

激光淬火对 40CrNiMo 高强度钢疲劳性能与 断口形貌的影响

孔德军^{1,3} 张 垒¹ 宋仁国² 付贵忠¹ 叶存冬¹

¹ 常州大学机械工程学院, 江苏 常州 213016

² 常州大学材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164

³ 江苏省大型重载齿轮传动工程技术研究中心, 江苏 常州 213012

摘要 用 CO₂ 激光对 40CrNiMo 高强度钢表面进行淬火强化处理,进行了拉-拉疲劳对比试验,采用 Locati 法求出激光淬火前后试样的疲劳极限。通过电子扫描显微镜观察了疲劳断口形貌,分析了激光淬火对 40CrNiMo 疲劳强度的影响机理。结果表明,激光淬火后试样表面形成强化层、马氏体和残余压应力,使 40CrNiMo 疲劳强度明显增加,由调质处理时的 626 MPa 提高到 715 MPa,疲劳强度提高了 14.2%。调质处理试样疲劳裂纹源萌生在试样表层,而激光淬火后试样疲劳裂纹源萌生于试样次表层,其扩展至断裂的过程较为缓慢。晶粒细化和残余压应力是疲劳强度提高的主要机制。

关键词 激光技术; 激光淬火; 40CrNiMo; 疲劳强度; 断口形貌

中图分类号 TN249; TU973+.254

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201340.1103005

Effect of Laser Quenching on Fatigue Properties and Fracture Morphologies of 40CrNiMo High Strength Steel

Kong Dejun^{1,3} Zhang Lei¹ Song Renguo² Fu Guizhong¹ Ye Cundong¹

¹ College of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213016, China

² College of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China

³ Jiangsu Province Engineering Technology Research Center for Large Heavy Gear Transmission, Changzhou, Jiangsu 213012, China

Abstract The surface of 40CrNiMo high strength steel is quenched with CO₂ laser, and the fatigue limits of 40CrNiMo before and after laser quenching are obtained through the tension-tension fatigue experiments based on Locati theory. The fracture morphologies of 40CrNiMo before and after laser quenching are investigated by scanning electron microscope. The mechanism of laser quenching on 40CrNiMo's fatigue strength is analyzed. The results show that a layer of hardened zone, martensite and compressive residual stress after laser quenching is formed on the sample surface, and the fatigue strength of 40CrNiMo is increased significantly from 626 MPa to 715 MPa, increasing by 14.2%. The fatigue crack sources of the sample in quenching and tempering state are produced in the surface, while that are transferred to the subsurface after laser quenching. The fatigue crack sources expand slowly to be fracture. Grain refinement and compressive residual stress by laser quenching are the main mechanism.

Key words laser technique; laser quenching; 40CrNiMo; fatigue strength; fracture morphology

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 140.3535

1 引言

40CrNiMo 是一种具有高淬透性的航空用高强

度调质钢,其抗拉强度高,常用于制造航空发动机轴类、大型齿圈、紧固件等^[1],属于高强度零件。航空

收稿日期: 2013-05-02; 收到修改稿日期: 2013-06-26

基金项目: 江苏省科技支撑计划(工业)(BE2012066)、江苏省科技基础设施建设计划项目(BM2012337)

作者简介: 孔德军(1966—),男,博士,副教授,主要从事激光表面改性处理研究。E-mail: kong-dejun@163.com

用零件对材料表面性能和力学性能要求较高,其失效形式主要是疲劳断裂,具有突然性,危害性较大,因此,必须对其进行表面强化处理。早期对40CrNiMo表面强化一般采用渗氮、渗碳淬火和感应淬火等传统工艺,处理后材料表面硬化层存在着组织分布不均、梯度硬度和表面形变较大等缺陷^[2-3],无法提高承载能力和延长使用寿命。激光淬火属于一种先进的表面强化技术,具有加热速度快和冷却速度快的特点,表面温度很快地达到奥氏体化温度范围,淬火冷却速度达到 $10^3 \sim 10^8$ K/s,可以通过把热量传给母材实现自冷淬火,得到中碳位错马氏体为主,并获得残余压应力,达到提高材料疲劳强度的目的^[4-5]。本文对激光淬火前后40CrNiMo高强度钢进行了拉-拉疲劳试验,通过扫描电镜对疲劳断口形貌和韧窝进行了分析,探讨了激光淬火对40CrNiMo钢疲劳强度的影响机理。

