

碳热还原法制备碳化硼原料缓释脱水研究

陈 滨, 李 欣, 牛 群, 王兴国, 唐 健

(江苏大学 绿色材料与冶金研究院, 江苏 镇江 212013)

[摘 要] 为改善传统碳热还原法制备碳化硼因直接高温(1 800~2 000 °C)剧烈脱水导致硼酸原料挥发严重进而产品纯度低和结晶差等弊端,本文以硼酸和石油焦为原料,研究了原料存在形式(球团、粉末)、脱水温度、加热时间及升温速率对缓释脱水过程的影响,确定了适宜的缓释脱水参数,同时研究了缓释脱水过程的动力学。研究表明,较优的缓释脱水参数为:原料压制球团、脱水温度 300 °C、脱水时间 40 min、升温速率 5 °C/min。此外,通过 XRD 和化学成分分析,原料经过缓释脱水过程可提高 B₄C 纯度约 9.01%,降低游离碳含量 7.95%。由此可知,原料缓释脱水有利于维持原料配比平衡,从而提高碳热还原法的反应程度。

[关键词] 碳化硼; 碳热还原法; 缓释脱水; 动力学; 压制; 预脱水; 球团

[中图分类号] TF803; TB321 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)03-0102-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.03.015

碳化硼(B₄C)是一种重要的非金属材料,具有高硬度、低密度、高熔点、耐腐蚀、耐磨损等优良特性^[1-4],因此被广泛用作蓝宝石晶片的研磨材料、工程陶瓷材料、军工防弹材料及高级耐火材料等^[5-6]。近年来,随着 LED 电路产业、军工产业和核能产业快速发展,B₄C 需求量逐年大幅增加^[7]。

目前,工业上生产 B₄C 主要方法为碳热还原法(Carbothermal Reduction,简称 CTR 法)^[7],该法设备简单、原料廉价易得、成本较低,但存在优质品纯率低(<94%)、产率低(<40%)和粉体污染严重等问题^[8]。这是由于 CTR 法制备 B₄C 时,原料(硼酸和石油焦)简单混合后直接投入电弧炉内进行高温冶炼,硼酸(H₃BO₃)原料在高温下(1 800~2 000 °C)剧烈脱水产生大量的水蒸气,水蒸气会与

碳还原剂发生反应(C + H₂O = CO + H₂),从而导致额外碳还原剂损失,同时 H₃BO₃在高温下挥发严重,会导致硼酸原料配比不足,最终导致 B₄C 产品纯率低和结晶差^[9]。若将原料经过低温缓释脱水处理,即先将原料入炉前在马弗炉内以一定温度(<500 °C)缓慢加热,脱去原料中的水,然后入炉反应。低温缓释脱水可减小水蒸气量和 H₃BO₃挥发量,同时可改善原料之间的润湿性,增强反应动力学。目前,关于碳热还原法制备 B₄C 的原料缓释脱水的研究鲜见报道。

本文以硼酸和石油焦为原料,研究并优化了球团和粉末 2 种原料形式的缓释脱水过程,通过对比原料失重率,确定适宜的缓释脱水温度、加热时间及升温速率,同时探讨了缓释脱水过程的动力学,采用 XRD 衍射和化学分析法等对碳热还原法制备的碳化硼进行了研究,探讨了缓释脱水对 B₄C 产品纯度的影响规律。

1 试验原料及试验方法

1.1 试验原料

本试验所用硼源为硼酸(99%,上海展云化工有限公司),碳还原剂为石油焦(C_p,淄博吉曜商贸有限公司)。

采用化学分析法对硼酸和石油焦进行分析检

[收稿日期] 2022-12-08

[作者简介] 陈滨(1998—),山东泰安人,硕士,主要研究方向为微波制备超纯超细硼化物粉体。

[基金项目] 江苏省自然科学基金项目(BK20200898);江苏省教育厅项目(20KJB430022);企业合作课题高纯超细硼化钛陶瓷粉体制备的新工艺研究(20210898);企业合作课题无碳铝电解可润湿阴极用硼化钛基复相陶瓷开发与产业化技术攻关(20210786)。

[引用格式] 陈滨,李欣,牛群,等.碳热还原法制备碳化硼原料缓释脱水研究[J].中国有色冶金,2023,52(3):102-108.

