

选钛尾矿制备钒钛搪瓷及性能研究

舒明勇^{1,2}, 尹海英¹, 刘光辉², 胡瑞¹, 吴伯涛¹

(1.攀枝花学院 生物与化学工程学院, 四川 攀枝花 617000; 2.攀枝花市冶金辅助矿产资源综合利用重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要:目的 研究攀枝花选钛尾矿制备出钒钛搪瓷的表面形貌、密着性能及在质量分数为 30% H₂SO₄ 溶液中的耐酸腐蚀性能。方法 将选钛尾矿煅烧或制备成 V₂O₅ 助剂后, 分别加入到搪瓷原料中, 经熔融淬化, 制备出搪瓷釉料, 釉料制浆涂覆在脱碳热处理后的 Q235 碳钢表面, 经 850 °C 搪烧制备出钒钛搪瓷涂层, 并通过 XRD、SEM 及 EDS 研究其涂层的表面形貌、密着性能及耐酸性能。结果 在搪瓷原料中直接加入煅烧选钛尾矿的质量分数高于 8.4% 时, 制备出的搪瓷涂层表面存在明显的气泡, 瓷釉面不细腻、光泽度低、耐酸性能不足, 而在搪瓷釉料中添加 V₂O₅ 质量分数为 3.5%~5% 的助剂时, 制备的搪瓷涂层密着性能、釉面光泽度及化学耐酸性能显著提高。结论 将选钛尾矿制成 V₂O₅ 助剂添加釉料中制备的搪瓷涂层界面易形成 Fe-V 过渡层, 利于提高搪瓷的密着性能。在酸溶液中, 瓷釉面形成含有 SiO₂ 的保护膜, 进一步阻止被酸腐蚀, 提高了耐酸性能。

关键词: 选钛尾矿; 搪瓷涂层; 密着性; 耐酸性

中图分类号: TG148 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)10-0013-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.003

Preparation and Properties of V-Ti Enamel by Ilmenite Tailings

SHU Ming-yong^{1,2}, YIN Hai-ying¹, LIU Guang-hui², HU Rui¹, WU Bo-tao¹

(1.School of Biological and Chemical Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;

2.Comprehensive Utilization Key Laboratory of Metallurgical Assistance of Mineral Resources of Panzhihua City, Panzhihua 617000, China)

ABSTRACT: The work aims to research surface morphology, adherence of V-Ti enamel prepared with Panzhihua ilmenite tailings as well as its acid corrosion resistance in 30% H₂SO₄ solution. The ilmenite tailings were added to enamel raw materials after calcination or being made into V₂O₅ assistant, then fused and quenched to prepare enamel glaze. Then glaze pulping was coated on surface of Q235 carbon steel which was subject to decarburization and heat treatment so as to prepare V-Ti enamel coating in 850 °C enameling burning. And surface morphology, adherence and acid corrosion resistance of its coating were studied by means of XRD, SEM and EDS. If mass fraction of the calcined titanium tailings directly added to enamel was higher than 8.4%, surface of the prepared enamel coating was subject to evident bubbles, rough glaze surface, low glossiness and insuf-

收稿时间: 2016-03-31; 修订时间: 2016-06-09

Received: 2016-03-31; Revised: 2016-06-09

基金项目: 四川省重点应用基础研究项目 (2016JY0230); 攀枝花市产业推进项目 (2015CY-G-12)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Sichuan Province (2016JY0230) and Industry Promotion Project of Panzhihua City (2015CY-G-12)

作者简介: 舒明勇 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为矿产资源综合利用及搪瓷材料制备技术。

Biography: SHU Ming-yong (1979—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: comprehensive utilization of mineral resources and enamel materials.

ficient acid resistance. However, when the mass fraction of V_2O_5 additive added to the enamel glaze was 3.5%~ 5%, the surface morphology, adherence and acid corrosion resistance of the prepared enamel coating were improved significantly. The making of ilmenite tailings into V_2O_5 assistant and addition of enamel coating interface prepared in the glaze may form Fe-V transition layer easily, contributing to improving the adherence of enamel. Meanwhile, the SiO_2 protective film forms on the enamel surface in the acid solution to prevent acid corrosion and improve its corrosion resistance.