2 试验方法

试验材料为40CrNiMo钢,其化学成分为(质量分数,%)C 0.37~0.44, Si 0.20~0.40, Mn 0.50~0.80, Cr 0.60~0.90, Mo 0.15~0.25, Ni 1.25~1.75,其余为Fe。激光淬火试验在GLS-IB型激光加工系统上进行,其工艺参数:激光功率1.5 kW,扫描速度6 mm/s,光斑尺寸 $\phi 5$ mm,在淬火时用液氮冷却,如图1(a)所示。疲劳试样尺寸如图1(b)所示,在日本岛津公司生产的EHF-EG250KN-40L型液压伺服疲劳试验机上进行拉-拉疲劳试验,静载精度满量程为 $\pm 0.2\%$,动载振幅波动度满量程为 $\pm 2\%$ 。施加载荷情况:载荷类型为拉-拉载荷,应力比 $R=0.1$ 。试样断裂后,利用JSM-6360LA型扫描电子显微镜(SEM)观察断口形貌,分析激光淬火对疲劳裂纹萌生、扩展和断裂的影响。

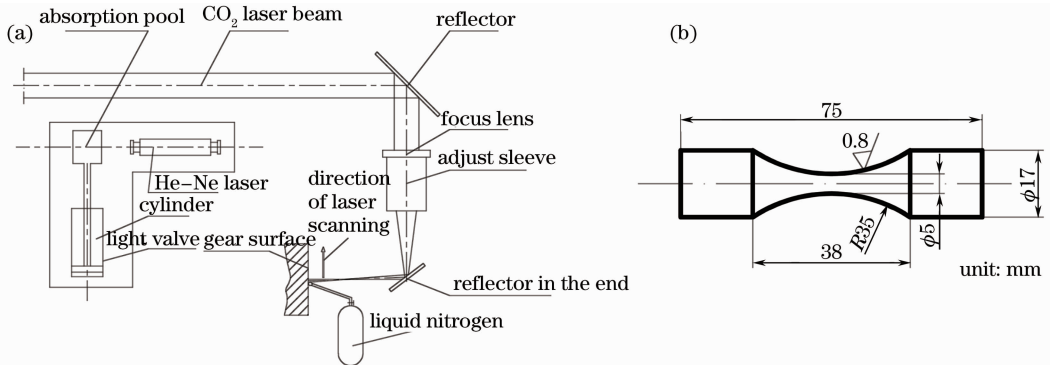


图1 激光淬火与疲劳试样示意图。(a) 激光淬火装置; (b) 疲劳试样

Fig. 1 Sketch of laser quenching and the fatigue sample. (a) Device of laser quenching; (b) fatigue sample

3 结果分析与讨论

3.1 疲劳试验结果

疲劳试验在室温下进行,最小与最大应力比 R ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)为0.1,试验载荷加载频率为10 Hz,采用Locati阶梯式加载法,试验加载情况如图2所示。根据材料疲劳估计过程,引进3条参考疲劳曲线,分别

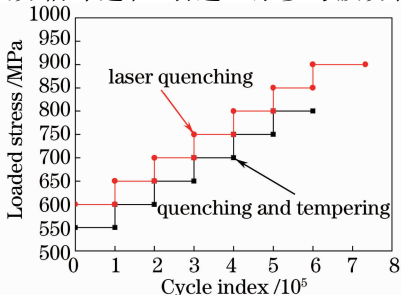


图2 疲劳试验阶梯加载图

Fig. 2 Ladder loading of fatigue tests

计算这3条曲线的极限疲劳值,使得3条曲线分别对应各自的疲劳极限。根据载荷加载情况,绘制出累积损伤-加载应力 σ ($\sum \frac{n}{N} - \sigma$)曲线,当曲线纵坐标 $\sum \frac{n}{N} = 1$ 时所对应的横坐标值,即为测试样品的疲劳极限值。

试样的疲劳极限 σ_r 估计值^[6]

$$\sigma_r = \{f + (1 - f) [(1 + r)/2]^n\} \sigma_b, \quad (1)$$

式中 f 为材料疲劳比, $f = \sigma_{-1}/\sigma_b$, σ_{-1} 为应力比为-1,即恒幅循环疲劳试验后的疲劳极限; σ_b 为材料静拉强度极限; n 为材料常数, $n = 1/(cf)$, c 为待定系数,取1.66。

图3为调质处理和激光淬火处理后40CrNiMo的疲劳累积曲线。调质处理试样疲劳强度极限 $\sigma_{r1} = 626$ MPa[图3(a)],激光淬火后试样疲劳强度

