

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.015

# 等离子喷涂 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 防护涂层及其表征\*

祝志祥<sup>1</sup>, 韩钰<sup>1</sup>, 陈新<sup>1</sup>, 马壮<sup>2</sup>, 杨长龙<sup>3</sup>, 张宏宇<sup>3</sup>

(1. 全球能源互联网研究院 a. 先进输电技术国家重点实验室, b. 电工新材料研究所, 北京 102211; 2. 北京理工大学材料学院, 北京 100081; 3. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110004)

**摘要:** 以 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粉末为原料, 通过高温固相煅烧、喷雾造粒及热处理制备出纯净单相的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 热喷涂粉体, 采用等离子喷涂技术在Q235钢表面沉积出 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 铁氧体涂层, 并研究其微观组织结构、物理电气和耐腐蚀性能。结果表明, 热喷涂制备的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层表面致密均匀, 平均孔隙率为4.1%, 且与钢基体具有良好的界面结合, 结合强度平均值为27.6 MPa, 涂层电阻率为 $2.14 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ , 且涂层耐电化学腐蚀性能良好, 3.5% NaCl溶液介质中的平均腐蚀速率约为0.003 7 mm/a, 显示等离子喷涂制备的高质量 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层可较好满足接地材料防护涂层对其耐蚀和导电性方面的要求, 可作为一种有效的腐蚀防护措施应用在传统钢质接地材料防腐工程中。

**关键词:** 等离子喷涂; 防护; 铁氧体; 接地材料

中图分类号: TG174.442; TM27

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)06-0107-06

## Preparation and Characterization of $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ Coatings by Plasma Spraying Process

ZHU Zhi-xiang<sup>1</sup>, HAN Yu<sup>1</sup>, CHEN Xin<sup>1</sup>, MA Zhuang<sup>2</sup>, YANG Chang-long<sup>3</sup>, ZHANG Hong-yu<sup>3</sup>

(1. a. State Key Lab of Advanced Power Transmission Technology, b. Institute of New Electrical Materials, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102211; 2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 3. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co. Ltd., Shenyang 110004)

**Abstract:** High temperature solid state calcination, spray granulation and thermal treatment were employed to synthesize pure  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  powders with  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  powders as raw materials. The  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  ferrite coatings were prepared on the steel substrate via the plasma spraying technology. The phase and microstructure, physical and electrical properties, as well as corrosion resistance were studied. The results show that the surface of the coatings is dense and uniform with an average porosity of 4.1%. Additionally, the mean adhesion strength of the coating is 27.6 MPa, the resistivity of  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  coating is about  $2.14 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ , and the electrochemical corrosion rate is about 0.003 7 mm/a in the 3.5% NaCl solution medium. The high-quality coatings can meet the requirements of corrosion resistance and conductivity for the grounding materials, which can be used as an effective protection measurement for the traditional steel grounding materials.

**Keywords:** plasma spraying; protection; ferrite; grounding materials

## 0 引言

采用金属或合金防护涂层对钢铁构件和构筑物进行长效防护, 国外早在20世纪20年代就已开始应用, 主要有电镀或热浸镀锌涂层、氧-乙炔火

焰喷涂锌层发展到电弧喷涂锌铝合金防护涂层等。对于交流接地网, 除选用耐蚀性能好的接地材料外, 利用涂覆层的表面工程技术也是解决接地装置腐蚀防护问题的较佳方案之一。传统热镀

收稿日期: 2016-06-12; 修回日期: 2016-11-06; 基金项目: \*国家电网公司科技项目(5455DW120005, 5455DW150015)

通讯作者: 祝志祥(1981—), 男(汉), 高级工程师, 博士; 研究方向: 电工新材料及应用技术; Tel: (010) 6660 1561; E-mail: zhuzhixiang003@163.com

网络出版日期: 2016-12-14 15:49; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161214.1549.012.html>

引文格式: 祝志祥, 韩钰, 陈新, 等. 等离子喷涂 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 防护涂层及其表征[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 107-112. ZHU Z X, HAN Y, CHEN X, et al. Preparation and characterization of  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  coatings by plasma spraying process[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 107-112.

