

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0056-04

激光合金化对疲劳裂纹扩展速率的影响

李正阳¹, 王海龙¹, 王秉毅², 杜志毅³, 钟敏霖¹, 刘建国², 梁德礼³, 张红军¹,
冯晓星³, 徐曼琼⁴, 刘文今¹

¹清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084
²包头钢铁(集团)有限公司, 内蒙古 包头 014010
³包头市鑫垣机械制造有限公司, 内蒙古 包头 014040
⁴清华大学工程力学系强度与振动中心, 北京 100084

摘要 在 45# 钢基体上以 TH-2 激光合金化专用粉进行激光合金化处理, 通过扫描电镜动态原位观察裂纹从基体向激光合金化区(LAZ)扩展的过程, 研究了疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子幅(SIFR)的关系, 分析了疲劳断口形貌和表面裂纹扩展路径的组织形态。经历一定循环次数之后, 激光合金化区内部也出现裂纹, 但是合金化区的边界能强烈阻滞裂纹的扩展, 一旦基体中的裂纹与合金化区中的裂纹汇合, 裂纹失稳扩展。裂纹扩展速率与应力强度因子幅之间的关系不满足传统的 Paris 公式, 裂纹在基体中扩展的断口形貌有典型的疲劳辉纹, 而合金化区的断口呈脆性断裂的形貌。从抗疲劳裂纹扩展的要求来看, 有必要针对不同的基体材料, 设计不同的合金化粉末, 通过适当增加合金化区的韧性相, 进一步提高激光合金化区抗疲劳裂纹扩展的能力。

关键词 激光技术; 疲劳; 合金化; 裂纹扩展速率

中图分类号 TN253 文献标识码 A

Effect of Laser Alloying on the Fatigue Crack Growth Rate

LI Zheng-yang¹, WANG Hai-long¹, WANG Bing-yi², DU Zhi-yi³, ZHONG Min-lin¹,
LIU Jian-guo², LIANG De-li³, ZHANG Hong-jun¹, FENG Xiao-xing³,
XU Man-qiong⁴, LIU Wen-jin¹

¹ Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology of Ministry of Education
Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
² Baotou Iron and Steel (Group) Co. Ltd., Baotou, Inner Mongolia 014010, China
³ Baoto Xinyuan Mechanical Manufacturing Co. Ltd., Baotou, Inner Mongolia 014040, China
⁴ The Center of Laboratory of Strength and Vibration, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract In this paper No. 45 steel (equivalent to AISI 1045) was laser alloyed with a special laser alloying powder TH-2. With SEM in situ observation of crack growth from base to alloying zone, the relationship between FCGR and stress intensity factor range (SIFR) was investigated, and the structure morphology of surface crack path and the fatigue fracture was analyzed. It is found that crack would appear on laser alloying zone (LAZ) after a certain cycles, but the boundary of LAZ would retard crack growth. Unstably propagation would occur when the crack from base meet the crack on LAZ. The relationship between FCGR and SIFR was not agreed with Paris formula. Typical fatigue strips was found on fatigue fracture of base and the morphology of LAZ was brittle fracture. It was necessary to design special alloying powder for different base material. To increase ductile phase in LAZ would improve resistance to fatigue crack growth of LAZ.

Key words laser technique; fatigue; alloying; crack growth rate

作者简介: 李正阳(1963—), 男, 江苏江阴人, 博士后, 主要从事激光加工、材料表面改性方面的研究。

E-mail: lizhengyang@tsinghua.org.cn

1 引言

大量研究已经证实,采用激光相变硬化、激光熔凝、激光冲击硬化等技术能够提高金属材料的疲劳寿命^[1~4],但是关于激光合金化对疲劳寿命影响的研究并不多。疲劳寿命是包括裂纹萌生和裂纹扩展这两个在微观机制上截然不同的阶段的一种总体评价。高强钢不易萌生裂纹,而一旦萌生裂纹,其扩展速率很快;塑性较好的中低强度钢容易萌生裂纹,但裂纹扩展速率却比较慢。所以,在研究激光改变金属材料疲劳性能时,有必要弄清楚激光作用下,材料表面性能的变化究竟是提高裂纹萌生的门槛值 ΔK_{th} ,还是降低裂纹扩展的速率 da/dN 。

