

# 高强度合金结构钢与高强度铝合金防护层的耐霉性研究

赵立华<sup>1,2</sup>, 段渝平<sup>1,2</sup>

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039;  
2. 国防科技工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039)

**摘要:** 目的 研究高强合金结构钢和高强铝合金防护层的耐霉菌腐蚀能力。方法 以高强合金结构钢和高强铝合金两种材料为基材分别制备不同防护层,按 GJB 150.10A—2009 进行实验室霉菌试验,评定防护层的长霉等级。结果 两种材料的不同防护层中,除润滑油涂层和阳极氧化层的长霉等级为 0~1 级外,炮油涂层、涂漆层、镀锌层或锌镍合金层长霉等级均在 2~3 级。结论 高强合金结构钢润滑油涂层耐霉性能良好,镀锌层或锌镍合金层、涂漆层、炮油涂层耐霉性能较差;高强铝合金阳极氧化层耐霉性能良好,炮油涂层、涂漆层耐霉性能较差。

**关键词:** 高强度合金结构钢; 高强度铝合金; 防护层; 霉菌试验

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.016

中图分类号: TJ04; TG172 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0082-07

## Mould Resistance of Protective Layer on High-strength Alloy Structural Steel and High-strength Aluminum Alloy

ZHAO Li-hua<sup>1,2</sup>, DUAN Yu-ping<sup>1,2</sup>

(1. South West Institute of Technical Engineering, Chongqing 400039, China;  
2. The Natural Environmental Test and Research Center of Science, Technology and Industry for National Defense, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the mould resistance of protective layers on high-strength alloy structural steel and high-strength aluminum alloy. **Methods** Different protective layers were prepared on high-strength alloy structural steel and high-strength aluminum alloy. Laboratory mould tests were carried out according to GJB 150.10A-2009 to evaluate the mould growth level on the protective layers. **Results** The mold levels of lubricant coating and anode oxidation layer on high-strength alloy structural steel and high-strength aluminum alloy were in the range of grade 0 ~ 1; the mold level of gun oil coating, paint coating, zinc layer or zinc nickel alloy layer moldy grade were in the range of grade 2~3. **Conclusion** For high-strength alloy structural steel substrate, lubricant coating had good mould resistance, while galvanized layer or zinc alloy layer, paint coating and gun oil coating had poor mould resistance. For

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-07-08

Received: 2015-06-01; Revised: 2015-07-08

作者简介: 赵立华(1968—),女,河北抚宁人,工程师,主要研究方向为环境试验与评价。

Biography: ZHAO Li-hua(1968—),Female,from Funing,Hebei,Engineer,Research focus:environmental test and evaluation.

high-strength aluminum alloy substrate, anode oxidation layer had good mould resistance, while gun oil coating and paint coating had poor mould resistance.

**KEY WORDS:** high-strength alloy structural steel; high-strength aluminum alloy; protective coating; mould test

高强度合金结构钢和高强铝合金都是军用装备及航空航天领域广泛应用的重要结构材料。30CrMnSiNi2A 合金钢属 Cr-Mn-Si-Ni 系列合金结构钢,是一种超高强度合金结构钢,其强度高,韧性塑性好,具有良好的抗疲劳性能。主要用于制造装备的关键承力结构,如飞机机翼主梁、起落架等连接件和轴类等重要受力结构部件<sup>[1]</sup>。7B04 铝合金是 Al-Zn-Mg-Cu 系高强度铝合金,是在 7A04 铝合金的基础上,通过对铁和硅等杂质元素的控制而发展起来的新型高纯铝合金,具有密度小、比强度高、比重低等特点,广泛用于航空航天产品主承力结构材料<sup>[2]</sup>。

目前,国内多位学者对于 30CrMnSiNi2A 高强度合金结构钢和 7B04 高强铝合金在典型环境如海洋大气环境的腐蚀规律和腐蚀特征已做了比较成熟的研究<sup>[1-2]</sup>。高强度合金结构钢和高强铝合金产品均对腐蚀环境比较敏感,容易产生腐蚀现象,因此需要对产品采用多种有效用途的防护层,以避免发生腐蚀。如在结构钢材质的炮管上涂抹防护润滑油脂,铝合金产品表面阳极氧化处理,也可进行涂漆或镀锌等工艺。产品的防护层在服役寿命期内的使用、贮存、运输时均会受到各种恶劣环境条件的作用,从而产生腐蚀和破坏,严重影响产品的使用寿命。霉菌属于恶劣生物环境条件,是引起材料腐蚀和破坏的一个重要因素。

