

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.02.022

中国典型钒钛磁铁矿的工艺矿物学特征与矿石价值

于宏东^{1,2}, 王丽娜^{1,2}, 曲景奎^{1,2}, 齐涛^{1,2}

(1. 中国科学院过程工程研究所 湿法冶金清洁生产技术国家工程实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院过程工程研究所 绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 对攀枝花、承德和朝阳等地钒钛磁铁矿的工艺矿物学进行研究,同时依据铁精矿、钛精矿的现货价格和理论选矿指标对矿石的价值进行了计算. 研究表明:攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿中 MFe 品位分别为 13.26% , 12.84% 和 1.15% ; TiO₂ 的品位分别为 10.98% , 4.53% 和 2.02% ; V₂O₅ 的品位分别为 0.22% , 0.23% 和 0.055% . 各个矿产地钒钛磁铁矿中钛磁铁矿和钛铁矿的矿物含量、矿物成分有显著差别; 攀枝花、承德和朝阳铁精矿中 TFe 品位分别为 59.21% , 66.46% 和 55.74% ; TiO₂ 品位分别为 12.35% , 4.87% 和 16.42% ; V₂O₅ 品位分别为 0.928% , 1.142% 和 2.07% ; 攀枝花矿石价值最高,其次是承德,朝阳最低.

关 键 词: 工艺矿物学; 选矿指标; 钛磁铁矿; 钒钛磁铁矿; 矿石价值

中图分类号: TD 951 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)02-0275-07

Process Mineralogical Characteristics and Ore Value of Typical Vanadium Titanium Magnetite in China

YU Hong-dong^{1,2}, WANG Li-na^{1,2}, QU Jing-kui^{1,2}, QI Tao^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China.
Corresponding author: YU Hong-dong, E-mail: hdyu@ipe.ac.cn)

Abstract: The process mineralogy of vanadium-titanium magnetite from Panzhihua, Chengde and Chaoyang is studied, and the value of the ore is calculated according to the spot price of iron concentrate, titanium concentrate and the theoretical mineral processing index. The results show that the grade of magnetic iron is 13.26% , 12.84% and 1.15% , the grade of TiO₂ is 10.98% , 4.53% and 2.02% , and the grade of V₂O₅ is 0.22% , 0.23% and 0.055% , respectively, in vanadium- titanomagnetite from Panzhihua, Chengde and Chaoyang. The mineral contents and mineral compositions of titanomagnetite and ilmenite in vanadium-titanomagnetite of different mineral areas are significantly different. The grade of iron is 59.21% , 66.46% and 55.74% , the grade of TiO₂ is 12.35% , 4.87% and 16.42% , and the grade of V₂O₅ is 0.928% , 1.142% and 2.07% , respectively, in iron concentrates from Panzhihua, Chengde and Chaoyang. Panzhihua ore has the highest value, followed by Chengde, while Chaoyang ore is the lowest.

Key words: process mineralogy; mineral processing index; titanomagnetite; vanadium-titanomagnetite; ore value

中国钒钛磁铁矿资源主要分布在四川攀西、河北承德、陕西洋县、广东兴宁、湖北郧阳、新疆喀

什和哈密,以及辽西朝阳等地区^[1-3]. 钒钛磁铁矿作为钒、钛、铁等多金属共伴生的矿产资源,是世

收稿日期: 2019-05-21

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC021); 国家自然科学基金资助项目(21606241,51804289,51704270); 中国科学院创新交叉团队项目; 国家重点研发计划项目(2018YFC1900500).

作者简介: 于宏东(1977-),男,黑龙江兰西人,中国科学院过程工程研究所副研究员,博士; 齐涛(1966-),男,山东泰安人,中国科学院过程工程研究所研究员,博士生导师.

界公认的紧缺资源,随着该类特色资源的开采利用,品位高的钒钛磁铁矿日益减少,低品位表外矿和超贫钒钛磁铁矿已相继得到开发. 本文对四川攀枝花、河北承德和辽宁朝阳等地钒钛磁铁矿工艺矿物学进行研究,为科学高效利用钒钛磁铁矿资源提供了基础的矿物学资料和经济参考依据.

1 钒钛磁铁矿的化学组成

攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿的化学组成特征见表 1、表 2 和表 3.

