

DOI: 10.11973/jxgccl201912002

预制止裂线对 DT4C 工业纯铁疲劳裂纹扩展行为的影响

张春国¹, 刘乾坤¹, 李光尚¹, 刘荣伟²

(1. 长安大学, 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 承德石油高等专科学校, 承德 067000)

摘要: 借助 ANSYS 仿真结果, 确定在疲劳裂纹扩展路径上预制“直线-圆”形止裂线的尺寸; 在 DT4C 工业纯铁上加工出标准扩展紧凑拉伸试样, 在距其 U 型切口根部不同距离(L_a 分别为 6.4, 7.0, 7.6 mm)处预制止裂线, 通过疲劳裂纹扩展试验及疲劳断口分析, 研究了 L_a 对试样疲劳裂纹扩展行为的影响。结果表明: 当 L_a 为 7.6 mm 时, 止裂线的引入降低了裂纹尖端的应力, 延长了试样的疲劳寿命; 在裂纹尖端到达止裂线位置之前, 当 L_a 为 6.4 mm 时, 止裂线的引入提高了裂纹扩展速率, 而当 L_a 为 7.6 mm 时则降低了试样的裂纹扩展速率; 在裂纹尖端穿过止裂线位置之后, 含止裂线试样的裂纹扩展速率均明显降低; 不含止裂线和含止裂线试样的裂纹扩展区呈现疲劳辉纹特征, 瞬断区呈现韧窝断裂特征。

关键词: 疲劳断口; 疲劳裂纹扩展; 止裂线; 应力分布

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2019)12-0007-05

Effect of Prefabricated Crack Arrest Line on Fatigue Crack Growth Behavior of Industrial Pure Iron DT4C

ZHANG Chunguo¹, LIU Qiankun¹, LI Guangshang¹, LIU Rongwei²

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China)

Abstract: According to the ANSYS simulation, the size of the prefabricated “straight-circle” shaped crack arrest line on the fatigue crack growth path was determined. Standard extended compact tensile specimens were sampled from industrial pure iron DT4C, and then crack arrest lines were prefabricated at different distances from the root of the U-shaped notch (L_a was 6.4, 7.0, 7.6 mm, respectively). The effect of L_a on the fatigue crack growth behavior of specimens was studied by fatigue crack growth tests and fatigue fracture surface analysis. The results show that when L_a was 7.6 mm, the introduction of crack arrest line reduced the stress at the crack tip and prolonged the fatigue life of the specimen. Before the crack tip reached the arrest crack line position, the introduction of the crack arrest line at L_a of 6.4 mm improved the crack growth rate, while that at L_a of 7.6 mm reduced the crack growth rate. After the fatigue crack tip passed through the crack arrest line position, the crack growth rates of all the specimens with crack arrest line decreased significantly. The crack growth zone of specimens without and with crack arrest lines showed fatigue striation characteristics and the instantaneous fracture zone showed dimple fracture characteristics.

Key words: fatigue fracture; fatigue crack growth; crack arrest line; stress distribution

0 引言

钢材具有强度高、塑韧性好、焊接性能好等诸多

优点^[1], 在桥梁、重型工程设备、工业与大型公共建筑中得到了广泛应用。疲劳是钢结构件常见的一种损伤形式: 在循环载荷作用下, 结构件应力集中的部位会萌生疲劳裂纹, 裂纹不断扩展直至结构破坏^[2]。疲劳裂纹通常会在结构件发生一定的塑性变形后以极高的速率扩展并造成断裂, 因此是结构件维修时需要解决的重要问题之一。

收稿日期: 2018-12-02; 修订日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672048, 51405029)