极限 $\sigma_{r2} = 715$ MPa [图 3(b)], 由此可见, 激光淬火

使 40CrNiMo 疲劳强度提高了 14.2%。

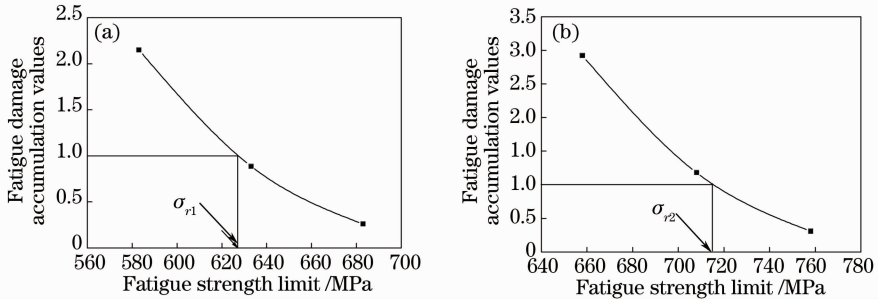


图 3 疲劳试验结果。(a) 调质处理; (b) 激光淬火

Fig. 3 Experimental results of fatigue tests. (a) Quenching and tempering; (b) laser quenching

3.2 疲劳裂纹源

调质处理试样疲劳裂纹源发生在试样表层, 为河流状裂纹形貌, 如图 4(a)所示。由于调质处理试样材料组织分布均匀, 在承受拉-拉交变载荷时, 其拉应力在试样横截面上分布也比较均匀, 裂纹源在试样表层的杂质或缺陷处萌生, 然后向四周扩展。在图 4(b)中 A 处疲劳源区出现了明显的摩擦痕迹, 这是由于裂纹在该区域扩展缓慢, 经过反复张开与闭合引起的摩擦所致^[7-9], 使得断口表面比较平整。在图 4(b)中

B 处疲劳扩展区, 疲劳裂纹以裂纹尖端为顶点, 呈扇形放射状向内扩展。在裂纹尖端附近滑移带内发生了急剧局部形变, 通过剪切脱粘形成了新的裂纹面, 裂纹尖端附近跨越多个不同的晶粒, 裂纹扩展沿多个滑移面同时进行, 且沿滑移方向以纯剪切方式扩展。当试样所承受的载荷未达到母材强度时, 母材的晶界强度小于晶内强度。因此, 在承受载荷情况下, 试样内部平面滑移沿晶界平面产生了滑移, 其断口形貌为沿晶断裂, 如图 4(b)中 C 处所示。

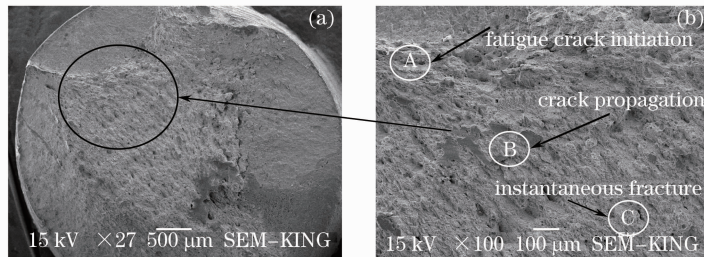


图 4 调质处理试样疲劳裂纹源与断口形貌。(a) 疲劳裂纹源; (b) 断口形貌

Fig. 4 Fatigue crack source and fracture morphology of the sample by quenching and tempering.

(a) Source of fatigue crack; (b) fracture morphology

激光淬火后试样疲劳裂纹源发生在试样次表层, 且裂纹源较少, 如图 5(a)所示。由于激光淬火的快速加热和冷却特性使得试样表面获得了淬火强化层, 在次表层形成孪晶-基体界面, 对抑制疲劳裂

纹的萌生有一定作用, 延缓了滑移在表层的形成, 使得疲劳裂纹源下移至次表层^[10]。同时, 激光淬火在试样表层形成压应力层, 也使得裂纹源下移, 萌生在次表层的冶金缺陷处 [图 5(b)中 D 处], 从而延长试

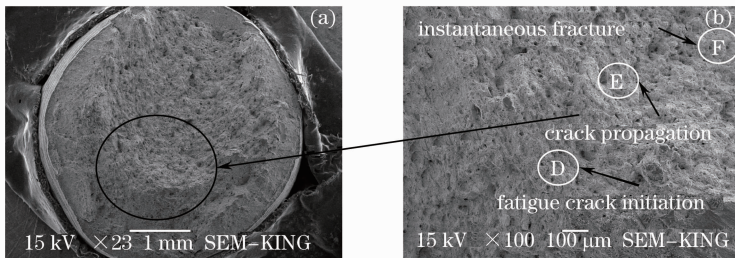


图 5 激光淬火试样疲劳裂纹源与断口形貌。(a) 疲劳裂纹源; (b) 断口形貌

Fig. 5 Fatigue crack source and fracture morphology of the sample by laser quenching.

