

# 激光扫描加热铸轧辊套材料热疲劳性能测试

刘晓博, 王之桐, 李文

中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190

**摘要** 以 Nd:YAG 连续激光为热源, 激光扫描加热铸轧辊套材料 32Cr3Mo1V 表面, 接触冷却样品背面, 进行了热疲劳性能测试。用集总参数法测量了不同表面粗糙度和氧化状态下材料的激光吸收率, 并数值计算模拟了样品表面的温度循环和压应力状态。结果显示, 热循环 1000 周次后, 在样品表面烧蚀坑和粗大磨痕处均出现裂纹。1000~2000 周次热循环范围内, 裂纹长度与热循环次数呈线性关系。由于测试中忽略了铝铸轧过程中辊套承受的机械应力和铝液对辊套的作用, 测得的辊套裂纹扩展速率为实际值的一半。

**关键词** 激光技术; 激光热疲劳; 铸轧辊套; 32Cr3Mo1V

**中图分类号** TG115.5+7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.041412

## Thermal Fatigue Performance Test of Casting Roller Sleeve Material Heated by Laser Scanning

Liu Xiaobo, Wang Zhitong, Li Wen

*Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

**Abstract** By using Nd:YAG continuous laser as the heat resource to scan and heat the surface of the casting roller sleeve material 32Cr3Mo1V, the thermal fatigue performance is tested by contact cooling the back of the sample. The laser absorptivity of the sample with different surface roughness and oxidation state is measured with the lumped parametric method. The temperature cycle and compressive stress condition of the sample surface are simulated by numerical calculation. The results show that, after 1000 thermal cycles, cracks appear in the ablation hole and at positions with rough scratches on the sample surface. When the thermal cycle ranges from 1000 to 2000, the length of the crack is linearly related to the number of thermal cycles. Because the proposed method ignores the effects of mechanical stress and aluminum liquid on the roller sleeve, the growth rate of the crack length obtained from the test is only half of the actual one.

**Key words** laser technique; laser thermal fatigue; casting roller sleeve; 32Cr3Mo1V

**OCIS codes** 140.3390; 000.2658; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

双辊式铸轧工艺能够将熔融金属连续加工成不同宽度和厚度的板带坯, 广泛应用于铝加工行业。在铝铸轧辊使用过程中, 辊套内部使用冷却水循环, 辊套表面周期性地与熔融铝液接触, 承受着周向和径向的热冲击, 在热应力、接触应力和装配应力的共同作用下, 会发生疲劳开裂。由于辊套的热疲劳性能直接影响其使用寿命和铝板带坯的质量, 为保证正常生产, 辊套使用一段时间后需要下机修磨, 因此需要合适的方法对其热疲劳性能进行评价。

材料热疲劳实验按照研究的目的大致分为机理型和热裂型。机理型实验以 Coffin 型实验<sup>[1]</sup>为代表, 只

**收稿日期:** 2016-11-30; **收到修改稿日期:** 2016-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(11372322, 60877064)

**作者简介:** 刘晓博(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光热疲劳过程数值模拟方面的研究。E-mail: xblusmail@qq.com

**导师简介:** 王之桐(1972—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光与材料相互作用方面的研究。

E-mail: ztwang@imech.ac.cn(通信联系人)

产生一维应力状态,能够对裂纹的扩展进行定量测量。热裂型实验的方法多种多样,通常根据实际工况设计约束方式和热循环温度范围,热源采用热处理炉<sup>[2]</sup>、感应<sup>[3]</sup>、火焰<sup>[4]</sup>等。激光作为新型的热疲劳性能测试热源,其优点包括:1)加热速度快,能够缩短测试时间;2)局部加热,可以研究特殊位置如孔、沟槽的热疲劳性能;3)通过光束变换,能够模拟复杂的温度分布。Fantini等<sup>[5]</sup>使用1 kW功率的Nd:YAG连续激光器对燃气轮机叶片进行了热疲劳性能测试,并与镍基合金新叶片和修复叶片的热疲劳性能进行了对比。Rettig等<sup>[6]</sup>使用800 W功率的Nd:YAG连续激光器测试了燃气轮机叶片表面氧化锆涂层的热疲劳性能,通过数值计算研究了叶片表面氧化锆涂层的热疲劳破坏机理。Kutsuna等<sup>[7]</sup>使用脉冲Nd:YAG激光对蒸汽轮机外壳材料CrMo钢进行了热疲劳测试,热循环5400周次后,在样品环槽的根部观察到了疲劳裂纹。贾力等<sup>[8]</sup>使用千瓦级CO<sub>2</sub>激光研究了轧辊材料无限冷硬铸铁的热疲劳性能,实现了裂纹的原位观察,并给出了裂纹长度、宽度与循环次数的关系。刘日平等<sup>[9]</sup>使用同样的实验装置研究了Zr基非晶合金的热疲劳性能,发现热循环区出现了塑性变形;随着加热温度的提高或热循环次数的增加,加热区表面产生的微裂纹的数量和长度增加。宋宏伟等<sup>[10-15]</sup>使用3 kW功率的Nd:YAG激光器,通过光束整形模拟了发动机工件的热负荷,对活塞、缸盖进行了低周和高周疲劳实验,并通过温度场的数值模拟校验、优化了光束整形器件,通过数值模拟应力场对工件的损伤区域进行了预测。

