

高频燃烧红外吸收法测定镍基焊带 625 碳和硫含量的影响因素

张碧莹, 刘满雨, 霍树斌, 于庭祥, 诸葛福乾, 马健朝, 毕志强

(哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

摘 要: 针对高频燃烧红外吸收法测定镍基焊带 625 碳和硫含量时存在试样熔解不完全及低硫含量准确度差的问题, 通过改变样品称样量、助熔剂种类及助熔剂用量, 对变量进行正交试验设计, 研究了不同因素对镍基焊带 625 碳和硫含量测定结果的影响。试验结果表明: 称样量在 0.5 g、助熔剂选择钨锡助熔剂、助熔剂用量为 1.2 g 的条件下, 碳含量测定结果为最佳; 称样量在 0.5 g、助熔剂选择钨助熔剂、助熔剂用量为 1.2 g 的条件下, 硫含量测定结果为最佳。将上述两种分析实验参数分别应用于镍基 H625 焊带的碳、硫含量检验, 该方法的相对标准偏差 (*RSD*) 小于 5% ($n=6$), 加标回收率为 90%~105%。本方法中碳和硫的检测下限分别为 0.00054%、0.00012%, 碳和硫的检测下限分别为 0.0018%、0.0004%, 满足镍基焊带 625 中碳硫的分析要求。

关键词: 高频燃烧红外吸收法; 碳; 硫; 镍基焊带 625; 助熔剂

中图分类号: O643.12

文献标志码: A

文章编号: 1001-9677(2025)22-0091-05

DOI: 10.20220/j.cnki.1001-9677.2025.22.027

Factors Affecting Determination of Carbon and Sulfur Content in Nickel-based Welding Tape 625 by High Frequency Combustion Infrared Absorption Method

ZHANG Biying, LIU Manyu, HUO Shubin, YU Tingxiang, ZHUGE Fuqian, MA Jianzhao, BI Zhiqiang
(Harbin Well Welding Co., Ltd., Heilongjiang Harbin 150060, China)

Abstract: In order to solve the problems of incomplete dissolution and poor accuracy of low sulfur content in the determination of carbon and sulfur content in nickel-based welding tape 625 by high frequency combustion infrared absorption method, the influence of different factors on the determination results of carbon and sulfur content of nickel-based welding material were studied by orthogonal test design of variables by changing the sample weight, flux type and flux dosage. The results showed that the best carbon content was determined when the sample weight was 0.5 g, the flux was selected as tungsten-tin flux and the flux dosage was 1.2 g. When the sample weight was 0.5 g, the flux was tungsten flux and the flux dosage was 1.2 g, the sulfur content was the best. The above two analytical parameters were applied to the carbon and sulfur content test of the nickel-based H625 welding strip, respectively. The relative standard deviation (*RSD*) of the method was less than 5% ($n=6$), and the recovery rate was from 90% to 105%. The detection limits of carbon and sulfur in this method were 0.00054% and 0.00012%, respectively, and the lower limits of carbon and sulfur were 0.0018% and 0.0004%, respectively, which met the requirements of carbon and sulfur analysis in nickel-based welding materials.

Key words: high frequency combustion infrared absorption method; carbon; sulfur; nickel-based welding tape 625; flux

镍基焊带 625 因其具有良好的高温强度、组织稳定性、抗氧化耐腐蚀性能和较低的裂纹倾向, 被广泛应用于航空航天、核电设施及压力容器等领域^[1-3]。保障镍基合金焊材服役性能的关键因素是焊接接头成分的稳定性。典型的镍基焊带 625 含 58.0% 的 Ni、21.0% 的 Cr、8.0% 的 Mo、5.0% 的 Fe 和少量的 Nb。其中 C、S 元素的含量对焊接接头的裂纹敏感性和耐腐蚀性存在极大影响^[4-5]。目前高频红外燃烧法是各实验室常用的 C、S 含量测试手段, 其具有分析速度快、精度高等特点^[6-8]。但镍基焊带 625 熔解不完全和 S 含量较低等情况给镍基焊带