作者简介: 张春国(1982—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士

疲劳裂纹扩展阻滞方法的研究是提高含裂纹结构件使用寿命的一个重要课题。抑制裂纹扩展的方法有很多,包括裂纹填充^[3]、钻孔止裂、在裂纹区域使用复合材料或金属补丁^[4]、焊接修复^[5-6]、引入残余压应力等。其中,钻孔止裂法是疲劳裂纹修复的一种常用措施^[7]。RAZAVI 等^[8]采用改进的止裂孔技术延缓了 S690 高强钢中疲劳裂纹的扩展,结果表明双止裂孔周围的应力水平较低,当两止裂孔圆心距离与其直径之比为 0.75 时,S690 高强钢的疲劳寿命增幅最大;郭阿明等^[9]采用弹塑性有限元方法分析了止裂孔直径对止裂效果的影响,结果表明当止裂孔直径为裂纹长度的 60% 左右时,其止裂效果较好,同时避免了对结构件截面的过多削弱;袁周致远等^[10]采用数值模拟方法对比了圆形孔、椭圆孔、腰型孔和 M 形孔等 4 种形状止裂孔的止裂效果,发现腰型孔具有最佳的止裂效果;FANNI 等^[11]采用 ANSYS 软件获得止裂效果最佳的非圆形止裂孔,发现采用最佳形状止裂孔获得的疲劳寿命为采用圆孔的 2~9 倍,且最佳孔形提高了所有试样的初始疲劳寿命;SONG 等^[12]研究了止裂孔直径对疲劳裂纹扩展寿命的影响,发现较大的止裂孔直径能导致更长的疲劳寿命;GHFIRI 等^[13-14]研究发现,在止裂孔附近引入残余压应力可以提高止裂孔边缘的初始疲劳寿命;AYATOLLAHI 等^[15-17]研究了在复合模式加载条件下两种止裂孔形式对疲劳裂纹扩展寿命的影响,结果表明双止裂孔形式与单止裂孔相比具有更好的止裂效果,当两止裂孔圆心距与孔直径比为 0.75 时,止裂效果最好;SHIN 等^[18]研究表明,在延长疲劳寿命上,采用钻孔止裂法比渗透法更有效,比过载法更安全;孔璞萍等^[19]采用碳纤维复合材料加固止裂孔的方法对裂纹进行复合修复,不仅

消除了裂纹尖端的奇异性,抑制了裂纹的持续扩展,而且提高了裂纹件的承载能力。

目前,已有研究主要集中于止裂孔参数对疲劳寿命的影响以及钻孔形状对疲劳性能的影响等方面,这使得止裂技术得到了一定发展。但是,裂纹尖端的准确位置难以确定,在裂纹尖端钻孔止裂的效果很难保证。为此,作者以 DT4C 工业纯铁为研究对象,借助三维软件建模及 ANSYS 仿真方法确定了在疲劳裂纹扩展方向上的止裂线形状和尺寸,并在标准扩展紧凑拉伸试样(E-CT 试样)上,距其 U 型切口根部不同距离处预制了止裂线,通过疲劳裂纹扩展试验以及疲劳断口形貌分析研究了止裂线距 U 型切口根部的距离对止裂效果的影响。

1 止裂线形状和尺寸的确定及试验方法

1.1 止裂线形状和尺寸的确定

试验材料为 DT4C 工业纯铁(太钢产),化学成分见表 1;其屈服强度为 550 MPa,抗拉强度为 610 MPa,弹性模量为 80.65 GPa,泊松比为 0.29。

表 1 DT4C 工业纯铁的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of industrial pure iron

DT4C (mass)										%
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	Fe	
0.006	0.01	0.1	0.007	0.005	0.38	0.06	0.01	0.02	余	

采用 E-CT 试样进行疲劳裂纹扩展试验。以不会过多削弱截面的承载力为前提,在裂纹扩展路径上设计了 2 个止裂孔(通孔);考虑裂纹再次萌生会缩短疲劳寿命,用直线通过顶端相切方式连接 2 个孔。设计得到的止裂线形状为“直线-圆”形,含裂纹 E-CT 试样的形状和尺寸见图 1。

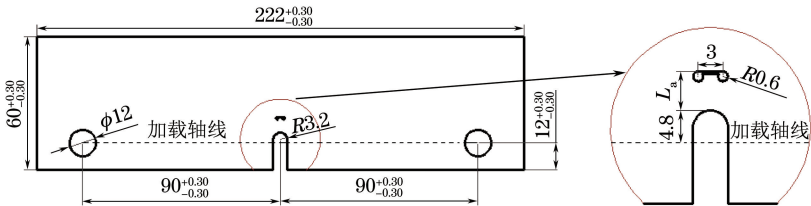


图 1 含止裂线 E-CT 试样的形状及尺寸

Fig.1 Geometry and size of E-CT specimen with crack arrest line

采用 Pro/E 软件建模,选用 ANSYS Workbench 中的 Static Structural 模块,将图 1 中的含止裂线 E-CT 试样导入模型,添加材料属性。为了提高计算结果的精确度、减小误差,网格类型采用六面体单元,网格大小设为 1 mm,同时运用 Refinement

