

攀西钛资源开发利用

引文格式:李宏,廖鑫,吴恩辉,等. 新型 TiC 铁基复合材料制备工艺研究[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(1): 1-14.

LI Hong, LIAO Xin, WU Enhui, et al. Preparation process of novel TiC iron-based composite materials[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(1): 1-14.

新型 TiC 铁基复合材料制备工艺研究

李宏^{1,2,4}, 廖鑫³, 吴恩辉^{1,2,4}, 马兰^{1,2,4}

(1. 攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 钒钛资源综合利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀枝花市应急救援服务中心, 四川 攀枝花 617000; 4. 国家钒钛检测重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

[摘要] TiC 铁基复合材料具有高硬度和强度、良好塑韧性、成型简单等优势,被广泛应用于航空航天、机械设备、汽车等行业,现有 TiC 铁基复合材料制备过程大部分选用高纯 Ti 粉、Fe 粉、C 粉、B₄C 粉等为原料合成制备。本研究以钒钛铁精矿和煤粉为主要原料,采用碳热还原-酸浸浸出工艺制备新型 TiC 铁基复合材料,采用单因素试验考察了碳热还原及酸浸工艺参数对 TiC 铁基复合材料制备的影响。结果表明,温度对产物物相组成影响较大,随温度上升,Fe 以 Fe_{0.9}Si_{0.1} 的形式存在逐渐变为以 Fe₃Si 的形式存在;在球料比 4:1、还原温度 1 550 ℃、还原时间 30 min 的条件下,物相组成主要为 Fe₃Si、Ti(C,N)、过量 C 和 MgAl₂O₄ 等;在 10% HCl、固液比 20:1、浸出温度 85 ℃、浸出时间 120 min 的条件下,酸浸除去了多余杂质,成功制备了 TiC/Fe 复合材料;酸浸前后形貌和粒径变化不大,酸浸前粒径为 22 μm、酸浸后为 23 μm;需要注意,所制备的 TiC/Fe 复合材料增强相 TiC 不纯,多以 Ti(C,N) 的形式存在,通过选择合适的原料球料比和碳热还原时间以及尽可能增大碳热还原温度可有效避免该问题。

[关键词] TiC/Fe 复合材料;钒钛铁精矿;煤粉;原位合成;碳热还原-酸浸;TiC 纯度;Ti(C,N)

[中图分类号] TF823; TF125.2+2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)01-0001-14

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.01.001

0 引言

复合材料是由两种或两种以上具有不同的物理化学性能和机械性能的材料组成的多相固体,通过优化这些材料的组合,可以使复合材料的整体性能

优于单一材料的性能^[1]。陶瓷颗粒增强铁基复合材料是由分散在金属铁中的陶瓷颗粒(如 TiC、VC 等)增强相和基体铁组成,一般通过粉末冶金的方法制备^[2-9],其具有高硬度和强度、良好塑韧性、成型简单等优势^[10-11],被广泛应用于航空航天、机械设备、建筑材料、汽车等行业^[12-15]。

针对我国四川攀西地区富有的钒钛磁铁矿,除了文献^[16]《攀钢尾矿原位合成 TiCN/Fe₃Si 复合材料》有研究外,目前国内外鲜有以攀枝花钒钛磁铁矿为主要原料原位合成制备铁基复合材料的相关报道。在有关 TiC 铁基复合材料制备过程中,大部分研究者选用高纯 Ti 粉、Fe 粉、C 粉、B₄C 粉等为原料,本文采用钒钛磁铁矿为原料,并对原料中 TiO₂ 等有价元素进行二次利用,探索制备新型 TiC 铁基

[收稿日期] 2024-09-30 [修订日期] 2024-11-08

[录用日期] 2024-11-09 [出版日期] 2025-02-01

[第一作者] 李宏(1985—),女,四川仁寿人,博士,讲师,主要从事钒钛磁铁矿综合利用方面的研究。

[通信作者] 廖鑫(1988—),男,四川邻水人,硕士,工程师,主要从事矿产资源开发及利用、尾矿处理等方面的工作。

[基金项目] 钒钛资源综合利用四川省重点实验室项目(035000806);攀枝花学院校级大学生创新创业训练计划项目(2023excy049)。

复合材料的工艺参数。

1 试验

1.1 试验原料

本试验以攀枝花某厂的钒钛铁精矿粉和攀枝花

某厂煤粉为原料,其中钒钛铁精矿经原矿磁选富集后得到,化学成分见表 1,主要成分为 Fe_3O_4 和 FeO ,伴生有 FeTiO_3 ;煤粉成分见表 2。

1.2 试验设备

试验所用到的设备见表 3 所示。

表 1 钒钛铁精矿化学成分(质量比)

Table 1 Chemical composition of vanadium-titanium iron concentrate(mass percent) %

成分	TFe	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	V ₂ O ₅	S	P
含量	53. 12	12. 70	4. 70	3. 88	3. 90	1. 58	0. 56	0. 677	0. 005

表 2 煤粉成分及热值

Table 2 Composition of pulverized coal

成分(热值)	固定碳	挥发分(V _r)/%	硫/%	灰分(A _r)/%	热值/(kJ·kg ⁻¹)
含量	79. 23	10. 72	0. 60	9. 45	28 511

表 3 试验设备

Table 3 Experimental equipment

设备名称	型号	厂家	用途
高温电阻炉	SX2-9-14TP	洛阳纳维特炉业有限公司	焙烧
循环水式真空泵	SHB-111	余姚市东方电工仪器厂	除渣
电热鼓风高温干燥箱	DZF-2	郑州长城科工贸有限公司	烘干球团
粉末压片机	FYD-30	北京市永光明医疗仪器厂	制备球团
电子天平	12001	天津市思创精实科技发展有限公司	称量耗材
磁力搅拌器	ZNCL	杭州有恒称重设备有限公司	酸浸反应搅拌
制样机	CJ-3	杭州卓驰仪器有限公司	球磨
PH 计	CT-6023	佛山南北潮电子商务有限公司	测量 PH 值

1.3 试验思路及方法

本试验采用碳热还原法,制备 TiC 铁基复合材料,工艺流程如图 1 所示。

1)焙烧。主要焙烧过程在高温电阻炉中进行,使钒钛铁精矿粉中的 TiO_2 、 V_2O_5 被碳还原为 TiC、VC,同时铁氧化物被还原为单质铁。将 10 g 含碳球团在 120 ℃干燥箱烘干后装入石墨坩埚中,放入高温电阻炉中焙烧,然后自然冷却,利用重力沉降法将冷却后的产物进行渣金分离,得到所需样品,用玛瑙干锅配上 12 目(1. 397 mm)筛子过筛后,对一部分样品进行物相分析,一部分样品酸浸后再进行物相分析。探索钒钛铁精矿粉球料比、碳热还原中还原温度、还原时间对还原产物物相组成成分及含量、质量变化和形貌尺寸变化等的影响规律。

2)酸浸。在盐酸浸出条件下,探究浸出前后样

品物相及形貌尺寸变化,分析酸浸过程的微观变化规律。在通过碳热还原法制备 TiC 铁基复合材料的过程中,除了目标产物 TiC、VC 和单质铁外,还会产生一些未反应完全的金属氧化物或其他可能存在的副产物或有少量未被还原的 TiO_2 残留,酸浸可以选择性地溶解这些杂质相,从而提高产物的纯度。通过对比酸浸前后的物相分析结果,可以更好地确定目标产物的成分和含量,以及其在酸浸条件下的变化规律。从微观角度来看,酸浸过程会对样品的形貌和尺寸产生影响。酸浸可能会溶解样品表面的一些物质,使原本被包裹或者附着在其他物质上的目标产物暴露出来,从而改变样品的微观形貌。

工艺流程图,如图 1 所示。

1.4 分析及计算方法

1)采用扫描电子显微镜(SEM,Inspect F50,美

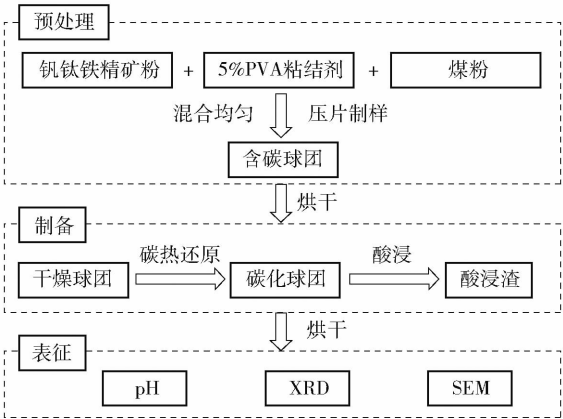


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart

国 FEI 公司)表征样品的形貌。通过 SEM (Inspect F50 型号)可以直观地观察到样品的微观结构,如颗粒的形状、大小、表面是否光滑或粗糙,以及颗粒之间的团聚状态等。这有助于了解在不同实验条件下(如不同球料比、还原温度、还原时间)制备的 TiC 铁基复合材料的微观形貌变化。

