

# 起落架用300M超高强度钢应力腐蚀分析与防护

杨永, 张宏明, 吴朝华, 张敏, 蔚海清

(石家庄海山实业发展总公司, 石家庄 050200)

**摘要:** 目的 研究起落架用300M超高强度钢的应力腐蚀防护措施。方法 分析起落架用300M超高强度钢应力腐蚀开裂的机理。结果 针对应力源和应力腐蚀环境对起落架的影响,从材料的制造工艺、表面应力状态和表面处理方法方面进行优化。结论 提高了起落架的抗应力腐蚀能力,并对起落架的防应力腐蚀措施进行总结。

**关键词:** 300M超高强度钢; 应力腐蚀; 防护

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.01.013

**中图分类号:** TJ07; TG174 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)01-0068-05

## Analysis and Protection of Stress Corrosion of 300M Ultra-high Strength Steel for Landing Gear

YANG Yong, ZHANG Hong-ming, WU Zhao-hua, ZHANG Min, YU Hai-qing

(Shijiazhuang Haishan Industrial Development Corporation, Shijiazhuang 050200, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the protection measures against stress corrosion of 300M ultra-high strength steel for landing gear. **Methods** The mechanism of stress corrosion cracking of 300M ultra-high strength steel for landing gear was analyzed. **Results** According to the effects of the source of stress and the stress corrosion environment on the landing gear, optimization was conducted from aspects of the manufacturing process, the surface stress state and the surface treatment methods of the material. **Conclusion** The stress corrosion resistance of landing gear was improved, and the prevention measures against stress corrosion of landing gear were summarized.

**KEY WORDS:** 300M ultra-high strength steel; stress corrosion; protection

40CrNi2Si2MoVA(300M)钢是高强度的中碳低合金钢,具有高强度、良好的韧性、良好的抗疲劳和抗应力腐蚀的性能,特别是它具有很好的淬火性,淬火和回火后强度可达1960 MPa。其主要用于制造飞机的起落架<sup>[1]</sup>,具有高强度和高韧性的特点,但其高韧性影响着超高强度钢的耐应力腐蚀性能。在处于潮湿大气、工业大气和海水等环境中时,污染性或腐

蚀性气体组分与高于某一临界值的应力联合作用于高强度钢,则会使其萌生裂纹并逐渐扩展,最终导致超高强度钢在大气环境发生应力腐蚀开裂,甚至在蒸馏水中都有发生应力腐蚀开裂的可能。文中通过分析超高强度钢应力腐蚀开裂机理,并对影响超高强度钢的应力腐蚀的因素进行分析,确定超高强度钢应力腐蚀防护措施。

收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2015-11-10

Received: 2015-10-13; Revised: 2015-11-10

作者简介: 杨永(1985—),男,河北石家庄人,硕士,主要从事国产歼击机起落架的修理。

Biography: YANG Yong(1985—), Male, from Shijiazhuang, Hebei, Master, Research focus: repair of landing gear for domestic fighters.

## 1 起落架用300M超高强度钢特性

目前国内起落架用超高强度钢主要有30CrMnSiNi2A,40CrMnSiMoVA(GC-4),40CrNi2Si2MoVA(300M)等。由于30CrMnSiNi2A钢的抗拉强度为1570~1765 MPa,落震试验时,研制的飞机起落架在较低寿命下就出现了焊缝裂纹、螺纹断裂、护板接头疲劳裂纹等缺陷。GC-4钢的抗拉强度为1800~2100 MPa,用其研制的起落架上出现了点状缺陷、硫化物夹杂、粗晶、内部裂纹、焊缝缺陷、热处理渗氢等问题,这些问题影响着起落架的寿命和可靠性。为此,国内研制了300M钢用于起落架的制造,该钢材的抗拉强度为1900~2100 MPa,采用真空炉冶炼,纯净度高,钢的韧性、塑性、疲劳和应力腐蚀性能都比较好,使得起落架寿命得到了很大的提升。