625C、S 准确测定带来了较大难度^[9]。

为了准确测量镍基合金焊材的 C、S 含量, 张庸等^[11]通过研究助熔剂的种类, 精确测得镍基高温合金中低碳含量, 添加 0.4 g 铁助熔剂与 1.2 g 钨锡助熔剂于试样底部时, 可以使样品充分燃烧。杨晓倩等^[12]着重考察了助熔剂的种类及其用量、称样量对镍基耐蚀合金中碳和硫测定的影响, 试验结果表明分别以 0.30 g 纯铜-0.30 g 纯铁和 0.40 g 纯铁-1.50 g 纯钨为助熔剂, 称取 (0.3000±0.0005) g 试样进行试验, 熔融后试样不会外溢且测得结果的相对标准偏差最小。Liu 等^[13]提出了一种测

作者简介: 张碧莹(1996-), 女, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为焊接材料气体检验。

通讯作者: 刘满雨(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为焊接材料检验。

定高镍耐腐蚀合金管材中碳硫的方法，通过加入 0.6 g 钨锡助溶剂，样品称样量选择 0.5 g，提高了碳硫分析的准确度。以上研究反映出称样量、助熔剂的种类、用量以及加入顺序等是影响镍基合金焊材 C、S 测定的主要因素。

基于以上研究现状，对助熔剂种类、助熔剂用量、样品称样量 3 个影响镍基焊带 625C、S 测定的变量设计正交试验，使用极差法分析各因素对镍基焊带 625 碳硫检测准确度的影响，探讨了不同因素对镍基焊带 625 碳硫检测准确度的影响机制，最终确定了高频红外燃烧法测定镍基焊带 625 种碳硫的最佳试验。

1 实验

1.1 主要仪器与试剂

CS744 型高频红外碳硫分析仪，美国 LECO 公司；BSA124S 型电子天平（精度为 0.000 1 g），德国赛多利斯科学仪器有限公司；高纯氮气、高纯氧气：纯度（体积分数）≥99.999%；超低碳硫钨助熔剂（ $\omega(\text{C})\leq 0.0006\%$ ， $\omega(\text{S})\leq 0.0003\%$ ），钢研纳克检测技术股份有限公司；纯铁助熔剂（ $\omega(\text{C})\leq 0.0005\%$ ， $\omega(\text{S})\leq 0.0005\%$ ），钢研纳克检测技术股份有限公司；钨锡助熔剂： $\omega(\text{C})\leq 0.0005\%$ ， $\omega(\text{S})\leq 0.0005\%$ ，美国 LECO；其余配套设备包括：坩埚、无水高氯酸镁、碱石棉、铂硅胶，美国 LECO 公司。

1.2 仪器工作条件

仪器设置参数为：氧气压力 0.35 MPa，氧气流量

表 2 用于正交试验的标准样品 IARM 68F 各成分认定值

Table 2 Standard sample IARM 68F component identification values for orthogonal tests

名称	编号	研制单位	认定值/%						
			C	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb
镍合金	IARM 68F	英国 LGC	0.101	0.000 5	59.6	21.9	1.35	1.50	0.084

1.4 实验步骤

1.4.1 陶瓷坩埚的处理

陶瓷坩埚使用前于 1 100 ℃灼烧 2~4 h，随炉冷却至室温后取出保存于干燥器中备用。

1.4.2 仪器测量前的准备

碳硫分析仪开启后预热至少 2 h。在测量试样前，先运行仪器的检漏程序，确保仪器不漏气。坩埚中加入少许钨助熔剂，运行仪器，使仪器气路畅通。对于测定超低硫的试样，通常在测量前预先测定几个硫含量较高的样品，使气路和试剂对二氧化硫的吸附达到饱和。

1.4.3 样品分析

将预先煅烧过的专用坩埚置于电子天平上，称取助熔剂约 0.9 g 并设定相应的工作参数，测定几个空白样品，待仪器空白稳定后进行样品检测，称取 0.5 g 分析样品，碳含量测定时加入钨锡助熔剂 1.2 g，硫含量测定时加入钨助熔剂 1.2 g，升炉燃烧检测。测量样品前，要注意保证样品的整洁，除去样品表面的油污、纸屑、氧化皮等，取样时要注意代表性和均匀性。

