

李博文, 刘高辉, 袁建, 等. 高温红外吸收法测定核纯级碳化硼中总碳的方法研究[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(1): 187-195. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.01.016

LI Bowen, LIU Gaohui, YUAN Jian, et al. Determination of total carbon in nuclear grade boron carbide by high temperature infrared absorption method[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(1): 187-195 (in Chinese).

高温红外吸收法测定核纯级碳化硼中总碳的方法研究

李博文, 刘高辉, 袁建, 孙进

核工业北京地质研究院, 北京 100029

摘要 建立高温红外吸收法测定核纯级碳化硼中总碳的方法, 重点探讨测试温度、样品称样量、助熔剂的选择和助熔剂覆盖方式对测量结果的影响, 确定实验的最佳条件; 并对该方法的准确度、精密度、检出限和定量限等指标进行分析。结果表明:最佳的测试温度为1 400 °C, 既保证总碳得到释放同时延长仪器使用寿命; 最佳称样量介于20~30 mg之间; 锡粒的助熔效果最好, 碳化硼中碳释放效率最高; 对助熔剂的覆盖方式进行探究, 0.4 g锡粒+碳化硼+0.6 g锡粒的覆盖方式为最佳, 碳化硼中碳得到全部释放。高温红外吸收法测定核纯级碳化硼中总碳的方法准确度高, 碳化硼标准物质的测量结果均在标准值的不确定度范围内; 该方法精密度良好, 重复测定结果的RSD均<1.5%; 方法的检出限为0.001 9%, 该方法简单、快速, 满足核纯级碳化硼中总碳测量的需求。

关键词 高温红外吸收法; 碳化硼; 核纯级; 总碳

中图分类号 O659.2 文献标志码 A 文章编号 1672-0636 (2025) 01-0187-09

Determination of total carbon in nuclear grade boron carbide by high temperature infrared absorption method

LI Bowen, LIU Gaohui, YUAN Jian, SUN Jin

Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract: This paper established a high-temperature infrared method to determine the total carbon in nuclear grade boron carbide. The optimal experimental conditions were determined by studying the testing temperature, sample weight, selection of flux, and flux coverage method. At the same time, accuracy, precision, detection limit and quantification limit of the method were determined. The results show that the optimal testing temperature is 1 400 °C, which not only ensures the release of total carbon but also extends the service life of the instrument. The optimal sample weight is 20-30 mg. Tin particles has the best melting effect, and boron carbide has the highest carbon release efficiency. The best coverage method was found to be 0.4 g tin particle + boron carbide + 0.6 g tin particle, and the carbon in boron carbide was totally released. The high-temperature infrared method for determining total carbon in nuclear grade boron carbide is good in

收稿日期: 2024-12-30 改回日期: 2025-01-17

第一作者: 李博文, 女, 1991年生, 高级工程师, 主要从事工作为岩石土壤化学分析测试。E-mail: libowen19910215@163.com

Received date: 2024-12-30 revised date: 2025-01-17

First author: LI Bowen, female, born in 1991, senior engineer, focusing on rock and soil chemical analysis. E-mail: libowen19910215@163.com

accuracy and precision, the test results of boron carbide certified reference material are all within the uncertainty range of the certified value, while the RSD is <1.5 %, and the detection limit of the method is 0.001 9 %. This method is simple and fast, it can meet the requirements for measuring total carbon in nuclear grade boron carbide.

Keywords: high temperature infrared absorption method; boron carbide; nuclear grade; total carbon

碳化硼 B_4C 是一种优良的功能材料,其硬度高,耐磨性好,密度低,熔点高,热膨胀系数低,化学性质稳定^[1]。广泛应用于航天航空,军工防弹材料,工程陶瓷材料及耐火材料领域^[2-5]。同时碳化硼在核工业领域是不可或缺的材料^[3,6],因其优良的热中子吸收特性,其原理是硼同位素 ^{10}B 吸收中子,其反应如下: $^{10}B+n \rightarrow Li+He$ 。 ^{10}B 的热中子吸收截面为 $3.837 \times 10^{-21} \text{cm}^2$ ^[7],仅次于钆、钷和镉等少数几种元素^[6],且没有二次辐射污染。核纯级

碳化硼的物理性质和化学组成需要满足具体的要求,根据美国材料与试验协会(American Society of Testing and Materials, ASTM) ASTM C750-24 标准,核纯级碳化硼根据不同的纯度与应用可以分为 3 种类型,具体参数如表 1 所示。核纯级碳化硼常被制作作为控制棒、安全棒、调节棒、事故棒和屏蔽棒等原件以控制核分离速度以及人体安全的防护^[4],故在核反应、高温气冷堆、快中子增殖堆和乏燃料处理中具有广泛的应用^[8]。

