

表面失效及防护

涂层厚度对再制造零件失效形式的影响

温飞娟^{1,2}, 董丽虹², 王海斗², 吕振林¹, 底月兰²

(1.西安理工大学, 西安 710048; 2.装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要: **目的** 研究不同厚度涂层的再制造零件在弯曲疲劳情况下的失效形式。**方法** 利用电弧喷涂对零件进行再制造处理, 并进行四点弯曲疲劳实验, 利用扫描电镜对不同厚度涂层的再制造零件断口形貌进行观察, 研究不同厚度涂层的疲劳裂纹萌生、扩展以及断裂方式。**结果** 疲劳裂纹萌生形式主要为多源疲劳失效, 在疲劳裂纹的扩展过程中, 不同平面内扩展的裂纹相交, 形成了台阶形貌。当涂层厚度为 100、200 μm 时, 裂纹主要萌生于四点弯曲实验中应力最集中的部位, 萌生于涂层和基体之间, 并逐渐地向涂层和基体扩展, 直至试样断裂。而涂层厚度为 300、400 μm 时, 裂纹萌生部位主要集中于四点弯曲疲劳试验中应力最大部位的两侧, 并呈对称式分布, 裂纹在界面处连接, 使得涂层和基体产生分层现象, 之后分层部位处裂纹沿着基体方向扩展, 直至试样断裂。**结论** 涂层厚度不同, 整个系统的失效模式也不同。对于较薄的涂层, 裂纹模式主要为垂直于涂层-基体界面的裂纹, 此时拉伸失效占主导。对于较厚的涂层, 界面裂纹为主要的裂纹模式, 此时剪切失效占主导。

关键词: 再制造; 曲轴; 涂层厚度; 裂纹扩展

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0176-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.029

Influence of Coating Thickness on Failure Form of Remanufactured Parts

WEN Fei-juan^{1,2}, DONG Li-hong², WANG Hai-dou², LYU Zhen-lin¹, DI Yue-lan²

(1.Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: The work aims to study different failure forms of remanufactured parts with different thickness of coatings in four-point bending fatigue test. The parts were remanufactured by performing arc spraying and then four-point bending test was performed. Fracture morphology of the remanufactured parts with different thickness of coatings was observed with scanning electron microscope, and initiation, growth and fracture mode of fatigue cracks on different thickness of coatings were studied. Initiation form of the fatigue cracks was found to be mainly multi-source failure fatigue. In the growth process of fatigue cracks, fatigue cracks growing in different planes intersected and formed shape of steps. When coating thickness was 100 μm and 200 μm , crack initiation mainly occurred between the coating and substrate in position bearing the most concentrated stress in the four-point bending test. And the cracks gradually expanded to the coating and substrate until the sample fractured. When coating thickness was 300 μm and 400 μm , crack initiation mainly occurred on both sides of the position bearing the maximum stress in the four-point bending test. The cracks spread symmetrically, connected on interface and led to layering of the coating and sub-

收稿日期: 2017-10-28; 修订日期: 2017-11-30

Received: 2017-10-28; **Revised:** 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51535011); 国家自然科学基金面上项目 (51675532)

Fund: Supported by the National Natural Science Fund Key Projects (51535011) and the National Natural Science Foundation Key Projects (51675532)

作者简介: 温飞娟 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为再制造裂纹扩展。

Biography: WEN Fei-juan (1993—), Female, Master, Research focus: crack propagation of remanufactured.

通讯作者: 王海斗 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为再制造表面工程。

Corresponding author: WANG Hai-dou (1969—), Male, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: remanufacturing engineering.

strate. Later cracks in layered positions grew along the direction of substrate until the sample fractured. Failure mode of the whole system varies with coating thickness. For thin coatings, crack mode is mainly cracks perpendicular to coating-substrate interface, and tension failure dominates. For thick coatings, crack mode is mainly interface crack, and shear failure dominates.

