

分析与检测

引用格式:钟睿,曾波华,李嘉豪,等.基于声学特征分析的镨钕合金无损检测方法研究[J].中国有色冶金,2024,53(1):119-126.

ZHONG Rui, ZENG Bohua, LI Jiahao, et al. NDT method of praseodymium alloy based on acoustic feature analysis[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(1): 119-126.

基于声学特征分析的镨钕合金无损检测方法研究

钟睿¹, 曾波华¹, 李嘉豪¹, 曹乐乐²

(1. 赣州职业技术学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学, 江西 赣州 341000)

[摘要] 当前镨钕等稀土合金铸锭成品的质量检测工序均采用人工钻检法和化学分析法,存在着质检周期长、成本高、严重依赖人工经验等缺陷,本文基于声学特征分析的技术,结合传感器、信号处理、经典工程控制等理论,提出了一种无损的物理检测方法。首先对熔盐电解得到镨钕合金进行成分分析,确定其碳含量指标可作为金属质量的分类特征,并且依靠声学信号能判断金属碳含量;其次采集镨钕合金受到外界脉冲激励时的声学信号,通过分析声学信号的时域波形,建立镨钕合金碳含量与其声学信号特征的内在关联模型;最后正交实验结果表明,声学信号的时域特征能较好区别镨钕合金的高低碳差异。

[关键词] 熔盐电解; 质量检测; 声学特征; 碳含量; 镨钕合金; 无损检测

[中图分类号] TF111.52⁺2; TF845 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)01-0119-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.01.015

目前,工业级纯度的稀土合金常采用熔盐电解法生产^[1-2]。冶炼过程中,熔盐电解槽内的石墨阳极直接与熔融状态的稀土合金接触,在高温和通电的情况下,石墨阳极中的碳元素通过溶解、夹杂的方式进入合金^[3-4]。因此,稀土合金中碳元素含量是衡量稀土合金品质最重要的标准指标之一^[5]。

在稀土冶炼企业的实际生产过程中,通常采用人工手检的方式对稀土合金进行质量检验和分类,易出现检测准确率不稳定、漏检、误检等情况^[6]。江西理工大学的刘飞飞团队^[7-8]在人工手检的基础上,研发一套基于切削力特征的稀土金属微孔切削钻检平台,可自动、快速完成合金质量检测工序,但

仍需钻削合金表面,破坏了金属的完整性,未实现无损检测。

而化学分析法则是对人工手检的辅助手段,可对不确定质量等级的稀土合金成品进一步分析碳含量。周晓东等^[9]采用高频燃烧红外吸收法使用三元助熔剂测定各种稀土金属及其氧化物中碳、硫含量,该方法具有很好的通用性,在一定程度上能弥补人工手检检测精度不高的缺陷,但整个检测周期过长、成本较高,严重制约了现代稀土企业的连续化生产发展。

因此,本文通过分析碳含量与稀土金属微观组织结构的关系,利用理论推导证明了稀土金属脉冲响应的声学特征与其自身材料属性有关性,提出通过分析稀土金属脉冲响应声学特征来实现对稀土金属碳含量软测量的系统解决方案。

1 试验部分

1.1 镨钕合金试验制备

目前市面上氟盐体系熔盐电解法制取稀土金属

[收稿日期] 2023-08-11

[第一作者] 钟睿(1976—),男,江西赣州人,教授,主要从事工业生产过程建模与控制的研究工作。

[基金项目] 江西省重点创新研发平台计划(20181BCD40009);江西省离子型稀土资源绿色开发与高值利用国家重点实验室培育计划(20194AFD44003)。

及稀土合金的比例占到 95% 以上^[10]。将对应的稀土氟化物与氟化锂以一定配比配置成电解质,作为电解反应的介质,以石墨为阳极、钨棒为阴极,电解温度 1 000 ℃ 左右,稀土氧化物根据电解速率定时加入,电解一定时间后,将石墨坩埚中的稀土金属浇铸到铸铁模子中,冷却后,处理掉表面的电解质,即

可得到铸锭成品。镨钕合金的冶炼工艺流程图如图 1 所示,稀土熔盐电解工艺过程是在电解槽中进行的,在稀土金属熔盐电解生产中,稀土氧化物经过电解得到稀土金属熔液并收集到坩埚或中间包,再经浇铸模将稀土金属液浇铸成铸锭,稀土熔盐电解法得到的最终产品是稀土金属铸锭。