表 1 核纯级碳化硼类型参数 (ASTM C750-24)^[9]

Table 1 Chemical parameters of three nuclear grade boron carbide types

组分	类型 1	类型 2	类型 3
总硼/%	76.5~81.0	73.0~81.0	70.0~81.0
HNO ₃ 可溶性硼/%	≤0.5	≤0.6	未确定
水溶性硼/%	≤0.2	≤0.2	≤1.0
氟/ 10^{-6}	≤25	≤25	未确定
氯/ 10^{-6}	≤75	≤75	未确定
钙/%	≤0.3	≤0.3	未确定
铁/%	≤1.0	≤1.0	≤2.0
总硼+总碳/%	≥98.0	≥97.0	≥94.0

核纯级碳化硼的化学组成与含量是决定其性能和功能的关键因素,因此在碳化硼原料生产及检验,相关复合材料的质量管理过程中,对碳化硼化学成分准确定量分析十分重要^[10-11]。其中,碳含量影响碳化硼柔韧性,导热性等性能,是核纯级碳化硼分析中重要的参数指标之一^[12]。

我国行业标准 YS/T423.2—2000 规定核纯级碳化硼中碳的测定方法为气体容量法,其原理是将碳化硼粉末在通氧的高温环境下与助熔剂燃烧,碳被氧化为二氧化碳,并被氧气载入量气瓶中,以氢氧化钾吸收,吸收前后体积之差为二氧化碳的体积,根据温度,大气压力计算出碳含量^[13],但是该方法仪器搭建复杂,操作繁琐,实验耗时长^[14]。也有研究表明,高

频红外碳硫分析仪可准确测定核纯级碳化硼中碳含量,但需加入铁粉与钨粉两种助熔剂,且助熔剂的消耗量较大,共 1.9g ^[15]。高频红外碳硫分析的炉膛使用顶吹的通氧方式,样品燃烧时飞溅严重,且产生粉尘较多,容易堵塞管路^[16]。随着技术的革新以及自动化技术的发展,使用高温红外碳硫分析仪测定不同类型样品中总碳方法已普遍使用,其原理是样品在富氧的管式炉中高温灼烧,样品中的碳会转化为二氧化碳,通过红外吸收池进行定量。该方法广泛应用于土壤、岩石、矿石和金属中总碳的测定^[17-21],但鲜有报道使用该方法测定核纯级碳化硼中总碳。本文对高温红外碳硫分析仪测定核纯级碳化硼中总碳方法进行摸索与探讨,对测试温度、样品称样量、助熔剂的选择和

助熔剂覆盖方式等进行研究,确定了实验的最佳条件。并对该方法的准确度、精密度、检出限和定量限进行测试。

1 实验部分

1.1 仪器

CS580A 高温红外碳硫分析仪(德国 ELTRA 公司),超低碳硫坩埚(醴陵茶山万财坩埚有限公司),BS124S 电子天平(赛多利斯科学仪器有限公司),电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)。

1.2 试剂与标准物质

高纯碳酸钙(上海阿拉丁生化科技股份有限公司,纯度 $\geq 99.99\%$),纯铁助熔剂(德国 ELTRA 公司,0.42~0.84 mm),钨粒助熔剂(钢研纳克检测技术股份有限公司,粒度介于0.4~1.0 mm 之间),线状氧化铜(上海市化学试剂公司工厂),五氧化二钒(上海阿拉丁生化科技股份有限公司,AR),锡粒助熔剂(醴陵茶山万财坩埚有限公司,0.42~0.84 mm),锡囊(英国 OEA labs,8 mm \times 5 mm),碳化硼化学成分标准物质 GBW06604、GBW06605 和 GBW06606(国防科技工业应用一级计量站),碳化硼标准物

质 ERM-ED102(德国联邦材料研究所)

1.3 实验步骤

核纯级碳化硼样品粒径应小于 150 mm (100 目)并在 105 °C 条件下烘干 2 h,置于干燥器中保存。准确称取 0.05 g 基准碳酸钙粉末,分析 3~5 次,利用分析结果对仪器进行校正。称取 0.02~0.03 g(精确至 0.000 1 g)核纯级碳化硼样品置于经 1 000 °C 灼烧过 4 h 的超低碳硫坩埚中,加入适量助熔剂,放置于已预热好的高温红外碳硫分析仪器中进行测定。