霉菌好氧喜偏酸性环境,只要有可利用的碳源和氮源等营养物质,且温度为 25~35℃、湿度为 95%~100%,供氧充足,霉菌就可以大量生长繁殖<sup>[3]</sup>。霉菌易在绝缘材料、有机涂料、非金属元器件等各种材料和结构表面生长,产生霉变和腐蚀,从而造成产品性能劣化、电器元件失效、表面结构破坏、零部件失灵功能丧失等严重后果。因此研究 30CrMnSiNi2A 高强度合金结构钢和 7B04 高强铝合金的防护层耐霉性具有重要意义。文中以两种材料不同工艺的防护层为研究对象,研究其抗霉能力,为材料的防护层工艺设计筛选提供依据。

1 试验

1.1 试验样品

选用 30CrMnSiNi2A 合金钢和 7B04 铝合金两种材

料做基材,制备不同工艺的防护层试验样品。两种材料的化学成分见表 1,试验样品基材及防护工艺见表 2。编号首位为 S 样品的基材为 30CrMnSiNi2A 合金钢,编号首位为 A 样品的基材为 7B04 铝合金,共 10 组,32 件样品。

表 1 30CrMnSiNi2A 合金钢和 7B04 铝合金的化学组分  
Table 1 Chemical composition of 30CrMnSiNi2A alloy steel and 7B04 aluminum alloy

| 30CrMnSiNi2A 合金钢 |             | 7B04 铝合金 |             |
|------------------|-------------|----------|-------------|
| 化学成分             | 质量分数/%      | 化学成分     | 质量分数/%      |
| C                | 0.27 ~ 0.34 | Zn       | 5.0 ~ 6.5   |
| Si               | 0.90 ~ 1.20 | Cu       | 1.4 ~ 2.0   |
| Mn               | 1.00 ~ 1.30 | Mg       | 1.8 ~ 2.8   |
| Cr               | 0.90 ~ 1.20 | Mn       | 0.2 ~ 0.6   |
| Ni               | 1.40 ~ 1.80 | Cr       | 0.1 ~ 0.25  |
| Cu               | ≤0.20       | Ni       | ≤0.1        |
| P                | ≤0.030      | Ti       | ≤0.05       |
| S                | ≤0.030      | Fe       | 0.05 ~ 0.25 |
| Fe               | 余量          | Si       | ≤0.1        |
|                  |             | 其他       | 0.1         |
|                  |             | Al       | 余量          |

表 2 试验样品的防护工艺  
Table 2 The protect techniques of specimens

| 试样编号        | 基材及防护工艺                             |
|-------------|-------------------------------------|
| S-1-1—3     | 30CrMnSiNi2A→涂炮油                    |
| S-2-1       | 30CrMnSiNi2A→涂炮用润滑脂                 |
| S-2-2       | 30CrMnSiNi2A→涂 7258 号航空润滑脂          |
| S-2-3       | 30CrMnSiNi2A→涂耐腐蚀高温润滑脂              |
| S-3-1—3     | 30CrMnSiNi2A→涂醇酸树脂漆                 |
| S-4-1 S-4-2 | 30CrMnSiNi2A→镀锌 (Fe/Ep·Zn·c2C)      |
| S-4-3 S-4-4 | 30CrMnSiNi2A→镀锌镍合金 (Fe/Ep·ZnNi·c2C) |
| S-5-1       | 30CrMnSiNi2A→镀锌镍合金→涂醇酸树脂漆           |
| S-5-2 S-5-3 | 30CrMnSiNi2A→镀锌→涂醇酸树脂漆              |
| S-6-1       | 30CrMnSiNi2A→镀锌→涂炮油                 |
| S-6-2       | 30CrMnSiNi2A→镀锌→涂炮用润滑脂              |
| S-6-3       | 30CrMnSiNi2A→镀锌→涂 7258 号航空润滑脂       |
| S-6-4       | 30CrMnSiNi2A→镀锌→涂耐腐蚀高温润滑脂           |
| A-1-1—3     | 7B04→涂炮油                            |
| A-2-1—3     | 7B04→喷涂航空环氧有机硅耐热磁漆                  |
| A-3-1—3     | 7B04→阳极氧化                           |
| A-4-1—3     | 7B04→阳极氧化→喷涂航空环氧有机硅耐热磁漆             |

1.2 试验设备

霉菌试验设备为ER-04KA-DF霉菌试验箱,设备主要参数如下:温度范围为10~150℃,相对湿度范围为25%~98%,风速≤8 m/s。

1.3 霉菌试验

试验按照GJB 150.10A—2009进行,试验菌种采用标准中的第二组菌种,即黑曲霉、黄曲霉、杂色曲霉、球毛壳霉、绳状青霉五种菌种<sup>[4]</sup>。

试验温、湿度条件:温度为(30±2)℃,相对湿度为(95±5)%,恒定不变,试验时间为28天。试验后

对每件样品逐个进行检查,记录样品长霉情况,按GJB 150.10 A—2009规定评定样品的霉菌生长等级(按霉菌生长程度:无、微量、轻度、中度、严重,分为0级、1级、2级、3级、4级等5个等级)。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