超高强度钢对腐蚀疲劳及应力腐蚀开裂非常敏感。应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳是超高强度钢的两种主要失效方式。应力腐蚀开裂是造成高强度钢故障的重要原因,其机理主要有两类:阳极溶解型和氢脆型。应力腐蚀开裂在应力远小于金属强度且环境介质腐蚀性不强的条件下就会产生,是一种较危险的破坏形式。

## 2 超高强度钢应力腐蚀开裂机理分析

应力腐蚀开裂是超高强度钢在使用过程中发生突发性破坏事故的主要形式之一,应力腐蚀开裂是指受拉伸应力的金属材料在某些特定的介质中,由于腐蚀介质和拉应力(可以是焊接、弯曲或其他成形工艺引起的残余应力,也可以是内压、机械载荷或热膨胀引起的应力)的协同作用而发生的低于强度极限的脆性断裂现象。一般认为,金属材料在环境中发生应力腐蚀开裂需要同时具备以下三个条件,即敏感材料、特定环境和拉伸应力。合金比纯金属更容易产生应力腐蚀开裂,几乎所有的合金在特定的环境中都有某种应力腐蚀敏感性。

美国飞机部件破坏调查分析表明,起落架多数是由于表面引起应力腐蚀或疲劳裂纹扩展而导致最后断裂的。零件表面缺陷在应力和腐蚀介质的共同作用下,由于电化学反应,表面产生不均匀腐蚀坑,进而开始应力腐蚀裂纹扩展,且往往在宏观应力远低于屈服强度的情况下发生滞后破坏。

应力腐蚀断裂过程可分为三个阶段<sup>[2]</sup>:萌生阶

段,即由于腐蚀引起钢的腐蚀敏感部位形成微小蚀坑或裂纹的阶段,约为断裂总时间的90%;裂纹扩展阶段,即由裂纹源或蚀坑达到极限应力值(单位面积所能承受的最大载荷)为止的这一阶段;失稳断裂阶段。

应力腐蚀的机理主要有阳极溶解理论和氢致开裂理论。

阳极溶解理论认为:在应力腐蚀环境中,金属被钝化膜覆盖,不与腐蚀介质直接接触,钝化膜在拉应力的作用下产生滑移,使钝化膜破裂,形成蚀孔和裂纹源。金属内部产生了一条狭窄的活性通道,随后在拉应力的作用下,活性通道前端的钝化膜反复破裂,产生裂纹,裂纹沿着垂直于拉应力作用的方向前进,只有钝化膜受局部破坏后,裂纹才能形核,并在应力作用下,裂纹尖端沿某一择优路径定向溶解,导致裂纹扩展,最终发生断裂。

氢致开裂理论涉及氢离子的迁移,氢离子放电。吸附在金属表面的一部分氢离子复合成分子,并以氢气的形式逸出;另一部分氢原子变成溶解型吸附原子,然后吸附成为溶解在金属中的原子氢,并通过扩散进入金属内部,在应力的作用下它们富集在应力集中区,导致材料的低应力脆断。超高强度钢对氢脆非常敏感,无论是材料内部的氢还是环境中来的外氢。

超高强度钢应力腐蚀开裂机理的出现,导致在考虑电镀氢脆的同时,也要注意研究阳极性镀层在使用过程中的腐蚀对基体材料氢脆影响。刘道新等<sup>[3]</sup>研究了带镀层300M钢应力腐蚀开裂行为的机理,发现电镀Cr,Cr-Ti镀层均使300M钢应力腐蚀开裂敏感性增加。阴极镀层加速的电偶腐蚀对镀Cr 300M钢的应力腐蚀开裂过程有明显的促进作用;阳极镀层促进氢致开裂,是镀Cr-Ti及镀Al 300M钢应力腐蚀开裂的失效机制。

