

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190415004

## 32Cr3Mo1V 钢表面激光离散 Cr 合金化的热疲劳性能

李文, 王之桐

(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 100090)

**摘要:** 为了研究增强 32Cr3Mo1V 铸轧辊套材料的热疲劳性能的方法, 使用连续 Nd:YAG 激光制备表面离散 Cr 合金化试样。使用激光扫描加热模拟实际辊套的表面温度和分布, 测试试样的热疲劳性能。通过对试样的准原位观察, 发现疲劳裂纹在氧化膜点蚀处萌生并扩展。通过 SEM 观察和 EDAX 分析, 发现在热循环 300 周次时, 基体中的 Cr 元素已经耗尽, 形成疲劳裂纹, 而合金化区和热影响区的组织保持完整。合金化区中 Cr 含量达到 10.41%, 含氧量仅为基体的 2.8%; 热影响区的 Cr 元素含量为 3.41%, 含氧量为基体的 7.2%。结合金属高温氧化理论和材料疲劳理论分析, 认为高 Cr 含量在试样表面形成薄且致密的氧化膜, 抑制氧化膜的点蚀现象, 避免裂纹的萌生; 而热影响区中显微组织的高 Cr 含量和残余压应力结合阻滞疲劳裂纹的扩展, 使裂纹扩展速率降低近一个量级。

**关键词:** 激光; 热疲劳; 铸轧辊套; 表面离散; Cr 合金化

中图分类号: TG174.46

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2020)01-0110-07

### Thermal Fatigue Performance of Laser Surface Discrete Chrome Alloyed 32Cr3Mo1V Steel

LI Wen, WANG Zhitong

(Key Lab of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to study the method improving the thermal fatigue performance of 32Cr3Mo1V steel used in the casting roll sleeve, the surface discrete chrome alloyed specimens were prepared by continuous Nd:YAG laser. The surface temperature and distribution of the actual roller sleeve were simulated by laser scanning heating, and the thermal fatigue properties of the samples were tested. In the in-situ observation of specimen, fatigue cracks were found to initiate and propagate at the oxide film pitting. By means of SEM observation and EDAX analysis to the specimens, it was found in the base material by heat cycling 300 times that the chrome elements had been exhausted and the fatigue cracks had been formed, while the microstructures of alloyed zone and heat affected zone (HAZ) remains intact. By heat cycling 300 times the content of chrome is 10.41% and the content of oxygen is only 2.8% of that of the base material in the alloyed zone, and the content of chrome is 3.41% and the content of oxygen is 7.2% of that of the base material in HAZ. Based on the theories of high-temperature oxidation and material fatigue, it is considered that high chrome content of material forms a kind of thin and compact oxide film on the surface of specimen, which suppresses the pitting of the oxide film and avoids the initiation of crack, while the combination of high chrome content and residual compressive stress in the microstructures of HAZ blocks the propagation of fatigue crack and reduces the crack growth rate by nearly one order of magnitude.

**Keywords:** laser; thermal fatigue; casting roll sleeve; surface discrete; chrome alloying

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2020-01-07

通信作者: 王之桐(1972—), 男(汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 激光表面改性; E-mail: ztwang@imech.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11372322, 60877064)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (11372322, 60877064)

引用格式: 李文, 王之桐. 32Cr3Mo1V 钢表面激光离散 Cr 合金化的热疲劳性能[J]. 中国表面工程, 2020, 33(1): 110-116.

LI W, WANG Z T. Thermal fatigue performance of laser surface discrete chrome alloyed 32Cr3Mo1V steel[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(1): 110-116.

## 0 引言

自从 1865 年 Henry Bessemer 发明辊式铸轧方法以来,这项技术在铝加工行业中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。在铸轧辊使用过程中,辊套内部使用冷却水循环,辊套表面周期性的与熔融的铝液接触,承受着周向和径向的热冲击。辊套表面在热应力、接触应力和装配应力的共同作用下,发生疲劳开裂。张立华等<sup>[2]</sup>发现热应力比其他应力高了一个量级,因此辊套的热疲劳性能直接影响其使用寿命和铝板带坏的质量。许志强等<sup>[3]</sup>通过对实际铝铸轧辊套表面进行着色法分析,发现裂纹方向为铸轧辊周向,与机械加工的切削痕迹方向基本相同。他们认为辊套表面裂纹起源于机械加工产生的微缺陷,该处形成的应力集中促进了裂纹的萌生。Yasniiy 等<sup>[4]</sup>对实际铸轧辊套(25 Kh1M1F)的表层破坏情况进行了研究,通过对表面裂纹长度、方向和分布的测量,以及组织的硬度分析,认为材料结构的破坏与表面下的深度相关,表层的破坏比亚表层(表面下 9~32 mm)大 60%~72%。由于裂纹是从辊套表面萌生和扩展,因此通过表面强化,有望抑制裂纹萌生、阻滞裂纹扩展,提高辊套的使用寿命,改善铝板坏质量。张立华等<sup>[5]</sup>对铝铸轧辊套的温度场和应力场进行了数值模拟,结果表明辊套表面的等效应力大于 1000 MPa,高于辊套材料 32Cr3Mo1V 的屈服强度,呈现低周应变疲劳特征。