测,确定原料的化学成分;采用激光粒度仪对这2种原料的粒度进行测试。分析及测试结果见表1。

表1 试验原料的纯度和粒度分析

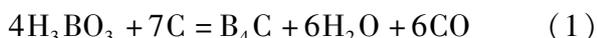
Table 1 Composition and partide size analysis of petroleum coke

试剂	纯度或 碳含量/ %	杂质含量/%					粒度/ μm
		Ca	Si	水分	挥发分	灰分	
硼酸	99.00	0.31	0.13	0.10	—	—	<90
石油焦	91.43	—	—	0.32	7.82	0.43	<70

由表1可知,石油焦中固定碳含量较高,可达91.43%,适合作为制备 B_4C 粉体的还原剂;硼酸的纯度较高,高达99.00%,杂质较少,适合用作制备 B_4C 粉体的硼源。

1.2 试验方法

1)原料缓释脱水试验。将硼酸和石油焦按反应式(1)的理论配比较料,以氧化锆球为研磨介质,球磨机内混料2h,80℃烘干12h,过200目^①筛待用。取5g原料,加入少量羟甲基纤维素黏结剂,随后装入模具,经压片机压制成药团。分别称取质量相等的药团和粉末原料放入坩埚内,使其平铺坩埚表面并称总重,将称好的原料分别放入马弗炉内并设定脱水温度(100~500℃),待温度升至指定的加热温度后开始计时,每隔10min取出称重,并记录质量变化,计算失重率并绘制失重曲线。缓释脱水试验流程如图1所示。失重率 Δm 的计算见式(2)。试验流程见图1。



$$\Delta m = (m_0 - m_1) / m_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 为试样初始质量,g; m_1 为试样加热后质量,g。

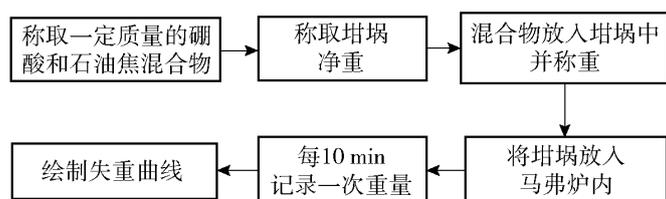


图1 硼酸和石油焦缓释脱水试验流程

Fig. 1 Flow chart of boric acid and petroleum coke sustained release dehydration experiment

2)碳热还原试验。原料混合物采用以下3种处理方法。①未处理:将硼酸和石油焦按理论配比

配料,经混料机混合后取出待用;②缓释脱水(球团):将硼酸和石油焦原料压制成药团,烘干待用;③缓释脱水(球团+预脱水):在②的基础上,将球团在马弗炉内以最优的加热温度、升温速率进行预脱水后随后将球团取出待用。将经过不同的预处理方式的原料放入高纯石墨坩埚,置于真空中频感应炉内,加热温度1600℃,保温时间30min,待试验结束后,将试验产物取出,用研钵研磨,并进行一系列的分析表征。

1.3 分析检测

采用化学分析方法分析了碳化硼产物的纯度;采用德国公司的D8ADVANCE型XRD衍射仪分析产物的物相结构。

2 结果与讨论

2.1 缓释脱水机理

H_3BO_3 在加热过程中,温度较低(100~150℃)情况下先脱水转变为偏硼酸(HBO_2),继续升温(>150℃), HBO_2 会脱水变成 B_2O_3 。 H_3BO_3 受热分解反应见式(3)~(5)^[10]。查阅文献可知 H_3BO_3 的理论结构水含量为43.4%,干燥后的 H_3BO_3 含水量应低于0.4%,在脱水过程中 H_3BO_3 会有少量挥发。



为分析 H_3BO_3 的脱水过程,对其进行热重-差热分析,TG-DTA曲线如图2所示。

由图2可知,当温度为100~150℃时, H_3BO_3 质量迅速降低,并产生反应的第一个吸热峰(约138.2℃),其质量变化为24.75%,这与 H_3BO_3 脱水变为 HBO_2 的理论失重率29.12%相近。为研究该温度区间发生的反应,将 H_3BO_3 在140℃下进行脱水15min,其脱水产物XRD结果见图3(a)。由图可知,产物的主要成分为 HBO_2 ,因此该吸热峰是 H_3BO_3 脱水变为 HBO_2 的吸热峰。当温度由150℃提高至170℃,质量进一步降低,出现第二个吸热峰(约160.1℃),这可能是 HBO_2 进一步脱水所致,其质量变化为5.76%,而这与 HBO_2 脱水变为 B_2O_3 的理论质量变化20%相差较大,可能是未完全反应的

