ), 测出各粒级中钛磁铁矿单体解离度( $y$ ) (表7), 它们之间具有如下线性关系:

$$y = -0.3076x + 100.28 \quad r = -0.8016$$

应当指出的是, 单体解离度不仅与矿物的粒度有关, 还与矿石类型, 矿石的结构构造和

矿石的可磨性等有关。平均粒径也只是粒度分布的一个数值特征，并不能全面反映整个分布函数。

表6

钛磁铁矿工艺粒度简表

| 分布<br>(%) | 粒度<br>(mm) |      |      |       |       |         |       | 平均粒径<br>$\bar{d}$ (mm) |
|-----------|------------|------|------|-------|-------|---------|-------|------------------------|
|           |            | >3   | 3—2  | 2—1   | 1—0.5 | 0.5—0.2 | <0.2  |                        |
| 攀枝花       | Ⅱ品级        |      |      | 4.34  | 35.06 | 46.98   | 13.62 | 0.69                   |
| 红 格       | Ⅰ品级        | 0.46 | 0.46 | 2.97  | 18.25 | 51.56   | 26.69 | 0.41                   |
|           | Ⅱ品级        | 1.35 | 1.92 | 4.18  | 16.02 | 44.10   | 32.43 | 0.46                   |
| 白 马       | Ⅰ品级        |      | 1.11 | 21.41 | 38.72 | 30.16   | 8.60  | 0.75                   |
|           | Ⅱ品级        |      |      | 5.31  | 43.90 | 34.99   | 15.80 | 0.55                   |
| 太 和       | 全矿区        |      |      | 3.31  | 14.86 | 51.03   | 30.80 | 0.37                   |
| 全区平均      | Ⅰ品级        | 0.33 | 0.54 | 6.36  | 21.67 | 47.33   | 23.77 |                        |
|           | Ⅱ品级        | 0.84 | 1.20 | 4.37  | 24.26 | 43.68   | 25.65 |                        |

表7

钛磁铁矿平均粒度、磨矿粒度与单体解离度的关系

| 样 号                      | T22    | T26    | T27    | T29    | T30    | T31    |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 粒 级<br>y(%)<br>$\bar{d}$ | 0.6326 | 0.3344 | 0.3343 | 0.2645 | 0.4001 | 0.5195 |
| +0.2                     | 70.61  | 85.65  | 85.87  | 65.75  | 69.56  | 77.97  |
| 0.2—0.1                  | 83.72  | 88.71  | 91.67  | 87.39  | 90.63  | 89.87  |
| 0.1—0.074                | 91.87  | 94.23  | 95.22  | 93.89  | 95.87  | 96.42  |
| 0.074—0.04               | 94.51  | 97.19  | 97.76  | 97.67  | 98.13  | 98.90  |
| —0.04                    | 98.30  | 99.40  | 99.01  | 99.04  | 99.14  | 99.47  |

### 三、钛铁矿的物质组成及其工艺特征

除去钛磁铁矿中呈固熔体分离物形式存在的板片状钛铁矿外，钛铁矿还有如下产出形态：

在脉石矿物中呈自形一半自晶包裹体的钛铁矿，属早期岩浆产物；

与钛磁铁矿紧密连生，或以单独粒状自形—它形晶充填于脉石粒间的钛铁矿，为晚期岩浆结晶产物；

在普通辉石、钛角闪石等脉石中呈微细薄片状产出的钛铁矿，为固熔体分解产物。

上述, 1、3两种数量微小, 或粒度细小(一般小于3~10微米), 没有工业意义。下面研究的是以形式2产出的钛铁矿。

#### 显微结构特征:

和钛磁铁矿一样, 钛磁矿也是多种矿物组成的复和矿物, 其主晶为钛铁矿, 客晶有钛磁铁矿、镁铝尖晶石、赤铁矿和镁钛矿等, 但客晶矿物含量较少, 一般0.1~20%, 多数小于5%。

钛磁铁矿沿钛铁矿 (0,001) 方向分布, 呈薄片状, 片宽0.2~3微米, 片晶中还常有镁铝尖晶石(照片8)。粒状镁铝尖晶石、赤铁矿、镁钛矿含量一般很少, 后者仅在富镁钛铁矿中见到。

