

## 基于海洋环境的紧固件腐蚀防护要求及技术措施

曹宏涛<sup>1</sup>, 李雪亭<sup>2</sup>

(1. 海装驻沈阳地区舰船配套军代室, 沈阳 110168; 2. 92330 部队装备部, 青岛 266100)

**[摘 要]** 紧固件是实现机械连接大量采用的一种最常见方式, 是机械工业中的关键基础零部件。紧固件在各种环境中的腐蚀一直是设计者面临的问题。解决紧固件腐蚀的方法很多, 表面处理是其中的重要方法之一。简要分析了紧固件腐蚀防护的基本措施和思路, 着重从表面处理技术和结构防腐出发, 讨论了紧固件表面涂层在不同工况下的使用要求, 提出了表面处理方法和防腐结构设计。

**[关键词]** 紧固件; 腐蚀防护; 表面处理

**[中图分类号]** TG174.4

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2013)01-0105-04

## Corrosion Protection Requirements and Technical Measures of Fasteners Based on the Marine Environment

CAO Hong-tao<sup>1</sup>, LI Xue-ting<sup>2</sup>

(1. Naval Equipment Department Warships Supporting Military Representative Office in Shenyang Area, Shenyang 110168, China; 2. 92330 Army Equipment Department, Qingdao 266100, China)

**[Abstract]** The fastener which is extensively used in mechanical connection as one of the most common methods, is the infrastructure component in the machinery industry. However, the corrosion of fasteners in a variety of environments has always been a big problem that designers have to face. There are many methods of solving fastener corrosion, among which the surface treatment is one of the important methods. The basic corrosion protection measures and ideas for fastener were briefly analyzed. Focused on the surface treatment technology and structural anti-corrosive, the requirements of surface coatings in different operation conditions were discussed. In addition, surface treatment methods and corrosion structural design for fasteners were proposed.

**[Key words]** fasteners; corrosion protection; surface treatment

紧固件在海洋平台和船舶上, 是最常用的机械连接方式, 其可靠性直接关系到平台、系统或者设备的可靠性, 也关系到总体安全性, 一直受到设计者和运行人员的高度重视。不过长期以来, 设计者往往比较重视紧固件的疲劳寿命、断裂失效、应力应变状况、冲击负荷等, 而忽视了腐蚀失效所带来的问题<sup>[1-4]</sup>。但实际上, 长期运行在海洋中的海洋平台、船舶系统, 已经凸显出紧固件腐蚀影响总体运行的问题, 尤其是严重威胁安全性。随着科学技术的发展, 设计者对腐蚀问题的认识越来越深入, 对海洋环境下紧固件的防腐要求也越来越高。对紧固件进行腐蚀防护设计, 可提高其在高温、高湿、高盐海洋环境中的耐腐蚀性。

### 1 紧固件腐蚀防护基本要求

紧固件是系统和设备连接的关键部件和受力部

件, 因此表面处理, 机械性能和物理性能应符合设计要求, 从而保证其在规定使用寿命内的连接可靠性。

#### 1.1 力学性能要求

金属紧固件的表面处理技术, 以不伤害基体金属和与基体金属发生有害反应, 不改变基体金属的化学成分, 不降低基体金属的力学性能为原则。如果基体金属的化学成分和力学性能发生了改变, 则应重新对紧固件的应用性能进行鉴定。

#### 1.2 工艺性能要求

1) 轮廓尺寸。裸紧固件的轮廓尺寸会影响表面处理层的厚度, 如果轮廓尺寸小于设计的标准尺寸, 那么留给表面处理层的空间较大, 反之亦然。但是若裸紧固件的轮廓尺寸太小, 将影响到紧固件的固有强度, 同时导致涂覆后的标准紧固件涂层较厚、加工费用很高, 这对多种规格、数量巨大的紧固件是不适用的。目前比较通用的是, 裸紧固件的螺栓、螺母的间隙为 20

~30  $\mu\text{m}$ 。

2) 厚度。紧固件的表面处理层应根据工艺确定合适的厚度,太薄则防腐性能差,太厚又会影响到紧固螺环与螺母的旋合性能。因此各种表面处理工艺必须慎重考虑厚度,以同时满足设计防护性能和使用性能。

