

不同镀铬工艺及镀铜预处理对 30CrMnSiA 高强钢疲劳性能的影响

胡忠卿^{1a}, 王帅星^{1a,1b}, 柳鑫^{1a}, 杨由凯², 杜楠^{1a}

(1.南昌航空大学 a.材料科学与工程学院 b.江西省航空材料表面技术工程研究中心, 南昌 330063; 2.中国航发南京轻型航空动力有限公司, 南京 210000)

摘要: **目的** 尝试采用新型微裂纹铬工艺或者引入缓冲层来实现镀铬层抗疲劳性能的改善。**方法** 分别采用标准硬铬、自研微裂纹铬工艺对 30CrMnSiA 高强钢进行处理, 通过旋转弯曲疲劳试验评价了两种镀铬工艺对其疲劳性能的影响。同时, 对比了镀铜预处理的作用, 利用 FESEM 分析了断口形貌。**结果** 相比于硬铬镀层, 自研微裂纹铬镀层表面微裂纹浅而细、数目更多, 密度高达 1020 条/cm, 且裂纹未贯穿镀层, 呈层状分布。在 850 MPa 应力下, 30 μm 厚的硬铬镀层会使 30CrMnSiA 钢的中值疲劳寿命下降 48% 左右, 疲劳断口呈多源区特征。而相同厚度的自研微裂纹铬镀层仅使基体的疲劳寿命下降了 23%, 疲劳试验后镀层上未发现明显裂纹、裂纹呈多向性扩展。**结论** 自研微裂纹铬工艺处理的 30CrMnSiA 钢, 其抗疲劳性能明显好于硬铬处理试样。若在基体/镀铬层之间引入镀铜过渡层, 可有效地减少直达金属基体的裂纹数目, 30CrMnSiA 钢的疲劳性能得到明显改善, 中值疲劳寿命几乎接近于基体。

关键词: 30CrMnSiA 高强钢; 硬铬; 微裂纹铬; 镀铜; 疲劳性能

中图分类号: TG174.441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0184-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.020

Effect of Different Chromium Plating Techniques and Copper Plating Pretreatment on Fatigue Properties of 30CrMnSiA High Strength Steel

HU Zhong-qing^{1a}, WANG Shuai-xing^{1a,1b}, LIU Xin^{1a}, YANG You-kai², DU Nan^{1a}

(1.a.School of Materials Science and Engineering, b.Jiangxi Provincial Engineering Research Center for Surface Technology of Aeronautical Materials, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2.AECC Nanjing Light Aero-engine Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

ABSTRACT: Chromium plating is widely used for surface strengthening of high-strength steel, but it will damage the fatigue

收稿日期: 2020-07-10; 修订日期: 2020-08-17

Received: 2020-07-10; Revised: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51801094)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51801094)

作者简介: 胡忠卿 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电沉积理论及工艺。

Biography: HU Zhong-qing (1996—), Male, Master student, Research focus: electrodeposition theory and technology.

通讯作者: 王帅星 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电沉积理论及工艺、有色金属表面改性。邮箱: wsxxpg@126.com

Corresponding author: WANG Shuai-xing (1985—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: electrodeposition theory and technology, surface modification of non-ferrous metal. E-mail: wsxxpg@126.com

引文格式: 胡忠卿, 王帅星, 柳鑫, 等. 不同镀铬工艺及镀铜预处理对 30CrMnSiA 高强钢疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 184-191.

HU Zhong-qing, WANG Shuai-xing, LIU Xin, et al. Effect of different chromium plating techniques and copper plating pretreatment on fatigue properties of 30CrMnSiA high strength steel[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 184-191.

strength of the matrix. This paper attempted to improve the fatigue resistance of chromium plating by using a new micro-crack chromium technique or introducing buffer layer. 30CrMnSiA high-strength steel was treated with standard hard chromium and self-developed micro-crack chromium techniques respectively. The effects of two chromium plating technique on fatigue properties of 30CrMnSiA high-strength steel were evaluated by rotary bending fatigue test. Meanwhile, the effect of copper plating pretreatment was compared, and the fracture morphology was analyzed by FESEM. The results showed that compared with the hard chromium coating, the surface micro-cracks of self-developed micro-crack chromium plating were shallow and fine, and had more numbers, with the density of micro-cracks was up to 1020 lines/cm, and the cracks did not penetrate the plating and were distributed in layers. Under the stress of 850 MPa, hard chromium plating of 30 μm would reduce the median fatigue life of 30CrMnSiA high-strength steel by about 48%, and the fatigue fracture is characterized by multi-sources. However, the self-developed micro-crack chromium plating with the same thickness only reduced the fatigue life of the substrate by 23%. After the fatigue test, no obvious cracks were found on the micro-cracked Cr-plating, and the cracks propagated in multi-direction. The fatigue resistance of 30CrMnSiA treated by self-developed micro-crack chromium technique was significantly better than that of hard chromium plating. In addition, if the copper-plated transition layer was introduced between the substrate/chromium plating, the number of cracks reaching the substrate could be effectively reduced, the fatigue performance of 30CrMnSiA high-strength steel was obviously improved, and the median fatigue life was almost close to the matrix.