KEY WORDS: ilmenite tailings; enamel; adherence; acid resistance

搪瓷是金属与瓷釉在高温条件下烧制熔融结合为一体的复合材料^[1], 它兼有钢的强度、延伸性和玻璃的耐酸碱腐蚀、抗氧化、易洗涤、无毒、无味、光滑耐磨等优良特性, 因此搪瓷被广泛应用于化工反应釜、家用电器、厨具、建筑外墙、卫生设施等方面^[2]。

搪瓷瓷釉主要以长石、石英等原料, 易溶的氧化硼、氧化锌、氧化钠、氧化钴等化工原料, 以及其他特性原料按一定比例配合, 经 1250 ~ 1300 °C 高温熔融后, 急剧冷却成粒状或片状的硅硼酸盐搪瓷釉块, 釉块经添加助磨物粉碎后, 在金属基体表面以一定的温度烧制成多面体形式组合的 SiO_2 - B_2O_3 - R_2O 连续网架结构的涂层^[3]。为提高搪瓷釉层的性能, 需要在配方中增加 SiO_2 、 TiO_2 、 CoO 和 NiO 等成分的含量, 能在一定程度上形成氧化物合金层, 以确保瓷层与金属间的牢固结合^[4]。但大规模生产各种搪瓷制品时, 需要大批量使用这些原料, 使得这些原材料供应紧张, 价格日趋上涨, 为了妥善解决这一矛盾, 设法寻求一条能降低瓷釉中钛、钴和镍等昂贵金属用量的有效途径。因此, 在搪瓷烧制过程中添加适量的天然废弃矿物, 能够有效利用矿物中的有效金属元素, 降低搪瓷釉料生产的成本。

攀枝花选钛尾矿中主要矿物为钛辉石、长石、钛铁矿、钛磁铁矿、角闪石、橄榄石等, 化学成分(以质量分数计)含有 SiO_2 32% ~ 38%、 TiO_2 7% ~ 10%、 V_2O_5 0.6% ~ 0.9%、 Al_2O_3 9.80% ~ 11%、 CaO 9.6% ~ 14%、 Co 0.04% ~ 0.08% 等十几种搪瓷制备所需的原料, SiO_2 可以为搪瓷制备提供基础剂, Ti 、 Co 、 Al 、 V 可进一步增强搪瓷釉层的综合性能。因此, 以长石、石英为主体原料, 配加一定量的选钛尾矿制备搪瓷釉料, 采用无底釉磨加钒助剂一次涂搪法制备含钒钛搪瓷涂层, 研究其釉面的形貌、密着性能及耐酸性能。通过研究为钒钛搪瓷涂层的制备方法及选钛尾矿废弃物的综合回收利用提供借

鉴, 对减少尾矿的堆放量, 降低尾矿库的负荷, 改善矿区生态环境具有重要的参考意义^[5]。

1 实验

1.1 材料及仪器

攀枝花钒钛磁铁矿选钛尾矿, 包括长石、石英、硼砂、纯碱、硝酸钠、氧化钴, 化学成分结果见表 1。攀钢 2 mm 厚 Q235 热轧低碳钢板。主要设备有高温马弗炉(上海广益 ECF1-10-14)、X 射线荧光光谱仪(日本 SHIMADZU XRF-1800)、X 射线衍射仪(日本理学电机 18KW\MAX-2550)、SEM (HITACHI SU-1500)、切割机(上海金相 QG-80Z)、研磨抛光机(上海金相 YMP-1)、镶嵌机(上海金相 BXQ-2)。

表 1 选钛尾矿化学成分分析结果

Tab.1 The chemical composition analysis results of ilmenite tailings

成分	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	V_2O_5	%
质量分数	38.26	15.96	13.43	11.48	10.63	7.11	0.92	
元素	Na_2O	K_2O	MnO_2	Co_2O_3	NiO	P_2O_5	SrO	
质量分数	1.68	0.12	0.21	0.04	0.01	0.06	0.06	

1.2 方法

1.2.1 搪瓷釉的制备

1) 将选钛尾矿在 780 ~ 820 °C 温度下煅烧 20 ~ 30 min, 待有机杂质成分挥发或烧尽后快速倒入冷水中淬化, 干燥, 得到煅烧尾矿。

2) 将长石、石英等原料, 易溶的硼砂、氧化锌、碳酸钠、硝酸钠、氧化钴等化工原料及煅烧选钛尾矿按一定比例混匀, 原料化学组成见表 2。转入坩埚加热至 850 °C 并保温 1 h, 去除生料中的结晶水分及碳酸盐(硼砂失结晶水温度 240 ~ 260 °C, 硝酸盐分解温度 420 ~ 480 °C, 碳酸盐分解温度

845 ~ 880 °C) 分解后继续升温。

表 2 主要原料化学组成

原料	长石	石英	硼砂	纯碱	硝酸钠	碳酸锂	萤石	氧化钴	氧化锌	煅尾矿
质量分数	26.5	27.5	19	6.9	5.6	0.7	3.9	0.6	0.9	8.4

3) 物料在 1250 ~ 1300 °C 下保温 1 ~ 1.5 h, 获得均匀的熔融瓷釉料, 拉丝无结、无砂粒, 将其倒入冷水中急剧冷却淬化成粒状或片状的硼硅酸盐釉块。釉块在 130 °C 下干燥 30 min 后, 加入一定量的硼砂、亚硝酸钠、粘土、膨润土一起粉碎制得搪瓷釉料。