(a) Source of fatigue crack; (b) fracture morphology

样疲劳裂纹萌生寿命^[11]。当内应力与外载荷的合力足够大时,在孪晶-基体界面附近形成一条驻留滑移带,最终发展成为疲劳裂纹,因此,激光淬火后疲劳裂纹萌生在试样次表层。由于激光淬火使强化层的晶粒细化,导致强化层与试样内部晶界数和位错密度有明显差异。当施加交变应力时,由于晶界数比较多,阻碍了滑移的进行,导致强化层和试样内部平面滑移速率出现差异,使裂纹向内扩展速度比向外扩展快^[12]。试样断口形貌仍呈现沿晶断裂,并夹杂着部分穿晶断裂,如图 5(b)中 F 处所示。

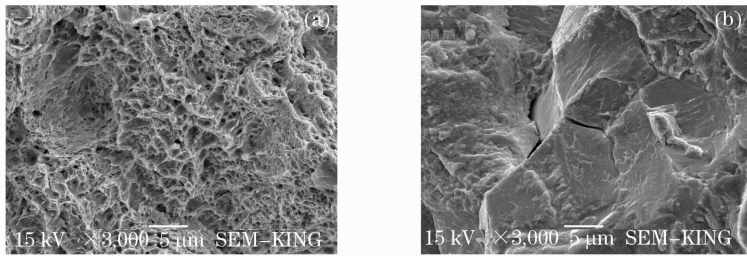


图 6 调质处理试样断口韧窝形貌。(a) 韧窝断裂;(b) 沿晶断裂

Fig. 6 Fracture morphologies of the sample dimple by quenching and tempering.

(a) Dimple fracture; (b) intergranular fracture

与调质处理相比,激光淬火试样在裂纹产生到扩展[图 5(b)中 D→E]过程中,断口韧窝没有明显的变化,如图 7(a)所示。图 7(b)为扩展区转入快速扩展区的断口形貌,可以看出沿晶断裂处晶粒小于图 6(b)中调质处理试样的晶粒,激光淬火后晶界数有所增加,阻碍了裂纹进一步快速扩展。在快速扩展阶段前,裂纹扩展方式为沿晶扩展。随着试样内部组织韧性的提高,裂纹扩展过程中逐渐出现塑性孔洞,最终形成沿晶和韧窝混合形貌。由于该区域

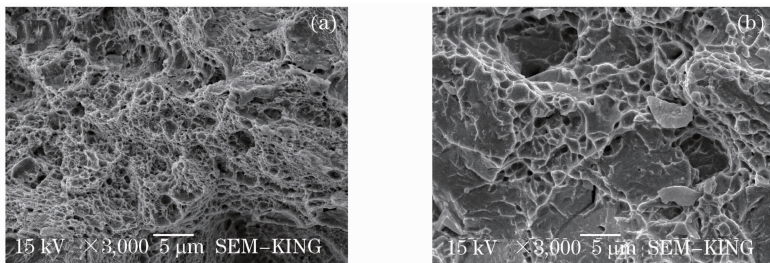


图 7 激光淬火断口韧窝形貌。(a) 韧窝断裂;(b) 沿晶和韧窝断裂

Fig. 7 Dimple morphologies of the sample fracture by laser quenching.

(a) Dimple fracture; (b) intergranular and dimple fracture

3.4 激光淬火强化机理

3.4.1 调质处理试样疲劳断裂

如图 8(a)所示,调质处理试样表层断口[图 4(b)中 A 处]存在一些杂质,是疲劳裂纹源的萌生点,并向杂质聚集方向延伸扩展,如图 8(b)所示。

3.3 断口韧窝

图 6 为调质处理试样断口韧窝形貌。在裂纹产生到扩展[图 4(b)中 A→B]过程中,试样内部瞬断区发生微孔聚合型断裂,形成不规则孔洞,在裂纹尖端前沿三向应力条件下长大,有连通趋势,如图 6(a)所示。随着载荷的增加,内部组织发生屈服变形,在断口处出现半球形空洞,并伴有撕裂棱。由图 6(b)可见,调质处理试样晶粒粗大,晶界数少,在裂纹扩展区断面呈现沿晶断裂形貌,与瞬断区撕裂韧窝形貌存在着明显的差异。