表 1 矿石的化学成分分析(质量分数)														
Table 1 Chemical composition of the raw ores(mass fraction)														%
矿产地	TFe	FeO	TiO ₂	Mn	V ₂ O ₅	Cr	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
攀枝花	27. 11	23. 61	10. 98	0. 15	0. 22	0. 009	0. 52	23. 16	9. 35	8. 73	8. 50	0. 08	1. 31	0. 07
承德	21. 18	16. 29	4. 53	0. 20	0. 23	0. 098	0. 30	34. 03	14. 79	5. 39	3. 55	0. 65	1. 95	0. 28
朝阳	11. 28	13. 53	2. 02	0. 03	0. 055	0. 001	1. 21	46. 46	13. 62	8. 22	5. 57	1. 05	3. 04	0. 08

表 2 矿石中铁的化学物相分析							
Table 2 Chemical phase analysis results of iron for the raw ore							%
矿产地	质量分数及分布率	磁性铁中铁	钛铁矿中铁	硫化物中铁	赤褐铁矿中铁	其他铁	总量
攀枝花	铁的质量分数	13. 26	5. 26	1. 05	0. 25	7. 29	27. 11
	铁的分布率	48. 91	19. 40	3. 87	0. 92	26. 89	100. 00
承德	铁的质量分数	12. 84	1. 92	0. 26	0. 45	5. 71	21. 18
	铁的分布率	60. 62	9. 07	1. 23	2. 12	26. 96	100. 00
朝阳	铁的质量分数	1. 15	1. 13	0. 99	1. 02	6. 99	11. 28
	铁的分布率	10. 19	10. 02	8. 78	9. 04	61. 97	100. 00

表 3 矿石中钛的化学物相分析						
Table 3 Chemical phase analysis results of titanium for the raw ore						%
矿产地	质量分数及分布率	磁性铁中钛	钛铁矿中钛	金红石中钛	其他钛	总量
攀枝花	钛的质量分数	1. 66	4. 87	0. 03	0. 02	6. 58
	钛的分布率	25. 23	74. 01	0. 46	0. 30	100. 00
承德	钛的质量分数	0. 56	1. 41	0. 39	0. 35	2. 71
	钛的分布率	20. 66	52. 03	14. 39	12. 92	100. 00
朝阳	钛的质量分数	0. 23	0. 95	0. 01	0. 02	1. 21
	钛的分布率	19. 01	78. 51	0. 83	1. 65	100. 00

由表 1 可知,攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿中 Fe 的品位分别为 27. 11% ,21. 18% 和 11. 28% ;TiO₂ 的品位分别为 10. 98% ,4. 53% 和 2. 02% ;V₂O₅ 的品位分别为 0. 22% ,0. 23% 和 0. 055% .

由表 2 和表 3 可知,攀枝花、承德和朝阳矿中铁的理论选矿回收率分别为 48. 91% ,60. 62% 和 10. 19% ,钛的理论选矿回收率分别为 74. 01% ,52. 03% 和 78. 51% .

2 钒钛磁铁矿的矿物组成

矿石中矿物相对含量的测量有重量法、目测法(包括光学显微镜和扫描电子显微镜下的线段和面积测量)、算法、统计法、红外光谱、发光光

谱、X 射线衍射相分析,以及热重分析等方法^[4-6]. 本文采用计算和目测相结合的方法对钒钛磁铁矿中的矿物含量进行研究,其中计算法是以铁和钛元素的化学物相分析为基础,经过矿物化学成分测算获得铁和钛金属矿物的含量,其他矿物的含量由 MLA(mineral liberation analyser)矿物自动测量系统通过矿物的相对面积和密度折算后获得^[7-8].

典型钒钛磁铁矿的矿物组成见表 4. 由表 4 可知,攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿中主要金属矿物是钛磁铁矿和钛铁矿,它们的矿物相对含量有明显差别;攀枝花矿中钛磁铁矿和钛铁矿的质量分数(铁精矿和钛精矿的产率)分别为 22. 39% 和 15. 92% ,承德矿中分别为 19. 32% 和 4. 46% ,

朝阳矿中分别为 2.59% 和 3.07% .