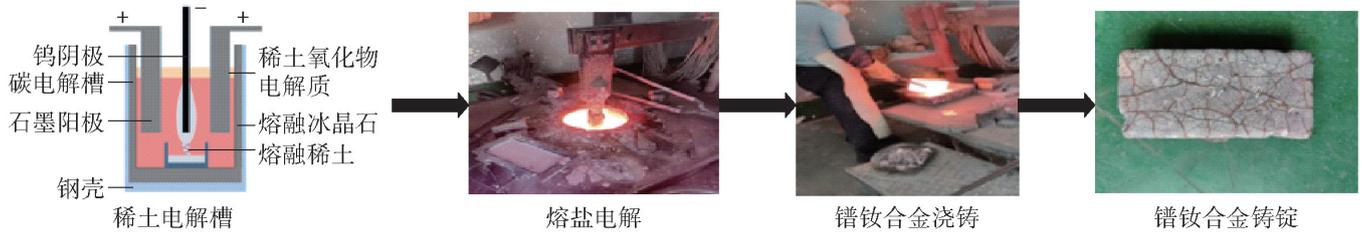


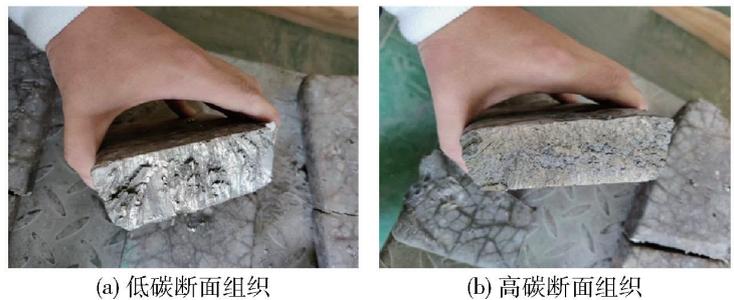
图 1 镨钕合金冶炼工艺

Fig. 1 Smelting process diagram of praseodymium neodymium alloy

由于在熔盐电解过程中,杂质 (Al、Si、Li、C 等微量元素) 会随电解槽的使用材料、操作方法不可避免地进入合金,从而影响镨钕合金的成品品质^[11]。

1.2 正交试验

随机抽取某离子型稀土工程中心生产的 103 块镨钕合金,镨钕合金生产的批次不同,碳含量不同(碳含量事先检测已知)。采集镨钕合金样本的声学信号,提取并分析信号特征值,对照已知的镨钕合金碳含量来选择合适的因子,进一步确定影响稀土合金碳含量的关键因素和各因素的水平。根据影响因子的个数、水平以及交互作用的程度,为确保各因素和因素之间的相互作用可以被均匀地覆盖,设计合适的正交试验表格。通过对试验表格数据结果的均值、极差和方差等数值分析与判断,最终可确定影响镨钕合金碳含量检测试验因数的优水平和最优水平组合。



(a) 低碳断面组织 (b) 高碳断面组织

图 2 镨钕合金断面

Fig. 2 Praseodymium neodymium alloy section

2 镨钕合金声学特征检测机理

碳元素对稀土金属材料的力学性能、微观组织结构、工艺有着重要影响:低碳稀土金属的断面具有金属光泽,整体呈现均匀的银白色;高碳稀土金属的断面特征分布不均匀,外围呈现银白色金属光泽,但存在明显的偏析现象,一般中部呈现灰色“沙状”特征^[12]。不同碳含量的镨钕合金断面,如图 2 所示。

固体材料通常有 3 种基本的振动方式:弯曲振动,纵向振动及扭转振动^[13]。假设试件具有特殊

的约束方式和激励方式时,试件只发生单纯的一种振动方式^[14]。本研究采用国家标准《金属材料弹性模量和泊松比试验方法》(GB/T 22315—2008)推荐的约束方式和激励方式,即平行支撑(支撑间距为筑波点间距,一般取 0.552 倍试件长度)和中部敲击^[15]。在此情况下,固体矩形试件可认为完全进行弯曲振动。试件发生弯曲振动时,振动传感器(麦克风)对其声学信号进行采集,如图 3 所示。

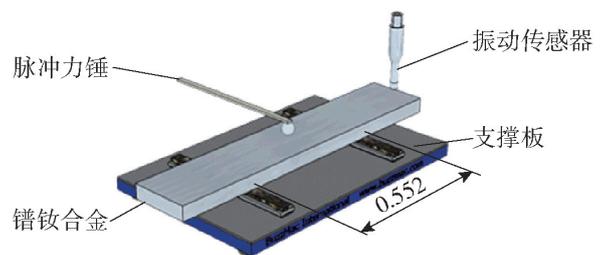


图 3 声学信号采集装置

Fig. 3 Acoustic signal acquisition device

在上述约束条件下,长条矩形试件弯曲振动时

声学信号的固有频率计算见式(1)^[16]。

$$f_r = \frac{\beta^2 h}{4 \sqrt{3\pi l^2}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

式中: h 为金属试件厚度,m; l 为长度,m; E 是材料弹性模量, N/m^2 ; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; β 是振动相关系数。

由上式可见,试件振动时声学信号的固有频率仅与此自身尺寸及材料属性有关。因此,稀土金属碳元素含量的不同将导致自身材料属性的不同,而不同的材料属性决定了稀土金属振动时声学信号的差异。