相对表面整体强化,在材料表面实施点阵式的强化,形成相对独立的强化点或区域,并保留部分原始表面,这种强化方法称为离散强化。离散强化可以在材料表面形成一种强韧相间的复合结构。同时,离散强化能更好地释放应力,避免工艺裂纹的产生。王之桐等<sup>[6]</sup>使用激光诱导放电方法对材料表面离散强化进行探索性研究。王海龙<sup>[7]</sup>对球墨铸铁热轧辊进行激光表面离散合金化,发现合金化表面的裂纹数量、密度远低于原始材料。Li 等<sup>[8-9]</sup>使用 CO<sub>2</sub> 激光对辊套材料 32Cr3Mo1V 进行表面带状 Cr 和 Co 的合金化,

并对比两种合金化表面的热疲劳性能,发现两种合金化层均能延缓、阻滞疲劳裂纹的产生,合金层内裂纹覆盖面积和裂纹深度均小于基体。同时,硬度高于基体的 Cr 合金化层的热疲劳性能优于硬度低于基体的 Co 合金化层。张津等<sup>[10]</sup>利用电泳沉积和热压滤烧结相结合的方法在 32Cr2MoV 钢表面制备氧化铝和氧化锆的陶瓷涂层,并研究该涂层的高温氧化行为,发现陶瓷涂层对基体起到抗氧化保护作用。

参考以上研究结果,文中制备表面离散 Cr 合金化的 32Cr3Mo1V 材料样品,采用激光扫描加热的测试方法<sup>[11]</sup>对该样品的热疲劳性能进行评价。相对于常规的炉中加热、液冷的热疲劳方法<sup>[12]</sup>,激光扫描加热的热疲劳测试方法能够定向诱导裂纹扩展并实现准原位观察,可以对裂纹扩展情况进行定量分析。

## 1 试验制备

### 1.1 表面离散 Cr 合金化

32Cr3Mo1V 是一种常用的铝铸轧辊套材料,其化学成分如表 1 所示。对废辊套通过气割取料,机械加工成尺寸为 25 mm×20 mm×6 mm 的试块,经 600 °C/2 h 退火<sup>[13]</sup>后使用。所用的合金粉末为纯 Cr 粉,粒度小于 80 μm。将粉末加入酒精和粘接剂的混合液中,粉末与混合液的体积比为 1:5,用喷枪将溶液均匀地喷在试样的表面上,粉层的厚度约为 100 μm。采用连续功率为 350 W、脉冲宽度为 200 ms 的 YAG 激光,在试样表面制备一个合金点。合金化区直径为 1 mm,深度 450 μm。包括热影响区后,合金点的总直径为 1.4 mm,深度 600 μm(图 1)。对试样进行 200 °C/2 h 消应力退火,沿合金点中心从表面向基体测量显微硬度。从图 2 中看出,合金化区的硬度与热影响区的硬度基本相当(650~690 HV<sub>0.2</sub>),约为基体硬度(360~380 HV<sub>0.2</sub>)的 1.8 倍。对合金点截面做 EDAX 线扫描(图 3),Cr 元素在合金化区内分布均匀,含量(质量分数,下同)为基体的 2.3 倍。而热影响区的 Cr 元素没有增加,和基体相当。

表 1 32Cr3Mo1V 的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 32Cr3Mo1V

(w/%)

| Element | C             | Si            | Mn            | P           | S           | Cr           | Ni         | Mo            | V             | Cu         |
|---------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|--------------|------------|---------------|---------------|------------|
| Content | 0.28-<br>0.36 | 0.20-<br>0.40 | 0.20-<br>0.50 | 0-<br>0.015 | 0-<br>0.015 | 2.7-<br>3.20 | 0-<br>0.25 | 0.90-<br>1.10 | 0.15-<br>0.20 | 0-<br>0.25 |