① 200目=0.074mm。

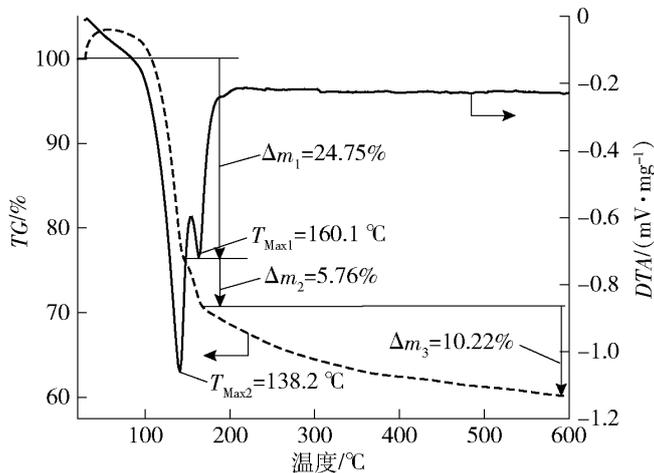
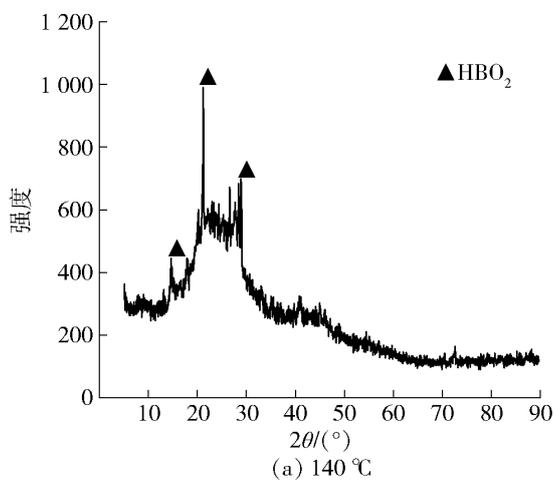


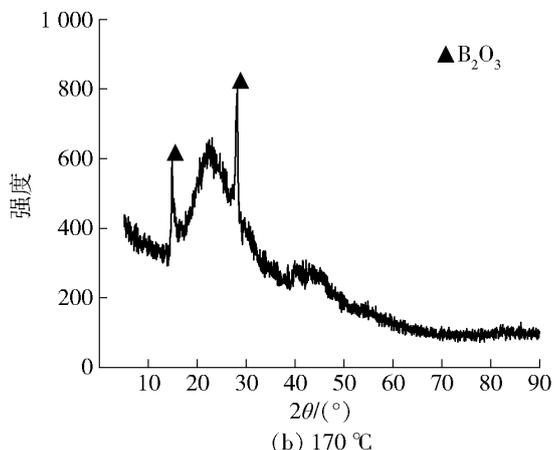
图2 硼酸的 TG-DTA 曲线

Fig. 2 TG-DTA curve of boric acid

缘故。为研究第二个吸热峰发生的反应,将 H_3BO_3 在 $170\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行脱水 15 min,其脱水产物的 XRD 见图 3(b),由图可知产物的主要成分为 B_2O_3 ,因此吸热峰是 HBO_2 脱水变成 B_2O_3 的吸热峰。在 $0 \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内, H_3BO_3 的总质量变化为 40.73%,与 H_3BO_3 的理论含水率 43.40% 相近。



(a) $140\text{ }^\circ\text{C}$



(b) $170\text{ }^\circ\text{C}$

图3 不同温度下硼酸脱水产物的 XRD 图
Fig. 3 XRD patterns of dehydration products of H_3BO_3 at different temperatures