KEY WORDS: remanufacturing; crankshaft; coating thickness; crack growth

在我国,对废旧零部件实施再制造是解决资源匮乏、实现可持续发展的最优途径之一。再制造是制造的延续,它以制造业产生的工业废弃物为坯料,通过表面喷涂等增材再制造关键技术,形成强化涂覆层,恢复废旧件的损耗尺寸,并提升耐磨、耐蚀及耐高温等性能,形成再制造产品^[1,2]。曲轴作为发动机的重要组成原件,由于其结构复杂、价格昂贵和附加值高,是再制造工程技术领域的首选应用对象^[3,4]。目前,曲轴的主要失效形式为弯曲疲劳失效。

涂层的破坏形式包括涂层表面裂纹的产生和涂层分层,同时不同涂层厚度试样的失效形式也存在相应差异,因而研究涂层厚度对裂纹扩展行为对优化涂覆层制备工艺、指导涂覆层设计具有重要意义^[5-8]。

为了得出涂层厚度与裂纹扩展之间的关系,国内外学者进行了相关研究。H. Deng 等^[9]对沉积在 X45CrSi9-3 基体上的钨铬钴合金涂层进行了研究,其研究表明,当该合金涂层的厚度从 2.5 mm 减小到 1 mm 时,维氏硬度下降了约 6%,抗弯强度下降了近 10%。接下来 H. Deng 对其进行了三点弯曲试验,并在这些试样中均观察到界面裂纹和涂层中的垂直裂纹。X. N. Li 等^[10]发现,对于厚度较小的陶瓷涂层,导致涂层失效的裂纹模式主要是与界面相垂直的多重横向裂纹;而当涂层厚度较大时,热喷涂体系中涂层和基体间的界面裂纹为主要的裂纹模式。赵志平等^[11,12]对不同厚度的 Ni60A 涂层热喷涂件的拉压疲劳性能进行了研究对比,当涂层厚度为 0.25 mm 时,涂层基体中没有裂纹扩展;当涂层厚度为 0.5 mm 以及 0.75 mm 时,涂层中均有较多的扩展裂纹;当涂层厚度达到 1 mm 时,裂纹在涂层基体中各处蔓延。其结果证明了涂层厚度并不是越厚越好。

涂层的厚度不但对其力学性能有一定的影响,同时,也影响着裂纹扩展失效的模式。现有涂层厚度对裂纹扩展的影响还未得到准确结论,因此本文利用四点弯曲实验,研究不同厚度涂层的裂纹扩展行为。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

42CrMo 为 6DL 型发动机曲轴的主要材料,因此本实验中选用其为基体材料。材料的规格如图 1 所示,长 200 mm,宽 15 mm,厚 10 mm。曲轴再制造

主要采用电弧喷涂 3Cr13 的方法,涂层厚度分别为 100、200、300、400 μm。电弧喷涂 3Cr13 涂层的组成和喷涂参数分别如表 1 和表 2 所示。

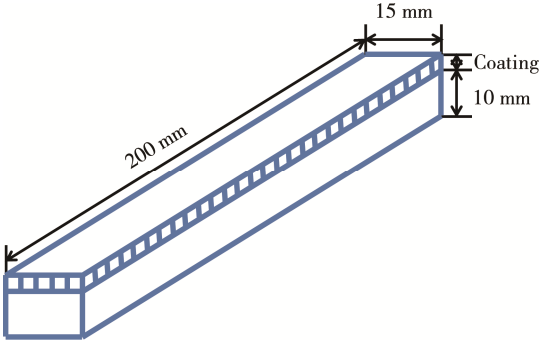


图 1 试样的规格和尺寸
Fig.1 Specifications and dimensions of sample

表 1 3Cr13 涂层成分
Tab.1 Ingredients of 3Cr13 coating

元素	Ni	Cr	C	Si	Mn	Fe
质量分数/%	0.1	12~13	0.25~0.34	≤0.6	≤0.6	余量

表 2 3Cr13 喷涂参数
Tab.2 Spraying parameters of 3Cr13

材料	电压/V	电流/A	气压/MPa	喷涂距离/mm
3Cr13	34	180	0.65	180~200

利用扫描电镜对电弧喷涂材料的侧面和组织进行观察,结果如图 2 所示。实验结果表明,3Cr13 涂层和基体之间有很好的结合性,同时涂层上有少量的气孔和夹杂物存在,说明喷涂效果良好并且此样品符合四点弯曲实验要求。

