

# 激光局部表面改性对疲劳裂纹萌生抗力的影响

刘常升 才庆魁 徐 灏

(东北大学 350 信箱, 沈阳 110006)

**提要** 研究无搭接激光单道扫描方式对材料局部应力集中部位进行表面改性及其对疲劳裂纹萌生抗力的影响。探讨了不同改性工艺条件下疲劳裂纹萌生的方式和断裂的微观机制。

**关键词** 激光, 局部改性, 疲劳裂纹萌生

## Fatigue crack initiation resistance improvement by means of laser partial surface modification

LIU Changsheng, CAI Qingkui, XU Hao

(Northeastern University, Shengyang 110006)

**Abstract** Using one pass method the areas of partial stress concentration were laser-modified and the influence on fatigue crack initiation resistance was investigated. The fatigue crack initiation patterns and fatigue fracture mechanism were also discussed at different laser parameters.

**Key words** laser, partial surface modification, fatigue crack initiation

## 1 引 言

大功率千瓦级激光器问世以来,人们开始运用这项高新技术提高材料和构件的疲劳抗力<sup>[1,2]</sup>,并取得了一定的成果和进展<sup>[3~6]</sup>。为克服以往研究工作中采用搭接方式处理致使强化效果减弱,进一步阐明改性对疲劳裂纹萌生的影响,本文设计并采用带单边缺口的板状疲劳试件,提出无搭接激光局部改性法,以研究没有搭接情况下运用激光对缺口根部局部进行改性对疲劳裂纹萌生的影响和改性后疲劳断裂的微观特征。

## 2 材料和实验方法

本文采用的材料为低合金钢 40Cr。首先将试料进行调质预处理,而后加工成带单边缺口的疲劳试件,其形状和几何尺寸如图 1 所示,缺口采用线切割加工。

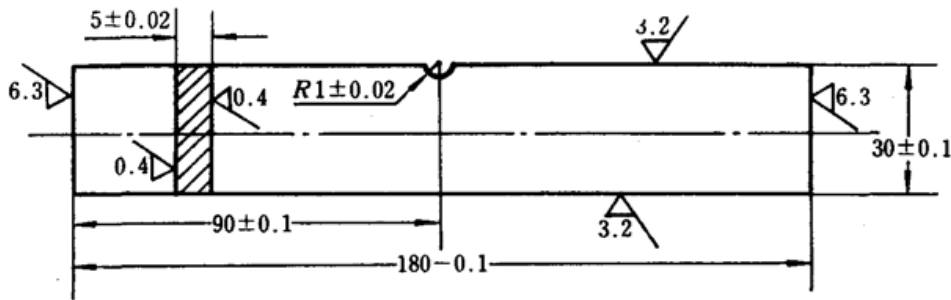


Fig. 1 Shape and size of fatigue specimen

激光处理前,为提高材料对激光能量的吸收率,在缺口根部处喷涂厚约  $10\sim 15\ \mu\text{m}$  的黑色涂料。之后,采用 JK-13 型 2 kW 连续  $\text{CO}_2$  激光器,矩形光斑,混合模式能量分布的激光对试件缺口根部进行处理。调整激光束轴线与缺口中心线重合,沿缺口根部、试件厚度方向进行单道扫描,此方法为无搭接局部改性。工艺参数有二种,一种是保证试件表面仅发生相变硬化,其参数选择原则和优化方法另文撰述,简称为工艺 I;另一种工艺为试件表面局部微熔,简称为工艺 II。在处理疲劳试件的同时处理平板试件以供研究改性层微观特征。

疲劳试验在 10 t (SHENCK) 电液伺服疲劳试验机上进行,采用载荷控制方式,应力比为  $R = 0.1$ ,频率  $f = 45\ \text{Hz}$ 。用 Versamet-2 型金相显微镜和  $\Pi\text{MT-3}$  型显微硬度计研究激光表面改性层的显微组织和显微硬度的变化。用 MSF-2903 型 X 射线应力仪测定经工艺 I 处理后的表面残余应力状态。用 EM-400T 型分析电镜观察硬化层内马氏体亚结构。用穆斯堡尔谱法定量测定残余奥氏体含量。用 EPM-810 型扫描电镜研究疲劳断口,分析裂纹萌生的方式和断裂特征。

