

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0066-04

# 球墨铸铁表面激光点状合金化组织及热疲劳性能研究

王海龙<sup>1</sup>, 李正阳<sup>1</sup>, 王秉毅<sup>2</sup>, 刘文今<sup>1</sup>, 钟敏霖<sup>1</sup>, 杜志毅<sup>3</sup>, 冯晓星<sup>3</sup>, 梁德礼<sup>3</sup>, 刘建国<sup>2</sup>

<sup>1</sup>清华大学机械系先进成形与制造教育部重点实验室, 北京 100084  
<sup>2</sup>包头钢铁(集团)有限公司, 内蒙古 包头 014010  
<sup>3</sup>包头市鑫垣机械制造有限公司, 内蒙古 包头 014040

**摘要** 采用 CO<sub>2</sub> 激光器对珠光体基体的球墨铸铁表面进行了点状合金化处理。设计了激光合金化点的分布方案, 研究了强化层的组织和性能, 对激光处理后的试样进行了热疲劳实验。结果表明, 预置 TH-2A 型 C-Si-B-RE 合金化涂层, 选择适当的激光辐照参数, 可以获得表面光洁、硬度高、无裂纹的合金化层。热疲劳实验的循环温度为 700 ℃ 至 25 ℃, 加热 90 s, 冷却 10 s, 共循环 90 次。实验发现, 激光合金化点及其热影响区(HAZ)以外表面区域的热疲劳裂纹萌生主要与石墨球的存在及其圆整度有关, 基体中裂纹的扩展在点状合金化区周围受到阻滞。合金化区内热疲劳裂纹同样在合金化区与热影响区的宏观界面被阻滞。热影响区内裂纹萌生主要与热循环过程中产生的氧化物有关, 热影响区内极为细化的珠光体团有效地阻滞了裂纹并迫使其只能沿晶界缓慢扩展。

**关键词** 激光技术; 激光点状合金化; 球墨铸铁; 显微组织; 热疲劳性能

**中图分类号** TG156.99; TG115.5<sup>+</sup>7 **文献标识码** A

## Microstructure and Thermal Fatigue Behavior of Spot Array Laser Alloying for Nodular Cast Iron

WANG Hai-long<sup>1</sup>, LI Zheng-yang<sup>1</sup>, WANG Bing-yi<sup>2</sup>, LIU Wen-jin<sup>1</sup>, ZHONG Min-lin<sup>1</sup>,  
DU Zhi-yi<sup>3</sup>, FENG Xiao-xing<sup>3</sup>, LIANG De-li<sup>3</sup>, LIU Jian-guo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology Ministry of Education, Beijing 100084, China  
<sup>2</sup> Baotou Iron and Steel (Group) Co. Ltd., Baotou, Neimengu 014010, China  
<sup>3</sup> Baotou Xinyuan Mechanical and Producing Corporation, Baotou, Neimengu 014040, China

**Abstract** Spot array laser alloying of C-Si-B-RE on nodular cast iron using CO<sub>2</sub> laser has been made. The microstructure and characteristics of the alloying layer and HAZ have been analyzed and thermal fatigue tests on the laser treated samples have been done. The results demonstrate that laser alloying of C-Si-B-RE on nodular cast iron is able to achieve satisfying layers with high hardness and smooth surface which are free of cracks. The laser treated specimens were tested under the specified thermo-cyclic condition: 700 ℃ ~ 25 ℃, heating 90 s, cooling 10 s, 90 times. The results show that the initiation of the crack in the substrate is relevant to graphite nodular and its morphology. The thermal fatigue cracks in substrate and alloying area are retarded by the HAZ. The initiation of the crack in the HAZ is relevant to the oxide formed during thermal fatigue test. The refining pearlite colonies in heat affected zone (HAZ) compel the crack to develop slowly along the grain boundaries.