2 结果与讨论

2.1 测试温度的选择

高温红外碳硫分析仪的炉膛温度影响碳化硼中碳的释放效率。称取适量碳化硼标准物质放置于高温红外碳硫分析仪中,对 1 200、1 250、1 300、1 350、1 400、1 450 和 1 500 °C 的炉膛温度进行测试,结果见图 1。随着炉膛温度的升高,碳化硼中碳释放效率越高,当温度为 1 400、1 450 和 1 500 °C 时,碳的释放趋于稳定,由于高温红外碳硫分析仪的最高使用温度为 1 500 °C,考虑到仪器所使用的陶瓷管长期处于高温状态下会有自身的寿命,采用 1 400 °C 的测试温度。

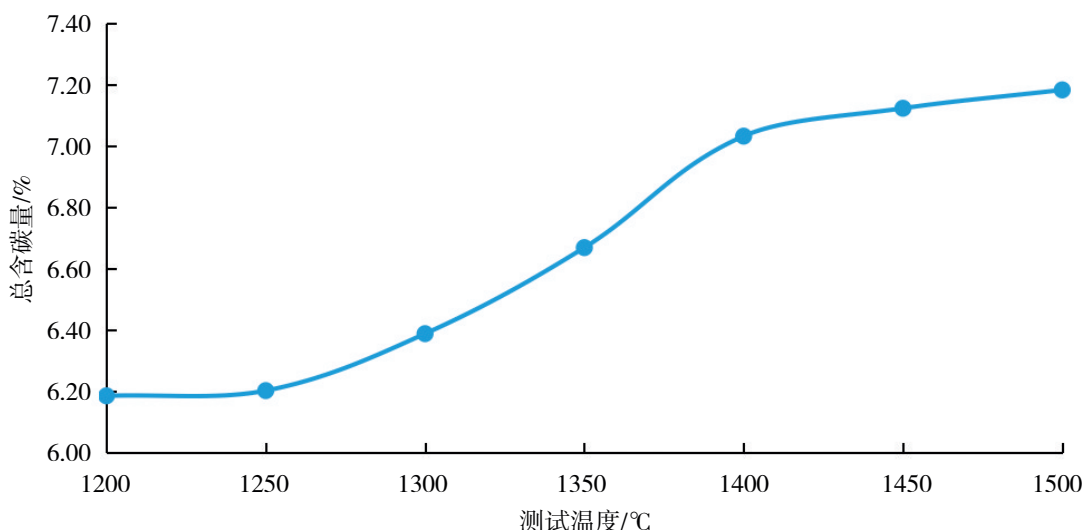


图1 不同温度下核纯级碳化硼中碳含量结果

Fig. 1 Results of carbon content in nuclear grade boron carbide at different temperatures

2.2 称样量的选择

核纯级碳化硼的称样量影响总碳测试结果的准确性,称样量过大会导致样品燃烧不完全,

熔体喷溅,碳无法完全释放,测试结果偏低;称样量过低会引入较高的称样误差,导致结果精密度不佳。选择 10、20、30、40、50、60 和 70 mg 的碳化

硼称样量连续测定 5 次,以碳的测定值与称样量的关系作图(图 2)。由图 2 可知,称样量为 10、20 和 30 mg 时碳化硼中碳的释放率较高,当称样量大于 40 mg 后,碳化硼燃烧不完全,碳的释放率明

显降低。称样量为 10 mg 的碳化硼中碳的释放虽较高,但是测量结果的相对标准偏差较大,由于使用的万分之一的天平进行称量,在称样过程中会引入较大的称量误差,故选择 20~30 mg 称样量。