组织结构不均匀,存在夹杂硬质相,裂纹扩展至此夹杂硬质相时,在靠近裂纹端形成的孔洞优先长大。在孔洞长大过程中,夹杂硬质相靠近裂纹的一端首先受到力的作用,倾向于朝裂纹方向转动^[13-14],使得孔洞呈现不规则状。在交变载荷作用下,断裂面之间不断摩擦,使得其韧窝边缘钝化,韧窝显得浅。但是激光淬火后试样断口韧窝数量没有明显变化,瞬断区仍呈现塑性断裂,这说明激光淬火在提高疲劳强度的同时,保证了材料内部的韧性。

试样中第二相粒子破碎,并零散地分布在试样中,在疲劳交变载荷作用下,内部产生位错滑移。第二相粒子阻止了位错滑移的进行,在第二相粒子处产生应力集中,当应力增加到一定程度时,即出现疲劳裂纹。当裂纹扩展到此处时速率加快,分裂出二次裂

纹,如图 8(c)所示。断口内部存在着大量的二次裂纹,断口呈现出分层断裂现象。这是由于调质处理

试样内部存在着缺陷,易萌生裂纹,加快扩展速率形成宏观裂纹,导致分层开裂现象。

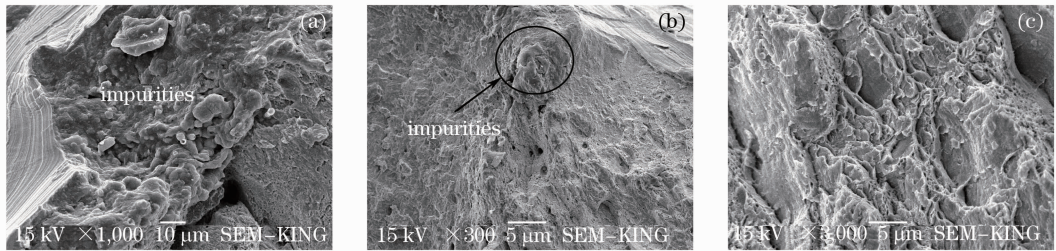


图 8 调质处理试样断裂缺陷。(a) 表层杂质;(b) 裂纹源处杂质;(c) 二次裂纹

Fig. 8 Fracture defects of the sample surface by quenching and tempering. (a) Surface impurities; (b) impurities of crack source; (c) secondary cracks

3.4.2 激光淬火强化层

激光淬火试样由于自身和液氮的冷却,使淬火温度急剧下降,表面得到细晶的马氏体,形成 1 mm 深度强化层,如图 9 所示,单道激光强化区截面呈月牙状分布。第二相粒子的破碎与零散分布使得外载荷不会在表层萌生疲劳裂纹,而是发生在次表层李

晶-基体界面与内部杂质处。同时,细晶使裂纹在扩展时受到了更多的晶粒和晶界阻碍,有效地延缓了裂纹扩展速率。在一定范围内,晶粒越细,强度越高,硬度越高^[15],因此,细小的马氏体是提高试样疲劳抗力的主要机制。

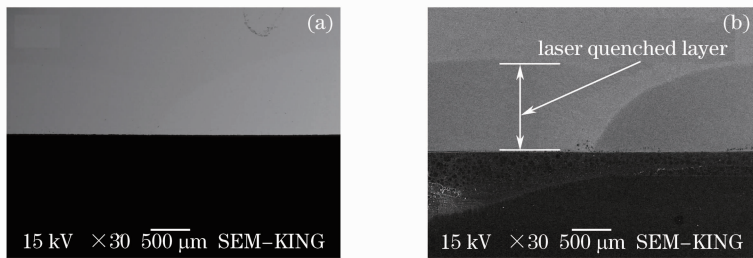


图 9 激光淬火前后 40CrNiMo 截面形貌。(a) 调质处理;(b) 激光淬火

Fig. 9 Section morphologies of 40CrNiMo before and after laser quenching. (a) Quenching and tempering; (b) laser quenching

3.4.3 激光淬火层表面金相组织与硬度

激光淬火后 40CrNiMo 表面显微组织主要由细小的马氏体和残余奥氏体组成,如图 10(a)所示。激光淬火搭接区主要由粗大的回火屈氏体、回火马氏体组成,如图 10(b)所示。用 HX-500 型显微硬度计进行硬度测试,测试条件:负荷为 1.96 N,保压