钛铁矿中的镁除以镁铝尖晶石、镁钛矿客晶形式存在外, 主要还是以固溶体形式赋存于主晶中, 但无论上述那种赋存形式, 用物理选矿法都难降低钛精矿中含镁量。

值得注意的是, 钛铁矿中钛磁铁矿片晶含量不同, 导致矿物磁性变化。对铁精矿进行显微镜检查发现, 铁精矿中经常含有1~3%的钛铁矿, 其中多是含钛磁铁矿客晶较多的钛铁矿。表8示出太和矿区钛铁矿化学成分和比磁化系数。随着FeO和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量增高, MgO含量降低, 比磁化系数升高。这与镜下观察结果完全一致。

表8 太和矿区钛铁矿的化学成分和比磁化系数

| 样号   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | TiO <sub>2</sub> | MgO  | CaO  | MnO   | 比磁化系数×10 <sup>-8</sup><br>C.G.S.M.cm <sup>3</sup> /g |
|------|--------------------------------|-------|------------------|------|------|-------|------------------------------------------------------|
| TD6  | 8.48                           | 39.82 | 48.66            | 1.51 | 0.02 | 0.988 | 469.5~148.2                                          |
| TD8  | 7.31                           | 38.74 | 50.74            | 1.52 | 0.21 | 0.955 | 298.7~152.0                                          |
| TD7  | 7.16                           | 36.84 | 51.66            | 3.44 | 0.11 | 1.029 | 150.9~105.5                                          |
| TD9  | 7.01                           | 35.76 | 52.37            | 4.05 | 0.11 | 0.941 | 117.8~ 87.5                                          |
| TD10 | 4.70                           | 34.68 | 52.27            | 6.73 | 0.07 | 0.629 | 109.4~ 88.9                                          |

表9 钛铁矿的工艺粒度

|     |       | <3   | 3-2  | 2-1   | 1-0.5 | 0.5-0.2 | <0.2  | 平均粒径<br>( $\bar{d}$ mm) |
|-----|-------|------|------|-------|-------|---------|-------|-------------------------|
| 攀枝花 | II 品级 |      | 0.93 | 3.16  | 34.84 | 43.75   | 17.32 | 0.50                    |
| 红 格 | I 品级  |      | 0.23 | 5.18  | 24.21 | 45.12   | 25.25 | 0.45                    |
|     | II 品级 | 0.41 | 0.37 | 6.88  | 22.32 | 41.36   | 28.66 | 0.45                    |
| 白 马 | I 品级  |      |      | 6.78  | 37.52 | 43.30   | 12.40 | 0.54                    |
|     | II 品级 |      |      |       | 38.62 | 48.58   | 12.80 | 0.47                    |
| 太 和 | 全矿区   |      | 2.70 | 31.47 | 39.99 | 19.64   | 6.20  | 0.91                    |
| 全 区 | I 品级  |      | 0.42 | 7.86  | 28.07 | 42.47   | 21.18 |                         |
| 平 均 | II 品级 | 0.26 | 0.46 | 5.06  | 27.46 | 42.68   | 23.84 |                         |

这一结果表明,采用强磁—浮选流程回收钛铁矿,应当选择适宜的磁场强度,才有利于对钛铁矿的回吸。场强过高,会把磁性较强的普通辉石和橄榄石等带入钛铁矿粗精矿,给以后的精选带来困难。