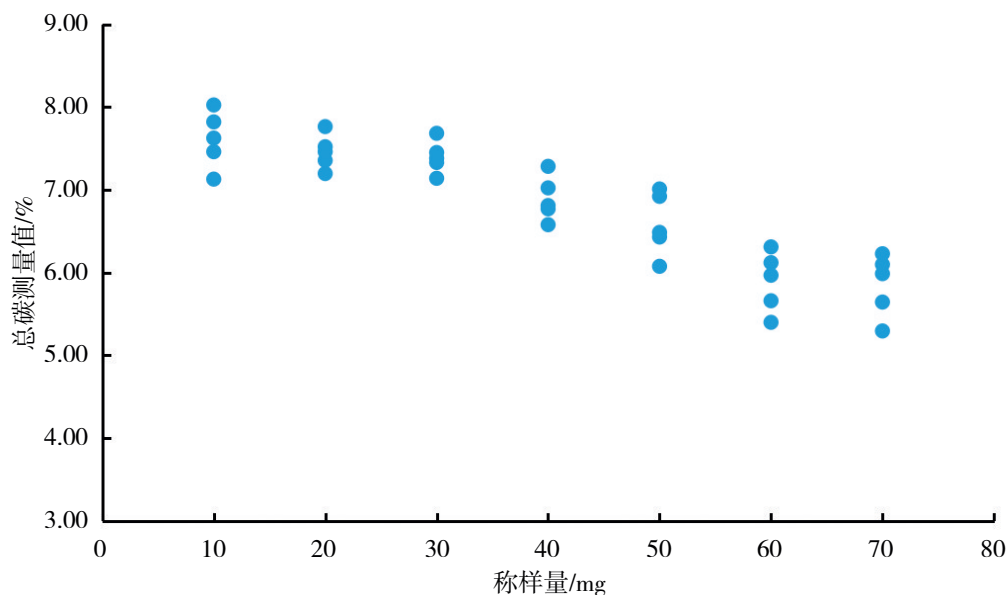


图 2 不同称样量与碳测定值关系

Fig. 2 The relationship between sample weight and carbon measured values

2.3 助熔剂的选择

核纯级碳化硼粉末在高温作用下进行分解,由于碳化硼结构稳定,其分解温度较高,为 $2450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],加热温度为 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时总碳未完全释放,加入助熔剂可以提供样品氧化热量,使碳化硼中碳得到充分稳定释放,并抑制飞溅。助熔剂的类型影响样品的熔解效果和测试精度^[14],常用的助熔剂包括铁粒、钨粒、线状氧化铜、五氧化二钒粉末以及锡粒,通过对比不同的助熔剂进行测试,选择最佳效果的助熔剂。称取 ERM-ED102 碳化硼标准物质 20~30 mg,上覆盖不同类型的助熔剂进行测试,五种助熔剂的熔出时间、释放曲线以及测试结果见表 2 和图 3。

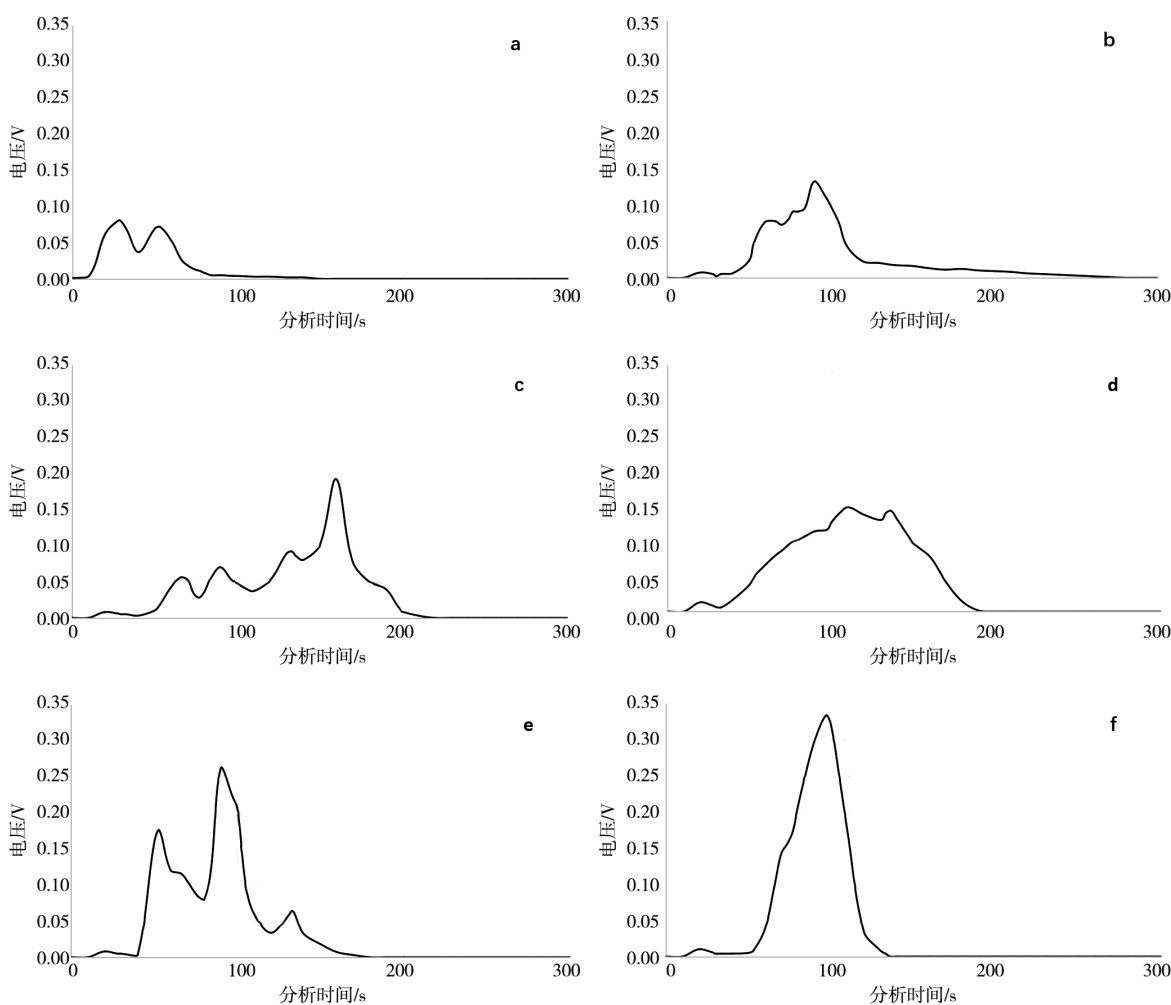
由表 2 可知,未加助熔剂的总碳测试结果为 7.23%,加入助熔剂后总碳结果有所提高,助熔剂为线状氧化铜的总碳结果为 13.53% 与碳化硼标准物质总碳标准值差异较大,效果不佳。助熔剂铁粒,钨粒和五氧化二钒粉末和锡粒的测试结果分别为 17.97%、18.94%、