优化止裂线及裂尖处的网格,划分网格后的模型见图 2。在直径为 12 mm 的一个销钉圆孔面处施加约束,在另一个销钉圆孔面处施加 23 kN 的拉伸载荷(两销钉孔圆心连线即为加载轴线),进行 Solution 求解。首先设定止裂线两孔的圆心距离

为定量,止裂线距U型缺口根部的垂直距离 L_a 为变量,进行多次仿真试验来确定较佳 L_a 值;再以 L_a 为定量,通过改变两孔圆心距离,确定两孔圆心的较佳距离。根据仿真结果,确定“直线-圆”形止裂

线的尺寸为两孔圆心距3 mm、孔直径1.2 mm, L_a 约7 mm。含该尺寸止裂线的E-CT试样在承受23 kN拉伸载荷时的整体应力分布较均匀,如图3所示。

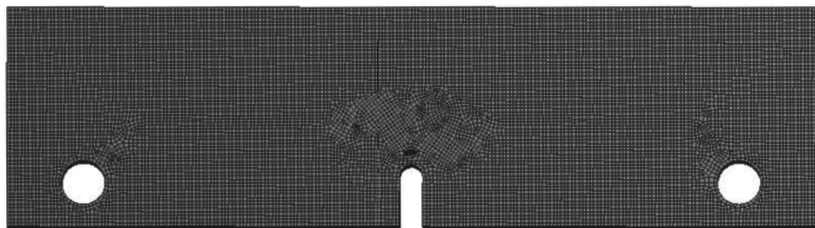


图2 含止裂线E-CT试样的网格划分

Fig.2 Meshing of E-CT specimen with crack arrest line

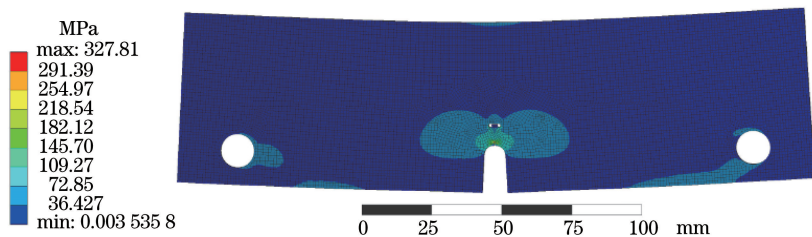


图3 拉伸载荷23 kN作用下含较佳尺寸止裂线E-CT试样的应力分布

Fig.3 Stress distribution of E-CT specimen with crack arrest line of relatively optimal size under tensile load of 23 kN

1.2 试验方法

在DT4C工业纯铁上加工出如图1所示的E-CT试样,采用直径为1.2 mm的钻头在E-CT试样上加工出2个止裂孔,孔直径为1.2 mm,两孔圆心距为3 mm,两圆孔顶端与线切割机加工的直线相切, L_a 取6.4,7.0,7.6 mm。采用SDS500型电液伺服动静疲劳试验机,按照GB/T 6398—2000进行疲劳裂纹扩展试验,采用载荷控制方式,正弦波形,试验频率为2 Hz,液压泵压力为9 MPa,保持应力比近似为0。先在不含止裂线和含止裂线E-CT试样上各加工一条长度1 mm的预裂纹,载荷幅值为17.75 kN,均值为18.25 kN,然后进行疲劳裂纹扩展试验,载荷幅值为11.25 kN,均值为11.75 kN。在整个预制裂纹和疲劳裂纹扩展试验过程中,采用BL-SC1600型数码显微镜实时记录不同疲劳循环次数 N 下的疲劳裂纹长度 a (从加载轴线起算),绘制得到 a - N 曲线。在 a - N 曲线上,采用分段拟合近似求得不同裂纹长度下的疲劳裂纹扩展速率 da/dN ;计算不同裂纹长度下的应力强度因子,计算公式为

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \times \frac{2 + \alpha}{[(1 - \alpha)^{3/2} \times (1 - d/W)^{1/2}]} \times (1.15 + 0.94\alpha - 2.48\alpha^2 + 2.92\alpha^3 - 1.24\alpha^4) \quad (1)$$

$$\alpha = a/(W - d) \quad (2)$$

式中: K 为应力强度因子; P 为载荷幅值; B 为试样厚度; W 为试样宽度; a 为裂纹长度; d 为加载轴线至试样边缘的距离,且 $0.1 \leq (a + d)/W < 1$ 。