钛铁矿的工艺粒度和磨矿粒度选择

四大矿区钛铁矿的工艺粒度列于表9。

钛铁矿的单体解离度与工艺粒度、磨矿粒度也具有较好的线性关系。对红格矿区一组样品进行磨矿、筛析和单体解离度测定(表10),有下述相关关系:

$$y = -0.6197x + 103.44 \quad r = -0.9442$$

其中 $y$ ——单体解离度,  $x$ ——磨矿粒级中位值与工艺粒度平均值之比。

粒度测定和单体解离度测定表明,钛铁矿工艺粒度和钛磁铁矿相近,在合适的相当磨矿条件下,能够使钛磁铁矿和钛铁矿同时都有较好的解离度。

表10 钛铁矿的平均粒度、磨矿粒度和单体解离度

| 样 号          | T22    | T26    | T27    | T29    | T30    | T31    |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $y(\%)$      | 0.5582 | 0.3767 | 0.3983 | 0.4208 | 0.4500 | 0.4623 |
| 粒 级          |        |        |        |        |        |        |
| +0.2         | 69.57  | 62.82  | 70.71  | 57.50  | 63.16  | 75.80  |
| 0.2 - 0.1    | 83.12  | 71.23  | 83.33  | 89.72  | 85.33  | 86.00  |
| 0.1 - 0.074  | 89.41  | 90.02  | 92.31  | 95.52  | 63.44  | 92.48  |
| 0.074 - 0.04 | 93.75  | 95.38  | 98.03  | 97.30  | 97.56  | 96.59  |
| - 0.04       | 98.55  | 98.76  | 99.40  | 99.20  | 99.12  | 98.80  |

#### 四、硫化物的组份及其工艺特征

硫化物在各矿区矿石中含量一般为1~2%。其中主要是磁黄铁矿和黄铁矿(表11),其它硫化物之和不足10%,且往往包裹于磁黄铁矿、黄铁矿中,或和它们紧密连生。因此,选

表11 硫化物中各相含量比

| 含 量 %<br>矿 物       | 磁黄铁矿 | 黄铁矿  | 其它硫化物 |
|--------------------|------|------|-------|
| 攀枝花 <sup>(2)</sup> | 98   | <1   | 1~2   |
| 红 格                | 62.6 | 31.6 | 5.8   |
| 白 马*               | 78.7 | 3.2  | 18.1  |
| 太 和                | 24   | 75   | 1     |

\* II品级矿石。

取钴镍，就是选磁黄铁矿和黄铁矿。

产出形态：

呈不规则粒状集合体，分别嵌布于脉石矿物、铁钛氧化物颗粒之间，或者脉石矿物与铁钛氧化界面附近，粒度一般较粗。这种形态产出的硫化物为其总量的60~90%；

呈竹叶状集合体嵌布于脉石中；

呈细网脉状充填在铁钛氧化物裂隙中，并交代后者，此时常伴生有磁铁矿出现；

呈微粒状、乳滴状包裹于钛磁铁矿、镁铝尖晶石或钛铁矿中，粒径一般小于2微米；

呈细小星点状包裹于脉石矿物中。

由于后三种形式的硫化物很难解离出来，况且磁黄铁矿磁性较强，在磁选时有22~44%的硫化物进入铁精矿。产品检查表明，这部分硫化物主要是强磁性磁黄铁矿和胶状黄铁矿。尾矿中的硫化物主要是磁性弱的六方磁黄铁矿及单体黄铁矿等。对这两部分硫化物进行化学分析(表12)可知，进入铁精矿中的硫化物，其钴镍品位一般高于进入尾矿的硫化物。计算表明，以硫化物形式赋存的钴镍在铁精矿中分配在18~34%，以攀枝花最高。因此，在以铁为主，综合回收其它元素的流程中，钴镍在硫精矿中回收率较低。

表12 不同选矿产品中磁黄铁矿、黄铁矿钴镍含量

| 矿 区         | 产 品     | 矿 物   | Co%   | Ni%    | Cu%    |
|-------------|---------|-------|-------|--------|--------|
| 攀<br>枝<br>花 | 铁 精 矿   | 磁黄铁矿* | 0.313 | 0.147  | 0.175  |
|             |         | 黄铁矿** | 0.363 | 0.235  | 0.440  |
|             | 选 铁 尾 矿 | 磁黄铁矿  | 0.261 | 0.139  | 0.096  |
|             |         | 黄铁矿   | 0.148 | 0.103  | 0.127  |
| 红<br>格      | 铁 精 矿   | 磁黄铁矿  | 0.406 | 2.078  | 1.337  |
|             |         | 黄铁矿   | 1.095 | 0.952  | 0.036  |
|             | 选 铁 尾 矿 | 磁黄铁矿  | 0.308 | 0.7375 | 0.2405 |
|             |         | 黄铁矿   | 0.458 | 0.242  | 0.113  |