试验28天结束后对样品进行目测检查,并使用10倍放大镜进行观察,记录样品表面长霉情况和长霉百分率,评定长霉等级。样品试验结果见表3。

表3 霉菌试验结果  
Table 3 The results of mold test

| 试样编号  | 生长程度 | 霉菌生长情况                                    | 长霉百分率% | 等级 |
|-------|------|-------------------------------------------|--------|----|
| S-1-1 | 中度   | 大量黑色颗粒及菌落状霉菌密集生长繁殖,除去霉菌及炮油后,基体有40%腐蚀      | 60     | 3  |
| S-1-2 | 中度   | 大量黑色颗粒及菌落状霉菌密集生长繁殖,除去霉菌及炮油后,基体有30%腐蚀      | 60     | 3  |
| S-1-3 | 中度   | 大量褐色菌落状霉菌分散生长繁殖,除去霉菌及炮油后,基体有40%腐蚀         | 50     | 3  |
| S-2-1 | 微量   | 局部、零星黑色颗粒状霉菌生长繁殖,除去霉菌及炮用润滑脂后,基体无腐蚀        | 3      | 1  |
| S-2-2 | 无    | 无霉菌生长。除去表面航空润滑脂后,基体2%锈蚀                   | 0      | 0  |
| S-2-3 | 无    | 无霉菌生长。除去表面耐腐蚀高温润滑脂后,基体30%锈蚀               | 0      | 0  |
| S-3-1 | 中度   | 大量淡褐色菌落和黑色颗粒状霉菌密集生长繁殖                     | 65     | 3  |
| S-3-2 | 中度   | 大量灰黄色菌落状霉菌密集生长繁殖                          | 50     | 3  |
| S-3-3 | 轻度   | 中量黑色颗粒状及黄色菌落状霉菌生长繁殖                       | 25     | 2  |
| S-4-1 | 轻度   | 中量淡褐色菌落和颗粒状霉菌生长繁殖                         | 30     | 2  |
| S-4-2 | 轻度   | 中量灰黄色菌落和黑色颗粒状霉菌生长繁殖                       | 25     | 2  |
| S-4-3 | 轻度   | 中量淡褐色菌落和黑色颗粒状霉菌松散生长和繁殖                    | 20     | 2  |
| S-4-4 | 轻度   | 中量淡褐色菌落状霉菌生长繁殖                            | 25     | 2  |
| S-5-1 | 中度   | 大量灰色菌落和黑色颗粒状霉菌密集生长和繁殖                     | 70     | 3  |
| S-5-2 | 中度   | 大量淡褐色菌落和黑色颗粒状霉菌密集生长和繁殖                    | 60     | 3  |
| S-5-3 | 轻度   | 中量黑色颗粒状及灰色菌落状霉菌生长繁殖                       | 25     | 2  |
| S-6-1 | 中度   | 大量黑色颗粒状霉菌密集生长繁殖,除去霉菌及炮油后,基体无腐蚀,霉菌主要生长在炮油上 | 50     | 3  |
| S-6-2 | 微量   | 局部、零星黑色颗粒状霉菌生长繁殖,除去霉菌及炮用润滑脂后,基体无腐蚀        | 3      | 1  |
| S-6-3 | 无    | 无霉菌生长。除去航空润滑脂后,基体无腐蚀                      | 0      | 0  |
| S-6-4 | 无    | 无霉菌生长。除去耐腐蚀高温润滑脂后,基体无腐蚀                   | 0      | 0  |
| A-1-1 | 中度   | 大量黑色及灰色颗粒状霉菌密集生长繁殖,除去霉菌及炮油后,基体有30%腐蚀      | 50     | 3  |
| A-1-2 | 中度   | 大量黑色及灰色颗粒状霉菌密集生长繁殖,除去霉菌及炮油后,基体有25%腐蚀      | 50     | 3  |
| A-1-3 | 中度   | 大量黑色及灰色颗粒状霉菌密集生长繁殖,除去霉菌及炮油后,基体有32%腐蚀      | 55     | 3  |
| A-2-1 | 轻度   | 中量灰色菌落及白色颗粒状霉菌生长繁殖                        | 20     | 2  |
| A-2-2 | 轻度   | 中量灰色菌落及白色颗粒状霉菌生长繁殖                        | 30     | 2  |
| A-2-3 | 轻度   | 中量灰色菌落及白色颗粒状霉菌生长繁殖                        | 30     | 2  |
| A-3-1 | 微量   | 极少量黑色颗粒状霉菌生长繁殖                            | 0.2    | 1  |
| A-3-2 | 无    | 无霉菌生长                                     | 0      | 0  |
| A-3-3 | 无    | 无霉菌生长                                     | 0      | 0  |
| A-4-1 | 轻度   | 中量黄色菌落、黑色及黄色颗粒状霉菌生长繁殖                     | 20     | 2  |
| A-4-2 | 轻度   | 中量黄色菌落及黑色颗粒状霉菌生长繁殖                        | 18     | 2  |
| A-4-3 | 轻度   | 中量灰色菌落及黑色颗粒状霉菌生长繁殖                        | 15     | 2  |