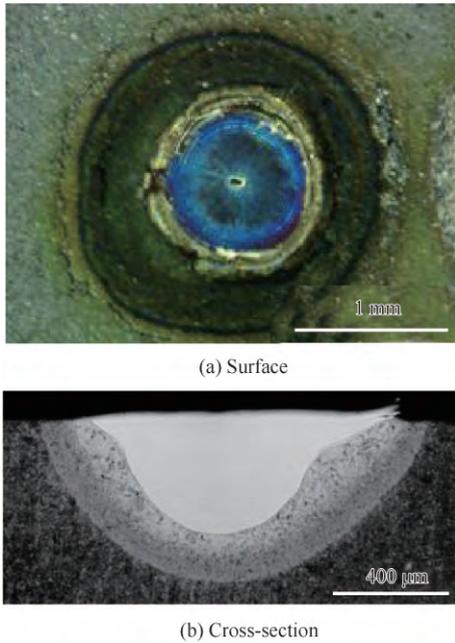


图1 合金点表面及截面形貌

Fig. 1 Surface and cross section morphologies of alloyed area

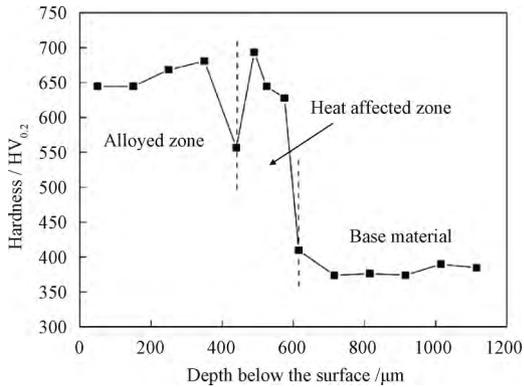


图2 200 °C/2 h 消应力退火合金点的硬度

Fig. 2 Hardness of alloyed area after annealing at 200 °C/2 h

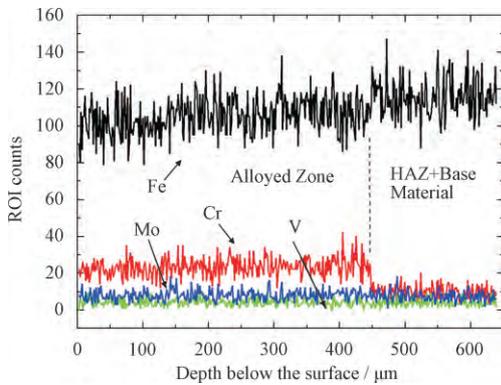


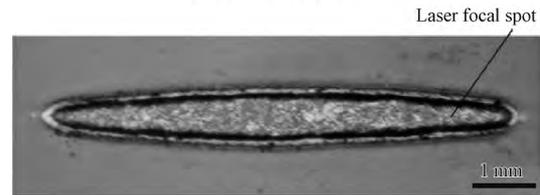
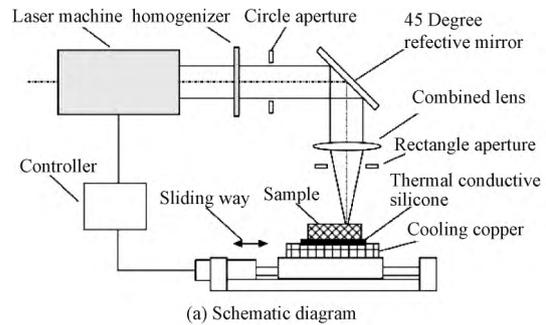
图3 合金点的元素含量分布

Fig. 3 Element content distribution of alloyed area

1.2 热疲劳试验装置和方法

图4 为激光热疲劳装置示意图。使用波长为

1.06 μm 的连续 Nd:YAG 激光作为热源。控制器同步控制激光的通断和滑台移动,对试样表面进行扫描加热和冷却。在激光光路中使用无暗斑匀束器件将激光光斑的光强分布从高斯分布转变为均匀分布,避免加热过程中材料表面局部熔化。再通过光束整形器件将圆形光斑转换为条形光斑聚焦到试样表面。试样表面使用 400~5000 号砂纸磨平、抛光。试样背面涂抹导热硅脂与水冷(20 °C)铜块接触。使用销钉对试样进行定位,试样边缘使用螺钉压紧。使用软件对瞬态温度场进行模拟计算,温度场数值计算参数见表 2<sup>[14-15]</sup>。



(b) Photo of laser focus

图4 激光热疲劳装置示意图

Fig. 4 Sketch diagram of laser heating fatigue device

表2 32Cr3Mo1V 的数值计算参数

Table 2 Numerical calculation parameters of 32Cr3Mo1V

| Parameters  | Value |
|---|-------|
| Thermal conductivity/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )    | 36.06 |
| Specific heat capacity/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 460   |
| Density/(K·m <sup>-3</sup> )                                  | 7830  |
| Laser absorption rate   | 0.655 |