4) 将硼酸、碳酸钡、煅烧尾矿、钒酸钠、氧化钛、氧化镍混合均匀并转入刚玉坩埚中, 加热至 1050 ~ 1100 °C, 保温 30 min, 熔融后倒入冷水中淬化, 干燥, 粉碎, 制得 V₂O₅ 助剂, 化学组成见表 3。在未加入选钛尾矿制备的瓷釉中加入硼砂、亚硝酸钠、粘土、膨润土及不同比例的钒助剂一起粉碎制得钒钛搪瓷釉料, 化学组成见表 4。

表 3 钒助剂主要化学组成

成分	B ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	NiO
质量分数	20.6	54.7	19.4	1.3	2.8	1.2

表 4 搪瓷釉料化学组成

成分	SiO ₂	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅
质量分数	65.36	2.15	2.53	0.48	10.53	4.11	0.74
成分	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	Co ₂ O ₃	NiO	ZnO	P ₂ O ₅
质量分数	11.53	0.27	0.14	0.29	0.25	1.47	0.14

1.2.2 搪瓷涂层的烧制

将搪碳钢 Q235 切割为 100 mm×100 mm×1.8 mm 的试样, 清洗去除油污, 在 720 °C 下热处理脱碳 20 min, 冷却后用 240CW 的 Al₂O₃ 砂纸打磨, 显出银灰色效果, 无残留氧化铁膜、粘砂, 用无水乙醇洗脱。将搪瓷料浆喷涂于上述金属基体表面, 厚度 0.6 ~ 0.8 mm, 130 °C 下干燥 30 min, 在 850 °C 烧制 12 min, 取出冷却, 制得钒钛搪瓷涂层。

1.3 搪瓷涂层性能分析

1.3.1 密着性能

将搪瓷涂层切割为 1.5 mm×1.5 mm 的试样, 用 240CW 的 Al₂O₃ 砂纸研磨试样四周至光滑、平整, 瓷层无脱瓷、开裂。将试样侧面放入镶嵌机中,

在 140 °C 下镶嵌好, 将镶嵌好的涂层侧面在抛光机上用 1200CW 的 Al₂O₃ 砂纸及金刚石研磨膏研磨至光亮无划痕。通过 SEM 扫描分析搪瓷涂层界面的密着性能。

1.3.2 表面形貌

将搪瓷涂层切割为 1.5 mm×1.5 mm 的试样, 在 Al₂O₃ 砂纸上研磨去除试样背面的高温氧化层。搪瓷层表面溅射喷金后通过 SEM 扫描分析瓷层的鳞爆及气孔现象。

1.3.3 耐酸性能

将搪瓷涂层切割为 4 mm×4 mm 的试样, 四周边缘打磨后, 瓷面平整放入 15 mm 高、φ50 mm 的 PVC 管磨具中, 浇入 $m_{\text{环氧树脂}}:m_{\text{乙二醇}}=4:1$ 的树脂, 固化 24 h, 取出放入质量分数为 30% 的 H₂SO₄ 溶液中煮沸 48 h, 取出 40 °C 烘干, 称量搪瓷涂层的质量变化, 计算涂层的酸腐蚀质量 m_n , 并通过 SEM 扫描分析涂层的耐酸腐蚀性能。

$$m_n = \frac{(m_1 - m_2) \times 10^3}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中: m_n 为酸腐蚀质量 (mg); m_1 为腐蚀前搪瓷的质量 (mg); m_2 为腐蚀后搪瓷的质量 (mg); S 为搪瓷釉面的面积 (cm²); t 为浸泡腐蚀的时间 (d)。

2 结果及分析

2.1 XRD 分析

XRD 图谱采用固定铜靶 X 射线测试, 由图 1 可知, XRD 图谱中选钛尾矿的主晶相为斜长石 Na(AlSi₃O₈)、钙长石 Ca(Al₂Si₂O₈)、镁橄榄石 (Mg,Fe)₂[SiO₄]、钛辉石 FeTiO₃、黑云母 Al₂K₂O₆Si 等, 并伴有少量的钛闪石、伊丁石、绿泥石。煅烧选钛尾矿的 XRD 图谱与原选钛尾矿中的物相略有变化, 钛辉石、伊丁石、绿泥石的熔点较高, 初晶相区内的主晶相没有明显的变化, 长石类、石英类矿物的衍射峰部分消失或明显减弱, 说明淬化过程使尾矿中的矿物在急速降温时引起了晶相的变化, 利于釉料烧制过程中尾矿的熔融分解^[6]。