2.2 硼酸和石油焦混合物的低温缓释脱水研究

2.2.1 TG-DTA 分析

为确定 $\text{H}_3\text{BO}_3 - \text{C}_p$ 混合物的脱水过程,对其进行 TG-DTA 分析,结果如图 4 所示。

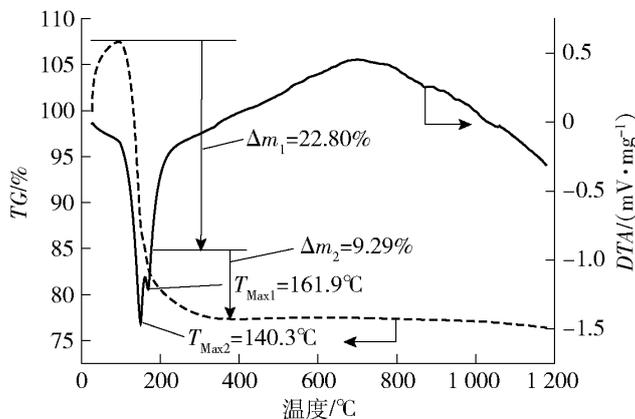


图4 硼酸-石油焦混合物的 TG-DTA 曲线

Fig. 4 TG-DTA curve of mixture of boric acid and petroleum coke

由图 4 可知,硼酸和石油焦混合物的 TG-DTA 曲线和硼酸的相类似,二者均在 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 左右有明显的吸热峰,由此可知在硼酸和石油焦混合物中重量变化的原因是反应物 H_3BO_3 脱水变成 HBO_2 然后变成 B_2O_3 的反应,与硼酸的 TG-DTA 曲线不同的是,当温度为 $500 \sim 1200\text{ }^\circ\text{C}$ 时,混合物质量略有变化,但 DSC 曲线有一个较宽的放热峰,这可能是由于 C_p 中挥发分在该温度区间挥发的缘故。

对 $\text{H}_3\text{BO}_3 - \text{C}_p$ 混合物进行 TG-DTA 分析时,称样量只有 15 mg,样品量较少,数据的代表性较差。

此外,TG-DTA 分析主要针对混合物脱水过程的微观分析,为对该混合物的脱水过程有宏观的认知,对 $\text{H}_3\text{BO}_3 - \text{C}_p$ 混合物进行缓释脱水试验,探讨原料形式、脱水温度、加热时间和升温速率对失重率的作用规律。

2.2.2 温度和时间对粉体和球团原料失重率的影响

图 5 为粉体原料和球团原料在不同温度下失重率与时间的关系曲线。

由图 5 可知,粉体原料和球团原料的失重率均随加热时间的延长而提高,且变化趋势几乎一致,粉体原料在低温 ($< 300\text{ }^\circ\text{C}$) 下脱水进行比较缓慢,达不到理论失重率 32.78%,可能是加热温度未达到 H_3BO_3 脱水的温度。当温度提高至 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,40 min 内失重率为 33.66%,失重率随时间的变化趋势不大,当温度继续升高,失重率已超过理论失重率,表

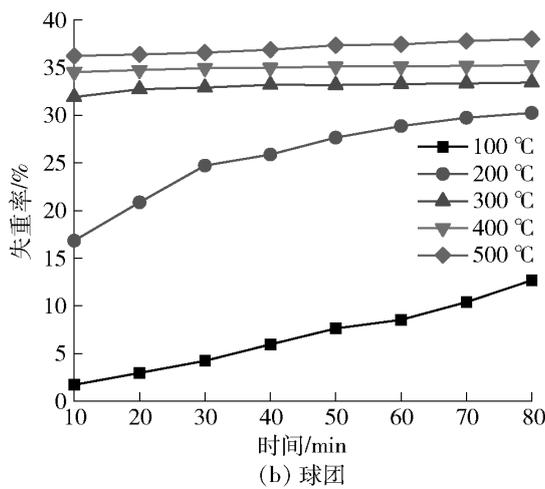
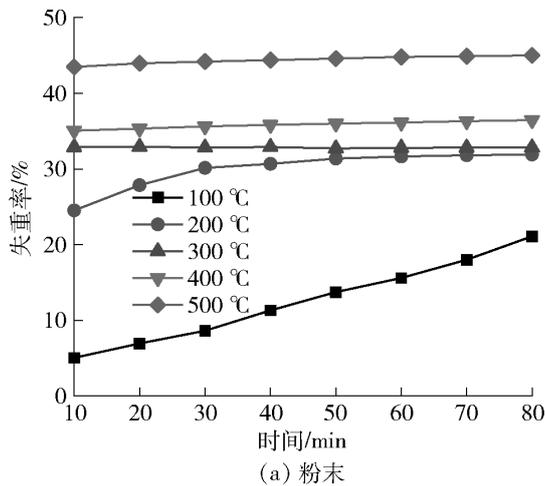