锌层在强腐蚀性土壤地区已越来越无法满足钢质接地材料的防腐要求,寻找新型防护涂层近年来逐渐受到电力行业的普遍关注<sup>[1-3]</sup>。

铁氧体是20世纪70年代发展起来的一种新型难溶环保电极材料。热喷涂技术的发展为高性能铁氧体涂层的制备及其在接地装置防腐工程中应用奠定了良好基础<sup>[4-6]</sup>。采用铁氧体涂层作为交流接地材料,除具备优良的耐土壤腐蚀性能外,同时要求优良的导电性能,以保证杂散电流快速入地,减小接地温升。铁氧体材料体系中, $\text{Li}^+$ 离子半径( $\sim 0.76 \text{ \AA}$ )比 $\text{Fe}^{2+}$ 离子半径( $\sim 0.83 \text{ \AA}$ )小,当 $\text{Li}^+$ 离子进入反尖晶石结构中将使晶格参数变小,使氧与金属离子的扩散变得更为困难,因此锂铁氧体具有良好的耐腐蚀性能;此外,据文献报道<sup>[7-10]</sup>,利用制备工艺及Li掺杂量的控制,锂铁氧体烧结块体可实现较低的室温电阻率,可较好满足接地材料对导电性的要求。因此,在前期关于铁氧体防腐涂层研究基础上<sup>[11]</sup>,为进一步改善钢基铁氧体涂层的导电及耐蚀性能,文中采用成分为 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 的锂铁氧体热喷涂粉体进行Q235钢基体上等离子喷涂制备涂层材料的研究,分析表征了涂层的微观组织结构、物理电气及耐电化学腐蚀性能,探讨了高质量 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层制备工艺控制及利用其进行传统钢质接地材料本体防护的技术可行性。

## 1 试验准备

### 1.1 热喷涂粉体制备

将Q235碳钢基体材料机加工成规格为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的圆柱试样和 $\Phi 14 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的圆棒试样,其中圆柱试样用于涂层结合强度的测试,圆棒试样用于涂层结合性(参考UL 467标准<sup>[12]</sup>)、电阻率和电化学加速腐蚀试验。喷涂粉末由高温固相煅烧法制备的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉末经喷雾造粒后制成。纳米级原料粉 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ (分析纯,粒径 $10 \sim 50 \text{ nm}$ )和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (工业级,粒径 $50 \sim 100 \text{ nm}$ )按1:5的摩尔比例在大气环境经双搅拌混料机混合均匀。

利用去离子水将混合后原料粉润湿并制成直径 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 的小球,以减少在高温煅烧时原料粉内外温度差,确保所有粉体受热均匀。将小球置于电热鼓风干燥箱中 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥6 h充分去除水分;干燥后的粉末置于 $\text{N}_2$ 保护气氛电阻炉中煅烧,煅烧温度 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间2 h,并放置在

铜板夹层中快速冷却;煅烧完成后,原料粉末会保持直径为 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 的小球结构,利用破碎机将原料振荡破碎成微米级的颗粒以满足喷雾造粒对粉体粒径的要求。以去离子水为分散剂,聚乙烯醇(PVA)为粘结剂,将其与振荡破碎后的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉末按表1配比放入球磨罐中球磨,将球磨6 h后获得的成分均匀、粘稠度适中的浆料送入喷雾造粒塔,喷雾干燥制成球形团聚 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉体,主要工艺参数见表2。为去除造粒后粉体中残留水分和PVA,使粉体更加致密且增加团聚粉体的强度,采用 $\text{N}_2$ 保护气氛电阻炉对喷雾造粒后的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉体进行热处理,热处理温度 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间3 h,随炉冷却。将热处理后的粉体过筛,获得粒径 $20 \sim 80 \text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 造粒粉末。

表1 喷雾造粒浆料的配比

Ingredients	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ powders	Binder	Dispersant
w / %	45	0.225	54.775

表2 喷雾造粒工艺参数

Parameters	Values
Inlet temperature/ $^\circ\text{C}$	250–260
Outlet temperature/ $^\circ\text{C}$	85–95
Creeping pump frequency/Hz	40
Atomizing disc frequency/Hz	35

### 1.2 涂层制备

涂层制备采用Praxair公司生产的5500-2000型(喷枪型号SG100)空气等离子喷涂设备,喷枪移动由ABB公司生产的机械手进行改革控制。喷涂前对Q235碳钢基体表面进行除锈、除油、喷砂等预处理<sup>[13]</sup>。等离子喷涂制备涂层的主要参数见表3。