**Key words** laser technique; spot array laser alloying; nodular cast iron; microstructure; thermal fatigue

## 1 引 言

热轧辊是热轧钢铁制品生产的重要部件, 其寿命长短不仅与产品的成本密切相关, 而且直接决定钢铁制品的质量, 尤其是表面质量和板型; 同时由于热轧辊服役过程中承受强烈的力和热的作用, 因此热轧辊是一个极易损坏的部件<sup>[1]</sup>。在热轧过程中, 对轧辊通

常辅以强劲的冷却水喷射, 由于轧辊孔型受轧件和冷却水的交替作用, 辊面上极易出现网状裂纹, 且裂纹处金属发生强烈氧化, 促使裂纹扩展<sup>[2]</sup>。

为提高热轧辊寿命, 通常通过改换热轧辊材料(热轧辊高速钢化)和对热轧辊进行表面处理两个方面来解决。但整体的高速钢或硬质合金轧辊成本极

**作者简介:** 王海龙(1982—), 男, 宁夏盐池人, 硕士研究生, 主要从事激光点状合金化研究。E-mail: whlong00@gmail.com

**导师简介:** 刘文今(1945—), 男, 湖南洞口人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光成形与制造研究。

E-mail: liuwjdme@tsinghua.edu.cn

高,对于轧辊芯部材料将造成浪费。因此,轧辊的生产迫切需要进行表面处理<sup>[3]</sup>。

传统的全面积激光合金化技术对于大型热轧辊而言成本高,而且热输入量大,在工作过程中容易出现贯穿整个强化层的裂纹。清华大学激光加工研究中心提出一种点状分布的合金化技术,减小了激光合金化中的热输入量并降低了成本。前期在钢和铸铁上的研究表明,在大载荷、周期性机械应力作用下,点状分布的合金化区域能有效抑制疲劳裂纹的扩展。本文针对实际生产中的热疲劳现象,在热轧辊用球墨铸铁表面进行了激光点状合金化的实验,并对其组织和热疲劳性能进行了初步的研究。

## 2 实验设备及研究方法

基体材料是由包头鑫垣公司提供的热轧辊用珠光体基体球墨铸铁,基体硬度  $HV_{0.2} 290$  左右,珠光体片间距  $0.72 \sim 0.95 \mu\text{m}$ ,石墨球直径在  $100 \mu\text{m}$  左右,石墨球形态很不规则。试块尺寸为  $20 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。表面除锈后预置 TH-2A 型 C-Si-B-RE 合金化涂层,涂层厚度为  $0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$ 。

激光处理采用 PRC 快轴流  $\text{CO}_2$  激光器,最大输出功率为  $3 \text{ kW}$ ,光束模式为多模,工作台为 FAGOR 数控机床。采用光闸控制激光断续输出扫描,使用激光功率  $2 \sim 2.4 \text{ kW}$ ,扫描速度  $3 \sim 6 \text{ mm/s}$ ,光斑直径  $3 \text{ mm}$ 。在试块表面按设计的分布方案(如图 1)进行点状合金化处理。激光扫描过程中对熔池侧吹氩气防止氧化。激光处理结束后将试样表面磨平进行着色探伤。激光处理过的试样用线切割机沿横断面切开,制备成断面金相试样,经硝酸酒精溶液腐蚀后,在 Noephot32 金相显微图象分析实验系统和 CSM950 扫描电子显微镜下观察、采集金相显微组织照片。

热疲劳实验采用 SX13 HTS 箱式电阻炉加热,自来水冷却,循环温度为  $700 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,加热  $90 \text{ s}$ ,冷却  $10 \text{ s}$ ,共循环  $90$  次。