本文以铝铸轧辊套材料32Cr3Mo1V为研究对象,提出一种激光扫描加热热疲劳测试方法,结合实验和数值计算,研究了辊套表面的热循环温度分布、应力状态和开裂方式。

## 2 测试方案

### 2.1 铝铸轧辊套辊套使用条件分析

32Cr3Mo1V材料的化学成分见表1。32Cr3Mo1V辊套工作时的热疲劳参数为:1)在铸轧辊套表面与铝液接触时,除了端部区域,轴向温度基本均匀,表面最高温度在500~600℃之间,内部水冷;2)辊套表层的热应力超过屈服极限,呈现低周疲劳特征<sup>[16]</sup>。

对高斯分布的圆形激光焦斑进行光束变换,形成矩形的匀强焦斑,以模拟辊套表面的等温区。利用激光扫描加热样品表面,接触冷却样品背面,以模拟辊套的工作状态。由于直接测量温度比较困难,使用集总参数法测量样品表面对激光的吸收率,数值模拟得到热循环温度分布。

表1 32Cr3Mo1V材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 32Cr3Mo1V (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
Content	0.280- 0.360	0.200- 0.400	0.200- 0.500	0- 0.015	0- 0.015	2.700- 3.200	0- 0.250	0.900- 1.100	0.150- 0.200	0- 0.250

### 2.2 光束变换

使用波长为1.06 μm的连续Nd:YAG激光作为热源,光束变换原理如图1所示。首先使用无暗斑匀束器件对光束进行均匀化处理,然后使用圆形光阑滤除杂波。光束整形器件包括一个凹面柱透镜和一个凸面

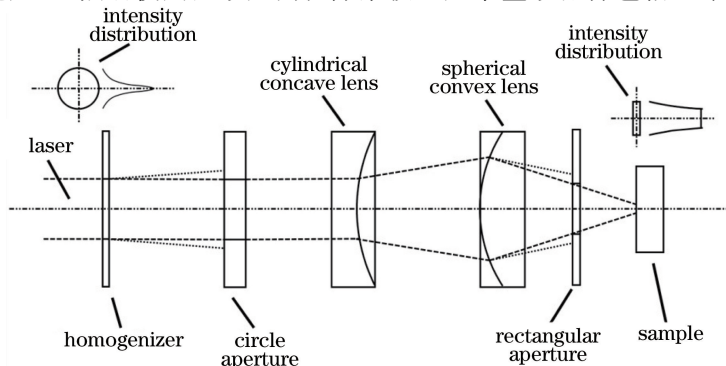


图1 光束变换原理图

Fig. 1 Schematic diagram of light beam transformation

球透镜。通过设计透镜参数和间距来获得不同的长宽比。最后使用矩形光阑进行滤波,获得规则的矩形光斑。为了便于研究,使用相纸烧蚀法评价激光焦斑,图2所示为用于热疲劳性能测试的矩形匀强激光焦斑,其中激光功率为75 W,光斑尺寸为2.8 mm×0.5 mm。

