

# 螺纹连接失效机理与防护的研究进展

黄志宇<sup>1,2</sup>, 王新礼<sup>1,2</sup>, 田盼<sup>1,2</sup>, 汪洋<sup>1,2</sup>, 刘兰轩<sup>1,2</sup>,  
刘秀生<sup>1,2\*</sup>, 吴正江<sup>3</sup>, 王博<sup>3</sup>

(1.中国机械总院武汉材料保护研究所有限公司 特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室, 武汉 430030; 2.中国机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100080;  
3.武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430014)

**摘要:** 螺纹连接在工程应用领域是必不可少的一种连接方式。其优点在于结构简单、连接可靠、拆卸方便、成本低廉等。然而在实际应用中, 受环境腐蚀、振动、外部冲击等因素的影响, 螺纹连接失效概率较大, 从而导致设备损坏或安全事故, 造成严重的经济损失和人员伤亡。因此, 对螺纹连接的失效机理进行深入研究, 并提出有效的预防和保护措施, 对提高设备的安全性和可靠性具有实际意义。基于对近年来相关文献报道的广泛调研, 从基本科学原理出发, 总结并探讨了螺纹连接的主要失效机理与预防措施。首先重点分析了螺纹断裂、螺纹腐蚀、螺纹磨损等现象的失效机理, 研究了包括预紧力、应力集中、振动、环境条件等在内的各种影响因素, 另外, 针对螺纹连接失效的不同形式总结了其主要的措施及手段, 包括电镀、涂层、添加缓蚀剂、热处理和表面硬化处理等, 并分析了这些措施的优势与缺点。现有的防护手段存在缺陷并且缺少相应的检测防控手段。例如, 使用热处理强化方法会对材料的性能产生影响、镀层不能长时间进行防护、表面处理成本高等。最后, 针对螺纹连接失效及其防护研究的重点和热点问题与改进进行了展望。

**关键词:** 失效分析; 螺纹断裂; 螺纹腐蚀; 螺纹防护

中图分类号: TG174.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2025)08-0033-18

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.08.003

## Failure Mechanism and Protection of Threaded Connections

HUANG Zhiyu<sup>1,2</sup>, WANG Xinli<sup>1,2</sup>, TIAN Pan<sup>1,2</sup>, WANG Yang<sup>1,2</sup>, LIU Lanxuan<sup>1,2</sup>,  
LIU Xiusheng<sup>1,2\*</sup>, WU Zhengjiang<sup>3</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Special Surface Protection Materials and Application Technology, Wuhan Research Institute of Materials Protection, Wuhan 430030, China; 2. China Academy of Machinery Science and Technology Group, Beijing 100080, China; 3. Wuhan Second Ship Design & Research Institute, Wuhan 430014, China)

**ABSTRACT:** As an important mechanical connection, the threaded connection has a wide range of applications covering many industries such as construction, automotive, aerospace, electric power, petrochemical, etc. The advantages of this type of connection are that it is structurally reliable, easy to connect and disassemble, and cost effective. However, in practice, environmental corrosion, vibration, external impact and other factors will have an impact on the threaded connection, resulting

收稿日期: 2024-09-27; 修订日期: 2024-12-27

Received: 2024-09-27; Revised: 2024-12-27

引文格式: 黄志宇, 王新礼, 田盼, 等. 螺纹连接失效机理与防护的研究进展[J]. 表面技术, 2025, 54(8): 33-50.

HUANG Zhiyu, WANG Xinli, TIAN Pan, et al. Failure Mechanism and Protection of Threaded Connections[J]. Surface Technology, 2025, 54(8): 33-50.

\*通信作者 (Corresponding author)

in its failure. This not only leads to equipment damage, but also may cause safety accidents, bringing serious economic losses and casualties to the enterprise. Therefore, carrying out in-depth study of the failure mechanism of threaded connection, and putting forward effective preventive measures accordingly to improve the safety and reliability of equipment are of great practical significance.

Based on the extensive research of relevant literature reports in recent years, the main failure mechanism and preventive measures of thread fracture, thread corrosion and thread wear are analyzed. Various factors such as preload, stress concentration, vibration and environmental conditions are also investigated. Secondly, for the previous thread fracture, thread corrosion, thread wear and other conditions, the various measures to prevent the thread connection failure are summarized, including coating, coating, corrosion inhibitor, heat treatment and surface hardening treatment, and the advantages and disadvantages of these measures are analyzed. Thread fracture usually requires the stress concentration of long hours and the effect of external impact, which can be eliminated by stress and heat treatment, refine the grain, and improve the toughness and plasticity of the material, but the high temperature will decrease the coarse hardness of the grain. Thread corrosion usually reacts with corrosive media in a specific chemical environment. Measures such as using corrosion-resistant materials and applying anti corrosive coating can be taken to isolate the contact between thread pairs and corrosive media. Thread wear is usually due to the role of friction in the working process of thread auxiliary, which can be reduced by coating to isolate the surface contact, or through the surface treatment method to increase the hardness of the material. Adding lubricant and sealing can also reduce wear. Some common daily maintenance and protection means, such as the manufacturing process to ensure the accuracy and surface quality of the thread, regular inspection and maintenance of the thread connection parts, also increase the pretension force, etc. These measures are designed to improve the corrosion, vibration and impact resistance of the risk of failure.

Finally, the current status of Chinese and international research on failure prevention of threaded connection in the last three years is screened and summarized. By comparative analysis, it is found that Chinese and foreign research on failure prevention of threaded connection has achieved certain results, but there are still many problems that need to be solved, such as short protection time, high cost, non-environmentally-friendliness and lack of appropriate testing and diagnostic technology. In the future, it is necessary to continue to study the failure mechanism of the threaded connection, and study the high performance protection materials, green environmental protection technology and intelligent monitoring and diagnosis technology to prevent and reduce the casualties and economic losses caused by the thread failure.

**KEY WORDS:** failure analysis; thread fracture; thread corrosion; thread protection

螺纹紧固件是一种广泛应用于各种机械设备和工程结构中的连接件,其研究背景和应用领域非常广泛。在工业领域,螺纹紧固件被广泛应用于各种机械设备和工程结构中,如航空航天、汽车、电子、建筑等<sup>[1]</sup>。螺纹连接具有结构简单、连接可靠、装拆方便、成本低、适用范围广等优点,是一种广泛使用的连接方式。

螺纹失效是指螺纹连接在应用过程中,不能正常发挥其功能的现象。通常表现为螺纹断裂、螺纹腐蚀和螺纹磨损。然而,螺纹紧固件的失效会对机械设备和工程结构的安全性和稳定性产生严重影响。首先是影响连接结构安全:螺纹紧固件失效可能导致工程结构不稳定,增加结构倒塌、断裂、滑脱等风险<sup>[2]</sup>。特别是在桥梁、建筑、运输等大型工程中,螺纹紧固件的失效会使力学性能下降,可能引发严重的安全事故。螺纹紧固件失效会导致机械设备的性能下降,如精度降低、振动增加构件滑脱等,从而影响机械设备的正常运行,增加维修和更换成本<sup>[3]</sup>。在工业生产过程中,螺纹紧固件失效可能导致生产线停滞,影响生

产效率和经济效益。特别是在汽车、电子等制造业中,紧固件的失效可能造成严重的生产损失<sup>[4]</sup>,更有可能引发安全隐患,如飞机坠毁、桥梁倒塌等重大安全事故<sup>[5-6]</sup>。螺纹紧固件虽小,但其失效导致的设备损坏或安全事故,会造成严重的经济损失和人员伤亡。因此,研究螺纹紧固件的失效机理、预防螺纹紧固件失效对保障机械设备和工程结构的安全性和稳定性具有重要意义。

在螺纹内部应力集中或预紧力过大的情况下,可能会导致螺纹断裂现象发生;当螺纹暴露于腐蚀性环境时,易发生螺纹腐蚀;而在振动的工作环境下,螺纹磨损则成为主要问题。螺纹紧固件的失效模式与多种因素相关,包括但不限于预紧力、应力集中、振动以及环境条件等。针对这些影响因素,目前主流的防护措施有改善螺纹应力分布的热处理防护、添加减缓腐蚀速率的有机缓蚀剂、减少螺纹与环境接触的镀层防护、提高螺纹表面硬度和耐磨性的表面处理防护等。然而,现有的防护手段存在缺陷:使用热处理强化方法会对材料的性能产生影响、镀层不能长时间进

行防护、表面处理成本高等。为了减少事故发生,还需要相应的监测防控手段。这需要选用合适的材料和工艺,采取有限元分析和性能评估等措施,并加强设备维护和检修<sup>[7-9]</sup>。螺纹连接在机械和工程领域中具有广泛的应用,因此其失效机理和防护措施一直是研究热点。通过对螺纹连接失效机理的研究,可以更好地了解其耐腐蚀性能和工作环境限制,从而采取有效的防护措施来提高其稳定性和耐久性。未来,随着新材料和新工艺的发展,螺纹连接的性能和防护措施将会得到进一步提升和完善。

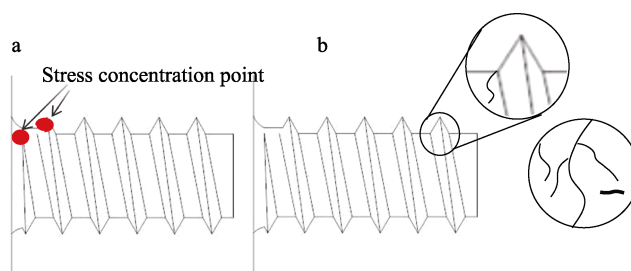


图1 螺纹应力集中(a)和螺纹表面裂纹拓展(b)  
Fig.1 Thread stress concentration (a) and surface crack propagation on thread (b)

## 1 螺纹断裂失效的机理及其防护

### 1.1 螺纹断裂失效的机理分析

螺纹断裂是生活中最常见的一种螺纹失效形式。螺纹断裂主要是因为应力疲劳及外部冲击的影响。当螺纹长期处于高强度或高温的工作环境下, 螺纹会出现应力集中区 (见图 1a)。随着工作时间的延长, 应力集中区逐渐出现微裂纹, 微裂纹缓慢拓展形成可见的宏观裂纹, 进而引起螺纹的断裂 (见图 1b)。当螺纹受到过大的剪切应力时, 则容易在螺纹应力集中区表面产生剪切疲劳裂纹, 进而引起螺纹的断裂<sup>[10]</sup>。螺纹冲击断裂是冲击载荷超出螺纹材料强度极限导致的螺纹连接件断裂。在该现象中, 外部冲击载荷直接作用于螺纹表面, 引起螺纹产生应力集中, 随着冲击载荷的增大在螺纹应力集中区会产生微裂纹, 最终导致断裂。

余世杰等<sup>[10]</sup>分析了某油田钻井队钎铤断裂失效事故,对其断裂口的化学成分、力学性能、硬度进行了检测。钎铤断裂处化学成分(见表1)、力学性能(见表2)、硬度测试(见表3)都符合要求。之后通过观察裂纹处微观形貌和断口附近的显微结构(见图2a),发现裂纹起源于内螺纹牙底(见图2c),沿径向向外扩展,裂纹整体形貌细长,裂纹径向深度范围为0.2~2.0 mm,将断面置于扫描电镜下观察,发现存在裂纹拓展现象(见图2d)。得出结论,在长时间高强度工作环境下,在循环载荷的作用下,应力集中区域首先产生微型塑性变形,随着循环加载继续,逐渐出现微裂纹,微裂纹缓慢拓展形成可见的宏观裂纹,继续拓展导致断裂。Guo等<sup>[11]</sup>发现高强度钢基材和多孔板在疲劳范围内表现良好,但应力集中会降低螺栓的疲劳强度。Wang等<sup>[12]</sup>发现拉伸疲劳下,与螺栓螺母相邻的区域最容易受到破坏,最大主应力影响剪切面上紧固件的疲劳寿命。

表 1 断裂钻铤的化学成分分析<sup>[10]</sup>  
Tab.1 Analysis of chemical composition of broken drill collar<sup>[10]</sup>

Project	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu	Ti
Measured value	0.45	0.22	1.06	0.014	0.001 9	1.10	0.23	0.025	0.008	0.019	0.011	0.006
Measured value	—	—	—	≤0.025	≤0.025	—	—	—	—	—	—	—

表 2 断裂钻铤的力学性能分析<sup>[10]</sup>  
Tab.2 Mechanical properties analysis of broken drill collar<sup>[10]</sup>

Project	Tensile strength $R_m$ /MPa	Yield Strength $R_{p0.2}$ /MPa	Elongation at break $A$ /%	Impact absorption energy/J	
				Single value	Average
Measured value	1 060	920	19	82,84,86	84
Measured value	$\geq 965$	$\geq 758$	$\geq 13$	$\geq 54$	

