

表面强化及功能化

# 舰船甲板用耐烧蚀涂层结构与性能的研究

张巍, 马磊, 赵许群, 王晓东, 张涛

(中国科学院大连化学物理研究所 航天催化与新材料研究室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** **目的** 通过双层涂层材料结构, 获得性能优良的适用于舰船甲板的耐烧蚀涂层。**方法** 以环氧树脂为底层基体材料, 加入不同的助剂和填料, 再以莫来石为表层基体材料, 加入不同的耐火原料, 制备出一种适用于舰船甲板的耐烧蚀涂层。通过附着力和剪切力测试对耐烧蚀涂层的底层进行性能研究, 通过常温抗折强度、常温耐压强度、耐火度、导热系数、热膨胀系数测试对耐烧蚀涂层的表层进行性能研究, 通过耐盐雾性能、老化性能、耐冲击性能、隔热性能和耐烧蚀性能测试对耐烧蚀复合涂层进行性能研究。最后, 考察了耐烧蚀涂层的涂抹工艺。**结果** 该耐烧蚀涂层材料底层附着力为 24.03 MPa, 剪切力为 7.8 MPa, 表层耐火度为 1580 °C, 常温抗折强度为 9.1 MPa, 耐压强度为 65.7 MPa, 导热系数为 0.762 W/(m·K)。涂层具有良好的耐盐雾性能、老化性能、耐冲击性能、隔热性能和耐烧蚀性能。**结论** 该耐烧蚀涂层材料可用于舰船甲板表面的外防护, 并且具有良好的涂抹施工性。

**关键词:** 舰船; 甲板; 耐烧蚀; 涂层; 隔热; 莫来石

**中图分类号:** U668; TQ630.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0169-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.024

## Research on Structure and Properties of an Ablation-Resistant Coating for Ship Deck

ZHANG Wei, MA Lei, ZHAO Xu-qun, WANG Xiao-dong, ZHANG Tao

(Dalian Institute of Chemical and Physics, Chinese Academy of Science,  
Laboratory of Catalysts and New Materials for Aerospace, Dalian 116023, China)

**ABSTRACT:** The work aims to make an ablation-resistant coating with excellent properties for ship deck from a double layer coating material structure. With epoxy resin as bottom base material and mullite as surface base material, a kind of ablation-resistant coating material for ship deck was prepared by adding several adjuvants and filler as well as various refractory raw materials. Properties of the ablation-resistant coating bottom were studied by testing adhesive force and shear force. Properties of the ablation-resistant coating surface were studied by testing modulus of rupture, cold crushing strength, refractoriness, thermal conductivity and coefficient of thermal expansion. Properties of the ablation-resistant composite coating were studied by testing neutral salt spray resistance, artificial weathering-resistant property, impact resistance, heat-insulating property and ablation resistance. At last, smear process of the ablation-resistant coating was investigated. Adhesion of the coating bottom was up

收稿日期: 2017-12-06; 修订日期: 2018-02-15

Received: 2017-12-06; Revised: 2018-02-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (YYYJ-1106-3)

Fund: Supported by Project Research from the Innovative Program of the CAS (YYYJ-1106-3)

作者简介: 张巍 (1982—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为材料学。

Biography: ZHANG Wei (1982—), Male, Master, Assistant researcher, Research focus: materials science.

通讯作者: 马磊 (1973—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为化学。

Corresponding author: MA Lei (1973—), Male, Master, Associate researcher, Research focus: chemistry.

to 24.03 MPa, shear force 7.8 MPa, surface coating refractoriness up to 1580 °C, modulus of rupture 9.1 MPa, cold crushing strength 65.7 MPa and thermal conductivity 0.762 W/(m·K). The coating material possesses better neutral salt spray resistance, artificial weathering-resistant property, impact resistance, heat-insulating property and ablation resistance. The developed ablation-resistant coating material can be used for external protection of ship deck surface, and it exhibits excellent smear application property.