绘制疲劳裂纹扩展速率曲线(da/dN - ΔK 曲线, ΔK 为一个循环下最大应力强度因子与最小应力强度因子之差)。采用VEGA 3 LM型扫描电子显微镜观察疲劳断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 a - N 曲线

由图4可知:不含止裂线试样的疲劳寿命约8万周次,含止裂线试样的疲劳寿命分别约为6万周次($L_a = 6.4$ mm)、10万周次($L_a = 7.0$ mm)、13万周次($L_a = 7.6$ mm),即随着 L_a 的增大,疲劳

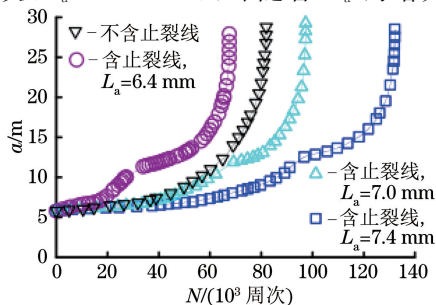


图4 不含止裂线和含止裂线E-CT试样的 a - N 曲线

Fig.4 a - N curves of E-CT specimens without and with crack arrest line

寿命延长;当 L_a 为7.6 mm时,止裂线的延寿效果最为明显,疲劳寿命相比不含止裂线试样的延长了62%。这是因为疲劳裂纹在穿过止裂线时尖端产生钝化,延缓其扩展,从而延长了试样的疲劳寿命。

2.2 疲劳裂纹扩展速率曲线

由图5可知:不含止裂线试样的疲劳裂纹扩展速率曲线呈现典型的S形变化趋势。含止裂线试样的疲劳裂纹扩展速率随着应力强度因子的增大逐渐加快,当裂纹扩展至止裂线处时经历第一次“断裂”,裂纹重新进入萌生阶段,使得疲劳裂纹扩展速率下降;裂纹再次萌生后,其扩展速率又开始加快直至试样完

全断裂。在疲劳裂纹尖端到达止裂线位置之前的裂纹扩展阶段,当 L_a 为6.4 mm时,含止裂线试样的疲劳裂纹扩展速率明显高于不含止裂线试样的;当 L_a 为7.0 mm时,疲劳裂纹扩展速率接近于不含止裂线试样的;而当 L_a 为7.6 mm时,疲劳裂纹扩展速率低于不含止裂线试样的。在疲劳裂纹尖端穿过止裂线位置之后的裂纹扩展阶段,含止裂线试样在该阶段初期的疲劳裂纹扩展速率均低于不含止裂线试样的,但随着应力强度因子的增大,疲劳裂纹扩展速率逐渐增大并趋于一致。当 L_a 为7.6 mm时,试样的疲劳裂纹扩展速率较低,因此疲劳寿命较长。

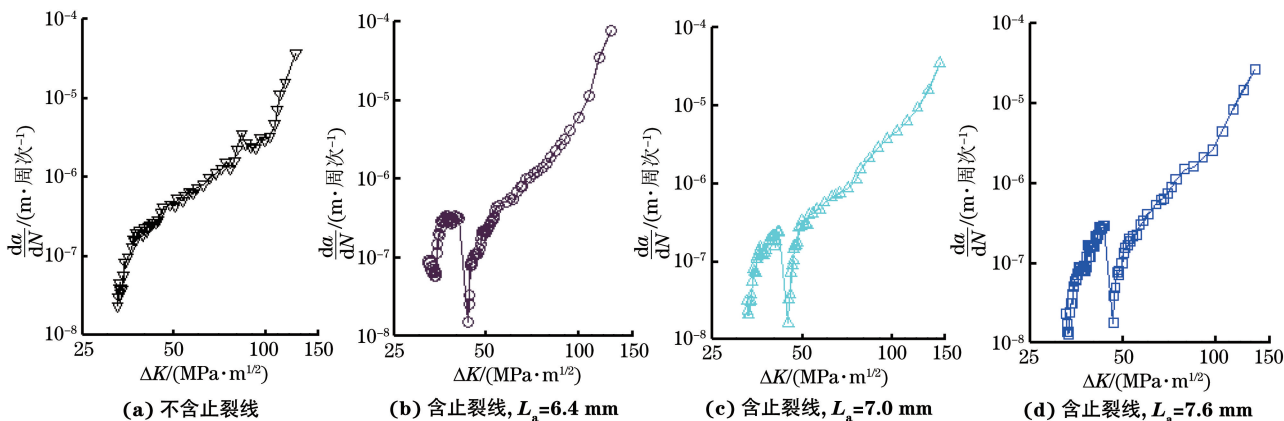


图5 不含止裂线和含止裂线 E-CT 试样的疲劳裂纹扩展速率曲线

Fig.5 Fatigue crack growth rate curves of E-CT specimens without (a) and with (b-d) crack arrest line