由上可知,在镨钕合金受到外界脉冲激励过程中,碳含量的变化直接影响其声学信号特征,可通过分析稀土金属脉冲响应的声学特征实现对稀土金属中碳元素含量进行软测量。

3 镨钕合金脉冲响应的声学信号分析及建模

基于国家标准(GB/T 22315—2008)声学检测方式,在实验室中自主搭建了一套镨钕合金声学检测平台,对不同碳含量的镨钕合金脉冲激励并对声学信号进行采集和预处理。镨钕合金声学测试平台包括激励装置(INV9310 振动脉冲力锤)、拾振单元(自由场麦克风)、信号处理装置(NI DAQmx 设备)以及镨钕合金试件,上位机为实验室虚拟仪器工程平台 LabVIEW 软件。

通过脉冲力锤对镨钕合金进行脉冲激励,自由场麦克风采集镨钕合金的脉冲响应声学信号,使用 LabVIEW 软件对信号进行显示,采样频率设置为 30 K,采样时间为 3 s。图 4 给出了实际采集的镨钕合金脉冲响应的声学信号波形图,该时序波形图为一个典型的脉冲信号响应,声学信号在激励开始时出现幅值突变,能量随着时间的变化而逐渐衰减消散。

通过分析镨钕合金的脉冲信号响应时域波形,可知镨钕合金的脉冲激励响应是一个衰减的正弦振荡瞬态过程,由一对能量包络线逐次收敛来表征,且声学信号的波形表现为时间的连续函数,因而声音和声音之间存在逐渐过渡的特点。在声学信号随时间变化过程中,声学信号的幅值随时间有显著变化,根据幅值的不同表现出山峰式的起伏。从图 4 可看出,高碳信号明显比低碳信号衰减快,这是由于高碳金属内部的“沙状”组织对声音有更好的吸收效果,

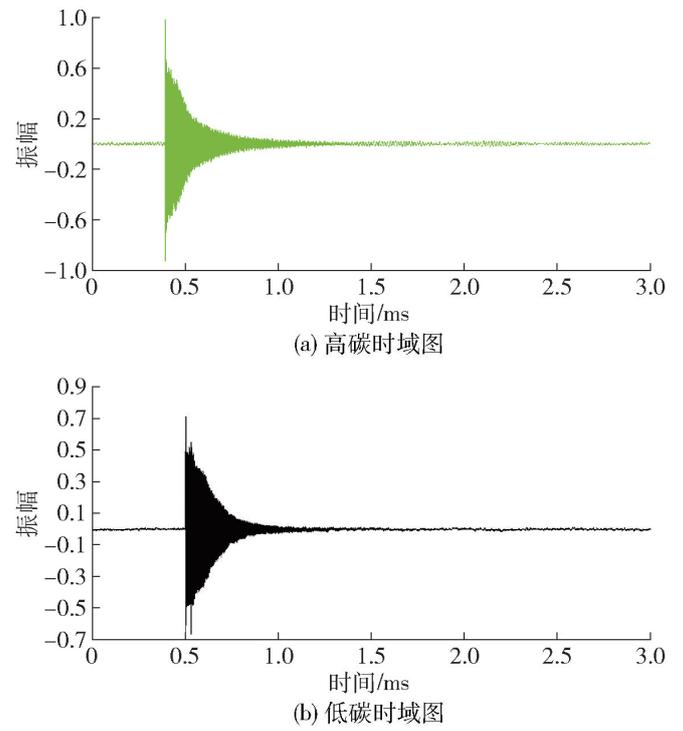


图 4 声学特征图

Fig. 4 Acoustic characteristic diagram

从而导致振动衰减更快。

由于镨钕合金受脉冲激励时会发生弯曲振动,在发生弹性形变过程中,金属铸锭在受到冲击载荷 F 、弹性应力 σ 以及摩擦阻力作用下达达到平衡状态,因此可将其简化成弹簧-阻尼-质量的单自由度黏性阻尼的自由振动,若给予初始冲击(其初速度为 dx/dt),则系统将在阻尼作用下作衰减自由振动^[17],如图 5 所示。

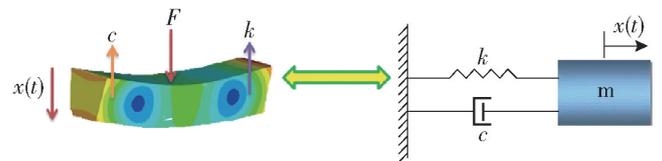


图 5 镨钕合金的阻尼自由振动系统

Fig. 5 Damping free vibration system of praseodymium neodymium alloy

设金属形变量为 $x(t)$,根据受力分析,可得到联立方程组,见式(2)。

$$\begin{cases} F = ma = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} \\ \sigma = E\varepsilon = kx(t) \\ f = cv = c \frac{dx(t)}{dt} \\ m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： E 为金属本身的弹性模量， N/m^2 ； ε 为应变变量； c 为系统的黏滞摩擦系数， $Pa \cdot s/kg$ 。