3) 旋合性能。裸紧固件的轮廓尺寸和紧固件表面处理层的厚度直接决定了紧固件的旋合性能,旋合性能是衡量施工性能的尺度。

4) 耐腐蚀性。表面处理层在海水、高温、高盐、高湿的环境中应具有良好的耐腐蚀性,以保证紧固件的寿命。

5) 结合强度。紧固件表面处理层和基体金属的结合强度,是衡量涂层性能的一个重要指标。紧固件的防腐不仅在螺栓的光杆部位,也在紧固件的螺纹部位,尤其螺纹部位的结合力必须满足使用要求,否则紧固件旋合时很容易发生涂层脱落,尤其是需要较大力矩拧紧的紧固件。

6) 耐磨性。与结合强度一样,耐磨性反映了涂层在使用过程中的性能。一般的紧固件防腐涂层较薄,在紧固件反复使用的过程中,涂层应保证完好性。

7) 硬度。紧固件涂层应有足够的硬度,保证在旋合时的均匀性和完好性。

8) 无毒。紧固件表面处理层应不挥发气味或者有害气体,对使用环境无污染,这一点对密闭空间尤其重要。

### 1.3 环境适应性要求

紧固件应用的环境复杂多变,因此,防腐涂层必须满足各种苛刻环境的要求,例如海水环境、油环境、冷热交变环境、干湿交替环境、阳光辐照环境、风力环境等。

## 2 紧固件腐蚀防护方法

紧固件的腐蚀防护是一项系统工程,为了延缓、控制紧固件材料的腐蚀,防止紧固件材料的退化、恶化,确保紧固件的可靠性、安全性和使用寿命,单一防腐措施的作用和效果有限,应同时采用多项防腐措施。

### 2.1 选取耐腐蚀的基体材料

选择具有良好耐海水腐蚀能力且与其它接触部件兼容的材料作为紧固件的基材,是最直接、最简单、最有效的方法。例如,美国海军研发了 868 合金钢作为海军船舶紧固件用材料,868 合金钢添加了镍、铬、钼等耐蚀金属,抗拉强度达 800 MPa 级,延伸率 50%,具有优异的抗冲击强度和韧性,耐海水性能良好,抗裂纹腐蚀和氢脆的性能也较好,在海水中不发生缝隙腐蚀,电化学的兼容性好<sup>[5]</sup>。

### 2.2 表面处理

目前,既满足强度、刚度和韧性要求,又满足耐海水腐蚀要求的材料不多,因此常对紧固件进行表面处理,即基体材料仅考虑力学性能,而将其抗腐蚀性能交付于涂层防护,这也是目前最常用的方法。

#### 2.2.1 镀锌和粉末渗锌

镀锌和粉末渗锌均是在紧固件表面覆盖一定厚度的锌层,其作用原理是牺牲阳极保护,即表面锌层先腐蚀,从而对基体金属起保护作用。由于锌层较薄,并且比铜合金等金属的电位低,因此锌层与铜合金、钛合金、不锈钢等发生异种金属接触腐蚀时,腐蚀速率较快。据资料介绍<sup>[6-7]</sup>,粉末渗锌层的耐大气腐蚀性能较好。普通碳钢经过粉末渗锌,其耐磨性可提高 50% 左右,渗锌层的耐磨性比热镀锌层高很多,还具有很好的耐热性能。另外,渗锌的工艺简单,生产灵活、方便,而且渗锌层的厚度可以控制在 10 ~ 140  $\mu\text{m}$  之间,这一特点对要求渗锌层很薄的紧固件非常重要。不过实践证明,对于高温、高湿、高盐环境下的紧固件,这两种表面处理方法的防腐效果是有限的。