图5 不同温度下不同形态原料失重率和时间关系

Fig. 5 Relationship of weight loss ratio versus time of raw material under different temperature

明提高温度有利于提高失重率,但同时也会造成 H_3BO_3 挥发。

球团原料的脱水基本趋势与粉末原料大体一致,但在相同加热时间和温度下,球团的失重率低于粉末的失重率。当温度在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时,失重曲线比较平缓,在加热温度为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,40 min 内的失重率为 32.92%,与理论失重率 32.78% 大体一致,已达到脱水要求。当温度进一步提高,失重率变化不大,当温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时,40 min 内球团的失重率为 36.86%,而在相同条件下粉末的失重率则高达 44.38%,通过对比可知原料压制成团对减少原料的挥发损失具有一定的实际意义^[11]。

2.2.3 升温速率对粉体和球团原料失重率的影响

升温速率是除温度外影响混合物脱水速率的另一重要因素^[11]。升温速率过快,易导致原料受热不均匀。为确定适宜的升温速率,本文选取不同升温

速率(3、5 和 $7\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$) 探究升温速率对失重率的影响,结果如图 6 所示。

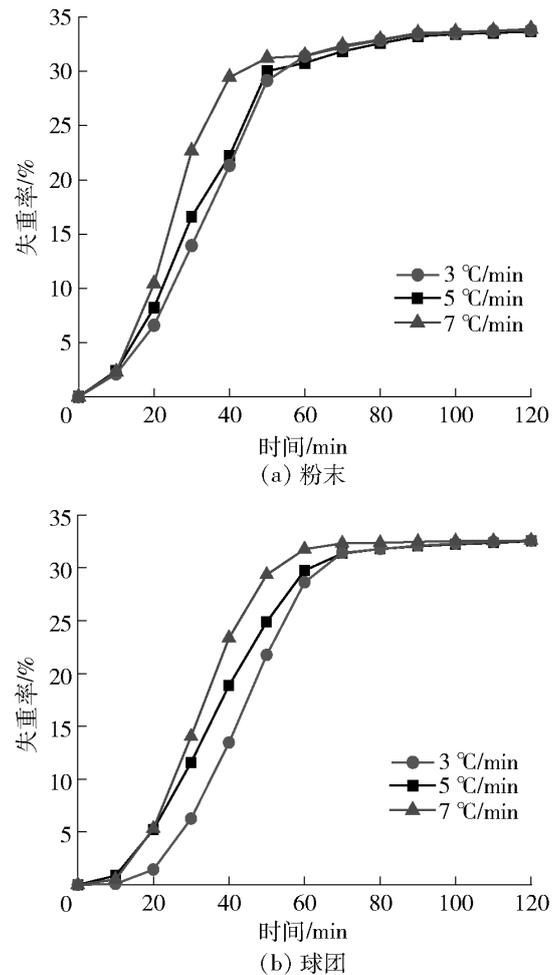


图6 不同升温速率下原料的失重率和时间关系

Fig. 6 The relationship of weight loss ratio versus time of raw material under different heating rates

随加热时间的延长,粉末原料和球团原料的失重率都增加。在设定脱水温度相同条件下,不同的升温速率导致的原料失重曲线趋势基本一致。以 $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温时,速率较慢,所需时间过长;以 $7\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温时,速率过快,原料受热不均匀,失重率波动较大。以 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温时,原料的失重率较为合适且稳定,因此适宜的升温速率为 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。此外,通过图 6(a) 和 (b) 对比可知,粉末脱水不稳定,这可能是由于 H_3BO_3 挥发所致,因此压制球团对减缓 H_3BO_3 挥发具有一定的实际意义。

通过对 H_3BO_3-C 混合物的粉末和球团 2 种形态的原料进行预脱水试验,考察了脱水温度、时间和升温速率对原料失重率的影响,通过对比分析可知,较优的脱水条件为原料压制球团、脱水温度 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 、脱水时间 40 min、升温速率 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