17.49% 和 20.25%,接近碳化硼标准物质总碳标准值。根据图 3 碳释放曲线,助熔剂为铁粒的碳释放峰形不流畅,峰形拖尾严重,熔出时间长为 230 s,熔出效果不佳,观察其在坩埚中的熔融形貌,存在熔剂喷溅的情况,会导致测试结果偏低。助熔剂为钨粒碳释放曲线峰形为单一峰,熔出时间为 200 s,观察钨粒助熔剂的坩埚中有结块的情况,坩埚内熔渣不光洁,未能全部熔融。熔剂为五氧化二钒粉末的碳释放曲线为非单一峰,熔出时间较短为 180 s,坩埚中有熔剂喷溅的形态,且五氧化二钒有一定的毒性^[15,22],不予以使用。锡粒的释放结果最佳,总碳释放曲线峰型平滑尖锐,近似正态分布,峰形无拖尾,碳的熔出时间短,仅为 130 s,总碳测量结果最高,且结果的重复性好,熔融试样无飞溅,坩埚内熔渣表面光洁,熔体均匀。因为锡粒的熔点较低($231.89\text{ }^{\circ}\text{C}$),熔融后形成液滴,提高流动性,降低整个燃烧体系的熔点,确保样品燃烧完全,同时稳定燃烧过程^[23],故选择锡粒作为助熔剂。

表 2 不同助熔剂的测试结果

Table 2 Test results of different fluxes

序号	助熔剂	用量/g	熔出时间/s	总碳测试结果/%
1	—	—	150	7.23
2	线状氧化铜	0.6	280	13.53
3	铁粒	1.0	230	17.97
4	钨粒	1.0	200	18.94
5	五氧化二钒粉末	0.3	180	17.49
6	锡粒	1.0	130	20.25



a— B_4C ; b— B_4C +线状氧化铜; c— B_4C +铁粒; d— B_4C +钨粒; e— B_4C +五氧化二钒粉末; f— B_4C +锡粒。

a— B_4C ; b— B_4C +cupric oxide wire form; c— B_4C +iron particles; d— B_4C +tungsten particles; e— B_4C +vanadium pentoxide powder; f— B_4C +tin particles

图 3 总碳释放曲线

Fig. 3 Release curve of carbon

2.4 助熔剂的覆盖方式

由第 2.3 节可知助熔剂为锡粒的测试结果最佳,但是与碳化硼中碳的理论值相比仍有一定差异,故对锡粒的覆盖方式进行分析,找出最优的测试条件。采用锡囊包裹 B_4C 、 B_4C +锡粒、锡粒+ B_4C +锡粒的覆盖方式进行对

比分析,测试条件与结果如表 3 所示,锡囊包裹碳化硼粉末的方式与 0.4 g 锡粒+ B_4C +0.6 g 锡粒的覆盖方式最佳,碳的释放最完全。但是锡囊的价格较高,且在包裹碳化硼粉末的过程中要求操作熟练,否则封口不完全会导致测试结果偏低或精密度不佳。采用 0.4 g 锡

粒+B₄C+0.6 g 锡粒的测试结果准确度较高,精密度较好,以坩埚底部覆盖 0.4 g 锡粒,后加入样品混匀,最后在样品之上覆盖 0.6 g 锡粒的方式测试,其优势是在高温燃烧的过程中,锡