表 3 断裂钻铤的硬度测试分析<sup>[10]</sup>  
Tab.3 Hardness test and analysis of broken drill collar<sup>[10]</sup>

[illegible]

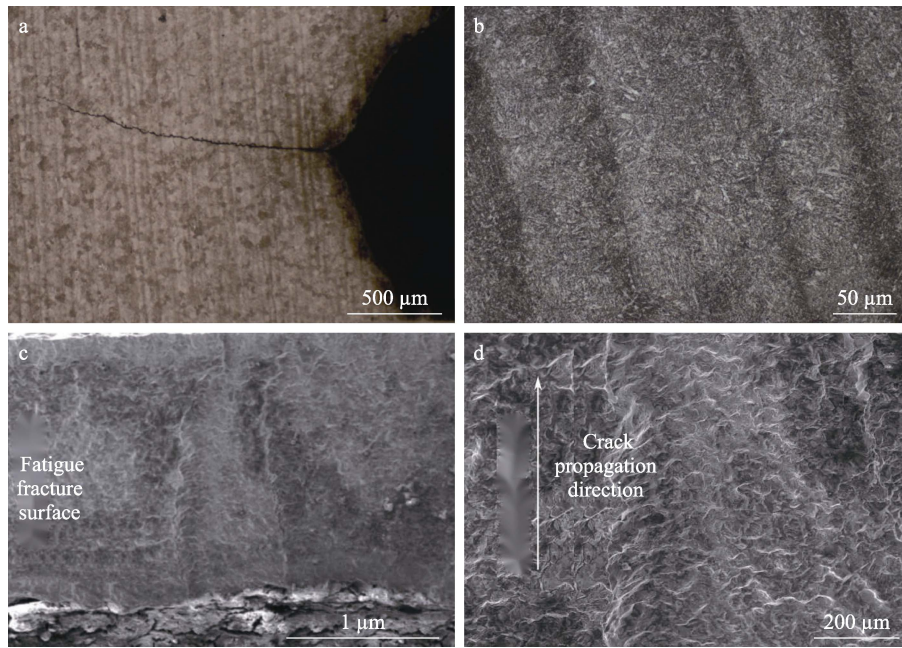


图 2 裂纹微观形貌 (a)、失效钻铤断口附近显微结构 (b)、疲劳断裂打开后疲劳断裂面 SEM 形貌 (c)、疲劳断裂打开后裂纹拓展台阶 SEM 形貌 (d)<sup>[10]</sup>

Fig.2 Micro morphology of the crack (a), micro structure morphology near fracture surface of the failure drill collar (b), SEM morphology of fatigue fracture surface after opening of fatigue fracture (c) and SEM morphology of crack propagation steps after opening of fatigue fracture (d)<sup>[10]</sup>

螺纹冲击断裂是指螺纹连接件在受到冲击载荷时引起的断裂。这种断裂通常是冲击载荷超过螺纹材料的强度极限而导致的。当螺纹连接件受到外部冲击时,冲击载荷会传递到螺纹表面上,产生应力集中现象。如果冲击载荷过大,超过螺纹材料的强度极限,就会导致螺纹的断裂。螺纹的形状和结构对冲击断裂有影响,例如,角度、深度、润滑<sup>[13]</sup>等设计因素不当,都可能增加螺纹受到冲击时的应力集中程度,从而促进冲击断裂的发生。如果螺纹材料存在缺陷,如裂纹、夹杂物等,这些缺陷可能会成为冲击断裂的起点。在冲击载荷的作用下,这些缺陷可能会导致应力集中,从而引发冲击断裂。陈彬彬等<sup>[14]</sup>发现,当钢棒原材料质量较差时,其横截面内部经常会有疏松、缩孔、裂纹等缺陷。这些缺陷在锻造过程中由于变形量较小而

无法消除,会遗传到后续产品中。打压时,这些缺陷处会形成泄漏点,导致所有泄漏点都出现在同一位置。廖贵鹏等<sup>[15]</sup>研究了螺杆钻具传动轴接头表面裂纹断裂性能。该接头同时承受钻压所产生的轴向和扭转冲击。应力集中在接头螺纹处,导致表面裂纹易产生并发生疲劳扩展,最终导致螺纹断裂。通过模型仿真分析(见图 3a),发现危险位置位于螺纹第一扣的根部。通过仿真拟合曲线预测了预紧力单独作用的曲线(见图 3b),并且研究了预紧力的作用,发现适当的预紧力可以起到保护作用,但是预紧力过大会加大螺纹承受的压力。

当螺纹受到外力作用时,若超出其材料的弹性极限,便会发生塑性变形。这种过度变形不仅会降低螺纹的紧固力,还可能引发局部应力集中,为断裂埋下

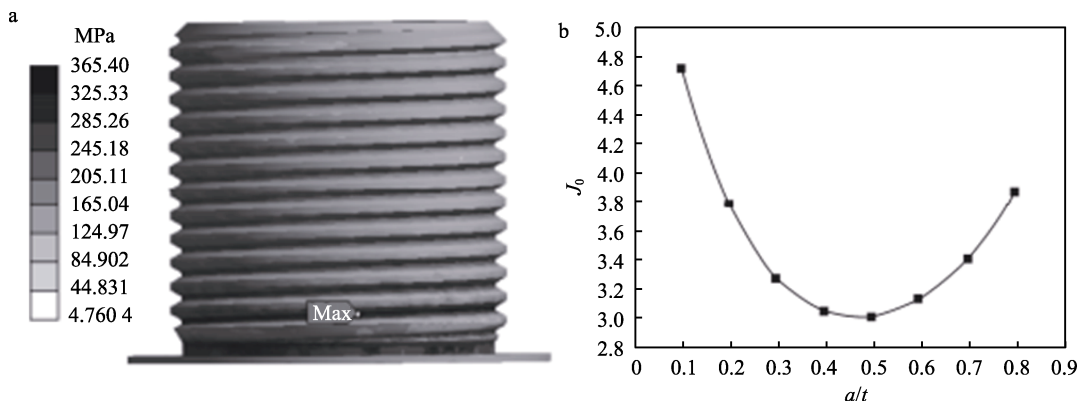


图 3 无裂纹接头外螺纹的等效应力 (a)、上扣预紧力单独作用 (b)<sup>[15]</sup>

Fig.3 Equivalent stress of the pin thread without crack (a) and loaded by tension only (b)<sup>[15]</sup>



隐患。当螺纹受到反复加载和卸载时,其塑性变形会逐渐累积,形成所谓的“冷作硬化”,进一步降低材料的韧性,增加断裂的风险<sup>[16]</sup>。在交变载荷的作用下,螺纹会逐渐产生疲劳损伤。这种损伤往往从微观裂纹开始,随着载荷的反复作用而逐渐扩展,最终导致断裂。疲劳损伤具有隐蔽性强、发展缓慢的特点,因此往往难以被及时发现和处理。

螺纹断裂通常不是单一因素导致的,而是多种因素共同作用的结果。这些因素包括接头处的过度变形、疲劳损伤、硫化物应力腐蚀和氢脆等,最终导致螺纹断裂失效。

在含有硫化物的环境中,螺纹可能受到硫化物应力腐蚀的威胁。这种腐蚀过程涉及硫化物与金属表面的化学反应以及应力作用下的裂纹扩展。硫化物应力腐蚀往往具有突发性强、破坏力大的特点,一旦发生往往会导致严重的后果。例如在深井钻具和油井隔热油管外管中,螺纹连接处是最容易发生断裂的部位。在钻具中,接头处的疲劳损伤和硫化物的应力腐蚀是导致螺纹断裂的主要原因<sup>[17]</sup>。在油管外管中,腐蚀介质在螺纹槽底部产生腐蚀坑,并导致硫化物应力腐蚀断裂。

氢脆是一种由于氢原子侵入金属内部而引起的脆化现象。在螺纹连接过程中,若存在氢气源(如电镀液、焊接气体等),则有可能发生氢脆现象。氢原子进入材料基体时,可能引起晶格畸变,导致材料在外力作用下容易开裂(见图4)。氢原子迁移到应力高度集中区,可能造成晶体颗粒间破裂。操作不当及金属材料中的氢也可能增加断裂的风险<sup>[18]</sup>。

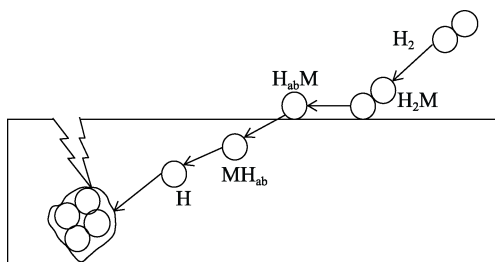


图4 螺纹氢脆机理

Fig.4 Hydrogen embrittlement mechanism of threads

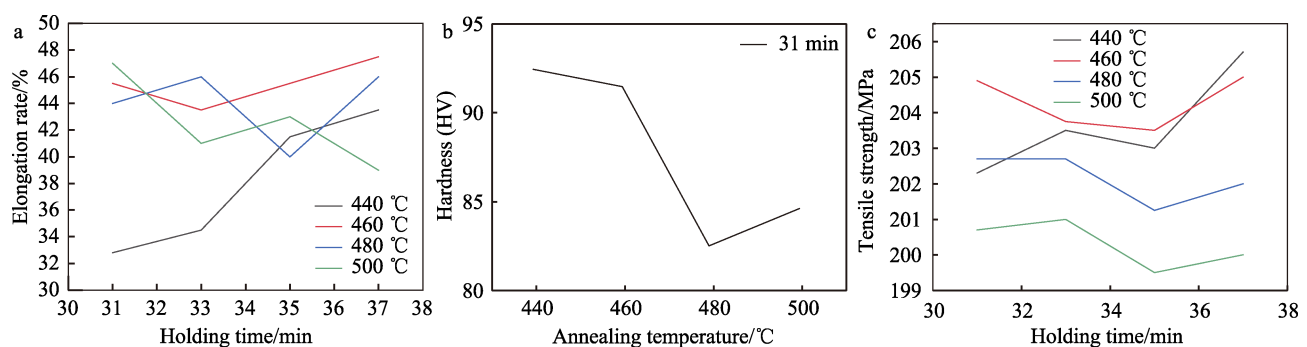


图5 退火工艺对伸长率的影响 (a)、退火工艺对硬度的影响 (b)、退火工艺对抗拉强度的影响 (c) <sup>[19]</sup>

Fig.5 Effect of annealing process on elongation (a), effect of annealing process on hardness (b) and effect of annealing process on tensile strength <sup>[19]</sup>

## 1.2 螺纹断裂失效的防护方法

螺纹断裂的机理主要包括弯曲应力过大、剪切应力过大、外部冲击等因素。为了预防螺纹断裂的发生,需要针对不同的因素采取相应的措施。如进行正确的热处理来改善材料内应力分布、选用高质量的材料来增大材料承受载荷的能力、使用正确的加工方法和工具、控制螺纹的形状和精度来减少间隙等。

螺纹热处理强化是一种常用的工艺方法,对螺纹材料进行加热和处理,以改变其物理和化学性质,提高其强度和韧性,最终提高螺纹零件的力学性能和耐磨性。在工程领域中,螺纹零件广泛应用于各种机械设备和工具中,因此对螺纹热处理强化的研究具有重要意义。通过改变螺纹材料的热处理状态,可以提高材料的硬度和耐腐蚀性,改善螺纹的应力分布情况,减少应力集中,减少螺纹发生微观裂纹开裂,从而减小螺纹发生断裂的概率。目前常用的方法有退火处理、正火处理、调质处理等。

退火处理是指将螺纹材料加热到一定的温度,随后缓慢冷却,以消除材料内部的应力和晶界杂质,提高材料的塑性和韧性。黄震等<sup>[19]</sup>研究了退火态  $\phi 7$  mm 内螺纹铜管的组织和力学性能。通过对不同退火温度下的铜管进行显微组织观察和力学性能测试(见图5)发现,适当的退火处理可以显著改善铜管的延伸率、硬度、抗拉强度等力学性能。但随着退火温度的上升,硬度开始逐渐降低,这是因为随着温度上升,材料晶粒逐渐长大,晶粒越粗大,材料的硬度、强度会下降。这一研究结果为螺纹热处理强化提供了重要的参考。

正火处理是指对经过退火处理的材料进行二次加热至特定温度区间,随后迅速冷却,以实现晶粒细化,进而提升材料的硬度与强度。调质处理则是在正火处理的基础上,将材料加热至更高的温度区间,进行一定时间的保温,最终冷却至室温。该处理过程能够进一步优化材料的综合性能,赋予其更高的硬度与强度。时效处理是在调质处理之后,将材料加热至特定温度区间,并保温一定时间,随后冷却。此过程有助于稳定材料的组织结构,并进一步增强其硬度与强