KEY WORDS: 30CrMnSiA high-strength steel; hard chromium plating; micro-crack chromium plating; copper plating; fatigue performance

电镀铬是钢铁零件常见的表面强化技术,在电镀工业中占有极其重要的地位。通常,齿轮、传动轴、活塞杆等零件会采用镀铬来提高表面耐磨性^[1-2]。然而,电镀硬铬后表面往往会形成贯穿镀层的微裂纹,且零件表面一般呈拉应力,在交变载荷作用下表面裂纹扩展很快,且镀铬会导致单源区疲劳断口变成多源区断口,造成基体疲劳强度大幅降低^[3-4]。

研究表明,钢的疲劳强度会随镀铬层厚度的增加而降低^[3-6]。40~50 μm 厚的镀铬层会导致 30CrMnSiA 钢的中值疲劳寿命下降 44%~55%, 60~80 μm 厚的铬镀层会使 300M 钢的疲劳极限下降约 50%~60%^[5-7]。因此,通过适当的预处理或后处理消除镀铬对基体疲劳强度的不利影响,对零件的安全、长效服役尤为重要。

目前,喷丸预处理是提高高强钢疲劳强度、消除镀铬层不利影响的主要手段^[8-10]。有研究表明,镀铬前采用 3 个大气压喷丸的试样的疲劳寿命,比不喷丸的镀铬试样的疲劳寿命提高 38~60 倍^[8-9]。但喷丸有时会导致表面粗糙度增大,对疲劳强度带来损失。此外,镀后抛光处理、合金化也是常用的改善手段之一^[11-12],但也有研究认为其对基体材料的疲劳性能影响不大。也就是说,现有的镀前喷丸处理或镀后抛光处理虽可在一定程度改善镀铬造成的不利影响,但此工序复杂、效果也不甚理想。因此,针对镀铬层,研究新的、简便的疲劳性能改善手段十分必要。

有研究认为,相比于标准硬铬镀层,微裂纹铬镀层的表面裂纹浅而细,并未贯穿整个镀层^[13],此种镀层结构理论上有助于分散应力、减轻疲劳损伤^[14]。基于以上分析,拟通过开发新型微裂纹铬电镀工艺、调整镀铬层裂纹分布来实现镀铬层抗疲劳性能的改善。

此外,鉴于部分研究通过柔性和/或软夹层提高了铝合金构件疲劳寿命^[15],考虑通过简便的电镀方法在基体/镀铬层之间引入软质金属(铜、镍)过渡层形成基体-缓冲层-镀铬层的多层结构,通过镀铜缓冲层阻碍铬镀层裂纹向基体的扩展,延缓裂纹扩展速率。

基于此,本文主要借助三维视频显微镜、FESEM 等评价了标准硬铬、自研微裂纹铬两种镀层的微观结构,通过旋转弯曲疲劳试验评价了两种镀铬工艺及镀铜预处理对 30CrMnSiA 疲劳性能的影响,研究结果可为高强钢零件电镀铬工艺体系设计提供参考依据。

1 试验

1.1 材料

试验材料为 30CrMnSiA 高强钢,其抗拉强度约为 1320 MPa,主要成分(以质量分数计)为:Cr 0.8%~1.1%, Mn 0.8%~1.1%, Si 0.9%~1.2%, C 0.27%~0.34%, Fe 余量。旋转弯曲疲劳试样按照 GB/T 4337—2015 中圆柱形光滑试样进行加工,具体尺寸见图 1。

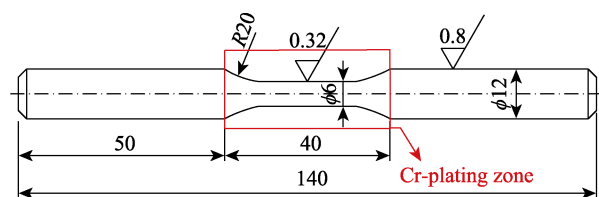


图 1 30CrMnSiA 高强钢旋转弯曲疲劳试样尺寸
Fig.1 The size for rotating bending fatigue sample of 30CrMnSiA high-strength steel

1.2 样品制备

30CrMnSiA 高强钢试样电镀铬工艺流程为：打磨→除油→活化→HEDP 镀铜（需要时）→镀铬→干燥，每道工序之间均用去离子水清洗。

除油液组成为：60~80 g/L NaOH, 35~55 g/L Na_3PO_4 , 30~50 g/L Na_2CO_3 , 10~20 g/L Na_2SiO_3 , 去离子水。除油温度为 60~70 °C, 除尽为止。活化采用 10%（体积分数）的硫酸浸泡 30~60 s。HEDP 镀铜配方为：碱式碳酸铜 15 g/L, 羟基乙叉二膦酸（HEDP, 60%水溶液）110~120 ml/L, K_2CO_3 35~45 g/L, 双氧水（30%水溶液）2 mL/L, 润湿剂 0.4~0.8 g/L。HEDP 镀铜工艺参数为：pH=9.0~10.0, 温度 55 °C, 电流密度 1~1.5 A/dm²。标准镀铬与自研微裂纹铬配方及工艺参数如表 1 所示。其中，ND-331 为一种有机磺酸

表 1 标准硬铬及自研微裂纹镀铬配方及工艺参数

Tab.1 Solution formulation and process parameters of standard hard chrome and self-developed micro-crack chrome plating

Formula and parameters	Hard chrome plating	Self-developed micro-crack chrome plating
$\text{CrO}_3/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	250	220
$\text{H}_2\text{SO}_4/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	2.5	3
Additive (ND-331)/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	—	3~4
Current density/($\text{A} \cdot \text{dm}^{-2}$)	40~50	40~50
Temperature/°C	55~60	55~60