### 3 结果与分析

#### 3.1 激光改性层特性

经无搭接激光表面辐照处理后,材料的显微组织发生了巨大的变化。激光作用区的表层显微组织形貌如图 2(a) 和图 2(b) 所示。在工艺 I 条件下,TEM 分析表明,其主要由板条马氏体和残余奥氏体组成(见图 2(c)),在板条内部,可见精细的相变孪晶(见图 2(d))。穆斯堡尔谱的分析结果表明硬化层内残余奥氏体含量为 7% 左右。在试件表面横向(激光扫描方向为纵向)存在约  $-743\ \text{MPa}$  的残余压应力。改性层中原奥氏体晶粒尺寸约为  $10\ \mu\text{m}$  左右,其确定方法后面将讨论到。显微硬度测量结果表明,整个激光改性层的显微硬度较均匀地为  $H_n 800$ ,远远高出基体的显微硬度值  $H_n 300$ ,且硬化层与基体间过渡区非常小,在此过渡区的硬度值没有产生低于基体硬度值的情况。在图 2(b) 中,高倍金相分析表明在局部微熔区有显微裂纹存在。工艺 I 和工艺 II 条件下硬化深度最大值分别为  $0.3\ \text{mm}$  和  $0.7\ \text{mm}$ 。

#### 3.2 疲劳试验结果

工程上,疲劳裂纹萌生定义为形成一定长度裂纹所对应的寿命。在此,我们定义裂纹形成并贯穿硬化层的寿命为萌生寿命,并把  $2 \times 10^6$  次循环数下仍未萌生裂纹的应力水平称为条件疲劳极限。实验结果表明,未经激光处理试件的疲劳极限为  $240\ \text{MPa}$ ,经工艺 I 处理试件的疲劳极限为  $360\ \text{MPa}$ ,经工艺 II 处理试件在  $240\ \text{MPa}$  应力水平下很快萌生裂纹。说明在合适的工艺条件下,激光局部无搭接改性可以显著提高材料的疲劳强度,降低其缺口敏感性。工艺不合适,则相反。