2)通过 Nano Measurer 软件分析 SEM 图片(样本量为随机取点 400 个),并分析样品的平均粒径及粒度分布,同时与 X 射线能谱仪(EDS)联用分析样品元素成分。通过该软件对颗粒尺寸的测量,可以计算出样品的平均粒径。粒度分布则反映了颗粒大小的分散程度,即不同粒径的颗粒在样品中所占的比例。这对于研究样品的物理性质(如流动性、填充性等)以及反应性能非常重要。例如,较小的平均粒径和较窄的粒度分布可能会使材料在后续应用(如作为复合材料的增强相)中有更好的性能。EDS 可以检测这些 X 射线的能量和强度,从而确定样品表面微区的元素种类和相对含量。在这个实验中,通过联用可以同时获得样品的形貌、粒径信息和元素组成信息,能够更好地了解 TiC 铁基复合材料的成分和微观结构之间的关系。例如,可以确定 TiC、VC 和单质铁等目标成分在样品中的分布情况,以及是否存在其他杂质元素。

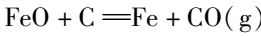
3)采用 X 射线衍射仪(DX-2700, 浩元仪器)分析样品的物相。设定设备参数为扫描角度为 10° 到 90° , 间距为 0.026° , 扫描速度为 0.02° 。这些参数决定了 XRD 测量的范围和精度。在这个范围内扫描可以检测到样品中不同晶相的衍射峰。通过与标准的晶体衍射卡(PDF 卡片对比,可以确定样品中

存在的物相种类。不同的物相(如 TiC、VC 单质铁等)具有不同的晶体结构,会在特定的衍射角度产生特征衍射峰。通过分析这些衍射峰的位置、强度等信息,可以确定物相组成成分及含量,从而研究不同实验条件对产物物相的影响。

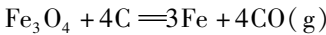
2 钪钛铁精矿还原过程热力学分析

2.1 铁氧化物还原过程热力学分析

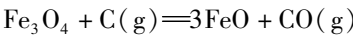
钪钛铁精矿中铁氧化物主要有 FeO 和 Fe_3O_4 , 其被煤粉还原的可能反应见式(1)~(6);各反应的标准摩尔吉布斯自由能 ΔG_r^{θ} 和温度(T)变化的关系如图 2 所示。



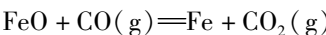
$$\Delta G_1^{\theta} = -0.1447T + 140.59 \text{ (kJ/mol)} \quad (1)$$



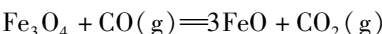
$$\Delta G_2^{\theta} = -0.1562T + 151.21 \text{ (kJ/mol)} \quad (2)$$



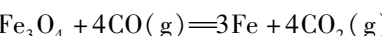
$$\Delta G_3^{\theta} = -0.1910T + 182.07 \text{ (kJ/mol)} \quad (3)$$



$$\Delta G_4^{\theta} = 0.0251T - 23.182 \text{ (kJ/mol)} \quad (4)$$



$$\Delta G_5^{\theta} = -0.0210T + 19.303 \text{ (kJ/mol)} \quad (5)$$



$$\Delta G_6^{\theta} = 0.0135T - 12.561 \text{ (kJ/mol)} \quad (6)$$

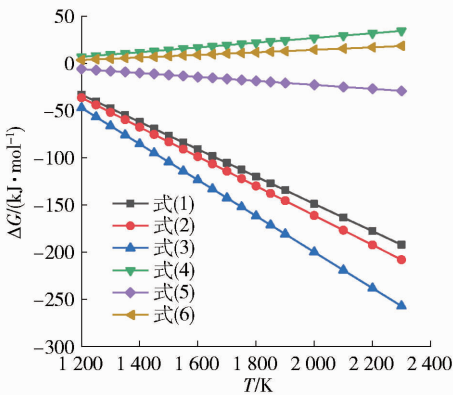


图 2 碳热还原铁氧化物的 $\Delta G_r^{\theta} - T$ 图

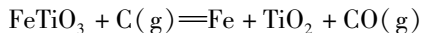
Fig. 2 Diagram of carbothermic reduction of iron oxides $\Delta G_r^{\theta} - T$

由图 2 可以看出,在标准状态下,铁氧化物与 C 的直接还原反应 ΔG_r^{θ} 值均为负值,反应可以发生;随着还原温度升高, ΔG_r^{θ} 越来越小,说明反应为吸热反应,温度升高有利于反应的进行。温度在 $1073 \sim$

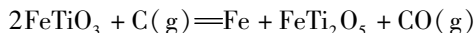
2 273 K 时,CO 还原 Fe_3O_4 生成 FeO 的反应为负值,反应可以发生;CO 还原 Fe_3O_4 生成 Fe 以及 CO 还原 FeO 的反应,其 ΔG_r^θ 的值均为正值,说明该反应是不能自发进行的。温度在 1 073 ~ 2 273 K 时,首先可能进行的反应是 Fe_3O_4 与 C 反应生成 FeO ,其次是 Fe_3O_4 与 C 反应生成 Fe ,然后是 FeO 与 C 反应生成 Fe 。

2.2 FeTiO_3 还原过程热力学分析

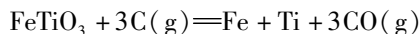
FeTiO_3 是一种复杂的多晶固溶体,其还原过程是一个非常复杂的过程。随着反应温度的不同,该反应过程可能有几种不同的还原历程,钛铁矿与碳的直接反应见式(7)~(13)。各反应的标准摩尔吉布斯自由能 ΔG_r^θ 变化和温度(T)变化的关系如图3所示。



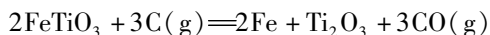
$$\Delta G_7^\theta = -0.373T + 359.68 \text{ (kJ/mol)} \quad (7)$$



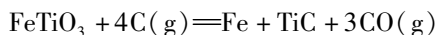
$$\Delta G_8^\theta = -0.2407T + 262.42 \text{ (kJ/mol)} \quad (8)$$



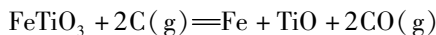
$$\Delta G_9^\theta = -0.2398T + 355.40 \text{ (kJ/mol)} \quad (9)$$



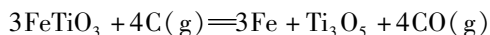
$$\Delta G_{10}^\theta = -0.3105T + 329.71 \text{ (kJ/mol)} \quad (10)$$



$$\Delta G_{11}^\theta = -0.1755T + 218.55 \text{ (kJ/mol)} \quad (11)$$



$$\Delta G_{12}^\theta = -0.2749T + 356.82 \text{ (kJ/mol)} \quad (12)$$



$$\Delta G_{13}^\theta = -0.3316T + 341.50 \text{ (kJ/mol)} \quad (13)$$

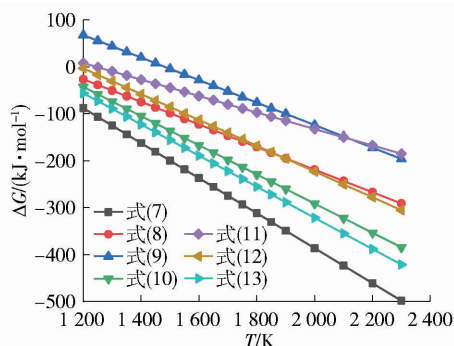


图3 C 还原 FeTiO_3 的 $\Delta G_r^\theta - T$ 图

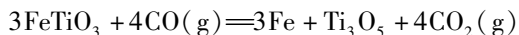
Fig.3 Diagram of C reducing FeTiO_3 $\Delta G_r^\theta - T$

由图3可以看出,在标准状态下,反应式(9)、式(11)和式(12)的起始反应温度分别为1 482 K、1 243 K、1 188 K,且反应也为吸热反应,温度升高,

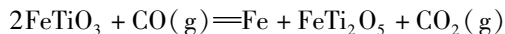
利于反应进行。除上述3个反应外,温度在1 073 ~ 2 273 K 范围内,其他反应的 ΔG_r^θ 值均为负值,说明反应均能发生,且 ΔG_r^θ 值随着温度的升高而下降,说明反应均为吸热反应,升高还原温度有利于反应进行。