表3 等离子喷涂工艺参数

Parameters	Values
Current/A	900
Ar flow rate/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	80
He flow rate/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	45
Power feedrate/( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ )	15
Spraying distance/mm	75

### 1.3 测试分析

采用FL4-1型漏斗式霍尔流量计测量 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$

热喷涂粉末的流动性和松装密度; 采用X射线衍射仪(XRD)分析合成的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 热喷涂粉末及涂层的物相结构; 用场发射扫描电镜(FESEM)观察热喷涂粉末和涂层的微观组织形貌; 采用金相显微镜观察涂层截面的金相组织; 采用黏结拉伸法在万能试验机上测试涂层与基体的结合强度; 采用KEITHLEY高精度电阻测试仪用两端法测量涂层的电阻并计算电阻率<sup>[14]</sup>; 采用德国Zahner M6型电化学工作站测量涂层的极化曲线, 测试介质为3.5% (质量分数) NaCl溶液, 用于模拟具有强腐蚀性的沿海地区土壤环境, 以更好评价材料的耐腐蚀性能, 涂层试样为工作电极, 工作面积为 $1\text{ cm}^2$ , 饱和甘汞电极为参比电极, 铂为辅助电极, 电位扫描速度为 $0.5\text{ mV/s}$ , 参考ASTM G102-1999《电化学测试腐蚀速度的计算》估算材料腐蚀速率<sup>[15]</sup>。同时, 在同等测试条件下, 测量了目前市售的纯铜接地材料、碳钢接地材料常用的热镀锌层、热镀锌铝合金层以及项目组前期研制的Q235钢基 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 涂层材料的极化曲线, 以进一步对比分析 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的抗腐蚀行为。

## 2 结果与讨论

### 2.1 喷涂粉体材料

图1为所合成的热喷涂粉体热处理前后的微观形貌。由图1(a)可知, 喷雾造粒原始粉体是由大量形状不规则的纳、微米级小颗粒团聚组成, 颗粒间依靠粘剂PVA粘合连接, 棱角鲜明且间隙较多; 由图1(b)可知, 经 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后, 粉体小颗粒粒径变化微弱, 但棱角变得较为模糊, 颗粒间可观察到较多的烧结颈, 连接程度及内聚力提升明显。根据热力学球形颗粒表面能最低理论, 表面粗糙的颗粒在热处理产生烧结颈的过程中, 颗粒系统会趋于能量最低状态球形, 且粉体表面变得更加光滑, 这对粉体流动性的提高极为有利。

表4给出了喷雾造粒制得的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉体热处理前后的粒径、流动性及松装密度。经 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后, 平均粒径值由 $55.24\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $52.30\text{ }\mu\text{m}$ , 且流动性及松装密度均明显提高, 表明热处理导致球形大颗粒表面致密化, 空隙减少, 表面更加光滑, 相当于粉体颗粒烧结收缩的过程, 这与喷雾造粒合成的团聚粉体热处理前后微观形貌的结果相符。

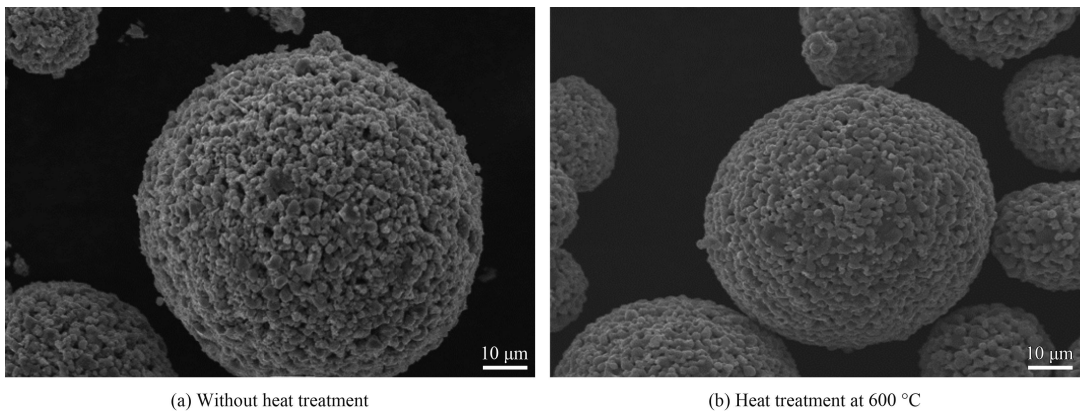


图1 热喷涂粉体热处理前后的微观组织形貌

Fig.1 Morphologies of the powders before and after heat treatment

表4 喷雾造粒制得 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉体的性能参数

Table 4 Parameters of the  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  powders after spray granulation