将激光光斑按照面积简化为 5.2 mm × 0.6 mm 的矩形。令激光扫描方向为 x 轴,条状光斑的长轴垂直扫描方向,为 y 轴。激光输出功率为 180 W,扫描速度为 600 mm/min,扫描长度为 12 mm。激光停止后,冷却 3.5 s。图5 为激光扫描路径上温度分布的数值模拟结果。从图 5(a)中可以看出,随着扫描长度的增加,温度在开始阶段快速升高,扫描长度大于 4 mm 后,温

度逐渐稳定在 590 °C 左右。图 5(b) 和图 5(c) 为激光扫描到路径中点处 Y 方向和 Z 方向的温度分布。Y 方向的温度曲线中部平坦, 在 2 mm 的范围内, 温度变化为 580~590 °C, 形成了一个近似的等温区。Z 方向的温度曲线沿表面向内快速下降, 0.5 mm 处下降到表面温度的一半。通

过温度场的模拟计算, 认为条状激光光斑扫描加热形成的温度场能够模拟铝铸轧辊套表面的热循环温度和等温区, 可以用于评价合金点的热疲劳性能。图 6 为扫描路径中点的 5 次热循环温度曲线。由于样品底面与水冷铜块接触, 因此 3 次循环加热后温度曲线稳定在 22.5~591.6 °C。

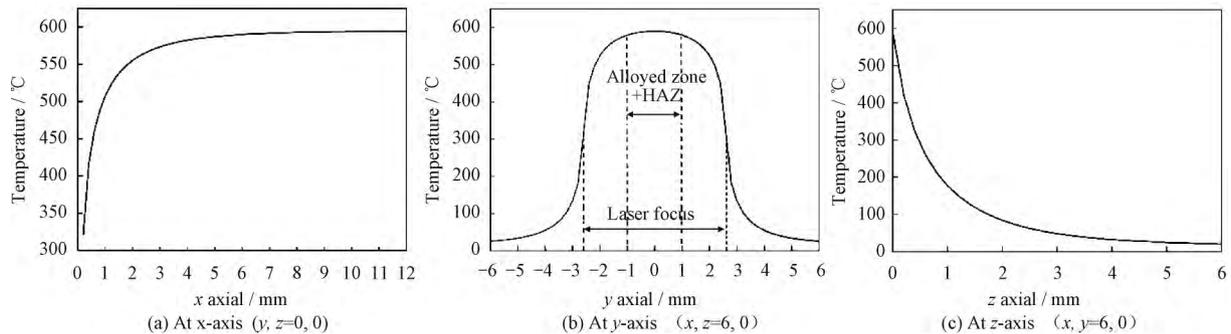


图 5 扫描路径上的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along laser scanning path

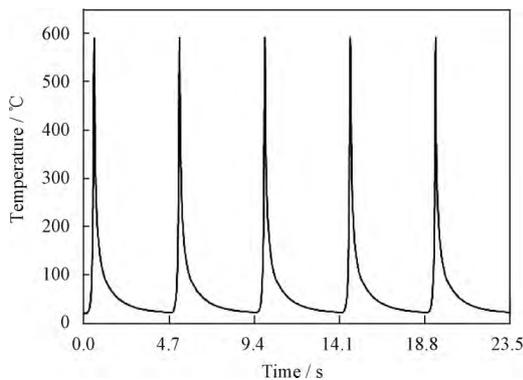


图 6 扫描路径中点的温度循环曲线

Fig. 6 Temperature cyclic curve in center of laser scanning path ( $x, y, z = 6 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}$ )

在后续热疲劳试验中采用激光往复扫描方式, 保证扫描路径上材料的热循环条件中心对称。取扫描路径中央 4~8 mm 作为研究范围, 将样品表面的 Cr 合金点放置在扫描路径上 7 mm 处。每循环 50 周次, 取下样品观察, 待出现裂纹后, 将观察周次缩短为 25 周。通过观察裂纹萌生、扩展情况和对比裂纹密度, 对材料的热疲劳性能进行评价。

