

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2021.01.011

火花放电原子发射光谱法测定 镍基合金中 12 种元素

冯秀梅^{1,2} 陈连芳^{1,2} 陈君^{1,2} 常守勤^{1,2} 甘美露^{1,2}

(1. 江阴市产品质量监督检验所, 江苏 江阴 214434;

2. 国家船舶材料质量监督检验中心(江苏), 江苏 江阴 214434)

摘 要 化学元素的含量及其变化影响镍基合金材料的各项性能。因此准确检测镍基合金化学成分并对其进行严格控制,对提高和保证镍基合金材料性能具有重要意义。通过对仪器分析条件进行优化,采用控制样品法,建立了用火花放电原子发射光谱法测定镍基合金中 Al、C、Cr、Co、Cu、Fe、Nb、P、Si、S、W、Mo 等 12 种元素含量的方法。采用优化的吹氩时间 6 s、预燃时间 6 s、积分时间 8 s 等实验条件测定了 3 种常规镍基合金样品,测定值与现行国家标准分析方法结果一致。

关键词 镍基合金;火花放电原子发射光谱法;元素

中图分类号:O657.31;TH744.11

文献标志码:A

文章编号:2095-1035(2021)01-0054-06

Determination of 12 Elements in Nickel-based Alloys by Spark Discharge Atomic Emission Spectrometry

FENG Xiumei^{1,2}, CHEN Lianfang^{1,2}, CHEN Jun^{1,2},

CHANG Shouqin^{1,2}, GAN Meilu^{1,2}

(1. Jiangyin Product Quality Supervision and Testing Institute, Jiangyin, Jiangsu 214434, China;

2. National Ship Materials Quality Supervision and Testing Center(Jiangsu), Jiangyin, Jiangsu 214434, China)

Abstract The contents of chemical elements and their changes affect the properties of nickel-based alloy materials. Therefore, the accurate detection and strict control of the chemical composition of nickel-based alloys are of great significance to improve and guarantee the properties of nickel-based alloys. By optimizing the parameters of the instrument and using sample control method, a method for determining the contents of Al, C, Cr, Co, Cu, Fe, Nb, P, Si, S, W and Mo elements in nickel base alloy by spark discharge atomic emission spectrometry was established. The optimized test conditions are as follows: argon-blowing time 6 s, pre-combustion time 6 s, the integral time 8 s. Three kinds of conventional nickel base alloy samples were analyzed by this method. The measured values are consistent with the results of the current national standard analytical methods.

Keywords nickel-base alloy; spark discharge atomic emission spectrometry; element

收稿日期:2020-04-01 修回日期:2020-05-09

作者简介:冯秀梅,女,高级工程师,主要从事实验室理化检测研究。E-mail:fengxiumei@jqt-cn.com

本文引用格式:冯秀梅,陈连芳,陈君,等.火花放电原子发射光谱法测定镍基合金中 12 种元素[J].中国无机分析化学,2021,11(1):54-59.

FENG Xiumei, CHEN Lianfang, CHEN Jun, et al. Determination of 12 Elements in Nickel-based Alloys by Spark Discharge Atomic Emission Spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(1): 54-59.

前言

镍基合金由于其具有强度高、抗氧化、耐腐蚀、良好的塑性和韧性以及冶金稳定性和可加工性等优异性能,使得其在航空、航天、石油化工、核反应堆和能源转换等领域中被广泛使用^[1-4]。化学元素的含量直接影响材料的各项性能,如增加铝元素的含量可提高合金的强度;增加钼元素含量可提高合金的蠕变性能,有利于合金抗热腐蚀;而碳、硫元素含量高低则对合金的持久性能和疲劳性能具有显著影响,因此准确测定镍基合金中各化学元素的含量,对镍基合金的研发、生产及应用是非常重要的^[5-6]。目前镍基合金中各元素测定的国家标准大都采用湿法分析,方法涵盖分光光度法、原子吸收光谱法、EDTA 滴定法、电解重量法等经典技术手段。然而,由于镍基合金本身具有优异的耐腐蚀性能,从而使样品溶解困难,另外溶解样品时需使用大量的化学试剂,操作繁琐,检测周期长。虽然 GB/T 8647.10 为发射光谱分析方法,但此方法使用的是实验室较少使用的电弧型发射光谱仪,难以普及;且试样需要用硝酸溶解、蒸发、灼烧、研磨成粉后测定,制样复杂,需要使用化学试剂,且只适合于合金元素含量较低的样品的检测。文献检索发现,镍基合金中元素的分析方法呈现多样性^[7-12],但用火花放电原子发射光谱分析方法测定镍基合金中多种化学元素的分析方法还鲜有报道^[4]。