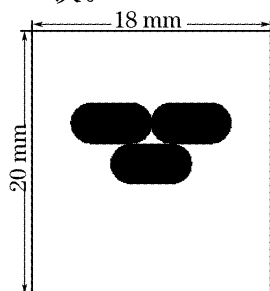


图 1 合金化点分布方案

Fig. 1 Distribution of laser alloying points

## 3 实验结果分析与讨论

### 3.1 表面形貌及显微组织分析

将激光处理后的试样表面磨平进行着色探伤(图 2),合金化区域没有裂纹出现。

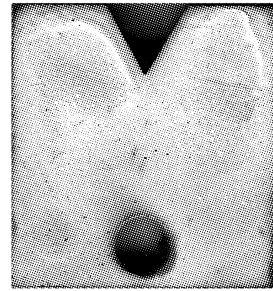


图 2 着色探伤结果

Fig. 2 Result of liquid penetrant test

在激光的快速加热和冷却作用下,合金化熔池凝固按照介稳系结晶。由于球墨铸铁轧辊基体中石墨球直径较大而且分布较为稀疏,对熔池增碳作用有限,最终在合金化层得到由先共晶奥氏体和共晶莱氏体组成的亚共晶介稳组织,并且先共晶奥氏体中发生了明显的马氏体相变(图 3)。热影响区上部存在一个较窄的过热带,其组织由粗大的马氏体和残余奥氏体构成,中部是马氏体和少量细片状珠光体,底部为细片状珠光体,层片间距在  $0.34 \sim 0.69 \mu\text{m}$  之间,比基体珠光体细化将近一倍。同时热影响区中有残留

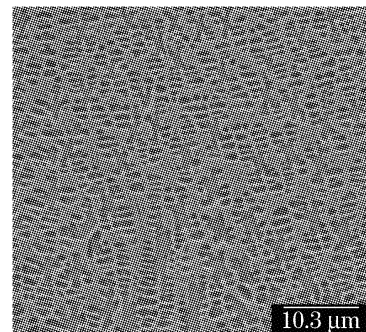


图 3 合金化层显微组织

Fig. 3 Microstructure of alloying layer

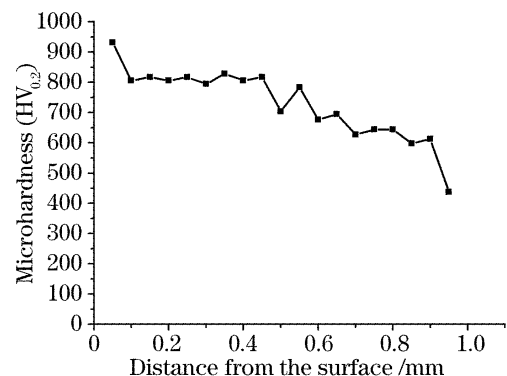


图 4 强化层硬度分布

Fig. 4 Microhardness of laser strengthened layer

的不规则石墨球。激光强化层硬度分布见图 4。可以看出,激光合金化区的显微硬度均匀达到  $HV_{0.2}$  800 以上,而热影响区的硬度从完全淬火区至非完全淬火区也比基材硬度高得多。

### 3.2 宏观热疲劳裂纹扩展

图 5(a)和(b)分别是基体材料经过 60 次和 90 次热循环之后的裂纹扩展情况。在 60 次热疲劳循环后,裂纹已经在形状不规则的石墨球周围萌生,部分裂纹已经连通,90 次循环后裂纹基本连通形成网状分布的长裂纹。在合金化点表面,裂纹以由激光收光时产生的小凹坑为中心呈放射状分布,但在合金化区与热影响区的宏观界面被阻滞。而合金化点周围热影响区内萌生的裂纹的扩展也同样在合金化区与热影响区的宏观界面处受到显著抑制。90 次热疲劳循环后,对比未经激光处理试样和激光处理后试样的裂纹扩展,未经激光处理的试样裂纹大片交联并扩展形成长裂纹,而经过激光处理的试样,裂纹在合金化点周围受到阻滞没有连接形成长裂纹。