## 2 结果和分析

图 7 为离散 Cr 合金点热疲劳样品的微观表面形貌。在 150 周次时, 基体中局部位置抗氧化性差, 脱落后形成点蚀, 而合金点和热影响区表面保

持完整(图 7(a))。点蚀的出现形成了局部过热和应力集中两种效应, 裂纹开始萌生(图 7(b))。随着热循环周次的增加, 裂纹的长度逐渐扩展, 基体中的裂纹密度也逐渐增加(图 7(c)~图 7(e))。循环周次超过 300 后, 裂纹开始相互交叉、连通(图 7(f))。观察循环 300 周次时的激光扫描路径(图 8), 发现基体已经严重开裂, 而合金点和热影响区中并未出现裂纹。取 200 周次时热影响区附近的两条裂纹(黑色箭头指示)作为研究对象(图 7(c))。以 200 周次的裂纹长度为基准, 以循环 25 周次为增量, 测量裂纹向基体和热影响区方向扩展的相对长度。取两条裂纹扩展相对长度的平均值, 绘制成图 9。相对循环 25 周次时, 裂纹的扩展速度较慢, 但基体方向的裂纹扩展速度大于合金化区方向。相对循环 25 周次以上, 基体方向的裂纹快速扩展。而在合金化区方向, 超过相对循环 50 周次后裂纹扩展速度才开始加快。在快速扩展阶段, 基体方向的裂纹扩展速度为 38.2  $\mu\text{m}/25$  周次, 而热影响区方向的裂纹扩展速度为 4.5  $\mu\text{m}/25$  周次。显然, 热影响区对裂纹扩展起到阻滞作用, 扩展速率比基体方向低近一个量级。

为解释合金点和热影响区的热疲劳行为, 对 300 周次循环样品表面进行扫描电镜(SEM)观察和能谱分析(EDAX)。Cr 合金点(图 10(a))的表

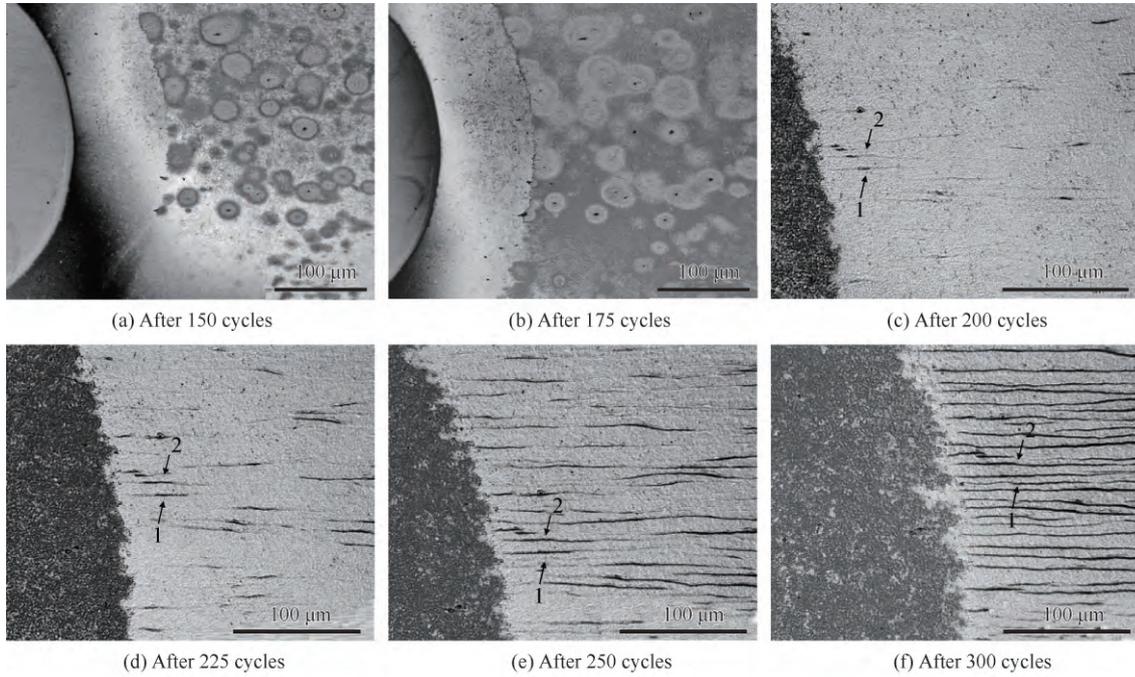


图 7 离散 Cr 合金化热疲劳样品的微观表面形貌

Fig. 7 Microsurface morphologies of discrete Cr alloyed thermal fatigue samples

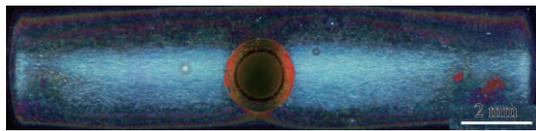


图 8 300 周次循环离散 Cr 合金化热疲劳样品的全扫描路径表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of discrete Cr alloyed thermal fatigue samples on whole Laser scanning path after 300 cycles