#### 2.2.2 锌镍镀层

锌镍镀层是一种合金镀层,耐蚀性较好。Ni 质量分数为 10% ~ 15% 的锌镍镀层在工业大气和海洋性大气中,耐蚀性是纯锌镀层的 3 ~ 6 倍。镀层中 Ni 的含量对镀层耐蚀性的影响最大,当 Ni 质量分数为 13% 时,镀层的耐蚀性最好。在 5% (质量分数) 的 NaCl 溶液中,随镍含量的增加,锌镍合金镀层的稳定电位向正方向移动,在最佳耐蚀区,稳定电位基本接近于镉的电位,远远低于锌的电位,当镀层与钢铁基体组成微电池时,腐蚀电势要小得多,因而腐蚀速度比镀锌层要慢得多<sup>[8-9]</sup>。此外,锌镍合金镀层的显微硬度也比纯镀锌层高,且 Ni 含量越高,硬度越高。

#### 2.2.3 钛纳米涂层

钛纳米涂层可通过以下方法获得:先用高效能粉碎机将钛粉碎成纳米级的金属颗粒,再采用机械-化学方法制备钛基纳米金属粉和钛纳米聚合物,然后按照一定的组分配比制备涂液,按程序涂装在金属基体表面,最后用钛纳米聚合物封闭。

钛纳米聚合物的比表面积大且具有化学作用,抗渗透能力显著,具备憎水性,腐蚀性介质和离子很难通过这层聚合物到达基体,因此它具有较好的封闭性能,能切断腐蚀介质与金属的接触。同时,金属粉和钛纳米聚合物呈化学键连接,结构致密,耐蚀性强。因此,钛纳米涂层具有较好的耐腐蚀性能。

#### 2.2.4 达克罗涂层

达克罗 (Dacromet) 涂层是美国在 20 世纪 50 年代

开发的防腐技术,具有良好的性能,如极强的抗腐蚀性、无氢脆,特别适用于高强度受力件。达克罗涂层主要用于处理钢铁零件,提高零件的耐腐蚀性和润滑性,其主要成分是 Zn-Cr。

国内达克罗生产单位较多,主要处理工艺有:1)二涂二烘,改进型环氧树脂封闭;2)渗锌,二涂二烘,改进型环氧树脂封闭;3)二涂二烘;4)三涂三烘。

值得推荐的是改进的 Zn-Al 达克罗涂层,它较常规达克罗涂层具有更好的耐腐蚀性能。

2.2.5 试验对比

针对紧固件的表面处理方法,笔者对目前船舶常用的渗锌紧固件、改进达克罗涂层紧固件和常规达克罗涂层紧固件进行了对比试验。

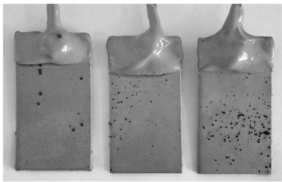
1) 盐雾试验。从不同表面处理的紧固件的腐蚀形貌(见图 1)看,改进后的 Zn-Al 达克罗涂层具有相对

较好的耐盐雾腐蚀性能,盐雾腐蚀 2100 h 后仍较完好,常规达克罗涂层的耐蚀性次之,渗锌层的耐蚀性最差。

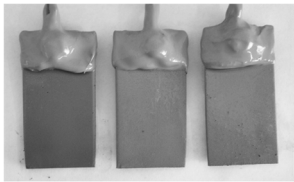
2) 海水全浸腐蚀试验。在海水中全浸腐蚀 2600 h 后的形貌如图 2 所示,可见改进达克罗涂层的耐腐蚀性能较好。



a 渗锌层



b 常规达克罗涂层



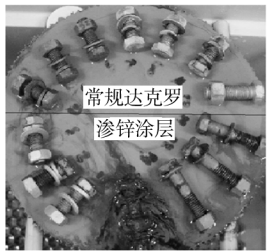
c 改进达克罗涂层

图 2 涂层的海水浸泡试验结果

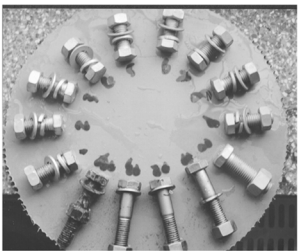
Fig. 2 Seawater immersion test results of different coatings