本工作利用火花放电原子发射光谱技术,以 NS1403、NS3102 和 NS3404 镍基合金为研究对象,通过参数优化,采用控样法测定镍基合金中铝、碳、铬、钴、铜、铁、铌、磷、硅、硫、钨、钼等 12 种元素含量,建立火花放电原子发射光谱法对镍基合金中多种元素含量的快速检测方法。

1 实验部分

1.1 主要仪器设备

火花放电原子发射光谱仪(Thermo ARL4460,美国 ThermoFisher);磨样机(上海立润),红外碳硫仪(CS744,美国力可公司)、电感耦合等离子体原子发射光谱仪(PE optima 8000 型,美国 PerkinElmer 仪器有限公司)、可见分光光度计(722S 型,上海精密科学仪器有限公司)。

1.2 仪器工作条件

钨电极:直径 6 mm,顶角 90°。分析间隙:3 mm,氩气纯度:99.999%,压力:0.2 MPa。

1.3 实验方法

标准样品和待测样品均在磨样机上用 60 号砂纸打磨,研磨后试样的表面应平整、纹路清晰且方向一致。处理后的试样表面应能完全盖住激发孔,且与激发台接触良好,不会漏气。将制备好的试样按优化的仪器分析条件进行测定。

2 结果与讨论

2.1 仪器工作条件的选择

实验用镍基合金标准样品 BS187D,以铬、钼和铜元素为代表元素,对火花放电原子发射光谱分析条件进行优化。

2.1.1 吹氩时间

光谱分析时,吹氩的主要目的是赶走火花室内的空气,从而减小激发试样时空气对紫外光区谱线的吸收,否则将对分析结果造成很大的影响,且不利于激发稳定。另外,样品中的合金元素在高温情况下可能会与空气中成分发生化学反应生成分子化合物,从而对所需测定的原子光谱造成干扰。固定预积分时间为 5 s,积分时间为 5 s,改变吹氩时间分别为 2、4、6、8 和 10 s。在不同吹氩时间下,将镍基合金标准样品 BS187D 激发 11 点,测量样品中铬、钼和铜元素的相对激发强度,分别计算测定结果的平均值、标准偏差和相对标准偏差。吹氩时间对各元素测定结果的影响见表 1。

由表 1 可知,吹氩时间对结果的稳定性具有一定的影响。当吹氩时间达到 6 s 时,样品中铬、钼和铜元素的平均值基本稳定;当吹氩时间为 8 s 时,铬、钼和铜元素相对发射强度的相对标准偏差均变大;而当吹氩时间为 10 s 时,钼和铜元素发射强度的相对标准偏差变大。为了保证试样分析强度的稳定性以及减少总的分析时间,实验选择吹氩时间为 6 s。

2.1.2 预积分时间

光谱分析中,预积分的作用是产生低压高能量的火花来处理样品表面,从而使样品熔化和均质化。为保证分析结果的稳定,一般要求预燃强度达到稳定状态后才开始积分。实验考察了预积分时间对测定结果的影响。首先固定吹氩时间为 6 s,积分时间为 5 s,改变预积分时间为 2、4、6、8 和 10 s。在不同预积分时间下,将镍基合金标准样品 BS187D 激发 11 点,测量样品中铬、钼和铜元素的相对激发强度的平均值、标准偏差和相对标准偏差,预积分时间对各元素测定结果的影响见表 2。

表 1 吹氩时间对测定结果的影响

Table 1 Effect of argon flush time on determination result

吹氩时间 <i>t</i> /s	Cr 的相对发射强度			Mo 的相对发射强度			Cu 的相对发射强度		
	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%
2	9.971	0.097	0.97	13.613	0.142	1.04	1.409	0.018	1.28
4	10.045	0.032	0.32	13.625	0.08	0.59	1.418	0.005	0.35
6	10.046	0.026	0.29	13.659	0.047	0.34	1.419	0.005	0.35
8	10.033	0.045	0.45	13.658	0.078	0.57	1.415	0.006	0.42
10	10.020	0.041	0.41	13.643	0.126	0.92	1.411	0.010	0.71