2.3 硼酸-石油焦混合物脱水动力学的计算

$H_3BO_3-C_p$ 脱水反应的动力学方程式见式(6)。

$$d\alpha/dt = k(1 - \alpha)^n \quad (6)$$

式中: n 为反应方程式反应级数; α 为脱水反应失重率; k 为反应速率常数; t 为反应时间。

对反应动力学方程式(3)两边取对数,得到式(7)。

$$\ln \frac{d\alpha}{dt} = \ln k + n \ln(1 - \alpha) \quad (7)$$

计算数据并作图,可以得到一条直线,直线的截距为 $\ln k$ 。计算结果见表2。

表2 不同温度下的动力学参数

Table 2 Kinetic parameters under different temperature

温度/°C	$\ln k/s^{-1}$	反应速率常数 k/s^{-1}
100	-8.610 0	1.82×10^{-4}
200	-7.689 0	4.58×10^{-4}
300	-7.074 0	8.47×10^{-4}
400	-6.778 0	1.14×10^{-3}

通过计算可知,反应速率常数 k 受温度影响,温度越高, k 越大。由此可推断出,温度越高,混合物的脱水速率越快, k 和绝对温度 T 之间关系可用阿伦尼乌斯(Arrhenius)经验方程表示^[12],见式(8)。

$$k = A \exp(-E/RT) \quad (8)$$

式中: A 为频率因子; E 为表观活化能, R 为摩尔气体常量, T 为热力学温度。

方程式两边取对数,得式(9)。

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{2.303R} \times \frac{1}{T} \quad (9)$$

将表2中 $\ln k$ 值对 $1/T$ 作图,如图7所示。

由图7可知,随着温度的升高,反应速率常数也不断增大。通过计算可以得到图中直线方程为: $\ln k = -4.27 - 1.61/T$ 。由此公式可以得到表观活化能 E 为 $30.49 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,表观活化能 E 表征了某一化学反应能够发生的难易程度^[12]。 E 越大,表明该反应阻力越大,从而阻碍反应的发生,反应越难进行;反之, E 越小,反应越容易进行。一般反应的活化能在 $45 \sim 450 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,该混合物 E 较小,即该脱水反应极易发生。