粒首先燃烧熔融,对样品起到一定的“搅拌”作用,使样品熔融更完全,且一次仅消耗 1 g 锡粒助熔剂,成本较低,故选用 0.4 g 锡粒+B₄C+0.6 g 锡粒的覆盖方式。

表 3 不同锡粒覆盖方式的结果

Table 3 Results of different coverage methods for tin particles

序号	助熔剂	总碳测定值/%				总碳平均值/%		RSD/%
1	锡囊包裹 0.02 g B ₄ C	21.24	21.76	20.68	20.21	20.76	20.93	2.82
2	0.02 g B ₄ C+0.6 g 锡粒	19.28	20.12	19.99	20.54	19.65	19.92	2.39
3	0.4 g 锡粒+0.02 g B ₄ C+0.6 g 锡粒	20.94	21.62	21.28	21.42	21.20	21.29	1.18

2.5 准确度

通过对不同的核纯级碳化硼标准物质 GBW06604、GBW06605、GBW06606 与 ERM-ED102 进行准确度分析,测试结果如表 4 所示,

标准物质的测定结果均在参考值不确定范围内,表明 0.4 g 锡粒+B₄C+0.6 g 锡粒覆盖-高温红外吸收法的准确度良好。

表 4 核纯级碳化硼标准物质测试结果

Table 4 Test results of nuclear grade boron carbide certified reference material

序号	标准物质编号	产地	总碳测试结果/%	总碳标准值及不确定度/%
1	GBW06604	中国	21.25	21.20±0.06
2	GBW06605	中国	20.35	20.41±0.06
3	GBW06606	中国	20.23	20.19±0.06
4	ERM-ED102	德国	20.99	21.01±0.28

2.6 精密度

对 3 种不同的核纯级碳化硼样品进行精密度测试,每个样品重复测定 6 次,测试结果见表

5。由表 5 可知,3 种核纯级碳化硼的相对标准偏差均 < 1.5 %,方法的精密度良好。

表 5 核纯级碳化硼总碳精密度测试结果

Table 5 Precision test results of total carbon of nuclear grade boron carbide

序号	样品名称	总碳测试结果/%	平均值/%	RSD/%
1	XEG-21	20.17	20.18	1.32
2		20.36		
3		19.92		
4		20.23		
5		19.85		
6		20.56		
7	SDQ-76	21.32	21.43	1.26
8		21.15		
9		21.76		
10		21.24		
11		21.78		
12		21.34		
13	ZZT-02	21.01	21.09	1.22
14		20.76		
15		21.23		
16		21.48		
17		20.89		
18		21.14		

2.7 检出限与定量限

根据《合格评定化学分析方法确认核验证指南:GB/T 27417—2017》^[24],对空白样品测试 11 次,计算空白样品平均值与 3 倍标准偏差之和可得高温红外吸收法测试碳化硼中总碳的

检出限,方法的定量限为 10 倍的检出限。空白样品为 1 g 锡粒,检出限的测试结果见表 6。由表 6 可见,方法的检出限为 0.001 9%,定量限为 0.019%,满足核纯级碳化硼中总碳的测试需求。

表 6 方法的检出限与定量限测试结果

Table 6 The detection limit and quantification limit test results of the method

样品	总碳/%	平均值/%	标准偏差/%	检出限/%	定量限/%
空白	0.001 1	0.000 8	0.001 1	0.000 3	0.001 9
	0.001 3	0.001 4			
	0.000 8	0.001 4			
	0.001 4	0.000 7			
	0.000 8	0.000 9			
	0.001 2				

3 结 论

1) 建立高温红外吸收法测量核纯级碳化硼中总碳的方法,从测试温度、样品用量、助熔剂的选择和覆盖方式方面进行优化,该方法测试温度选择 1 400 °C,既保证总碳得到释放同时延长仪器使用寿命;样品最佳用量介于 20~30 mg 之间,在此称样量条件下,碳化硼燃烧较为完全且测试结果精密度良好;选择锡粒作为助熔剂,碳化硼中碳释放效率最高;采用 0.4 g 锡粒+碳化硼样品+0.6 g 锡粒的覆盖模式,碳化硼中碳得到全部释放。

2) 建立的高温红外吸收法测量核纯级碳化硼中总碳的分析方法检出限为 0.001 9%,定量限为 0.019%,方法精密度均 < 1.5%;测量碳化硼标准物质 GBW06604、GBW06605、GBW06606 和 ERM-ED02 的结果均在标准值的不确定度范围内;该方法满足核纯级碳化硼中总碳测量的需求。