时间为 15 s,淬火区和搭接区显微硬度分别为 750 ~ 780 HV 和 400 ~ 420 HV,这表明激光淬火后 40CrNiMo 表面显微硬度产生了不均匀性,虽然在一定程度上降低了试样的疲劳性能,但不会形成疲劳破坏的裂纹源^[16]。

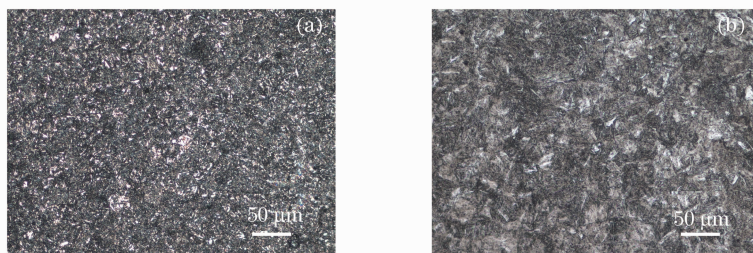


图 10 40CrNiMo 激光淬火后表面金相组织。(a) 淬火区;(b) 搭接区

Fig. 10 Metallographic microstructures of 40CrNiMo surface after laser quenching. (a) Quenching zone; (b) overlapping zone

3.4.4 残余应力

试样的疲劳断裂还与硬化层的应力状态有关,激

光淬火后残余应力采用常规法中 $\sin^2\psi$ 法测试,设备为 X-350-A 型 X 射线应力测试仪。对于 Cr 靶 K_α 辐

射,衍射面为(211)晶面。计数扫描方式为分步扫描, 2θ 扫描步距为 0.2° ,扫描范围为 $169^\circ\sim 142^\circ$,X射线强度用盖革-米勒计数器定时计数,每步计数时间为 0.5 s ,应力常数 $K=-318\text{ MPa}/(^{\circ})$ 。激光淬火后试样表面残余应力由拉应力 $88.6\pm 8\text{ MPa}$ [图 11(a)]转化为压应力 $-417.6\pm 47\text{ MPa}$ [图 11(b)],压应力值明显增大,半峰全宽 β 值也明显增加。这是由于激光淬火产生马氏体相变,晶粒尺寸变小,表现为高值的残余压应力。由于在次表层内保持着残余

压应力,降低了由施加载荷产生的切应力^[17],使裂纹稳定扩展的阻力变大,达到了提高疲劳强度的目的。激光淬火搭接区残余应力为 $-368.9\pm 41\text{ MPa}$,如图 11(c)所示,与激光淬火区残余应力相比,降低了 47.8 MPa ,这表明淬火区和搭接区残余应力稳定性较好,处于可控范围内。激光淬火处理形成的压应力延缓了疲劳损伤的微观过程^[18-19],有利于提高疲劳裂纹萌生的抗力。

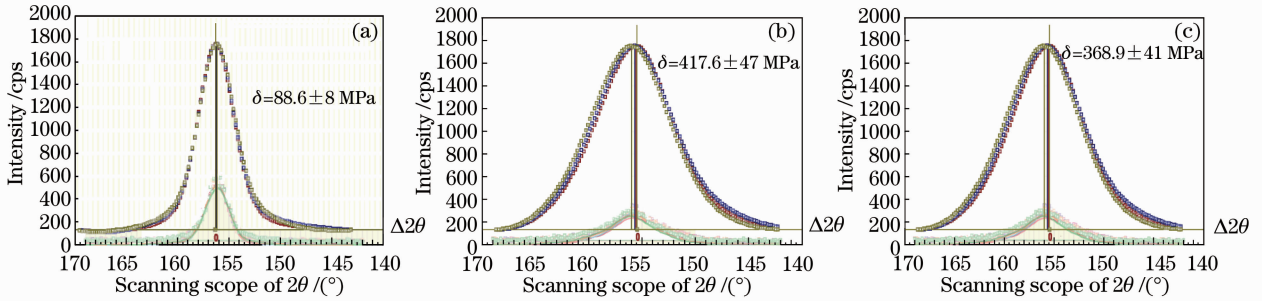


图 11 激光淬火前后残余应力分析。(a) 调质处理; (b) 淬火区; (c) 搭接区

Fig. 11 Analysis of residual stress before and after laser quenching. (a) Quenching and tempering; (b) quenching zone; (c) overlapping zone