在标准状态下,还原温度1 073 ~ 2 273 K 范围内,最容易发生的反应是 FeTiO_3 与 C 反应生成 TiO_2 和 Fe ,其次是 FeTiO_3 与 C 反应生成 Ti_3O_5 与 Fe , FeTiO_3 与 C 反应生成 Ti_2O_3 和 Fe ,然后是 FeTiO_3 与 C 反应生成 FeTi_2O_5 和 Fe , FeTiO_3 与 C 反应生成 TiO 和 Fe ,最后是 FeTiO_3 与 C 反应生成 TiC 和 Fe , FeTiO_3 与 C 反应生成 Ti 和 Fe 。

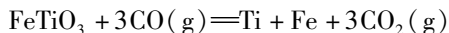
其次, FeTiO_3 和 CO 可以发生间接反应,可能存在的反应见式(14)~(20)。各反应的标准摩尔吉布斯自由能 ΔG_r^θ 和温度(T)变化的关系如图4所示。



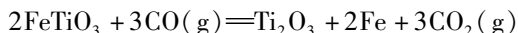
$$\Delta G_{14}^\theta = -0.1619T + 177.71 \text{ (kJ/mol)} \quad (14)$$



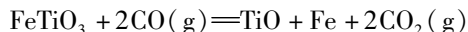
$$\Delta G_{15}^\theta = -0.0709T + 98.646 \text{ (kJ/mol)} \quad (15)$$



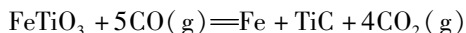
$$\Delta G_{16}^\theta = -0.0700T + 191.61 \text{ (kJ/mol)} \quad (16)$$



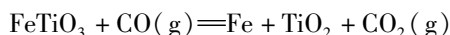
$$\Delta G_{17}^\theta = -0.01408T + 165.94 \text{ (kJ/mol)} \quad (17)$$



$$\Delta G_{18}^\theta = -0.1052T + 163.05 \text{ (kJ/mol)} \quad (18)$$



$$\Delta G_{19}^\theta = -0.0046T + 43.818 \text{ (kJ/mol)} \quad (19)$$



$$\Delta G_{20}^\theta = -0.2033T + 195.91 \text{ (kJ/mol)} \quad (20)$$

由图4可以看出,在标准状态下, FeTiO_3 与 CO

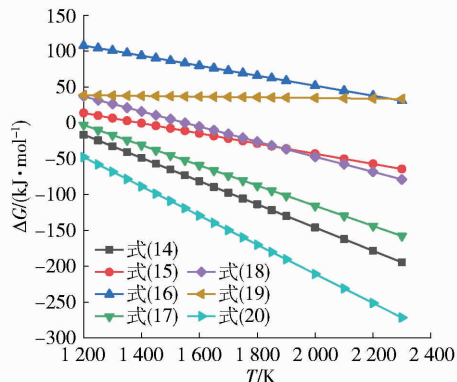


图4 CO 还原 FeTiO_3 的 $\Delta G_r^\theta - T$ 图

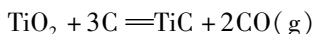
Fig.4 Diagram of CO reducing FeTiO_3 $\Delta G_r^\theta - T$

的反应都是随着还原温度升高, ΔG_r^θ 值越来越小。在 1 073 ~ 2 273 K 的条件下, FeTiO_3 与 CO 反应分别生成 Ti 和 TiC 的反应不能进行; 还原温度从 1 073 K 升高到 2 273 K 的过程中, 首先可能进行的反应是 FeTiO_3 与 CO 反应生成 TiO_2 和 Fe, 其次是 FeTiO_3 与 CO 反应生成 Ti_3O_5 和 Fe。

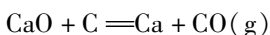
以上分析是按各反应式单独进行反应来考虑的, 实际上, 整个还原过程中, 应该是多个反应同时进行, 且各个反应生成物和反应物甚至中间产物之间都有可能发生相互作用, 进而影响整个还原过程。综上可知, C 在还原钛铁矿过程中, 中间可能生成钛的各种氧化物, 在温度一定、C 含量过量情况下, 钛的各种氧化物被碳进一步还原为最终所需产物 TiC。具体还原产物在理论分析的基础上, 还应该结合 XRD 等分析手段得出还原结果。

2.3 其他氧化物还原过程热力学分析

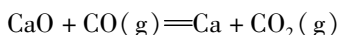
试验所选钒钛铁精矿原料中还含有一定量的其他氧化物, 如 TiO_2 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 等, 其与还原剂可能发生的反应见式 (21) ~ (29)。各反应的标准摩尔吉布斯自由能 ΔG_r^θ 变化和温度 (T) 变化的关系如图 5 所示。



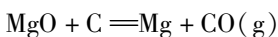
$$\Delta G_{21}^\theta = -0.3694T + 587.85 \text{ (kJ/mol)} \quad (21)$$



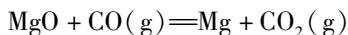
$$\Delta G_{22}^\theta = -0.1978T + 528.40 \text{ (kJ/mol)} \quad (22)$$



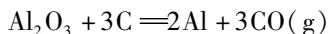
$$\Delta G_{23}^\theta = -0.0281T + 364.27 \text{ (kJ/mol)} \quad (23)$$



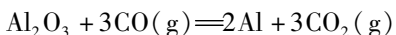
$$\Delta G_{24}^\theta = -0.2002T + 492.64 \text{ (kJ/mol)} \quad (24)$$



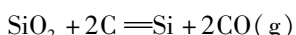
$$\Delta G_{25}^\theta = -0.0305T + 328.87 \text{ (kJ/mol)} \quad (25)$$



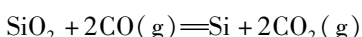
$$\Delta G_{26}^\theta = -0.1938T + 445.97 \text{ (kJ/mol)} \quad (26)$$



$$\Delta G_{27}^\theta = -0.0240T + 282.19 \text{ (kJ/mol)} \quad (27)$$



$$\Delta G_{28}^\theta = -0.1762T + 342.18 \text{ (kJ/mol)} \quad (28)$$



$$\Delta G_{29}^\theta = -0.0014T + 171.10 \text{ (kJ/mol)} \quad (29)$$

由图 5 可知, 在 1 073 ~ 2 273 K 温度区间内, 以上其他氧化物除 TiO_2 可能被还原物还原外, 其他杂

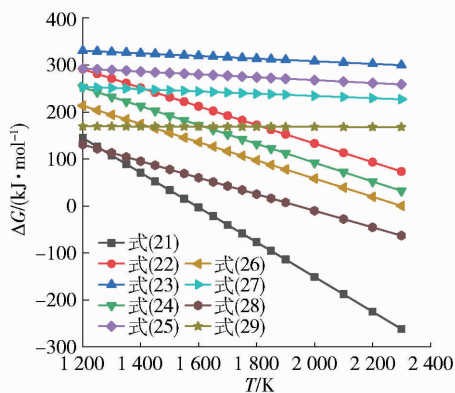


图 5 碳热还原其他氧化物的 $\Delta G_r^\theta - T$ 图

Fig. 5 Diagram of Carbothermal Reduction of Other Oxides $\Delta G_r^\theta - T$

质类氧化物所涉及到的反应均不可能发生, 因此不用考虑其他氧化物的反应。

2.4 热力学分析结论

由热力学分析可知, 在 1 073 ~ 2 273 K 的高温区间内, 得出以下结论。

1) 铁氧化物在高温下被碳直接还原得到单质铁的反应均有可能发生, 但铁氧化物被 CO 还原得到单质铁的反应不可能发生, 被 C 和 CO 还原得到低价氧化铁 (FeO) 的反应均有可能发生。

2) FeTiO_3 被 C 还原的反应在高温下均可能发生, 但被 CO 还原得到 $\text{Fe} + \text{Ti}$ 和 $\text{Fe} + \text{TiC}$ 的反应均不可能发生。

3) 其他氧化物除 TiO_2 能被 C 还原得到 TiC 外, 其余杂质氧化物均不能被 C 或 CO 还原。

3 碳热还原试验结果及分析

3.1 球料比对试验结果的影响分析

3.1.1 碳热还原前后质量变化

在球磨时间为 6 h, 球磨转速 20 r/min, 碳氧比 1.8、还原温度为 1 550 ℃、还原时间为 30 min 的条件下, 不同球料比与物料中立粒径和还原后质量减少情况, 如图 6 所示。球料比是指在球磨过程中, 研磨球的质量与被研磨物料质量的比值。合适的球料比可以保证研磨球与物料之间有充分的接触和碰撞机会; 减少研磨球的使用量, 从而降低生产成本; 通过控制球料比, 可以使物料在球磨过程中受到较为均匀的研磨力, 有助于得到粒度分布均匀的产品, 对于后续的还原等工艺过程以及最终产品的质量稳定