由图 2 可知, 未加尾矿搪瓷原料通过熔融后主要以 NaAlSiO₄ 物相为主, 析出的晶相与搪瓷组成的 SiO₂ 相一致, 加入选钛尾矿或钒助剂后的搪瓷

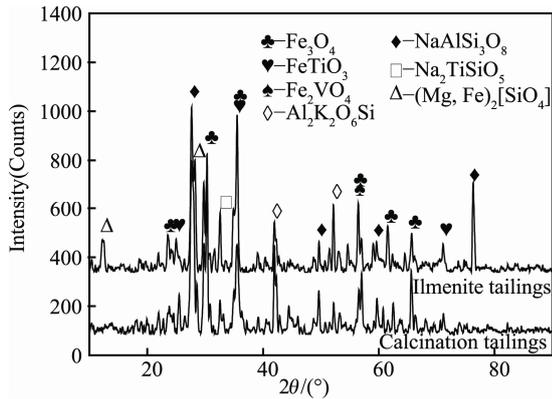


图1 不同选钛尾矿的 XRD 图谱

Fig.1 The XRD pattern of different ilmenite tailings

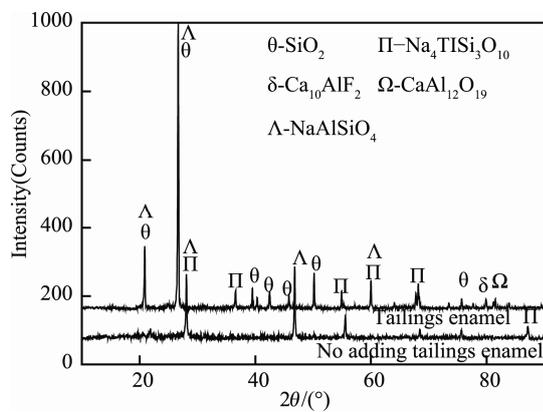


图2 不同搪瓷釉料的 XRD 图谱

Fig.2 The XRD pattern of different enamel glaze

釉料 XRD 的衍射峰多且强度高, 说明釉料中析出了更多的物相, 析晶性能更好, 晶化率更高, 因此,

随着析出晶相的增加, 利于搪瓷涂层性能的改善。

2.2 密着性能

将未加选钛尾矿制备的搪瓷釉料和添加原料质量分数 8.4%的煅烧尾矿制备的搪瓷釉料分别添加 3.5%和 5% (质量分数) 的钒助剂制备成搪瓷釉料, 加水调浆喷涂于脱碳处理的 Q235 表面, 130 °C 烘干, 850 °C 搪烧 12 min, 取出冷却, 制得搪瓷涂层。按 1.3.1 的实验方法进行涂层密着性能的测试, 结果如图 3 所示。

由图 3a、b 可知, 未加煅烧尾矿的搪瓷涂层与 Q235 碳钢界面的密着效果一般, 形成的氧化铁、铁的合金过渡层相对较少, 由于瓷釉料中 Co_2O_3 的含量 (<0.6%) 较低, 搪烧过程中形成的氧化铁枝晶不够, 密着性能一般, 使瓷层与钢板的联接不够紧密, 降低了瓷层的密着效果^[8]。加入煅烧尾矿的搪瓷涂层的枝晶明显增多, 枝晶的突出岛、锚状物更多。枝晶颗粒越多, 氧化铁-铁相含量就越多, 密着效果越好^[9]。从图 3d 的 EDS 能谱图可分析出 V、Ti 元素的存在, 由于选钛尾矿中含有 V、Ti, 瓷层中的 V 元素促进金属基体与搪瓷釉层的界面上形成 Fe-V 合金相, Fe 的扩散和氧化铁的熔融使金属铁的晶格活化和畸变, 促进 Si-O-Fe 相互扩散, 形成更多的突出岛、锚状物, 使搪瓷釉层与金属基体中间层 Fe-V 紧密结合, 增加搪瓷涂层的密着性^[10]。