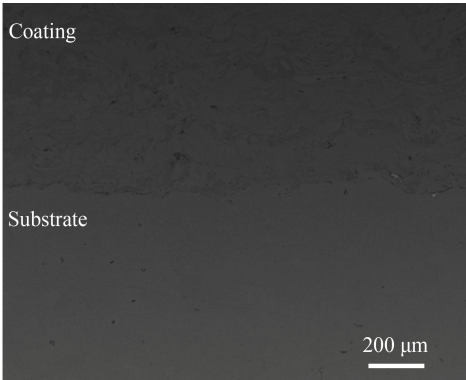


图 2 电弧喷涂涂层的 SEM 图
Fig.2 SEM image of electric arc sprayed sample

1.2 实验方法

42CrMo 钢四点弯曲疲劳实验在 MTS809 型液压伺服试验机上进行,该试验机可以完成弯曲疲劳、拉伸、压缩等多种试验,且该设备精度较高,静态力学误差为 $\pm 0.5\%$,动载荷误差为 $\pm 1\%$ 。试验在室温条件下进行,下跨距设置为 120 mm,上跨距为 40 mm,应力比 $R=0.1$,频率为 15 Hz。试验控制参量为载荷控制,载荷波为正弦波。

本文中采用 Nova Nano SEM 450/650 型环境扫描电子显微镜,对涂层中可能存在的气孔、孔隙、裂纹等缺陷进行观察,同时也需要对材料的疲劳断口形貌进行观察,以确定材料疲劳失效形式和涂层破坏特征。其分辨率为 1.0 nm,放大倍数最大 600 000 倍,倾斜角度 $-20^{\circ}\sim 5^{\circ}$,加速电压 200~30 kV,样品的真空度 $10\sim 10^{-4}$ Pa。

2 结果与讨论

2.1 不同涂层厚度试样的疲劳断口

对涂层厚度分别为 100 和 200 μm 的试样断口宏观形貌进行观察,从中可以发现,材料的疲劳失效过程分为疲劳裂纹萌生、裂纹扩展和瞬断 3 个阶段,同时发现其疲劳裂纹萌生的形式主要为多源疲劳失效。对材料的疲劳裂纹源区域进行放大,如图 3 所示,可以发现,材料的疲劳裂纹萌生部位不同,材料的尖端及中间不同位置均有疲劳裂纹的萌生,并且在疲劳裂纹扩展过程中,不同平面内扩展的裂纹相交,形成了台阶形貌。

涂层厚度为 100 μm 的试样断口的显微形貌如图 4 所示,从图中可以发现,材料的疲劳裂纹萌生主要是在涂层和基体之间,萌生的主要原因是喷涂过程中

的夹杂物导致材料应力集中。裂纹萌生后,以裂纹源为中心向涂层和基体方向扩展,同时在扩展过程中可见明显的疲劳条纹和二次裂纹。在显微形貌中可见到韧窝的存在,在瞬断区可以发现明显的蔡状断口形貌。对涂层厚度为 200 μm 的试样断口的形貌进行观察发现,其规律与 100 μm 的试样相同。

涂层厚度为 300、400 μm 的试样的疲劳失效过程与涂层厚度为 100、200 μm 的试样相同,也分为疲劳裂纹萌生、裂纹扩展和瞬断 3 个阶段,同时,其疲劳裂纹萌生的形式主要为多源疲劳失效。对材料的疲劳裂纹源区域进行放大,可以发现,其裂纹萌生部位与涂层厚度为 100、200 μm 的试样相同,在材料的尖端和中间不同位置均有疲劳裂纹萌生,并且在疲劳裂纹的扩展过程中,不同平面内扩展的裂纹相交,形成了台阶形貌。

涂层厚度为 300、400 μm 试样的疲劳裂纹源显微形貌相同,如图 5 所示。与涂层厚度为 100、200 μm 的试样相比可以发现,涂层厚度为 300、400 μm 的试样在涂层和基体之间存在界面裂纹,同时在涂层的内部也存在着微裂纹。根据观察发现,材料疲劳裂纹萌生的主要原因是喷涂过程中涂层和基体间的夹杂物引起了应力集中,导致了基体材料上的裂纹萌生(如图 5a 所示)。界面裂纹产生的主要原因是当试样承受循环交变载荷作用时,涂层界面和夹杂物之间结合力较弱,夹杂物与涂层的应变变化不协调,造成局部的应力集中,故在交变载荷的作用下夹杂物和涂层脱离,产生界面裂纹(如图 5b 和 5c 所示)。其裂纹扩展和断裂形式与涂层厚度为 100、200 μm 的试样相同,在疲劳裂纹扩展过程中可见明显的疲劳条纹和二次裂纹,从显微形貌可以发现韧窝的存在,在瞬断区可以发现明显的蔡状断口形貌。