2 结果与讨论

2.1 正交试验设计

助熔剂种类、助熔剂用量及称样量是影响准确度分析的重要因素，由于单因素实验的实验量较大，通过设计正交变量试验，有效降低试验量，同时清晰反映出各因素对最终结果的影

响程度。通过标准 GB/T 21931.1-2008《镍、镍铁和镍合金碳含量的测定高频燃烧红外吸收法》以及 GB/T 21931.2-2008《镍、镍铁和镍合金硫含量的测定高频燃烧红外吸收法》中规定对助熔剂种类、助熔剂用量及称样量进行正交试验。正交实验表中试样称样量的 3 水平分别为 0.300 0 g、0.500 0 g、0.700 0 g（ A_1 、 A_2 、 A_3 ）；助熔剂种类的 3 水平分别为铁、钨锡助溶剂、钨助熔剂（ B_1 、 B_2 、 B_3 ）；助熔剂用量的 3 水平分别为 0.80 g、1.20 g、1.60 g（ C_1 、 C_2 、 C_3 ），选取 $L_9(3^3)$ 正交实验表进行实验。

1.3 标准样品与校准曲线

红外吸收法属于相对分析方法，需要采用标准样品校准仪器以实现量值溯源。因市面上很少有基本完全匹配的市售标准样品，通常选用钢铁标准样品校准仪器。本文使用表 1 中美国 LECO 公司生产的标样进行碳硫的多点校准。

表 1 标准样品的研制单位与碳和硫的认定值

Table 1 The research institute and the certified value of carbon and sulfur in CRMs

名称	编号	研制单位	认定值	
			C/%	S/%
钢铁	503~508	美国 LECO	0.018 3	0.002 4
钢铁	502~991	美国 LECO	0.072 0	0.003 1
钢铁	502~990	美国 LECO	0.172 0	0.024 4

在研究各因素对镍基焊带 625 碳和硫含量测定结果的影响时发现，直接采用镍基焊带 625 作为样本时由于镍基焊带 625 成分的不均匀，常造成得到的实验结果在重复试验时效果不佳，得到的工艺参数对于镍基焊带 625 检测不具有很好的普适性，还需重新调整参数，增加了试验量。针对以上情况，提出了一种采用与镍基焊带 625 主合金体系十分相同的标准样品 IARM 68F 来研究工艺参数对碳硫测量结果影响的方法，后续采用镍基焊带对试验结果进行验证，标准样品成分如表 2 所示。

响程度。通过标准 GB/T 21931.1-2008《镍、镍铁和镍合金碳含量的测定高频燃烧红外吸收法》以及 GB/T 21931.2-2008《镍、镍铁和镍合金硫含量的测定高频燃烧红外吸收法》中规定对助熔剂种类、助熔剂用量及称样量进行正交试验。正交实验表中试样称样量的 3 水平分别为 0.300 0 g、0.500 0 g、0.700 0 g（ A_1 、 A_2 、 A_3 ）；助熔剂种类的 3 水平分别为铁、钨锡助溶剂、钨助熔剂（ B_1 、 B_2 、 B_3 ）；助熔剂用量的 3 水平分别为 0.80 g、1.20 g、1.60 g（ C_1 、 C_2 、 C_3 ），选取 $L_9(3^3)$ 正交实验表进行实验。

2.2 实验结果

正交实验结果如表 3，表 4 所示。

由表 3 中碳的正交实验结果可知，以 R 值从大到小可知，3 种变量对实验结果的影响从大到小依次为试样称样量、助熔剂用量、助熔剂种类，以 K 值最接近镍基标准样品标准值的原则，称样量在 0.5 g、助熔剂选择钨锡助熔剂、助熔剂用量为 1.2 g 的条件下，镍基标准样品碳含量测定结果为最佳。

由表 4 中硫的正交实验结果可知，以 R 值从大到小可知，3 种变量对硫实验结果的影响从大到小依次为助熔剂种类、试样称样量、助熔剂用量，以 K 值最接近镍基标准样品的原则，称样量在 0.5 g、助熔剂选择钨助熔剂、助熔剂用量为 1.2 g 的条件下，镍基标准样品硫含量测定结果为最佳。

2.3 称样量的影响

称样量的多少主要基于样品是否充分燃烧、转化以及红外池的灵敏度。称样量低于 0.500 0 g 时，其精度也会降低，样品

表3 碳含量测定的正交实验结果
Table 3 Orthogonal experiment results of carbon content determination