度。傅璞<sup>[20]</sup>研究了 40Cr 钢的热处理工艺及其组织与性能。通过对不同热处理工艺下的 40Cr 钢进行组织观察和性能测试, 得出了不同热处理工艺对 40Cr 钢组织和性能的影响规律。发现 40Cr 钢经调质处理后既具有较高的硬度和强度, 又具有较好的韧性, 即具有良好的综合力学性能。这一研究结果对于螺纹热处理强化的工艺优化具有重要的指导意义。

氮化处理是一种表面处理技术, 通过加热时效处理后的材料并通入氮气, 使材料表面形成氮化物层。接头螺纹进行表面处理的目的是防止出现粘扣、表面划伤等影响使用寿命的问题。目前, 主要的表面处理技术有螺纹表面渗氮和螺纹表面镀铜。苏辰兆等<sup>[21]</sup>研究了氮化工艺在钻杆接头螺纹处理中的应用, 使用了离子渗氮和氮碳共渗的方法对其进行氮化处理。钻杆接头螺纹表面氮化处理后, 渗层深度为 0.46 mm, 硬度大于 350HV, 压痕边角完整无缺; 渗氮层化合物层较致密, 表面有少量细点状微孔; 渗氮层扩散层中有少量脉状分布的氮化物。通过对氮化处理后的钻杆接头螺纹进行显微组织观察和性能测试, 发现氮化处理可以显著提高钻杆接头螺纹的硬度和耐磨性。

郭国强等<sup>[22]</sup>通过设计研究了不同条件(见表 4)、次数热处理后的试验试板金相组织结构和晶粒形貌, 对比了 1 号淬火、2 号淬火后回火、3 号淬火后冷处理再回火、4 号在 3 号基础上再次冷处理后回火 4 种试样的变化(见图 6a)。对比 1、2、3 号的金相组织结构, 发现采用冷处理工艺, 沉淀析出了二次碳化物。对比 3、4 号的金相组织结构, 发现二次碳化物的分布更加均匀, 数量明显增加。观察热处理试样晶粒形貌, 发现 2 号试样出现粗大晶粒(见图 6b)。通过增加冷处理和回火处理及其处理次数, 可以有效改善螺纹量规材料的金相组织结构和碳化物偏析状态, 并且降低残余奥氏体的质量分数, 从而提升材料

表 4 不同试板热处理方案<sup>[22]</sup>  
Tab.4 Heat treatment program for different test plates<sup>[22]</sup>

Sample number	Experimental plan
1	Quenching
2	Quenching + Tempering
3	Quenching+Cold Treatment+Tempering
4	Quenching+Cold treatment+Tempering+ Cold treatment+Tempering

的硬度和耐磨性能。

热处理强化方法的选择和使用应根据具体的腐蚀环境和需求进行选择 and 评估(见表 5)。同时, 对于重要的设备或系统, 建议定期进行热处理强化检查和维护, 以确保其正常运行和安全性。此外, 还有一些其他的热处理强化方法, 如渗碳<sup>[23]</sup>、氰化、硼化<sup>[24]</sup>等, 可以根据实际需求进行选择。谢浪<sup>[23]</sup>研究了螺纹的防渗碳与漏渗碳处理。通过对不同碳处理工艺下的螺纹进行显微组织观察和性能测试, 得出了不同碳处理工艺对螺纹性能的影响规律。这一研究结果为螺纹热处理强化的工艺选择提供了重要的参考。于文馨等<sup>[24]</sup>探析了表面硼化处理的应用。通过对表面硼化处理后的材料进行显微组织观察和性能测试, 发现表面硼化处理可以显著提高材料的硬度和耐磨性。

1.3 本章小结

螺纹断裂失效通常发生在承受循环载荷的紧固件中, 如螺栓、螺钉等。这种失效形式是由于材料在循环应力作用下, 表面或内部的微小裂纹逐渐扩展, 最终导致断裂。疲劳裂纹往往起始于应力集中的区域, 如螺纹根部或表面缺陷处。随着载荷循环次数的增加, 裂纹逐渐扩展, 直至达到临界尺寸, 导致突然断裂。

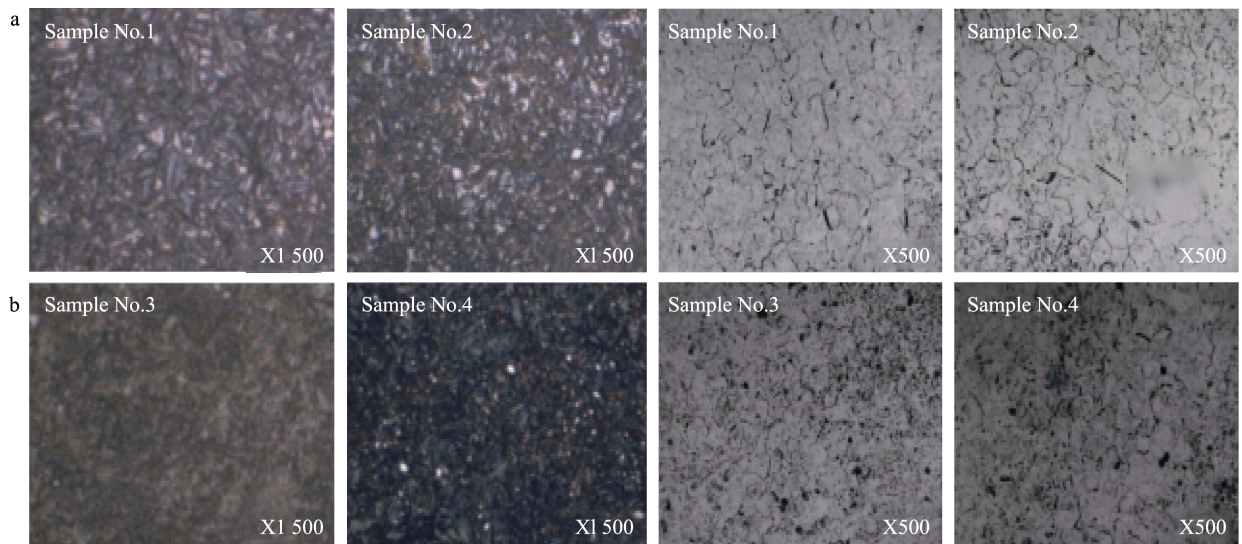


图 6 热处理试样金相组织结构 (a)、热处理试样晶粒形貌 (b)<sup>[22]</sup>  
Fig.6 Metallographic structure of heat-treated specimens (a) and grain morphology of heat-treated specimens (b)<sup>[22]</sup>



表 5 热处理防护方法及其优缺点  
Tab.5 Heat treatment protection methods and their advantages and disadvantages

Project	Advantages	Disadvantages
Annealing treatment	Eliminate internal stress and grain boundary inclusions Improve material toughness and ductility	High temperatures can cause grain coarsening and a decrease in hardness
Normalizing treatment	Grain refinement Increases hardness and strength	
Tempering treatment	Improve the comprehensive properties of materials Higher hardness and strength	Increased cold brittleness Higher cost
Time-effect processing	Stabilize organizational structure Increase hardness and strength	Long processing cycle High energy consumption for heating
Nitriding treatment	Good deformability Good toughness	Long processing time

螺纹热处理强化是一种有效提高螺纹零件力学性能和耐磨性的方法。退火处理、热处理工艺优化、氮化处理、防渗碳处理和表面硼化处理等工艺方法在螺纹热处理强化中具有重要的应用价值。目前的研究主要集中在不同工艺条件下的组织和性能测试,还需要进一步研究螺纹热处理强化的机理和工艺优化方法。这些方法都可以克服螺纹材料应力集中,提高螺纹的耐腐蚀性和耐磨性,延长其使用寿命。但是,热处理强化方法也存在一定的局限性,如对材料性能的影响、生产成本提高等,因此在选择时应综合考虑。螺纹热处理强化是一个具有重要研究价值和应用前景的领域。未来的研究可以进一步探索螺纹热处理强化的机理和工艺优化方法,以满足不同工程领域对螺纹零件性能的需求。

2 螺纹腐蚀失效的机理及其防护

2.1 螺纹腐蚀失效的机理分析

通常情况下,螺纹副在潮湿、酸碱等腐蚀性环境时,会发生腐蚀现象。螺纹腐蚀失效主要是由于螺纹材料外部环境中的某些化学成分发生化学反应或电化学反应,生成的腐蚀物在螺纹牙表面黏附不牢而易脱落,新的螺纹牙表面继续与腐蚀介质发生反应(见图 7),如此重复就形成了腐蚀性磨损。这种腐蚀性磨损会导致螺纹牙的侧表面和牙顶受到损伤,进而影响螺纹的正常功能,造成失效。腐蚀会使螺纹表面出现锈蚀、坑蚀等问题,进而降低螺纹的强度和密封性能,最终导致失效。

缝隙腐蚀是金属与金属或非金属间缝隙中的介质迁移受阻,导致缝隙内金属加速腐蚀的现象。它是

常见的局部腐蚀类型之一,不论在何种腐蚀介质中,只要金属或合金存在缝隙,如焊接、铆接、螺纹连接等,都可能引发缝隙腐蚀。Rui 等<sup>[25]</sup>通过化学成分分析、硬度测试和金相检验,发现 L80 油管螺纹表面腐蚀产物致密,主要由 FeCO<sub>3</sub> 组成,但存在大量微裂纹和微孔。螺纹试样腐蚀的主要原因是高矿化度地层水、CO<sub>2</sub> 等腐蚀介质对螺纹接头的渗透产生了缝隙腐蚀。张颖等<sup>[26]</sup>研究了螺纹缝隙腐蚀的材料、环境、缝隙尺寸等因素。发现在材料中添加适量的 Cu、Cr、Mo、N 等能抑制材料缝隙腐蚀的发生,不同的缝隙宽度会影响缝隙内溶解氧的浓度,并最终影响缝隙内腐蚀产物的形成,缝隙的长度则主要影响缝隙内腐蚀介质的 pH。

应力腐蚀开裂是材料在特定腐蚀介质中,受到低于屈服强度的拉伸应力后发生的脆性断裂。研究认为,应力腐蚀开裂分为裂纹孕育期、裂纹扩展期和裂纹断裂期。由于裂纹孕育期过长,通常导致无预兆的断裂,造成严重后果。在腐蚀环境中,螺纹表面会受到应力和腐蚀介质的共同影响,导致表面裂纹产生。这些裂纹通常源于表面缺陷,并向内扩展。持续的应力和腐蚀会使裂纹不断扩展,最终导致螺纹断裂。裂纹的扩展与螺纹的形状和结构设计有关,如角度、深度、润滑等。不同腐蚀介质对螺纹的腐蚀作用不同<sup>[27]</sup>。刘华东<sup>[28]</sup>研究了车用刀具固定的高强度内六角螺栓断裂原因。通过宏观观察、断口成分分析(见表 6)以及硬度(见表 7)、金相检验,发现其硫元素含量超标,硬度符合标准。其断口特征主要为沿晶断裂,表面有腐蚀产物,腐蚀区域螺纹底部存在伴有树枝状裂纹的腐蚀坑(见图 8)。因此得出结论,清洗设备时,清洗剂渗入螺栓连接处引起腐蚀,并在应力作用下产生应力腐蚀断裂。

在振动环境下,螺栓连接结构的支撑面及螺纹接触面均呈现出微动损伤现象,其主要发生在预紧力作用区域。Liu 等<sup>[29]</sup>发现随着这些损伤不断积累,不仅会使预紧力下降,还容易造成螺纹牙变薄、表面出现腐蚀等现象,导致螺纹松脱。在腐蚀环境中,腐蚀介质会对螺纹表面产生腐蚀作用,使螺纹表面间隙增大,导致螺纹松脱。

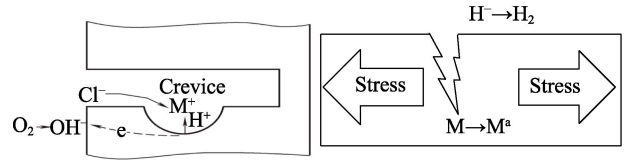


图 7 螺纹缝隙腐蚀与应力腐蚀机理  
Fig.7 Mechanism of thread gap corrosion and stress corrosion

表 6 螺纹断裂区域的化学成分<sup>[28]</sup>  
Tab.6 Chemical composition of thread fracture area<sup>[28]</sup>

Project	wt. %					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
Measured value	0.40	0.22	0.76	0.009 4	0.058	1.04
Standard value	0.37-0.44	0.17-0.37	0.50-0.80	≤0.02	≤0.02	0.80-1.10