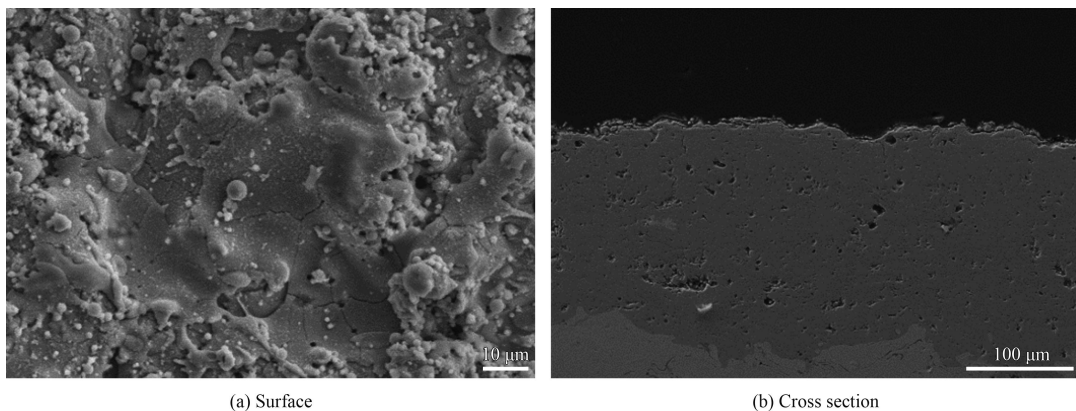
Powder state	Particle size		Powder fluidity/ $(\text{s} \cdot 50\text{ g}^{-1})$	Bulk density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
	Average value / $\mu\text{m}$	Volume ratio of sprayed powder/%		
Without heat treatment	55.24	91.83	51.6	1.328
Heat treatment at $600\text{ }^\circ\text{C}$	52.30	97.60	37.3	1.749

### 2.2 涂层的显微组织

图2为合成的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层表面及其截面的微观组织形貌。从图2(a)可以看出, 涂层表面除少

量的未充分熔融的颗粒外, 几乎全是熔融的团聚粉末在表面铺展而成的光滑面, 且堆叠致密。从图2(b)可以看出,  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层厚度约为 $200\text{ }\mu\text{m}$ ,



图2  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的表面及截面形貌Fig.2 Surface and cross section morphologies of the  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  coating

涂层致密均匀, 且与基体结合良好。经图像处理软件(Image J)分析计算的涂层平均孔隙率约为4.1%, 显示出采用表3的等离子喷涂工艺参数制备的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层具有良好质量。与前期研究的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 涂层相比<sup>[11]</sup>,  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层更加致密均匀, 这主要是由于喷涂参数的优化改善了 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉体的熔化状态, 涂层中未熔颗粒及孔隙较少, 导致涂层孔隙率较 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 涂层明显降低。

### 2.3 涂层的相结构

图3为高温固相烧结合成的初始粉体、造粒后的热喷涂粉体及沉积涂层的XRD谱图。由图3中 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 的特征衍射峰可知, 经1 100 °C固相反应合成的初始粉体为较纯净的反尖晶石结构的锂铁氧体, 经造粒、600 °C热处理后 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉体的物相基本无变化, 且等离子喷涂制备的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层与热喷涂粉体的衍射峰位也无明显偏移, 表明涂层为较纯净单相反尖晶石结构的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$