在实际应用中,对于许多工程构件来说,只要裂纹扩展速率低于某一阈值,是允许带伤运行的。因此,研究激光合金化对裂纹扩展速率的影响具有重要的现实意义。TH-2合金粉是清华大学激光加工研究中心研制的激光加工专用粉末,被广泛用于活塞环、凸轮轴等重要工业部件的激光表面强化,具有较高的耐磨性和耐腐蚀性^[5~8],但是其抗疲劳裂纹扩展的能力尚需进行研究。本文以45#钢为基体材料,通过扫描电镜原位观察,研究了激光合金化对疲劳裂纹扩展速率的影响。

2 实验

试样为45#钢,成分(质量分数)如表1所示,组织为铁素体加珠光体。试样尺寸如图1所示,在试样中间用线切割开出长约1.0 mm,宽约0.15 mm的缺口,在缺口下方用激光加工出一合金化区,其边缘距缺口约0.5 mm。所用激光器为美国PRC公司3 kW快轴流CO₂激光器,激光功率约1000~1100 W,通过送粉器送入TH-2合金粉(其主要成分为:Fe,C,Si,B),得到激光合金化区。为便于观察和测量裂纹,试样表面磨至 $R_a=0.8\ \mu\text{m}$,磨后试样的厚度为2.01 mm。对试样表面进行深腐蚀,直至扫描电镜下可见激光合金化区及其周围的组织。用SHIMADZU SS-550显微高温静动态实验机进行常温下的三点弯曲疲劳裂纹扩展实验,应力比 $R=0.1$,最大载荷 $P_{\max}=900\ \text{N}$,正弦波加载,频率 $f=4\ \text{Hz}$,每循环约4000次停机,通过扫描电镜测量裂纹长度,采用递增多项式方法局部拟合求导确定 da/dN 。用同样的参数对未作激光合金化处理的试样进行实验以作对比。

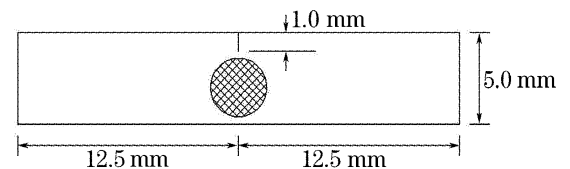


图1 实验尺寸及激光合金化区的位置(图中阴影区)
Fig. 1 Sample size and its site of laser alloying zone (dark area)

表1 试样的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the specimens (weight percent %)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
0.45	0.64	0.010	0.011	0.28	0.05	<0.02	0.09

3 实验结果与分析

图2是在扫描电镜下观察到的裂纹在45#钢激光合金化试样表面扩展的总体情况,图2(a)中弧形阴影区域为激光合金化区,图2(c)显示激光合金化区中也出现裂纹,图2(d)表明合金化区中萌生的裂纹在边界上被阻滞扩展。图3为裂纹在基体、热影响区、相变硬化区和激光合金化区等各区域扩展的详细情况。在基体中[图3(a)],裂纹主要在铁素体内扩展,裂纹前缘有明显的挤出和侵入,为典型的疲劳裂纹扩展特征,断口也显示出疲劳条纹和二次裂纹(图4)。在热影响区[图3(b)],裂纹沿铁素体与珠光体边界扩展,也有大量二次裂纹。在相变硬化区[图3(c)],有大量马氏体,裂纹沿原奥氏体晶界扩展。图3(d)显示,合金化区中的裂纹沿枝晶晶界扩展。