表 4 矿石中的矿物组成(质量分数)
Table 4 Mineral composition of the raw ore(mass fraction) %

矿产地	钛磁铁矿	钛铁矿	黄铁矿	黄铜矿	磁黄铁矿	赤铁矿	褐铁矿	透辉石	钛辉石	镁铁闪石	普通角闪石	石榴子石
攀枝花	22.39	15.92	0.11	0.02	1.41	0.05	0.27	24.80	4.28	3.40	2.37	3.16
承德	19.32	4.46	0.54	0.04	—	0.36	0.24	1.20	—	—	2.90	4.70
朝阳	2.59	3.07	2.52	0.15	0.67	0.62	0.84	28.85	—	—	14.89	0.34
矿产地	石英	云母	长石	方解石	菱铁矿	绿泥石	蛇纹石	楣石	尖晶石	磷灰石	金红石	其他矿物
攀枝花	—	—	11.08	0.32	0.02	9.68	0.11	0.29	0.10	0.02	0.05	0.15
承德	4.10	7.80	9.40	3.87	2.67	31.50	—	1.60	1.50	1.60	0.65	1.55
朝阳	1.83	0.25	42.02	0.15	0.33	0.34	0.11	0.09	—	0.24	0.02	0.08

3 钒钛磁铁矿中主要金属矿物的结构及化学组成

3.1 钛磁铁矿

钛磁铁矿是以磁铁矿为主晶、钛铁矿为客晶组成的复合矿物相,钛磁铁矿中偶尔可见镁铝尖晶石^[9]. 钛磁铁矿中钛铁矿和尖晶石等矿物产出粒度细小(小于 0.005 mm),从磨矿的角度看,磁

铁矿与钛铁矿客晶之间难以单体解离,这是铁和钛之间难以选矿分离的根本原因. 攀枝花、承德和朝阳矿中的钛磁铁矿集合体的矿物结构见图 1 ~ 图 3 所示. 从图中可知,攀枝花的钛磁铁矿中含有较多的钛铁矿客晶;承德的钛磁铁矿中钛铁矿客晶相对较少,偶尔可见镁铝尖晶石;朝阳钒钛磁铁矿中的钛铁矿客晶也比较多. 客晶含量多意味着钛磁铁矿中钛的含量变高,而铁的含量变低.

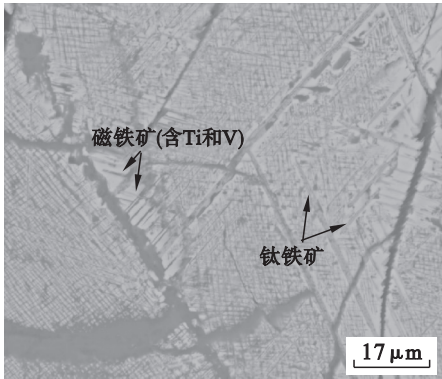
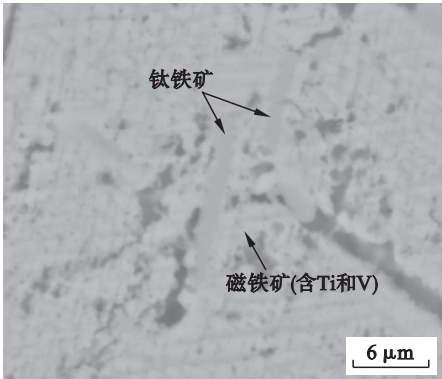


图 1 攀枝花钒钛磁铁矿中由客晶钛铁矿和主晶磁铁矿所组成的钛磁铁矿
Fig. 1 Titanomagnetite consisting of guest ilmenite and main crystal magnetite in Panzhihua titanomagnetite

不同矿产地钛磁铁矿的 X 射线谱见图 4, 钛磁铁矿的基本化学组成(EDS)见表 5. 由图 4 和表 5 可知,攀枝花、承德和朝阳矿中钛磁铁矿的成分比较复杂;因矿物形成条件及矿物结构所限,不同矿产地钛磁铁矿这一矿物复合相中铁的质量分数都低于磁铁矿的理论值(72.40%),伴生的钛和钒含量也有明显差异. 其中,承德的钛磁铁矿中含铁量最高,其次是攀枝花的钛磁铁矿,而朝阳的钛磁铁矿中含铁量最少. 承德和攀枝花的钛磁铁矿中含钒量比较接近,而朝阳的钛磁铁矿中钒含量是攀枝花的两倍以上. 朝阳、攀枝花和承德的钛磁铁矿中钛的含量依次降低. 钛磁铁矿与磁铁矿、

磁黄铁矿等矿物相似,都属于强磁性矿物^[10],弱磁选时钛磁铁矿也容易得到选择性富集和高效回收,但因不同的钒钛磁铁矿中钛磁铁矿的化学组成不同,选矿获得的磁选精矿中铁的品位及钛、钒的品位有显著的差别.