表 7 断裂螺纹断裂区域的硬度检测<sup>[28]</sup>  
Tab.7 Hardness detection of thread fracture area<sup>[28]</sup>

Project	Hardness
Measured value	428 425 425
Average	426
Standard value	385-435

2.2 螺纹腐蚀失效的防护方法

化学腐蚀是指螺纹副在特定化学环境下与腐蚀性介质发生化学反应，导致材料逐渐溶解或破坏。这种腐蚀通常与介质中的化学成分、温度、压力等因素有关。为了预防化学腐蚀，可以使用耐腐蚀材料来减小腐蚀速率，或者涂抹防腐涂层来减少螺纹副与腐蚀性介质的接触，从而减少腐蚀。

2.2.1 涂层防护

在螺纹表面涂覆一层耐腐蚀的化学物质，可以形成一层保护膜，阻止腐蚀介质与螺纹表面接触，从而起

到防腐作用。在螺纹连接件表面涂抹防腐涂层，可以有效防止腐蚀。涂层的防腐蚀性能是通过其对腐蚀性组分的阻隔作用，避免其与金属表面发生接触（屏蔽机理），或对金属表面腐蚀反应进行干扰破坏（电化学保护机理），从而实现防止金属腐蚀的目标。张智<sup>[30]</sup>通过对恶劣环境下油井管腐蚀机理的分析，提出了一种新型的防护涂层材料。该涂层具有良好的耐腐蚀性能和附着力，能够有效地保护油井管不受腐蚀的侵害。

锌铝涂层处理工艺是一种表面处理技术，其主要原料为铝粉、锌粉和铬酐（见图 9）。该工艺通过浸涂或喷涂方法将涂层应用于工件表面，并在高温条件（300~350 ℃）下进行烧结，从而形成紧密的涂层。该工艺具有高耐蚀、高耐温、无氢脆等特点，适用于高强度钢质紧固件的腐蚀防护，是常见的紧固件表面处理方式之一。无铬锌铝涂层具有环境友好、耐腐蚀性能好等优点，已经成为一种重要的防腐蚀涂层材料。然而，该涂层在耐高温和耐磨损性能方面仍存在一定的挑战<sup>[31]</sup>。

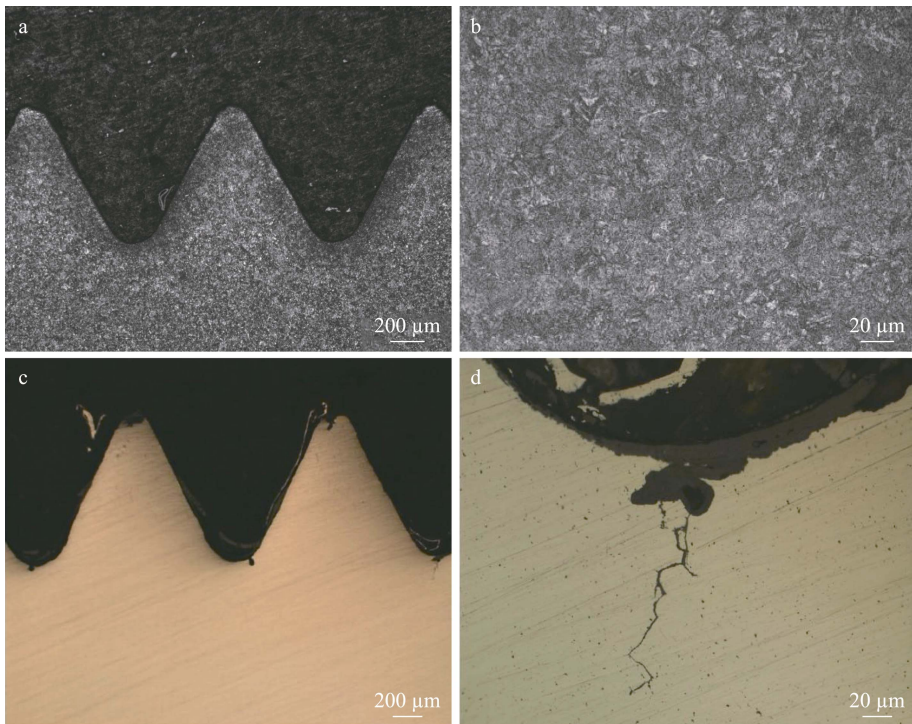


图 8 螺栓表面显微组织形貌（a）、螺栓心部显微组织形貌（b）、锈蚀区域腐蚀坑形貌（c）、锈蚀区域坑底腐蚀裂纹形貌（d）<sup>[28]</sup>

Fig.8 Bolt surface microstructure morphology, bolt heart microstructure morphology (b), corrosion pit morphology in corrosion area (c) and corrosion crack morphology at the bottom of the pit in corrosion area<sup>[28]</sup>



钛合金紧固件因其轻质、高强和耐热的特点, 在航空制造业中广泛应用。例如, 为了减轻机身的重量, 在制造中大量使用铝合金连接件。但铝合金和钛合金间存在电位差, 会产生电偶腐蚀, 因此需要对钛合金紧固件表面进行铝涂层处理。该涂层原料包括成膜树脂、铬黄、铝粉和润滑填料, 经高温固化形成。该涂层主要用于与铝合金结构件装配的钛合金紧固件表面, 能有效解决电位腐蚀问题<sup>[32]</sup>。

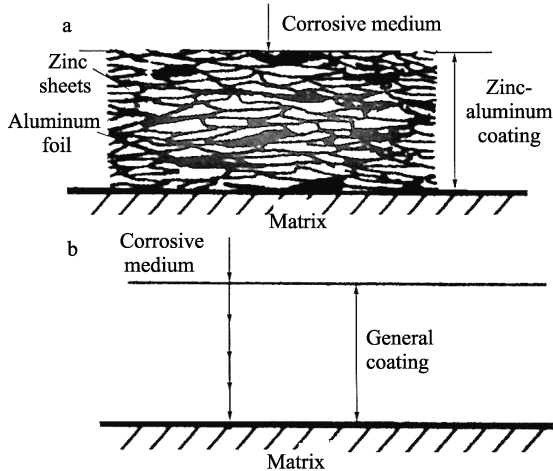


图 9 锌铝涂层 (a) 和一般防护涂层 (b) 结构示意图<sup>[32]</sup>  
Fig.9 Schematic diagram of structures of zinc aluminum coating (a) and general protective coating<sup>[32]</sup>

二硫化钼涂层由二硫化钼和黏接层组成, 具有优异的减摩、润滑、化学惰性、耐温、耐磨和低摩擦因数等特性。适用于高负载连接工况, 即使在中高温环境下, 仍能保持良好的抗冲击、承载和润滑性能。高雪等<sup>[33]</sup>研究了纳米结构对二硫化钼涂层摩擦学性能的影响。通过混合纳米二硫化钼粉末、水性树脂和功能助剂, 制得均匀的泳镀液。利用电泳沉积技术, 可在工件表面形成厚度为 2~5  $\mu\text{m}$ 、误差小于 2  $\mu\text{m}$  的致密光滑、平整均匀涂层。结果表明, 纳米结构能够显著改善涂层的摩擦学性能, 提高其耐磨损性能和润滑性能。这种涂层可用于精密装配的螺纹表面防护<sup>[34]</sup>。

有机氟涂料以氟树脂为成膜物, 具有高键能、稳定 C—C 主链, 赋予涂层耐候、耐温、低表面能、绝

缘、耐化学介质等特性, 是我国具有发展潜力的新型涂料品种之一。将其涂于紧固件表面可具有良好的耐蚀、减摩、防咬死等功能。氟碳涂料具有优异的耐腐蚀和耐候性能, 已经广泛应用于各个领域<sup>[35]</sup>。然而, 氟碳涂料的价格较高, 且在一些特殊环境下的防腐效果有限, 需要进一步改进和研发。

锌铝涂层由于其卓越的耐腐蚀性能和相对低廉的成本, 在户外设施及建筑材料领域得到了广泛应用。然而, 在高温环境下, 其性能会显著降低, 并且对某些化学物质的抵抗能力有限。相比之下, 铝涂层以其卓越的耐热性和耐候性而闻名, 尤其在航空航天和汽车工业中占据重要地位。但是, 铝涂层的附着力较弱, 且在特定环境下易发生氧化反应。二硫化钼涂层凭借其优异的润滑性能和抗磨损特性, 在机械领域中占据一席之地, 尤其适用于高温高压的工作环境。然而, 该涂层的耐腐蚀性能不足, 且在潮湿环境下易失效。有机氟涂层因其卓越的耐化学性和耐候性, 在化工设备和船舶行业中得到应用, 但其高昂的成本和复杂的施工过程限制了其更广泛的应用。涂层防护方法及其优缺点见表 8。

2.2.2 缓蚀剂防护

缓蚀剂可以降低腐蚀速率, 主要通过吸附在金属表面, 改变金属表面特性来抑制腐蚀反应。通常作为防锈剂或防腐剂使用, 与螺纹表面反应形成保护膜, 防止腐蚀性介质接触<sup>[36]</sup>。缓蚀剂发展经历了从传统金属到新型合金及复合构件的防护, 从单一组分到复合配方, 从水介质到油、气、涂层、混凝土, 从均匀腐蚀到点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、电偶腐蚀的变化。缓蚀剂技术已成为成熟的应用技术<sup>[37-38]</sup>。

缓蚀剂分为无机和有机两类, 根据作用机理分为阳极、阴极和混合型, 根据用途分为油溶、水溶和酸性介质, 根据环境温度分为常温 and 高温, 根据挥发性分为挥发性和非挥发性。

史明慧等<sup>[39]</sup>研究了缓蚀剂添加量对 Q235 螺纹钢耐蚀性能的影响。通过浸泡实验和电化学测试 (见图 10), 评估了不同添加量的缓蚀剂对螺纹钢的防护效果。研究表明,  $\text{ZnSO}_4$  缓蚀剂可以提高材料的腐蚀电

表 8 涂层防护方法及其优缺点  
Tab.8 Coating protection methods and their advantages and disadvantages

Project	Advantages	Disadvantages
Zinc-aluminum coating	High corrosion resistance, high temperature resistance, no hydrogen embrittlement, low cost	Resistance to high temperatures and wear is average
Aluminum coating	Lightweight, high strength, heat-resistant	The adhesion is relatively weak and tends to oxidize easily in certain environments
Molybdenum disulfide coating	Excellent anti-friction, lubrication, chemical inertness, temperature resistance, wear resistance, and low friction coefficient	Poor corrosion resistance, prone to failure in humid environments
Organofluorine coating	Weather-resistant, temperature-resistant, low surface energy, insulating, resistant to chemical media	High costs, complex construction processes, and limited corrosion resistance in special environments

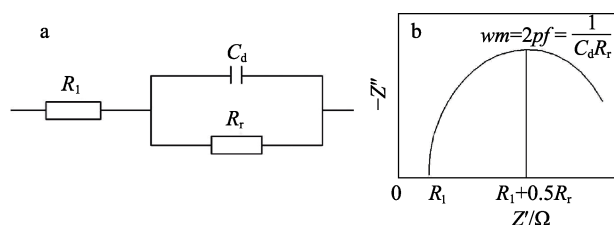


图 10 电化学等效电路示意图 (a)、等效电路的 Nyquist 图 (b) [39]

Fig.10 Schematic diagram of electrochemical equivalent circuit (a) and Nyquist of equivalent circuit (b) [39]

位并降低腐蚀电流, 显著降低 Q235 螺纹钢在模拟雨水中的腐蚀速率。Q235 在模拟雨水中的腐蚀主要通过电化学极化形式进行。适量的缓蚀剂添加可以显著提高螺纹钢的耐蚀性能。然而, 过量的缓蚀剂添加可能导致防护效果下降。因此, 合理控制缓蚀剂的添加量对螺纹钢的防护效果至关重要。

王丹等<sup>[40]</sup>指出,  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  是油气管道中常见的腐蚀性气体, 对螺纹钢的腐蚀速率有着显著影响。为了提高螺纹钢的耐蚀性能, 提出了多种防护技术, 包括缓蚀剂的应用。然而, 目前存在的问题是缓蚀剂的选择和添加量的确定。不同的环境条件和腐蚀介质可能需要不同的缓蚀剂和添加量, 因此需要进一步的研究来优化螺纹缓蚀剂的防护效果。

在存储和使用过程中, 对螺纹连接件进行防锈处理, 可以使用防锈油、防锈剂等来防止螺纹连接件生锈。定期检查螺纹连接件的腐蚀情况, 如果发现有腐蚀现象, 需及时进行维护或更换; 避免将螺纹连接件暴露在潮湿、高温、酸碱等恶劣环境中, 以减小腐蚀的可能性。