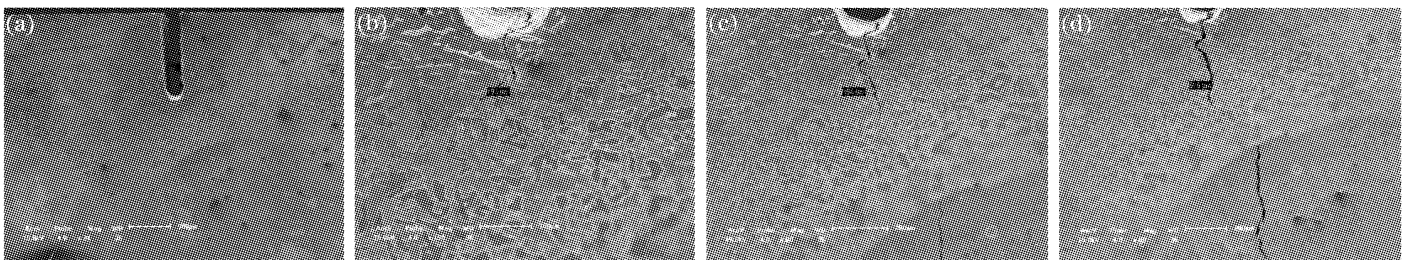


图2 不同循环次数时的裂纹长度, N 为循环次数, a 为自缺口根部起的裂纹长度。

Fig. 2 Crack length varied with different cycles. N means cycle numbers, a is the crack length from notch

(a) $N=0, a=0$; (b) $N=2400, a=80.3\ \mu\text{m}$; (c) $N=60192, a=366\ \mu\text{m}$; (d) $N=67112, a=569\ \mu\text{m}$

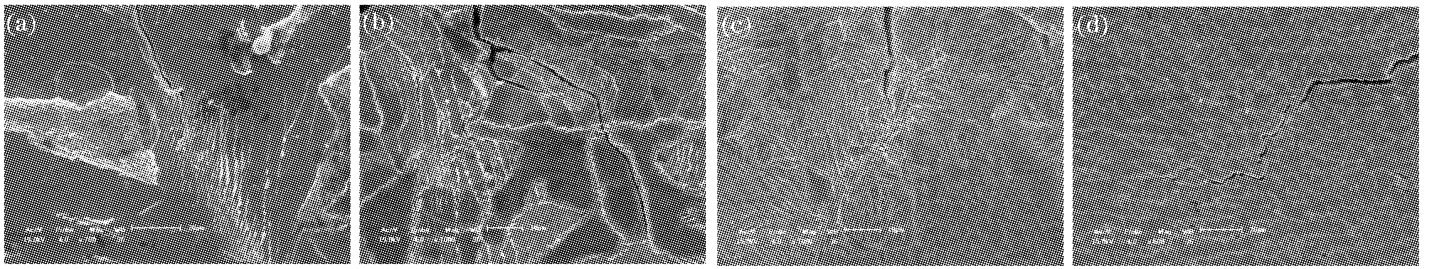


图 3 裂纹在各区域扩展的情况。(a) 基体中；(b) 热影响区；(c) 相变硬化区；(d) 激光合金化区

Fig. 3 Crack growing on different zones. (a) base; (b) heat affected zone; (c) phase transformation hardening zone; (d) laser alloying zone

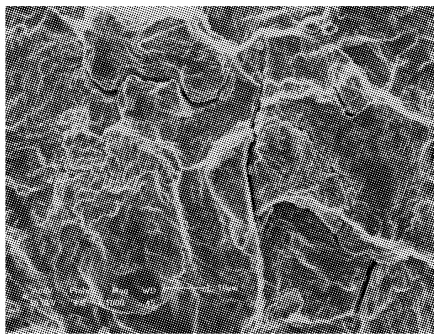


图 4 基体中的疲劳断口

Fig. 4 Fractograph of base factor range

图 5 为裂纹长度与循环次数的关系。图中显示,裂纹在扩展至 1.7~1.8 mm 左右发生失稳扩展,无激光合金化区的试样,裂纹发生失稳扩展的循环次数少于有激光合金化区的试样。激光合金化区的存在,提高了试样的疲劳寿命,图 6 为根据图 5 数据拟合计算得到的双对数坐标下裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子 ΔK 幅的关系。由图 6 可知,45# 钢试样疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子幅在双对数坐标下呈线性关系,满足 Paris 公式

$$da/dN = 1.58 \times 10^{-14} (\Delta K)^{7.95},$$

而有激光合金化区的试样,其 $da/dN \sim \Delta K$ 关系较为复杂,不满足 Paris 公式,但是,在相同应力强度因子条件下,激光合金化区的存在显著降低了裂纹扩展速率。需要注意的是,在疲劳实验中,合金化区