试验序号	(A)称样量/g	(B)助熔剂种类	(C)助熔剂用量/g	平均值/%
1	A ₁ (0.300 0)	B ₁ (铁助熔剂)	C ₁ (0.80g)	0.107
2	A ₁ (0.300 0)	B ₂ (钨锡助熔剂)	C ₂ (1.20g)	0.102
3	A ₁ (0.300 0)	B ₃ (钨助熔剂)	C ₃ (1.60g)	0.102
4	A ₂ (0.500 0)	B ₁ (铁助熔剂)	C ₂ (1.20g)	0.102
5	A ₂ (0.500 0)	B ₂ (钨锡助熔剂)	C ₃ (1.60g)	0.100
6	A ₂ (0.500 0)	B ₃ (钨助熔剂)	C ₁ (0.80g)	0.099
7	A ₃ (0.700 0)	B ₁ (铁助熔剂)	C ₃ (1.60g)	0.096
8	A ₃ (0.700 0)	B ₂ (钨锡助熔剂)	C ₁ (0.80g)	0.100
9	A ₃ (0.700 0)	B ₃ (钨助熔剂)	C ₂ (1.20g)	0.100
K ₁	0.104	0.102	0.102	—
K ₂	0.100	0.101	0.101	—
K ₃	0.099	0.100	0.099	—
R	0.005	0.002	0.003	—

表4 硫含量测定的正交实验结果
Table 4 Orthogonal experiment results of carbon content determination

试验序号	(A)称样量/g	(B)助熔剂种类	(C)助熔剂用量/g	平均值/%
1	A ₁ (0.300 0)	B ₁ (铁助熔剂)	C ₁ (0.80)	0.001 50
2	A ₁ (0.300 0)	B ₂ (钨锡助熔剂)	C ₂ (1.20)	0.000 61
3	A ₁ (0.300 0)	B ₃ (钨助熔剂)	C ₃ (1.60)	0.000 60
4	A ₂ (0.500 0)	B ₁ (铁助熔剂)	C ₂ (1.20)	0.000 70
5	A ₂ (0.500 0)	B ₂ (钨锡助熔剂)	C ₃ (1.60)	0.000 21
6	A ₂ (0.500 0)	B ₃ (钨助熔剂)	C ₁ (0.80)	0.000 34
7	A ₃ (0.700 0)	B ₁ (铁助熔剂)	C ₃ (1.60)	0.000 54
8	A ₃ (0.700 0)	B ₂ (钨锡助熔剂)	C ₁ (0.80)	0.000 39
9	A ₃ (0.700 0)	B ₃ (钨助熔剂)	C ₂ (1.20)	0.000 31
K ₁	0.000 90	0.000 91	0.000 74	
K ₂	0.000 42	0.000 40	0.000 54	
K ₃	0.000 41	0.000 42	0.000 45	
R	0.000 49	0.000 51	0.000 29	

的不均匀和低称样量会导致实验误差的产生，而随着样品称样量的增加，样品不能充分燃烧，流动性变差，同时，喷溅现象也会随之发生，燃烧炉受污染程度也会加大，影响测定结果的准确性。表3、表4中数据表明，称样量为0.500 0 g，效果最好。

2.4 助熔剂种类的影响

铁的熔点为1 540 ℃，是高电磁感应物质，作为助熔剂铁的存在会产生涡流效应，增加样品的导磁性，燃烧氧化过程中释放出较大的能量，能提高炉温，使试样完全燃烧。而镍属于铁族元素，熔点为1 500 ℃，具有与铁相似的物化性质，同时铁助熔剂会增加空白的影响，由表3、表4可知，当助熔剂为铁(B₁)时，相应的正交实验结果偏高，因此铁助熔剂并不是影响镍基合金焊材碳硫分析准确性的关键因素。钨的熔点极高，为3 380 ℃，且密度较大，可防止飞溅，钨在600 ℃时与氧反应生成WO₃，氧化过程中释放出大量的热，可提高熔融物的热

熔，WO₃的生成有利于CO₂和SO₂的释放^[13]。另外WO₃的挥发逸出增加了碳、硫的扩散速度，使其充分氧化，挥发的WO₃在700~800 ℃又转化为固相，覆盖在管道中尚存的Fe₂O₃上，防止了管道对硫的吸附，从而保证了碳硫分析结果的可靠性。另外钨空白值低，可用于低碳、低硫的测定。锡的熔点为231 ℃，兼有发热作用和稳燃作用，并且能改善样品的流动性，加入锡主要是为了助熔。如表3所示，测定碳的过程中，选择钨锡助熔剂(B₂)会使碳的测定结果更加准确^[14]。测定硫时，硫与氧结合生成SO₂，属酸性氧化物，气体SO₂在酸性介质中容易逸出，在碱性介质中容易吸附，在燃烧系统中，由于大量氧的存在，锡与氧结合生成SnO₂属碱性氧化物，吸附作用使SO₂难以完全释放，硫的测定结果就会偏低^[15-16]。如表4所示，当选择钨锡助熔剂(B₂)时，硫的测定结果偏低，因此在助熔剂的选择上，纯钨助熔剂(B₃)会使硫的测定结果更加准确。