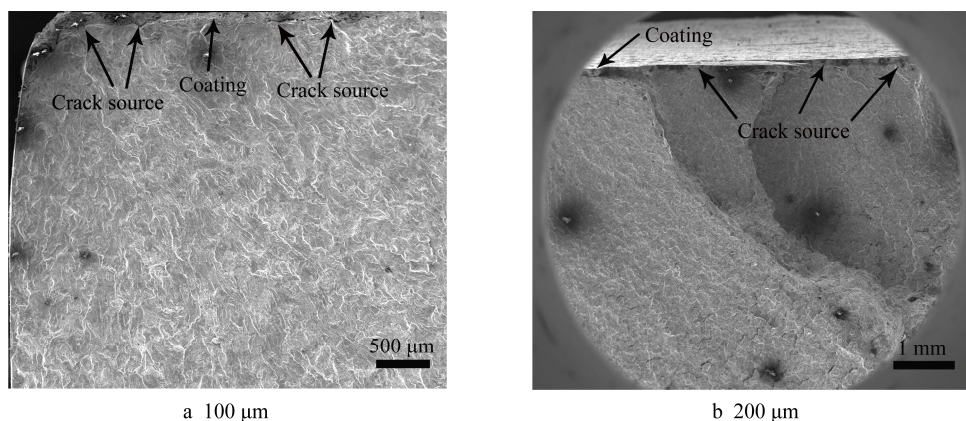


图 3 不同涂层厚度的试样疲劳裂纹源的放大图

Fig.3 Enlarged view of fatigue crack source of samples with different thickness of coating

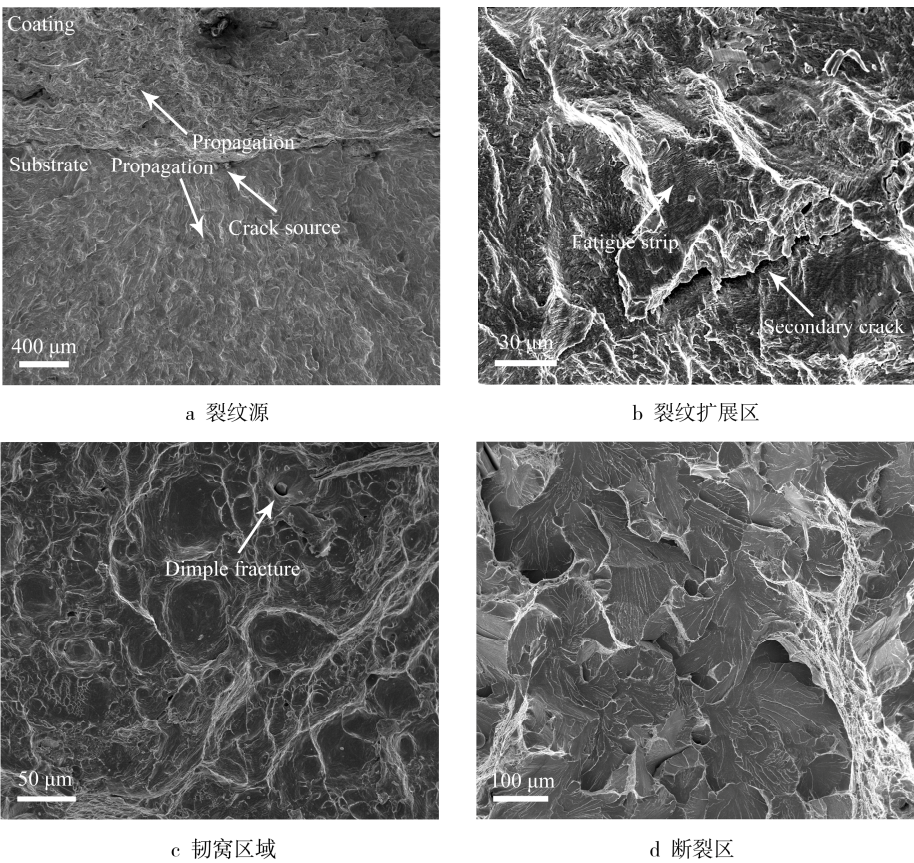


图 4 涂层厚度为 100 μm 的试样断口的显微形貌
Fig.4 Fracture microstructure of samples with 100 μm thick coating: a) crack source, b) fatigue crack growth area, c) dimple fracture area, d) fracture area