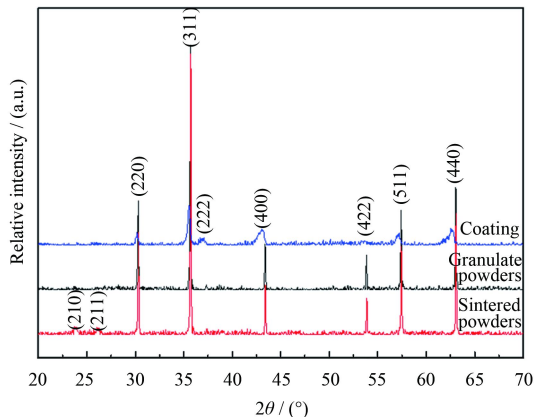


图3 合成粉体及涂层的XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of the prepared powders and coating

涂层。同时, 图3中 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的(220)、(400)、(311)、(511)和(440)衍射峰与热喷涂粉体相比均出现了宽化现象, 考虑到涂层与热喷涂粉体的晶粒大小在喷涂前后相差不大, 因此可能是粉体粒子经高速飞行撞击基材表面后铺展、瞬间凝固成涂层, 导致涂层内部残存较大的宏观内应力, 内应力效应使衍射峰位置改变, 从而引起底片上衍射线条变宽的现象。

### 2.4 涂层的性能

考虑到接地材料实际使用时对其导电性能、耐腐蚀性能的要求, 以及接地材料运输、施工中可能存在的磕碰、撞击等情况, 对 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层材料的结合性能、导电性能和耐电化学腐蚀性能进行了表征, 表5给出了相应测试数据的平均统计结果。

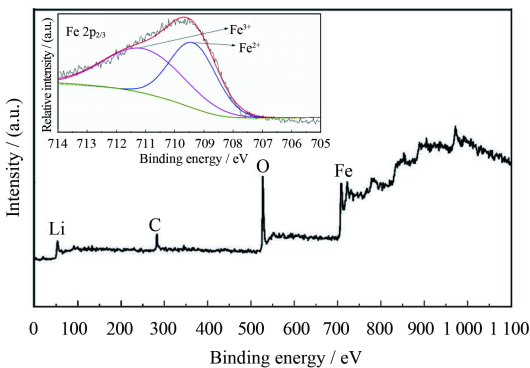
从表5可以看出,  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层材料结合强度平均值为27.6 MPa, 表明 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层与钢基体结合性良好。涂层破坏方式上, 涂层的断裂主要发生在涂层与基体的界面, 表明涂层内部致密, 孔隙裂纹较少, 涂层内部结合强度大于涂层与基体间的结合强度。同时, 参考UL467标准中(7.8项)进行了涂层接地棒的结合性测试<sup>[12]</sup>, 具体将 $\Phi 14 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 涂层棒一端斜切45°, 将被切一端置于虎钳之间, 两虎钳钳口间的距离比试样直径小1 mm, 施加外力使试样向下进入虎钳钳口, 试验结果显示, 涂层接地棒经结合性试验后没有出现涂层与钢的分离, 表明涂层接地材料结合性满足UL467标准要求。

在导电性能方面, 表5给出的测试结果显示 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的室温电阻率约为 $2.14 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ ,

表5  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层材料性能对比Table 5 Comparison of properties for  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  coating with other materials

Materials	Bonding strength / MPa	Resistivity / ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	Corrosion potential / V	Corrosion current density / ( $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Corrosion rate / ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )
$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	27.6	$\sim 2.14 \times 10^{-5}$	-0.112 8	0.065 2	$\sim 0.003 7$
$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	21.8	$\sim 3.60 \times 10^{-4}$	-0.211 2	0.109 2	$\sim 0.006 2$
Zinc	$\sim 5-15$	$\sim 5.20 \times 10^{-8}$	-1.167 8	7.204 0	$\sim 0.099 5$
Zn-Al alloy	$\sim 5-15$	$\sim 5.32 \times 10^{-8}$	-1.050 3	3.287 2	0.03-0.05
Copper		$\sim 1.68 \times 10^{-8}$	-0.128 6	0.511 3	$\sim 0.006$