**KEY WORDS:** ship; deck; ablation-resistant; coating; heat insulation; mullite

在舰船装备的发射过程中,甲板部位由于受到装备发射尾焰的炙烤和喷吹,其表面的环氧防锈漆很容易发生变黑、炭化、剥落等失效现象,失去对甲板的防护作用。使用耐高温的硅树脂涂料时,又因其粘附力、耐热变形能力不高而发生脱落、破裂等问题。如果将高温尾焰吹扫部位涂以耐烧蚀涂层,可以使被吹扫金属表面隔热,减少热烧蚀和热冲击,并防止金属在多次热冲击载荷的作用下产生热疲劳、热龟裂和热断裂,从而确保发射工作的可靠性,同时有望减少舰船返厂维修的次数,提高舰船的使用率。因此,耐烧蚀涂层的使用对舰船的稳定运行和高效服役具有重要意义。此外,舰船服役于海洋的高温高湿、高盐雾、高紫外线照射等特殊的环境中,这对甲板用耐烧蚀涂层也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。

国内外的耐烧蚀涂层多采用有机耐热涂料<sup>[2]</sup>,如环氧树脂<sup>[3]</sup>、有机硅改性环氧树脂<sup>[4]</sup>、酚醛树脂<sup>[5]</sup>、环氧改性有机硅树脂<sup>[6]</sup>等,虽然能够对金属钢结构起到保护作用,但一方面有机烧蚀涂料一般都没有通用性,需要依据不同的隔热要求来设计不同的涂料性能,另一方面施工条件要求较高,或因为涂料需要高温固化,或因为耐候性较差等原因,均无法应用于舰船甲板上。

本文首先分析了作为舰船甲板用耐烧蚀涂层应具有的特性,并以双层涂层结构制备出耐烧蚀涂层,底层以环氧树脂为基体,表层采用工艺简单、无毒、耐高温<sup>[7-10]</sup>的不定形耐火材料,国内外尚未有采用不定形耐火材料对舰船甲板进行防护方面的研究报道,最后对耐烧蚀涂层材料的综合性能进行了测试。

## 1 舰船甲板用耐烧蚀涂层的一般要求分析

作为舰船甲板用耐烧蚀涂层,材料必须满足以下性能要求:

- 1) 涂层与舰船甲板钢结构表面的附着力要好。
- 2) 耐烧蚀、抗燃气流冲刷能力强,在装备发射过程中无脱落现象发生。
- 3) 具有足够的耐压强度和耐冲击性。
- 4) 抗热震性能好,能承受温度的急剧变化。

5) 隔热性能好。

6) 须耐受海洋空气高湿度、高盐度的侵蚀。

## 2 试验方案及性能测试

### 2.1 试验方案

用于舰船甲板的耐烧蚀涂层采用双层结构,底层选用的原材料有:环氧树脂(65%~80%)、固化剂(10%~20%)、增韧剂(5%~20%)、填料A,均为工业品。表层选用的原材料有:莫来石(40%~70%)、堇青石(5%~25%)、铝酸盐水泥(10%~30%)、填料B。

### 2.2 性能测试

附着力测试按照 GB/T 5210—2006 进行,剪切力测试按照 GB/T 7124—2008 进行。

常温抗折强度测试参照 GB/T 3001—2007 进行。常温耐压强度测试参照 GB/T 5072—2008 进行。耐火度测试采用 GB/T 7322—2007 进行。导热系数测试采用 YB/T 4130—2005 进行。热膨胀系数测试采用 GB/T 7320—2008 进行。

耐盐雾性能测试参照 GB/T 1771—2007 进行。老化性能测试参照 GB/T 14522—2008 进行。耐冲击性能测试参照 GB/T 7124—2008 进行。隔热性能和耐烧蚀性能测试利用缩比试验发动机进行。在除锈、除漆后的 190 mm × 120 mm × 5 mm 的钢板上涂覆耐烧蚀涂层,用于测试涂层的耐盐雾性能、老化性能、耐冲击性能、隔热性能和耐烧蚀性能。

## 3 结果与讨论

### 3.1 耐烧蚀涂层底层性能分析

耐烧蚀涂层底层采用具有优良粘接性能的环氧树脂为基体材料,但其脆性较大。为了提高底层的韧性,在底层中加入增韧剂,改善了底层脆性大的问题,但随着增韧剂的引入,又降低了底层的附着力。为了在提高底层韧性的同时又不降低附着力,选用一种耐热填料A,填料A用量(占环氧树脂的质量百分比,全文同)对底层附着力的影响见表1(表1中每个数