缓蚀剂是一种常用的涂层保护方法, 通过吸附在金属表面形成保护膜, 可以有效延缓金属的腐蚀速度。缓蚀剂的研究已经取得了一定的进展, 涉及缓蚀剂的种类、性能评价方法以及在不同领域的应用。涂层保护在防腐蚀领域具有广泛的应用前景, 但仍然存在一些问题需要进一步研究和解决。例如, 缓蚀剂的性能评价方法需更加准确、可靠, 针对不同材料和环境条件的涂层保护技术还需进一步探索和改进。

### 2.2.3 电化学防护

电化学保护就是通过改变螺纹表面的电位, 使其成为腐蚀电池的阴极, 从而防止腐蚀。为预防螺纹腐蚀, 在选择螺纹紧固件时, 应选择具有耐腐蚀性的材料来制造螺纹连接件, 尽量采用同种金属材料或电位相近的材料。在异种材料连接时, 通常会采用绝缘材料进行隔离, 以避免电化学腐蚀的发生<sup>[41]</sup>。在材料中添加适量的 Cu、Cr、Mo、N 等能抑制材料缝隙腐蚀的发生<sup>[26]</sup>。目前常用的方法为镀锌、镀铬、镀镍、镀银、镀镉 (见图 11)。

对螺纹连接件进行适当的表面处理, 如镀锌、镀铬、镀镍等, 可以增加其耐腐蚀性<sup>[42]</sup>。镀锌技术是紧



图 11 电化学保护工艺

Fig.11 Electrochemical protection process

固件表面处理中最常见的应用技术, 镀锌的典型工艺分为热镀锌、电镀锌、机械镀锌等。热镀锌就是将钢铁件浸入熔融锌液中, 使表面形成一层锌层<sup>[43]</sup>, 其耐腐蚀性强, 使用寿命长, 但是不适用于高强度紧固件, 主要是由于高温下易发生回火软化<sup>[44]</sup>。电镀锌利用电解质原理, 将紧固件作为阴极, 形成锌保护膜, 提高耐腐蚀性, 延长使用寿命, 用于螺纹连接件、紧固件等。但镀层较薄, 防护效果有限, 电解易引发氢脆, 需去氢处理<sup>[45]</sup>。机械镀锌通过锌粉沉积和冲击载荷形成金属颗粒堆积层, 在室温常压下进行, 无须电场辅助。3 种工艺都需要注意控制镀锌层厚度、均匀性、附着力等。渗锌层具备均匀、紧密的特性, 拥有较高的耐磨性, 厚度可精确控制, 同时不会引发氢脆现象。然而, 粉末渗锌层在抗腐蚀性能方面表现并不十分突出, 渗镀过程耗时较长, 效率相对较低。邓本金<sup>[46]</sup>研究了锌 (铝) 以及有机涂料对钢铁底材的双重防腐保护。通过实验研究发现, 锌 (铝) 涂层和有机涂料可以形成一层双重防护膜, 有效提高了钢铁底材的防腐性能。锌 (铝) 涂层、有机涂料等防腐材料可以形成双重防护膜, 提高钢铁底材的防腐性能。杨永伟等<sup>[47]</sup>研究了机械镀锌、电镀锌、热浸镀锌三类镀层 (见表 9)。随着镀层厚度的增加, 材料的耐蚀性能得以提升。当机械镀锌层的厚度达到一定程度时, 其自腐蚀电位明显正向移动, 使腐蚀电流密度与电镀锌及热浸镀锌相当。

镀铬工艺分为装饰性和功能性 2 种。装饰性镀铬是电镀工艺外层, 厚度一般在  $0.25\sim 0.5\ \mu\text{m}$ , 光亮鲜艳, 耐化学介质, 主要起装饰、封闭和耐磨的作用; 功能性镀铬厚度一般在  $5\sim 50\ \mu\text{m}$ , 硬度大, 一般用于提升螺纹紧固件抗磨损性, 延长使用寿命。Sun 等<sup>[48]</sup>研究了铬在镀铬工艺中的分布、可溶性和化学形态。通过对镀铬工艺现场的研究发现, 铬在镀液中分布不均匀, 且存在一定的可溶性。镀铬工艺中铬的分布、可溶性和化学形态对于优化工艺、减少环境污染具有重要意义。刘晓强等<sup>[49]</sup>研究了铬酸酐质量浓度、温度

和电流密度对电镀铬层性能的影响,发现最佳工艺为:铬酐质量浓度 230 g/L,温度 55~60 ℃,电流密度 25~35 A/dm<sup>2</sup>。

镍镀层可快速形成均匀致密的钝化层,耐酸、碱及各种腐蚀介质,可提升紧固件的耐磨性,镍镀层在恶劣环境下也能保持良好的性能。鲁喜宁等<sup>[50]</sup>对镀镍钨合金试样进行了疲劳测试。试样的断口有疲劳源、裂纹拓展区、顺断区 3 个部分(见图 12a)。镀层在

裂纹源处有块状脱落,镀层与基体基本没有脱落(见图 12d),说明与基体结合良好。通过实验研究发现,镀镍钨合金可以有效提高钻具螺纹的耐腐蚀性能,并且具有较好的耐磨性。镀镍钨合金可以提高钻具螺纹的耐腐蚀性能和耐磨性。

镀镉和镀锌化学性质相似,可用于高强度紧固件表面防护,但在高温下易扩散渗透到基材中造成“镉脆”现象,导致连接件的强度和韧性下降,影响其使

表 9 三类镀锌试样的全浸试验结果<sup>[47]</sup>  
Tab.9 Full immersion test results of three types of galvanized specimens<sup>[47]</sup>

Sample type	<i>m</i> (Before corrosion)/g	<i>m</i> (After corrosion)/g	<i>S</i> (Average surface)/mm <sup>2</sup>	Δ <i>m</i> (Average)/g	<i>V</i> <sub>corr</sub> /(g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
Mechanical galvanizing (10 μm)	9.024	8.965	1 283.63	0.067	0.072 494
	7.474	7.413			
	9.181	9.099			
Mechanical galvanizing (20 μm)	7.103	7.084	1 283.63	0.018	0.019 476
	9.485	9.465			
	7.822	7.808			
Mechanical galvanizing (30 μm)	8.356	8.353	1 283.63	0.003	0.003 246
	7.769	7.772			
	7.449	7.455			
Mechanical galvanizing (40 μm)	8.662	8.678	1 283.63	-0.015	0.016 230
	8.249	8.263			
	7.197	7.212			
Electro-galvanizing (6 μm)	34.809	34.801	3 294.77	0.008	0.003 372
	35.457	35.447			
	34.007	34.001			
Hot-dip galvanizing (50 μm)	24.458	24.466	5 065.03	-0.01	0.002 742
	20.543	20.553			
	22.6	22.612			

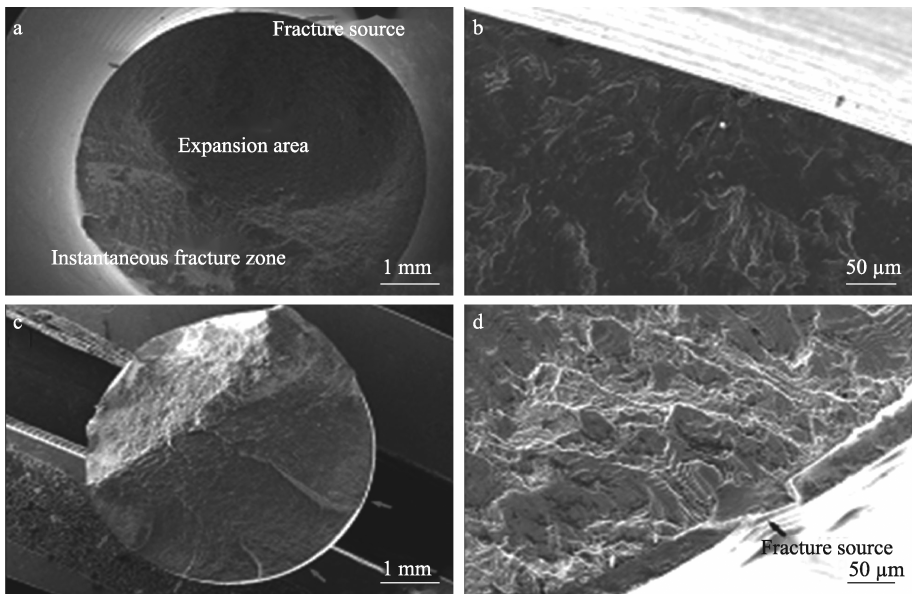


图 12 未处理疲劳试样断面的 SEM 形貌: a) 疲劳断面; b) 疲劳断裂源,以及镀镍钨合金疲劳试样断面形貌: c) 疲劳断面; d) 疲劳断裂源  
Fig.12 SEM morphology of untreated fatigue section<sup>[50]</sup>. a) fatigue section; b) fatigue fracture source and section morphology of nickel tungsten alloy fatigue specimens: c) fatigue section; d) fatigue fracture source



使用寿命和安全性，同时镉离子和蒸气毒性较大，对环境和人体健康有害<sup>[51]</sup>。电镀零件绝缘工装可以提高电镀工艺的稳定性与效率。

银镀层具有化学惰性，高温抗氧化性好，在高温下仍能保持良好的导电性和导热性。高温下不易发生变形和开裂，具有良好的力学性能。高温下不易产生有害气体，环保性能好。并且银晶体结构具有 12 个滑移系，延展性好，摩擦工况中润滑减摩性能佳<sup>[52]</sup>。银镀层作为润滑层，还能有效防止高温后螺纹出现黏着咬死现象。

热镀锌技术凭借其卓越的抗腐蚀性能和持久的使用寿命，在桥梁、高速公路护栏以及建筑结构领域得到了普遍应用。然而，该技术在处理大型结构时面临较高的成本挑战，并且在特定环境下可能会出现锌层脱落的问题。相对而言，电镀锌技术由于其涂层的均匀性，在汽车、电子产业中广受欢迎，尽管其耐腐

蚀性能不及热镀锌，并且在恶劣环境下易受损。机械镀锌作为一种环保型表面处理技术，通过物理手段将锌层固定于金属表面，展现出良好的耐腐蚀性能和较低的环境污染水平，但其涂层的附着力和耐热性不及电镀锌。镀铬技术因其高硬度、耐磨特性及美观性，在装饰和防护领域中具有广阔的应用前景，但铬层较薄，易产生裂纹和脱落。镀镍技术则因其出色的耐腐蚀性和导电性，在电子产业中占据重要地位，但镍层的脆性使其易受冲击和弯曲的影响。镀镉技术曾因其卓越的抗腐蚀性和电导性，在航空航天等领域中得到广泛应用，但鉴于镉的毒性，其应用范围受到了限制。镀银技术则因其极佳的导电性和反射性，在电子和光学领域中具有一定的应用价值，但银层易氧化变黑且成本较高。电化学防护技术在工业领域具有广阔的应用前景，但仍需进一步研究和优化。电化学防护方法及其优缺点见表 10。

表 10 电化学防护方法及其优缺点  
Tab.10 Electrochemical protection methods and their advantages and disadvantages

Project	Advantages	Disadvantages
Hot-dip galvanizing	Excellent corrosion resistance, long service life	Higher cost, prone to falling off
Electro-galvanizing	Coating uniformity, coating uniformity	Poor corrosion resistance, prone to damage.
Mechanical galvanizing	Good corrosion resistance, low pollution	Poor adhesion and heat resistance
Chrome plating	High hardness, wear-resistant	The coating is thin, prone to cracking, and easy to fall off
Nickel plating	Corrosion resistance and high conductivity	Poor resistance to impact and deformation
Cadmium plating	Corrosion resistance and high conductivity	Toxic, environmental pollution
Silver plating	Good electrical conductivity and reflectivity	Oxidizes easily and turns black, high cost

### 2.3 本章小结

螺纹腐蚀失效通常发生在恶劣的腐蚀环境中，例如酸性或盐碱性环境。该失效模式是由于腐蚀介质对螺纹表面的持续侵蚀作用，导致材料逐渐损失，最终可能引起螺纹尺寸减小、强度下降，甚至完全断裂。腐蚀过程往往从微小的腐蚀坑开始，随着时间的推移，这些腐蚀坑会逐渐扩大并相互连接，形成更大的腐蚀区域。在循环载荷的作用下，这些腐蚀区域会成为应力集中的点，加速裂纹的形成和扩展，从而导致螺纹的失效。