接近文献报道的锂铁氧体烧结块体的电阻率<sup>[4-6]</sup>。与前期研制的 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 涂层相比<sup>[11]</sup>, 文中 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的导电性更好, 原因可能是 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层更加致密、孔隙率低, 且存在大量二价铁离子利于电子间的迁移。图4为 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的X射线光电子能谱(XPS), 插图为其Fe 2p<sub>3/2</sub>谱图。XPS全谱图中只有Li、C、O、Fe谱线, 一定程度上验证了 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的化学元素组成, 其中C为污染线, 可能来自样品暴露在空气中吸附的碳化合物。对Fe 2p<sub>3/2</sub>峰进行拟合发现(见图4插图),  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的晶格中含有大量 $\text{Fe}^{2+}$ , 通过 $\text{Fe}^{2+}$ 与 $\text{Fe}^{3+}$ 峰面积比计算出含量比约为1:0.95。铁氧体的导电机理主要是电子电荷的排序和电子间的相互作用引起的<sup>[4-7]</sup>。 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层中B位的 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 之间电子的迁移, 导致晶格中产生空穴, 当导带中的电子数远超过空穴时, 导带的电子就对导电起主要作用, 因此 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层因大量 $\text{Fe}^{2+}$ 的存在而使其具有良好的导电性能。

图4  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的XPS全谱图Fig.4 XPS spectra of the  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  coating

交流接地材料长期埋置于土壤中, 其耐土壤腐蚀性能的好坏直接影响其安全服役寿命。图5给出了 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层、 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 涂层、热镀锌层、热镀锌铝合金层和纯铜材料电化学测试时获得的

Tafel极化曲线。经极化曲线外推法确定的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的电化学腐蚀电位为-0.112 8 V, 腐蚀电流密度为0.065 2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。从表5中可以看出, 与钢质接地材料常用的热浸镀锌层、热浸镀锌铝合金层以及纯铜接地材料相比, 在强腐蚀介质3.5%NaCl溶液测试条件下,  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层的电化学腐蚀电位相对较大, 表明其发生腐蚀反应的难度较大。经极化曲线外推法确定的腐蚀电流密度计算的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层腐蚀速率约为0.0037 mm/a, 显著低于传统热浸镀锌层( $\sim 0.0995$  mm/a)、热浸镀锌铝合金层(0.03~0.05 mm/a), 且低于纯铜材料的腐蚀速率( $\sim 0.006$  mm/a), 显示 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层具有良好的耐电化学腐蚀特性, 用其涂覆在常规钢质接地材料表面可起到良好的腐蚀防护作用。

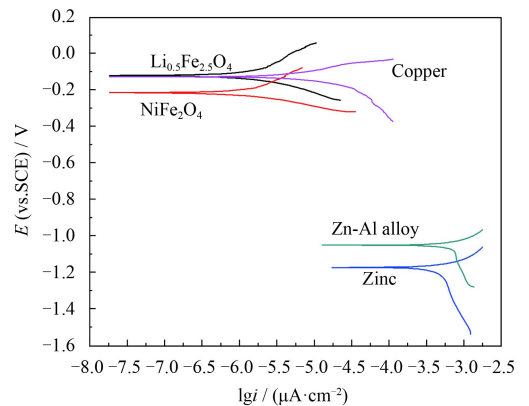


图5 不同交流接地材料的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of the different grounding materials

### 3 结论

(1) 以 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粉末为原料, 经高温固相法制备出纯净单相的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 粉体, 平均粒径为52.30  $\mu\text{m}$ , 高温煅烧和热处理均在 $\text{N}_2$ 保护气氛下进行, 煅烧温度为1 100  $^\circ\text{C}$ , 保温时间2 h, 快速冷却; 热处理温度为600  $^\circ\text{C}$ , 保温时间3 h, 随炉冷却。

(2) 等离子喷涂制备的 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层厚度约200  $\mu\text{m}$ , 涂层表面均匀致密, 平均孔隙率为4.1%, 且涂层结合强度平均值为27.6 MPa。良好的涂层质量及 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层晶格中大量存在 $\text{Fe}^{2+}$ , 电子在 $\text{Fe}^{2+}$ 与 $\text{Fe}^{3+}$ 间快速传递, 使涂层具有良好的导电性能, 电阻率平均值为 $2.14 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ , 作为接地材料可保证良好的通流能力。

(3)  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 涂层可有效提高钢基体的的耐腐蚀性能, 其在3.5%NaCl溶液介质中的平均腐蚀速率约为0.003 7 mm/a, 低于同等测试条件下紫铜的腐蚀速率( $\sim 0.006$  mm/a), 可较好满足钢质接地材料实际使用中土壤腐蚀的防护要求。