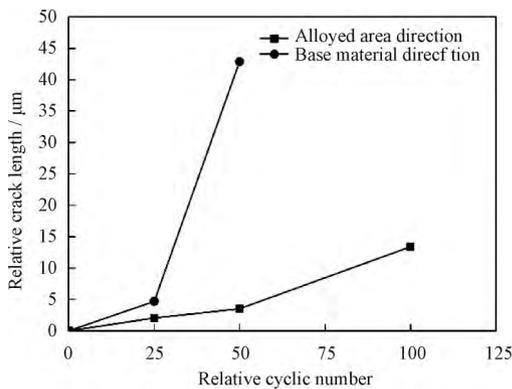


图 9 疲劳裂纹相对扩展长度

Fig. 9 Fatigue crack relative growth length

面平滑, Cr 含量(质量分数, 见表 3, 下同) 达到 10.41%, 含氧量仅为 0.6%。热影响区(图 10(b)) 的 Cr 含量(3.41%) 略高于原始成分, 表面呈粗

糙态, 含氧量为 1.55%。基体(图 10(c)) 的 Cr 元素已耗尽, 形成裂纹, 表面为 Fe 氧化物。在扫描路径边缘基体(图 10(d)) 的 Cr 含量没有变化, 未形成裂纹。其表面粗糙程度与热影响区相当, 但含氧量远高于热影响区, 达到 8.52%。

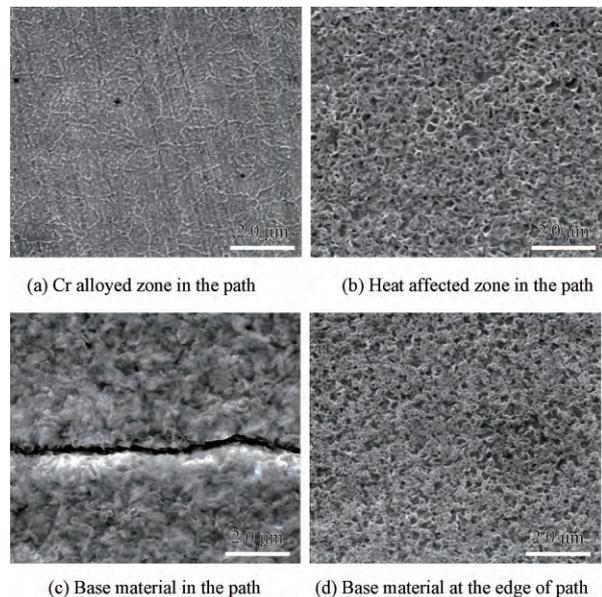


图 10 300 周次循环热疲劳样品 SEM 照片

Fig. 10 SEM images of thermal fatigue specimens after 300 cycles

图 11 为 Fe-Cr 合金表面氧化膜结构示意图

图<sup>[16]</sup>。Fe 金属在 570 °C 以上形成的氧化膜由表及里的顺序为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 FeO。对于低 Cr 的基体材料, 基体中的 Cr 被内氧化形成岛状的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 随后与 FeO 固相反应形成 FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>。岛状的 FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 阻碍 Fe 离子的扩散, 起到了一定的抗氧化作用。此时, 整体氧化膜的结构与纯铁类似, 呈疏松状态, 氧化速率仍然很高。随着 Cr 含量的增加, FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 含量增多, 表面逐渐形成完整的 FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 膜, FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 膜的内部将形成 Fe(Fe, Cr)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>。此时, 氧化膜整体变薄, 呈致密状态, Fe 离子在氧化膜中的扩散速率降低。

表 3 样品的 EDAX 分析数据

Table 3 EDAX analysis data of the specimens (w/%)

| Element    | Cr    | Mo   | O     | Fe    |
|------------|-------|------|-------|-------|
| Fig. 10(a) | 10.41 | 0.56 | 0.60  | 87.49 |
| Fig. 10(b) | 3.41  | 0.56 | 1.55  | 94.07 |
| Fig. 10(c) | 0     | 0    | 21.61 | 78.39 |
| Fig. 10(d) | 3.16  | 1.14 | 8.52  | 85.79 |

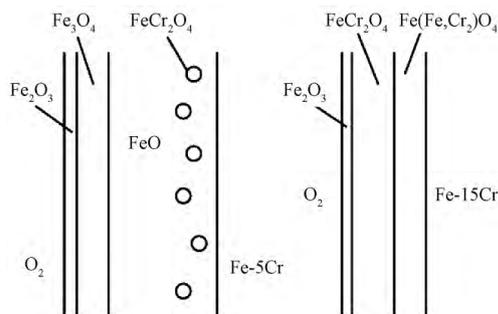


图 11 Fe-Cr 合金表面氧化膜结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of surface oxide film structure of Fe-Cr alloy