3) 电化学阻抗谱评价试验。由图 3 可见,涂层试样在海水中呈现 2 个时间常数,改进达克罗涂层的  $R_f$  和  $R_t$  值要大得多,说明其耐蚀性能更加优良。改进达克罗涂层的  $R_t$  值在 200 h 内变化缓慢,说明表面膜层为保护性良好的隔绝层,腐蚀介质(即海水)的渗入较慢,具有较好的耐腐蚀性能。

4) 电偶腐蚀试验。由图 4 可以看出,改进达克罗



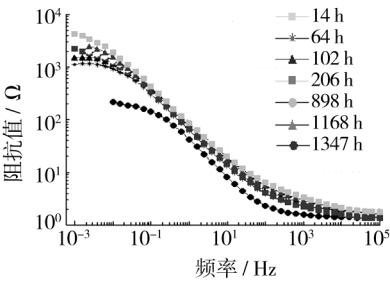
a 常规达克罗涂层与渗锌层  
盐雾试验 480 h



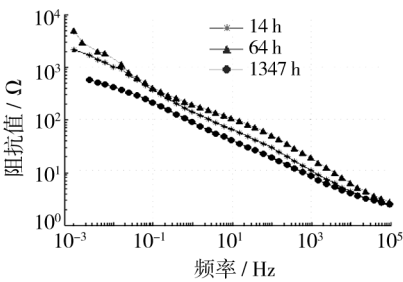
b 改进达克罗涂层盐雾  
试验 2100 h

图 1 涂层的盐雾试验结果

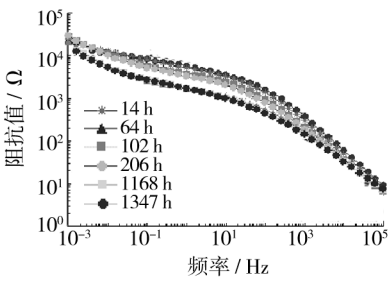
Fig. 1 Salt spray test results of the coatings



a 渗锌涂层



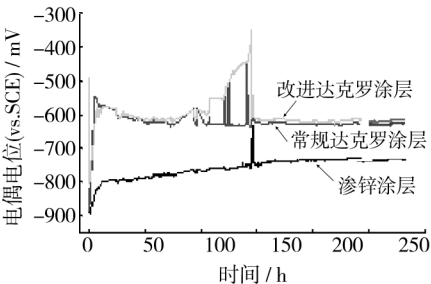
b 常规达克罗涂层



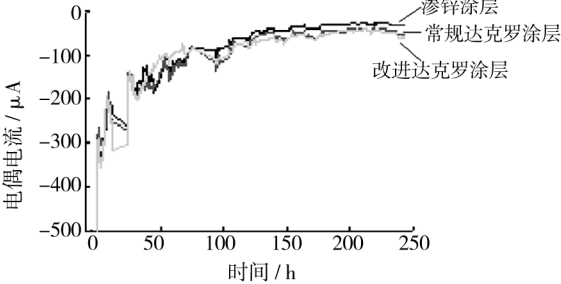
c 改进达克罗涂层

图 3 电化学阻抗谱评价试验结果

Fig. 3 Test results of electrochemical impedance spectroscopy evaluation



a 与 Q235 钢接触



b 与紫铜接触

图 4 涂层的电偶腐蚀试验结果

Fig. 4 Test result of coating galvanic corrosion

涂层与紫铜、Q235 钢间的电偶腐蚀程度最轻,与管路和法兰材料间的相容性好,渗锌与钢、铜的电偶腐蚀倾向均较大。

## 2.3 合理的防腐结构设计

紧固件结构防护主要是针对高电位金属对它的加速腐蚀,例如钛合金、铜合金、不锈钢等法兰对钢制紧固件的加速腐蚀。电绝缘隔离技术和介质隔离技术是可行的方法,目前已经得到应用。

### 2.3.1 电绝缘隔离技术

由于海洋平台上和船舶系统中所用材料较多,如钛合金、不锈钢等,紧固件与法兰连接后,可能发生异种金属接触腐蚀。紧固件与法兰连接的部位有两个,即垫圈与法兰的接触部位和螺栓与法兰螺栓孔的接触部位。采用隔离套筒方式,在这两个部位采取物理措施将其隔离开,可切断螺栓腐蚀电流的通路。