对上式进行变化，等式两边除以质量 m ，可得方程，见式(3)。

$$\ddot{x}(t) + \frac{2cw_n}{2mw_n}\dot{x}(t) + \frac{k}{m}x(t) = 0 \quad (3)$$

式中： w_n 为无阻尼振荡频率(自然频率)， kg/s 。

通过 $w_n^2 = k/m$ 变换，可将 $\xi = c/(2mw_n)$ 定义为黏性阻尼因子，这样便得到了锆钽合金受到脉冲激励的单自由度阻尼系统自由振动时的齐次微分方程式(4)。

$$\ddot{x}(t) + 2\xi w_n \dot{x}(t) + w_n^2 x(t) = 0 \quad (4)$$

由于方程为齐次式，因此方程的解可表达为式(5)形式。

$$x(t) = Ae^{st} \quad (5)$$

将解的形式代入式(4)，可得到系统特征方程，见式(6)。

$$S^2 + 2\xi w_n S + w_n^2 = 0 \quad (6)$$

由于锆钽合金脉冲激励响应系统是衰减的振荡过程，属于欠阻尼系统，则 $0 < \xi < 1$ ，特征方程式(6)有一对共轭复根，式(5)方程的通解见式(7)。

$$x(t) = e^{-\xi w_n t} (A_1 \cos \sqrt{1 - \xi^2} w_n t + A_2 \sin \sqrt{1 - \xi^2} w_n t) \quad (7)$$

引进阻尼自由振动的频率 $w_d = \sqrt{1 - \xi^2} w_n$ ，则式(7)可进一步化简成式(8)。

$$x(t) = e^{-\xi w_n t} (A_1 \cos w_d t + A_2 \sin w_d t) \quad (8)$$

式中： $A_1 = A \cos \phi$ ， $A_2 = A \sin \phi$ 。

应用三角公式可将式(8)变形为式(9)，最终得到阻尼系统的解。

$$x(t) = Ae^{-\xi w_n t} \cos(w_d t - \phi) \quad (9)$$

由式(9)可知，单自由度阻尼系统的响应具有按指数 $Ae^{-\xi w_n t}$ 衰减振幅的振动规律，其能量包络线方程为 $\pm Ae^{-\xi w_n t}$ 。通过相关性拟合计算可得：高碳的黏性阻尼因子 $0.5 \leq \xi < 1$ ；低碳的黏性阻尼因子 $0 < \xi < 0.5$ ；高低碳金属的二阶阻尼拟合曲线如图 6 所示。

因此，当锆钽合金受脉冲激励时，其初始状态均一致，黏性阻尼将直接导致系统的振动随时间按指数规律衰减，衰减响应曲线也反映了锆钽合金声学信号的物理形态；当 ξ 取不同的值时，系统同样会呈现不同的振动特性。碳含量不同的锆钽合金，其本

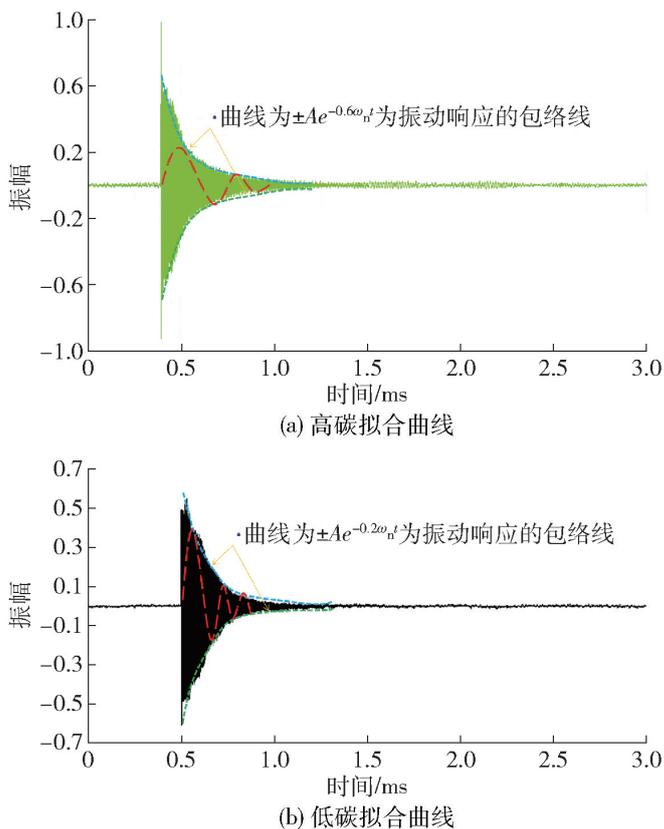


图 6 阻尼自由振动系统响应曲线

Fig. 6 Response curve of damped free vibration system

身材料属性也会发生改变，而不同的材料属性决定了 ξ 值，从而导致声学信号的差异，因此，锆钽合金的声学信号响应与碳含量 $C(\%)$ 之间的函数关系见式(10)。