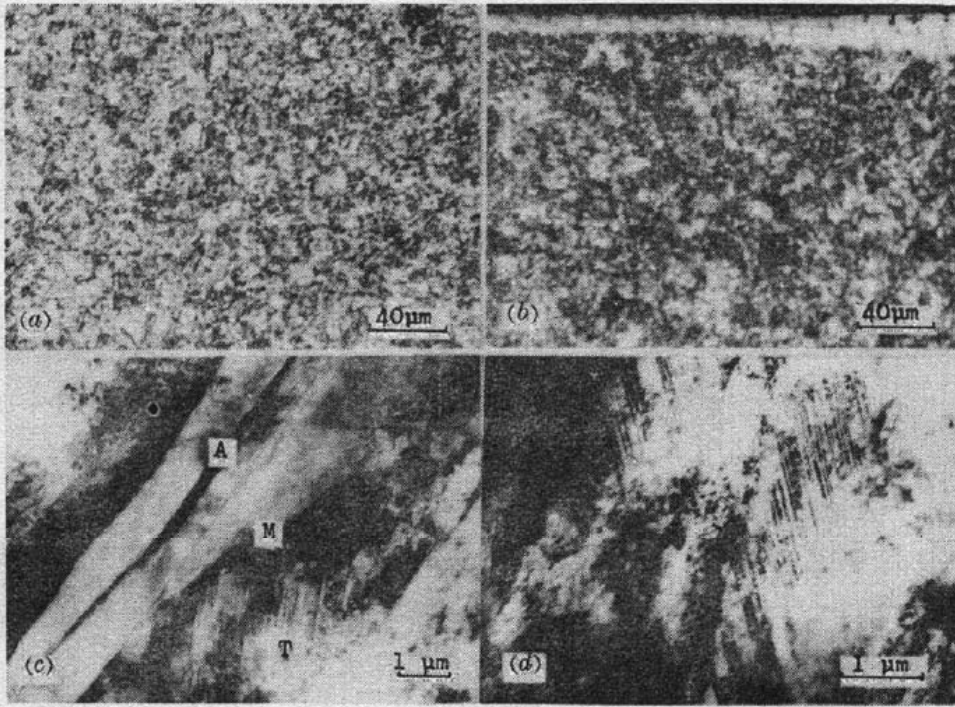


Fig. 2 Micrographs of laser-modified layer

(a) OM, technique I; (b) OM, technique II; (c) TEM, martensite and retained austenite  
 “A”—Retained austenite; “M”—Martensite; “T”—Twin; (d) TEM, fine twins

图 3 (a) 和 (b) 分别为工艺 I 和工艺 II 条件下疲劳裂纹萌生的宏观形貌。为了观察裂纹方便起见, 疲劳试验前将试件两表面沿拉伸方向磨光并轻微腐蚀, 图中横向细线为磨痕。由于改性区耐蚀性提高造成基体与硬层之间较大的反差, 可清楚地分辨出图中的白亮区为硬化层。图 3 (a) 表示疲劳裂纹在硬化层中的萌生。图 3 (b) 中, 由于裂纹的快速扩展没有捕捉到在硬化层中的形成过程, 但可说明裂纹萌生是起始于缺口根部表面。

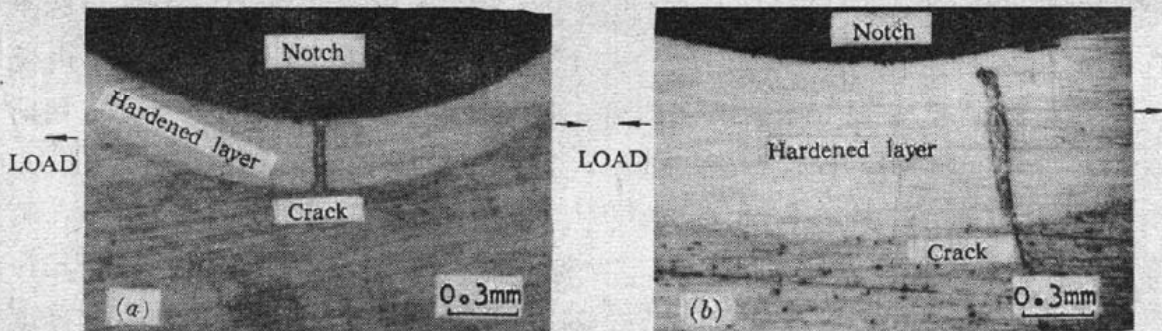


Fig. 3 Macrograph of fatigue crack initiation (a) technique I; (b) technique II

### 3.3 断口分析

为了研究疲劳断裂过程的微观特征, 我们将疲劳裂纹萌生后的试件拉断, 用扫描电镜对断口表面进行分析。未经激光处理试件的断口特征为循环解理和疲劳条带, 且有二次裂纹存在。图 4 (a) 和 (b) 分别是工艺 I 和工艺 II 处理试件的断口形貌。图 4 (a) 的特征为循环解理和舌形花样, 解理小刻面上可见清晰的条痕, 而且不同刻面上的条痕取向亦有少许不同。这可能是激光硬化材料中裂纹形成和早期扩展的断裂机制的表现。图 4 (b) 为沿晶和穿晶的混合断口形貌, 其中沿晶断裂的比例稍大, 这是由于裂纹于表面微熔区显微裂纹处萌生并在缺口根部较