据分别为 5 个数据的平均值)。由表 1 可知, 填料 A 用量为 100% 时, 底层具有最大的附着力, 说明涂层与金属基体具有良好的结合强度, 故选用该配方作为底层配方进行下一步试验, 将该配方命名为 D1 号。

表 1 耐烧蚀涂层底层的附着力  
Tab.1 Adhesion of ablation-resistant coating bottom

配方	填料A用量/%	附着力/MPa
1 <sup>#</sup>	0	8.75
2 <sup>#</sup>	50	16.85
3 <sup>#</sup>	100	24.03
4 <sup>#</sup>	150	18.51

对 D1 号配方的涂层进行剪切力测试, 剪切力为 7.8 MPa (5 个数据的平均值)。通过观察破坏后的测试残样可知, 涂层的破坏形式为混合破坏, 即兼有涂层的内聚破坏和粘附破坏, 一部分是涂层间撕裂, 一部分是涂层与测试板条间的粘接界面。因此可知, 此时涂层与金属之间具有良好的粘接性能。

3.2 耐烧蚀涂层表层性能分析

表层采用不定形耐火材料技术。不定形耐火材料中, 以莫来石为基体的材料具有强度大、抗热震性能好、耐高温等性能<sup>[11-15]</sup>, 因此耐烧蚀涂层的表层选用莫来石作为基体材料。确定基体材料后, 进行配比调整研究, 研制的几种表层材料的力学性能和热学性能见表 2。表 2 中每个数据均为 3 个数据的平均值。

表 2 耐烧蚀涂层表层的物理性能  
Tab.2 Physical properties of ablation-resistant coating surface

配方	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>
常温抗折强度/MPa	8.2	7.2	9.1	8.5
常温耐压强度/MPa	68.1	49.3	65.7	38.0
耐火度/℃	1440	1500	1580	1580
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.635	1.505	0.762	0.655
热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> ℃ <sup>-1</sup> )	1.16	3.40	5.30	6.20

材料的隔热性能主要取决于材料的导热系数。从表 2 中可以看出, 5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>和 8<sup>#</sup>配方的涂层导热系数较小。再比较其他性能指标可知, 7<sup>#</sup>和 8<sup>#</sup>配方的涂层具有较高的耐火度, 热膨胀系数也接近于金属钢结构, 5<sup>#</sup>和 7<sup>#</sup>配方的涂层具有较高的强度, 因此综合考虑决定选用 7<sup>#</sup>配方作为表层配方进行下一步试验, 将该配方命名为 B1 号。

3.3 耐烧蚀涂层复合涂层性能分析

利用 D1 号底层和 B1 号表层制备成复合耐烧蚀涂层, 并对其进行涂层性能测试。对耐烧蚀涂层进行

耐盐雾性能和老化性能测试, 结果见表 3。由表 3 可知, 该涂层满足使用要求。对耐烧蚀涂层进行耐冲击性能测试, 结果显示 10 cm 通过, 说明涂层能够满足装备发射过程中的要求。

表 3 耐烧蚀涂层的耐盐雾性能和老化性能  
Tab.3 Resistance to neutral salt spray and artificial weathering of ablation-resistant coating

项目	结果
耐盐雾性能(480 h)	无起泡、无生锈、无脱落
老化性能(480 h)	表面无粉化、无开裂、无脱落、无起泡

通过缩比试验发动机的模拟燃气流对耐烧蚀涂层进行隔热性能测试。金属钢板的一侧涂有耐烧蚀涂层, 不带有涂层的金属面为背面。火焰吹扫涂有耐烧蚀涂层一侧的金属钢板, 测试不涂覆热防护涂层一侧金属的温度 (背面温度)。试验条件为: 发动机燃料采用氧气和煤油, 发动机燃烧室压力  $P=1.4 \pm 0.05$  MPa, 喷管出口燃气温度 2210 K, 燃气速度 2390 m/s, 燃烧室温度 3470 K, 烧蚀试验时间 3 s, 涂层厚度分别为 10 mm 和 15 mm。缩比试验发动机热流密度和压力测试模型安装示意图如图 1 所示, 各点对应的热流密度和压力见表 4。涂层的背温测量结果见表 5。