应力腐蚀裂纹形态有沿晶型、穿晶型和混合型。如高强度钢、铝合金和镍基合金是沿晶型的(称为晶间腐蚀破裂),奥氏体不锈钢多是穿晶型的(应力腐蚀破裂)。300M钢的应力腐蚀为沿晶开裂模式,裂纹源于表面开始的腐蚀部位并向内部扩展<sup>[1]</sup>。裂纹断口的形貌,宏观上属于脆性断裂,即使塑性很高的材料也是如此。从微观上观察,在断裂面上仍有塑性流便痕迹,断面有裂纹分叉现象,断口形貌呈海滩条纹、羽毛状、扇子形等症状。裂纹方向宏观上和主拉伸应力的方向垂直,微观上略有偏移。

### 3 300M钢应力腐蚀因素分析

影响金属材料应力腐蚀性能的因素很多,包括力学因素、环境因素及金属学因素。当合金体系确定以后,应力与环境成为应力腐蚀的两个主要方面。

#### 3.1 300M钢的抗应力腐蚀特性

300M钢超高强度钢显微组织以片状马氏体结构为主,同时存在孪晶马氏体及沉积于片状马氏体间的脆性渗碳体。孪晶马氏体导致局部高应力并限制位错移动,渗碳体构成氢致开裂敏感途径。因此,300M超高强度钢在外加应力与环境介质的共同作用下,阳极溶解与氢致开裂过程均易进行。

元素的化学作用可以影响材料的耐蚀性,随着金属强度的升高,抗应力腐蚀性能明显降低。提高钢中的Ni,C,Si等元素含量可提高超高强度钢的应力腐蚀性能,而N,P,Ti等元素却会降低其耐应力腐蚀能力。金属材料的屈服强度会影响金属内氢扩散的过程和速度,随着屈服强度的提高,裂纹尖端氢聚集的速率加快,从而使氢致开裂速率增大。李继欣等<sup>[4]</sup>测定了300M超高强度钢在蒸馏水和3.5%NaCl水溶液中的应力腐蚀断裂性能,结果表明,当抗拉强度为2020 MPa,相对于1915 MPa时,其断裂韧性临界值下降17.8%,抗应力腐蚀性能明显降低。

#### 3.2 影响应力腐蚀的环境因素

影响应力腐蚀的环境因素主要包括腐蚀介质和介质温度。腐蚀介质的离子种类以及体系的电化学状态对应力腐蚀有着重要的影响,当溶液电位超过一定值时,就发生破裂。溶液中的Cl<sup>-</sup>离子的存在容易造成300M钢表面钝化膜破坏,并协同拉应力促进钢表面膜的局部破坏,形成大阴极(钝化膜)-小阳极(钢基)腐蚀电偶,从而促进应力腐蚀开裂敏感性<sup>[5]</sup>。300M钢的应力腐蚀敏感性取决于环境,在海洋大气环境下具有较高的应力腐蚀敏感性<sup>[1]</sup>。

电化学研究方法表明,300M钢对3.5%的NaCl溶液相当敏感<sup>[6]</sup>。如图1所示,为300M钢在空气中和不同电位下的慢应变速率拉伸试验中的应力-应变曲线对比图,图1b为其局部放大图。从图1可见,与空气中的值相比,300M钢在溶液中开路电位(OCP)下的伸长率和断裂强度都有明显下降,说明300M钢在3.5%NaCl溶液中存在应力腐蚀敏感性。与开路电位相比,阳极和阴极电位对伸长率和断裂强度的影响则有不同趋势。