性非常重要。

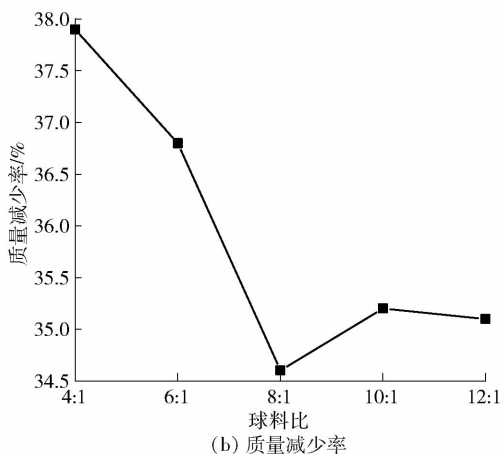
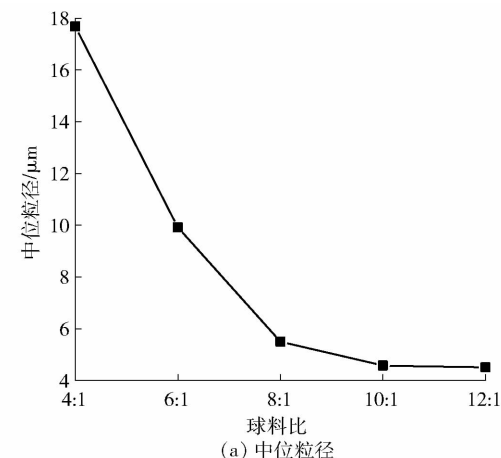


图6 球料比对物料中位粒径和还原后产物质量的影响

Fig. 6 Effect of the ratio of ball to material on the trend of neutral particle size and mass reduction after reduction

由图6可以看出,随着球料比增大,所制备钒钛铁精矿混合粉末中位粒径逐渐减小。当球料比达到10:1时,混合粉末中位粒径最小;球料比为12:1时,粉末中位粒径相比10:1时要大。这是因为当磨球质量固定时,球料比增加(即加入原料比较少),易产生空磨,影响球磨效果;球料比低时,加入的原料较多,钢球相对较少,只有小部分的原料被球与球之间的界面捕捉到,所以在球磨过程中,有大量的粉被挤压逸出,进行研磨破碎,其他的由于剪切力和揉搓的作用延展开来,导致中位粒径偏大。

从图6中可以看出不同球料比下物料中粒径的变化。球料比的改变会影响球磨后物料的粒径大小。合适的球料比可以使物料粒径达到合适的范

围,而粒径大小对碳热还原过程有重要影响。较小的粒径可以增加物料的比表面积,使物料与还原剂(碳)之间的接触面积增大。在碳热还原过程中,反应物之间的接触面积越大,反应越容易进行,反应速率也会加快。例如,当球料比使得物料粒径较小,在1550℃、还原时间为30min的条件下,物料中的氧化物与碳能够更充分地接触,有利于还原反应的进行,提高还原效率。

3.1.2 物相变化分析

固定试验条件碳氧比1.8、还原温度1550℃、还原时间30min,考察不同球料比对碳热还原后产物物相组成的影响,结果如图7所示。

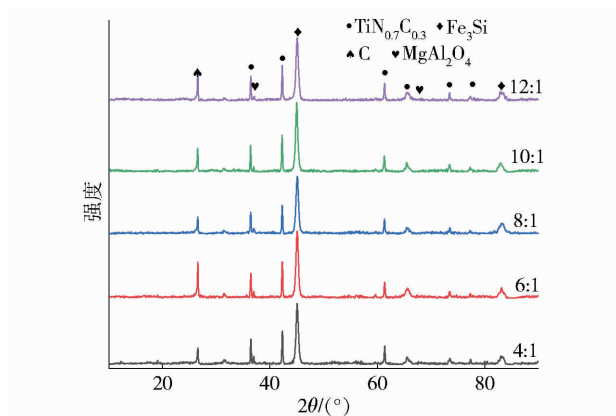


图7 不同球料比下还原产物X射线衍射图谱

Fig. 7 X-ray diffraction patterns of reduction products under different ball-to-powder ratios

通过分析X射线衍射图谱可知,碳热还原后,样品主要物相为Fe₃Si,其次为Ti(C,N)、过量C和MgAl₂O₄等其他杂质物相;还原产物物相组成随球料比增加变化不大,仅部分物相波峰有细微变化。由于原料粉末成分复杂且XRD分析物相时存在一定的误差,尤其是在某类物相含量较少时,物相峰表现并不明显。图7中,所属Ti(C,N)峰与TiC、TiN峰靠近,吻合程度均较大,所属Fe₃Si峰与Fe峰较为接近。

图8为不同球料比下Fe/TiC重量比变化趋势及实际Ti(C,N)与理论TiC特征峰衍射角偏移量变化趋势。

由图8(a)可以看出,当球料比为4:1时,Fe/TiC重量比最低;随着球料比增大,Fe/TiC比值先上升后下降,球料比为6:1时,Fe/TiC重量比值最大。这是由于球料比增加后,参与反应的铁精矿粒径减小,

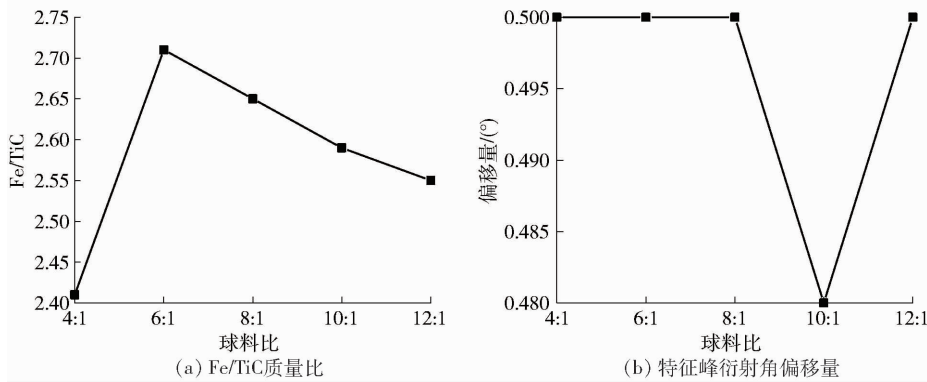


图 8 不同球料比下 Fe 与 TiC 的重量比及实际 Ti(C,N)与理论 TiC 特征峰衍射角偏移量

Fig.8 The weight ratio of Fe to TiC and the diffraction angle offset of the actual Ti(C,N) and theoretical TiC characteristic peaks under different nder different ball-to-powder ratios:

(a) Fe/TiC weight ratio (b) Diffraction angle shift of characteristic peaks

反应更加充分,生成的 Fe 量增加。由图 8(b)可知,当球料比为 10:1 时,实际 Ti(C,N)与理论 TiC 特征峰衍射角偏移量最小(0.48),说明此条件下 Ti(C,N)中含碳量更多,更易获得 TiC。其他球磨参数下,

偏移量始终为 0.5°。

3.1.3 形貌尺寸分析

不同球料比对还原产物形貌的影响如图 9 所示,样品粒径的变化情况如图 10 所示。

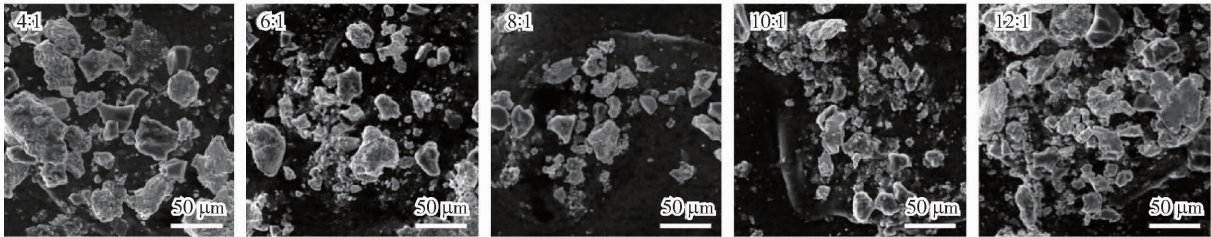


图 9 不同球料比下还原产物局部微观形貌图(1 000 ×)

Fig.9 Local microscopic morphology of reduction productsunder different ball-to-powder ratios (1 000 × Magnification)

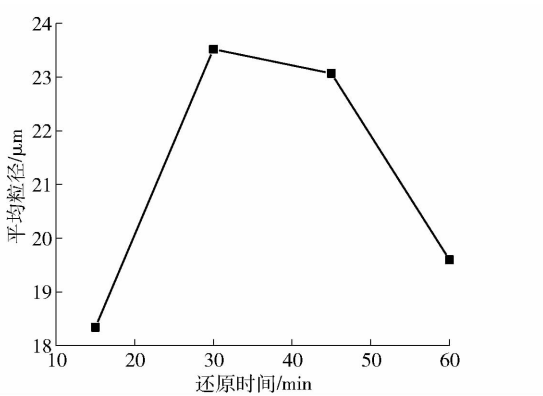


图 10 不同球料比下还原产物平均粒径变化趋势

Fig.10 Variation trend of average particle size of reduction products under different ball-to-powder ratios