3.2 钛铁矿

钒钛磁铁矿中的钛铁矿主要有以下三种典型的嵌布特征:其一是粒状结构的钛铁矿,是矿石中钛铁矿的主要结构类型;其二是具有长条状结构的钛铁矿,该类型的钛铁矿与钛磁铁矿共生较为密切,钛铁矿与钛磁铁矿之间实现单体解离需要较细的磨矿细度;其三是片晶结构分布在磁铁

矿基底中与尖晶石一起组成钛磁铁矿复合矿物相的钛铁矿,其片晶宽度多数都小于0.005 mm,磨矿作业时此部分钛铁矿无法与磁铁矿之间实现充

分单体解离,这是导致弱磁选铁精矿中钛含量高的根本原因.攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿中钛铁矿的典型特征见图 5.从中可以看出:攀枝花和

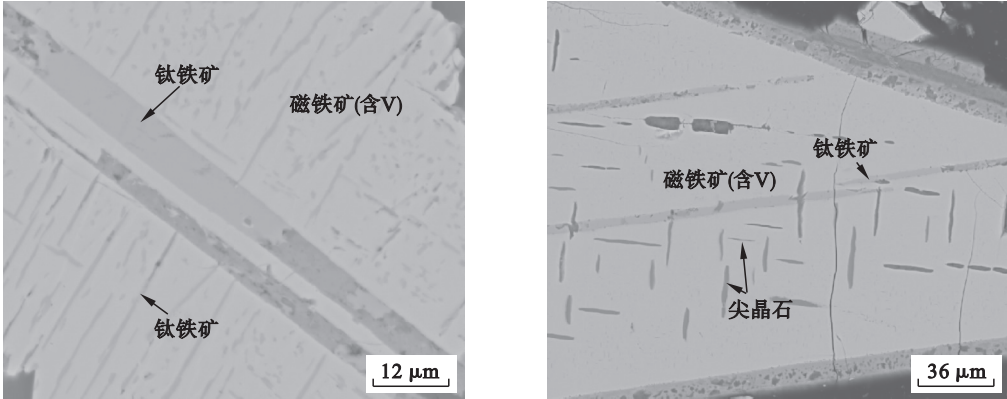


图 2 承德钒钛磁铁矿中由客晶钛铁矿、尖晶石和主晶磁铁矿所组成的钛磁铁矿
Fig. 2 Titanomagnetite consisting of guest ilmenite, spinel and main crystal magnetite in Chengde vanadium-titanomagnetite

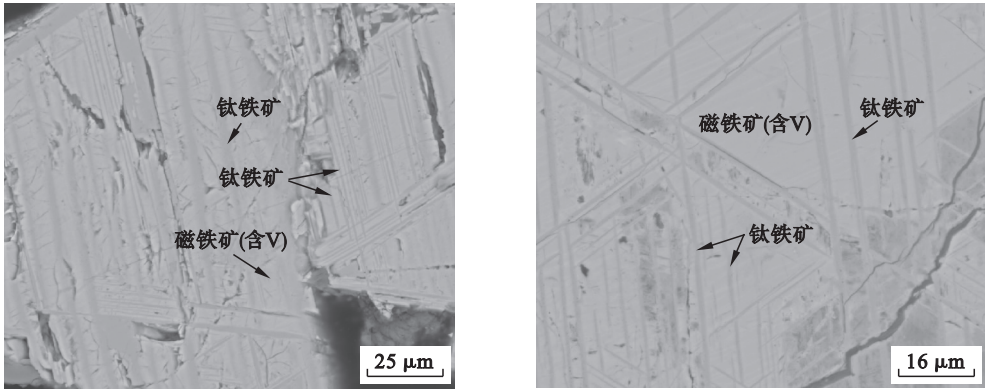


图 3 朝阳钒钛磁铁矿中由客晶钛铁矿和主晶磁铁矿所组成的钛磁铁矿
Fig. 3 Titanomagnetite consisting of guest-crystalline ilmenite and main-crystalline magnetite in Chaoyang vanadium-titanomagnetite