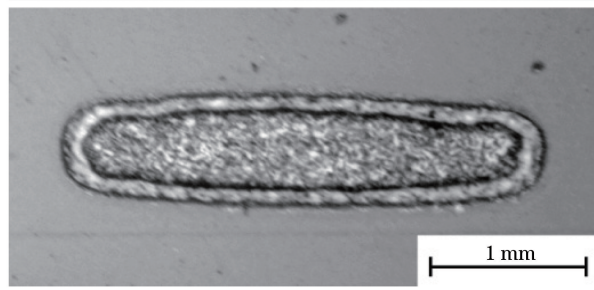


图2 矩形匀强激光焦斑

Fig. 2 Rectangular laser focus with uniform intensity distribution

### 2.3 激光吸收率的测量

样品表面对激光的吸收率是测试过程中的关键参数,会影响样品的温度场和应力场。对于确定的材料和激光波长,影响激光吸收率的因素包括表面粗糙度、表面氧化状态和温度。根据集总参数测量法<sup>[17-18]</sup>,当热量传入一定体积的固体时,固体内各个点的温度一般互不相同,固体内的温度场通常应按照三维传热模型进行计算。当固体内部的导热热阻很小且远小于固体表面与周围环境的换热热阻时,固体内部的温度趋于一致,可以认为整个固体在同一瞬间均处于同一温度,忽略固体内部的温度梯度,将三维的传热问题简化为质点传热问题。为了保证集总参数条件,将薄片样品(15 mm×9 mm×1 mm)镶嵌到铜块中,中间涂抹导热硅脂。在铜块背面固定4个K型热电偶进行测温,用绝热材料包裹铜块,只露出样品表面。使用经光束变换后的矩形匀强激光光斑对样品表面进行扫描加热。矩形光斑的长度略小于样品宽度,扫描长度为12 mm。激光功率为150 W,扫描速率为600 mm/min,往复扫描一次后测量温度。图3为热电偶温度响应曲线,“平台”部分温度与初始温度的差值即为温差,对4个热电偶温差数据取平均值,记为 $\Delta T$ 。激光吸收率为

$$A = P_{\text{abs}}/P_{\text{in}} = m_{\text{cu}}C_{\text{cu}}\Delta T/P_{\text{in}}, \quad (1)$$

式中 $P_{\text{abs}}$ 为材料吸收的热功率, $P_{\text{in}}$ 为激光输入功率, $m_{\text{cu}}$ 为铜的热沉质量, $C_{\text{cu}}$ 为铜的比热容,忽略样品表面与空气间的热交换。

使用金相砂纸制备表面粗糙度不同的样品,以研究表面粗糙度对激光吸收率的影响。分别在样品表面未氧化时和氧化后进行测量,以研究表面氧化状态对激光吸收率的影响。由于样品表面温度、激光吸收率以及扫描速度三者交叉相关,因此难以单独研究温度对激光吸收率的影响。本测试中每种样品测量三次激光吸收率后取平均值,结果如图4所示。可以看出,随着样品表面粗糙度的升高,激光吸收率快速增大,当表面粗糙度大于0.1  $\mu\text{m}$ 后,激光吸收率的增速降低。与粗糙度相比,样品表面氧化状态对样品激光吸收率的影响更大,表面氧化后,激光吸收率提高了62%。

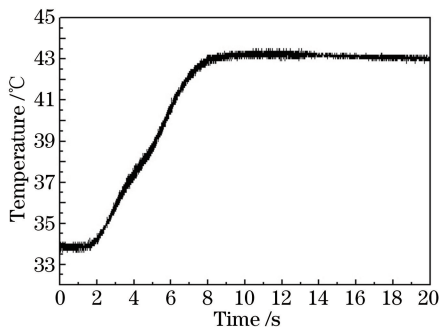


图3 热电偶的温度响应

Fig. 3 Temperature response of thermocouple

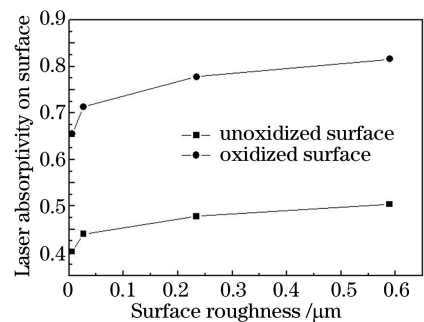


图4 表面氧化与表面粗糙度对激光吸收率的影响

Fig. 4 Influence of surface oxidization and surface roughness on laser absorptivity

由于激光的烧蚀作用,材料表面粗糙度和氧化程度会随着热循环次数的增加而发生变化,激光吸收率也相应发生变化。为了减少表面粗糙度变化对激光吸收率的影响,样品表面粗糙度取图 4 曲线中相对稳定的阶段,并在样品表面预制氧化膜以保证稳定的激光吸收率。