$$C = f(\xi, x(t)) \quad (10)$$

式中： f 代表碳含量与黏性阻尼因子 ξ 和应变变量 $x(t)$ 呈相关比例关系。

4 试验结果分析

4.1 锆钽合金成分分析

为分析影响锆钽合金质量的主要指标，取不同批次的不少于 300 块锆钽合金铸锭进行碳硫仪分析，分析其显微组织特征，结果见表 1。

由表 1 可知，碳元素大于 500ppm 的金属，均为不合格品；碳元素含量小于 500ppm 的金属，均是合格品。因此，碳元素含量决定了锆钽合金的品质，准确测定锆钽合金中的碳含量对冶炼和生产制造工艺有重要的指导意义。

4.2 正交试验结果

通过对锆钽合金的脉冲激励响应曲线分析，寻求解决声学信号与碳含量之间的数学关系的模型。

由于金属碳含量与系统响应曲线相关,系统响应曲线与 ξ 和应变变量 $x(t)$ 相关。而 ξ 与金属材料属性相关,金属的材料属性包括质量、体积、密度等多种因素; $x(t)$ 与脉冲锤的击打力度、金属与麦克风传感器之间的距离相关,因此设计正交实验方法进一步验

证本研究的猜想。为研究声学信号与碳含量之间的规律,将镨钕合金的质量、体积、脉冲锤力度、麦克风传感器与金属的距离作为本次试验的试验因素,分别记为 A 、 B 、 C 和 D ;各因素均取3个水平,可选用 $L_9(3^4)$ 正交表,因素水平表见表2。

表1 不同品质镨钕合金中的杂质含量

Table 1 Impurity content in praseodymium neodymium alloys of different quality

样品序号	质量等级	碳含量 (C)/%	硫含量 (S)/%	铁含量 (Fe)/%	铝含量 (Al)/%	硅含量 (Si)/%	锂含量 (Li)/%	样品重量/ kg
1	合格产品	0.024 259 ±	0.000 762 ±	0.000 239 ±	0.000 181 ±	0.000 163 ±	0.000 161 ±	7.3 ~ 8.1
		0.000 168	0.000 011	0.000 016	0.000 002	0.000 009	0.000 006	
2	合格产品	0.033 502 ±	0.000 958 ±	0.000 280 ±	0.000 169 ±	0.000 133 ±	0.000 132 ±	8.1 ~ 8.5
		0.000 106	0.000 009	0.000 013	0.000 001	0.000 004	0.000 008	
3	合格产品	0.049 827 ±	0.001 194 ±	0.000 163 ±	0.000 172 ±	0.000 141 ±	0.000 140 ±	8.5 ~ 8.9
		0.000 133	0.000 011	0.000 019	0.000 001	0.000 007	0.000 006	
4	不合格产品	0.069 583 ±	0.001 031 ±	0.000 331 ±	0.000 122 ±	0.000 105 ±	0.000 102 ±	7.3 ~ 8.1
		0.000 152	0.000 020	0.000 009	0.000 001	0.000 007	0.000 009	
5	不合格产品	0.053 939 ±	0.000 692 ±	0.000 219 ±	0.000 166 ±	0.000 152 ±	0.000 149 ±	8.1 ~ 8.5
		0.000 194	0.000 015	0.000 011	0.000 002	0.000 008	0.000 009	
6	不合格产品	0.073 951 ±	0.001 107 ±	0.000 340 ±	0.000 243 ±	0.000 195 ±	0.000 186 ±	8.5 ~ 8.9
		0.000 109	0.000 013	0.000 014	0.000 002	0.000 009	0.000 006 8	

表2 因素水平表

Table 2 Factor level

水平	试验因子			
	重量/kg	体积/m ³	力度/N	距离/cm
	A	B	C	D
1	6.7 ± 0.3	0.002 48 ± 0.000 7	23	3
2	7.0 ± 0.3	0.002 52 ± 0.000 7	25	5
3	7.3 ± 0.3	0.003 52 ± 0.000 7	27	7

由于每块金属的质量不一,体积不一,因此为排除误差干扰,试验可随机进行,共安排9次正交试验方案,见表3。

4.2.1 确定试验因素 A 、 B 、 C 、 D 的优水平和最优水平组合

A_1 的影响主要反映在第1、2、3号试验中, A_2 的影响主要反映在第4、5、6号试验中, A_3 的影响主要反映在第7、8、9号试验中。 A 因素的1水平所对应的指标之和见式(11)。