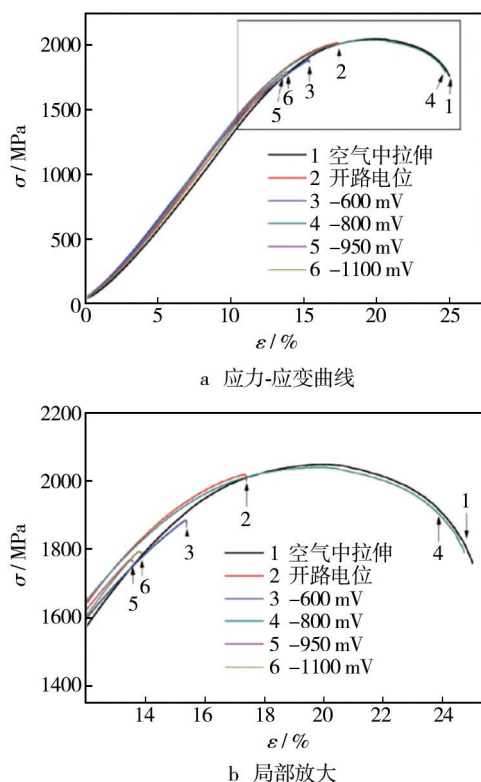


图1 300M钢在空气中和不同电位下的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of 300M steel in the air and at different potentials

#### 3.3 影响应力腐蚀的应力因素

引起超高强度钢应力腐蚀开裂的应力主要是在淬火、焊接、扭转、拉伸和配合等过程中产生的。应力腐蚀开裂主要发生在应力集中部位。应力主要来源于设备或部件在工作条件下的外载荷,另外还包括材料在生产制造或者加工过程中残留的应力。应力的主要作用是引起合金塑性变形,使裂纹尖端表面膜破裂、滑移台阶露头,裂纹尖端活性增加,引起局部腐蚀;同时使微裂纹向纵深扩展,新鲜电解液不断地流入,促进了裂纹尖端腐蚀过程的持续进行。如果不存在静拉伸应力,即使有敏感的合金与特定的介质配合,应力腐蚀同样不会出现,压应力是不会产生应力腐蚀开裂的。

### 4 超高强度钢应力腐蚀防护措施分析

通过对超高强度钢应力腐蚀产生的原因分析,针对起落架用300M超高强度钢的抗应力腐蚀能力提升,应主要从材料、环境、拉伸应力方面制定防护措施。同时对起落架的使用维护和维修进行完善。



## 4.1 改变材料的制造工艺

超高强度钢对氢脆很敏感,采用空气炉或甲醇裂化炉热处理都存在渗氢、零件表面氧化脱碳等问题,而表面脱碳会降低疲劳强度。300M钢采用真空热处理技术,避免了渗氢,零件表面光亮,无氧化脱碳、增碳和晶界氧化等缺陷,提高了零件的表面质量<sup>[7]</sup>。控制S含量和硫化物,获取高纯度300M超高强度钢,提高在腐蚀环境中的疲劳裂纹扩展速率。

通过改进热处理工艺,降低板条束尺寸,从而降低边界裂纹的平均自由程,以改变抗氢脆能力<sup>[8-9]</sup>;设法阻止氢在板条界的聚集,改变板条边界对氢脆的阻力;减少孪晶马氏体量,并设法在马氏体间均匀地分布一层稳定的残余奥氏体薄膜,提高抗应力腐蚀开裂能力<sup>[10]</sup>。

## 4.2 改变表面的应力状态

通过“无应力集中”抗疲劳概念设计,降低零件的应力集中水平,通过增加过渡圆角,强化薄弱环节等措施,提高材料的抗疲劳特性。同时控制机械加工,尤其是控制磨削及其他精加工,保证其表面完整性。

通过表面强化技术,改变零件的表面应力场,如喷丸强化、孔挤压强化、螺纹滚压强化等手段。喷丸强化能非常有效地改善金属零件疲劳断裂和应力腐蚀断裂抗力,通过合适的喷丸工艺强化后,可以使300M钢因电镀、表面脱碳和表面粗糙等造成的疲劳降低得到恢复。电镀后表面的拉应力高达600 MPa,应力场的深度约为0.08 mm,而喷丸后电镀,表面的拉应力深度为0.02~0.03 mm,在镀层与基体过渡区则为压应力,在基体上还存在较大的压应力场,深度可达0.3 mm,可有效降低零件表面的拉应力影响,提高零件的抗应力腐蚀能力。同样,通过孔挤压强化、螺纹滚压强化均能改变零件表面的应力场,由拉应力变为压应力,有效提高疲劳强度和抗应力腐蚀能力。