预防螺纹的腐蚀失效需要综合考虑各种腐蚀原因，并采取相应的预防措施。通过合理的材料选择、表面处理、防腐剂使用、定期维护等手段，可以有效降低螺纹腐蚀的风险，提高其使用寿命和安全性。虽然，涂层和镀层可以起到防护作用，但是不能长期防护，并且在有机涂层和电镀中会产生有害气体影响环境。随着科技的不断进步和工程实践的不断深入，未来对螺纹腐蚀的研究和预防也将更加深入和广泛，为螺纹连接的失效预防提供更多的理论支持和技术保障。

## 3 螺纹磨损失效的机理及其防护

### 3.1 螺纹磨损失效的机理分析

磨损是常见的失效机理之一，通常因为螺纹副在运行过程中因震动导致相对滑移，进而产生摩擦力，致使材料逐步损耗。这一过程最终会对螺纹的精确度和密封性能造成影响（见图 13）。磨损的程度与摩擦力的大小、材料的硬度、润滑条件等因素密切相关。为了减缓磨损，可以采取使用耐磨材料、改善润滑条件、降低摩擦阻力等措施。



图 13 螺纹熔焊和间隙磨屑增大摩擦力  
Fig.13 Thread fusion welding and increased friction caused by clearance

程西云等<sup>[53]</sup>最早从滑动摩擦副胶合角度研究了磨损咬死失效机理，提出了高温熔焊模型，认为失效



原因是接触面最高温度超过材料熔点导致局部焊接。通过计算不同工况下的咬死载荷<sup>[54]</sup>,发现螺纹副的咬死现象是由接触区瞬间产生的高温导致基体金属熔焊所致。李文顶等<sup>[55]</sup>研究了运载火箭中的不锈钢螺纹磨损咬死问题,发现摩擦破坏螺牙氧化膜,热能加速氧化膜破坏,持续发热导致金属螺牙直接接触产生黏着现象,产生金属屑导致螺纹磨损失效。

万蕾等<sup>[56]</sup>对管道接头失效螺纹结构进行了观察、测量和硬度检验、金相分析(见图 14)。发现内外螺牙磨损,表面材料转移,发生黏着磨损。这是由于摩擦力导致塑性变形和金属表面发生焊合。当外力超过焊合点结合力时,则相对滑动表面会产生相对移动(见图 14a)。当剪切力发生在原接触面上时,不发生磨损;若作用于强度较低金属时,部分转移材料因硬化、疲劳、氧化等脱离,形成游离磨屑,造成黏着磨损和咬死(见图 14b)。当黏接强度远大于剪切强度时,表面将沿滑动方向明显撕脱,而严重磨损(见图 14c)。摩擦产生的热量使表面温度剧增,导致局部焊死和螺纹咬死(见图 14d)。魏培欣等<sup>[57]</sup>认为螺纹旋合过程中摩擦导致黏着磨损、磨屑堆积,阻碍转动,引起螺纹咬死失效。

虽然研究人员对机理的认识不同,但都认为螺纹的磨损对螺纹咬死有重要的影响。除此之外,研究人员还研究了螺纹咬死的其他影响因素。Thornton 等<sup>[58]</sup>通过试验研究了表面光洁度、涂层、润滑剂、螺旋面法向应力等对摩擦磨损和咬死失效的影响规律,发现金属填充润滑剂的动态摩擦因子在 0.04~0.26 时,不

会发生咬死现象。Sundh 等<sup>[59]</sup>则重点研究了接触表面磨损和咬死随施加载荷的变化,发现润滑剂的使用量和接触界面的滑移速度明显影响咬死失效程度;徐汉中等<sup>[60]</sup>通过失效分析和机理研究,从配合螺纹、螺纹、螺纹表面处理和润滑剂使用 4 个方面提出了防螺纹咬死的控制措施,并进行了相关试验验证;潘泽宇<sup>[61]</sup>提出通过减少附加应力,使螺牙受力均匀分布,防止螺栓咬入螺孔未攻丝部分,降低螺纹表面粗糙度,减小热紧螺栓咬死的概率。

### 3.2 螺纹磨损失效的防护方法

螺纹的磨损是由接触面相对滑移产生的摩擦所导致的。因此可以通过涂层、镀层来隔离接触面减少接触,或者通过表面处理的方法加大材料硬度以减少磨损,添加润滑剂与密封措施同样也可以减少磨损。

螺纹表面硬化处理是一种常用的表面改性技术,可以提高螺纹紧固件的抗松动性能和耐磨性能。随着工程材料和应用环境的不断发展,对螺纹表面硬化处理的研究也越来越受到关注。通过喷丸、碾压等表面硬化处理方法,可以提高螺纹表面的硬度和耐磨性,从而减少腐蚀和磨损。螺纹的表面硬化处理是一种通过改变螺纹材料表面状态,提高其硬度和耐磨性的方法。这种方法主要包括喷丸硬化处理、离子注入硬化处激光硬化处理等。

喷丸硬化处理:通过高速喷射钢丸、砂粒等硬质颗粒,冲击螺纹表面,使其产生塑性变形,从而形成具有较高硬度和耐磨性的表面层。硬度大的紧固件抗

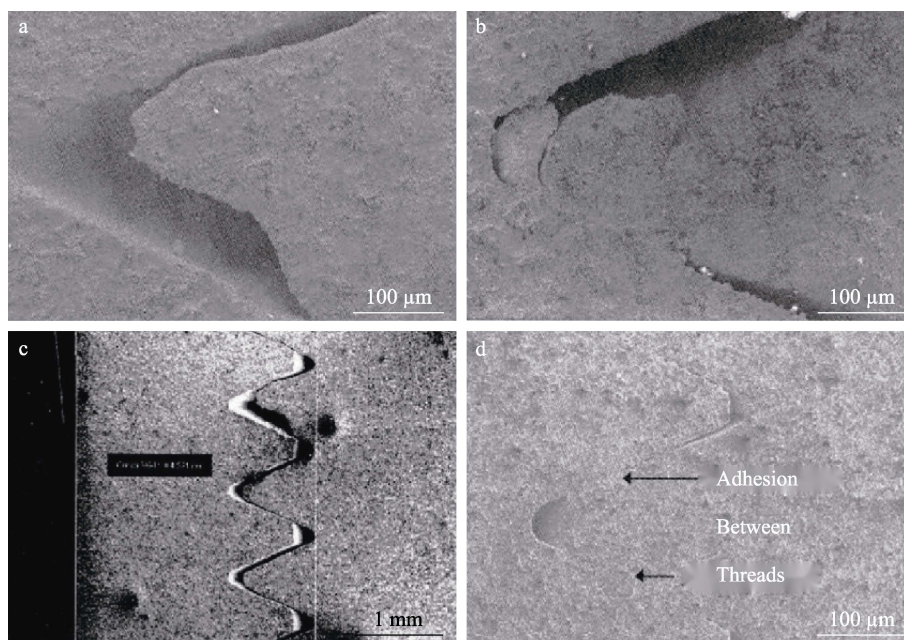


图 14 受损螺牙处的微观形貌 (a)、多余物堆积螺牙处的微观形貌 (b)、失效件螺纹间隙较小一侧的间距测量结果 (c)、失效件螺纹间隙较小一侧的材料黏着现象 (d)<sup>[56]</sup>

Fig. 14 Microscopic morphology of damaged screw teeth (a), microscopic morphology of excess material accumulation at screw teeth (b), measurement results of the spacing on the side with smaller thread clearance of the failed component (c) and phenomenon of material adhesion on the side with smaller thread clearance of the failed part (d)<sup>[56]</sup>

松动能力强,微粒子喷丸可增强这一能力,且表面硬化程度越高,效果越明显。硬度大的紧固件不易发生塑性变形和磨损,而微粒子喷丸能形成硬化层和小四坑,抵抗螺牙磨损和滑移,进一步增强抗松动能力。张明远<sup>[62]</sup>通过对螺纹紧固件进行微粒子喷丸处理,探究了微粒子喷丸对螺纹紧固件抗松动性能的影响。研究表明,微粒子喷丸处理可以显著提高螺纹紧固件的抗松动性能,减小松动量和松动角度。

**离子注入硬化:**通过将特定元素离子注入螺纹材料表面,使其形成一层具有较高硬度和耐磨性的表面层。杨胜强等<sup>[63]</sup>研究指出,航空钛合金在高温、高应力和腐蚀环境下容易发生疲劳破坏,因此需要进行表面改性以提高其抗疲劳性能。目前,常用的表面改性技术包括激光表面熔化、等离子体表面合金化和化学表面改性等。这些技术可以显著提高航空钛合金的抗疲劳性能,延长其使用寿命。

**激光硬化处理:**通过激光束对螺纹表面进行扫描,使其瞬间熔化、蒸发,从而形成一层具有较高硬度和耐磨性的表面层。国外研究<sup>[64]</sup>比较了激光硬化处理对奥氏体化和淬火回火灰铸铁磨损性能的影响。研究表明,激光硬化处理可以显著提高灰铸铁的磨损性能,降低磨损量和磨损率。与淬火回火相比,激光硬化处理能够形成更深的硬化层,提高灰铸铁的硬度和耐磨性能。

**化学气相沉积(CVD)硬化,**通过在螺纹表面涂覆一层硬质、耐磨的化学薄膜,如氮化钛、碳化钛等,以提高其耐磨性和抗腐蚀性。Ruammaitree等<sup>[65]</sup>成功地通过热化学气相沉积在不锈钢上培育了石墨烯,从而增强了其硬度。但要清除阻碍石墨烯生长的铁氧化物,需要较高的退火温度(约1 000℃)。随着生长时间的延长,石墨烯在不锈钢表面的覆盖范围逐渐扩大(见图15a)。最终,石墨烯使不锈钢的表面硬度达到了4.55 GPa(见图15b)。

需要注意的是,表面硬化处理方法的选择应根据

具体的环境和需求进行选择 and 评估。同时,表面硬化处理方法也存在一定的局限性,如对材料性能的影响、生产成本的提高等。因此,在实际应用中,应将表面硬化处理与其他防护措施相结合,以达到更好的防护效果。此外,对于重要的设备或系统,建议定期进行表面硬化处理的检查和维护,以确保其正常运行和安全性。

**二硫化钼涂层**由二硫化钼和黏接层组成,具有优异的减摩、润滑、化学惰性、耐温、耐磨和低摩擦因数等特性。它适用于高负载连接工况,即使在中高温环境下,仍能保持良好的抗冲击、承载和润滑性能。高雪等<sup>[33]</sup>研究探讨了纳米结构对二硫化钼涂层摩擦学性能的影响。结果表明,纳米结构能够显著改善涂层的摩擦学性能,提高其耐磨损性能和润滑性能。通过混合纳米二硫化钼粉末、水性树脂和功能助剂,制得均匀的泳镀膜液。利用电泳沉积技术,可在工件表面形成厚度为2~5 μm、误差小于2 μm的致密光滑、平整均匀涂层。这种涂层可用于精密装配的螺纹表面防护。也可以使用具有化学惰性,高温抗氧化性能好的银镀层,其延展性好,摩擦工况中润滑减摩性能佳<sup>[52]</sup>。银镀层还可以作为润滑层,能有效防止高温后螺纹出现黏着咬死现象。

### 3.3 本章小结

螺纹磨损失效通常发生在高摩擦力作用的环境下,如机械传动系统中。该失效模式归因于螺纹表面与接触物体之间的持续摩擦作用,导致材料逐渐磨损。随着时间的推移,磨损程度逐渐加剧,螺纹轮廓变得模糊,尺寸缩减,最终可能引起螺纹承载能力下降,甚至完全失效。在特定情况下,磨损还会引起螺纹表面温度升高,进一步加速材料磨损进程。

防护螺纹磨损失效需要从材料选择、表面处理、润滑与密封、设计与制造工艺以及定期维护等多个方面综合考虑。然而,镀层的保护时效较短,易遭受破

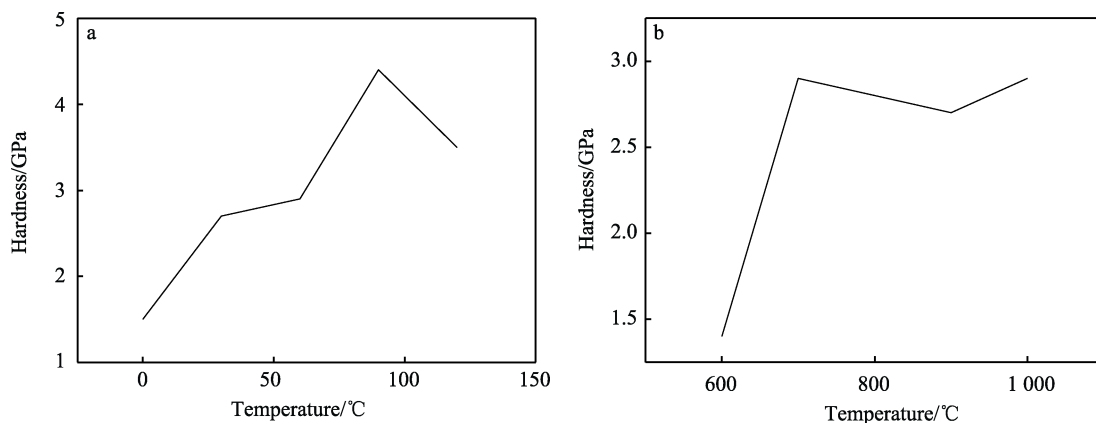


图15 表面硬度测量与生长60 min样品的生长温度(a)、表面硬度测量与1 000℃生长下样品的生长时间(b)<sup>[65]</sup>

Fig.15 Surface hardness measurements vs. growth temperature of the specimens grown for 60 minutes (a) and surface hardness measurements vs. growth time of the specimens grown at 1 000 °C (b)<sup>[65]</sup>