表3 试验方案

Table 3 Test plan

试验序号	试验因子				试验结果 (准确率/%)
	A	B	C	D	
1	1(6.7 ± 0.3)	1(0.002 48 ± 0.000 7)	1(23)	1(3)	95.7
2	1	2(0.002 52 ± 0.000 7)	2(25)	2(5)	92.6
3	1	3(0.003 52 ± 0.000 7)	3(27)	3(7)	93.1
4	2(7.0 ± 0.3)	1	2	3	96.9
5	2	2	3	1	94.7
6	2	3	1	2	92.2
7	3(7.3 ± 0.3)	1	3	2	95.8
8	3	2	1	3	97.3
9	3	3	2	1	95.5

$$K_{A1} = y_1 + y_2 + y_3 = 281.4\% \quad (11)$$

$$\text{则 } \bar{K}_{A1} = K_{A1}/3 = 93.8\%。$$

A 因素的 2 水平所对应的指标之和见式(12)。

$$K_{A2} = y_4 + y_5 + y_6 = 283.8\% \quad (12)$$

$$\text{则 } \bar{K}_{A2} = K_{A2}/3 = 94.6\%。$$

A 因素的 3 水平所对应的指标之和见式(13)。

$$K_{A3} = y_7 + y_8 + y_9 = 288.6\% \quad (13)$$

$$\text{则 } \bar{K}_{A3} = K_{A3}/3 = 96.2\%。$$

根据正交试验设计的特性,可对 A 因素的 3 个水平进行均值维度的比较。由于 \bar{K}_{A1} 、 \bar{K}_{A2} 、 \bar{K}_{A3} 数值不相等,表明 A 因素的水平变动对试验结果有一定影响,并根据 $\bar{K}_{A3} > \bar{K}_{A2} > \bar{K}_{A1}$,因此可认为 A_3 为 A 因素的优水平。同理可计算并确定 B_1 、 C_1 、 D_3 分别为 B、C、D 因素的优水平。4 个因素的优水平组合 $A_3B_1C_1D_3$ 为本实验的最优水平组合,即采用声学检测镨钕合金碳含量的试验条件是质量为 7.3 ± 0.3 kg/块、体积 0.00248 ± 0.0007 cm³/块、脉冲锤的击打力度 23 N、金属与麦克风传感器之间的距离 3 cm 时,试验效果最佳,识别准确率大于 97.3%。

4.2.2 确定因素的主次顺序

设 R_j 为第 j 列因素的极差,极差反映了第 j 列元素水平波动时试验指标的幅度变动。利用极差分析法可判断 A、B、C、D 4 个因素对于影响镨钕合金高低碳分类准确率的主次顺序,因此可通过比较 R_j 的数值大小,得出对试验指标的影响权重。本次试验的极差 R_j 计算结果见表 4。

表 4 试验结果分析

Table 4 Analysis of Test Results

指标	试验因子			
	A	B	C	D
K_1	281.4%	288.4%	285.2%	285.9%
K_2	283.8%	284.6%	285.0%	280.6%
K_3	288.6%	280.8%	285.1%	287.3%
\bar{k}_1	93.8%	96.1%	95.0%	95.3%
\bar{k}_2	94.6%	94.8%	95.0%	93.5%
\bar{k}_3	96.2%	93.6%	95.0%	95.7%
极差 R	2.4%	2.5%	0%	2.2%
主次顺序	$B > A > D > C$			
优级水平	A_3	B_1	C_1	D_3
优级组合	$A_3B_1C_1D_3$			

从上表可比较各 R 值大小,可得 $R_B > R_A >$

$R_D > R_C$,因此影响试验准确率的主→次顺序是 B、A、D、C,即体积和质量影响较大,其次是麦克风传感器与金属之间的距离,而脉冲锤击打力度的影响较小。

正交试验结果表明稀土金属的质量、体积、敲击力度、检测距离等因素在合适的范围内,高、低碳含量的稀土金属识别准确率能达到最佳,稀土金属的质量和体积对高、低碳稀土金属分类准确率影响最大。

5 结论

稀土金属质量检测行业普遍使用人工钻检法和化学分析法等传统检测手段,存在检测周期长、成本高、难于在线实时检测等不足,本文提出一种基于声学的无损检测方法,声学信号具有采集成本低廉、获取方式简单的优点,是一种可用于稀土金属碳含量检测的物理信号。

1) 本研究提出基于稀土金属脉冲响应的声学特征识别方法,借助单自由度阻尼系统的振动过程分析,通过非线性拟合,建立声学特征的黏性阻尼因子与稀土金属碳含量之间的映射关系,实现了对稀土金属的快速有效分类。

2) 试验初步表明,对于不同碳含量的稀土金属,其振动声学信号的特征存在显著差别。正交试验结果表明,相较行业普遍使用人工钻检法和化学分析法等传统检测手段,本文的声学检测法在影响因素最优组合条件下,检测的镨钕合金范围包括质量(7.3 ± 0.3 kg)、体积(0.00248 ± 0.0007 cm³)、击打力度(23 N)、检测距离(3 cm),准确率可达到 97% 以上;并进一步讨论了影响镨钕合金声学检测准确率的主次顺序,为稀土冶炼生产线提供了一定的指导。