表 2 预积分时间对测定结果的影响

Table 2 Effect of pre-integration time on determination result

预积分时间 <i>t</i> /s	Cr 的发射强度			Mo 的发射强度			Cu 的发射强度		
	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%
2	10.023	0.037	0.37	13.631	0.117	0.86	1.411	0.010	0.71
4	10.059	0.028	0.28	13.647	0.107	0.78	1.407	0.008	0.57
6	10.067	0.022	0.22	13.675	0.070	0.51	1.412	0.004	0.28
8	10.038	0.040	0.40	13.618	0.071	0.52	1.412	0.006	0.46
10	10.301	0.031	0.31	13.610	0.078	0.57	1.411	0.006	0.43

由表 2 可以看出,当预积分时间为 6 s 时,测量样品中铬、钼和铜元素激发强度相对标准偏差最低,且三元素激发强度的平均值相对较高。因此,实验选择预积分时间为 6 s。

2.1.3 积分时间

火花放电原子发射光谱分析时,延长积分时间可增强火花源对样品的预熔能力,从而使不同样品的原子化效率趋于一致,对提高实验结果的

准确度具有重要的影响。实验对积分时间进行了考察,固定吹氩时间为 6 s,预积分时间为 6 s,改变积分时间分别为 2、3、4、5、6、7、8、9 和 10 s。在不同积分时间下,将镍基合金标准样品 BS187D 激发 11 点,测量样品中铬、钼和铜元素的相对激发强度,分别计算样品中铬、钼和铜元素相对激发强度的平均值、标准偏差和相对标准偏差,分析结果见表 3。

表 3 积分时间对测定结果的影响

Table 3 Effect of integration time on determination result

积分时间 <i>t</i> /s	Cr 的相对发射强度			Mo 的相对发射强度			Cu 的相对发射强度		
	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%	平均值	标准偏差	相对标准偏差/%
2	10.037	0.025	0.25	13.667	0.122	0.89	1.418	0.007	0.49
3	10.037	0.035	0.35	13.622	0.122	0.90	1.413	0.008	0.57
4	10.019	0.023	0.23	13.627	0.165	1.21	1.411	0.010	0.71
5	10.067	0.022	0.22	13.675	0.070	0.51	1.412	0.004	0.28
6	10.025	0.023	0.23	13.642	0.085	0.62	1.412	0.007	0.50
7	10.044	0.025	0.25	13.667	0.061	0.45	1.413	0.005	0.35
8	10.053	0.002	0.02	13.630	0.074	0.54	1.418	0.005	0.36
9	10.062	0.028	0.28	13.615	0.129	0.95	1.415	0.009	0.64
10	10.052	0.029	0.29	13.622	0.172	1.27	1.412	0.010	0.71

由表 3 可知,积分时间为 2~4 s 时,测量样品中铬、钼和铜元素发射强度的波动逐渐降低,当积分时间为 5~8 s 时,三元素发射强度平均值的稳定性较好。为提高分析结果的准确性,实验选择积分时间为 8 s。

通过对实验条件的探讨,最终选择的最佳分析条件见表 4。

表 4 分析条件

Table 4 Analysis conditions

项目	内容
吹氩时间/s	6
预燃时间/s	6
积分时间/s	8
放电形式	预燃期高能放电,积分期低能放电

2.2 干扰实验

用火花放电原子发射光谱分析镍基合金时,金属试样被整体激发,谱线复杂,由于共存元素的存在引起分析元素强度的变化,从而影响分析结果的准确度。根据仪器厂家推荐的干扰元素范围,确定可能的干扰元素见表 5。

表 5 内标线和可能的干扰元素
Table 5 Internal standard lines and possible interfering elements

元素	波长/nm	可能干扰的元素
Ni	243.79(内标线)	
C	193.09	Mo Co Cr Cu Fe Nb V Al
Si	212.41	Mo Cu Fe Cr Co Mn
P	178.29	Mo Si
S	180.73	Cr Mo Mn
Cr	267.72 298.92	Mo Co Ti Fe Mn Si Nb
Cu	200.03	Fe Nb Al Si
Mo	281.61 290.91	Cr Fe
Co	258.03	Cr Fe W Nb Mo
Al	394.40	Cr Cu Ti Nb Co Mo Fe Si
Fe	273.07 371.99	Al Mo Ti Cr W Co Mn
Nb	319.50	Mo Fe Si
W	220.45	Cr Fe Si Al