类催化剂，在六价铬镀铬中有机磺酸会与 H_2CrO_4 反应生成与有机磺酸铬酐，从而促进铬的电沉积；且有机磺酸铬酐分子中的饱和烃基是斥电子基团、稳定性更高，有助于提高镀铬的电流效率^[13,16]。

镀层制备后，采用 KH-7700 三维视频显微镜和 Nova Nano SEM 450 场发射扫描电镜观察其表面、截面微观形貌，分析镀层微裂纹密度、长度及宽度。其中，微裂纹密度（裂纹数/cm）主要依据镀层显微照片中的裂纹总数和放大倍率来计算。

1.3 旋转弯曲疲劳试验

按 GB/T 4337—2015，采用四点加力方式进行旋转弯曲疲劳测试。试验设备为 PQ-6 型弯曲疲劳试验机，试验频率为 50 Hz，试验温度为室温，环境为空气。鉴于 30CrMnSiA 高强钢的抗拉强度约为 1320 MPa，选择 65% σ_b （约 850 MPa）作为指定载荷对比评价不同镀铬工艺及镀铬预处理对疲劳性能的影响。为了保证数据可靠性，每种工艺处理的试样数量不少于 4 根，相应的结果见表 2。试验后，借助场发射扫描电子显微镜（Nova Nano SEM 450）来观察断口形貌以及裂纹源。

2 结果与讨论

2.1 镀层微观形貌及结构分析

图 2a、图 2b 分别给出了标准硬铬、自研微裂纹

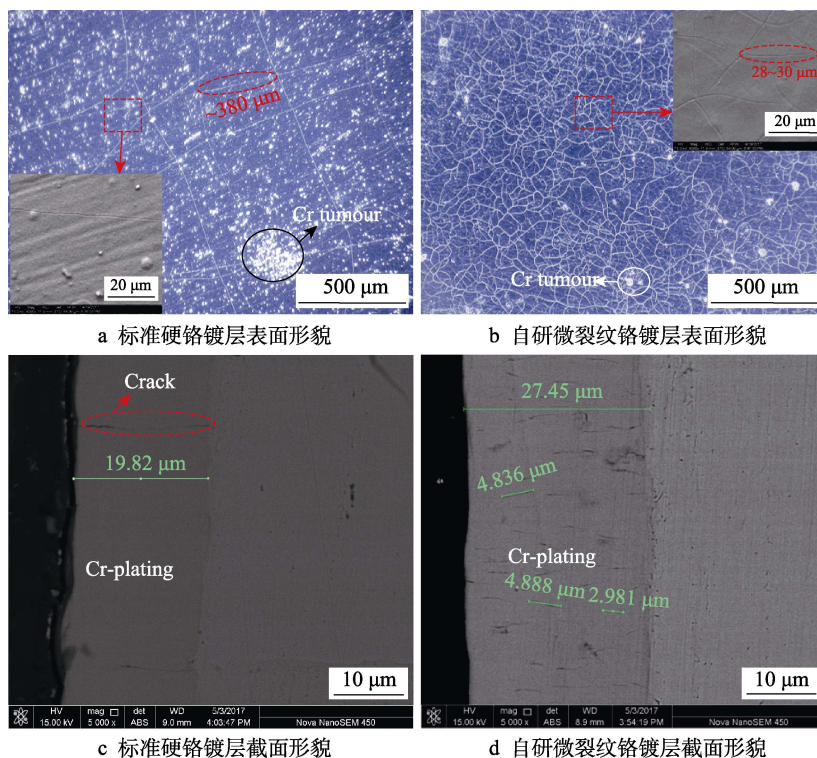


图 2 不同镀铬层的表面及截面微观形貌

Fig.2 The surface (a, b) and the cross-sectional morphology (c, d) of different chrome plating layers: (a, c) hard Cr- plating; (b, d) microcracked Cr-plating

铬镀层的表面 OM 像。可知，标准硬铬镀层表面裂纹细而长、密度较小、分布也不均匀，局部还有大块的铬瘤；其微裂纹长度约为 383 μm，宽度为 0.592 μm。采用自研裂纹镀铬工艺所得镀层表面微裂纹密集、分布均匀，微裂纹密度高达 1020 条/cm，长度约为 28~30 μm、宽度在 0.33 μm 上下浮动，且与标准硬铬层相比铬瘤明显更小，仅部分零星分布在镀层表面。

图 2c、图 2d 给出了两种镀铬层的截面 SEM 像。可知，标准镀铬工艺得到的裂纹贯穿整个镀层直到基体，裂纹深而宽，见图 2c。而自研微裂纹铬镀层，裂纹浅而细、未贯穿镀层，裂纹呈层状分布。分析认为，在硬铬电镀中总伴随析氢，沉积初期铬层中会生成面心立方（fcc）或密排六方（hcp）的 CrH。但（fcc）或（hcp）的 CrH 不稳定，随着晶粒的长大，会自发地转变为体心立方晶格（bcc），此会使铬层体积缩小约 15%。同时，不稳定的 CrH 分解产生氢气，也会使体积减小。随着反应的持续进行，铬层变形、晶格扭曲，加之镀层中的内应力不断增大，最终导致铬层开裂，形成垂直并贯通到金属表面的网状微裂纹^[12,17-18]。对于微裂纹铬镀层，微裂纹的形成也与 CrH 的晶格转变有关。但由于有机磺酸催化剂的存在，镀铬电流效率提高，析氢减少，且当镀层产生微裂纹、应力得