### 3 实验装置和样品制备

图 5 为激光热疲劳实验装置示意图。控制器同步控制激光的通断和滑台移动,对样品 32Cr3Mo1V 表面进行扫描加热。样品背面涂抹导热硅脂后与水冷(20 °C)铜块接触。使用销钉对样品进行定位,样品边缘使用螺钉压紧。波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的连续 Nd:YAG 激光通过光束变换后聚焦到样品表面进行扫描。样品尺寸为 20 mm $\times$ 25 mm $\times$ 6 mm。激光的扫描路径如图 6 所示,扫描长度为 11 mm,扫描速率为 300 mm/min。热循环一次后,样品冷却 2.2 s 再进行下一次循环。利用砂纸磨削样品表面,直至表面粗糙度为 0.23  $\mu\text{m}$ ,磨痕方向与扫描方向垂直。将样品在 400 °C 热处理炉中放置 0.5 h,使表面预先形成氧化膜。对照图 4,样品表面的激光吸收率为 0.778。每热循环 500 周次后,取出样品在显微镜下观察扫描路径的中心区域,测量裂纹长度,再放回滑台进行下次循环加热。

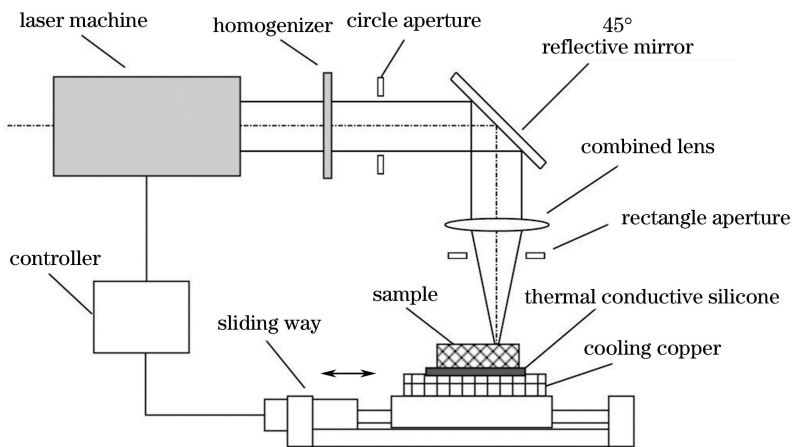


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental device

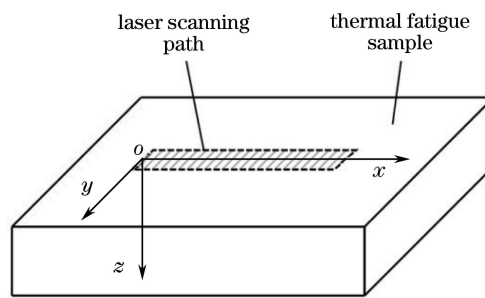


图 6 激光扫描加热示意图

Fig. 6 Schematic diagram of laser scanning and heating

### 4 数值模拟

使用 ANSYS 软件建立有限元模型以进行数值计算,32Cr3Mo1V 的计算参数见表 2<sup>[18-19]</sup>。图 7 为初次激光加热时扫描路径上样品表面的最高温度分布。在扫描开始阶段,温度沿扫描路径方向( $x$  轴正方向)快速升高,当扫描长度超过 4 mm 后,温度逐渐趋于稳定,如图 7(a)所示。宽度( $y$  轴, $x=5.5$  mm, $z=0$  mm)方向上,激光焦斑边缘的温度较低,离焦斑中心 $\pm 1$  mm 范围内,温度保持在 500~558 °C,近似等温区,如图 7(b)所示。厚度( $z$  轴, $x=5.5$  mm, $y=0$  mm)方向上,温度下降很快,离表面 1 mm 处的温度已经降低为

150 °C,如图 7(c)所示。图 8 为扫描路径中点处( $x=5.5$  mm, $y=0$  mm, $z=0$  mm)5 次热循环的温度曲线。由于样品底面与水冷铜块接触,因此几次循环加热后温度曲线已经稳定,热循环温度范围为 26.4~576 °C。图 9 为线弹性应力计算结果。从图 9(a)中可以看出,激光扫描长度超过 1.5 mm 后,扫描路径上的等效应力已经超过室温下的屈服强度(约 1000 MPa)<sup>[16]</sup>,满足低周疲劳条件。图 9(b)、(c)为扫描路径中点处的  $x$  轴和  $y$  轴方向压应力随时间的变化,可以看出  $x$  轴方向的压应力峰值为 940 MPa,远小于  $y$  轴方向的压应力峰值 1600 MPa。因此可以推断,热疲劳裂纹将沿激光扫描路径( $x$  轴)方向形成并扩展。