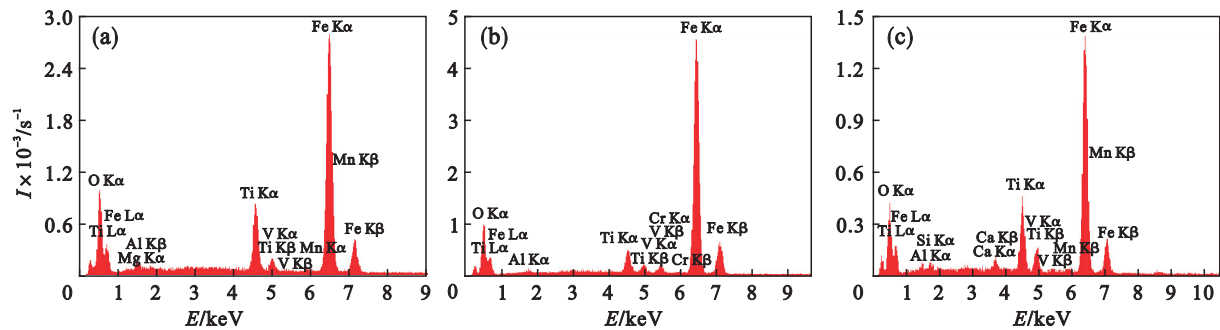


图 4 不同矿产地钛磁铁矿的典型 X 射线能谱
Fig. 4 Typical X-ray energy spectra of titanomagnetite from different areas
(a)—攀枝花; (b)—承德; (c)—朝阳.

表 5 攀枝花、承德和朝阳钛磁铁矿的基本化学组成(质量分数)

Table 5	Basic chemical composition of Panzhihua, Chengde and Chaoyang titanomagnetite(mass fraction) %									
矿产地	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
攀枝花	29.72	1.26	1.35	0.15	0.06	7.41	0.52	—	0.32	59.21
承德	27.88	—	1.29	—	—	2.92	0.64	0.81	—	66.46
朝阳	30.62	—	1.65	—	0.13	9.85	1.16	—	0.85	55.74

承德矿中钛铁矿主要是以粒状结构产出,少部分钛铁矿呈长条状嵌布在钛磁铁矿中;而朝阳钒钛磁铁矿中的钛铁矿主要呈粒状产出,且与钛磁铁矿常紧密共生. 相比较而言,攀枝花矿中钛铁矿的

矿物相对含量最高,其次是承德,而朝阳矿中的钛铁矿最少. 呈粒状产出的钛铁矿粒度主要都分布在 0.03 ~0.3 mm 之间.

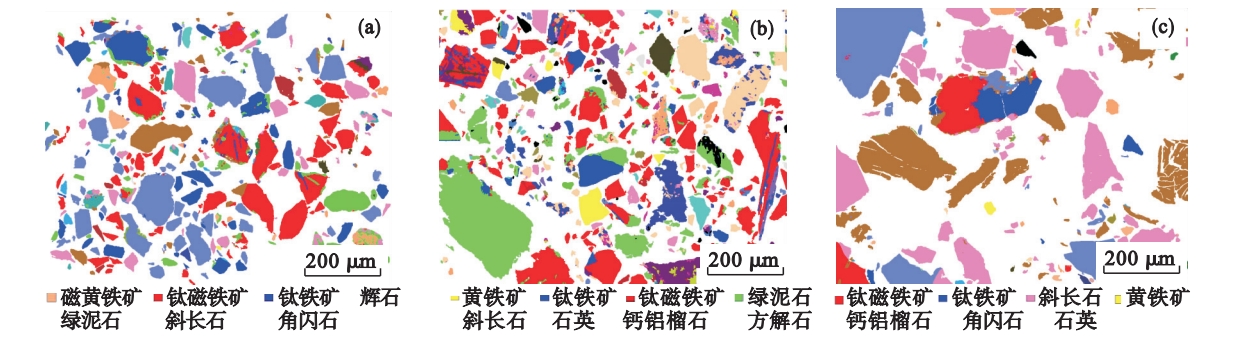


图 5 不同矿产地矿石中产出的钛铁矿
Fig. 5 Ilmenite produced from the ore of different areas
(a)—攀枝花;(b)—承德;(c)—朝阳.

不同矿产地中钛铁矿的 X 射线谱见图 6, 钛磁铁矿的基本化学组成 (EDS) 见表 6. 结果表明, 攀枝花钛铁矿中普遍含有 Mg 和 Mn 元素, 而承德钛铁矿中除铁和钛外, 其他金属元素含量极少, 朝阳钛铁矿中常常含有 Mn. 其中, 攀枝花钛铁矿中各成分的质量分数为: Ti 30.60% (TiO₂

51.00%), Fe 33.02%, Mg 3.53%, Mn 0.69%, O 32.16%, TiO₂ 质量分数低于该矿物的理论值 (TiO₂ 52.63%); 承德钛铁矿的成分与该矿物理论值一致; 朝阳钛铁矿中各成分的质量分数为: Ti 30.37% (TiO₂ 50.62%), Fe 36.36%, Mg 0.20%, Mn 0.69%, O 32.38%.