从表3的试验结果可看出,涂有炮油的S-1,A-1和S-6-1样品表面均长有大量霉菌,长霉面积在50%~60%,长霉等级为3级。除去霉菌和炮油后,S-1,A-1底材均有不同程度的腐蚀,S-6-1底材无腐蚀,霉菌主要生长在炮油上;而涂有油脂(炮用润滑脂、7258号航空润滑脂、耐腐蚀高温润滑脂)的S-2,S-6样品表面长霉稀少或不长霉,等级为0~1级;底材镀锌后再涂油脂的样品S-6-2—4表面长霉稀少或不长霉,等级为0~1级,与只涂油脂的样品基本一致。涂漆的S-3,S-5,A-2,A-4样品表面均有不同程度长霉,醇酸树脂漆表面长霉面积在25%~70%,霉菌生长较薄,长霉等级为2~3级;航空环氧有机硅耐热磁漆表面长霉面积在15%~30%,长霉等级为2级;镀锌或锌镍合金的S-4样品表面长霉面积在20%~30%,长霉等级为2级;7B04铝合金阳极氧化样品A-3表面长霉极少或不长霉,等级为0~1级。

用数码相机对每件样品照相记录外观形貌。部分样品霉菌试验前、后的外观形貌见图1—8。

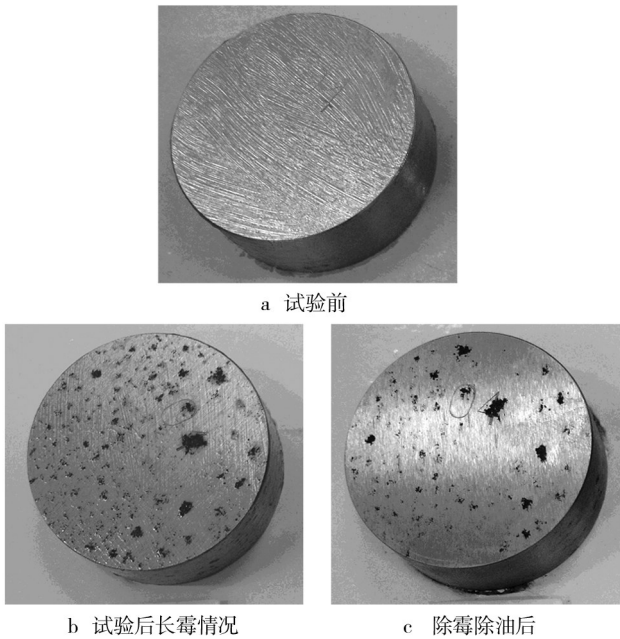


图1 S-1-1试样试验前后外观形貌  
Fig.1 The appearance of S-1-1 specimen before and after test

2.2 分析与讨论

2.2.1 霉菌对油脂防护层的破坏

试验中的30CrMnSiNi2A合金钢和7B04铝合金样品表面涂炮油,虽然可起到润滑和防腐蚀的作用,但表面生长大量霉菌。炮油的主要成分为聚 $\alpha$ -烯烃、三环基磷酸脂、TUFOIL特孚油、硫酸钙及双酯类

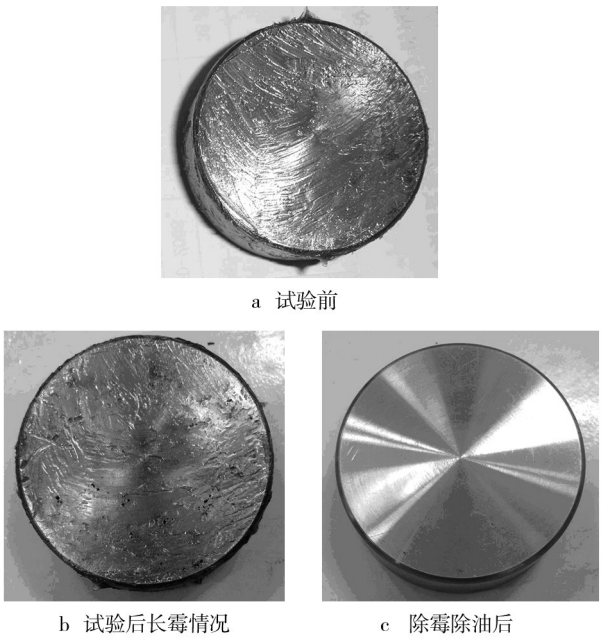


图2 S-2-1试样试验前后外观形貌  
Fig.2 The appearance of S-2-1 specimen before and after test