首先讨论热疲劳裂纹的萌生现象。在热循环过程中, 氧化膜中的生长应力和热应力叠加, 将造成氧化膜的开裂与点蚀。点蚀坑处的过热和应力集中现象促进裂纹的萌生(图 7(a)(b))。对于 Fe 和 Cr 金属来说, 氧化膜中的生长应力均为压应力。由于金属与氧化物热膨胀系数不匹配, 冷却过程中形成的热应力也为压应力。当氧化膜中的弹性应变能超过金属-氧化膜界面的断裂抗力时, 氧化膜将发生剥落。氧化膜剥落的判据表示为<sup>[16]</sup>:

$$(1 - \nu)\sigma^2 h/E > G_c \quad (1)$$

其中,  $\nu$  为泊松比,  $\sigma$  为氧化膜中残余压应

力,  $h$  为氧化膜厚度,  $E$  为氧化膜弹性模量,  $G_c$  为金属-氧化膜截面的断裂抗力。根据此判据, 可以对实验现象进行定性的分析。基体的氧化膜  $h$  较大, 且与基体接触的 FeO 组织疏松 ( $G_c$  较小), 因此容易发生剥落。合金点的氧化层  $h$  较小且致密 ( $G_c$  较大), 剥落倾向小。热影响区的初始 Cr 含量与基体相当, 由于经过快速淬火晶粒细化, Cr 元素扩散相对容易, 导致 Cr 元素含量甚至高于原始值, 氧化膜相对致密。同时, 热影响区的淬火组织为马氏体加残余奥氏体, 消应力退火消除了宏观应力, 但残余压应力依然存在。热影响区中的残余压应力抵消表面氧化膜中的部分生长应力, 降低了  $\sigma$ 。高 Cr 含量保持率和残余压应力是热影响区未发生点蚀的两个原因。

接下来讨论裂纹的扩展现象。疲劳裂纹扩展速率公式可表示如下<sup>[17]</sup>:

$$da/dN = B[\Delta K - \Delta K_{th}]^2 = B[\Delta K - \Delta K_{th0}(1 - R)^\gamma]^2 \quad (2)$$

其中,  $B$  为疲劳裂纹扩展系数,  $\Delta K_{th0}$  为  $R=0$  时的疲劳裂纹扩展门槛值,  $R$  为应力比,  $\gamma$  为常数。通常情况下, 钢铁材料的  $\Delta K_{th0}$  将随晶粒细化和屈服强度的升高而降低, 因此热影响区的高硬度对阻滞裂纹扩展是不利的。文献[18]中使用脉冲放电在模具表面裂纹尖端形成了马氏体组织, 截止裂纹扩展, 这可能与裂纹尖端钝化和马氏体组织中的残余压应力相关<sup>[7]</sup>。在热循环过程中, Cr 合金点的热影响区中具有高的 Cr 含量保持率, Cr 的氧化物能够钝化裂纹尖端, 减缓裂纹扩展速率。同时, Cr 合金点热影响区中的残余压应力能够降低应力比  $R$ , 提高  $\Delta K_{th}$ 。两种因素结合在一起降低了裂纹扩展速率  $da/dN$ 。

### 3 结 论

通过对 32Cr3Mo1V 钢激光离散 Cr 合金化热疲劳试样表面的原位观察和 EDAX 分析。

(1) 合金化区中高含量的 Cr 元素在试样表面形成薄且致密的氧化膜, 保护材料在热循环过程中被进一步氧化、破坏, 300 周次热循环后含氧量仅为基体的 2.8%。Cr 合金化区表面薄且致密的氧化膜避免了点蚀现象, 抑制裂纹的萌生。

(2) 热影响区中淬火组织晶粒细化, 有利于

Cr 元素扩散,使 Cr 元素含量的保持在一定的水平,具有低于基体的氧含量。淬火组织中的高 Cr 元素保持率和残余压应力一起抑制裂纹的萌生,并对基体裂纹起到了阻滞作用,使裂纹的扩展速率降低近一个量级。