2.5 助熔剂用量的影响

助熔剂加入量过大会产生大量粉尘堵塞仪器金属过滤网使气流不畅，影响碳和硫的回收率，同时增加空白值的影响。而加入得过少则会影响试样的熔融效果。如表3、表4所示，助熔剂加入量在1.2 g时，碳硫含量最接近理论值。因此选择加入1.2 g的助熔剂会使碳硫的测定值更加准确。

2.6 检出限及检测下限

表5 检出限和检测下限实验数据及结果
Table 5 Experimental data and results of detection limit and detection limit

元素	测定值	标准偏差 RSD/%	检出限DL ω/%	检测下限 LOD ω/%
C	-0.001 10	0.000 180	0.000 54	0.001 8
	-0.001 80			
	-0.000 58			
	-0.000 96			
	-0.001 10			
	-0.001 30			
	-0.001 20			
	-0.000 98			
	-0.001 00			
	-0.000 94			
	0.000 93			
	0.000 88			
	0.000 77			
	0.000 86			
S	0.000 84	0.000 041	0.000 12	0.000 4
	0.000 86			
	0.000 84			
	0.000 83			
	0.000 86			
	0.000 88			

样品质量为0.500 0 g时，按实验方法测定1.2 g钨助熔剂和1.2 g钨锡助熔剂的空白值，并按空白值标准偏差的3倍和10倍分别计算方法的检出限和检测下限。由表5可知，本方法中检出限为0.00054% (C)、0.00012% (S)，检测下限为0.001 8% (C)、0.0004% (S)。

2.7 精密度

采用实验方法对3个不同批号的镍基H625焊带进行重复性试验，结果见表6。由表6可知，重复性试验的极差均满足GB/T 21931.1-2008及GB/T 21931.2-2008标准中关于允许差的控制要求，其相对标准偏差 $\leq 5\%$ ，精密度良好。

表6 待测样品镍基625焊带碳、硫精密度测试结果

Table 6 Precision test results of carbon and sulfur in the nickel-based 625 welded belt of the sample to be tested					
样品	元素	测定值	平均值	极差	相对标准偏差 RSD/%
H6251#	C	0.012	0.012	0.002	4.76
		0.011			
		0.012			
		0.012			
		0.011			
	S	0.0018	0.0017	0.0002	4.39
		0.0017			
		0.0018			
		0.0016			
		0.0017			
H625 2#	C	0.014	0.014	0.001	2.95
		0.014			
		0.014			
		0.013			
		0.014			
	S	0.0019	0.0018	0.0002	3.51
		0.0018			
		0.0018			
		0.0018			
		0.0017			
H625 3#	C	0.012	0.012	0.001	3.36
		0.012			
		0.013			
		0.012			
		0.012			
	S	0.0019	0.0019	0.0001	2.77
		0.0018			
		0.0019			
		0.0018			
		0.0019			

2.8 正确度

将精密度实验的3组样品委托至北京钢研纳克检测技术股份有限公司国家钢铁材料测试中心/国家钢铁产品质量检验检测中心进行碳硫对比分析，结果见表7。由表7可以看出，用文中

实验参数进行实验的检测值与委托值的差值满足GB/T 21931.1-2008及GB/T 21931.2-2008标准中再现性限R的要求，进一步证明了该实验方法的准确性。

表7 待测样品镍基625焊带碳、硫正确度分析结果

Table 7 Accuracy analysis results of carbon and sulfur in the nickel-based 625 welded belt of the sample to be tested					
样品	元素	测定值 $\omega/\%$	委托值 $\omega/\%$	差值 $\omega/\%$	再现性限 $\omega/\%$
H625 1#	C	0.0110	0.0110	0.0000	0.0041
	S	0.0017	0.0015	0.0002	0.0019
H625 2#	C	0.0140	0.0130	0.0010	0.0041
	S	0.0018	0.0017	0.0001	0.0019
H625 3#	C	0.0120	0.0100	0.0020	0.0041
	S	0.0019	0.0020	0.0001	0.0019