为验证上述止裂线对裂纹扩展路径上的应力分布存在一定影响,采用 ANSYS Workbench 对不含止裂线和含止裂线 E-CT 试样进行不同裂纹长度(从加载轴线算起)的静力分析和对比,如图6所示。由图6可知:在疲劳裂纹尖端到达止裂线位置之前的裂纹扩展阶段,在相同裂纹长度下, L_a 为6.4 mm时含止裂线试样的裂纹尖端应力明显高于不含止裂线试样的; L_a 为7.0 mm的裂纹尖端应力近似等于不含止裂线试样的; L_a 为7.6 mm的裂纹尖端应力低于不含止裂线试样的。在疲劳裂纹尖端

穿过止裂线位置之后的裂纹扩展阶段,含止裂线试样的裂纹尖端应力均明显低于不含止裂线试样的,这表明止裂线的引入改善了裂纹扩展路径上的应力分布。

2.3 断口形貌

由图7可知:随着疲劳裂纹的扩展(裂纹长度的增加),疲劳断口上的辉纹间距逐渐增大;当裂纹长度约3 mm(裂纹尖端未到达止裂线位置)时,含止裂线试样断口上的辉纹间距小于不含止裂线试样的,表明含止裂线试样的疲劳裂纹扩展速率小于不含止裂线试样的;当裂纹长度为12 mm和18 mm(裂纹尖端穿过止裂线位置)时,不含止裂线与含止裂线试样均进入裂纹快速扩展阶段,断口均呈现出明显的疲劳辉纹特征;在瞬断区,疲劳辉纹特征消失,断口呈现出典型的韧窝断裂特征。

3 结论

(1) 在疲劳裂纹扩展过程中,沿裂纹扩展路径、距U型缺口根部7.6 mm处预制“直线-圆”形止裂线可降低裂纹尖端的应力,延长试样的疲劳寿命。

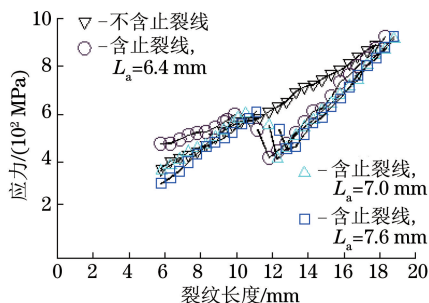


图6 不含止裂线和含止裂线 E-CT 试样的裂纹尖端应力曲线

Fig.6 Crack tip stress curves of E-CT specimens without and with crack arrest line