表 2 32Cr3Mo1V 的计算参数<sup>[16,19]</sup>

Table 2 Calculation parameters of 32Cr3Mo1V

Thermal conductivity / ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Specific heat capacity / ( $\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Density / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Modulus of elasticity /GPa	Poisson ratio	Linear expansion coefficient /( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )
36.06	460	7830	210	0.3	14.4

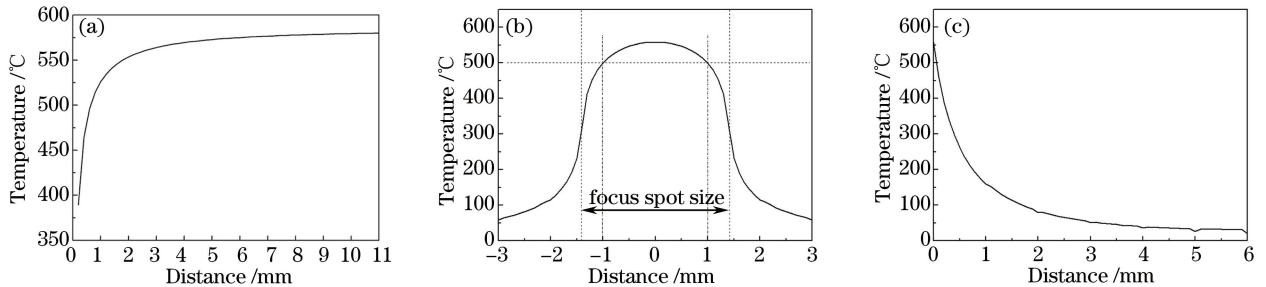


图 7 扫描路径上最高温度分布。(a)沿  $x$  轴方向, $y=0$  mm, $z=0$  mm;(b)沿  $y$  轴方向, $x=5.5$  mm, $z=0$  mm;(c)沿  $z$  轴方向, $x=5.5$  mm, $y=0$  mm

Fig. 7 Distribution of highest temperature along scanning path. (a) Along  $x$  axis,  $y=0$  mm,  $z=0$  mm; (b) along  $y$  axis,  $x=5.5$  mm,  $z=0$  mm; (c) along  $z$  axis,  $x=5.5$  mm,  $y=0$  mm

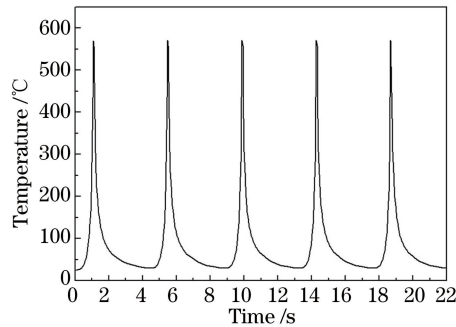
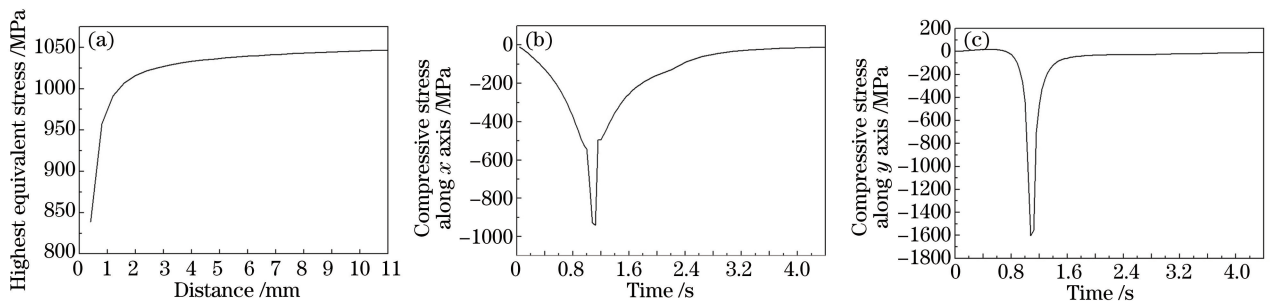
图 8 温度循环曲线( $x=5.5$  mm, $y=0$  mm, $z=0$  mm)Fig. 8 Temperature cyclic curve ( $x=5.5$  mm,  $y=0$  mm,  $z=0$  mm)图 9 扫描路径上的应力。(a)最高等效应力;扫描路径中点处沿(b)  $x$  轴和(c)  $y$  轴方向上的压应力