到释放之后，会继续形成无应力镀层并将微裂纹覆盖呈现出浅浅的“伪”裂纹。此过程交替进行，从而形成近乎一层一层的微裂纹^[13]。

此外，本文还测试了两种镀铬层的显微硬度，结果表明自研微裂纹铬镀层的硬度更高，约为 989HV_{0.2}，而标准硬铬层的硬度仅为 808HV_{0.2}。

2.2 不同工艺处理的 30CrMnSiA 的中值疲劳寿命

为评价不同镀铬工艺及镀铜预处理对 30CrMnSiA 疲劳性能的影响，通过旋转弯曲疲劳试验测定了不同表面处理在指定载荷 850 MPa 下的中值疲劳寿命，结果见表 2、图 3。对表 2、图 3 中的数据进行对比分析可知：相比于 30CrMnSiA 基体（A 组），30 μm 厚的硬铬镀层（B 组）使得基体的中值疲劳寿命下降了 48%左右；当采用自研微裂纹铬工艺后（C 组），相同厚度的镀层仅使 30CrMnSiA 基体的中值疲劳寿命下降了 23%，其抗疲劳性能明显好于硬铬镀层。

此外，试验结果表明无论硬铬还是微裂纹铬镀层，当在 30CrMnSiA 基体/镀铬层之间引入镀铜过渡层后，其抗疲劳性能均明显得到改善。相比于 B 组和 C 组样品，E 组和 D 组试样的中值疲劳寿命均大幅提高，几乎接近于 30CrMnSiA 基体（A 组）。

表 2 不同表面处理的 30CrMnSiA 高强钢在 850 MPa 下的疲劳寿命
Tab.2 Fatigue life of 30CrMnSiA high-strength steel with different surface treatments at 850 MPa

Sample number	Surface treatment process	Cycle times (<i>N</i>)	log <i>N</i>	log <i>N</i> ₅₀	Median fatigue life (<i>N</i> ₅₀)
A	30CrMnSiA steel	104 093	5.0174	5.1105	128 973
		102 885	5.0123		
		153 537	5.1862		
		168 271	5.2260		
B	Hard Cr-plating (~30 μm)	64 971	4.5978	4.8191	65 932
		39 614	4.8127		
		80 247	4.9044		
		91 540	4.9616		
C	Microcracked Cr-plating(~30 μm)	91 226	4.9601	4.9939	98 605
		69 576	4.8424		
		119 276	5.0765		
		124 920	5.0966		
D	Cu-plating(~15 μm) + microcracked Cr-plating (~30 μm)	133 797	5.1264	5.0829	121 031
		105 758	5.0243		
		83 702	4.9227		
		181 366	5.2585		
E	Cu-plating(~15 μm) + hard Cr-plating (~30 μm)	109 163	5.0381	5.0496	112 098
		70 524	4.8483		
		139 012	5.1431		
		147 650	5.1692		

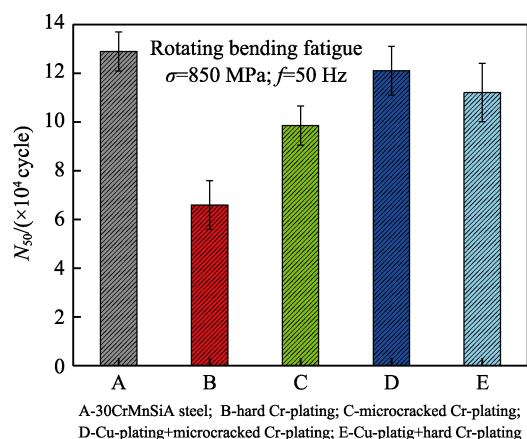


图3 不同表面处理的30CrMnSiA在850 MPa下的中值疲劳寿命

Fig.3 The median fatigue life of 30CrMnSiA with different surface treatments at 850 MPa

2.3 不同工艺处理的30CrMnSiA的疲劳断口形貌

疲劳断口分析有助于研究材料/构件的裂纹萌生及断裂行为^[3-6,19-20]。一般来说,典型的疲劳断口可划分为三个区域,即疲劳裂纹源、裂纹扩展区和瞬时断裂区。疲劳源往往在材料/构件的表面产生,常常与缺口、裂纹等缺陷相连。而在裂纹扩展区,材料一般处于平面应变状态,断面较为平滑且分布有贝纹线,表示裂纹前沿在间歇扩展中的逐次位置。瞬断区是裂纹最后失稳快速扩展时所形成的断口区域,其表面较粗糙,脆性材料的断口截面多为结晶状断口,而韧性材料断口多呈放射状或人字纹断口。