进行隔热性能测试后, 涂层表面没有发现裂纹, 也没有出现掉块脱落现象, 但有一些肉眼可见的条状溅射物, 用手触摸是光滑的, 这是由于表层组分中含有 SiO<sub>2</sub>, 其在高温下熔融为玻璃态, 在缩比发动机的高温燃气流冲刷下呈向外溅射状态, 在降温过程中冷凝。从表 5 可以看出, 涂层经过最大热流密度 (16.2 mW/m<sup>2</sup>) 和最大压力 (0.324 MPa) 的燃气流烧蚀后, 10 mm 和 15 mm 厚度涂层的背温均未超过 70 ℃。因此可以得知, 该涂层具有良好的隔热性能。

对涂层进行耐烧蚀性能测试, 试验条件与隔热性能测试的试验条件相同, 结果见表 6 (表 6 中每个数据分别为 5 个数据的平均值)。从表 6 可以看出, 耐烧蚀涂层线烧蚀率的平均值为 1.160 mm/s, 说明涂层材料具有良好的耐烧蚀性能, 当涂层厚度为 15 mm 时, 可满足装备多次发射的需求。

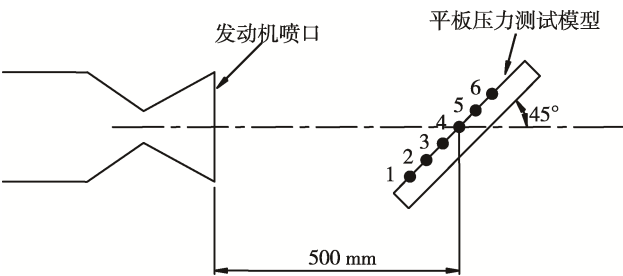


图 1 热流和压力测试模型安装示意图  
Fig.1 Installation schematic of heat flux and pressure testing model

表 4 热流密度和压力  
Tab.4 Heat flux density and pressure

测点	1	2	3	4	5	6
热流值/(kW · m <sup>-2</sup> )	6012	12759	14110	16219	13668	13428
压力值/MPa	0.128	0.230	0.318	0.324	0.273	0.217

表 5 背温测量结果  
Tab.5 Measurements of back temperature

涂层厚度/mm	起始温度/℃	3 s时温度/℃	最高温度/℃	最高温度对应的时间/s
10	28.3	32.0	66.2	244
15	29.3	29.8	64.8	407

表 6 耐烧蚀涂层的耐烧蚀结果  
Tab.6 Ablation resistance results of ablation-resistant coating

编号	烧蚀时间/s	线烧蚀率/(mm · s <sup>-1</sup> )	质量烧蚀率/(g · s <sup>-1</sup> )
1	3	1.120	24.13
2	3	1.192	24.88
3	3	1.167	24.88
平均值		1.160	24.63

4 耐烧蚀涂层涂抹工艺试验

在耐烧蚀涂层涂抹前,为了保证涂层与金属钢结构具有良好的附着力,金属钢结构的表面必须清理干净。首先,采用打磨的方式对金属表面进行除锈、除漆和去油污等,将金属表面打磨至一定的粗糙度(st3级)。然后,在金属表面涂抹耐烧蚀涂层的底层,最后涂抹耐烧蚀涂层的表层,表层必须在底层涂抹后30 min内进行。为了保证耐烧蚀涂层的厚度,在水平面放置木条、水平线等定位工装作为厚度的标准。试验结果表明,金属钢结构表面涂抹耐烧蚀涂层后,涂层均匀,表观质量良好,说明涂层材料具有良好的涂抹施工性。

5 结论

1) 研制的耐烧蚀涂层材料由双层结构组成:底层以环氧树脂为基体,由增韧剂及具有耐热性能的功能填料组成;表层采用以莫来石为基体的不定形耐火材料。

2) 研制的涂层材料底层附着力为24.03 MPa,剪切力为7.8 MPa,表层耐火度为1580℃,常温抗折强度为9.1 MPa,耐压强度为65.7 MPa,导热系数为0.762 W/(m · K)。涂层具有良好的耐盐雾性能、老化性能、耐冲击性能以及隔热性能和耐烧蚀性能。

3) 研制的涂层材料具有良好的涂抹施工性。

参考文献:

[1] 张巍,马磊,王国鹏,等.一种舰船甲板用热防护涂层的结构:中国,ZL201620122827.4[P].2016-09-28.  
ZHANG Wei, MA Lei, WANG Guo-peng, et al. A Kind of Structure of Heat-Resistant Coating for Ship Deck: China, ZL201620122827.4[P]. 2016-09-28.