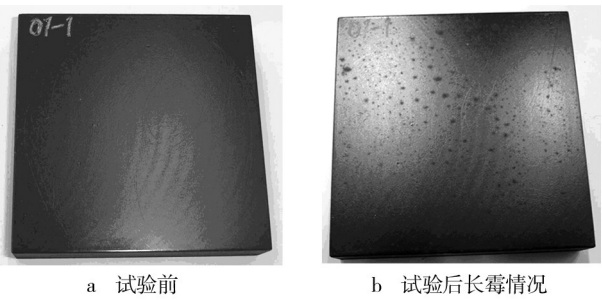


图3 S-3-1试样试验前后外观形貌  
Fig.3 The appearance of S-3-1 specimen before and after test

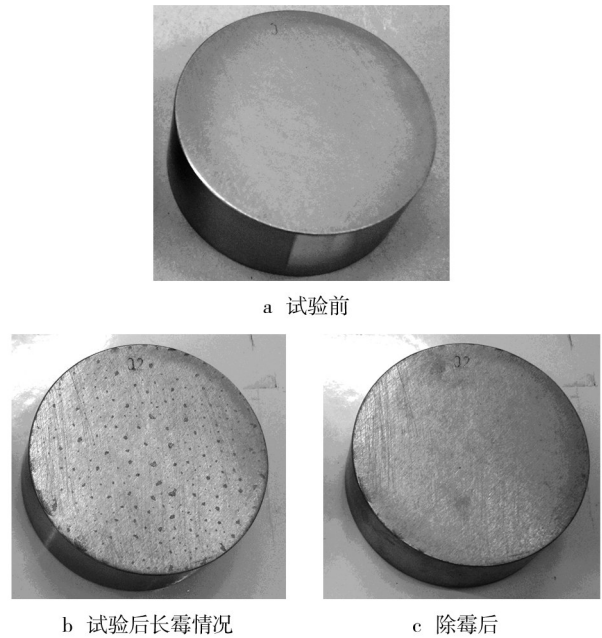


图4 S-4-1试样试验前后外观形貌  
Fig.4 The appearance of S-4-1 specimen before and after test

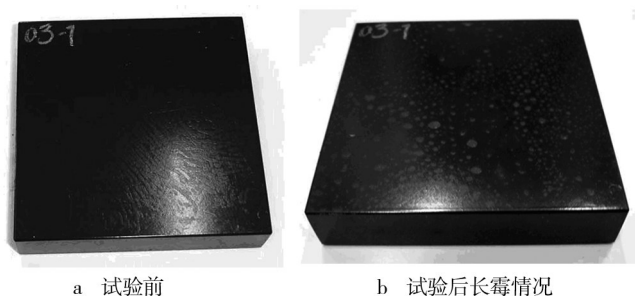


图5 S-5-1试样试验前后外观形貌  
Fig.5 The appearance of S-5-1 specimen before and after test

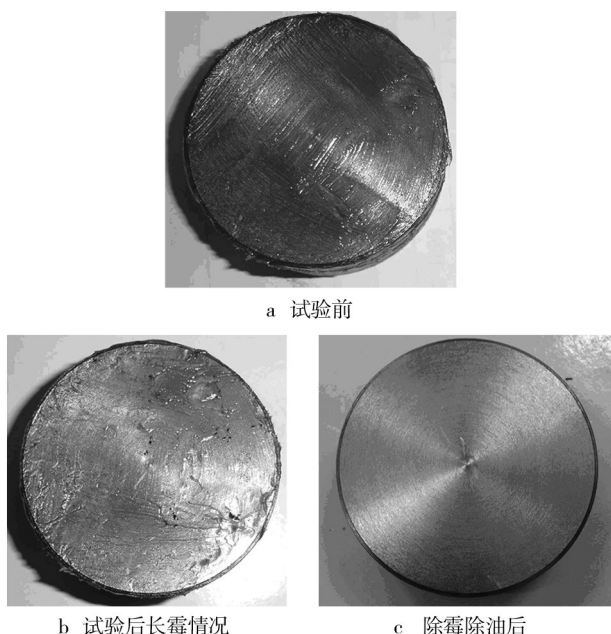


图6 S-6-2试样试验前后外观形貌  
Fig.6 The appearance of S-6-2 specimen before and after test