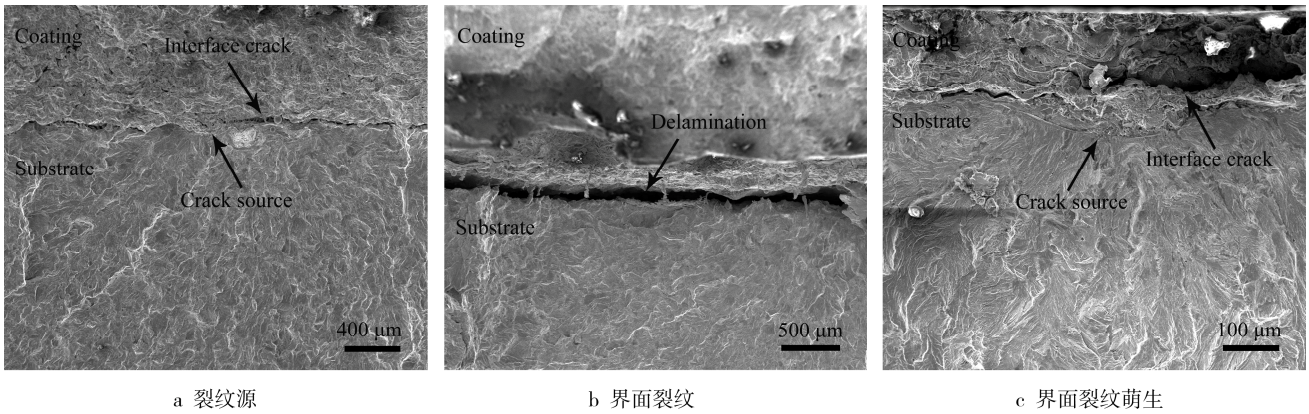
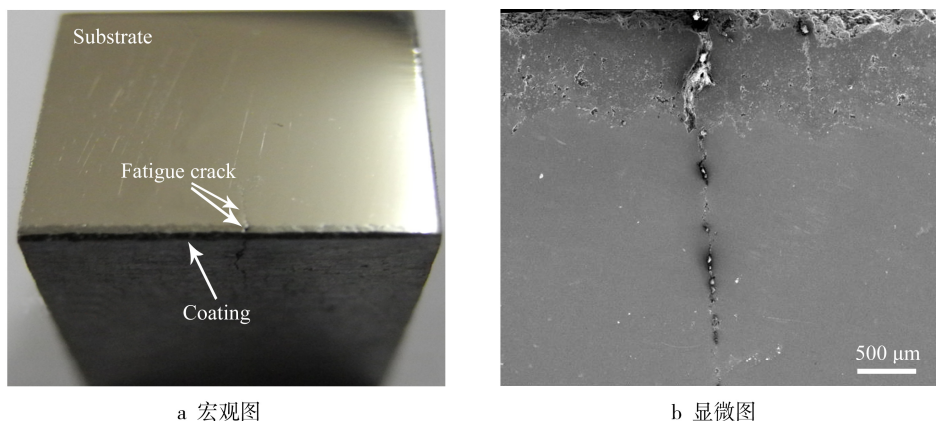


图 5 涂层厚度为 300、400 μm 的试样疲劳裂纹源形貌
Fig.5 Fatigue crack source morphology of samples with 300 and 400 μm thick coating: a) crack source, b) interface crack, c) interfacial crack initiation