2.3 校准

通常火花发射光谱仪器出厂时,仪器厂商根据用户的要求已绘制校准曲线,用户采用这些校准曲线进行分析。原始校准曲线法是先使用校准曲线法

绘制校准曲线(可以是仪器出厂时自带的校准曲线),当光谱仪器因温度、湿度、震动等因素导致谱线产生位移,或因发光强度变化导致校准曲线发生漂移,通过标准化样品对校准曲线的漂移进行整体标准化修正,使修正后元素强度恢复到最初建立校准曲线时强度的方法。

由于分析样品与绘制校准曲线的标准样品存在冶炼工艺过程和组织结构的差异,会使校准曲线发生变化。为避免这种差异造成的影响,通常使用与分析样品的冶金工艺过程和组织结构相近的控制样品,用于控制分析样品的分析结果。在有原始校准曲线的基础上,在同样的工作条件下,将控制样品与分析样品同时分析,利用控制样品的分析结果与其标准值之间的偏差对分析样品的分析结果进行修正。

按照 GB/T 14203—2016《火花放电原子发射光谱分析法通则》,采用原始校准法和控制样品法相结合对样品进行分析。在优化的实验条件下,对实验研究对象 NS1403、NS3102 和 NS3404 镍基合金进行火花放电原子发射光谱分析,控制样品选择情况见表 6。在同样的工作条件下,将控制样品与分析样品同时分析,利用控制样品的分析结果与其标准值之间的偏差对分析样品的分析结果进行修正。实验样品的未校准和校正后光谱分析结果见表 7。从表 7 中可以看出,部分元素用通用镍基合金校准曲线分析的结果与用控样校正后的结果相差较大。

表 6 控制样品中各元素含量
Table 6 Element content in control samples

序号	编号	C	Si	S	P	Cr	Mo	Cu	Al	Co	Nb	Fe	W
1	BS187D	0.033 7	0.669	0.002 1	0.015 5	19.91	2.17	3.52	0.016 4	0.089	0.621	-	0.086
2	HRT Ni2012	0.008	0.06	0.003	0.009	15.56	15.77	0.09	0.23	-	-	6.66	3.47
3	Alloy G-30	0.005 8	0.14	0.000 6	0.011	28.9	4.93	1.24	0.14	1.75	0.36	13.48	1.97

表 7 实验样品分析结果
Table 7 Analysis results of test samples

试验样品	项目	C	Si	S	P	Cr	Mo	Cu	Al	Co	Nb	Fe	W
NS1403	未校正	0.078	0.340	0.004 8	0.011 0	20.147	2.522	4.270	0.027	0.073	0.744	37.827	-
	校正后	0.065	0.116	0.001 6	0.011 3	20.236	2.731	3.273	0.135	0.064	0.834	37.787	-
NS3102	未校正	0.009	0.002	0.006 3	0.004 0	15.554	15.882	0.044	0.111	0.024	0.029	5.784	3.301
	校正后	0.006	0.080	0.003 3	0.004 1	15.328	15.728	0.053	0.065	0.014	0.046	5.300	3.287
NS3404	未校正	0.028	0.235	0.007 0	0.009 0	28.053	5.214	1.831	0.157	3.136	0.614	15.449	2.457
	校正后	0.022	0.261	0.000 6	0.006 5	28.421	5.116	1.822	0.137	3.105	0.678	15.498	2.577

2.4 与其它分析方法比较

用标准方法对 NS1403、NS3102 和 NS3404 中 12 种元素进行分析,校正后的准确度检验,所用标准方法及检测结果见表 8。火花放电原子发射光谱

测定方法与其它方法测定结果的一致性分别见表 9~11。从表中可以看出,除了钼元素在其含量范围内没有合适的分析方法外,其它元素的光谱分析结果与现行国家标准分析方法结果一致。