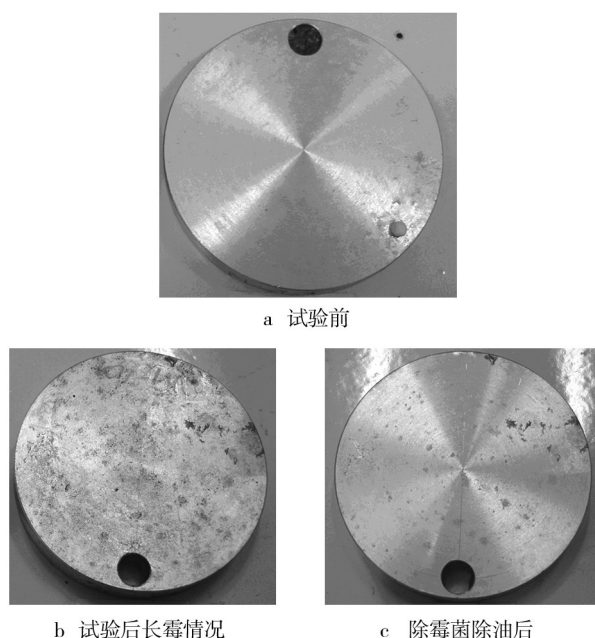


图7 A-1-1试样试验前后外观形貌  
Fig.7 The appearance of A-1-1 specimen before and after test

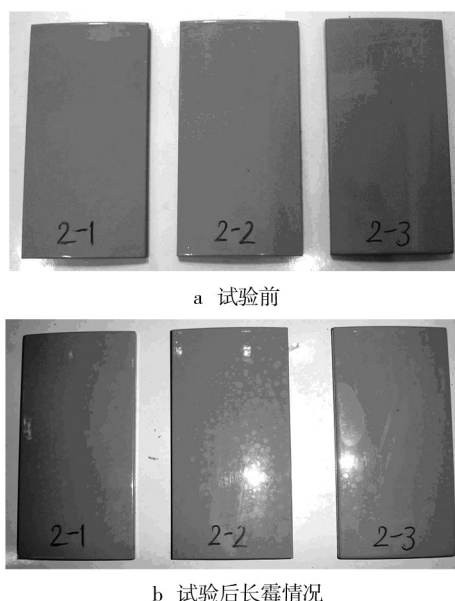


图8 A-2试样试验前后外观形貌  
Fig.8 The appearance of A-2 specimen before and after test

机油<sup>[5]</sup>。聚 $\alpha$ -烯烃为含碳化合物,与三环基磷酸脂等油脂均是霉菌生长繁殖所需的营养物质,因此涂有炮油的表面长有大量霉菌,同时霉菌生长繁殖所分泌的有机酸对材料有腐蚀作用,S-1,A-1样品表面长霉后均对基材金属有腐蚀斑迹。霉菌生长繁殖穿透炮油层后,底材30CrMnSiNi2A合金钢和7B04铝合金中所含的少量碳、磷、硫、镁等元素也是霉菌的必需营养物质,霉菌吸收后进而腐蚀基体金属。S-6-1虽然表面炮油长有大量霉菌,但其镀锌层对基材起到保护作用,使基材未被腐蚀。另三种润滑脂(炮用润滑脂、7258号航空润滑脂、耐腐蚀高温润滑脂)的主要成分是矿物基础油或合成润滑油、石油脂,同时也加入了提纯地蜡、工业氢氧化钠以及结构改善剂、抗氧剂、金属钝化剂、防水防锈剂等添加剂<sup>[6]</sup>。因此增加了该类油脂的耐霉性,且化学稳定性好,提供给霉菌的营养物质很少或无营养物质成分,所以涂有这三种润滑脂的S-2,S-6样品表面霉菌生长繁殖稀少或不长霉,但7258号航空润滑脂、耐腐蚀高温润滑脂的防锈能力有待提高。

## 2.2.2 霉菌对涂料防护层的腐蚀

两种材料的涂料表面不同程度长霉。涂料是一种以树脂或油脂制成的有机高分子为主体的胶液溶液,其主要作用是保护金属材料或非金属材料不受环境的侵蚀。一般涂料的树脂部分是耐霉的,没有可提供霉菌生长的碳源,但涂料中的增塑剂、纤维素、润滑油、稳定剂、填料、颜料以及油脂类等有机成分均含有霉菌所需的营养物质,如碳、氢、氧及多种金属元素以



及无机盐。另外,霉菌生长分泌出多种酶和有机酸性物质如醋酸、丁醋酸等分解漆膜中的有机基料和某些高分子化合物,将漆膜分子结构中的脂链打开或把链氧化,再经水解,使漆膜的高分子结构物变成低分子物,导致结构破坏。