2.9 回收率

称取表6中的3个样品，并加入含量相近的IARM 68F镍基合金标样进行加标回收实验，实验结果见表8、表9所示。由表8、表9数据可知，该方法参数下所测得的回收率在90%~105%之间，能够定量回收，该方法测定的准确度满足检验要求。

表8 镍基合金焊材样品的碳回收率试验结果

Table 8 Carbon recovery test results of base welding material samples							
样品	样品量/g	测定值 $\omega/\%$	本底量/ μg	加标量/ μg	加入标准质量/g	测定总量/ μg	回收率/%
H625 1#	0.4201	0.011	0.046	0.077	0.0764	0.12	104
	0.4780	0.011	0.053	0.055	0.0545	0.11	96
H625 2#	0.4518	0.014	0.063	0.060	0.0599	0.13	92
	0.4647	0.014	0.065	0.056	0.0556	0.12	93
H625 3#	0.4466	0.012	0.054	0.068	0.0676	0.12	99
	0.4692	0.012	0.056	0.057	0.0561	0.13	95

表9 镍基合金焊材样品的硫回收率试验结果

Table 9 Sulfur recovery test results of base welding material samples							
样品	样品量/g	测定值 $\omega/\%$	本底量/ μg	加标量/ μg	加入标准质量/g	测定总量/ μg	回收率/%
H625 1#	0.1318	0.0017	0.0023	0.0020	0.3960	0.042	100
	0.1126	0.0017	0.0019	0.0020	0.3849	0.040	90
H625 2#	0.1114	0.0018	0.0020	0.0020	0.4085	0.042	91
	0.1126	0.0018	0.0020	0.0020	0.3953	0.041	95
H625 3#	0.1233	0.0019	0.0023	0.0021	0.4101	0.043	105
	0.0992	0.0019	0.0019	0.0020	0.3959	0.040	95

3 结 论

本文通过采用正交实验方法，探讨了准确测定镍基625焊带中碳、硫元素的定量分析方法。结果表明称样量在0.5 g、助熔剂选择钨锡助熔剂、助熔剂用量为1.2 g的条件下，碳含量

测定结果为最佳; 称样量在 0.5 g、助熔剂选择钨助熔剂、助熔剂用量为 1.2 g 的条件下, 硫含量测定结果为最佳, 从而确定了镍基焊材 625 中碳硫测定的最佳条件, 复现性高, 有效地提高了碳硫分析结果的方法准确度和精密度, 该方法的检出下限及检测下限完全能满足镍基焊材 625 种碳硫的分析要求。