从A、B、C、D四组试样中分别选取一根试样断口在SEM下观察断口形貌,具体见图4—5。从图4a

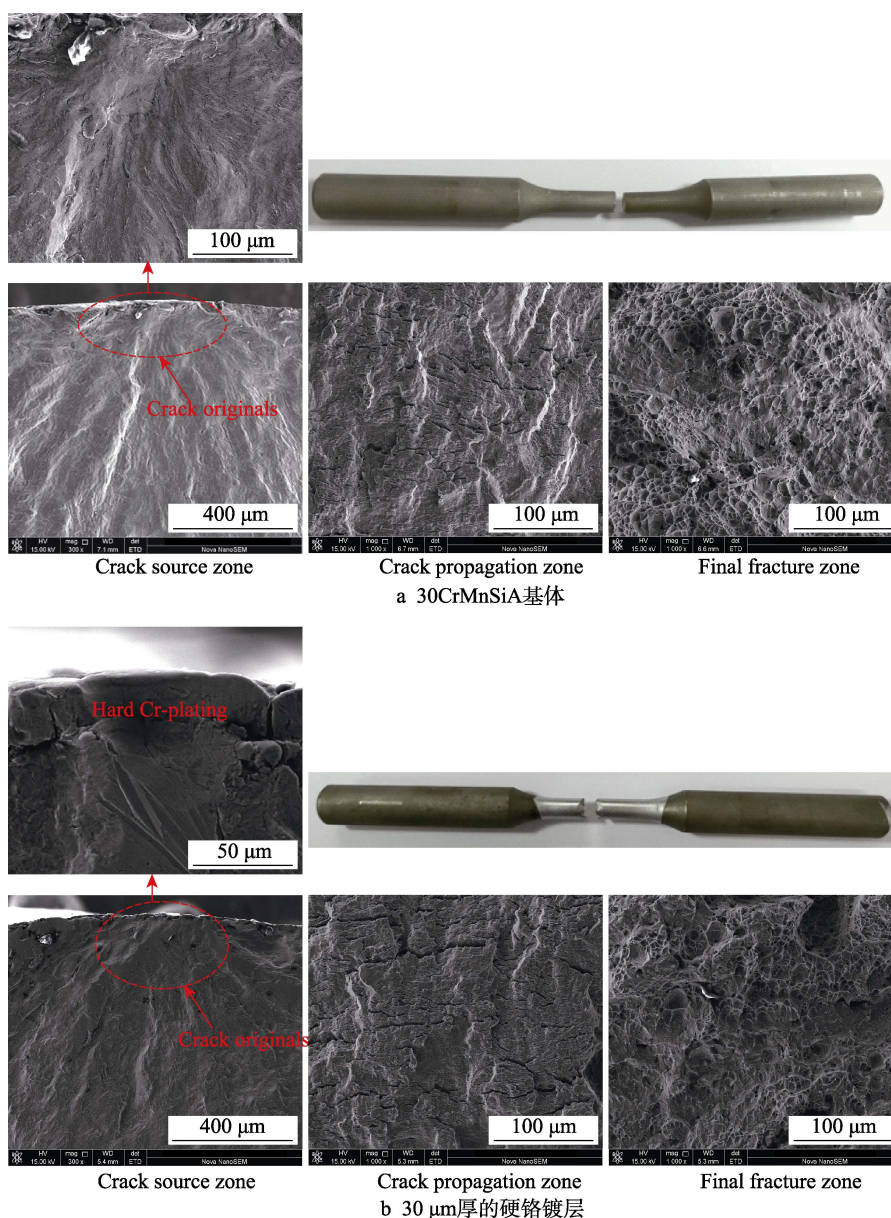


图4 A、B试样的疲劳断口形貌

Fig.4 Fatigue fracture morphology of A sample and B sample: (a) 30CrMnSiA substrate; (b) hard Cr-plated (~30 μm) sample