结合图 9 和图 10 可以看出,随球料比增加,还原产物平均粒径先增大后减小。球料比为 10:1 时,粉末的平均粒径最大,此时 Ti(C,N)附着在 Fe₃Si 上最多,颗粒之间发生团聚,导致粒径变大。导致这一现象发生的原因可能是较小的颗粒具有较大的比表面积,因此更容易附着在 Fe₃Si 上。同时,颗粒的形状也会影响其相互之间的接触方式和结合强度。球料比为 12:1 时,平均粒径有所下降,可能是因为反应物粒径比较小,在碳热还原过程中生产的 Ti(C,N)量较少,颗粒之间发生的团聚现象不明显。

3.2 还原温度对试验结果的影响

3.2.1 碳热还原前后质量变化

固定试验条件球料比 8:1、C/O1.8、还原时间 30 min,考察不同碳热还原温度对还原后样品质量

减少率的影响,结果如图 11 所示。

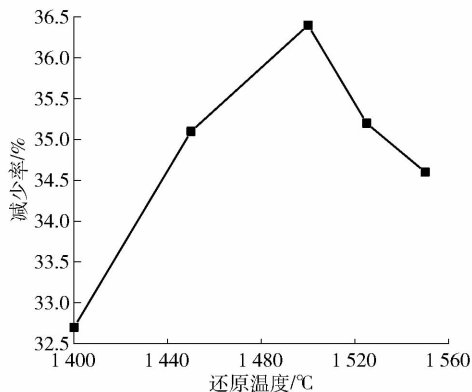


图 11 还原温度对还原后样品质量的影响

Fig. 11 Effect of reduction temperature on the quality of reduced samples

从图 11 可以看出,随着反应温度上升,还原后样品质量减少率逐渐增加,到 1 500 °C 时样品质量减少率达到最大值 36.4%,而后再次降低。从还原反应动力学来看,随着温度升高,还原反应的速率会加快,这通常会导致样品中氧化物的还原程度增加,从而引发质量的显著减少。然而,当温度达到或超过某一临界值(如 1 500 °C)时,还原反应可能接近或达到平衡状态,此时进一步升高温度对反应速率的提升作用变得有限,甚至可能导致副反应的发生,从而减缓了质量的减少速率。从物相转变与结构稳定性来看,在高温下,样品中的矿物相会发生转变,形成更稳定的化合物。在还原反应过程中,矿物相中的氧原子被碳等还原剂夺走,形成气体(如 CO 等)逸出,从而导致样品质量减少。钛铁矿和磁铁矿等矿物相可能转变为更稳定的氧化物或合金相。

3.2.2 物相变化分析

不同还原温度下,还原产物的 X 射线衍射图谱如图 12 所示。

随着还原温度升高,Fe 以 $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ 的形式存在逐渐变为以 Fe_3Si 的形式存在;TiC 始终以 $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ 的形式存在,只是 C、N 质量百分比有所不同;不同还原温度下,始终有过量 C 的存在以及 Mg_2SiO_4 、 MgAl_2O_4 等微量杂质存在。另外,Fe 和 C 所属峰强在不同温度下也有细微差异,当温度为 1 450 °C 时,Fe 和 C 所属峰强最弱,其他温度下相差不大。

不同还原温度下,Fe/TiC 的变化趋势及实际 Ti(C,N)与理论 TiC 特征峰衍射角偏移量变化趋势如

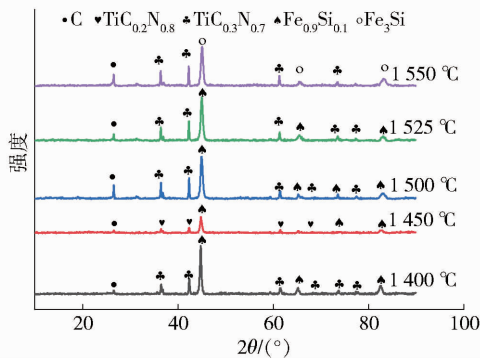
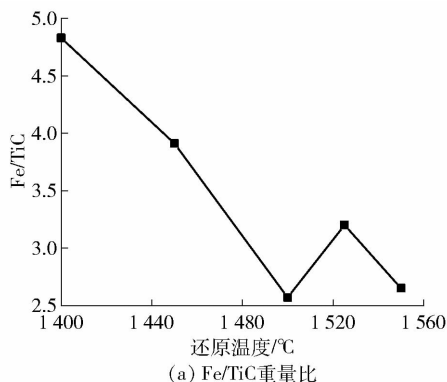


图 12 不同还原温度下对应 X 射线衍射图谱

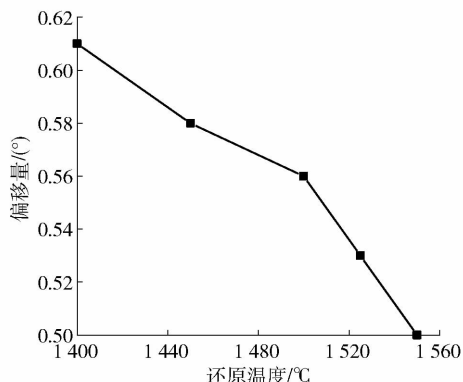
Fig. 12 X-ray diffraction patterns of reduction products under different reduction temperatures

图 13 所示。

从图 13 可以看出,随还原温度增加,Fe 含量减少 TiC 含量增加,当温度超过 1 500 °C 时,存在一个



(a) Fe/TiC 重量比



(b) 特征峰衍射角偏移量

图 13 不同还原温度下 Fe/TiC 及实际 Ti(C,N)与理论 TiC 特征峰衍射角偏移量变化趋势

Fig. 13 Variation trend of diffraction angle offset of Fe/TiC and actual Ti(C,N) and theoretical TiC characteristic peaks under different reduction temperatures: (a) Fe/TiC weight ratio (b) Diffraction angle shift of characteristic peaks

小的起伏区间,此区间内 Fe 含量先增后减,当温度为 1 500 ℃时,TiC 相对含量最高。实际 Ti(C,N) 与理论 TiC 特征峰衍射角偏移量随还原温度增加而降低,说明升高温度,实际反应过程中生成的 TiC 量越

多。综合考虑,选择还原温度为 1 550 ℃。

3. 2. 3 形貌尺寸分析

不同还原温度下,还原产物的局部微观形貌如图 14 所示,样品平均粒径变化情况如图 15 所示。

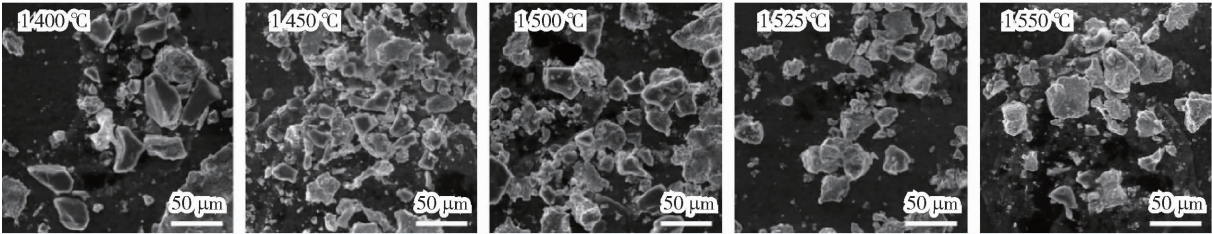


图 14 不同还原温度下还原产物局部微观形貌图(1 000 ×)

Fig. 14 Local microscopic morphology of the reduction product under different reduction temperatures (1 000 × Magnification)

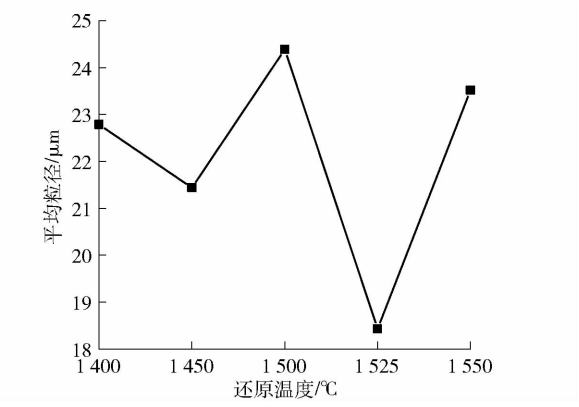


图 15 不同还原温度下还原产物平均粒径变化趋势

Fig. 15 Variation trend of average particle size of reduction products under different reduction temperatures