坏, 且不够环保, 其表面处理的费用也较高。随着科技的进步和工程实践的不断深入, 未来会有更多创新的防护方法和技术应用于螺纹连接中, 为螺纹的失效预防提供更有效的解决方案。同时, 加强对螺纹磨损失效机理和防护方法的研究, 有助于为螺纹连接的设计和制造提供更加可靠的理论支持和实践指导。

## 4 日常防护手段

为了避免螺纹失效, 日常生活中通常采取一些措施进行预防 (见图 16)。选择适当的材料和工艺可以有效地提高螺纹连接的稳定性和耐久性。选择具有良好耐腐蚀性和强度的螺纹材料, 如不锈钢、合金钢等, 可以增强螺纹的耐腐蚀性和耐磨性。Guo 等<sup>[11]</sup>通过研究几种不同母材开孔板的疲劳性能, 发现疲劳强度越好的材料越不容易发生断裂。应力集中导致局部应力和应力梯度增强, 还限制了最大应力下的裂纹萌生, 降低了试样的疲劳强度。

在制造过程中, 要确保螺纹的精度和表面质量, 避免制造缺陷导致的应力集中或腐蚀问题。根据使用要求和环境条件, 合理设计螺纹的形状、尺寸和配合公差, 以减少应力集中和摩擦磨损。刘翊安等<sup>[2]</sup>对直螺纹连接机构失效进行了研究, 发现断裂易发生在接头处, 并且此处的拉伸强度也显著降低。并且优化设计了剥肋—缩颈—滚压的加工流程, 提高了其性能。

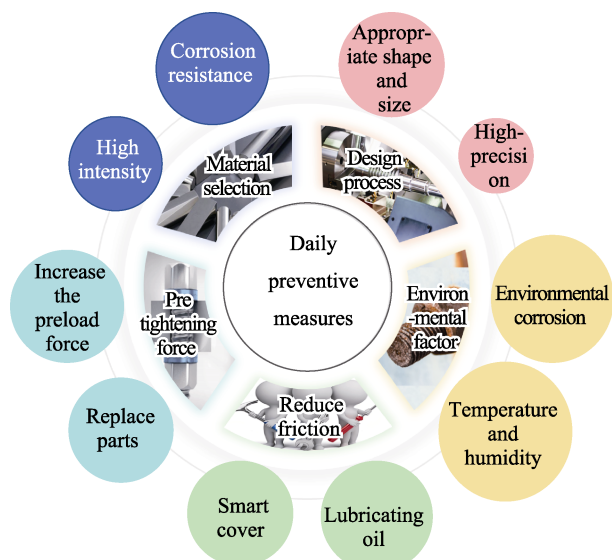


图 16 螺纹失效日常预防措施

Fig.16 Daily preventive measures for thread failure

定期对螺纹连接部位进行检查和维护, 及时发现并处理潜在的问题, 避免因腐蚀或磨损导致连接失效。在螺纹连接部位使用专用的防护套, 并涂抹适当的润滑剂, 可以有效保护螺纹不受外界环境的影响, 并减少摩擦和磨损。控制环境因素如温度、湿度、腐蚀介质等, 以减少对螺纹的腐蚀和磨损。李艳军等<sup>[5]</sup>

发现控制机加工的余量, 母材在热处理后进行滚丝操作, 都可以强化螺纹, 提高螺纹的抗拉载荷。

增加预紧力可以有效提高螺纹连接的稳定性和耐久性。通过增加预紧力, 可以减少外力对螺纹连接的影响, 并避免螺纹连接松动。聂福平<sup>[66]</sup>发现增大预紧力可以有效避免螺纹连接松动, 但是预紧力过大可能会出现螺纹咬死现象。并提出使用细牙螺纹、接触面大的螺栓或螺母及大规格螺栓都可以提高螺纹放松性能。定期检查和维护是保证螺纹连接长期稳定运行的关键。通过定期检查, 可以及时发现并修复潜在的问题, 避免螺纹连接失效。同时, 定期维护也可以保证设备的正常运行, 延长设备的使用寿命。对于重要的设备或系统, 建议定期更换螺纹连接件, 以避免因长期使用导致的疲劳和腐蚀问题。

综上所述, 预防螺纹失效需要从材料选择、制造质量、设计优化、定期检查和维护、使用防护套和润滑剂、控制环境因素以及定期更换连接件等方面入手。这些措施可以有效提高螺纹的耐腐蚀性和耐磨性, 延长其使用寿命。

## 5 总结与展望

螺纹失效对机械设备的运行具有显著影响。螺纹断裂通常由应力集中、外部冲击及疲劳损伤等因素引发, 通过热处理工艺和选用高品质材料可实现有效的防护。螺纹腐蚀现象多见于湿润或具有酸碱性质的环境中, 采用耐腐蚀材料、涂层保护以及电化学防护技术能够有效预防。螺纹磨损与摩擦力、材料硬度及润滑条件紧密相关, 选用耐磨材料、优化润滑条件能够减缓磨损进程。虽然上述方法能够延长螺纹的使用寿命, 但腐蚀现象无法被彻底消除, 因此在选择防护措施时必须综合考量多种因素, 并采取多种措施相结合的方式, 以期达到最优的防护效果。

高性能防护材料的研究构成了科技领域中的关键研究方向, 对于防护技术的进步具有至关重要的意义。此类材料必须具备耐腐蚀性、高强度以及良好的导电性能, 以适应极端的工作环境, 增强设备的耐久性和稳定性, 同时降低维护成本, 从而推动相关行业的发展。这些材料的应用领域极为广泛, 包括但不限于航空航天、石油化工以及电力行业。随着环保意识的提升, 绿色环保型防护技术愈发受到重视, 研究者致力于开发无污染、低能耗的防护方法, 例如纳米材料修饰技术和无机纳米复合涂层, 旨在减少挥发性有机化合物 (VOC) 的排放, 降低对环境的负面影响。智能化监测与诊断技术通过信息技术的应用, 实现了对腐蚀状况的实时监控, 进而延长了设备的使用寿命。结合数据分析和人工智能技术, 智能化监测与诊断技术能够精确预测腐蚀程度, 为制定个性化防护策略提供了科学依据。未来, 防护技术的集成与应用将

成为发展趋势,通过融合多种技术手段,进一步提升螺纹连接部位的防护效果。

#### 参考文献:

- [1] 王国栋,徐尚超,王先强,等. 螺纹紧固件工程应用研究[J]. 机械制造, 2020, 58(2): 67-69.  
WANG G D, XU S C, WANG X Q, et al. Study on Engineering Application of Threaded Fastener[J]. Machinery, 2020, 58(2): 67-69.
- [2] 刘翊安,庞国星,王振丰,等. HRB500 钢筋直螺纹机械连接失效研究与工艺优化[J]. 锻压技术, 2021, 46(3): 138-145.  
LIU Y A, PANG G X, WANG Z F, et al. Failure Study and Process Optimization on Straight Thread Mechanical Connection on HRB500 Rebar[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(3): 138-145.
- [3] GRIMSMO E L, AALBERG A, LANGSETH M, et al. How Placement of Nut Determines Failure Mode of Bolt-and-Nut Assemblies[J]. Steel Construction, 2017, 10(3): 241-247.
- [4] 叶栋梁. 辽河油区钻具失效分析与检测研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.  
YE D L. Failure Analysis and Detection of Drilling Tools in Liaohe Oilfield[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [5] 李艳军,周杰,石大鹏,等. 某螺纹连接副服役失效原因分析[J]. 中国设备工程, 2022(6): 182-184.  
LI Y J, ZHOU J, SHI D P, et al. Cause Analysis of Service Failure of a Threaded Connection Pair[J]. China Plant Engineering, 2022(6): 182-184.
- [6] 张认认,杨尚谕,闫相祯,等. 储气库注采管柱螺纹失效动态风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 84-90.  
ZHANG R R, YANG S Y, YAN X Z, et al. Dynamic Risk Assessment on Thread Failure of Injection-Production Tubular String in Gas Storage Depot[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(3): 84-90.
- [7] 赵兵,陈龙. 基于实际工况的螺纹紧固件虚拟加载平台建设[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(9): 125-128.  
ZHAO B, CHEN L. Construction of Virtual Loading Platform for Threaded Fasteners in Real Working Conditions[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(9): 125-128.
- [8] FUKUOKA T, NOMURA M, FUCHIKAMI T. Finite Element Analysis of the Cyclic Stress Amplitude of Threaded Fasteners Using Helical Thread Models[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2011, 133(6): 061201.
- [9] 聂晓东,张恒,霍军周,等. 一种等强度微锥结构螺栓设计及有限元分析[J]. 机械设计, 2018, 35(11): 74-78.  
NIE X D, ZHANG H, HUO J Z, et al. Design and Finite Element Analysis of a Bolt Featuring Its Equal-Strength Micro-Taper Structure[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(11): 74-78.
- [10] 余世杰,欧阳志英,龚丹梅,等. 某油田钻铤断裂失效原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2019, 55(3): 200-203.  
YU S J, OUYANG Z Y, GONG D M, et al. Cause Analysis on Fracture Failure of Drill Collar in an Oilfield[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing)), 2019, 55(3): 200-203.
- [11] GUO H C, MAO K H, LIU Y H, et al. Experimental Study on Fatigue Performance of Q460 and Q690 Steel Bolted Connections[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 138: 243-251.
- [12] WANG J, UY B, LI D X, et al. Fatigue Behaviour of Stainless Steel Bolts in Tension and Shear under Constant-Amplitude Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133: 105401.
- [13] LIU H T, HU F T, ZHAO M F, et al. Fracture Failure Analysis of 5 "Drill Collar Double Shoulder External Thread in a Well[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2612(1): 012009.
- [14] 陈彬彬,刘斌,许万剑,等. 321 螺纹接头泄漏失效分析[J]. 现代冶金, 2020(6): 16-18.  
CHEN B B, LIU B, XU W J, et al. Analysis of Leakage Failure of 321 Threaded Joint[J]. Modern Metallurgy, 2020(6): 16-18.
- [15] 廖贵鹏,赵广慧,梁政,等. 螺杆钻具传动轴接头表面裂纹断裂性能研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(1): 258-264.  
LIAO G P, ZHAO G H, LIANG Z, et al. Fracture Behavior of Surface Crack in Tool Joint of Transmission Shaft of Positive Displacement Motor[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1): 258-264.
- [16] 朱力微,孙银林. CF-8M 铸钢加工过程中丝锥断裂的原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(1): 54-56.  
ZHU L W, SUN Y L. Causes Analysis on Fracture of Screw Taps in the Machining Process of CF-8M Casting Steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing)), 2016, 52(1): 54-56.
- [17] 毕雪亮,王长江,阎铁,等. 深井钻具失效分析与预防[J]. 钻采工艺, 2005, 28(6): 27-30.  
BI X L, WANG C J, YAN T, et al. Analysis and Precaution of Drilling Tools Failure in Deep Well[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(6): 27-30.
- [18] 苏广兰,殷凤仕,谢甲伟,等. 隔热油管外管断裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 156-158.  
SU G L, YIN F S, XIE J W, et al. Fracture Failure Analysis of Insulated Tubing Outer Pipe[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(10): 156-158.
- [19] 黄震,余琪,刘锦平,等. 退火态  $\phi 7$  mm 内螺纹铜管组织和力学性能的研究[J]. 铜业工程, 2021(4): 21-23.  
HUANG Z, YU Q, LIU J P, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Annealed  $\phi 7$  Thin-Walled Inner Grooved Copper Tubes[J]. Copper Engineering, 2021(4): 21-23.
- [20] 傅璞. 40Cr 热处理工艺及其组织与性能[J]. 机械工程与自动化, 2005(5): 110-111.  
FU P. 40Cr Heat Treatment Craft and Its Structure and Function[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2005(5): 110-111.
- [21] 苏辰兆,王洪伟,程林. 氮化工艺在钻杆接头螺纹处理中的应用研究[J]. 地质装备, 2023, 24(4): 6-11.  
SU C Z, WANG H W, CHENG L. Study on the Application of Nitriding Process in Thread Treatment of Drill