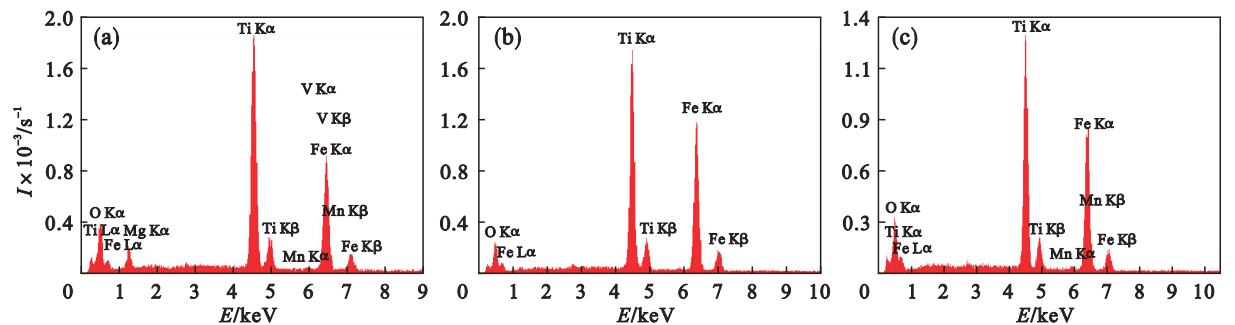


图 6 钛铁矿的典型 X 射线能谱
Fig. 6 Typical X-ray energy spectra of ilmenite
(a)—攀枝花;(b)—承德;(c)—朝阳.

表 6 钛磁铁矿的基本化学组成 (质量分数) Table 6 Composition of ilmennite (mass fraction) %					
矿产地	O	Mg	Ti	Mn	Fe
攀枝花	32.16	3.53	30.60	0.69	33.02
承德	31.58	—	31.58	—	36.84
朝阳	32.38	0.20	30.37	0.69	36.36

磁铁矿为 81.49%, 朝阳钛磁铁矿为 86.11%; 可见, 攀枝花钒钛磁铁矿中钛磁铁矿的嵌布粒度相对比较细, 而承德和朝阳钒钛磁铁矿中钛磁铁矿的嵌布粒度比较粗. 在 +74 μm 粒级中, 攀枝花钛铁矿累积的质量分数为 70.94%, 承德钛铁矿为 83.93%, 朝阳钛铁矿为 80.92%.

4 钛磁铁矿和钛铁矿的粒度分布

不同矿产地钒钛磁铁矿中钛磁铁矿和钛铁矿的粒度分布如图 7 所示: 在 +74 μm 粒级中, 攀枝花钛磁铁矿累积的质量分数为 58.93%, 承德钛

5 矿石的选矿指标与价值

不同矿产地钒钛磁铁矿中铁、钛、钒的理论选矿指标见表 7. 由表 7 可知, 承德的钒钛磁铁矿更容易获得品位高的铁精矿, 其次是攀枝花, 而朝阳

矿难以获得高品位的铁精矿;对比铁精矿中 V_2O_5 的理论品位可知,朝阳铁精矿钒的品位是攀枝花铁精矿中钒的品位的 2.23 倍,是承德铁精矿中钒品位的 1.81 倍,可见朝阳铁精矿是提钒最好的矿

物原料,其次是承德和攀枝花铁精矿.此外,因不同矿产地中钛铁矿的化学组成所限,理论上承德的钛精矿质量相对较好,其次是朝阳和攀枝花的钛精矿.