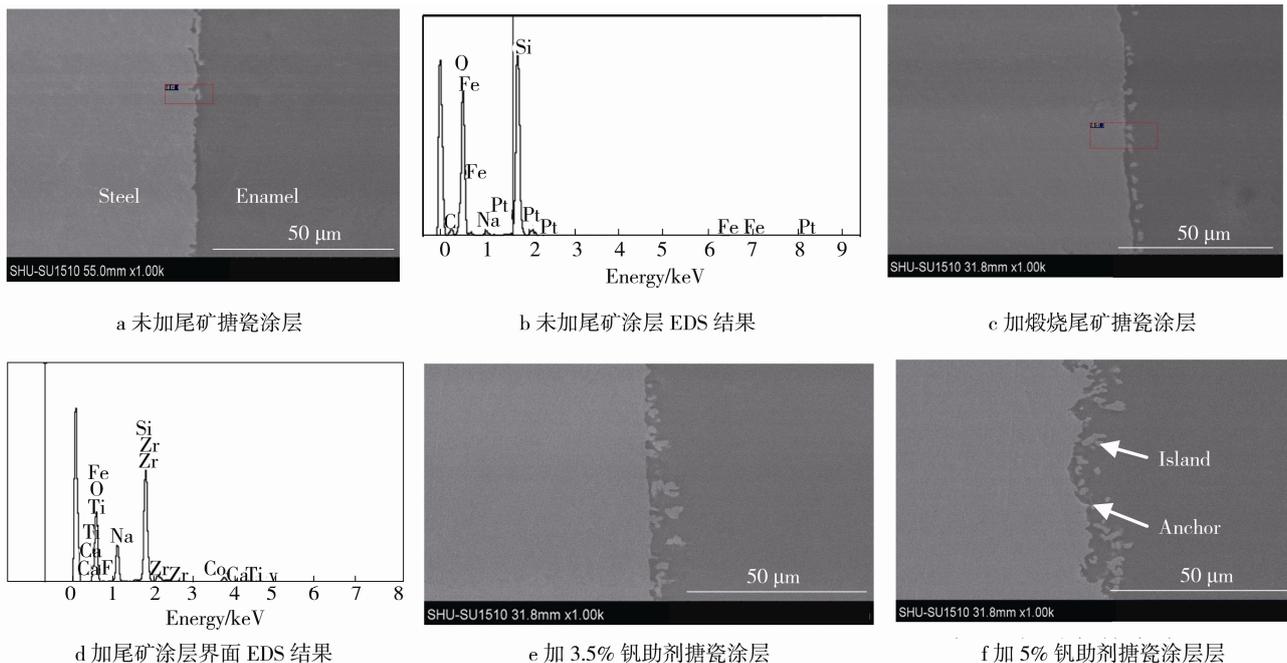


图3 搪瓷涂层界面 SEM-EDS 结果

Fig.3 The SEM and EDS results of enamel coating interface

由图 3e、f 可知，将煅烧尾矿、钒酸钠与硼酸制备成钒助剂，以搪瓷助磨物的形成引入，随着钒助剂加入量的增加，枝晶颗粒明显增多，氧化铁-铁相越多，密着效果越好。钒助剂中的 B_2O_3 、 V_2O_5 、 NiO 主要富集在瓷釉与金属铁之间，利于瓷釉与金属的亲密接触，促进铁与氧化铁的溶解与扩散。 B_2O_3 能促进界面的浸润，改变界面的组成、结构和性能，促进瓷釉与金属铁基板相互扩散，促使瓷釉与金属达到化学势平衡，在瓷釉与金属铁间更容