- Pipe Joints[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2023, 24(4): 6-11.
- [22] 郭国强, 成群林, 杨长祺, 等. 不同热处理状态螺纹量规材料的磨削性能研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 232-240.  
GUO G Q, CHENG Q L, YANG C Q, et al. Investigation on the Grinding Ability of Thread Gauge Material under Different Heat Treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 232-240.
- [23] 谢浪. 螺纹的防渗碳与漏渗碳处理[J]. 金属热处理, 2000, 25(12): 29-30.  
XIE L. Anti-Carburizing and Limited Carburizing of Screw Threaded Parts[J]. Heat Treatment of Metals, 2000, 25(12): 29-30.
- [24] 于文馨, 王庆顺. 表面硼化处理探析[J]. 有色矿冶, 1999, 15(6): 28-31.  
YU W X, WANG Q S. Analysis of Surface Boronizing Treatment[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 1999, 15(6): 28-31.
- [25] CAI R, XIAO W W, XU Y Y, et al. Corrosion Failure Analysis of a L80 Oil Tube Thread[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 233: 042034.
- [26] 张颖, 杨坤, 余柳丝, 等. 油井管接头螺纹腐蚀与防护研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2563-2572.  
ZHANG Y, YANG K, YU L S, et al. Research Progress on Thread Corrosion and Protection of Oil Well Pipe Joint[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2563-2572.
- [27] ZYWITZKI O, MODES T, SCHÄFER K. Corrosion and Microstructural Studies on Gilded Silver Threads from Sumptuous Textiles from the Era of Augustus the Strong[J]. Practical Metallography, 2020, 57(12): 853-868.
- [28] 刘华东. 12.9 级高强度内六角螺栓应力腐蚀断裂原因[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(11): 43-45.  
LIU H D. Cause of Stress Corrosion Fracture on Grade 12.9 High Strength Hexagon Socket Bolt[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing)), 2020, 56(11): 43-45.
- [29] LIU J H, OUYANG H J, PENG J F, et al. Experimental and Numerical Studies of Bolted Joints Subjected to Axial Excitation[J]. Wear, 2016, 346/347: 66-77.
- [30] 张智. 恶劣环境油井管腐蚀机理与防护涂层研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.  
ZHANG Z. Study on Corrosion Mechanism and Protective Coating of Oil Well Pipe in Harsh Environment[D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2005.
- [31] 宋积文, 杜敏. 无铬锌铝涂层发展现状[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(8): 411-413.  
SONG J W, DU M. Current Status of non-Chromium Zn-Al Coating[J]. Corrosion & Protection, 2007, 28(8): 411-413.
- [32] 徐良. 航空钛合金紧固件铝涂层性能规范研究[J]. 航空标准化与质量, 2012(1): 32-36.  
XU L. The Specification of Aluminum Pigmented Coating for Aerospace Titanium Alloy Fasteners[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2012(1): 32-36.
- [33] 高雪, 吉利, 鞠鹏飞, 等. 纳米结构对二硫化钼摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 133-140.  
GAO X, JI L, JU P F, et al. Effect of Nanostructure on Tribological Properties of Molybdenum Disulfide[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 133-140.
- [34] 彭俊锋. 分子泳镀纳米二硫化钼润滑涂层工艺设计[J]. 上海化工, 2020, 45(6): 27-29.  
PENG J F. Process Design of Nano Molybdenum Disulfide Lubricating Coating by Molecular Electrophoresis[J]. Shanghai Chemical Industry, 2020, 45(6): 27-29.
- [35] 房亚楠, 秦立光, 赵文杰, 等. 氟碳涂料在防腐领域的研发现状和发展趋势[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(2): 97-106.  
FANG Y N, QIN L G, ZHAO W J, et al. Research Progress and Development Trend on Corrosion Resistant Fluorocarbon Paint[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(2): 97-106.
- [36] 邓滨才. 缓蚀剂的作用机理及应用[J]. 化学工程师, 1995, 9(6): 43-44.  
DENG B C. Mechanism and Application of Corrosion Inhibitor[J]. Chemical Engineer, 1995, 9(6): 43-44.
- [37] 林海潮. 缓蚀剂研究的进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1997, 9(4): 308-313.  
LIN H C. Progress in Research of Inhibitors[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1997, 9(4): 308-313.
- [38] SÖYLEV T A, RICHARDSON M G. Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete: State-of-the-Art Report[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4): 609-622.
- [39] 史明慧, 赵德悦, 马玉春, 等. 缓蚀剂添加量对 Q235 螺纹钢耐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 143-147.  
SHI M H, ZHAO D Y, MA Y C, et al. Effect of Adding Amount of Inhibitor on Corrosion Resistance of Steel Q235[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 143-147.
- [40] 王丹, 袁世娇, 吴小卫, 等. 油气管道 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀及防护技术研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 31-37.  
WANG D, YUAN S J, WU X W, et al. Research Progress of CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S Corrosion in Oil and Gas Pipelines and the Protection Techniques[J]. Surface Technology, 2016, 45(3): 31-37.
- [41] 陶寄明. 机械连接设计示例与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 15-16.  
TAO J M. Design Example and Analysis of Mechanical Connection[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 15-16.
- [42] 东晓林, 时小军, 黄燕滨, 等. 螺纹紧固件腐蚀防护技术的应用现状[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(9): 481-485.  
DONG X L, SHI X J, HUANG Y B, et al. Application Status of Corrosion Protection Technologies to Threaded Fasteners[J]. Electroplating & Finishing, 2016, 35(9): 481-485.
- [43] Subcommittee A05.13 on Structural Shapes and Hardware Specification, ASTM A153/A153M-16, Standard Specification for Zinc Coating(Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware[S]. Xikangshehuoken: ASTM International, 2016.
- [44] NEJAD S A T, ALIBAKHSI E, RAMEZANZADEH B, et al. The Role of Acetylacetone in Alkaline Surface Modification Bath of Electro-Galvanized Steel to Enhance Protective Functioning of a Hybrid Silane Coat-

- ing[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 171: 107048.
- [45] 肖革, 杨晓波, 向可友, 等. 电镀锌及热浸镀锌钢板磷化工艺新进展[J]. *电镀与精饰*, 2021, 43(9): 31-38.  
XIAO G, YANG X B, XIANG K Y, et al. New Development in Phosphating Process of Electro Galvanized and Hot Dip Galvanized Steel Sheet[J]. *Plating and Finishing*, 2021, 43(9): 31-38.
- [46] 邓本金. 锌(铝)以及有机涂料对钢铁底材的双重防腐保护[J]. *涂层与防护*, 2021, 42(7): 48-56.  
DENG B J. Duplex Corrosion Protection to Steel Substrates by Zinc(Aluminum) and Organic Coatings[J]. *Coating and Protection*, 2021, 42(7): 48-56.
- [47] 杨永伟, 王胜民, 杨李锋, 等. 机械镀锌层耐蚀性能的研究[J]. *材料保护*, 2019, 52(8): 8-14.  
YANG Y W, WANG S M, YANG L F, et al. Corrosion Resistance of Mechanical Deposited Zinc Coating[J]. *Materials Protection*, 2019, 52(8): 8-14.
- [48] SUN J C, LUO Y T, YE J E, et al. Chromium Distribution, Leachability and Speciation in a Chrome Plating Site[J]. *Processes*, 2022, 10(1): 142.
- [49] 刘晓强, 孟凡江, 丁宗华, 等. 核电堆内构件紧固件镀铬工艺研究[J]. *电镀与涂饰*, 2021, 40(21): 1615-1618.  
LIU X Q, MENG F J, DING Z H, et al. Study on Chromium Electroplating Process for Fasteners of Nuclear Reactor Internals[J]. *Electroplating & Finishing*, 2021, 40(21): 1615-1618.
- [50] 鲁喜宁, 丁洁琼, 余世杰. 钻具螺纹表面镀镍钨合金的应用研究[J]. *材料保护*, 2021, 54(4): 145-148.  
LU X N, DING J Q, YU S J. Application of Ni-W Alloy Plating on Drilling Tool Thread Surface[J]. *Materials Protection*, 2021, 54(4): 145-148.
- [51] 仇振安, 张尉, 靳冉, 等. 电镀零件绝缘工装应用研究[J]. *河南科技*, 2021, 40(6): 53-55.  
QIU Z A, ZHANG W, JIN R, et al. Research on the Application of Insulation Tooling for Electroplating Parts[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(6): 53-55.
- [52] 卢泰宇, 郭绕龙, 李艳军, 等. 螺纹紧固件表面防护技术综述[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(12): 61-68.  
LU T Y, GUO R L, LI Y J, et al. The Review of Surface Protection Technology of Thread Fastener[J]. *Plating and Finishing*, 2022, 44(12): 61-68.
- [53] 程西云, 周银生. 润滑油对滑动摩擦副咬死性能的影响[J]. *润滑与密封*, 1997, 22(4): 10-12.  
CHENG X Y, ZHOU Y S. Influence of Lubrication Oil on the Scuffing Resistant of Sliding Friction Pairs[J]. *Lubrication Engineering*, 1997, 22(4): 10-12.
- [54] 程西云, 蒋松, 韦云隆. 一种新的咬死失效理论模型——高温熔焊模型[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(6): 107-110.  
CHENG X Y, JIANG S, WEI Y L. A New Scuffing Model for Surface Welding at High Temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2000, 31(6): 107-110.
- [55] 李文顶, 孔鸣杰, 江文达. 不锈钢螺纹联接副损伤及咬死现象分析与解决措施[J]. *机电工程技术*, 2013, 42(1): 97-99.  
LI W D, KONG M J, JIANG W D. Analysis of Screw Pairs Galling of Stainless Steel[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2013, 42(1): 97-99.
- [56] 万蕾, 孙璐, 杨耀东. 接头螺纹咬死失效原因分析[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(1): 77-81.  
WAN L, SUN L, YANG Y D. Failure Analysis for Screw Thread of Joint[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(1): 77-81.
- [57] 魏培欣, 许一源, 郑云昊, 等. 不锈钢螺纹连接咬死机理及预防措施研究[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(7): 1120-1124.  
WEI P X, XU Y Y, ZHENG Y H, et al. Research on Galling Mechanism of Stainless Steel Thread and Preventive Scheme[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(7): 1120-1124.
- [58] THORNTON H R, BAILEY E I, WILLIAMSON J S. Friction and Wear in Threaded Surfaces of Rotary Drill Collars[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1993, 115(1): 23-31.
- [59] SUNDH J, OLOFSSON U. Seizure Mechanisms of Wheel-Rail Contacts under Lubricated Conditions Using a Transient Ball-on-Disc Test Method[J]. *Tribology International*, 2008, 41(9/10): 867-874.
- [60] 徐汉中, 王寅虎, 吕蒙, 等. 拔销器手动拔销螺纹咬死故障分析与防控[J]. *导弹与航天运载技术*, 2020(1): 118-122.  
XU H Z, WANG Y H, LYU M, et al. Analysis and Prevention of Retracting Actuator Screw Thread Galling[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2020(1): 118-122.
- [61] 潘泽宇. 热紧螺栓防咬死技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
PAN Z Y. Study on Anti-seizure Technology of Hot-tightening Bolts[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [62] 张明远. 微粒子喷丸对螺纹紧固件抗松动性能影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
ZHANG M Y. Study on the Influence of Micro-particle Shot Peening on the Anti-loosening Performance of Threaded Fasteners[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [63] 杨胜强, 李永刚, 李文辉. 航空钛合金抗疲劳表面改性技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(13): 28-35.  
YANG S Q, LI Y G, LI W H. Development of Anti-Fatigue Surface Modification Technology of Aeronautical Titanium Alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(13): 28-35.
- [64] WANG B, BARBER GC, WANG R, PAN Y. Comparison of Wear Performance of Austempered and Quench-Tempered Gray Cast Irons Enhanced by Laser Hardening Treatment[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3049.
- [65] RUAMMAITREE A, PHOKHARATKUL D, WISITSORAAAT A. Surface Hardening of Stainless Steel by Coating Graphene Using Thermal Chemical Vapor Deposition[J]. *Solid State Phenomena*, 2018, 283: 173-178.
- [66] 聂福平. 拧紧扭矩、松脱扭矩和轴向预紧力的关系及防松运用[J]. *机电产品开发与创新*, 2022, 35(1): 131-133.  
NIE F P. The Relationship and Application of Fastening Torque and Loosening Torque/Clamp Force[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2022, 35(1): 131-133.