通过动力学计算验证了 $H_3BO_3-C_p$ 混合物脱水反应极易发生,验证了该混合物预脱水的可行性。

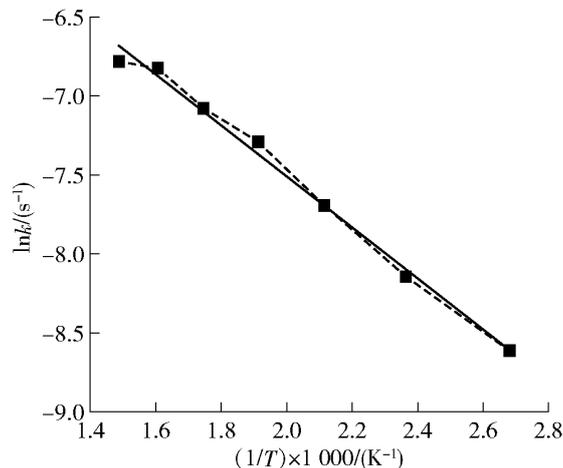


图7 硼酸与石油焦脱水反应的 Arrhenius 图

Fig. 7 Arrhenius curve of boric acid dehydration reaction

2.4 原料预处理对产物含量影响的研究

采用3种不同预处理方式的原料进行碳热还原,制得产物 B_4C 。图8为原料不同预处理方式下所制备 B_4C 的 XRD 衍射图谱。

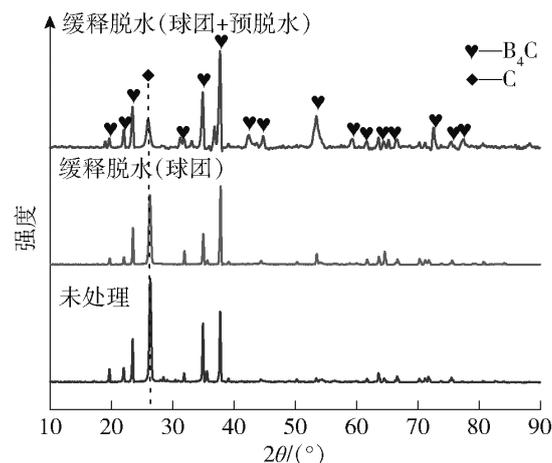


图8 产物的 XRD 结果

Fig. 8 XRD pattern products

由图可知,3种处理方式所制备的产物中均有 B_4C 和游离碳的衍射峰,无其他杂质相的衍射峰。原料未经预处理直接以粉状入炉,游离碳衍射峰较强。经过缓释脱水处理原料(球团)相比未处理原料的游离碳衍射峰弱, B_4C 的衍射峰较强。原因是球团中 C 和 H_3BO_3 紧密结合,相比于粉状原料,球团在加热脱水过程中,脱除的水分会增加液体 B_2O_3 与 C 颗粒表面的润湿性,也可以渗透到 C 颗粒的内部,为后续的碳化硼的制备创造良好的条件。缓释脱水原料(球团+脱水)的 B_4C 衍射峰更强,游离碳衍射峰更弱,因为压制球团改善了原料挥发的问题,而预脱水首先浸润了紧密接触的 C 颗粒表面,减少

了B的挥发,保证了B/C比,从而使得碳化硼结晶越来越好。因此原料缓释处理(球团+预脱水)有利于碳化硼的制备。

表3为原料不同处理方式下的化学成分分析结果。原料不作预处理直接入炉,其产物中 B_4C 的含量较低,为82.84%;原料压制球团后入炉,产物中 B_4C 相比原料未处理制备的产物有所提高,C的含量也明显降低;原料压制球团后并预脱水后再入炉,产物中碳化硼的含量高达91.85%,较其他处理方式, B_4C 的含量有明显的提升。由此可知,原料经过缓释处理(球团+预脱水)可降低C的含量,提高 B_4C 的含量。

表3 试验产物的化学成分分析

Table 3 Chemical composition analysis of experimental products

预处理方式	产物成分/%				
	B _总	C _总	B _{Free}	C _{Free}	B ₄ C
未预处理	62.63	32.56	0.97	11.38	82.84
球团	68.87	24.79	0.82	6.14	86.70
球团+预脱水	76.34	19.43	0.49	3.43	91.85

3 结论

1)通过缓释脱水试验,原料不同形态(粉体和球团)对混合物失重率影响不同;通过对比粉体原料和球团原料在不同温度下的失重情况,球团工艺可明显降低硼的挥发量,有利于维持原料配比平衡,进而加速碳热还原反应进行。

2)通过对比失重率情况,确定了缓释脱水处理的较优条件,最佳条件为:混合物压制球团、脱水温度300℃、脱水时间40min、升温速率5℃/min。

3)硼酸和碳的混合物经过缓释脱水后,通过反应动力学计算可知反应的表观活化能 E 为30.49 kJ·mol⁻¹,表明混合物缓释脱水反应极易进行。

4)原料经过缓释脱水(球团+预脱水)与未处理相比,制备的产物中碳化硼含量更高,结晶性更好。

[参考文献]

[1] Thevenot F. A review on boron carbide[J]. Key Engineer in Materials, 1991, 56: 59-88.

[2] Li X, Wang S H, Nie D. Effect and corresponding mechanism of NaCl additive on boron carbide powder synthesis via carbothermal reduction[J]. Diamond & Related Materials. 2019, 97: 107458.

[3] Alizaieh A, Taheri-Nassaj E, Ehsani N. Synthesis of boron carbide powder by a carbothermic reduction method[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(10-11): 3227-3234.

[4] Sarithadevi H V, Swapna M S, Ambadas G. Low-temperature green synthesis of boron carbide using aloe vera[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(10): 582-587.

[5] Toksoy M F, Rafaniello W, Xie K Y. Densification and characterization of rapid carbothermal synthesized boron carbide[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2017, 14: 443-453.

[6] 李欣, 都兴红, 李盼, 等. 蓝宝石精磨专用碳化硼微粉的制备及其分级研究[J]. 铁合金, 2017, 48(6): 16-21.
LI Xin, DU Xinghong, LI Pan. Preparation and classification of boron carbide powder for sapphire fine grinding [J]. Ferro-alloy, 2017, 48(6): 16-21.

[7] 于国强, 刘维良, 欧阳瑞丰, 等. 碳热还原法制备碳化硼粉末的工艺研究[J]. 中国陶瓷, 2012, 48(6): 58-60.
YU Guoqiang, LIU Weiliang, OUYANG Ruifeng. Preparation of boron carbide powder by carbothermal reduction [J]. China Ceramics, 2012, 48(6): 58-60.