\*\*\*：包括与其共生的其它硫化物，下同

## 五、脉石矿物的物质组份及其工艺特征

研究脉石矿物的意义在于，脉石矿物的含量和化学成分影响选矿的收率和产率，脉石矿物的性质不同，其选别难易程度也不同；脉石的工艺粒度是确定粗粒抛尾碎矿粒度的依据。

普通辉石：

不同类型矿石中其含量在25—28%之间。普通辉石中常含有数量不等的钛磁铁矿和钛铁矿微细片晶，后者沿普通辉石解理或裂开面分布。由于片晶的加入，使辉石中铁钛含量增高，比磁化系数增高(表13)。与钛铁矿的比磁化系数比较可知，两者之间有相当大的重叠部分。部分磁性强的辉石强磁选时易进入钛精矿。

表13

普通辉石的化学成分和比磁化系数

| 项 目                                                  | 攀 枝 花     | 红 格          | 太 和          |
|------------------------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>                                     | 51.66     | 47.60        | 49.82        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 3.71      | 5.13         | 4.52         |
| CaO                                                  | 20.40     | 20.54        | 20.84        |
| MgO                                                  | 13.87     | 14.45        | 13.78        |
| TiO <sub>2</sub>                                     | 1.34      | 2.27         | 1.81         |
| TFe                                                  | 6.44      | 5.62         | 5.87         |
| 比磁化系数 $\times 10^{-8}$<br>C.G.S.M.Cm <sup>3</sup> /g | 20.27(平均) | 412.15~17.32 | 187.86~17.18 |

## 斜长石:

不同类型矿石中斜长石含量为1~60%。斜长石一般较纯净,仅有少数含微细铁矿物色体,所以比磁性系数较低(11.79~1.24),比重较小(2.67~2.80),无论磁选还是重选,都容易除去。

## 橄榄石:

主要是贵橄榄石,少量透铁橄榄石。在橄榄岩形矿石中,其含量为脉石总量的10~30%,辉长岩和辉石岩型矿石中,分别占脉石总量的0~3%和3~10%。橄榄石含铁较高(表14),由于蛇纹石化、伊丁石化,伴随生成微粒磁铁矿,橄榄石比磁化系数很高,所以容易进入铁精矿和钛精矿。利用浮选法选钛时,应注意对橄榄石的抑制。

表14

橄榄石的化学成分和比磁化系数

| 矿 区 | SiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO   | TFe   | TiO <sub>2</sub> | 比磁化系数C.G.S.<br>MCm <sup>3</sup> /g |
|-----|------------------|------|-------|-------|------------------|------------------------------------|
| 红 格 | 38.30            | 1.42 | 37.29 | 13.94 | 0.63             | 1480~97                            |
| 太 和 | 39.23            | 1.43 | 31.83 | 16.58 | 0.134            | 325~71                             |

## 脉石的工艺粒度:

脉石工艺粒度统计结果示于表15。由表可知,其粒度很粗,平均粒径是铁钛氧化物的3~8倍,矿石宜采用粗磨预选抛尾工艺。选矿试验证明,各矿区不同类型矿石,当磨至3~0毫米,采用弱磁选,可抛除40~50%的尾矿,使中贫矿石升格为中富矿石,然后再进行二段磨矿选别。两段磨矿磁选比一段磨矿磁选大大降低磨矿费用。

试验证明,四大矿区的抛尾产率与矿石类型有关,在相同磨矿条件下,辉长岩型矿石抛尾产率最高,辉石岩型次之,橄辉岩型矿石最低。矿石类型相同的情况下,磨矿粒度与脉石粒度比值越小,抛尾产率越高。