参考文献

- [1] Karimihaghighi R, Naghizadeh M. Effect of alloying elements on aqueous corrosion of nickel-based alloys at high temperatures: A review [J]. *Materials and Corrosion*, 2023, 74(8): 1246–1255.
- [2] Sanchez S, Smith P, Xu Z, et al. Powder Bed Fusion of nickel-based superalloys: A review [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 165: 103729.
- [3] Zhang J, Wang L, Xie G, et al. Recent progress in research and development of nickel-based single crystal superalloys [J]. *Acta Metall Sin*, 2023, 59(9): 1109–1124.
- [4] Dong C, Liu Z, Wang X, et al. Formation behavior of long needle-like M23C6 carbides in a nickel-based alloy without γ' phase during long time aging [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 821: 153259.
- [5] Patra P, Dey S, Gayathri N, et al. Influence of alloying elements on stacking fault energy in Ni and Ni-based alloy: A first-principles study [J]. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2024, 1240: 114815.
- [6] 张庸, 李瑶, 郑立春, 等. 高频燃烧红外吸收法测定金属材料中碳和硫的研究进展 [J]. *冶金分析*, 2022, 42(6): 18–29.
- [7] Wei J. Two-time Calibration at Both Ends for Sulfur Measurement by Using High Frequency Induction Infrared Absorption Method// proceedings of the 9th Annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering (MSEE 2021) [C]. UK: IOP Publishing, 2022.
- [8] Chen K, Kong X, Xie X, et al. Sulfur-doped carbon-wrapped heterogeneous $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_7\text{S}_8/\text{C}$ nanoplates as stable anode for lithium-ion batteries [J]. *Batteries & Supercaps*, 2020, 3(4): 344–353.
- [9] Chen H, Dong W D, Xia F J, et al. Hollow nitrogen-doped carbon/sulfur@ MnO_2 nanocomposite with structural and chemical dual-encapsulation for lithium-sulfur battery [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 381: 122746.
- [10] Honma H, Yanashima H, Yoshida M, et al. Determination of carbon, hydrogen, and nitrogen in sublimable or volatile samples by using a sealing method with indium foil [J]. *Bunseki kagaku*, 1984, 33(11): 113–117.
- [11] 张庸, 杨丽, 詹秀嫣, 等. 高频燃烧红外吸收法测定镍基高温合金中碳的助熔剂影响探讨 [J]. *冶金分析*, 2016, 36(1): 52–56.
- [12] 杨晓倩, 谭胜楠, 戚振南, 等. 高频燃烧红外吸收法测定镍基耐蚀合金中碳和硫 [J]. *冶金分析*, 2020, 40(2): 46–52.
- [13] Liu Y, Shao X, Qu L. Study on analytical method for carbon and sulfur in high nickel corrosion resistant alloy tubing [M]. // ICPTT 2011: Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines, 2011: 1099–1103.
- [14] 王勇, 刘林, 施宗友, 等. 高频燃烧红外吸收法则 SCR 脱硝催化剂中的硫含量 [J]. *材料导报*, 2018, 32(S1): 156–159.
- [15] Yamada T, Chishiro M, Tshji K. Assistant combustion agent for the use in a high-frequency combustion furnace [P]. US: 4994398A, 1991–02–19.
- [16] Rohn W C, Schmitt H J. are segments as accelerator for induction furnace combustion of ferrous metal [P]. US: 3464795A, 1969–09–02.

(上接第 50 页)

参考文献

- [1] Isseman I, Green S. Activation of a member of the steroid hormone receptor superfamily by peroxisome proliferators [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 645–50.
- [2] Bougarne N, Weyers B, Desmet S J, et al. Molecular actions of PPAR α in lipid metabolism and inflammation [J]. *Endocrine Reviews*, 2018, 39(5): 760–802.
- [3] Montaigne D, Butruille L, Staels B. PPAR control of metabolism and cardiovascular functions [J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2021, 18(12): 809–823.
- [4] Ngala R A, Stocker C J, Roy A G, et al. A new, highly selective murine peroxisome proliferator-activated receptor δ agonist increases responsiveness to thermogenic stimuli and glucose uptake in skeletal muscle in obese mice [J]. *Diabetes Obes. Metab.*, 2011, 13(5): 455–464.
- [5] Yu B C, Chang C K, Ou H Y, et al. Decrease of peroxisome proliferator-activated receptor delta expression in cardiomyopathy of streptozotocin-induced diabetic rats [J]. *Cardiovasc. Res.*, 2008, 80(1): 78–87.
- [6] Grygiel-Górniak B. Peroxisome proliferator-activated receptors and their ligands: Nutritional and clinical implications—a review [J]. *Nutr. J.*, 2014, 13: 17.
- [7] Inzucchi S E, Bergenstal R M, Buse J B, et al. Management of hyperglycaemia in type 2 diabetes, 2015: A patient-centred approach. Update to a position statement of the American Diabetes Association and the European Association for the study of diabetes [J]. *Diabetologia*, 2015, 58(3): 429–442.
- [8] Tan C K, Zhuang Y, Wahli W. Synthetic and natural Peroxisome Proliferator-Activated Receptor (PPAR) agonists as candidates for the therapy of the metabolic syndrome [J]. *Expert Opin. Ther. Targets*, 2017, 21(3): 333–348.
- [9] Blair H A. Pemafibrate: First global approval [J]. *Drugs*, 2017, 77: 1805–1810.
- [10] Yamazaki Y, Araki T, Koura M, et al. Enantioselective synthesis of the PPAR α agonist ((R))–K-13675 via (S)–2-hydroxybutyrolactone [J]. *Synthesis*, 2008, 7: 1017–1022.
- [11] Inman M, Visconti A, Yan C, et al. Antitumour indolequinones: synthesis and activity against human pancreatic cancer cells [J]. *Organic & Biomolecular Chemistry*, 2014, 12(27): 4848–4861.