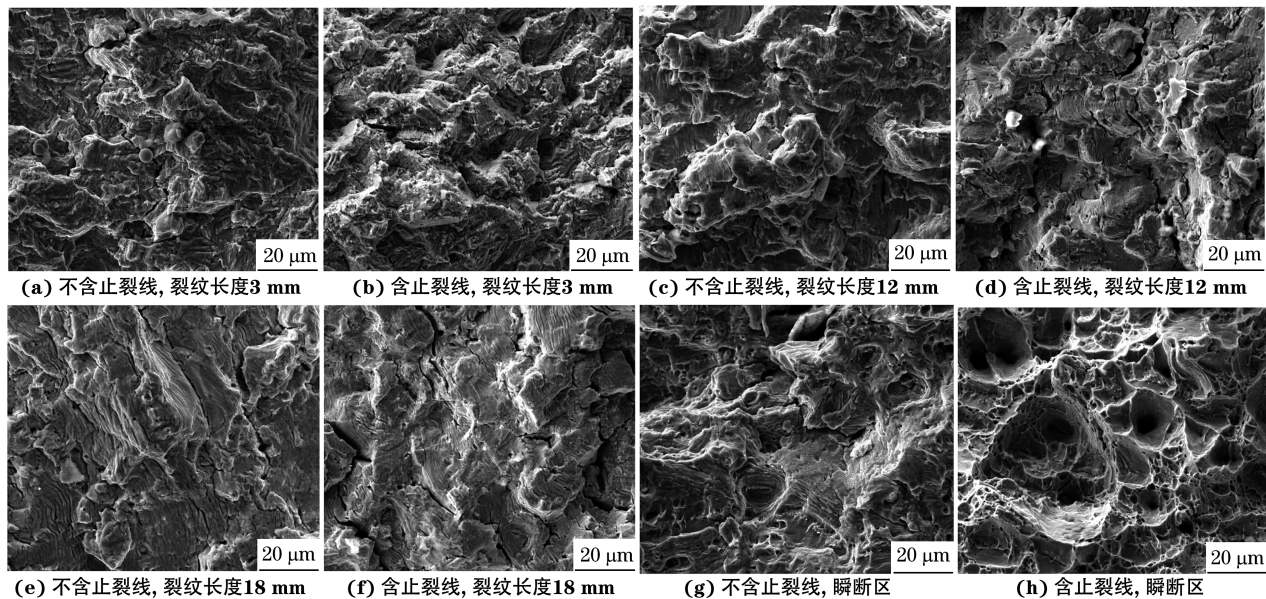


图7 不含止裂线与含止裂线 E-CT 试样疲劳断口不同位置处的微观形貌 ($L_a=7.6$ mm)

Fig.7 Micromorphology at different locations on fatigue fracture of E-CT specimens without (a, c, e, g) and with (b, d, f, h) crack arrest line ($L_a=7.6$ mm): (a—b) crack length of 3 mm; (c—d) crack length of 12 mm; (e—f) crack length of 18 mm and (g—h) instantaneous fracture zone

(2) 在疲劳裂纹尖端到达止裂线位置之前,当 L_a 为 6.4 mm 时,止裂线的引入提高了试样的裂纹扩展速率;当 L_a 为 7.0 mm 时,含止裂线与不含止裂线试样的裂纹扩展速率基本一致;当 L_a 为 7.6 mm 时,止裂线的引入降低了试样的裂纹扩展速率。在疲劳裂纹尖端穿过止裂线位置之后,裂纹再次萌生,含止裂线试样的裂纹扩展速率明显降低。

(3) 不含止裂线和含止裂线试样的疲劳裂纹扩展区均呈现典型的疲劳辉纹特征,瞬断区的疲劳辉纹特征消失,呈现出韧窝断裂特征。

参考文献:

- [1] 施刚,班慧勇,石永久,等. 高强度钢材钢结构的工程应用及研究进展[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 1-7.
- [2] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 王中光,译. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] SHARP P K, CLAYTON J Q, CLARK G. Retardation and repair of fatigue cracks by adhesive infiltration[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1997, 20 (4): 605-614.
- [4] AYATOLLAHI M R, HASHEMI R. Mixed mode fracture in an inclined center crack repaired by composite patching[J]. Composite Structures, 2007, 81(2): 264-273.
- [5] MENDEZ P F, EAGAR T W. Penetration and defect formation in high-current arc welding[J]. Welding Journal, 2003, 82(10): 296-306.
- [6] ZHANG C G, VAN DER VYVER S, HU X Z, et al. Fatigue crack growth behavior in weld-repaired high-strength low-alloy

steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78 (9): 1862-1875.

- [7] 赵少汴. 抗疲劳设计手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [8] RAZAVI S M J, AYATOLLAHI M R, SOMMITSCH C, et al. Retardation of fatigue crack growth in high strength steel S690 using a modified stop-hole technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 169: 226-237.
- [9] 郭阿明,王力忠,田秋月. 疲劳裂纹钻孔止裂技术研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 107-109.
- [10] 袁周致远,吉伯海,傅中秋. 钢结构疲劳裂纹合理止裂孔形状研究[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(5): 556-561.
- [11] FANNI M, FOUADA N, SHABARA M A N, et al. New crack stop hole shape using structural optimizing technique [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2015, 6(3): 987-999.
- [12] SONG P S, SHIEH Y L. Stop drilling procedure for fatigue life improvement[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(12): 1333-1339.
- [13] GHFIRI R, AMROUCHE A, IMAD A, et al. Fatigue life estimation after crack repair in 6005 A-T6 aluminium alloy using the cold expansion hole technique [J]. Fracture of Engineering Materials and Structures, 2000, 23(11): 911-916.
- [14] GHFIRI R, SHI H J, GUO R, et al. Effects of expanded and non-expanded hole on the delay of arresting crack propagation for aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 286(2): 244-249.
- [15] AYATOLLAHI M R, RAZAVI S M J, CHAMANI H R. Fatigue life extension by crack repair using stop-hole technique under pure mode-I and pure mode-II loading conditions[J]. Procedia Engineering, 2014, 74: 18-21.