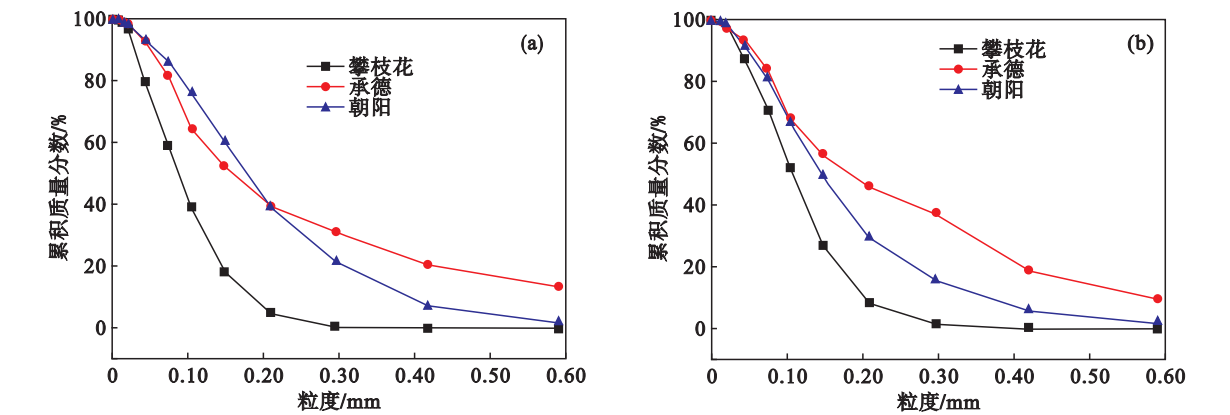


图 7 钒钛磁铁矿中钛磁铁矿和钛铁矿的粒度分布
Fig. 7 Particle size distributions of titanomagnetite and ilmenite in vanadium-titanomagnetite
(a)—钛磁铁矿; (b)—钛铁矿.

表 7 攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿的理论选矿指标								
Table 7 Beneficiation index of vanadium-titanomagnetite from Panzhihua, Chengde and Chaoyang								
矿产地	产品名称	产率	品位			回收率		
			Fe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Fe	TiO ₂	V ₂ O ₅
攀枝花	铁精矿	22.39	59.21	12.35	0.928	48.90	25.18	94.44
	钛精矿	15.92	33.02	51.00	0.000	19.39	73.95	0.00
	尾矿	61.69	13.93	0.16	0.020	31.71	0.87	5.56
	原矿	100.00	27.11	10.98	0.220	100.00	100.00	100.00
承德	铁精矿	19.32	66.46	4.87	1.142	60.62	20.76	95.93
	钛精矿	4.46	36.84	52.63	0.000	7.76	51.82	0.00
	尾矿	76.22	8.79	1.63	0.012	31.62	27.42	4.07
	原矿	100.00	21.18	4.53	0.230	100.00	100.00	100.00
朝阳	铁精矿	2.59	55.74	16.42	2.070	12.80	21.05	97.48
	钛精矿	3.07	36.36	50.62	0.000	9.90	76.93	0.00
	尾矿	94.34	9.24	0.04	0.001	77.30	2.02	2.52
	原矿	100.00	11.28	2.02	0.055	100.00	100.00	100.00

依据铁精矿(含钒单独计价)和钛铁矿精矿的现货价格以及理论选矿指标对矿石的价值进行计算(见表 8).铁精矿现货价格按 62% 干基铁精矿价格 629.33 元/t 折算为 10.15 元/(t·度)计算铁的价格,铁精矿中 V_2O_5 按 14.73 元/kg 单独计价(按高纯 V_2O_5 为 165 元/kg,采用提取率 50% 和 5.60 的调整系数进行折价);钛精矿按 TJK46 价格 1 225 元/t 折算为 26.63 元/(t·度)测算(参考 2019 年 4 月 25 日国内铁精矿、钛精矿和高纯

V_2O_5 的价格).由表 8 可知,攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿的矿石价值分别为 381.44 元/t, 225.34 元/t 和 63.93 元/t;其中攀枝花矿石价值中铁精矿的贡献率为 43.32%,钛精矿的贡献率为 56.68%;承德矿石价值中铁精矿的贡献率为 72.26%,钛精矿的贡献率为 27.74%;朝阳矿石价值中铁精矿的贡献率为 35.27%,钛精矿的贡献率为 64.73%.

表 8 攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿的矿石价值
Table 8 Ore value of vanadium-itanomagnetite from Panzhihua, Chengde and Chaoyang

矿产地	产品名称	产量/t	现货价格/(元·t ⁻¹)	产品价值/元	贡献率/%
攀枝花	铁精矿	0.223 9	737.96	165.23	43.32
	钛精矿	0.159 2	1 358.13	216.21	56.68
	原矿石	1.000 0	—	381.44	100.00
承德	铁精矿	0.193 2	842.79	162.83	72.26
	钛精矿	0.044 6	1 401.54	62.51	27.74
	原矿石	1.000 0	—	225.34	100.00
朝阳	铁精矿	0.025 9	870.67	22.55	35.27
	钛精矿	0.030 7	1 348.01	41.38	64.73
	原矿石	1.000 0	—	63.93	100.00

6 结 论

1) 攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿中铁的品位分别为 27.11% ,21.18% 和 11.28% ,其中磁性铁品位分别为 13.26% ,12.84% 和 1.15% ,TiO₂ 的品位分别为 10.98% ,4.53% 和 2.02% ,V₂O₅ 的品位分别为 0.22% ,0.23% 和 0.055% .