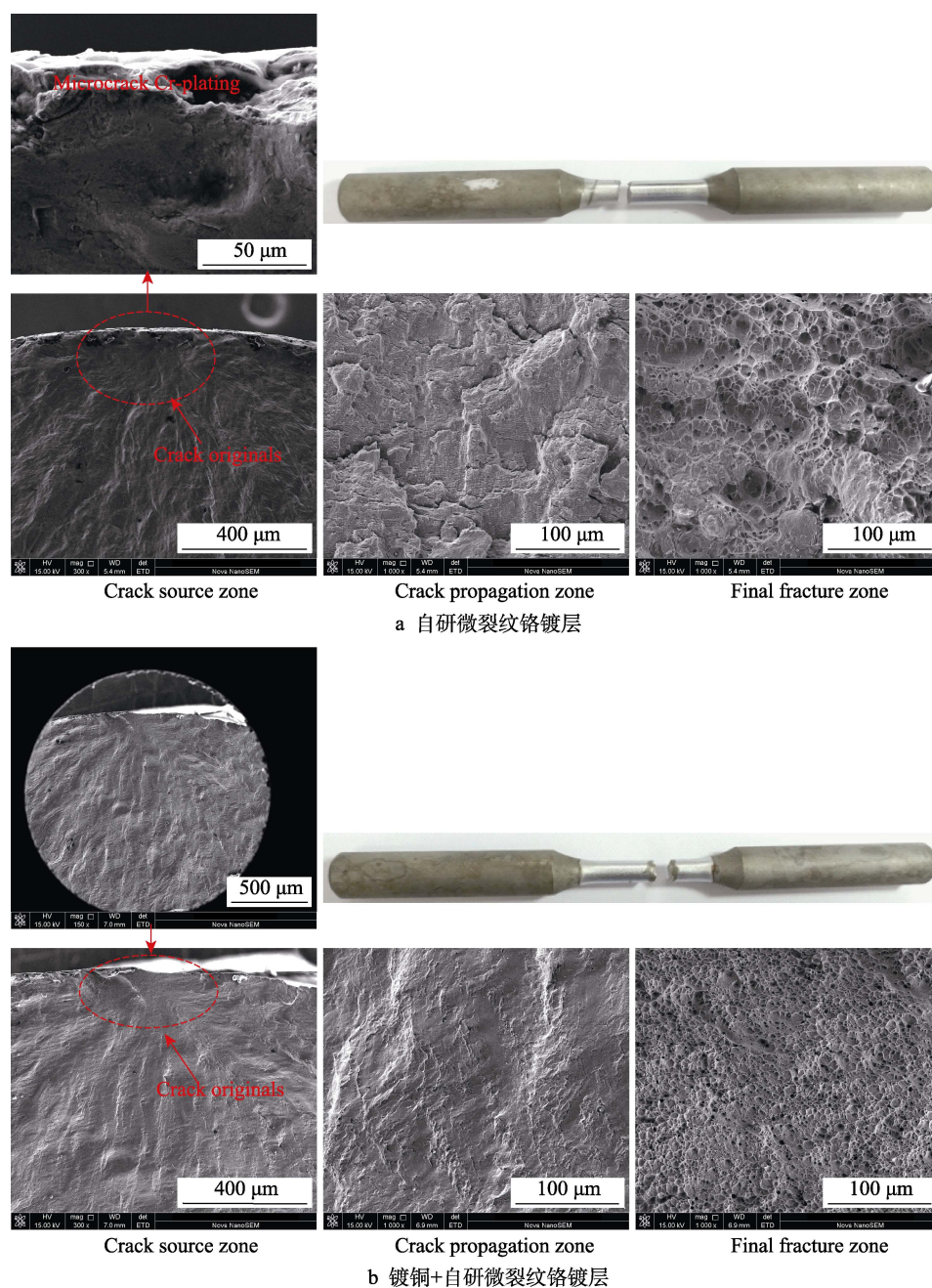


图 5 C、D 试样的疲劳断口形貌

Fig.5 Fatigue fracture morphology of C sample and D sample: (a) microcracked Cr-plated ($\sim 30 \mu\text{m}$) sample; (b) Cu-plated ($\sim 15 \mu\text{m}$) + microcracked Cr-plated ($\sim 30 \mu\text{m}$) sample

可以看出, 未经电镀的 30CrMnSiA 试样 (A 组) 断口呈单源疲劳断裂特征, 断口微观均呈韧性断裂特征。经电镀硬铬后, B 组试样 (图 4b) 的断口呈多源疲劳特征, 并可见明显的放射状棱线起源于镀层 (或镀层与基体的界面处), 裂纹起源后穿过镀层与基体的界面扩展到 30CrMnSiA 钢基体上。微观断口处除了韧窝外, 局部伴有少量脆性疲劳条带, 且镀层上可见明显的微裂纹, 且裂纹走向与断口吻合。电镀微裂纹铬试样 (C 组) 的疲劳源、疲劳断口基本特征与电镀硬铬试样 (B 组) 相似, 但对比仍可发现, 相比于镀硬铬试样, 微裂纹铬试样疲劳试验后镀层上未发现明显大裂纹, 且裂纹扩展区呈多向性扩展。这种现象

也是对两种镀层抗疲劳性能差异的一种合理解释。当在 30CrMnSiA 基体/镀铬层之间引入镀铜过渡层后, D 组试样 (图 5b) 的疲劳纹明显从表层的多方向向心部延伸, 缩短了断裂传播时间, 且其瞬断区的韧窝状端口更为细小、也未见脆性条带, 表明其断裂行为较为缓慢。这也是镀铜层提高镀铬层抗疲劳性能的原因之一。

2.4 分析与讨论

众所周知, 疲劳是一个非常复杂的过程, 影响材料疲劳性能的因素很多, 包括钢的化学成分、冶金质量、表面处理状态等。其中, 表面状态是控制材料疲劳寿命的关键性因素之一。

对于硬铬镀层导致高强钢(30CrMnSiA、300M)疲劳强度下降的原因,众多学者进行了深入研究^[3-7,21]。一般认为电镀硬铬工艺使得30CrMnSiA试样平滑的表面变成了多裂纹的铬晶体表面,在交变应力的作用下,垂直于基体表面的镀铬层裂纹将会深入金属试样的内部成为造成疲劳断裂的微裂纹源,在较低交变载荷作用下微裂纹源就会发生进一步的疲劳扩展^[3,5]。由于镀铬层与高强钢基体的结合力较强,镀铬层裂纹相当于基体上之前存在的裂纹^[21],且由于硬铬镀层的裂纹可能深入到基体(见图2c),也导致了应力集中作用。因此,电镀硬铬降低了30CrMnSiA的疲劳断裂应力,使其疲劳强度大幅降低,30 μm厚的镀层即可使得30CrMnSiA的中值疲劳寿命下降48%左右。

电镀微裂纹铬(C组)试样的疲劳性能会比电镀硬铬(B组)效果好主要与其镀层结构有关。由于电镀微裂纹铬镀层表面存在大量微小的裂纹(见图2b),这些裂纹会在进行疲劳性能测试时造成应力分散^[14]。此外,微裂纹铬镀层中的裂纹是相互交错、逐层分布的,这些裂纹会在载荷加载时可以分担部分载荷,从而避免应力集中^[14,20],同时相比于硬铬镀层中的贯穿裂纹,分层的裂纹会减缓裂纹的扩展速率。上述因素的综合作用,使得电镀微裂纹铬的疲劳性能优于电镀硬铬。从图3可知,30 μm厚的微裂纹铬镀层的中值疲劳寿命大约是相同厚度硬铬镀层试样的1.5倍。