越大;在相同循环次数下,烟炱颗粒数量越多,试样的耗散能越小,即克服摩擦力所做的功越小,灰尘颗粒数量的影响则不存在明显的规律。

3 结 论

(1) 当紫铜表面附着导电性较差的烟炱或灰尘颗粒进行微动磨损时,其初始阶段接触电阻出现较大峰值,随后表面颗粒层因磨损而破坏,导致接触电阻急剧下降,最终稳定在一定范围内波动;与附着灰尘颗粒的相比,附着烟炱颗粒的接触电阻更小,微动磨损过程中的导电性能更优。

(2) 与表面未附着颗粒时的相比,表面附着烟炱颗粒微动磨损后的摩擦因数较低,附着灰尘颗粒的磨损因数较高;且表面附着烟炱颗粒数量的增加会降低试样的摩擦因数,而附着灰尘颗粒数量的增加则会增大试样的摩擦因数;两种颗粒的引入均延缓了试样的微动磨损,磨痕宽度、磨痕深度和磨损量均与颗粒数量呈负相关。

参考文献:

- [1] 刘利彪,周怡琳.典型尘土颗粒对电接触的影响[J].机电元件,2011,31(6):6-11.
- [2] 吕阳.环境污染物对电接触和电子设备防护可靠性的影响研究[D].北京:北京邮电大学,2016.
- [3] 冯萃峰.失效手机电接触故障表面的污染物特性及形成机理[D].北京:北京邮电大学,2010.
- [4] 刘宏达.尘土中几种典型成分对电接触性能的影响[D].北京:

北京邮电大学,2011.

- [5] ZHANG J G. Effect of dust contamination on electrical contact failure[C]//Electrical Contacts: 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh: IEEE, 2007: 9983947.
- [6] 王浩.硬质颗粒及有机污染物对电触点可靠性影响的实验研究[D].北京:北京邮电大学,2010.
- [7] 周怡琳,王鹏,葛世超,等.长期贮存航天电连接器尘土污染的研究[J].电工技术学报,2014,29(7):269-276.
- [8] BRAUNOVIC M, MYSHKIN N K, KONCHITS V V. Electrical contacts: Fundamentals, applications and technology[M]. Boca Raton: CRC press, 2006.
- [9] 郭凤仪,任志玲,马同立,等.滑动电接触磨损过程变化的实验研究[J].电工技术学报,2010,25(10):24-29.
- [10] LIU X L, CAI Z B, LIU S B, et al. Effect of roughness on electrical contact performance of electronic components[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 74: 100-109.
- [11] 李正阳.贫铀及其 Ti/TiN 多层涂层的切向微动磨损性能研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [12] ZHU M H, ZHOU Z R. On the mechanisms of various fretting wear modes[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1378-1388.
- [13] TRINH K E, TSIPENYUK A, VAREMBERG M, et al. Wear debris and electrical resistance in textured Sn-coated Cu contacts subjected to fretting[J]. Wear, 2015, 344/345: 86-98.
- [14] LAPORTE J, FOUVRY S, ALQUIER O. Prediction of electrical contact resistance failure of Ag/Ag plated contact subjected to complex fretting-reciprocating sliding[J]. Wear, 2017, 376/377: 656-669.

(上接第 11 页)

- [16] AYATOLLAHI M R, RAZAVI S M J, YAHYA M Y. Mixed mode fatigue crack initiation and growth in a CT specimen repaired by stop hole technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 145: 115-127.
- [17] AYATOLLAHI M R, RAZAVI S M J, CHAMANI H R. A numerical study on the effect of symmetric crack flank holes on fatigue life extension of a SENT specimen[J]. Fatigue &

Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 37(10): 1153-1164.

- [18] SHIN C S, WANG C M, SONG P S. Fatigue damage repair: A comparison of some possible methods[J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(8): 535-546.
- [19] 孔璞萍,刘志平,周凯,等.起重机金属结构裂纹的复合修复方法[J].中国机械工程,2018,29(13):1610-1614.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告