表15

脉石矿物的工艺粒度

| 矿区<br>和矿石<br>品级 | 分<br>布<br>% | 粒 级 (mm) |       |       |       |         |      |
|-----------------|-------------|----------|-------|-------|-------|---------|------|
|                 |             | >3       | 3~2   | 2~1   | 1~0.5 | 0.5~0.2 | <0.2 |
| 红 格             | I 品级        | 12.44    | 13.31 | 25.20 | 24.83 | 16.89   | 7.33 |
|                 | II 品级       | 30.34    | 17.00 | 27.57 | 17.36 | 5.11    | 2.62 |
| 白 马             | I 品级        | 18.15    | 13.59 | 29.67 | 27.59 | 8.44    | 2.56 |
|                 | II 品级       | 52.00    | 10.87 | 17.06 | 13.99 | 4.26    | 1.79 |
| 攀 枝 花           | II 品级       | 46.00    | 27.46 | 18.19 | 6.78  | 1.36    | 0.20 |
| 太 和             | 全矿区         | 14.86    | 20.34 | 29.56 | 22.65 | 7.79    | 6.2  |

## 六、主要有益元素的赋存状态和分布

现以红格T103号样为例说明(表16)。

铁：主要赋存于钛磁铁矿中，其次尚有20%以钛铁矿形式存在，以硫化物形式存在的铁只有2%左右，脉石中含铁达6%，分布率占12.46%。脉石中的铁主要是以钛磁铁矿和钛铁矿片晶形式存在，包裹于普通辉石和角闪石等矿物中，其次以磁铁矿微粒形式存在包裹于蛇纹石、绿泥石中。此外，少部分以类质同象进入辉石、角闪石、橄榄石、黑云母、绿泥石等矿物晶格。因此，这12%左右的铁在选矿中进入尾矿是合理的。合格尾矿的品位是等于或略大于6.09%。其它矿区与此接近。

钛：主要以钛铁矿形式存在，占钛金属总量的70.54%。其次是在钛磁铁矿中以类质同象和类质同象分解物状态存在，占23.54%。四大矿区的其它各矿区中，钛磁铁矿中钛的分布率一般均达到40~50%。钛磁铁矿中钛占有这样大的比例，如何使其合理回收，应在铁精矿的冶炼过程中加以研究解决。至于脉石中的钛，主要是以类质同象或类质同象分解产物形

表16

红格103号样主要元素分布

| 矿物名称  | 矿物含量   | TFe   |        | TiO <sub>2</sub> |        | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |        | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        |
|-------|--------|-------|--------|------------------|--------|-------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
|       |        | 品位%   | 分布%    | 品位%              | 分布%    | 品位%                           | 分布%    | 品位%                            | 分布%    |
| 钛磁铁矿  | 28.04  | 60.29 | 64.20  | 9.06             | 23.54  | 0.67                          | 83.18  | 0.12                           | 87.50  |
| 钛 铁 矿 | 16.44  | 33.56 | 20.96  | 50.29            | 70.54  | 0.066                         | 4.78   | 0.002                          | 0.78   |
| 硫 化 物 | 1.47   | 42.39 | 2.35   | 0.51             | 0.06   | 0.015                         | 0.09   | 0.0165                         | 0.52   |
| 脉 石   | 54.05  | 6.09  | 12.49  | 1.27             | 5.86   | 0.050                         | 11.95  | 0.008                          | 11.20  |
| 合 计   | 100.00 |       | 100.00 |                  | 100.00 |                               | 100.00 |                                | 100.00 |
| 原矿分析  |        | 25.74 |        | 11.50            |        | 0.239                         |        | 0.048                          |        |

| 矿物名称 | 矿物含量   | Co    |        | Ni    |        | Cu    |       |
|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
|      |        | 品位%   | 分布%    | 品位%   | 分布%    | 品位%   | 分布%   |
| 钛磁铁矿 | 28.04  | 0.011 | 24.22  | 0.032 | 36.00  | 0.019 | 28.80 |
| 钛铁矿  | 16.44  | 0.006 | 7.81   | 0.004 | 2.80   | 0.006 | 5.44  |
| 硫化物  | 1.47   | 0.489 | 50.78  | 0.075 | 44.00  | 0.53  | 42.39 |
| 脉石   | 50.05  | 0.004 | 17.19  | 0.008 | 17.20  | 0.008 | 23.37 |
| 合计   | 100.00 |       | 100.00 |       | 100.00 |       | 100.0 |
| 原矿分析 |        | 0.017 |        | 0.026 |        | 0.023 |       |