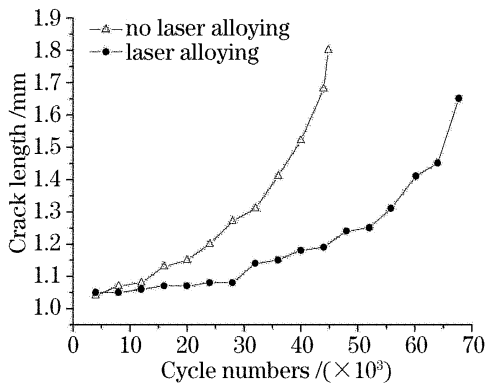


图 5 裂纹长度与循环次数的关系

Fig. 5 Crack length varied with cycles

也出现了裂纹,当来自缺口根部的裂纹与合金化区的裂纹汇合时,试样断裂,图 5 和图 6 的数据并没有包括合金化区裂纹的长度,这说明,所进行的实验反映的是热影响区和相变硬化区对裂纹扩展的阻碍作用,仅这两个区域的作用就已经极大地提高了试样的疲劳寿命。对于 45# 钢来说,激光重熔或合金化区的外围是相变硬化区^[2],其组织主要为马氏体,应力状态为压应力。对试样断口的观察也证实了这一点。图 7 为取自瞬断部分的试样断口,A 区为基体,主要为韧窝,B 区为熔池底部枝晶开始生长处,A 区与 B 区之间为相变硬化区,可见粗大的奥氏体晶粒及其冰糖状沿晶断口。

疲劳裂纹的扩展既取决于材料的微结构,又与

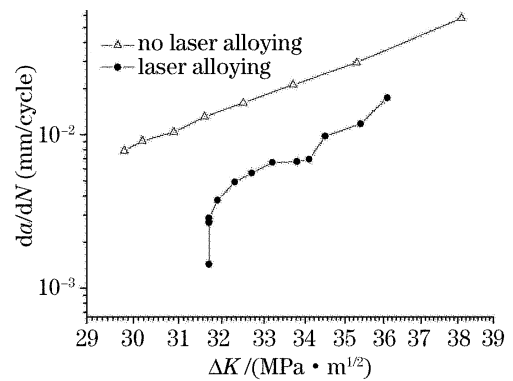


图 6 裂纹扩展速率与应力强度因子幅的关系

Fig. 6 Relationship between crack growth rate and stress intensity

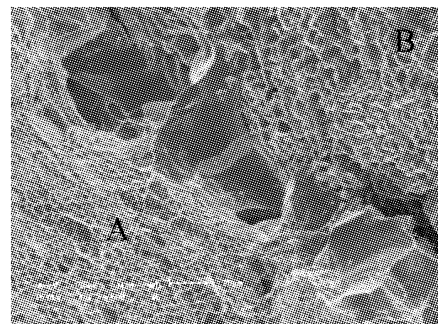


图 7 瞬断部分的试样断口

Fig. 7 Fractograph of brittle fracture of specimen

应力状态有关。实验所显示的对裂纹扩展的阻滞作用应主要归于残余压应力的影响^[9,10]。但是,测量激光合金化区及其周围的残余应力是一项较为复杂的工作,有待进一步研究。同时,激光合金化区本身脆性较大,在实验中产生了裂纹[见图 3(d),其断口见图 8],与来自基体的裂纹相遇,使试样因裂纹失稳扩展而断裂,因此,有必要改善 TH-2 激光合金化专用粉的设计,增强其韧性,进一步提高激光合金化的抗疲劳裂纹扩展的能力。