在俄罗斯的船舶上,大量采用了电绝缘隔离措施。初期的电绝缘设计是在一对法兰的两端均采用电绝缘结构,但在后期设计中,俄罗斯简化了方法,实行单边电绝缘。紧固件电绝缘结构示意图如图 5 所示。

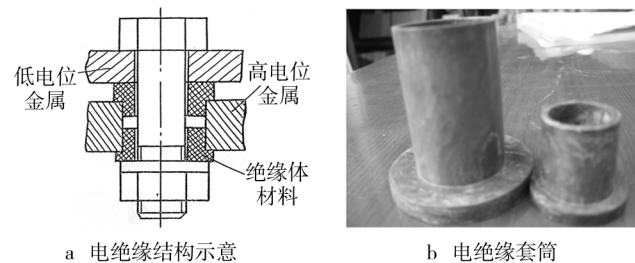


图 5 紧固件电绝缘结构

Fig. 5 Electrical insulation structure of fasteners

### 2.3.2 介质隔离技术

海洋平台或者船舶上,某些部位的紧固件或浸没于海水中,或干湿交替,或受凝露覆盖。海水或者凝露作为电解质,连通了法兰与紧固件两异种金属之间的电路。将电解液与两种金属隔离开,就切断了两种金属之间的电路,不能形成腐蚀电流。介质隔离层的材料应耐油,耐水,为电的不良导体,具有一定的硬度,耐冷热干湿交替,易施工。介质隔离示意图如图 6 所示。

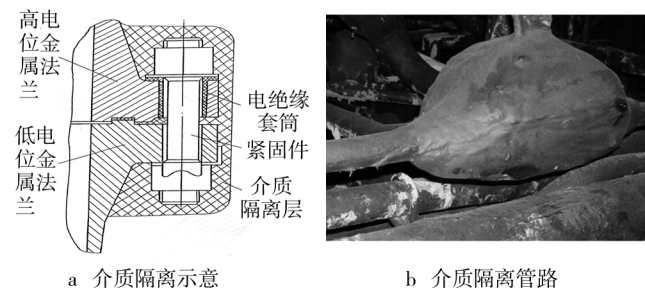


图 6 介质隔离

Fig. 6 Dielectric isolation

## 2.4 其它应注意的问题

1) 在生产、运输、储存的过程中,应以不损伤紧固件固有的耐蚀性为原则。

2) 确定合理、可行的紧固件安装工艺,实行科学施工。

## 3 结语

随着科学技术的发展,对材料耐环境腐蚀的要求不断提高,有必要发展新技术、新方法,不断提高关键基础零部件的长效保护性能。各种腐蚀防护表面处理技术均有其特点和局限性,使用时要针对具体使用环境进行设计,从防护特点及性能、服役寿命、制备成本等诸多方面进行综合分析,并加以利用。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 惠卫军,翁宇庆,董瀚. 高强度紧固件用钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:30—40.
- [2] 王永庆. 30CrMnSiNi2A 螺栓断裂分析[J]. 理化检验, 2000,36(10):463—465.
- [3] 景秀并,潘凤章,沈兆光. 紧固件横向振动试验台的研制[J]. 机械设计,2005(6):45—47.
- [4] 燕来荣. 我国紧固件行业发展现状[J]. 金属制品,2011(1):11—13.
- [5] 刘德林,胡小春. 从失效案例探讨钢制紧固件的氢脆问题[J]. 材料工程,2011(10):78—83.
- [6] 唐绍铨,郭庆珍. 粉末渗锌工艺实践与总结[J]. 有色金属,1998(5):45—48.
- [7] 马青华,付大海,董作敬. 机械能助渗锌及其海洋环境防腐效果[J]. 中国表面工程,2009(6):61—67.
- [8] 田伟,谢发勤,吴向清. 锌镍合金镀层耐蚀性研究[J]. 腐蚀与防护,2006(11):552—555.
- [9] 肖作安,费锡明,邹勇进. 锌镍合金镀层耐蚀性的研究[J]. 材料保护,2005(3):25—28.