一般情况下,完全抗霉菌的涂料是很少的,大部分涂料是不抗霉或半抗霉的材料,已有资料表明,醇酸树脂漆属不抗霉涂料<sup>[7]</sup>。本次试验结果醇酸树脂漆表面也长有较多霉菌,航空环氧有机硅耐热磁漆的长霉等级为1~2级,属半抗霉材料。另外,虽然30CrMnSiNi2A合金钢经镀锌或镀锌镍合金处理、7B04铝合金经阳极氧化处理后再进行涂漆,但其漆膜表面层长霉与底层处理工艺无明显关系。

### 2.2.3 霉菌对镀锌或镀锌镍合金防护层的腐蚀

金属材料在镀锌或镀锌镍合金后可使表面形成均匀、致密、结合良好的镀锌层,将基体金属与外部环境隔离,从而防止金属的腐蚀,提高使用寿命并起到装饰作用。镀锌工艺中加入合金元素可提高镀层的耐蚀性,镀锌镍合金层的耐蚀性是镀锌层的3倍以上<sup>[8-9]</sup>。镀锌层在干燥空气中不易变化,在高湿水气环境下镀锌表面有水存积时,由于水中溶解了一定量的氧、二氧化碳、二氧化硫等腐蚀性介质,可发生电化学反应<sup>[10]</sup>,结果产生 $\text{ZnO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnCO}_3$ ,使表面积存白锈、水渍等。另外,镀层中夹带过多光亮剂、镀后清洗不良、样品在加工流转过程中沾染污物,这些都为霉菌生长提供了一定的营养物质,可使样品表面长霉、腐蚀。从试验结果可知,镀锌镍合金表面长霉比镀锌表面稍少。

### 2.2.4 铝合金阳极氧化防护层的耐霉性

试验中,7B04铝合金阳极氧化层表面长霉极少,甚至不长霉,其耐霉性明显优于其他防护层。铝合金经过阳极氧化处理,表面能生成几个微米~几百个微米的氧化膜,阳极氧化膜在大气中很稳定,比起铝合金的天然氧化膜,其耐蚀性、耐磨性和装饰性都有明显的改善和提高<sup>[11-12]</sup>。铝氧化膜是多孔性膜,为提高膜的耐蚀能力,都要进行封闭处理,一般采用高温水化反应封闭。用沸水法或蒸汽法处理,是利用铝氧化膜与水的水化反应,将非晶质膜变为水合结晶膜<sup>[13]</sup>。在高温下特别是在沸点时,所生成的水合结晶膜是非常稳定的、不可逆的结晶膜。膜表面干净,不易沾染污物,也不易出现其他化合反应,因此没有可供霉菌生长的养料,表面不易长霉。试验中的7B04铝合金阳极氧化层有一块样品上有极少的霉菌颗粒,也可能是霉菌箱内邻近的其他样品漂落在其表面的,即使漂落

移动在其表面,也没有继续蔓延生长繁殖。

综合以上分析,材料的抗霉性好坏与材料成分、材质、工艺处理、周围环境条件等密切相关。为防止材料长霉,必须采取相应的防护措施,包括改进材料组成和生产工艺、优先选用抗霉材料限制霉菌的营养源、适当加入防霉抗菌剂<sup>[14]</sup>;并采用去湿、控制温度、除氧等方法改善产品材料使用和贮存的环境条件,有效控制霉菌在材料上的生长繁殖。试验中高强合金结构钢、高强铝合金的防护层抗霉菌性各有差异,但在实际使用中还需根据装备结构的具体部位、使用目的、工艺要求等选择材料的防护层。为提高防护层的抗霉性,可考虑在不影响防护层使用性能要求的情况下,添加适用的防霉剂。

## 3 结论

1) 30CrMnSiNi2A高强度合金结构钢和7B04高强度铝合金的防护油脂涂层中,炮用润滑脂、7258号航空润滑脂、耐腐蚀高温润滑脂这三种润滑脂的耐霉性好,明显优于炮油。炮油的耐霉性差。

2) 两种材料的防护涂料均不耐霉,航空环氧有机硅耐热磁漆耐霉性稍好于醇酸树脂漆,两种涂料可适当加入防霉剂提高其耐霉性。

3) 30CrMnSiNi2A高强度合金结构钢的镀锌层、镀锌镍合金层防霉性虽较差,但比炮油涂层耐霉性好。

4) 7B04高强度铝合金阳极氧化层有很好的耐霉性。阳极氧化层耐霉性优于涂漆层和炮油涂层。

## 参考文献:

- [1] 上官晓峰,姜松,王晴晴. 海洋大气中30CrMnSiNi2A钢接触腐蚀疲劳性能研究[J]. 西安工业大学学报, 2014(2): 152—159.  
SHANGGUAN Xiao-feng, JIANG Song, WANG Qing-qing. Research on Fatigue Properties of Galvanic Corrosion of 30CrMnSiNi2A Steel in Marine Atmosphere[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2014(2):152—159.
- [2] 王刚,金平,谭晓明,等. 海洋环境下7B04铝合金腐蚀损伤演化规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012(4): 338—342.  
WANG Gang, JIN Ping, TAN Xiao-ming, et al. Research on Corrosion Damage Evolvement Rule of 7B04 Aluminum Alloy under Ocean[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012(4):338—342.
- [3] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京:航空工业出版社,