Fig. 9 Stress along scanning path. (a) Highest equivalent stress; compressive stresses along (b)  $x$  axis and (c)  $y$  axis at scanning path midpoint

## 5 实验结果分析

考察扫描路径的中央区域。在热循环 1000 周次后,发现样品表面出现裂纹。裂纹开裂方向与扫描方向平行,这与数值模拟的预测结果一致。裂纹在两种位置萌生:1) 粗糙度高于平均值的粗大磨痕处,如图 10(a)所示;2) 烧蚀坑内(局部材料抗氧化能力差会形成烧蚀坑,其表面粗糙度大),如图 10(b)所示,其中激光从右向左扫描。由于表面粗糙度越大,激光吸收率越高(图 4),这两种位置的热应力大于表面其他地方的,容易萌生裂纹。选择 10 条裂纹进行测量,发现裂纹平均长度为  $33.2 \mu\text{m}$ (见表 3),宽度在微米级。

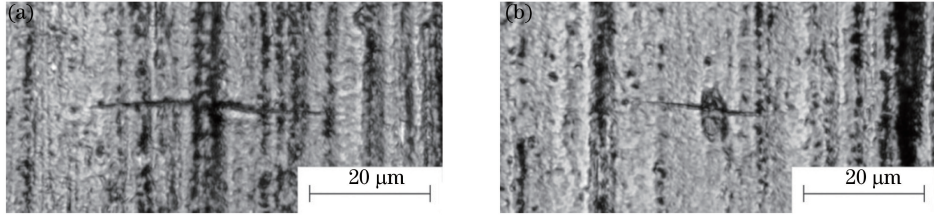


图 10 1000 周次热循环后样品表面的热疲劳裂纹(激光从右向左扫描)。(a)粗大磨痕处;(b)烧蚀坑内

Fig. 10 Thermal fatigue cracks on sample surface after 1000 thermal cycles (laser scanning from right to left).

(a) Position with rough scratch; (b) in ablation holes

表 3 1000 周次热循环后的裂纹长度

Table 3 Length of cracks after 1000 thermal cycles

Crack number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Crack length / $\mu\text{m}$	35	24.4	23.6	26.4	20	38.6	47	44.5	50.3	22.3

不同热循环周次下试样表面的热疲劳裂纹如图 11 所示。1000 周次热循环后,裂纹 1 长度为  $35 \mu\text{m}$ ,如图 11(a)所示。随着循环次数的增加,裂纹长度扩展,如图 11(b)、(c)所示。2000 周次时,裂纹长度为  $112.3 \mu\text{m}$ ,如图 11(d)所示。2000 周次以上,表面裂纹增多,相互连通,无法定量测量。1000~2000 周次热循环范围内,裂纹长度与热循环次数为线性关系,裂纹的扩展速率(斜率)为  $7.74 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{cycle}$ ,如图 12 所示。