3) 该方法克服了传统气体容量法操作复杂、分析速度慢的缺点,操作简单,样品与助熔剂用量少,分析成本较低,可高效地进行大批量试样的分析测定,对于核纯级碳化硼成分分析,碳化硼标准物质研究以及碳化硼基复合材料中总碳的测量具有重要意义。

参考文献

- 杜文轩,王帅,孙瑶,等.碳化硼的制备及其在电池储能和核能中的应用[J].铁合金,2024,55(1):31-35.
DU Wenxuan, WANG Shuai, SUN Yao, et al. Preparation of boron carbide and its application in battery energy storage and nuclear energy [J]. Ferro-Alloys, 2024, 55(1): 31-35 (in Chinese).
- 李艳玲,李朝阳,冀克俭,等.电感耦合等离子体发射光谱法测定碳化硼标准物质中的铁、硅、铝[J].化学分析计量,2018,27(增刊1):37-39.
LI Yanling, LI Chaoyang, JI Kejian, et al. Determination of Fe, Si and Al in boron carbide reference substances by inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2018, 27(Sup.1): 37-39 (in Chinese).
- 郑伟,徐姣,张卫江.核用碳化硼制备工艺研究进展[J].现代化工,2011,31(增刊1):24-25+27.
ZHENG Wei, XU Jiao, ZHANG Weijiang, et al. Progress in preparation of boron carbides used as nuclear shielding material [J]. Modern Chemical Industry, 2011, 31(Sup.1): 24-25+27 (in Chinese).
- 白羽.碳化硼粉体中游离碳的分离研究[D].沈阳:东北大学,2021.
BAI Yu. Study on the separation of free carbon in boron

- carbide [D]. Shenyang: Northeastern University, 2021 (in Chinese).
- 5 李欣, 牛群, 陈滨, 等. 碳热还原法制备碳化硼的热力学研究[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(5): 464-470.
LI Xin, NIU Qun, CHEN Bin, et al. Research on the thermodynamics for the synthesis of boron carbide by carbothermal reduction [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2023, 22(5): 464-470 (in Chinese).
 - 6 曹磊. 碳化硼基中子吸收复合材料的制备与性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
CAO Lei. Preparation and properties of boron carbide based neutron absorption composites [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
 - 7 陈洪胜, 王文先, 聂慧慧, 等. 核屏蔽用中子吸收材料研究现状与展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(12): 4358-4364.
CHEN Hongsheng, WANG Wenxian, NIE Huihui, et al. Research progress and development of neutron-absorbing materials for nuclear shielding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(12): 4358-4364 (in Chinese).
 - 8 王日中, 胡毅, 唐可超. 核反应堆用碳化硼材料研究进展[C]//中国核学会 2011 年学术年会, 2011, 2: 87-90.
WANG Rizhong, HU Yi, TANG Kechao. The research progress of boron carbide in the nuclear reactors [C]// Progress Report on China Nuclear Science & Technology, 2011, 2: 87-90 (in Chinese).
 - 9 American Society for Testing and Materials. ASTM C750-24 standard specification for nuclear-grade boron carbide powder [S]. United States: ASTM international, 2024.
 - 10 罗威, 杨诚辉, 陈邦明, 等. 高频燃烧红外吸收法测定碳化钨粉总碳量[J]. 硬质合金, 2022, 39(6): 490-494.
LUO Wei, YANG Chenghui, CHEN Bangming, et al. Determination of total carbon content in tungsten carbide powder by high-frequency combustion-infrared absorption method [J]. Cemented Carbides, 2022, 39(6): 490-494 (in Chinese).
 - 11 李艳玲, 冀克俭, 高岩立, 等. 碳化硼成分分析标准物质的研制[J]. 化学分析计量, 2017, 26(5): 8-11.
Li Yanling, JI Kejian, GAO Yanli, et al. Preparation of reference materials of boron carbide for elements analysis [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2017, 26(5): 8-11 (in Chinese).
 - 12 王汝怡, 谈树苹, 沙顺萍, 等. 浅析碳化硼化学成分分析方法[J]. 广东化工, 2023, 50(12): 213-215.
WANG Ruyi, TAN Shuping, SHA Shunping, et al. Research on analysis methods of boron carbide chemical composition [J]. Guangdong Chemical, 2023, 50(12): 213-215 (in Chinese).
 - 13 国家有色金属工业标准计量质量研究院. 核级碳化硼粉末化学分析方法总碳量的测定: YS/T 423.2—2000 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000 (in Chinese).
National nonferrous metals industry standard metrology quality research institute. Methods for chemical analysis of nuclear-grade boron carbide powder—Determination of total carbon content: YS/T 423.2—2000 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2000 (in Chinese).
 - 14 陈倩倩, 张毅, 张健豪, 等. 高频感应燃烧红外吸收光谱法测定碳化硼增强铝基复合材料中碳[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(11): 1576-1580.
CHEN Qianqian, ZHANG Yi, ZHANG Jianhao, et al. Determination of carbon in boron carbide reinforced aluminum matrix composites by high-frequency induction combustion infrared absorption spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(11): 1576-1580 (in Chinese).
 - 15 郭飞飞, 杨植岗, 王兴华, 等. 高频燃烧红外吸收法测定碳化硼中总碳[J]. 冶金分析, 2012, 32(7): 38-40.
GUO Feifei, YANG Zhigang, WANG Xuehua, et al. Determination of total carbon in boron carbide by high frequency combustion-infrared absorption method [J]. Metallurgical Analysis, 2012, 32(7): 38-40 (in Chinese).
 - 16 魏红兵, 王虹, 李异. 管式电阻炉加热红外吸收法测定红土镍矿中硫[J]. 冶金分析, 2008, 28(11): 65-67.
WEI Hongbing, WANG Hong, LI Yi. Determination of sulfur in laterite-nickel ore by infrared absorption method with tube resistance furnace heating [J]. Metallurgical Analysis, 2008, 28(11): 65-67 (in Chinese).
 - 17 张明杰, 戴雪峰, 陆丁荣, 等. 高频燃烧-红外碳硫仪用于农用地土壤质量调查样品中碳硫的快速测定[J]. 岩矿测试, 2010, 29(2): 139-142.
ZHANG Mingjie, DAI Xuefeng, LU Dingrong, et al.