高正应力作用下快速扩展的结果。另外,由此断口形貌可推断出原奥氏体晶粒尺寸大小。

## 4 讨 论

由以上实验结果可见,用不同的激光局部改性工艺来提高材料的疲劳抗力会得到截然不同的效果。在合理的工艺制度下,疲劳试件危险点处的材料获得了优良的改性层。快速加热和快速冷却使改性层晶粒细化,层内马氏体强化对提高疲劳裂纹萌生抗力有举足轻重的作用。表面残余压应力的存在,使缺口处应力集中的拉应力部分地被抵消。从而,其在疲劳载荷作用下所经历的应力——应变过程发生根本性的变化,即未进入塑性或塑性变形的程度不大。

由于疲劳损伤是塑性变形控制的,这样,激光改性就可降低或延缓每循环下疲劳损伤的微观进程,使疲劳裂纹萌生抗力得到提高。

在改性层中,残余奥氏体的量很少,它在宏观裂纹的萌生中起何作用呢?笔者认为:宏观裂纹萌生实际上是微裂纹形核和短裂纹扩展的过程。在疲劳载荷作用下,残余奥氏体成为微裂纹形核的地点,而在随后的短裂纹扩展过程中作为韧性相,又起到松弛裂尖应力集中、使之钝化的作用,从而阻止裂纹扩展。因此,它在宏观裂纹萌生中所起作用具有双重性,其作用的性质随外载水平高低而变化。高应力水平下,残余奥氏体处微裂纹形核占主要地位;阻止裂纹扩展占次要地位。低应力水平下,则相反。

在力争获得较大硬化深度时,若工艺不合适,改性层中可能会产生显微裂纹,则对疲劳性能有很坏影响。因为,显微裂纹是一种高度应力集中的缺陷,它将引起疲劳损伤的局部化,导致疲劳断裂性能劣化。因此,在选择工艺参数时,应优先考虑改性后的表面状态,犹以避免显微裂纹的产生为要。

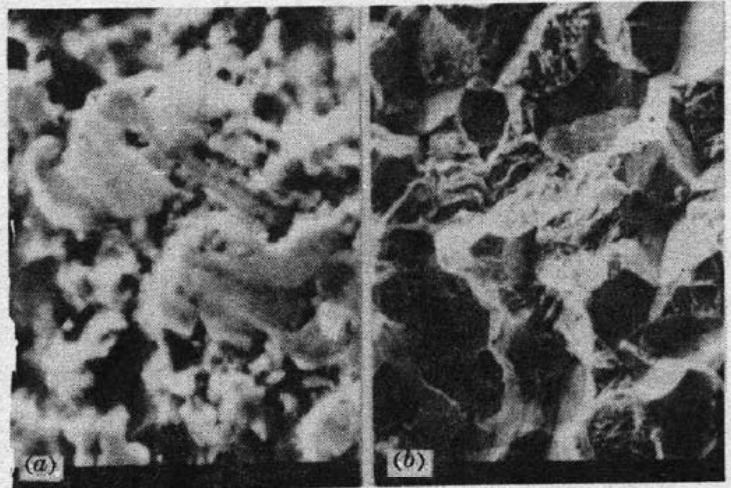


Fig. 4 Morphological characteristics of fatigue fracture

(a) Technique I ; (b) Technique II

## 参 考 文 献

- 1 Gnanamuthu, D. S., Shaw, C. B. *et al.* Laser-Solid Interaction and Laser Processing, ed. Ferris, S. D., Leamy, H. J. *et al.*, AIP, New York, 1979, 173~178
- 2 Singh, H. B., Copley, S. M. *et al.*, *Met. Trans.*, **12A**, 138(1981)
- 3 Kikuchi, M., Hisada, H. *et al.*, Proceedings of First Joint U. S. /Japan International Laser Processing Conference, Toledo, Ohio, Laser Institute of America, 1981
- 4 Cai Qingkui, Fatigue Prevention and Design, ed. Barnby, J. T., 1986, 333
- 5 Cai Qingkui, Liu Changsheng, Proceedings of the C-MRS International'90, June 18-22, 1990, Beijing, China, Vol. 4
- 6 才庆魁, 刘常升 *et al.*, 中国激光, **18**(2), 178(1991)