[2] PALOVSKII V A. Heat Resistant Coatings on High-temperature Metals[J]. Protection of Metals, 2004, 40(4): 358-361.

[3] 张巍,马磊,王国鹏,等.火箭发射台用热防护涂层材料的应用研究[J].表面技术,2017,46(2):144-148.  
ZHANG Wei, MA Lei, WANG Guo-peng, et al. Application of Heat-resistant Coating Materials for Rocket Launching Pad Use[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 144-148.

[4] 郭亚林,梁国正,丘哲明,等.一种新型热防护涂料研究[J].宇航学报,2005,26(5):635-639.  
GUO Ya-lin, LIANG Guo-zheng, QIU Zhe-ming, et al. Study on a New Thermal Protection Coating[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5): 635-639.

[5] 李金龙,黄广奇.火箭发动机喷管隔热涂层研究[J].弹箭与制导学报,2008,28(6):152-154.  
LI Jin-long, HUANG Guang-qi. Study about Heatproof Coat Process of Nozzle on Susta in Rocket Motor[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(6): 152-154.

[6] 赵英民,刘瑾.高效防热隔热涂层应用研究[J].宇航材料工艺,2001,31(3):42-44.  
ZHAO Ying-min, LIU Jin. Research on Heat Resistant and Heat Insulated Coating[J]. Aerospace Materials & Technology, 2001, 31(3): 42-44.

[7] 张巍.环境友好型耐火材料的研究进展[J].中国材料进展,2013,32(9):562-569.

- ZHANG Wei. Progress in Research on Environment-friendly Refractories[J]. Materials China, 2013, 32(9): 562-569.
- [8] 张巍. 不定形耐火材料之浇注料的研究进展[J]. 材料导报: 综述篇, 2012, 26(8): 93-97, 101.  
ZHANG Wei. Progress in Research on Castables of Monolithic Refractories[J]. Materials Review, 2012, 26(8): 93-97, 101.
- [9] 张巍. 耐火喷涂料的研究进展[J]. 耐火材料, 2012, 46(4): 303-308.  
ZHANG Wei. Research Progress on Refractory Gunning Mix[J]. Refractories, 2012, 46(4): 303-308.
- [10] 张巍. 不定形耐火材料的施工技术研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(6): 557-563, 574.  
ZHANG Wei. Research Progress of Construction Technology of Monolithic Refractories[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2013, 28(6): 557-563, 574.
- [11] ZHANG Wei, DAI Wen-yong, NOBUAKI C. Research on Thermal Shock Resistance of Mullite-Bauxite-Silicon Carbide Castable Refractory[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2012, 31(2): 204-208.
- [12] 张巍, 戴文勇, 千代田修明. 堇青石对莫来石-铝矾土浇注料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(6): 1286-1290.  
ZHANG Wei, DAI Wen-yong, NOBUAKI C. Effect of Cordierite on Properties of Mullite-Bauxite Castable Refractory[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009, 28(6): 1286-1290.
- [13] ZHANG Wei, DAI Wen-yong, NOBUAKI C. Research on Application of Different Particle Sizes of Cordierite on Castable Refractory[J]. Engineering Sciences, 2012, 10(1): 72-75.
- [14] 湛伟, 闫洪. 莫来石/碳化硅复相泡沫陶瓷的制备及抗压强度研究[J]. 稀有金属, 2015, 39(4): 331-336.  
CHEN Wei, YAN Hong. Preparation and Compressive Strengths of Mullite/SiC Composite Ceramic Foams[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(4): 331-336.
- [15] KUMAR P, NATH M, GHOSH A, et al. Thermo-Mechanical Properties of Mullite-Zirconia Composites Derived from Reaction Sintering of Zircon and Sillimanite Beach Sand: Effect of CaO[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(9): 2397-2403.