## 4.3 表面防护技术

通过在金属表面涂覆耐蚀涂料或镀覆耐蚀金属或合金,将金属与环境介质隔离起来<sup>[11]</sup>,可有效提高金属的抗腐蚀能力。

1) 低氢脆电镀防护。低氢脆镀镉-钛代替传统的磷化用于高强度钢的表面防护,有效地隔离了应力腐蚀介质,极大地提高了零件的耐蚀性。起落架尺寸较大、结构复杂,导致在电镀时出现防护的“真空部

位”。采用低氢脆刷镀镉工艺,是低氢脆镀镉-钛和低氢脆镀镉(松孔镀镉)的配套工艺,保证了零件防护表面的完整性。同时,在镀层上喷涂底漆和面漆,能够有效地保护基体不受外部环境的影响。

2) 热喷涂防护。由于常用的表面处理方法在电镀过程中引入的氢容易引起氢脆,通过热喷涂WC涂层的方法,明显提高了材料的耐蚀性。周克崧等<sup>[12]</sup>采用电化学的方法研究300M钢及其表面WC涂层在3.5%NaCl水溶液中的腐蚀性为,所测的电化学极化曲线如图2所示。300M钢基体的腐蚀电位最低,经WC-17Co和WC-10Co4Cr涂层处理后,腐蚀电位明显升高。热喷涂涂层有良好的硬度及耐磨性,此防护技术可用于零件运动摩擦部位的防护。

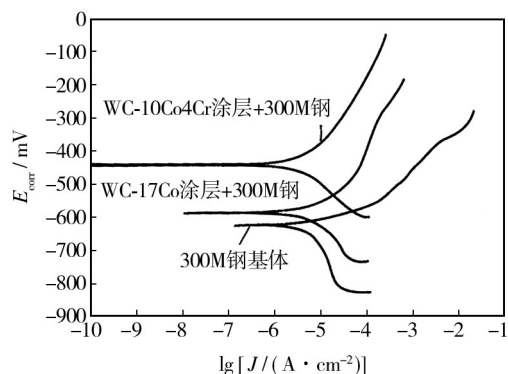


图2 300M钢在3.5%NaCl水溶液中的极化曲线

Fig.2 Polarization curve of 300M steel in 3.5% NaCl aqueous solution

## 4.4 起落架的使用维护及维修

起落架长期暴露在外界环境中,其应力腐蚀和氢致开裂的倾向性增加,因此在起落架的使用维护过程中,需要对零件采取严密的防护措施,以提高起落架零件的使用寿命。通过对起落架的表面完整性进行监控,利用刷镀镉或补漆的方式保证表面防护层的完整性,实现与应力腐蚀环境的物理隔离。

零件在表面处理、装配、使用、分解等过程中均会有残余应力产生,同时起落架经过长时间使用,也存在内部的残余应力。在起落架维修时,应先释放应力,降低起落架本身的应力水平,对应力集中区及疲劳关键区进行无损检测,提前发现表面微裂纹,并对起落架的热损伤进行检测。

零件的表面缺陷会引起应力集中,是应力腐蚀的诱因,维修过程中严格控制起落架的外部缺陷,修复起落架表面损伤,并重新恢复零件表面防护层,以保证起落架在寿命期内的抗应力腐蚀能力和可靠性。

同时要严格控制过程,防止过程中产生应力腐蚀的影响因素,如碰伤、机械加工、敲击、氢脆等。所有过程中禁止接触酸性物质,以防产生氢脆。

## 5 结语

文中通过对300M钢的应力腐蚀开裂机理分析,确定影响应力腐蚀的材料、环境、应力因素,从材料本身、热处理方法、表面强化及表面防护等方面分别阐述了提高材料抗应力腐蚀特性的措施,并对起落架的使用维修过程中,提高300M材料的抗腐蚀应力特性措施进行总结。