易产生一层 $Si-O-Fe-V$ 中间过渡层，与金属基板产生牢固的化学键力密着，为搪瓷涂层产生良好的密着性能创造条件^[11]。

2.3 表面形貌

按 1.3.2 方法烧制的搪瓷涂层进行镶嵌及涂层表面研磨后，通过 SEM 扫描分析瓷釉面的鳞爆及气孔现象，结果如图 4。

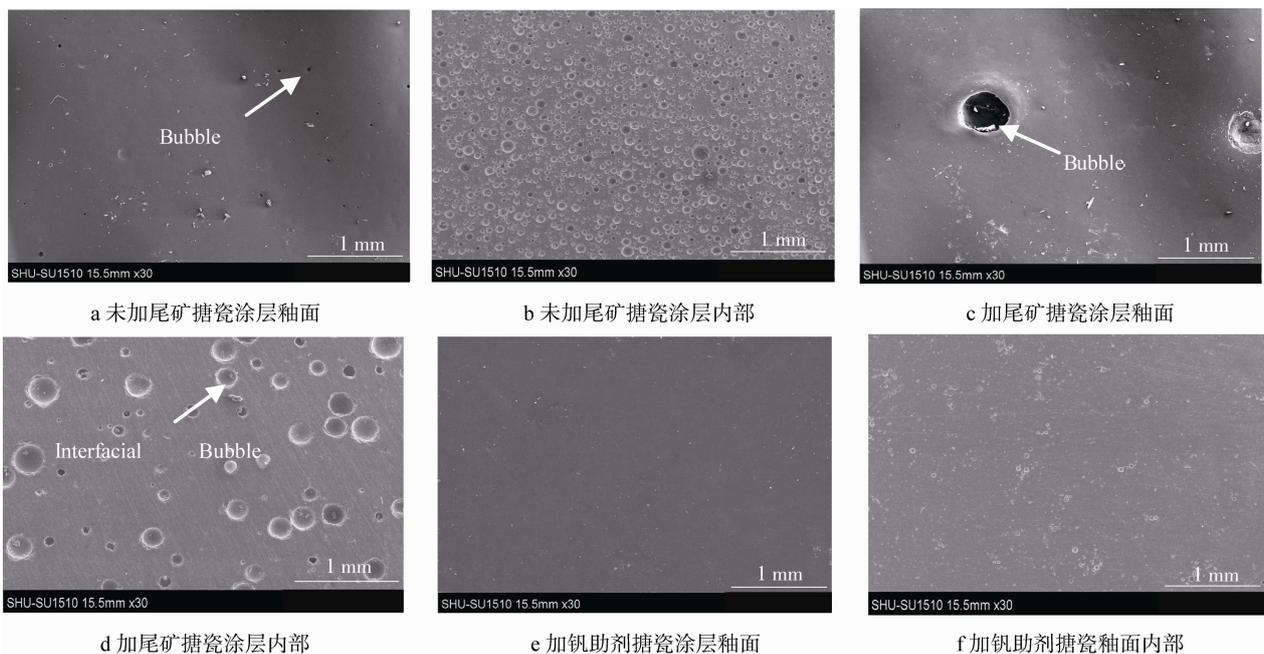


图 4 不同搪瓷表面形貌及内部的 SEM 结果

Fig.4 The SEM images of different enamel surface and interface

由图 4a、b 可知，瓷釉面未出现鳞爆现象，但生成较多的微小气孔，由于瓷釉直接搪烧于碳钢表面，碳钢内部缺陷和结晶水在高温下产生的 H_2 大量停留在搪瓷釉内部，由于缺少吸收 H 的载体，内部界面存有大量密集的 H_2 ，少量 H_2 溢出釉面层形成细小的微气孔^[12]。图 4c、d 是加入煅烧尾矿的搪瓷釉面的 SEM 图片，当煅尾矿添加质量分数超过 8.4% 时，由于钛辉石、橄榄石的熔点较高，未熔融反应的矿物以生料存于瓷釉料中。搪烧釉料主体在 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 时已熔融软化，但煅烧尾矿中带入极少量的生料矿物以细小晶粒混合在熔融体中，高温时釉料涂搪带入的水与碳钢生成的 H_2 聚集于生料晶粒周围，当聚集的气体达到一定程度时，压力增大溢出瓷釉表面，气体通道没有及时被弥合而产生明显的气泡，使瓷釉表面无光、细腻感降低、化学稳定性变差^[13-14]。

由图 4e、f 可知，搪瓷釉面光滑、平整，无任何鳞爆及针孔出现，釉面内部出现的界面气孔也较少。由于瓷釉搪烧时以助磨料的形式加入了钒助剂，助剂中含有质量分数为 20% 的 B_2O_3 、55% 的 BaO 和 1.2% 的 NiO ，由于 B_2O_3 和 BaO 作为助熔剂和光泽剂，有利于提高瓷釉面的密着性能、釉面光泽度、细腻感和化学稳定性。同时， NiO 有利于抑制搪瓷鳞爆和细小气孔的出现。 Ni 是面心立方结构，多以 dsp^2 杂化，易与 H 的孤对电子杂化形成配位键，对氢具有较强的吸收作用^[15]。H 来源于碳钢内部晶界或位错等缺陷或搪瓷釉涂搪时带入的水，为减少 H 结合形成 H_2 ，对瓷釉面产生鳞爆或气孔，高温下 NiO 不仅被 H 还原生成金属 Ni 。同时，金属 Ni 除吸收 H 外，部分沉积于碳钢基体表面，进一步阻碍了金属铁与水发生氧化还原反应，阻碍生成的氢进入金属铁内部，减少了 H_2 的

生成量,降低了氢气压力,防止搪瓷鳞爆或气孔缺陷的产生。

2.4 耐酸性能

按 1.3.3 的方法烧制的搪瓷涂层用环氧树脂固

化 24 h,放入 30%的 H₂SO₄ 溶液中煮沸 48 h,取出 40 °C 的温度下烘干,称量计算瓷层的酸腐蚀量,并通过 SEM 扫描分析瓷釉面的耐酸腐蚀情况,结果见图 5。