- 2003.
- WANG Xue-hua. Natural Environmental Test Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [4] GJB 150.10A—2009, 军用装备实验室环境试验方法, 第10部分: 霉菌试验[S].
- GJB 150.10A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 10: Fungus Test[S].
- [5] 金文. 合成润滑油的市场需求及开发情况[J]. 石油知识, 2014(4): 24—25.
- JIN Wen. Market Demand and Development of Synthetic Lubricants[J]. Petroleum Knowledge, 2014(4): 24—25.
- [6] 于唯, 董元虎, 贾文, 等. 复合锂基润滑脂实验室制备工艺研究[J]. 润滑与密封, 2013(1): 92—95.
- YU Wei, DONG Yuan-hu, JIA Wen, et al. Study on the Processing Technology of Complex Lithium Grease in Laboratory[J]. Lubrication Engineering, 2013(1): 92—95.
- [7] 夏越美, 傅耘. 电子产品常用有机涂层防霉特性研究[J]. 装备环境工程, 2007, 2: 32—35.
- XIA Yue-mei, FU Yun. Mould Proofing Characteristic of Common Organic Coatings in Electronics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 2: 32—35.
- [8] 夏玲玲, 李明明, 李亭亭, 等. Zn-Ni合金电镀、钝化工艺及镀层性能[J]. 材料保护, 2013(8): 44—46.
- XIA Ling-ling, LI Ming-ming, LI Ting-ting, et al. Plating, Passivation Process and Properties of Zn-Ni Alloy[J]. Materials Protection, 2013(8): 44—46.
- [9] 宣卫芳, 胥泽奇, 肖敏, 等. 装备与自然环境试验·基础篇[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- XUAN Wei-fang, XU Ze-qi, XIAO Min, et al. Equipment and Natural Environmental Test · Basic Course[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.
- [10] 张秀, 龙晋明, 裴和中, 等. 一种碱性电镀锌镍合金镀层的抗腐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2013(2): 127—129.
- ZHANG Xiu, LONG Jin-ming, PEI He-zhong, et al. Study on Corrosion Resistance of Alkaline Zinc-nickel Alloy Plating[J]. Hot Working Technology, 2013(2): 127—129.
- [11] 孔水龙, 楼白杨, 李培华, 等. 铝合金阳极氧化膜的耐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2012(10): 157—158.
- KONG Shui-long, LOU Bai-yang, LI Pei-hua, et al. Study on Corrosion Behavior of Anodic Oxidation Coating on Al Alloy[J]. Hot Working Technology, 2012(10): 157—158.
- [12] 孙志华, 章妮, 蔡建平, 等. 7B04铝合金的一种阳极化膜层电化学性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 281—284.
- SUN Zhi-hua, ZHANG Ni, CAI Jian-ping, et al. Electrochemical Behavior of an Anodic Oxidation Film Aluminum Alloy 7B04[J]. Corrosion Science And Protection Technology, 2009, 21(3): 281—284.
- [13] 周赞, 宣天鹏, 汪亮, 等. 铝合金阳极氧化膜的封闭方法[J]. 电镀与精饰, 2011(4): 14—17.
- ZHOU Yun, XUAN Tian-peng, WANG Liang, et al. Pour Sealing Methods for Anodic Oxidation Film of Aluminum Alloy[J]. Plating & Finishing, 2011(4): 14—17.
- [14] 谭生, 郭军红, 崔锦峰, 等. 抗菌涂料的研究现状及发展趋势[J]. 中国涂料, 2011(2): 16—19.
- TAN Sheng, GUO Jun-hong, CUI Jin-feng, et al. Research Status and Development Trend of Antibacterial Coatings[J]. China Coatings, 2011(2): 16—19.

(上接第81页)

- Marine[M]. WANG Yue-yi, DU Gui-zhi, Translate. Beijing: National Defence Industry Press, 1983.
- [15] AHMAD Ivan Karayan, JAVIER Esquivel Guerrero, HOME-RO Castaneda. Single-boss Crevice Former for Studying Crevice Corrosion of UNS S32003 in Chloride-containing Solution at High Temperature[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619: 544—552.
- [16] 陈云, 药宁娜, 陈新, 等. 电化学阻抗谱评价输电铁塔防护涂层配套性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(9): 735—738.
- CHEN Yun, YAO Ning-na, CHEN Xin, et al. Evaluation of Protective Coating Systems for Transmission Tower by Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(9): 735—738.