声学检测法可与稀土冶炼生产工艺过程集成形成闭环控制系统,以满足稀土冶炼企业无损检测的工业要求,实现稀土金属质量在线监测的目标,保证生产过程稳定进行。

[参考文献]

- [1] DJAMAL M, YULIANTINI L, HIDAYAT R, et al. Development of optical material based on glass doped rare earth for photonic devices[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43(9):2531 - 2537.
- [2] 王春梅,刘玉柱,赵龙胜,等.我国稀土材料与绿色制备技术现状与发展趋势[J].中国材料进展,2018,37(11):841 - 847,

- 879.
- WANG Chunmei, LIU Yuzhu, ZHAO Longsheng, et al. Current situation and development tendency on rare earth materials and its green preparation technologies in China [J]. *Materials China*, 2018, 37(11): 841–847, 879.
- [3] 赖丹, 吴一丁. 南方离子型稀土产业发展现状、问题及出路——以赣州为例[J]. *稀土*, 2019, 40(4): 140–148.
- LA Dan, WU Yiding. Development status, problems and solutions of southern ion-type rare earth industry-taking Ganzhou as an example [J]. *Chinese Rare Earths*, 2019, 40(4): 140–148.
- [4] 季男, 彭浩, 蒋锋, 等. 稀土氧化物 Gd_2O_3 、 Nd_2O_3 、 Sm_2O_3 和 Dy_2O_3 在 $KCl-LiCl-Li_2O$ 熔盐中的电解[J]. *核化学与放射化学*, 2022, 44(5): 524–532.
- JI Nan, PENG Hao, JIANG Feng, et al. Electrolysis of rare earth oxides (Gd_2O_3 , Nd_2O_3 , Sm_2O_3 and Dy_2O_3) in $KCl-LiCl-Li_2O$ molten salt [J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2022, 44(5): 524–532.
- [5] GIBILARO M, REMAZEILLES C, MASSOT L, et al. Process optimization to avoid perfluorocarbon emission during neodymium rare earth electrolysis in molten $LiF-NdF_3-Nd_2O_3$ [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2022, 169(8): 1165–1173.
- [6] XING P, LI H Q, YE C L, et al. Recovery of rare-earth elements from molten salt electrolytic slag by fluorine fixation roasting and leaching [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, 8(1): 522–531.
- [7] 刘飞飞, 曾波华, 伍昕宇, 等. 基于切削力模型的镨钕合金碳含量钻检方法研究[J]. *稀土*, 2022, 43(2): 53–60.
- LIU Feifei, ZENG Bohua, WU Xinyu, et al. Research on drilling method for carbon content of PrNd alloy based on cutting force model [J]. *Chinese Rare Earths*, 2022, 43(2): 53–60.
- [8] 陈鑫宇, 伍昕宇, 刘飞飞, 等. 镨钕合金碳含量软测量研究[J]. *稀土*, 2022, 43(3): 111–122.
- CHEN Xinyu, WU Xinyu, LIU Feifei, et al. Research on soft sensing of carbon content in Pr-Nd alloy [J]. *Chinese Rare Earths*, 2022, 43(3): 111–122.
- [9] 周晓东, 李洁, 方斌, 等. 高频-红外吸收法测定稀土金属及其氧化物中的碳、硫含量[J]. *稀土*, 2003, 24(6): 33–34, 51.
- ZHOU Xiaodong, LI Jie, FANG Bin, et al. Determination of carbon and sulphur in rare earth and oxide by high frequency infrared analyzer [J]. *Chinese Rare Earths*, 2003, 24(6): 33–34, 51.
- [10] YIN T Q, XUE Y, YAN Y D, et al. Recovery and separation of rare earth elements by molten salt electrolysis [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2021, 28(6): 899–914.
- [11] LIU Q S, TU T, GUO H, et al. High-efficiency simultaneous extraction of rare earth elements and iron from NdFeB waste by oxalic acid leaching [J]. *Journal of Rare Earths*, 2021, 39(3): 323–330.
- [12] ZHOU T Y, SHI J M, LI G J, et al. Advancing $n-\pi^*$ electron transition of carbon nitride *via* distorted structure and nitrogen heterocycle for efficient photodegradation: Performance, mechanism and toxicity insight [J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2023, 632(PB): 285–298.
- [13] GUI X H, XUE H T, GAO R P, et al. Study on structural performance of horizontal axis wind turbine with air duct for coal mine [J]. *Energies*, 2021, 15(1): 225–225.
- [14] 胡甫才, 刘浩天, 郭磊. 激励力施加方式对结构振动特性影响研究[J]. *噪声与振动控制*, 2022, 42(5): 54–59.
- HU Fucui, LIU Haotian, GUO Lei. Study on the effect of excitation force applying form on vibration characteristics of structures [J]. *Noise and Vibration Control*, 2022, 42(5): 54–59.
- [15] 姚强, Md Ahmed Sanuar Hossain, 李秀红, 等. 工件固定方式对振动式滚磨光整加工效果影响的实验研究[J]. *机械设计与制造*, 2022(3): 7–14.
- YAO Qiang, Md Ahmed Sanuar Hossain, LI Xiuhong, et al. Experimental study on the effect of fixing method of workpiece on vibratory finishing [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022(3): 7–14.
- [16] 惠维维, 韩宾, 张钱城, 等. 基于一种简化剪切变形理论的层合梁自由振动分析[J]. *应用力学学报*, 2017, 34(6): 1067–1071, 1217.
- HUI Weiwei, HAN Bin, ZHANG Qiancheng, et al. Free vibration analysis of laminated composite beams based on a simplified shear deformation theory [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(6): 1067–1071, 1217.
- [17] 吴鑫, 李高磊, 乐源. 单自由度碰撞振动系统的奇异非混沌动力学和多稳态共存[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(2): 45–52, 86.
- WU Xin, LI Gaolei, YUE Yuan. Strange nonchaotic dynamics and multistable coexistence phenomena of a single-degree-of-freedom vibro-impact system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(2): 45–52, 86.