由图 14 和图 15 可知,不同还原温度下,还原产物的局部微观形貌变化不大,多为不规则类球块状;还原产物的平均粒径均在 20 μm 左右,且随温度变化无明显规律;在 1 525 ℃时平均粒径最小,1 550 ℃时平均粒径最大,此时 Ti(C,N)附着在 Fe₃Si 上最多,颗粒之间发生团聚,导致粒径变大。

3. 3 还原时间对试验结果的影响分析

3. 3. 1 碳热还原前后质量变化

固定试验条件球料比 8:1、C/O 1.8、温度 1 550 ℃,考察不同还原时间对还原后样品质量减少率的影响,结果如图 16 所示。

由图 16 可知,保持还原温度为 1 550 ℃不变的情况下,当还原时间小于 30 min 时,质量减少率较

低;当还原时间大于 30 min 时,质量减少率较高;60 min 时达到最大值 36.5%。说明随还原时间增加,反应更加充分,综合考虑,选择还原时间大于 30 min 较为适宜。

3. 3. 2 物相变化分析

不同还原时间下还原产物对应的 X 射线衍射图谱如图 17 所示。

由图 17 可知,还原产物中 Fe 主要以 Fe_{0.9}Si_{0.1}和 Fe₃Si 的形式存在,且随时间增加,逐步向 Fe₃Si 转变;Ti(C,N)以 TiC_{0.3}N_{0.7}的形式存在,过量 C 仍以单质形式存在。纵向对比相同物相的不同峰强,发现 C 的特征峰随还原时间的增加而增大,说明 C 含量随反应时间的增加逐渐增多。除了还原时间为 15 min 外,其余还原时间条件下对比其他物相的峰强没有发生明显的变化,说明还原产物的成分随还原时间的增加,物相组成无明显变化。综上,选择还

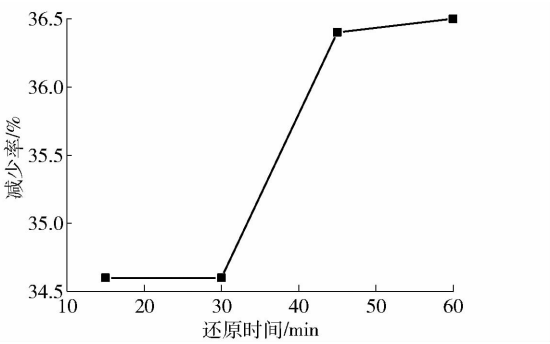


图 16 不同还原时间下质量变化趋势

Fig. 16 Mass change trend under different reduction time

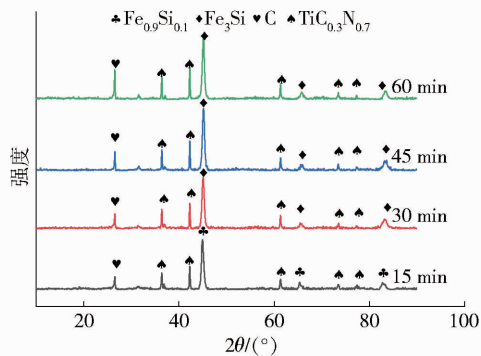


图 17 不同还原时间下对应的 x 射线衍射图谱

Fig. 17 X-ray diffraction patterns of reduction products under different reduction times

原时间大于 15 min 小于 60 min 区间较为合适。

不同还原温度下, Fe/TiC 含量变化趋势及实际 Ti(C,N) 与理论 TiC 特征峰衍射角偏移量变化趋势如图 18 所示。

由图 18 可以看出, 15 ~ 30 min 反应时间内, 还原产物中 Fe 含量减少, TiC 含量增加; 在 30 ~ 45 min 还原时间内, 变化情况恰好相反; 在 30 ~ 60 min 还原时间内, 此时 TiC 含量最高。这个现象涉及到金属氧化物(如铁的氧化物)与碳在高温下的还原反应, 以及可能伴随的碳化物(如 TiC)的生成。在还原反应的开始阶段, 主要的反应是金属氧化物(如 Fe_2O_3 、 TiO_2 等)被碳还原成金属(Fe、Ti)和二氧化碳。这个过程中, 随着还原时间的增加, 金属氧化物的含量逐渐减少, 金属的含量逐渐增加。当金属(特别是 Ti)被还原出来后, 如果系统中存在足够的碳和适宜的温度条件, 金属 Ti 可能会与碳反应生成碳化物 TiC。这个反应会消耗一部分金属 Ti, 导致 TiC 的含量随还原时间的增加而增加。还原反应和碳化反应都受到反应动力学和热力学平衡的影响。

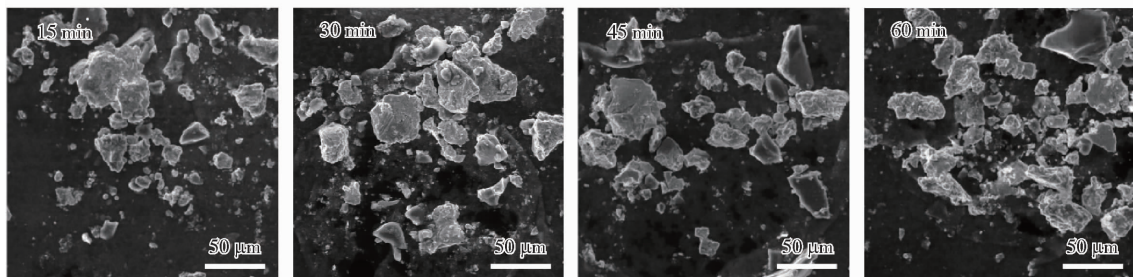
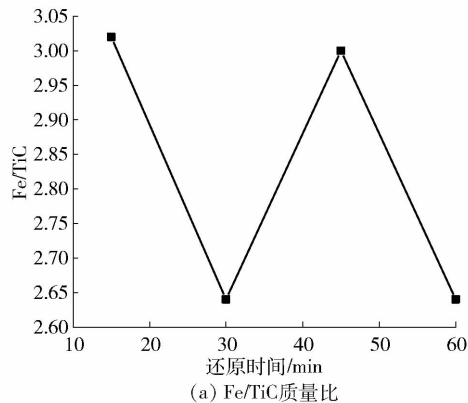
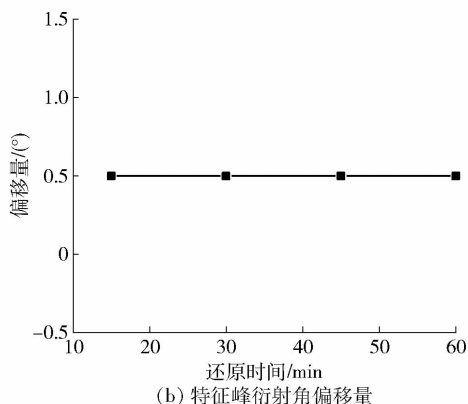


图 19 不同还原时间下还原产物局部微观形貌图(1 000 ×)

Fig. 19 Local microscopic morphology of reduction products under different reduction times (1 000 × Magnification)



(a) Fe/TiC 质量比



(b) 特征峰衍射角偏移量

图 18 不同还原时间下 Fe/TiC 及实际 Ti(C,N) 与理论 TiC 特征峰衍射角偏移量变化趋势

Fig. 18 Variation trend of diffraction angle offset of Fe/TiC and actual Ti(C,N) and theoretical TiC characteristic peaks under different reduction times: (a) Fe/TiC weight ratio (b) Diffraction angle shift of characteristic peaks

随着反应的进行, 反应物的浓度逐渐降低, 产物的浓度逐渐增加, 这会影响反应速率和平衡位置。在 30 min 到 45 min 这个时间段内, 观察到 Fe 含量增加而 TiC 含量减少的现象, 可能是由于系统中可能存

在某种中间产物或反应条件的变化(如温度波动、气体流动等),导致 TiC 的生成速率暂时降低或 TiC 的分解速率增加。随还原时间的增加,还原产物中实际 Ti(C,N)和理论 TiC 特征峰衍射角偏移量不变,说明不同碳热还原时间下对 TiC 生成量影响作用相同。综合比较,同时考虑到成本因素,还原时间选择 30 min 较为合适。

3.3.3 形貌尺寸分析

不同还原时间下,还原产物局部微观形貌如图 19 所示,还原产物平均粒径变化如图 20 所示。

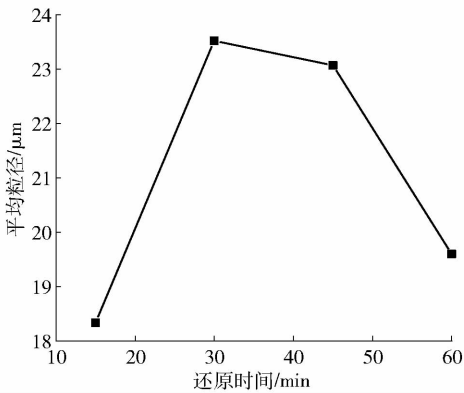


图 20 不同还原时间下还原产物平均粒径变化趋势

Fig. 20 Trend of average particle size of reduction products under different reduction times