3.4.5 激光淬火试样疲劳断裂

激光淬火后试样表层晶粒细化程度高于内部,虽然也存在少量杂质[图 12(a)],但没有在表层形成裂纹源,这表明裂纹扩展在表层的形成被有效地抑制。激光淬火后试样裂纹源发生在次表层[图 5(b)中 D 处],在剪应力作用下沿某一角度扩展至表面产生断

裂^[17]。在塑性钝化过程中,撕裂出的塑性孔洞如图 12(b)所示,形成了不规则韧窝,呈现出图 7(b)中沿晶和韧窝混合形貌。断口处二次裂纹数目明显少于图 8(c)中调质试样,且裂纹细小,无分层开裂现象,如图 12(c)所示。这表明激光淬火处理改变淬火强化层组织,有利于提高试样的止裂能力。

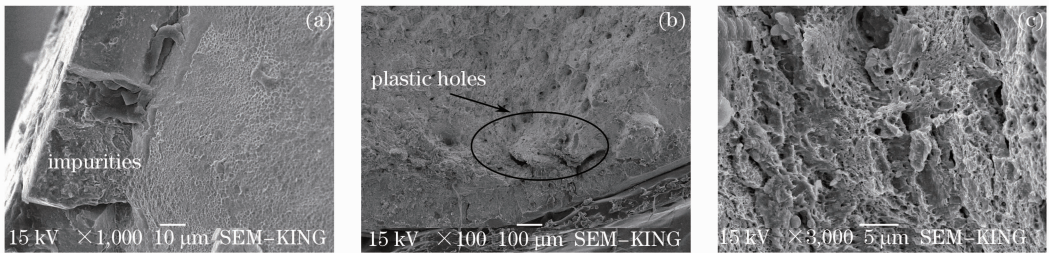


图 12 激光淬火试样断裂缺陷。(a) 表层杂质; (b) 塑性孔洞; (c) 二次裂纹

Fig. 12 Fracture defects of the sample by laser quenching. (a) Surface impurities; (b) plastic holes; (c) secondary cracks

3.4.6 分析与讨论

激光搭接区使得试样表面性能产生了不均匀性,对 40CrNiMo 高强度钢的疲劳性能产生了一定的影响,主要表现在:1) 搭接区产生回火屈氏体虽然在一定程度上降低了试样的疲劳强度,但是淬火区产生细小的马氏体提高了疲劳裂纹萌生的抗力,这是疲劳强度极限提高的主要原因之一;2) 淬火区和搭接区产生了显微硬度差,在一定程度上影响了试样的疲劳性能;3) 淬火区和搭接区残余应力差值

为 47.8 MPa ,仍处于压应力状态,对疲劳寿命和强度的影响在有限范围内。激光淬火在 40CrNiMo 高强度钢表面形成的强化层、细小的马氏体和残余压应力,抵消了上述不利因素,改善了疲劳断裂形式,提高了试样的疲劳强度极限。