NDT method of praseodymium alloy based on acoustic feature analysis

ZHONG Rui¹, ZENG Bohua¹, LI Jiahao¹, CAO Lele²

(1. Ganzhou Polytechnic, Ganzhou 341000, China;

2. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The current quality inspection process of finished praseodymium and other rare-earth alloy ingots uses manual drilling method and chemical analysis method, which has defects such as long quality inspection period, high cost and serious reliance on manual experience. This paper proposes a non-destructive physical inspection

method based on the technology of acoustic feature analysis, combined with the theory of sensors, signal processing and classical engineering control. Firstly, the smelting process of praseodymium alloy obtained by molten salt electrolysis is analyzed to determine that its carbon content index can be used as a classification characteristic of metal quality, and the acoustic signal can be relied on to determine the metal carbon content. Secondly, the acoustic signal of praseodymium alloy is collected when it is excited by external pulses, and the inner correlation model between the carbon content of praseodymium alloy and its acoustic signal characteristics is established by analyzing the time domain waveform of the acoustic signal. Finally, the results of the orthogonal experiments show that the time domain characteristics of the acoustic signal can better distinguish the difference between high and low carbon of praseodymium alloy.

Key words: molten salt electrolysis; quality inspection; acoustic characteristics; carbon content; praseodymium-neodymium alloy; NDT method

国家发展改革委等部门印发《铜冶炼等 2 项行业清洁生产评价指标体系》

近日,国家发展改革委会同生态环境部、工业和信息化部印发《铜冶炼等 2 项行业清洁生产评价指标体系》(发改环资规〔2024〕45 号)。

国家发展改革委 2007 年发布的《铅锌行业清洁生产评价指标体系(试行)》,原环境保护部 2009、2010 年发布的《清洁生产标准粗铅冶炼业》(HJ512—2009)、《清洁生产标准铅电解业》(HJ513—2009)、《清洁生产标准铜冶炼业》(HJ558—2010)同时停止施行。

一是贯彻落实党中央、国务院决策部署。党的二十大强调要“推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型”。《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》明确要求“全面推进清洁生产”。《“十四五”全国清洁生产推行方案》要求推进有色行业绿色转型升级,在有色行业实施清洁生产改造工程,推动一批重点企业达到清洁生产领先水平。近年来,有关部门也陆续出台系列政策措施,对铜、铅冶炼等行业高质量发展提出了新要求。此次修订深入贯彻落实党中央、国务院决策部署,按照绿色低碳高质量发展相关要求对指标体系进行全面升级。

二是促进行业高质量发展。铜、铅冶炼属于国民经济中的基础性行业,为经济社会发展提供重要原材料。此次修订对行业清洁生产提出了更高要求,有利于推动企业更新技术装备,减少能源资源和污染物排放消耗,提升行业绿色生产水平,促进行业绿色低碳转型。

三是强化行业绿色生产技术指引。铜冶炼行业清洁生产评价指标体系修订强化了铜冶炼生产工艺技术方向和要求,修订了单位产品能源消耗、铜冶炼综合回收率等指标,引导企业采用短流程冶炼、富氧熔池熔炼技术,提高资源综合利用水平。铅冶炼行业清洁生产评价指标体系强化了对铅冶炼废水、废气中重金属的管控要求,明确了铅冶炼推行富氧底吹熔炼、液态铅渣直接还原炼铅工艺的技术提升方向,设置了单位产品特征污染物产生量和排放量指标,推动铅冶炼企业减污降碳协同增效。

(资料来源:中国有色网)