由图 19 可知,不同还原时间下,还原产物的形貌均为不规则球块状,且各组之间无明显形貌区别。由图 20 可知,随还原时间的增加,还原产物平均粒径先增大后减小,还原温度为 30 min 时粒径最大,此时 Ti(C,N)附着在 Fe₃Si 上最多,新生成的 Ti(C,N)和 Fe₃Si 颗粒具有很高的表面能。为了降低这种高能量状态,颗粒倾向于通过相互接触和结合来减小总表面积,从而降低表面能。这种趋势促使颗粒发生团聚,导致粒径变大。

4 盐酸浸出试验前后结果对比及分析

盐酸浸出条件为温度 85 ℃、反应时间 120 min、固液比 10:1、盐酸浓度 10%,研究酸浸对最后产物物相、形貌和粒径等影响,采用盐酸而不采用硫酸进行酸浸主要考虑以下因素。

1)对于含有 Fe、Ti 等元素的混合物,盐酸能够有效溶解其中 Fe 元素(如 Fe₃Si 中的 Fe),同时对于

TiC、TiN 等碳化物和氮化物则相对不活泼,因为这些化合物中的 Ti—C 和 Ti—N 键非常强,不易被盐酸破坏。相比之下,硫酸(H₂SO₄)虽然也是强酸,但与其某些金属氧化物的反应不如盐酸迅速或有效。

2)使用硫酸进行酸浸时,可能会产生硫酸铁或者硫酸亚铁等硫酸盐作为副产物,这些硫酸盐在某些情况下可能难以从溶液中去掉,或者可能对后续的处理步骤产生不利影响,影响产物的纯度和质量。而盐酸的副产物主要是氯化物,这些氯化物通常更容易处理或去除。

3)从设备腐蚀性和安全性方面考虑,硫酸具有更强的氧化性和脱水性,可能对金属设备造成更严重的腐蚀,此外,硫酸在稀释过程中会放出大量的热,增加操作风险;而盐酸虽然也具有腐蚀性,但其腐蚀性相对较弱,且稀释过程中放热较少,因此操作起来可能更为安全。

4.1 盐酸浸出后产物物相分析

钕铁精矿粉浸出前后的 X 射线衍射图谱如图 21 所示。

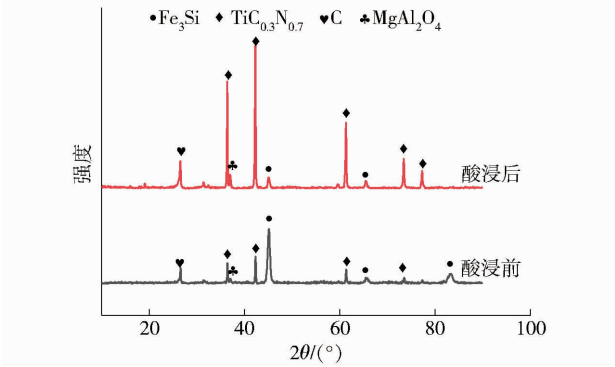


图 21 酸浸前后 X 射线衍射图谱

Fig. 21 X-ray diffraction patterns before and after acid leaching

由图 21 可看出,酸浸前后物相组成成分变化不大,但含量发生明显变化。其中,Fe₃Si 物相的峰强明显减弱,而 Ti(C,N)的峰强明显增加,C 物相的峰强增强不大。酸浸后,以 Ti(C,N)为主的 TiC、TiN 混合物的含量增加,而以 Fe 为主的 Fe₃Si 合金含量减少,其他物相如 C 等含量百分比稍许增加但不明显。在这个情况下,盐酸酸可能主要溶解了 Fe₃Si 合金中的 Fe 部分,因为 Fe 相对于 Ti、C 和 N 等元素在常见的酸中更容易溶解。因此,随着酸浸的进行,Fe₃Si 合金的含量减少,而 TiC、TiN 等含 Ti 的化合

物由于酸的不溶性或低溶解性而得以保留,甚至可能因为 Fe 的溶解而相对含量增加,进而表现出 TiC 等颗粒含量百分比上升。

4.2 盐酸浸出后产物形貌及粒径分析

酸浸前后产物的局部微观形貌如图 22 所示;根据粒径分布计算软件,酸浸前后粒径分布如图 23 所示。

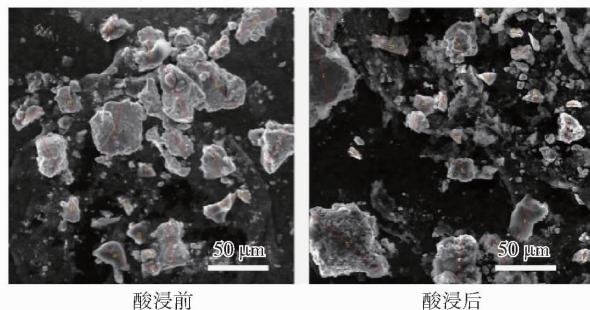


图 22 酸浸前后产物局部微观图

Fig. 22 Local microscopic image of the product before and after acid leaching (1 000 × Magnification)

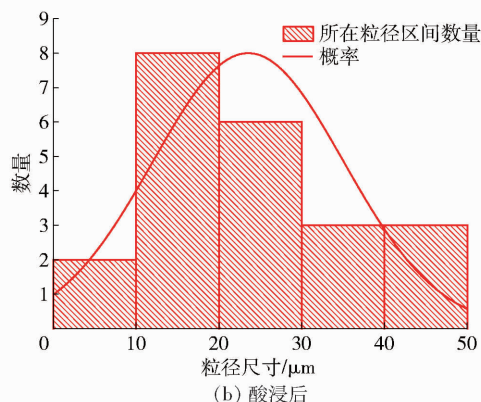
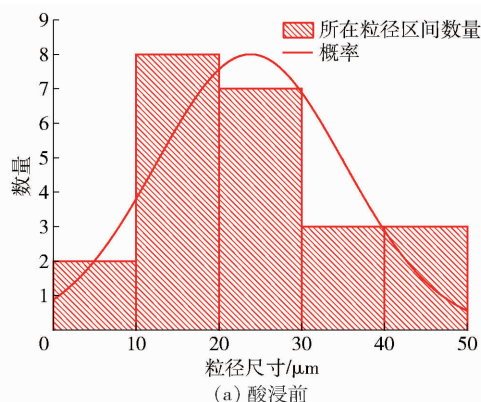


图 23 酸浸前后粒径尺寸分布

Fig. 23 Particle size distribution before and after acid leaching

从图 22 可以看出,使用盐酸浸出之后,粉末局部微观形貌变化不大,仍为不规则球块形状分布,只是酸浸后固体物相稍显暗淡并无明显区别,这可能是由于 Fe 含量减少所致。

通过粒径计算分析软件统计粒径大小,粒径方面变化不大,均在 22 μm 左右。从直观照片上观察,酸浸前可以在球团上发现铁粒,而酸浸之后,整体粉末暗淡,无明显大块铁粒出现,这是由于 Fe 被盐酸浸出,与前面分析局部微观图所得结论基本吻合。

5 结论

针对攀西地区钒钛磁铁矿特点,本文以其为原料采用碳热还原法原位合成制备铁基复合材料,考察了工艺参数对产品 TiC 铁基复合材料的影响,得到以下主要结论。

1) 碳热还原前后质量减少率变化规律研究表明,随球料比的增加,还原前后质量减少率整体降低,4:1 时最高为 37.9%,反应最为充分;随还原温度的上升,质量减少率先增后减,在 1 500 $^{\circ}\text{C}$ 时最高为 36.4%,反应最为充分;随还原时间的增加,质量减少率整体增大,在 60 min 时达到最大为 36.5%。

2) 碳热还原产物 XRD 分析表明,球料比和还原时间对产物物相组成影响不大,物相主要为 Fe_3Si 、 $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ 、过量 C 和 MgAl_2O_4 等其他杂质。随温度上升,Fe 以 $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ 形式存在逐渐变为以 Fe_3Si 形存在。其中 TiC 相对含量最大的条件为球料比 4:1、还原温度 1 550 $^{\circ}\text{C}$ 、还原时间 30 min 或 60 min。

3) 对 SEM 照片进行统计分析,随球料比的增加,还原产物粒径先增后减,10:1 时达到最大为 23.59 μm ;还原温度对粒径影响很大,在 1 550 $^{\circ}\text{C}$ 时粒径最大为 24.39 μm ;随还原时间增加还原产物粒径先增后减,在 30 min 时有最大粒径 23.52 μm 。