[8] 王正军. 碳化硼抗弹陶瓷的制备方法及应用[J]. 中国粉体技术, 2008, 14(3): 56-59.
WANG Zhengjun. Preparation and application of boron carbide resilient ceramics [J]. China Powder Science Technology, 2008, 14(3): 56-59.

[9] 高晓梅. 球团抗压强度影响因素技术分析[J]. 现代矿业, 2016, (1): 268-270.
GAO Xiaomei. Technical analysis of influencing factors of pellet compressive strength [J]. Modern Mining, 2016, (1): 268-270.

[10] 张存. 硼酸脱水机理及应用研究[J]. 宁夏石油化工, 1999, (2): 19-20.
ZHANG Cun. Study on dehydration mechanism and application of boric acid [J]. Ningxia Petrochemical Industry, 1999, (2): 19-20.

[11] Prochazka S, Grellner W. The influence of carbon on the microstructure and mechanical properties of B₄C[J]. Journal of the Less-Common Metals, 1981, 82: 37-471.

[12] 叶开凯, 邢鹏飞, 王敬强. 利用碳化稻壳制备高纯硅过程球团制备条件的探究[J]. 铁合金, 2017, 48(11): 26-29.
YE Kaikai, XING Pengfei, WANG Jingqiang. Study on preparation conditions of high purity silicon pellet from carbonized rice husk [J]. Ferro-alloy, 2017, 48(11): 26-29.

Research on slow-release dehydration of boron carbide by carbothermal reduction

CHEN Bin, LI Xin, NIU Qun, WANG Xingguo, TANG Jian

(Institute of Green Materials and Metallurgy, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to improve the traditional carbothermal reduction preparation of boron carbide for direct high temperature (1 800 ~ 2 000 °C), severe dehydration cause boric acid raw material volatilized and low product purity and poor crystal defects. In this paper, with boric acid and petroleum coke as raw materials, the raw material forms (pellets and powder), dehydration temperature, heating time and heating rate on the slow-release effects of dehydration process were studied, the optimum parameters of slow release dehydration were determined and the kinetics of slow-release dehydration was studied. The results showed that the optimal slow release dehydration parameters were as follows: pressing into pellets of raw material, dehydration temperature of 300 °C, dehydration time of 40 min, and heating rate of 5 °C/min. In addition, XRD and chemical composition analysis showed that the purity of B_4C was increased by 9.01% and the free carbon content was reduced by 7.95% after slow release dehydration. It can be concluded that the slow release dehydration of raw materials is conducive to maintaining the balance of raw material proportion, so as to improve the reaction degree of carbothermal reduction.

Key words: boron carbide; carbothermal reduction; slow release dehydration; kinetics; pressing; pre-dehydration; pellet

中国恩菲主编的《PS 转炉炼铜技术进展》正式出版

近日,中国恩菲冶金专家颜杰撰写的《PS 转炉炼铜技术进展》一书由冶金工业出版社公开发行人出版。

《PS 转炉炼铜技术进展》系统介绍了 PS 转炉炼铜技术的“前世今生”,对我国近 30 年的 PS 转炉炼铜技术进行了系统研究。全书共分为 14 章,包括 PS 转炉炼铜技术的基本原理、物理化学、动力学、脱杂能力、装备、生产操作参数、污染防治、工厂设计等相关知识。书中列举的数据来源于企业生产实践,并融入了作者多年的专业理论研究成果及工程应用实践经验。本书是中国恩菲工程实践的总结,可供冶金行业科研院所的研究人员、设计人员、企业生产技术人员以及大专院校相关专业师生参考阅读。

目前,我国铜冶炼厂采用 PS 转炉吹炼技术矿产粗铜占比 58.4%,国外铜冶炼厂采用 PS 转炉吹炼技术矿产粗铜占比 83.2%,PS 转炉吹炼技术仍然是当今世界上普遍采用的成熟炼铜技术。近年来,PS 转炉吹炼在大型化、数控智能化、环集烟气捕集、低空污染防治等方面取得了长足发展,大大改善了厂房内的作业环境,解决了污染问题。本书通过对 PS 转炉炼铜技术进行系统研究与总结,将有力推进铜冶炼行业的改造升级和可持续发展。

(资料来源:中国恩菲)