表 8 其它方法分析结果

Table 8 Analysis results of other methods

/%

	C	Si	S	P	Cr	Mo	Cu	Al	Co	Nb	Fe	W
试验样品	GB/T 8647.9	GB/T 24585	GB/T 8647.8	GB/T 24585	GB/T 223.11 方法一	-	GB/T 223.18	GB/T 223.9 方法二	GB/T 24585	GB/T 223.40	GB/T 6730.65	GB/T 223.43 方法一
NS1403	0.070	0.131	0.002 2	0.010 2	20.104	-	3.211	0.149	-	-	37.494	-
NS3102	0.008	-	0.004 1	-	15.135	-	-	0.067	0.019	-	-	3.234
NS3404	0.024	0.292	-	0.005 1	28.138	-	1.873	0.145	-	0.618	-	2.398

表 9 试样 NS1403 光谱分析方法与其它方法分析结果的一致性

Table 9 Consistency of analysis results of sample NS1403 determination by spectral analyzing and other methods

元素	判定标准	判定依据/%	差值/%	结果
C	GB/T 8647.9(红外)	实验室间允许差 0.006	0.005	一致
Si	GB/T 24585(ICP)	$R=0.020$	0.015	一致
S	GB/T 8647.8	实验室间允许差 0.000 7	0.000 6	一致
P	GB/T24585	$R=0.002 5$	0.001 1	一致
Cr	GB/T223.11 方法一	$R=0.25$	0.132	一致
Mo	GB/T223.26	-	-	-
Cu	GB/T223.18	$R=0.073$	0.062	一致
Al	GB/T223.9 方法二	$R=0.016$	0.014	一致
Co	GB/T24585	-	-	-
Nb	GB/T223.40	-	-	-
Fe	GB/T6730.65	$R=0.4$	0.293	一致
W	GB/T223.43 方法一	-	-	-

表 10 试样 NS3102 光谱分析方法与其它方法分析结果的一致性

Table 10 Consistency of analysis results of sample NS3102 determination by spectral analyzing and other methods

元素	判定标准	判定依据/%	差值/%	结果
C	GB/T 8647.9(红外)	实验室间允许差 0.002	0.002	一致
Si	GB/T 24585(ICP)	-	-	-
S	GB/T 8647.8	实验室间允许差 0.001 0	0.000 8	一致
P	GB/T24585	-	-	-
Cr	GB/T223.11 方法一	$R=0.21$	0.19	一致
Mo	GB/T223.26	-	-	-
Cu	GB/T223.18	-	-	-
Al	GB/T223.9 方法二	$R=0.005$	0.002	一致
Co	GB/T24585	$R=0.006$	0.005	一致
Nb	GB/T223.40	-	-	-
Fe	GB/T6730.65	-	-	-
W	GB/T223.43 方法一	$R=0.069$	0.053	一致

表 11 试样 NS3404 光谱分析方法与其它方法分析结果的一致性

Table 11 Consistency of analysis results of sample NS3404 determination by spectral analyzing and other methods

元素	判定标准	判定依据/%	差值/%	结果
C	GB/T 8647.9(红外)	实验室间允许差 0.003	0.002	一致
Si	GB/T 24585(ICP)	$R=0.035$	0.031	一致
S	GB/T 8647.8	-	-	-
P	GB/T24585	$R=0.001 7$	0.001 4	一致
Cr	GB/T223.11 方法一	$R=0.31$	0.283	一致
Mo	GB/T223.26	-	-	-
Cu	GB/T223.18	$R=0.055$	0.042	一致
Al	GB/T223.9 方法二	$R=0.016$	0.012	一致
Co	GB/T24585	-	-	-
Nb	GB/T223.40	$R=0.005$	0.004	一致
Fe	GB/T6730.65	-	-	-
W	GB/T223.43 方法一	$R=0.068$	0.059	一致

3 结论

通过吹氩时间、预燃时间和积分时间的实验与优化,确立了火花放电原子发射光谱分析镍基合金的条件。根据仪器厂家推荐的干扰元素范围,确定可能的干扰元素。用优化的测试条件,利用仪器自带的标准曲线,采用控样法对镍基合金试样 NS1403、NS3102 和 NS3404 进行火花放电原子发射光谱分析,结果与现行国家标准分析方法一致。本方法实用、方便,可用于镍基合金的日常检测分析。