2) 钒钛磁铁矿中选矿目的矿物为钛磁铁矿和钛铁矿,不同的矿产地中这两种矿物的含量和成分有显著差别.理论上,承德矿容易获得高品位的铁精矿,而攀枝花和朝阳矿不能获得高品位的铁精矿;朝阳的钛磁铁矿中含钒量较高,且具有含铁量低、含钛量高的特点,与攀枝花和承德铁精矿不同,是一种特殊的含钒铁精矿.

3) 承德钒钛磁铁矿中钛磁铁矿和钛铁矿的嵌布粒度较粗,其次是朝阳矿和攀枝花矿,由工业矿物的嵌布粒度可知,承德矿易于选别,而朝阳矿和攀枝花矿次之.

4) 矿石的价值计算结果表明:攀枝花、承德和朝阳钒钛磁铁矿的矿石价值分别为 381.44 元/t, 225.34 元/t 和 63.93 元/t.

5) 通过工艺矿物学研究和矿石价值的测算,可直接获取矿产资源的理论选矿指标,对矿床技术经济评价具有一定的意义.

参考文献:

[1] 张冬清,李运刚,张颖异. 国内外钒钛资源及其利用研究现状[J]. 四川有色金属,2011(6):1-6.
(Zhang Dong-qing, Li Yun-gang, Zhang Ying-yi. The current research situation of vanadium and titanium resources and its utilization at home and abroad [J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2011(6):1-6.)

[2] 李厚民,王瑞江,肖克炎,等. 中国超贫磁铁矿资源的特征、利用现状及勘查开发建议——以河北和辽宁的超贫磁铁矿资源为例[J]. 地质通报,2009,28(1):85-90.
(Li Hou-min, Wang Rui-jiang, Xiao Ke-yan, et al.

Characteristics and current utilization status of ultra-low-grade magnetite resource, and suggestion on its exploration and development[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(1): 85-90.)

[3] 唐志东,李文博,高鹏,等. 朝阳钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(12): 1769-1774.
(Tang Zhi-dong, Li Wen-bo, Gao Peng, et al. Mineralogical study of vanadium titanium magnetite ore in Chaoyang[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2017, 38(12): 1769-1774.)

[4] 于宏东,齐涛,王丽娜,等. 临沂低品位钛矿的矿物组成及铁钛元素的分布状态[J]. 过程工程学报,2015,15(5):813-818.
(Yu Hong-dong, Qi Tao, Wang Li-na, et al. Mineral composition and distributions of Fe and Ti in low-grade titanic ore from Linyi [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2015, 15(5): 813-818.)

[5] Petit-Dominguez M D, Rucandio M I, Galan-Saulnier A, et al. Usefulness of geological, mineralogical, chemical and chemometric analytical techniques in exploitation and profitability studies of iron mines and their associated elements[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, 98(3): 116-128.

[6] Ulsen C, Kahn H, Nery G, et al. Gold characterization by MLA and technological tests-discussion of sample preparation and results [C]//Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM). [S. l.]: Springer, 2013: 39-49.

[7] Xu Z, Li Y, Liu S, et al. The characteristics study of sphalerite tailings by using MLA[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 102: 278-286.

[8] Xu C L, Zhong C B, Lyu R L, et al. Process mineralogy of Weishan rare earth ore by MLA[J]. *Journal of Rare Earths*, 2019, 37(3): 334-338.

[9] 汤集刚,张璞. 再论攀枝花地区钒钛磁铁矿中固溶分解物的相属问题[J]. 钢铁钒钛, 1984(1): 37-40.
(Tang Ji-gang, Zhang Pu. Re-discussion on phase dependence of solid solution decomposition in vanadium-titanium magnetite in Panzhihua area [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 1984(1): 37-40.)

[10] 姚江成,程希翱. 攀枝花、白马矿区钛磁铁矿磁性研究[J]. 矿冶工程, 1991, 11(4): 37-40.
(Yao Jiang-cheng, Cheng Xi-ao. Studies on magnetic properties of titanomagnetite ore at Baima mining area, Panzhihua mine[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1991, 11(4): 37-40.)