无论硬铬,还是微裂纹铬镀层,当引入镀铜过渡层后,其抗疲劳性能均得到明显改善。这种情况的合理解释是:镀铜层的延展性较好,在疲劳应力的作用下,基体表面的镀铬层裂纹虽有向下生长的趋势,但镀铜层可以有效地阻止裂纹的扩展和深入,此可从文献[15,22]的研究得到证实。文献[15,22]中提及引入柔性过渡层可以降低层间裂纹驱动力,或者施加化学镀镍层可以阻止或延迟微裂纹从硬铬外层的扩散。因此,电镀铜后再镀铬的疲劳性能优于直接电镀铬,E组试样(铜+硬铬)的中值疲劳寿命大约是B组试样(硬铬)的1.70倍,D组试样(铜+微裂纹铬)的中值疲劳寿命大约是C组试样(微裂纹铬)的1.23倍。

3 结论

1) 标准硬铬镀层表面裂纹密度较小、分布也不均匀,且裂纹贯穿整个镀层。而自研裂纹铬镀层表面微裂纹浅而细、数目更多,密度高达1020条/cm,且裂纹未贯穿镀层,呈层状分布。

2) 相比于30CrMnSiA基体,30 μm厚的硬铬镀层使得基体的中值疲劳寿命下降了48%左右;当采用自研微裂纹铬工艺后,相同厚度的镀层仅使基体的中值疲劳寿命下降了23%,其抗疲劳性能明显好于硬铬镀层。无论硬铬还是微裂纹铬镀层,当在基体/镀铬层之间引入镀铜过渡层后,30CrMnSiA高强钢的疲劳

性能明显得到改善,中值疲劳寿命几乎接近于基体。

3) 电镀硬铬后,30CrMnSiA试样呈多源区断口,且试验后镀层上可见明显的微裂纹,裂纹走向与断口吻合,从而造成基体疲劳强度的大幅降低。相比于镀硬铬试样,微裂纹铬试样疲劳试验后镀层上未发现明显大裂纹,且裂纹扩展区呈多向性扩展,使得其抗疲劳性能优于镀硬铬试样。若先镀铜后再镀铬处理,镀铜层有效地减少了直达金属基体的裂纹数目,从而大大降低了裂纹形成的可能性,提升了30CrMnSiA钢的疲劳性能。

参考文献:

- [1] KIR H, APAY S. Effect of hard chrome plating parameters on the wear resistance of low carbon steel[J]. Materials testing, 2019, 61(11): 1082-1086.
- [2] CHOI Y, KIM M, KWON S C. Characterization of chrome layer formed by pulse plating[J]. Surface & coatings technology, 2003, 169: 81-84.
- [3] NGUYEN V P, DANG T N, LE C C. Effect of residual stress and microcracks in chrome plating layer to fatigue strength of axle-shaped machine parts[J]. Applied mechanics & materials, 2019, 889: 10-16.
- [4] 邵绪分, 胡成江, 骆豫蜀, 等. 电镀铬对300M钢疲劳性能影响研究[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(4): 213-216.
SHAO Xu-fen, HU Cheng-jiang, LUO Yu-shu, et al. Influence of chromium electroplating on fatigue performance of 300M steel[J]. Failure analysis and prevention, 2012, 7(4): 213-216.
- [5] 胡小华, 张斌, 马林, 等. 镀铬层厚度对30CrMnSiA钢疲劳性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2009, 31(6): 41-43.
HU Xiao-hua, ZHANG Bin, MA Lin, et al. Effect of chromium plating thickness on fatigue property of 30CrMnSiA steel [J]. Plating and finishing, 2009, 31(6): 41-43.
- [6] 耿长建, 邢丕臣, 牛春兴, 等. 镀铬对8Cr4Mo4V钢疲劳行为的影响[J]. 航空发动机, 2017, 43(6): 64-68.
GENG Chang-jian, XING Pi-chen, NIU Chun-xing, et al. Influence of chroming on fatigue behavior of 8Cr4Mo4V steel[J]. Aeroengine, 2017, 43(6): 64-68.
- [7] 赵连红, 刘成臣, 金涛, 等. 实验室加速腐蚀环境下35Cr2Ni4MoA材料镀硬铬表面腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(8): 78-82.
ZHAO Lian-hong, LIU Cheng-chen, JIN Tao, et al. Corrosion behavior of 35Cr2Ni4MoA hard chrome plating surface in accelerated corrosion environment in laboratory[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(8): 78-82.
- [8] VOORWALD H J C, SILVA M P, COSTA M Y P, et al. Improvement in the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel by shot peening[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2010, 32(2): 97-104.
- [9] 刘长生. 30CrMnSiNi2A钢镀铬前后喷丸对疲劳强度的影响[J]. 航空工艺技术, 1982(1): 11-13.
LIU Chang-sheng. Effect of shot peening before and after