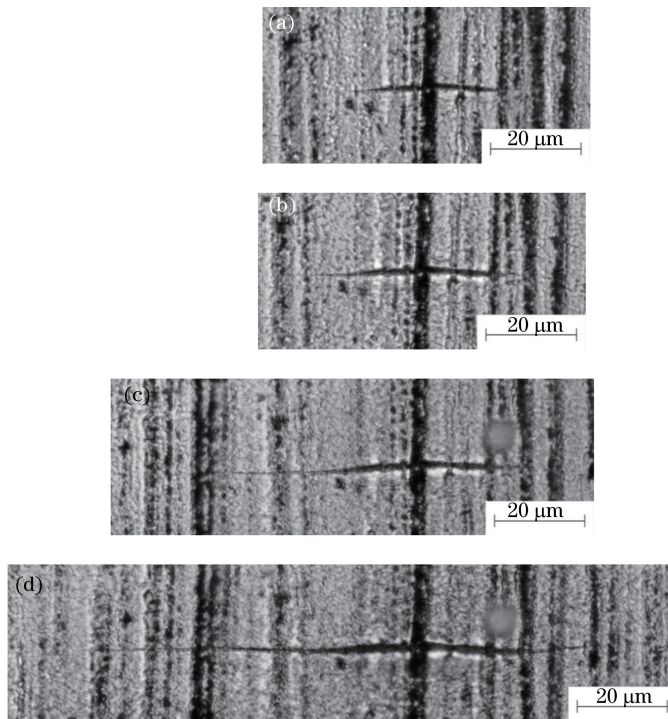


图 11 不同热循环周次下试样表面的热疲劳裂纹(激光从右向左扫描)。(a) 1000 周;(b) 1200 周;(c) 1500 周;(d) 2000 周

Fig. 11 Thermal fatigue cracks on sample surface under different thermal cycles (laser scanning from right to left).

(a) 1000 cycles; (b) 1200 cycles; (c) 1500 cycles; (d) 2000 cycles

在激光扫描加热过程中,样品表面的温差达到了 500 °C 以上,与实际辊套的热循环温差相当。由于裂纹在表面形成,因此样品厚度与实际辊套厚度的差别可忽略不计。铝铸轧辊套通常使用约  $3 \times 10^4$  周次后进行修磨,图 13 为辊套表面裂纹照片。取 10 条典型裂纹,测得裂纹平均长度为 4.5 mm,裂纹扩展速率为  $15 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{cycle}$ 。可以看出,实际辊套表面裂纹的扩展速率是本测试方法的两倍。在铝铸轧过程中,辊套除了承受交变的热应力外,还承受一定的机械应力。此外,铝液凝固在裂纹尖端,阻止了裂纹的闭合,也对裂纹扩展有促进作用。而本测试忽略了机械应力和铝液的作用,因此得到的裂纹扩展速率偏低。

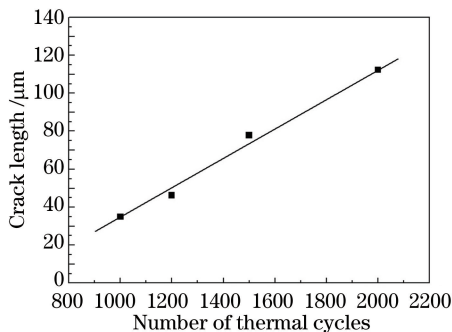


图 12 裂纹长度与热循环次数线性拟合曲线

Fig. 12 Linear fitting curve of crack length and number of thermal cycles

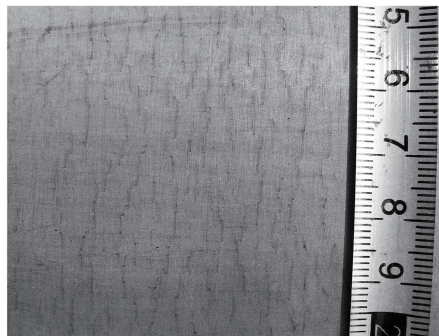


图 13 铸轧辊套表面裂纹

Fig. 13 Cracks on surface of casting roller sleeve

## 6 结 论

以铸轧辊套材料 32Cr3Mo1V 为研究对象,研究了一种激光扫描加热的热疲劳测试方法。对激光束进行光束变换,通过预制表面粗糙度和预氧化以确保材料对激光的吸收率相对稳定,数值计算修正热循环温度,模拟了辊套的热疲劳参数,在样品表面形成了与扫描方向平行的裂纹。分析热疲劳裂纹出现位置,认为粗大磨痕处和抗氧化性缺陷处的高表面粗糙度增大了激光吸收率,导致局部较高的热应力,诱发了裂纹萌生。通过测量裂纹长度,得出热循环 1000~2000 周次时,裂纹的扩展速率为  $7.74 \times 10^{-2} \mu\text{m}/\text{cycle}$ 。该方法能够发现和测量长度为百微米级别的疲劳裂纹,并能对材料的抗氧化性进行评价,适用于研究裂纹的萌生和早期扩展规律。由于忽略了铝铸轧过程中辊套承受的机械应力和铝液对辊套的作用,该测量方法得到的辊套裂纹扩展速率为实际的一半。