4) 还原产物在 10% HCl、固液比 20:1、浸出温度 85 $^{\circ}\text{C}$ 、浸出时间 120 min 的浸出条件下,Fe 峰强明显降低,TiC 峰强明显升高,Fe/TiC 相对含量由最初 2.65 减小为 0.08,TiC 含量明显增加;酸浸前后微观形貌和粒径变化数据表明,酸浸前后形貌和粒径变化不大,酸浸前粒径为 22 μm 、酸浸后为 23 μm 。

5) 该研究成功制备了以 TiC 为主要增强体、Fe 为基体的 TiC/Fe 复合材料。增强相 TiC 不纯且多以 $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ 的形式存在,通过选择合适的原料球料比和碳热还原时间以及尽可能增大碳热还原温度,

可有效避免该问题;Fe 含量过多可通过合适的酸浸条件去除部分 Fe,进而提高 TiC 相对含量。

[参考文献]

- [1] LI Zaichao, ZHANG Yuang, WANG Xuan, et al. Thermally-induced flexible composite phase change material with enhanced thermal conductivity[J]. Journal of Power Sources, 2024, 603: 234447.
- [2] 李滋阳,王思佳,邓文举. 陶瓷颗粒增强金属基复合材料研究进展[J]. 轻工科技, 2021, 37(4): 41-44.
LI Ziyang, WANG Sijia, DENG Wenju. Research progress of ceramic particle reinforced metal matrix composites [J]. Light Industry Science and Technology, 2021, 37(4): 41-44.
- [3] 庞雅丹,陈伟鹏,杨家富,等. TiC/NbC 添加量对铁基复合材料显微组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2020, 48(3): 45-49.
PANG Yadan, CHEN Weipeng, YANG Jiafu, et al. Effect of TiC/NbC content on microstructure and mechanical properties of Iron-based composite materials [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2020, 48(3): 45-49.
- [4] 田方,胡途,张利波,等. TiC 的制备方法及应用研究进展[J]. 功能材料, 2022, 53(10):10046-10053.
TIAN Fang, HU Tu, ZHANG Libo, et al. Progress in preparation and application of TiC[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(10):10046-10053.
- [5] LI Shuaidi, XU Xiaojing, LUO Yuntian, et al. Study on hot corrosion resistance of in situ generated TiC and TiC plus TiB reinforced TB8 titanium matrix composite by powder metallurgy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(2): 835-846.
- [6] WEI Siyaun, TANG Junjie, JHA Abhinav, et al. Individual and collective effects of titanium carbides and multi-walled carbon nanotubes on reinforcing the inconel 625 alloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. Materials Characterization, 2024, 207: 113555.
- [7] SYLVIE L K, MICHAEL W, NADIA H, et al. Interfaces and defects in a successfully hot-rolled steel-based composite Fe-TiB₂ [J]. Acta Materialia, 2015, 98: 297-305.
- [8] DAS K, BANDYOPADHYAY T K, DAS S. A review on the various synthesis routes of TiC reinforced ferrous based composites

- [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(18): 3881-3892.
- [9] MOREIRA A B, SOUSA R O, LACERDA P, et al. Microstructural characterization of TiC-white cast-Iron composites fabricated by In situ technique [J]. Materials, 2020, 13(1): 209.
- [10] 陈锡广. Ti(C,N)颗粒增强铁基复合材料制备工艺及性能的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
CHEN Xiguang. Study on preparation technology and properties of Ti (C, N) particle reinforced iron matrix composites [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [11] ZHONG Lisheng, YE Fangxia, XU Yunhua, et al. Microstructure and abrasive wear characteristics of in situ vanadium carbide particulate-reinforced iron matrix composites [J]. Materials and Design, 2014, 54(2): 564-569.
- [12] ZHONG Lisheng, ZHANG Xi, CHEN Shili, et al. Fe-W-C thermodynamics and in situ preparation of tungsten carbide-reinforced iron-based surface composites by solid-phase diffusion [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2016, 57: 42-49.
- [13] ZHAO Nana, XU Yunhua, WANG Jiefang, et al. Microstructure and kinetics study on tantalum carbide coating produced on gray cast iron in situ [J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 286(286): 347-353.
- [14] ZHAO Nana, XU Yunhua, ZHONG Lisheng, et al. Fabrication microstructure and abrasive wear characteristics of an in situ tantalum carbide ceramic gradient composite [J]. Ceramics International, 2015, 41(10): 12950-12957.
- [15] XIANG Siqi, REN Shaofeng, LIANG Yihan, et al. Fabrication of titanium carbide-reinforced iron matrix composites using electropulsing-assisted flash sintering [J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 768(768): 138459.
- [16] 刘明,徐利华,邸云萍,等. 攀钢尾矿原位合成 TiCN/Fe₃Si 复合材料[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 165(S2): 574-576.
LIU Ming, XU Lihua, QIU Yunping, et al. TiCN/Fe₃Si composite synthesized by in-site carbothermic reduction from tailings of panzhihua steel [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 165(S2): 574-576.

Preparation process of novel TiC iron-based composite materials

LI Hong^{1,2,4}, LIAO Xin³, WU Enhui^{1,2,4}, MA Lan^{1,2,4}

(1. College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;

2. Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Panzhihua 617000, China;

3. Emergency Rescue Service Center of Panzhihua, Panzhihua 617000, China;

4. State Key Testing Laboratory of Vanadium & Titanium, Panzhihua 617000, China)

Abstract: So advantageous are TiC-based iron matrix composites in terms of high hardness, strength, good plasticity and toughness, and simple molding that they are widely used in industries such as aerospace, mechanical

equipment, and automobiles. In the preparation process of existing TiC-based iron matrix composites, high-purity Ti powder, Fe powder, C powder, B_4C powder and other materials are mostly selected for synthesis. In this study, vanadium-titanium iron concentrate and coal powder were used as the main raw materials, and a new type of TiC-based iron matrix composite was prepared by carbothermal reduction-acid leaching process. The effects of carbothermal reduction and acid leaching process parameters on the preparation of TiC-based iron matrix composites were investigated by single factor experiments. The results illustrate that temperature exerts a remarkable influence on the phase composition of the products. With the increase in temperature, Fe gradually changes from existing in the form of $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ to Fe_3Si . Under the conditions of a ball-to-material ratio of 4:1, a reduction temperature of 1550 °C, and a reduction time of 30 minutes, the main components of the phase composition are Fe_3Si , $Ti(C,N)$, excessive C, and $MgAl_2O_4$. By employing a 10% hydrochloric acid (HCl) solution, maintaining a solid-to-liquid ratio of 20:1, setting the leaching temperature at 85 °C, and conducting the leaching process for 120 minutes, the acid-leaching operation effectively removed the extraneous impurities. As a result, the TiC/Fe composite material was successfully fabricated. The morphology and particle size showed little change before and after acid leaching. The particle size was 22 μm before acid leaching and 23 μm after acid leaching. It should be noted that the reinforcing phase TiC in the prepared TiC/Fe composite material is impure and predominantly exists in the form of $Ti(C,N)$. However, this problem can be effectively circumvented by selecting an appropriate raw-material-to-ball ratio, appropriately adjusting the carbothermal reduction time, and maximizing the carbothermal reduction temperature to the greatest extent possible.

Key words: TiC/Fe composite, vanadium-titanium iron concentrate, coal powder, in-situ synthesis, carbothermal reduction-acid leaching, TiCpurity, $Ti(C,N)$

国内首次发现“冯锐银矿”获国际批准,填补矿物学研究空白

近日,在河南发恩德蒿坪沟矿区发现的新型富银硫化物矿物——“冯锐银矿”(Fengruite,缩写 Fen),正式获得国际矿物学协会新矿物命名与分类专业委员会(International Mineralogical Association-Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification,缩写 IMA-CNMNC)的批准。这是我国矿物学研究领域的一项重要成果,标志着我国在新矿物发现方面又向前了一步。

“冯锐银矿”是由中国地质大学(北京)科研团队和希尔威金属矿业有限公司技术团队在蒿坪沟矿区开展矿物学研究时首次识别出的新矿物。经过详细地化学成分分析、晶体结构研究以及与其他已知矿物的对比,科研团队确认这是一种全新的硫化物矿物。2025年1月13日,国际矿物学协会新矿物命名与分类专业委员会正式批准了“冯锐银矿”的命名申请,英文名称为 Fengruite,缩写 Fen,编号为 IMA 2024-045。

“冯锐银矿”是以希尔威金属矿业有限公司董事长冯锐博士的名字命名。冯锐博士在国内外矿业领域有近40年丰富的勘探和运营经验,在他的带领下,希尔威已经成为了中国主要的白银和铅锌生产商之一。

(资料来源:中国有色金属报)