搪瓷釉面的耐酸性主要取决于 SiO_4 骨架

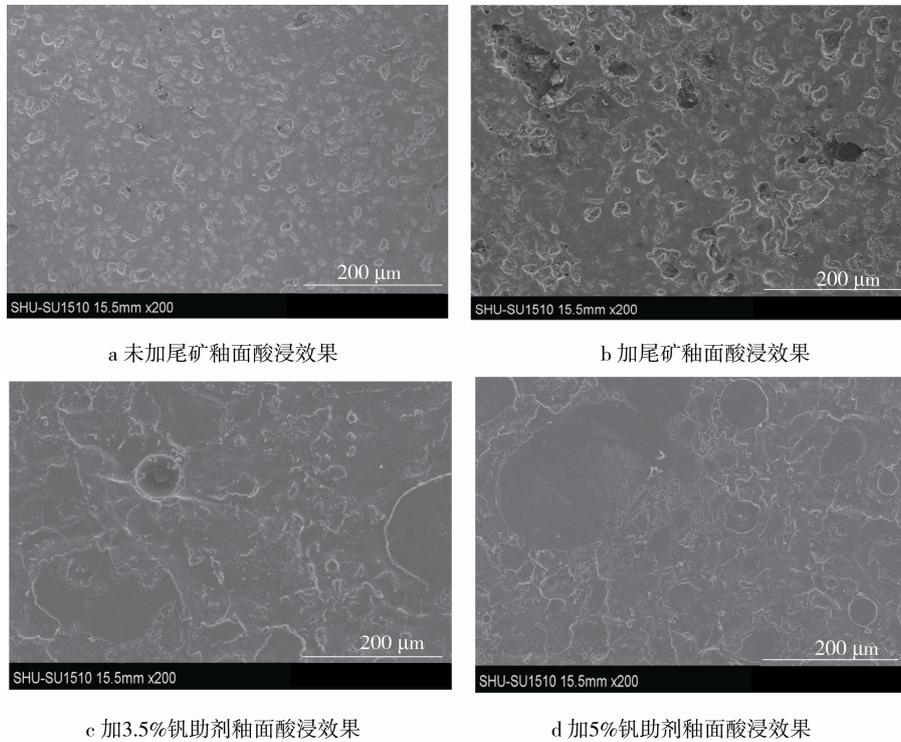


图 5 不同搪瓷釉面在 30% H₂SO₄ 腐蚀后 SEM

Fig.5 The different enamel coating corrosion images in 30% H₂SO₄

的连续程度, SiO₂ 含量越高,瓷釉面的致密程度越高,釉面的耐酸性就越高。相反, R₂O 的含量越高, Li⁺、Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 越容易阻断 SiO_4 结构,形成 Si—R—O 结构(R 为碱金属离子),釉面的耐酸性能降低。由图 5 可知,未添加煅烧尾矿制备的搪瓷釉面的酸腐蚀量为 10.46 mg/(cm²·d),当加入煅烧尾矿后,未熔融矿物生料存于瓷釉料中,阻断了 SiO_4 骨架的连续程度,釉面的酸腐蚀量为 11.34 mg/(cm²·d),同时,瓷釉面微观形貌的局部点蚀程度加大,釉面的腐蚀速度增加,耐酸性能降低^[16-17]。

表 5 不同搪瓷釉面在 30% H₂SO₄ 中的酸腐蚀量

Tab.5 The mass of acid corrosion of different enamel coating in 30% H₂SO₄

序号	酸浸前 质量/g	酸浸后 质量/g	减少 质量/g	瓷釉面 积/cm ²	酸腐蚀量 /(mg·cm ⁻² ·d ⁻¹)
A	37.7244	37.6373	0.0871	4.16	10.46
B	37.3981	37.3056	0.0925	4.08	11.34
C	37.1483	37.0897	0.0586	4.04	7.25
D	36.2920	36.2571	0.0349	4.22	4.13

钒助剂以添加物的形式加入到搪瓷釉料中,随着钒助剂的添加质量分数由 3.5%增加到 5%后,釉面的酸腐蚀量由 7.25 mg/(cm²·d)降低到 4.13 mg/(cm²·d),说明瓷釉面的耐酸性能得到提高。钒助剂中的 Ba、V 离子添加到搪瓷釉料中,搪烧时熔融态下进入到 SiO_4 结构中,使结构更稳定。当搪瓷层浸泡在 30%的 H₂SO₄ 溶液时,搪瓷釉面结构稳定,不易被腐蚀破坏,虽有少量的 Li⁺、Na⁺、K⁺、Ca²⁺等碱金属溶解出,当瓷层主体结构完整,表面裸露出 SiO₂ 膜层在 H₂SO₄ 溶液中不溶解,随着腐蚀时间的增加, SiO₂ 膜层不断增厚,在搪瓷层表面富集形成一个 SiO₂ 保护层,进一步阻止 H₂SO₄ 溶液对釉面的腐蚀。

3 结论

以攀枝花选钛尾矿制备的钒钛搪瓷釉料,并结合当地攀钢生产的热轧低碳钢 Q235,通过对 Q235

进行脱碳处理后制备出钒钛搪瓷涂层, 并研究其搪瓷涂层的性能。研究表明, 直接加入煅烧选钛尾矿制备的搪瓷涂层, 对涂层密着性能有一定提高, 当煅烧选钛尾矿添加质量分数超过 8.4% 时, 钛辉石、橄榄石含量增加, 由于具有较高的熔点, 未熔融反应的钛辉石邓生料残存于瓷釉料中, 搪瓷釉层表面明显产生气泡, 使瓷釉表面无光、不细腻、耐酸性能降低。

将煅烧选钛尾矿与硼酸、碳酸钡、钒酸钠、氧化镍混合加热熔融后淬化, 制得 V_2O_5 助剂, 将助剂加入到未添加选钛尾矿的搪瓷釉料中, 同样在脱碳后的 Q235 碳钢表面烧制成钒钛搪瓷涂层。由于助剂中含有助熔剂 B_2O_3 、光泽剂 BaO 及吸氢剂 NiO , 能够显著提高搪瓷釉面的密着性能、光泽度、细腻感及化学耐酸性能。