- chrome plating on fatigue strength of 30CrMnSiNi2A steel[J]. Aviation technology, 1982(1): 11-13.
- [10] 包俊成, 赵捷, 王志奇, 等. 表面强化对 30CrMnSiA 钢疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2010, 34(6): 71-73. BAO Jun-cheng, ZHAO Jie, WANG Zhi-qi, et al. Influence of surface strengthening on fatigue property of 30CrMnSiA steel [J]. Materials for mechanical engineering, 2010, 34(6): 71-73.
- [11] 姜伟, 戚佳睿, 孙海霞. 30CrMnSi 镀铬后激光表面合金化[J]. 表面技术, 2008, 37(4): 29-30. JIANG Wei, QI Jia-rui, SUN Hai-xia. Laser surface alloying on 30CrMnSi electroplated with Cr[J]. Surface technology, 2008, 37(4): 29-30.
- [12] STEPURENKO V T, BARANOVSKII V I, MANAENKO V P. Effect of electrolytic chromium plating quality on fatigue strength of steel[J]. Soviet materials science, 1974, 8(4): 398-401.
- [13] 王力强, 杨由凯, 赵晴, 等. 一种新型微裂纹镀铬工艺及镀层性能研究[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(1): 17-21. WANG Li-qian, YANG You-kai, ZHAO Qing, et al. Study on a new type of micro-crack chrome plating process and the coating performance[J]. Plating and finishing, 2018, 40(1): 17-21.
- [14] HIRATSUKA K, KOBAYASHI Y, SASAKI T, et al. Effect of microcracks and residual stress of Cr plating layer on fatigue strength[J]. Jitsumu hyomen gijutsu, 2004, 55: 91-92.
- [15] KOLEDNIK O, ZECHNER J, PREDAN J. Improvement of fatigue life by compliant and soft interlayers[J]. Scripta materialia, 2016, 113: 1-5.
- [16] 吴双成, 储荣邦. 六价铬镀铬添加剂作用机理[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(2): 26-32. WU Shuang-cheng, CHU Rong-bang. Mechanism of additives for hexavalent chromium plating[J]. Plating and finishing, 2020, 40(2): 26-32.
- [17] JONES A R. Hard chromium: microcrack formation and sliding wear[J]. Transactions of the IMF 1992, 70(1): 8-13.
- [18] MARTYAK N M, MCCASKIE J E, VOOS B, et al. Microcracks in chromium electrodeposits[J]. Journal of materials science, 1997, 32(22): 6069-6073.
- [19] BHATTACHARYA B, ELLINGWOOD B. Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation[J]. International journal of fatigue, 1998, 20 (9): 631-639.
- [20] 李占明, 朱有利, 黄元林, 等. 喷丸强化后 30CrMnSiNi2A 钢表面完整性对其抗疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 85-89. LI Zhan-ming, ZHU You-li, HUANG Yuan-lin, et al. Influence of surface integrity on fatigue resistance of the 30CrMnSiNi2A steel after shot peening [J]. China surface engineering, 2012, 25(5): 85-89.
- [21] AYDN Z, ALD G, IMENOLU H. An investigation on the mechanical properties of the hard chromium layer deposited by brush plating process on AISI H13 steel[J]. Archives of materials science & engineering, 2014, 65(2): 87-92.
- [22] VOORWALD H J C, PADILHA R, COSTA M Y P. Effect of electroless nickel interlayer on the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel[J]. International journal of fatigue, 2007, 29(4): 695-704.
- (上接第 159 页)
- [21] HIRATSUKA K, ABE Y, KAWASHIMA S. Effect of in-situ electroless plating on friction and wear of metals[J]. Wear, 2003, 255(7-12): 910-916.
- [22] 张新杰, 崔洪芝, 毕文彪, 等. 磨损条件对等离子熔覆 TiB₂-TiC/Ni 复合涂层磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 148-158. ZHANG Xin-jie, CUI Hong-zhi, BI Wen-biao, et al. Effects of wear conditions on tribological properties of TiB₂-TiC/Ni composite coating by plasma cladding[J]. China surface engineering, 2018, 31(2): 148-158.
- [23] 张国涛, 尹延国, 刘振明, 等. 复层铁基粉末冶金材料的摩擦学性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(1): 7-13. ZHANG Guo-tao, YIN Yan-guo, LIU Zhen-ming, et al. Tribological properties of multi-layer iron based powder metallurgy materials[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(1): 7-13.
- [24] CHENG J, LI F, ZHU S Y, et al. High temperature tribological properties of a nickel-alloy-based solidlubricating composite: Effect of surface tribo-chemistry, counterpart and mechanical properties[J]. Wear, 2017, 386-387: 39-48.
- [25] WANG J Y, SHAN Y, GUO H J, et al. Friction and wear characteristics of hot-pressed NiCr-Mo/MoO₃/Ag self-lubrication composites at elevated temperatures up to 900 °C [J]. Tribology letters, 2015, 59(3): 48.
- [26] 俞友军, 周健松, 陈建敏, 等. 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂ 金属基高温自润滑耐磨覆层的组织结构及摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 64-73. YU You-jun, ZHOU Jian-song, CHEN Jian-min, et al. Microstructure and tribological behavior of laser cladding NiCr/Cr₃C₂-Ag-BaF₂/CaF₂ self-lubrication wear-resistant metal matrix composite coating[J]. China surface engineering, 2010, 23(3): 64-73.
- [27] HE D Q, PU J B, WANG L P, et al. Investigation of post-deposition annealing effects on microstructure, mechanical and tribological properties of WC/a-C nanocomposite coatings[J]. Tribology letters, 2016, 63(2): 14-28.
- [28] 范祥娟, 李文生, 杨军, 等. 载荷对 Ni₃Al 基自润滑复合涂层摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(4): 418-425. FAN Xiang-juan, LI Wen-sheng, YANG Jun, et al. Effect of loads on tribological behaviors of Ni₃Al matrix self-lubricating composite coating[J]. Tribology, 2019, 39(4): 418-425.
- [29] 甄金明. 镍基宽温域自润滑复合材料的制备及摩擦学性能研究[D]. 兰州: 中国科学院兰州化学物理研究所, 2017. ZHENG Jin-ming. Fabrication and tribological performance of nickel-alloy matrix wide temperature self-lubricating composite[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.