2.2 疲劳裂纹的扩展形式

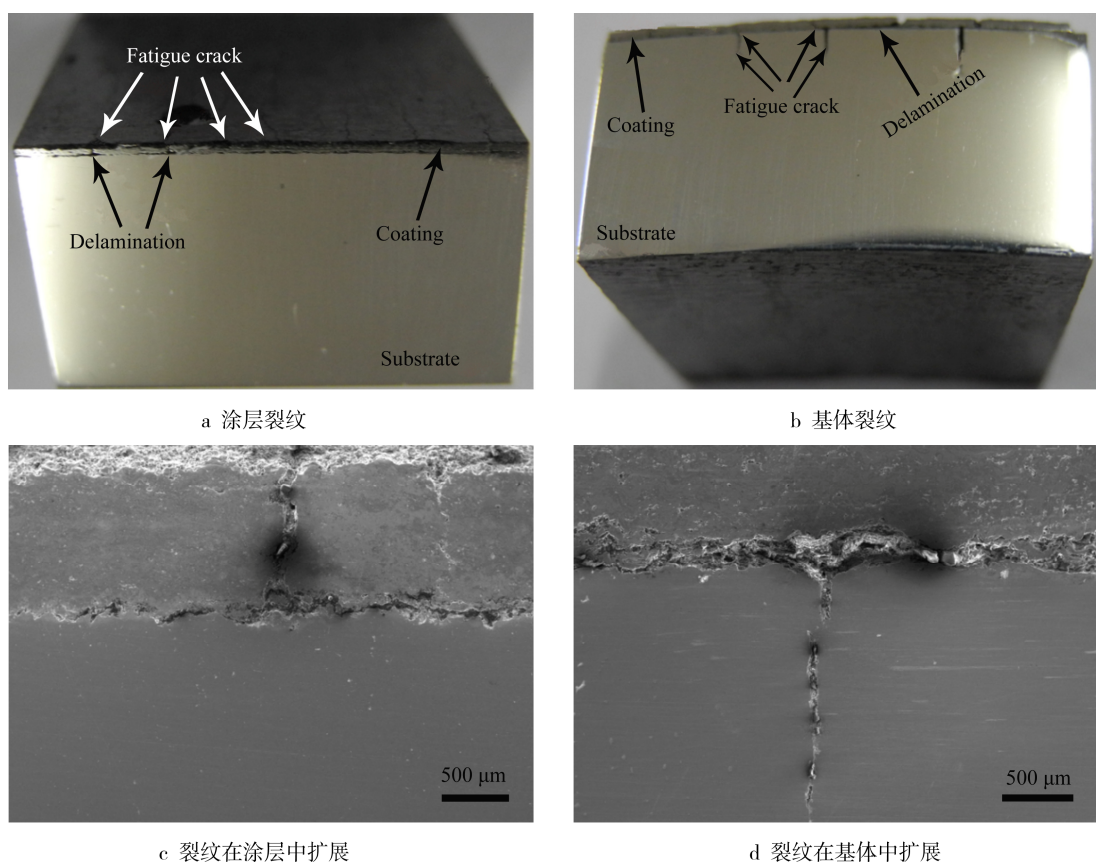
图 6 为涂层厚度 100 μm 的试样裂纹的扩展方式，从图中可以发现，试样在疲劳失效过程中，涂层和基体之间没有界面裂纹和分层现象出现，并且涂层裂纹和基体裂纹在同一直线上。这说明材料的疲劳裂纹是从基体和涂层之间的部位萌生并向基体和涂层内部扩展的，与图 4a 所示的裂纹萌生方式相同。

图 7 为涂层厚度 400 μm 的试样裂纹扩展方式，从图中可以发现，该试样的疲劳失效方式与涂层厚度为 100、200 μm 的试样存在不同。在图 7a 和 7b 中，试样在疲劳失效过程中主要是先在涂层上产生裂纹，随着试验的进行，涂层和基体逐渐地分离，产生分层现象，在涂层和基体分层的部位有疲劳裂纹的萌生，并沿着基体逐渐地扩展直至试样断裂(图 7c 和 7d)。



a 宏观图

b 显微图

图 6 涂层厚度为 100 μm 的试样裂纹扩展方式Fig.6 Crack growth mode of samples with 100 μm thick coating: a) macrograph, b) micrograph

a 涂层裂纹

b 基体裂纹

c 裂纹在涂层中扩展

d 裂纹在基体中扩展

图 7 涂层厚度为 400 μm 的试样裂纹扩展方式Fig.7 Crack growth mode of samples with 400 μm thick coating: a) coating crack, b) matrix crack, c) cracks expand in the coating, d) cracks expand in the matrix

总体而言,涂层厚度为 100、200 μm 的试样裂纹主要萌生于四点弯曲实验中应力最集中的部位,并逐渐地向涂层和基体扩展,直至试样断裂。而涂层厚度为 300、400 μm 的试样,裂纹萌生部位主要集中于四点弯曲疲劳试验中应力最大部位的两侧,并呈对称式分布。涂层裂纹首先扩展到基体和涂层的结合处,同时裂纹在界面处连接,使涂层和基体产生分层现象,之后分层部位处裂纹在基体上萌生,并沿着基体方向扩展,直至试样断裂。