## 参考文献

- [1] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
HE J L, ZENG R. Grounding technology in power system[M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese).
- [2] 周佩朋, 王森, 李志忠, 等. 耐蚀性金属接地材料研究综述[J]. 电力建设, 2010, 31(8): 50-54.  
ZHOU P P, WANG S, LI Z Z, et al. Review of corrosion resistant metals for grounding[J]. Electric Power Construction, 2010, 1(8): 50-54 (in Chinese).
- [3] 张波, 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2569-2582.  
ZHANG B, HE J L, ZENG R. State of art and prospect of grounding technology in power system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2569-2582 (in Chinese).
- [4] 白铁城, 曾祥斌, 丘睦钦. 铁氧体电极材料的研究[J]. 材料保护, 1997, 30(1): 3-4.  
BAI T C, ZENG X B, QIU M Q. Study on ferrite electrode materials[J]. Materials Protection, 1997, 30(1): 3-4 (in Chinese).
- [5] 冯士明. 铁氧体电极—一种新型导电耐蚀材料[J]. 陶瓷研究, 1993, 8(4): 192-195.  
FENG S M. Ferrite electrode-A new type of conductive corrosion resistant materials[J]. Ceramic Studies Journal, 1993, 8(4): 192-195 (in Chinese).
- [6] 邓树滨. 外加电流阴极保护用陶瓷阳极[J]. 材料开发与应用, 1997, 12(6): 33-35.  
DENG S B. Ceramic anode for impressed current cathodic protection[J]. Development and Application of Materials, 1997, 12(6): 33-35 (in Chinese).
- [7] 焦小莉, 蒋荣立, 吕慧, 等. 离子掺杂改性铁氧体材料的研究进展[J]. 淮阴工学院学报, 2011, 20(3): 52-56.  
JIAO X L, JIANG R L, LV H, et al. Progress in the study of the doped ferrite material[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2011, 20(3): 52-56 (in Chinese).
- [8] 阎鑫, 胡小玲, 岳红, 等. 纳米级尖晶石型铁氧体制备进展[J]. 材料导报, 2002, 16(8): 42-44.  
YAN X, HU X L, YUE H, et al. Recent research progress in synthesis of spinel-type ferrite[J]. Materials Review, 2002, 16(8): 42-44 (in Chinese).
- [9] BABA P, ARGENTINA G, COURTNEY W, et al. Fabrication and properties of microwave lithium ferrites[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1972, 8(1): 83-94.
- [10] QI X W, ZHOU J, YUE Z X, et al. Permeability and microstructure of manganese modified lithium ferrite prepared by sol-gel auto-combustion method[J]. Materials Science and Engineering: B, 2003, 99(1): 278-281.
- [11] 祝志祥, 韩钰, 陈新, 等. 等离子喷涂制备直流接地极钢基体 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 防腐涂层[J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 37-41.  
ZHU Z X, HAN Y, CHEN X, et al. Nickel ferrite coatings on steel for DC ground electrode prepared by plasma spraying process[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(3): 37-41 (in Chinese).
- [12] UL 467-2007 grounding and bonding equipment[S]. Underwriters Laboratories Publications, 2007.
- [13] 杨震晓, 刘敏, 邓春明, 等. 热喷涂基体表面预处理技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 8-14.  
YANG Z X, LIU M, DENG C M, et al. Review on the pretreatment of surface for thermal spray process[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(2): 8-14 (in Chinese).
- [14] 郭智慧, 黄群英, 宋勇, 等. CLAM钢基体上大气等离子喷涂制备氧化铝涂层工艺研究[J]. 核科学与工程, 2008, 28(4): 295-299.  
GUO Z H, HUANG Q Y, SONG Y, et al. Study on aluminum oxide coating preparation on the CLAM steel by air plasma spraying process[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2008, 28(4): 295-299 (in Chinese).
- [15] 卢云深, 祝志祥, 韩钰, 等. 5种接地金属材料在北方碱性黄土中的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2014, 47(9): 67-69.  
LU Y S, ZHU Z X, HAN Y, et al. Corrosion behavior of five kinds of metal materials in alkaline loess soil of northern China[J]. Materials Protection, 2014, 47(9): 67-69 (in Chinese).