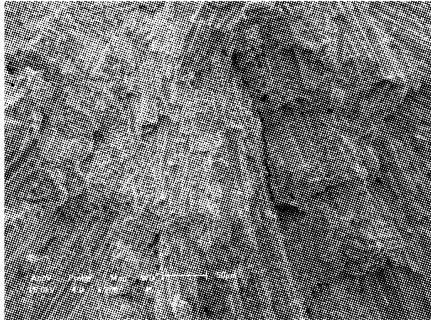


图 8 激光合金化区的沿晶脆性断口
Fig. 8 Intergranular fracture of LAZ

4 结 论

激光合金化区外围的相变硬化区对疲劳裂纹扩展有明显的阻滞作用,主要原因是该区存在残余压应力,而合金化区本身脆性较大,有必要改善合金设计,进一步提高激光合金化区的抗疲劳能力。

致谢 感谢张伟民老师在试样制备等方面的大力支持,感谢包头钢铁集团公司轨梁厂、包头鑫垣有限公司各方面人员的配合与协助。

参 考 文 献

- 1 H. B. Singh, S. M. Copley, M. Bass. Fatigue resistance of laser heat-treated 1045 carbon steel [J]. *Metll. Trans. A*, 1981, **12**(1): 138~140
- 2 Li Haopin, Cai Qingkui, Shi Changxu. The fatigue property of steel with laser melting treated surface layer [J]. *Applied Laser*, 1988, **9**(2): 52~55
李好平, 才庆魁, 师昌绪. 激光表面熔凝钢的疲劳性能 [J]. *应用激光*, 1988, **9**(2): 52~55
- 3 Liu Changsheng, Cai Qingkui, Xu Hao. Fatigue crack initiation on non-overlapped laser hardened 40Cr steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1993, **29**(12): B540~B543
刘常升, 才庆魁, 徐 灏. 40Cr 钢无搭接激光强化层的疲劳裂纹萌生 [J]. *金属学报*, 1993, **29**(12): B540~B543
- 4 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys; a review [J]. *Inter. J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 5 Tan Wen, Liu Wenjin, Jia Junhong. Research on laser cladding Fe-C-Si-B [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2000, (1): 15~17
谭 文, 刘文今, 贾俊红. 激光熔覆 Fe-C-Si-B 的研究 [J]. *金属热处理*, 2000, (1): 15~17
- 6 Liu Wenjin, Zhao Haiyun, Zhong Minlin *et al.*. New technique on laser melting-alloying combined strengthening of 45 steel cam surface [J]. *Vehicle Engine*, 1996, (5): 51~54
刘文今, 赵海云, 钟敏霖 等. 45 钢凸轮表面的激光熔凝一合金化复合强化新工艺 [J]. *车用发动机*, 1996, (5): 51~54
- 7 Jia Junhong, Liu Wenjin, Zhong Minlin *et al.*. Investigation on generating composite coatings reinforced by compound carbides by laser cladding on the surface of Fe-C alloy [J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(5): 198~200
贾俊红, 刘文今, 钟敏霖 等. Fe-C 合金表面激光熔覆制备颗粒增强复合材料层的研究 [J]. *应用激光*, 1999, **19**(5): 198~200
- 8 Zhou Dayong, Liu Wenjin, Zhong Minlin *et al.*. The investigation on the microstructure, properties and wear resistance of the Inconel 625 laser alloyed layer [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 375~379
周大勇, 刘文今, 钟敏霖 等. Inconel 625 激光合金化层组织、性能与耐磨性研究 [J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 375~379
- 9 V. K. Saxena, A. Bharti, G. Malakondaiah *et al.*. Effect of laser surface treatment on fatigue crack growth resistance in an Fe-Mn-Al austenitic steel [J]. *Int J. Fatigue*, 1993, **15**(5): 369~375
- 10 S. Kocanda, D. Natkaniec. Fatigue crack initiation and propagation in laser-hardened medium-carbon steel [J]. *Fatigue Fract. Mater. Struct.*, 1992, **15**(12): 1237~1249