参考文献

- [1] 杨瑞成,王晖,郑丽平,等. 高性能镍基耐蚀合金的特性与研究动向[J]. 材料导报,2001,15(11):21-23.
YANG Ruicheng, WANG Hui, ZHENG Liping, et al. Characteristics and research trends of high performance Ni-base corrosion resistant alloys[J]. Materials Review, 2001,15(11):21-23.
- [2] 郭晓东,李军利,邹斌,等. 剪切温度对车削加工 GH4169 镍基高温合金的影响[J]. 上海交通大学学报,2009,43(1):79-83.
GUO Xiaodong, LI Junli, ZOU Bin, et al. Influence of shear temperature on chip formation of turning GH4169[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009,43(1):79-83.
- [3] 叶晓英,李帆. ICP-AES 测定镍基高温合金中主量与杂质元素分析技术[J]. 材料工程,2002(12):23-24.
YE Xiaoying, LI Fan. Determination of normal and impurity elements in Ni based superalloys by ICP-AES[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(12):23-24.
- [4] 李文新. 真空直读光谱仪对镍基合金中多种元素的测定[J]. 甘肃科学学报,2008,20(2):86-88.
LI Wenxin. Analysis of nickel-based alloys by vacuum direct-reading spectrometry[J]. Journal of Gansu Sciences, 2008,20(2):86-88.
- [5] 邵晓东,刘养勤,李瑛,等. 镍基合金中元素分析方法研究进展[J]. 冶金分析,2010,30(5):38-48.
SHAO Xiaodong, LIU Yangqin, LI Ying, et al. Progress in analytical methods of elements in nickel-base alloys[J]. Metallurgical Analysis, 2010,30(5):38-48.
- [6] 付二红. 高温合金化学成分分析及标准现状[J]. 航空标准化与质量,2016(1):8-12.
FU Erhong. Chemical composition analysis technology and standard actuality of high temperature alloy[J]. Aeronautic Standardization Quality, 2016(1):8-12.
- [7] 郭兴家,徐叔坤,李晓舟,等. 萃取分离—石墨炉原子吸收光谱法测定铁镍基高温合金中砷、铅、锡、铋、铋[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(6):1167-1169.
GUO Xingjia, XU Shukun, LI Xiaozhou, et al. Determination of As, Pb, Sn, Sb and Bi in high temperature iron and nickel based alloy by graphite furnace atomic absorption spectrometry combined with liquid liquid extraction[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006,26(6):1167-1169.
- [8] MAKHMUDOV K T, ALIEVA R A, GADZHIEVA S R, et al. Photometric determination of copper(II) in nickel alloys using azoderivatives of ethyl acetoacetate [J]. Journal of Analytical Chemistry, 2008,63(5):435-438.
- [9] 谢绍金,杨春晟,贾进铎. 氢化物发生—原子荧光光谱法测定镍基高温合金中痕量铋[J]. 理化检验—化学分册,2005,41(6):381-382.
XIE Shaojin, YANG Chunsheng, JIA Gindou. Determination of traces of Bi in high temperature nickel alloys by hyderide generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. Physical Testing and Chemical Analysis: Part B Chemical Analysis, 2005,41(6):381-382.
- [10] KATAOKA Y, FURUSAWA E, KOHNO H, et al. 基本参数法 X-射线荧光光谱同时分析镍、钴和铁基合金[J]. 冶金分析,2009,29(5):6-11.
KATAOKA Y, FURUSAWA E, KOHNO H, et al. Simultaneous analysis of nickel, cobalt and iron base alloys using X-ray fluorescence spectrometry with the fundamental parameter method [J]. Metallurgical Analysis, 2009,29(5):6-11.
- [11] 汪本林,郭洪涛. 红外线吸收光谱法测定金属材料中碳硫元素的原理及注意事项[J]. 化学分析计量,2007,16(1):65-67.
WANG Benlin, GUO Hongtao. Principle and matters needing attention of determination of carbon and sulfur in metal materials by infrared absorption spectrometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2007,16(1):65-67.
- [12] 叶晓英,杨春晟,谢绍金. ICP-AES 法测定含高钼镍基高温合金中的硼[J]. 化学分析计量,2008,17(4):31-32.
YE Xiaoying, YANG Chunsheng, XIE Shaojin. Determination of boron in nickel based superalloys by ICP-AES[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2008,17(4):31-32.