4 结 论

1) 40CrNiMo 高强度钢调质处理试样疲劳极限为 626 MPa ,经过激光淬火后疲劳极限为

715 MPa, 疲劳强度提高了 14.2%。

2) 调质处理试样疲劳裂纹源萌生于试样表层, 激光淬火使材料表面形成强化层, 阻止了裂纹扩展和延伸, 使疲劳裂纹源由表层转移至次表层。

3) 激光淬火后试样表面形成的细化晶粒和残余压应力, 使得拉应力得到松弛, 是疲劳强度提高的主要机制。

参 考 文 献

- 1 M A S Torres, H J C Voorwald. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(8): 877-886.
- 2 M P Nascimento, R C Souza, W L Pigatin, *et al.*. Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(7): 607-618.
- 3 B Q Yang, G N Chen, K Zhang, *et al.*. A mechanical model for the quantification of the effect of laser quenching on CTOD in steels[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(4): 2180-2185.
- 4 Z Y Chen, G J Zhou, Z H Chen. Microstructure and hardness investigation of 17-4PH stainless steel by laser quenching [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 534(1): 536-541.
- 5 R L Mcdaniels, S A White, K Liaw, *et al.*. Effects of a laser surface processing induced heat-affected zone on the fatigue behavior of AISI 4340 steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 485(1-2): 500-507.
- 6 Li Haimei, Song Gang, Liu Yongzhi. Estimating formula of fatigue limits for metallic materials[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2002, 23(4): 26-29.
李海梅, 宋刚, 刘永志. 金属材料疲劳极限的估算[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2002, 23(4): 26-29.
- 7 Shao Honghong, Chen Guang, Chen Kangmin. Effects of surface treatments on the ultrasonic fatigue life of 40CrNiMo steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2006, 27(4): 65-68.
邵红红, 陈光, 陈康敏. 表面处理对 40CrNiMo 钢超声疲劳寿命的影响[J]. *材料热处理学报*, 2006, 27(4): 65-68.
- 8 Jian Haigen, Jiang Feng, Zheng Xiuyuan, *et al.*. Study on fatigue fractography of high strength and toughness aluminum alloy for aviation[J]. *Journal of Aeronautic Materials*, 2010, 30(4): 97-102.
蹇海根, 姜锋, 郑秀媛, 等. 航空用高强高韧铝合金疲劳断口特征的研究[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(4): 97-102.
- 9 Fu Zhiqiang, Pan Hongwei, Chen Guangzhi, *et al.*. Failure analysis of 40CrNiMo steel gear shaft[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2011, 36(S1): 376-378.
傅志强, 潘宏伟, 陈广志, 等. 40CrNiMo 钢齿轮轴断裂原因分析[J]. *金属热处理*, 2011, 36(S1): 376-378.
- 10 Wang Jianguo, Yang Shengli, Wang Hongying, *et al.*. Low cycle fatigue properties of 800MPa-grade ultrafine-grained steel[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(1): 75-78.
王建国, 杨胜利, 王红缨, 等. 800 MPa 级低合金高强度钢低周疲劳性能[J]. *北京科技大学学报*, 2005, 27(1): 75-78.
- 11 Hui Weijun, Nie Yihong, Fu Shuhong, *et al.*. Fatigue fracture behavior of high strength Cr-Mo-V steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, 28(5): 37-41.
惠卫军, 聂义宏, 付书红, 等. Cr-Mo-V 系高强度钢的疲劳断裂行为[J]. *材料热处理学报*, 2007, 28(5): 37-41.
- 12 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi, *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3323-3328.
罗新民, 张静文, 赵广志, 等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3323-3328.
- 13 Li Bin, Dong Wanyuan, Wang Xiaobing, *et al.*. Study of fatigue performance for high strength steel 30Cr3SiNiMoVA[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(2): 35-40.
李斌, 董万元, 王小兵, 等. 高强度钢 30Cr3SiNiMoVA 的疲劳特性研究[J]. *材料工程*, 2012(2): 35-40.
- 14 Xu Tianhan, Feng Yaorong, Song Shengyin, *et al.*. Effect of stress ratio on fracture morphology of fatigue crack of J55 steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2010, 22(1): 46-51.
许天旱, 冯耀荣, 宋生印, 等. 应力比对 J55 钢级疲劳裂纹断口形貌的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2010, 22(1): 46-51.
- 15 Cheng Yiyuan, Wang Yong, Han Bin, *et al.*. Microstructure and properties of 35CrMoA steel in laser quenching-nitriding [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 250-255.
程义远, 王勇, 韩彬, 等. 35CrMoA 钢激光淬火-渗氮复合处理微观组织与性能[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 250-255.
- 16 Shi Juan, Wu Gang, Fan Xueyan, *et al.*. The test and study of fatigue life and wear resistance of laser hardening gear [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2004, 25(1): 92-96.
石娟, 吴钢, 范雪燕, 等. 激光淬火齿轮的疲劳寿命和耐磨性试验研究[J]. *上海海运学院学报*, 2004, 25(1): 92-96.
- 17 Zhou Jianzhong, Wang Chengdong, Huang Shu, *et al.*. Study on fatigue crack growth performance of 6061-T6 aluminum alloy after laser shot peening [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0703009.
周建忠, 王呈栋, 黄舒, 等. 6061-T6 铝合金紧凑拉伸试样激光喷丸强化后的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0703009.
- 18 Zhang Xingquan, He Guangde, Qi Xiaoli, *et al.*. Investigation on contact fatigue strength of gear affected by laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 3187-3191.
张兴权, 何广德, 戚晓利, 等. 激光冲击强化对齿轮接触疲劳的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3187-3191.
- 19 Zhang Xiaodong, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.*. Microstructure and contact fatigue property of laser cladding and active screen plasma duplex treated coating[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603018.
张晓东, 董世运, 徐滨士, 等. 激光熔覆和活化屏等离子体氮化复合涂层组织与接触疲劳性能[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603018.

栏目编辑: 宋梅梅