## 参考文献:

- [1] 张晓云,孙志华,刘明辉,等. 40CrNi2Si2MoVA钢的大气应力腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 275—281.  
ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, LIU Ming-hui, et al. Atmospheric Stress Corrosion of 40CrNi2Si2MoVA Steel[J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 2006, 26(5): 275—281.
- [2] 刘建洲. 奥氏体不锈钢的应力腐蚀及其防护[J]. 石油化工设备技术, 2010, 31(4): 49—53.  
LIU Jian-zhou. Stress Corrosion and Protection of Austenitic Stainless Steel[J]. Petro-chemical Equipment Technology, 2010, 31(4): 49—53.
- [3] 刘道新,金石. 带镀层300M超高强度钢应力腐蚀行为与机理研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(6): 49—52.  
LIU Dao-xin, JIN Shi. The Stress Corrosion Cracking Behavior and Mechanism of Coated Ultrahigh Strength Steel 300M[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(6): 49—52.
- [4] 李继欣,陈铿如,吴静贞. 超高强钢应力腐蚀断裂行为研究[J]. 物理测试, 1991(4): 27—30.  
LI Ji-xin, CHEN Keng-ru, WU Jing-zhen. The Research of Ultrahigh Strength Steel Stress Corrosion Fracture Behavior[J]. Physics Examination and Testing, 1991(4): 27—30.
- [5] 刘道新,金石,何家文. 300M超高强度钢的应力腐蚀开裂[J]. 特殊钢, 1997, 18(6): 20.  
LIU Dao-xin, JIN Shi, HE Jia-wen. Stress Corrosion Cracking of Ultra-high Strength Steel 300M[J]. Spec Steel, 1997, 18(6): 20.
- [6] 孙敏,肖葵,董超芳,等. 300M超高强度钢电化学性能及应力腐蚀开裂[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(10): 1159—1165.  
SUN Min, XIAO Kui, DONG Chao-fang, et al. Electrochemical Behavior and Stress Corrosion Cracking of 300M Ultrahigh Strength Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(10): 1159—1165.
- [7] 吴国宏. 300M(40CrNi2Si2MoVA)钢制起落架[J]. 海军航空工程学院学报, 2001, 16(2): 224.  
WU Guo-hong. 300M Steel Gear[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2001, 16(2): 224.
- [8] FIGUEROA D, ROBINSON M J. Hydrogen Transport and Embrittlement in 300M and Aermet100 Ultra High Strength Steels[J]. Corrosion Science, 2010, 52(5): 1593—1602.
- [9] FIGUEROA D, ROBINSON M J. The Effects of Sacrificial Coatings on Hydrogen Embrittlement and Re-embrittlement of Ultra High Strength Steels[J]. Corrosion Science, 2008, 50(4): 1066—1079.
- [10] 刘道新,金石. 300M超高强度钢应力腐蚀敏感性及断口的分维特征[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1994, 6(1): 77—81.  
LIU Dao-xin, JIN Shi. Stress Corrosion Cracking Susceptibility and Fractal Characterization of Fractured Surfaces of Ultra-high Strength Steel 300M[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1994, 6(1): 77—81.
- [11] 隆小庆. 飞机的应力腐蚀与防护[J]. 中国民航学院学报, 1995: 13(1): 62—74.  
LONG Xiao-qing. The Stress Corrosion of Airplane and Prevention[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 1995: 13(1): 62—74.
- [12] 周克崧,邓春明,刘敏,等. 300M钢基体上高速火焰喷涂WC-17Co和WC-10Co4Cr涂层的疲劳和抗盐雾腐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 671—676.  
ZHOU Ke-song, DENG Chun-ming, LIU Min, et al. Characterizations of Fatigue and Salt Spray Corrosion Resistance of HVOF Sprayed WC-17Co and WC-10Co4Cr Coatings on the Substrate of 300M Steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(4): 671—676.