参考文献

- [1] 卢进标. 中国搪瓷手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 54—58.
LU Jin-biao. Chinese Manual of Enamel[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001: 54—58.
- [2] 张明喆, 佟金, 安键, 等. 一种搪瓷涂层的磨料磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2001(1): 65—66.
ZHANG Ming-zhe, TONG Jin, AN Jian, et. Abrasive Wear Behavior of an Enamel Coating[J]. Tribology, 2001(1): 65—66.
- [3] 蒋伟忠, 厉益骏. 搪瓷与搪玻璃[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2015: 54—152.
JIANG Wei-zhong, LI Yi-jun, Enamel and Glass Lining[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2015: 54—152.
- [4] YANG X, JHA A, BRYDSON R. An Analysis of the Microstructure and Interfacial Chemistry of Steel-Enamel Interface[J]. Thin Solid Films, 2003, 25: 33—45.
- [5] 张总华, 张桂芳. 选钛尾矿分选钽实验研究[J]. 中国矿业, 2003(11): 35.
ZHANG Zong-hua, ZHANG Gui-fang. Study on Test of Separating Scandium from Tailing of Titanium Separation[J]. China Mining Magazine, 2003(11): 35.
- [6] 刘明, 徐利华, 邸云萍, 等. 攀钢尾矿原位合成 $TiCN/Fe_3Si$ 复合材料[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(8): 575.
LIU Ming, XU Li-hua, DI Yun-ping, et al. $TiCN/Fe_3Si$ Composite Synthesized by In-site Carbothermic Reduction from Tailings of Panzhihua Steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007(8): 575.
- [7] 叶佳意, 钱蕙春, 蒋伟忠, 等. 超细镍酸锂晶体对搪瓷密着强度影响的研究[J]. 玻璃与搪瓷, 2008(4): 5—7.
YE Jia-yi, QIAN Hui-chun, JIANG Wei-zhong, et. Study on In Fluence of Mill Addition of Super Fine $Li_2Ni_8O_{10}$ Crystals on Enamel Adherent Strength[J]. Glass & Enamel, 2008(4): 5—7.
- [8] ROSSI S, PARZIANI N, ZANELLA C. Abrasion Resistance of Vitreous Enamel Coatings in Function of Frit Composition and Particles Presence[J]. Wear, 2015, 562: 702—709.
- [9] YILMAZ S, BAYRAK G, SEN S. Structural Characterization of Basalt-based Glass-Ceramic Coatings[J]. Mater Des, 2006(27): 1092—1096.
- [10] 石王涛, 钱蕙春, 蒋伟忠, 等. 低温覆铝锌钢板搪瓷的密着性能研究[J]. 玻璃与搪瓷, 2008(01): 11—15.
SHI Wang-tao, QIAN Hui-chun, JIANG Wei-zhong, et. A Study on Mechanism of Adherence of Enamel to Al-Zn Alloy Coated Steel[J]. Glass & Enamel, 2008(1): 11—15.
- [11] YANG X, JHA A, BRYDSON R, et. An Analysis of the Microstructure and Interfacial Chemistry of Steel-Enamel Interface[J]. Thin Solid Films, 2014, 452: 880—887.
- [12] YANG X, JHA A, BRYDSON R, et. The Effects of a Nickel Oxide Precoat on the Gas Bubble Structures and Fish-scaling Resistance in Vitreous Enamels[J]. Materials Science and Engineering, 2004, 32: 254—261.
- [13] 吕真, 钱蕙春, 蒋伟忠, 等. 超细镍酸锂晶体对搪瓷鳞爆的影响研究[J]. 玻璃与搪瓷, 2007(3): 10—11.
LYU Zhen, QIAN Hui-chun, JIANG Wei-zhong, et. Study of In Fluence of Mill Addition of Super Fine $Li_2Ni_8O_{10}$ Crystals on Enamel Fish Scale[J]. Glass & Enamel, 2007(3): 10—11.
- [14] 张万灵, 刘建容. 冷轧搪瓷钢板抗鳞爆性能检测方法评述[J]. 武钢技术, 2009(6): 44—45.
ZHANG Wan-ling, LIU Jian-rong. Review on Test Method for Fish-Scaling Resistance of the Cold Rolled Enamel Steel Sheet[J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology, 2009(6): 44—45.
- [15] 景平, 蒋伟忠. 氧化镍在搪瓷密着及抑制鳞爆中的作用[J]. 中国搪瓷, 2003(S2): 22—23.
JING Ping, JIANG Wei-zhong. Nickel Oxide in Enamel Indiscrete and the Function of Fish-scaling Blasting[J]. China Enamel. 2003(S2): 22—23.
- [16] 张春华, 张松, 杨洪刚, 等. 高温钛合金表面稀土改性搪瓷涂层的制备[J]. 金属热处理, 2007(11): 49—50.
ZHANG Chun-hua, ZHANG Song, YANG Hong-gang, et al. Preparation of Enamel Coating Containing Cerium Oxide on High Temperature Titanium Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2007(11): 49—50.
- [17] 吴静沛, 卢建树. 低温无底釉搪瓷涂层制备及性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(8): 130—132.
WU Jing-pei, LU Jian-shu. Preparation and Performance Study of Low Firing Non-engage Enamel Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(8): 130—132.