涂层厚度不同,裂纹萌生和扩展形式会有差异,这主要与试样材料在弯曲疲劳试验过程中的受力模型和表面残余应力大小有关。涂层试样在四点弯曲疲劳试验中,涂层上受到了沿水平方向上的拉应力,而涂层和基体界面之间受到了垂直方向上的拉应力。利用 X-350A 型 X 射线应力测定仪对涂层表面残余应力进行测量,结果如图 8 所示。可以发现,涂层厚度为 100、200 μm 的试样表面残余压应力大于涂层厚度为 300、400 μm 的试样,因此在相同的应力作用下,涂

层厚度为 300、400 μm 的试样表面残余压应力较小, 同时其应力集中相对较大, 故涂层厚度为 300、400 μm 的试样在涂层上先产生裂纹, 并沿水平和垂直方向上进行扩展, 最终产生分层现象。涂层厚度为 100、200 μm 的试样由于表面残余压应力较大, 故涂层上未产生裂纹, 而是在涂层和基体之间的界面, 即结合力较弱或有夹杂物的部位产生裂纹, 并逐渐向涂层和基体的方向扩展。

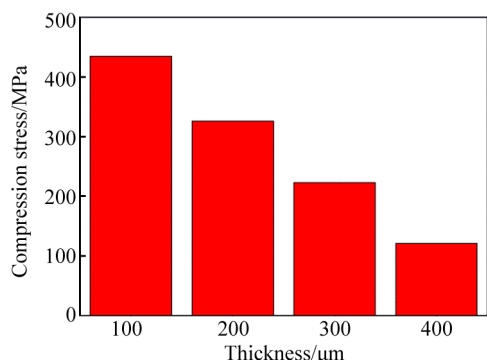


图 8 不同涂层厚度试样表面残余应力的大小
Fig.8 Residual stress on surface of samples with different thickness of coating

根据薄膜结构的非线性分层模型, 各向同性的涂层熔覆在基体上, 受到应力 σ_R , 此时涂层上单位面积的弹性能为 $(1-\gamma)h\sigma_R^2/E$, 这里 E 和 γ 分别为涂层的弹性模量和泊松比^[13-16]。当分层现象发生时, 界面裂纹扩展, 并释放涂层中的弹性能, 若此时涂层中无塑性变形, 裂纹扩展单位长度的能量释放率 G 为^[17,18]: $G = \frac{1-\gamma^2}{2} \frac{h\sigma_R^2}{E}$ 。当涂层-基体界面上的应力 σ_R 达到界面结合强度 σ_b 时, 界面裂纹即开始萌生。若界面裂纹的临界应变能释放率 G_c 已知, 界面裂纹萌生时所对应的涂层临界厚度 h_c 可由公式 $h_c = \frac{2EG_c}{(1-\gamma^2)\sigma_b^2}$ 计算出。

上式表明, 当涂层厚度达到临界值时, 界面裂纹才会萌生。而当涂层厚度小于临界值时, 裂纹模式即为与界面相垂直的裂纹。这与实验得到的结果相吻合。

3 结论

1) 涂层试样的裂纹萌生形式主要为多源疲劳裂纹萌生, 不仅萌生于试样尖端, 还萌生于试样中间。涂层厚度为 100、200 μm 的试样裂纹主要萌生于涂层与基体的界面之间, 并逐渐向涂层和基体扩展。涂层厚度为 300、400 μm 的试样失效形式为: 裂纹首先萌生于涂层的尖端并逐渐沿着水平和垂直方向扩展, 导致涂层和基体产生分层现象, 最后在基体材料的应力集中部位萌生裂纹, 并逐渐向基体扩展

直至试样断裂。

2) 涂层厚度不同, 整个系统的力学性能和失效模式也不同。对于较薄的涂层, 裂纹模式主要为垂直于涂层-基体界面的裂纹, 此时拉伸失效占主导。对于较厚的涂层, 界面裂纹为主要的裂纹模式, 此时剪切失效占主导。

参考文献:

- [1] 徐滨士. 绿色再制造工程的发展现状和未来展望[J]. 中国工程科学, 2011, 13(1): 4-10.
XU Bin-shi. Development Status and Prospect of Green Remanufacturing Engineering[J]. Chinese Engineering Science, 2011, 13(1): 4-10.
- [2] 国务院. 国务院关于加强培育和发展战略性新兴产业的决定[J]. 中国科技产业, 2010(10): 24-27.
The State Council. The State Council's Decision to Accelerate the Cultivation and Development of Strategic Emerging Industries[J]. China's Technology Industry, 2010(10): 24-27.
- [3] MO Xiao-jun. The Automotive Remanufacturing Engineering Technology and Process[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(5): 301-302.
- [4] 王凡, 闫世春, 孙远东, 等. 发动机曲轴失效分析[J]. 金属热处理, 2015, 40(12): 194-197.
WANG Fan, YAN Shi-chun, SUN Yuan-dong, et al. Failure Analysis of Engine Crankshaft[J]. Metal Heat Treatment, 2015, 40(12): 194-197.
- [5] ZHANG Guo-qing, PU Geng-qiang, WANG Cheng-tao. Fatigue Life Prediction of Crankshaft Made of Material 48MnV Based on Fatigue Tests Dynamic Simulation and FEA[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 16-20.
- [6] KLIMAN V. Fatigue Life Prediction for a Material under Programmable Loading Using the Cyclic Stress-strain Properties[J]. Material Science Engineering, 1984, 68(1): 1-10.
- [7] SMAIL M, FAHIM A. Exploring Generalized Probability Weighted Moments Generalized Moments and Maximum Likelihood Estimating Methods in Two-parameter Weibull Model[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1-4): 62-75.
- [8] WANG Xiang-hong, ZHU Chang-ming, MAO Han-ling, et al. Feasibility Analysis for Monitoring Fatigue Crack in Hydraulic Turbine Blades Using Acoustic Emission Technique[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(3): 444-450.
- [9] DENG H, SHI H, TSURUOKA S. Influence of Coating Thickness and Temperature on Mechanical Properties of Steel Deposited with Co-based Alloy Hardfacing Coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(23): 3927-3934.
- [10] LI X N, LIANG L H, XIE J J, et al. Thickness-dependent Fracture Characteristics of Ceramic Coatings

- Bonded on the Alloy Substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 1039-1047.
- [11] 赵志平, 李新勇, 段红艳, 等. 涂层厚度对火焰热喷涂件拉压疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(s2): 139-144.
ZHAO Zhi-ping, LI Xin-yong, DUAN Hong-yan, et al. Influence of Coating Thickness on Tension and Compression Fatigue Performance of Flame Thermal Spraying Components[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(s2): 139-144.
- [12] 张国庆. 零件剩余疲劳寿命预测方法与产品可再制造性评估研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
ZHANG Guo-qing. Study on Residual Fatigue Life Prediction Methods of Remanufacturing Parts and Assessment of Remanufacturability[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [13] LIU Y P, WANG C G, TAN H F. Growth from Buckling to Buckling-driven Delamination in a Film/Substrate System[J]. Composite Structures, 2017, 174: 292-300.
- [14] LIU Y, WANG B L, ZHANG C. Mechanical Model for a Thermoelectric Thin Film Bonded to an Elastic Infinite Substrate[J]. Mechanics of Materials, 2017, 114: 88-96.
- [15] PAN K, NI Y, HE L, et al. Nonlinear Analysis of Compressed Elastic Thin Films on Elastic Substrates: From Wrinkling to Buckle-delamination[J]. International Journal of Solids & Structures, 2014, 51(21-22): 3715-3726.
- [16] FORSCHELEN P J J, SUIKER A S J, SLUIS O V D. Effect of Residual Stress on the Delamination Response of Film-substrate Systems under Bending[J]. International Journal of Solids & Structures, 2016, s97-98: 284-299.
- [17] XU Z H, YANG Y, HUANG P, et al. Determination of Interfacial Properties of Thermal Barrier Coatings by Shear Test and Inverse Finite Element Method[J]. Acta Materialia, 2010, 58(18): 5972-5979.
- [18] ZHAO P F, SUN C A, ZHU X Y, et al. Fracture Toughness Measurements of Plasma-sprayed Thermal Barrier Coatings Using a Modified Four-point Bending Method[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 4066-4074.