- Rapid determination of carbon and sulfur in farm land soil samples by high frequency-infrared carbon-sulfur analyzer [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(2):139-142(in Chinese).
- 18 郑立春,张庸,闫秀芬,等.高频燃烧-红外吸收法测定镍基自熔合金中碳[J].*冶金分析*,2013,33(11):67-70.
ZHENG Lichun,ZHANG Yong,YAN Xiufen, et al. Determination of carbon in nickel-matrix self-fluxing alloy by high frequency-infrared absorption method [J]. *Metallurgical Analysis*, 2013, 33(11):67-70(in Chinese).
- 19 李博文,刘高辉,袁健,等.气量法与差减法测定岩石中碳酸盐含量的对比研究[J].*世界核地质科学*,2024,41(1):82-87.
LI Bowen,LIU Gaohui,YUAN Jian, et al. Comparative study on the determination of carbonate content in rocks between gasometric method and subtraction method [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(1):82-87(in Chinese).
- 20 刘军,耿海燕.管式炉红外吸收光谱法测定铬铁矿中碳[J].*中国无机分析化学*,2023,13(11):1204-1208.
LIU Jun,GENG Haiyan. Determination of carbon in chromite by tube furnace infrared absorption method [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(11):1204-1208(in Chinese).
- 21 李英秋,纪新华,吴梅,等.管式炉加热-红外吸收法测定铀金属中碳[J].*冶金分析*,2015,35(1):59-62.
LI Yingqiu,JI Xinhua,WU Mei, et al. Determination of carbon in uranium metals by tubular furnace heating-infrared absorption method [J]. *Metallurgical Analysis*, 2015, 35(1):59-62(in Chinese).
- 22 刘凤君.管式炉燃烧-红外吸收光谱法快速测定含钒液体中硫量[J].*理化检验(化学分册)*,2013,49(11):1339-1340+1348.
LIU Fengjun. Rapid determination of sulfur in liquid sample containing vanadium by combustion with resistance-type tubular furnace-IR absorption spectrometry [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Chemical Analysis)*, 2013, 49(11):1339-1340+1348(in Chinese).
- 23 李玄辉,汤宇磊,陈占生.高频燃烧-红外吸收法测定地质样品中的碳硫[J].*黄金*,2015,36(12):84-86.
LI Xuanhui, TANG Yulei, CHEN Zhansheng. Determination of carbon and sulfur in geological samples by high frequency combustion-infrared absorption method [J]. *Gold*, 2015, 36(12):84-86(in Chinese).
- 24 全国认证认可标准化委员会实验室认可分技术委员会.合格评定化学分析方法确认核验证指南:GB/T 27417—2017 [S].北京:中国标准出版社,2017.
National Certification and Accreditation Standardization Committee Laboratory Accreditation Technical Committee. Conformity assessment-Guidance on validation and verification of chemical analytical methods: GB/T 27417—2017 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2017(in Chinese).