(3)在 32Cr3Mo1V 辊套表面上离散 Cr 合金化处理,将提辊套的热疲劳性能,减少辊套的修磨量或提高产能。

## 参考文献

- [ 1 ] BAREKAR N S, DHINDAW B K. Twin-roll casting of aluminum alloys-An overview [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29(6): 651-661.
- [ 2 ] 张立华, 黄明辉, 肖文锋. 提高铸轧辊使用寿命的研究. *中国机械工程*, 2002, 13(7): 614-616.  
ZHANG L H, HUANG M H, XIAO W F. Research on the improving the life of the casting roll[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2002, 13(7): 614-616(in Chinese).
- [ 3 ] 许志强, 张沛, 杜凤山. 铸轧辊表面裂纹的萌生及扩展机理[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(3): 421-425.  
XU Z Q, ZHANG P, DU F S. Mechanism of crack initiation and propagation on casting roller surface [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(3): 421-425 (in Chinese).
- [ 4 ] YASNIY P, MARUSCHAK P, LAPUSTA Y, et al. Thermal fatigue material degradation of caster rolls' surface layers [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2008, 15(6-7): 499-507.
- [ 5 ] 张立华, 李善德, 刘君, 等. 基于 ANSYS 的辊套热结构耦合分析[J]. *机械设计与制造*, 2007, 3(11): 79-81.  
ZHANG L H, LI S D, LIU J, et al. Thermal-structural coupling analysis of roller using ANSYS software[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2007, 3(11): 79-81 (in Chinese).
- [ 6 ] 王之桐, 杨明江, 周终强, 等. 激光诱导放电材料表面离散处理研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 3131-2138.  
WANG Z T, YANG M J, ZHOU Z Q, et al. Study of laser-guided discharge to discrete surface processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(8): 3131-2138 (in Chinese).
- [ 7 ] 王海龙. 球墨铸铁热铸轧表面激光点状合金化技术研究 [D]. 北京:清华大学, 2007.  
WANG H L. The investigation on spot array laser alloying on nodular cast iron hot roller [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007 (in Chinese).
- [ 8 ] LI F H, TONG X, LIU M, et al. Experimental research on 32cr3mo1v substrate antimolten aluminum corrosion by laser treatment[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 41(S1): 104-107.
- [ 9 ] 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.  
LI F H, TONG X, LIU M, 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 (in Chinese).
- [ 10 ] 张津, 郭海明, 李洪, 等. 32Cr2MoV 钢表面电泳沉积氧化铝和氧化锆涂层 [J]. *中国表面工程*, 2012, 25(4): 68-73.  
ZHANG J, GUO H M, LI H, et al. Electrophoretic deposition of alumina and zirconia coating on the surface of 32Cr2MoV steel[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(4): 68-73 (in Chinese).
- [ 11 ] 刘晓博, 王之桐, 李文. 激光扫描加热的铸轧辊套材料热疲劳性能测试 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041412.  
LIU X B, WANG Z T, LI W. Thermal fatigue performance test of casting roller sleeve material heated by laser scanning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041412 (in Chinese).
- [ 12 ] 康进武, 游锐, 聂刚, 等. 铝合金压铸模具热疲劳寿命试验研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(12): 63-68.  
KANG J W, YOU R, NIE G, et al. Study on the thermal fatigue life of H13 steel for aluminum alloy casting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(12): 63-68 (in Chinese).
- [ 13 ] 高永辉. 热处理工艺对辊套材料 32Cr3Mo1V 性能的影响 [J]. *特钢技术*, 2011, 17(1): 31-33.  
GAO Y H. Influence of heat treatment process on property of 32Cr3Mo1V roller case material[J]. *Special Steel Technology*, 2011, 17(1): 31-33 (in Chinese).
- [ 14 ] 吴维泽. 提高铸轧辊套寿命的研究 [D]. 沈阳:东北大学, 2005.  
WU W Z. Research on the raising the life of the casting roll shell [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [ 15 ] 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.  
LI S D. Thermal structural coupling and the fatigue life of the roll shell [D]. Changsha: Central South University, 2006 (in Chinese).
- [ 16 ] 伯格斯特, 迈尔, 佩蒂特. 金属高温氧化导论 [M]. 北京:高等教育出版社, 2010.  
NEIL B, GERALD H M, FREDERICK S P. Introduction to the high-temperature oxidation of metals [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010 (in Chinese).
- [ 17 ] 郑修麟, 王泓, 鄢君辉, 等. 材料疲劳理论与工程应用 [M]. 北京:科学出版社, 2013.  
ZHENG X L, WANG H, YAN J H, et al. Material fatigue theory and engineering application [M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [ 18 ] 高殿奎, 李慧, 付宇明, 等. 脉冲放电截止热疲劳裂纹的亚临界扩展[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(11): 28-31.  
GAO D K, LI H, FU Y M, et al. Acted a pulse current to prevent the thermal fatigue crack subcritical extending [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(11): 28-31 (in Chinese).