## 参 考 文 献

- [1] 平修二. 热应力与热疲劳(基础理论与设计应用)[M]. 郭廷伟, 李安定, 译. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [2] Li Fuhai, Tong Xin, Liu Min, *et al.* Thermal fatigue resistance of laser surface alloying layers on the surface of 32Cr3Mo1V substrate[J]. *Materials Research and Application*, 2011, 5(2): 97-104.  
李福海, 佟鑫, 刘敏, 等. 32Cr3Mo1V 表面激光合金化层热疲劳性能的研究[J]. *材料研究与应用*, 2011, 5(2): 97-104.
- [3] Kundalkar D, Mavalankar M, Tewari A, *et al.* Effect of gas nitriding on the thermal fatigue behavior of martensitic chromium hot-work tool steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 651: 391-398.
- [4] Birol Y. Thermal fatigue testing of Inconel 617 and Stellite 6 alloys as potential tooling materials for thixoforming of steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(7-8): 1938-1945.
- [5] Fantini V, Serri L, Bianchi P. Laser thermal shock and fatigue testing system[C]. SPIE, 1997, 3097: 538-545.
- [6] Rettig U, Bast U, Steiner D, *et al.* Characterization of fatigue mechanisms of thermal barrier coatings by a novel laser-based test[C]. *The International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, Stockholm, 1998: 1-8.
- [7] Kutsuna M, Fujita S, Sugita Y, *et al.* Thermal fatigue test for turbine housing by a pulse YAG Laser[C]. SPIE, 2000, 3888: 438-445.
- [8] Jia Li, Sun Zhigang. Investigation on laser system used on forecasting thermal fatigue performance of roll [J]. *Industrial Heating*, 2009, 38(5): 63-64.

- 贾力, 孙智刚. 激光热疲劳实验系统在预测轧辊热疲劳性能上的研究[J]. 工业加热, 2009, 38(5): 63-64.
- [9] 景勤, 赵亮, 苑辉, 等. 激光脉冲加热条件下 Zr 基非晶合金晶化及热疲劳行为[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(6): 706-710.
- [10] Song Hongwei, Yu Gang, Wang Lixin, *et al.* Laser-induced thermal loadings on pistons[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 701-704.  
宋宏伟, 虞钢, 王立新, 等. 激光诱发活塞的热负荷[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 701-704.
- [11] Song Hongwei, Li Shaoxia, Yu Gang. Intensity distribution design for laser-induced thermal loading based on numerical simulation[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 842-845.  
宋宏伟, 李少霞, 虞钢. 基于数值模拟的激光热负荷光强分布设计[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 842-845.
- [12] Tan Jiansong, Pang Ming, Xie Zhimin, *et al.* Numerical simulation of thermal loading on piston by laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 970-974.  
谭建松, 庞铭, 解志民, 等. 活塞激光热负荷数值模拟[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 970-974.
- [13] Pang Ming, Tan Jiansong, Xie Zhimin. Numerical simulation of stress field for laser thermal loading of piston[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2011, 9(1): 17-20.  
庞铭, 谭建松, 解志民. 活塞激光热负荷应力场数值模拟[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(1): 17-20.
- [14] Nie Shuzhen, Sun Hui, Yu Gang, *et al.* Study on laser thermal loading test with non-symmetric and non-uniform shaped laser beam[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091408.  
聂树真, 孙辉, 虞钢, 等. 非对称非均匀分布整形光束用于激光热负荷试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091408.
- [15] Song H W, Yu G, Tan J S, *et al.* Thermal fatigue on pistons induced by shaped high power laser. Part I: Experimental study of transient temperature field and temperature oscillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(3-4): 757-767.
- [16] Wu Weize. Research on the raising the life of the casting roll shell[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005: 29.  
吴维泽. 提高铸轧辊套寿命的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005: 29.
- [17] Lin Xiuchuan, Shao Tianmin. Lumped method for the measurement of laser absorptance of materials[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(5): 854-859.  
蔺秀川, 邵天敏. 利用集总参数法测量材料对激光的吸收率[J]. 物理学报, 2001, 50(5): 854-859.
- [18] Cui Chunyang, Wu Wei, Yu Gang, *et al.* On laser absorptivity of ductile iron[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(7): 977-980.  
崔春阳, 吴炜, 虞钢, 等. 球墨铸铁材料对激光的吸收率[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 977-980.
- [19] Li Shande. Thermal structural coupling and the fatigue life of the roll shell[D]. Changsha: Central South University, 2006: 22.  
李善德. 铸轧辊套热结构耦合分析及其疲劳寿命研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006: 22.