式存在于普通辉石等矿物中，其损失在尾矿中也是合理的。

钒、铬：前已述及，钒、铬主要以类质同象方式存在于钛磁铁矿中，各矿区相近，分布率一般为85~95%。钛铁矿和脉石中存在少部分钒和铬，这部分钒铬主要是存在于钛磁铁矿片晶包体中，少量以 $V^{3+}$ 、 $Cr^{3+}$ 进入钛铁矿和脉石晶格。

钴、镍、铜比较分散，在硫化物相中分布率只有40~50%。这是因为钛磁铁矿和脉石中有微粒乳滴状或细网状硫化物存在。此外，研究表明，部分钴镍参加钛磁铁矿和脉石晶格。

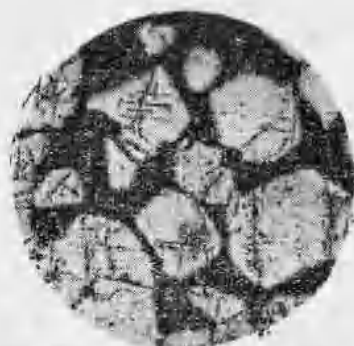
## 七、结 语

通过以上研究可知，钒钛磁铁矿矿石中含有多种有益组份。但是，由于这类矿石中广泛发育类质同象和类质同象分解，致使这些有益元素分散率较高。即使对于主元素铁、钛等，也不可能象其它矿石那样，通过选矿手段得到高品位和高回收率。矿石性质本身决定了选矿所能达到的目标。因此，这类矿石的综合利用，还必须通过冶金手段来实现。这方面，我们已作了许多有益研究，并在冶金工艺矿物学研究上取得一些进展。

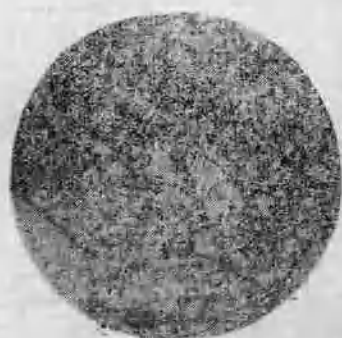
通过矿石的结构构造和工艺粒度研究，由于脉石矿物和金属矿物粒度悬殊，选矿工作者制造了一段粗粒（块矿）抛尾，使贫矿升格为中富矿，进入下段磨矿选别作业，使铁钛氧化物、硫化物解离，磁选得到铁的粗精矿，利用尾矿中不同矿物的磁性、电性、比重和表面物理化学性质的差异，采用强磁—浮选，或重选—电选流程，得到钛精矿和钴镍精矿。根据磁铁矿的内部结构，对白马、太和矿铁精矿进一步细磨精选，获得高质量的钒铁精矿，能进一步提高矿山经济效益。



照片1 反光40×海绵陨铁结构



照片2 反光40×自形晶粒状结构稠密浸染构造



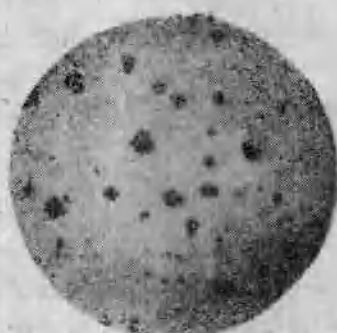
照片3 100×绿泥石交代钛磁铁矿



照片4 400×片状镁铝尖晶石和  
钛铁晶石组成盒子状结构



照片5 反光400×晶架状结构



照片6 反光100×钛磁铁矿中的  
粒状镁铝尖晶石



照片7 反光100×钛磁铁矿中  
板状铁矿被晚期硫化物呈脉状切割



照片8 电镜10000×钛铁矿中固熔  
体分离形成的钛磁铁矿(片状)  
和镁铝尖晶石(粒状)