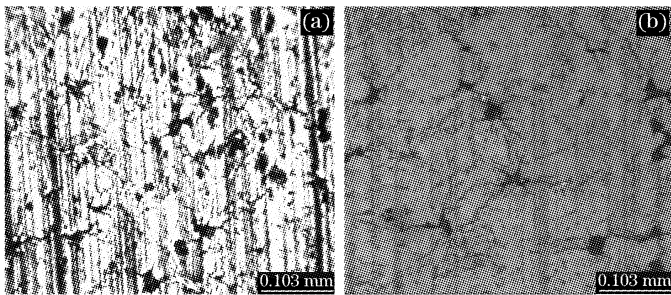


图 5 热疲劳裂纹在基体中扩展。(a) 60 次循环;  
(b) 90 次循环

Fig. 5 Thermal fatigue cracks propagation in substrate  
(a) 60 times; (b) 90 times

光学显微镜的观察分析更清楚地揭示了上述现象的微观过程。图 6(a)和图 6(b)是激光处理后的同一试样同一部位,经过 60 次和 90 次热疲劳循环后,在光学显微下观察到的裂纹在同一合金化点周围的扩展情况,图中左下部为合金化区域,右上部为

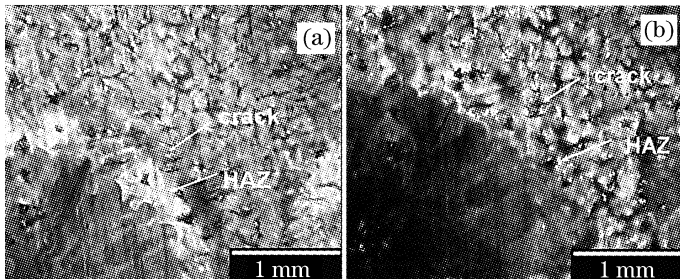


图 6 热影响区对裂纹的阻滞效果。(a) 60 次循环;  
(b) 90 次循环

Fig. 6 Retarding effect of HAZ to crack propagation  
(a) 60 times; (b) 90 times

基材。可以清楚地观察到,从合金化区和基材分别扩展而来的裂纹在其与热影响区宏观界面处都受到有效阻滞,始终没有穿过热影响区而彼此连通。90 次热疲劳循环后的裂纹只是比 60 次循环后的裂纹变宽了。

### 3.3 显微组织对热疲劳裂纹的影响

基体中裂纹从形状不规则的石墨球附近萌生,并沿着原奥氏体晶界扩展如图 7。这样一来,不同方向的裂纹就很容易相互连通形成网状宏观裂纹而导致材料失效。激光合金化层的亚共晶介稳组织实际上是一种高合金白口层,裂纹一旦在合金化层微观缺陷处形成即迅速扩展,但在热影响区和合金化层交界处受到抑制,就使得球墨铸铁表面激光点状合金化区内的热疲劳裂纹无法延伸到热影响区内。经过多次热疲劳循环后在热影响区内出现新的裂纹。图 8 是 90 次热疲劳循环后裂纹在热影响区附近受到抑制的情况,图中左上方是基体中的裂纹,右下方为热影响区中裂纹。裂纹在基体中较为笔直地扩展到热影响区附近受到阻滞。热影响区内裂纹受到热影区内极为细化的珠光体团的阻滞,只能沿着晶界曲折缓慢地扩展,90 次循环后两条裂纹始终没有突破热影响区而相互连通。这种现象将会大幅度地延缓经过激光点状合金化处理表面热疲劳裂纹扩展、相互连通并最终导致材料失效的进程。

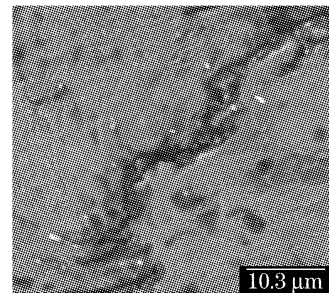


图 7 基体裂纹沿晶界扩展

Fig. 7 Crack propagation in substrate along the grain boundary

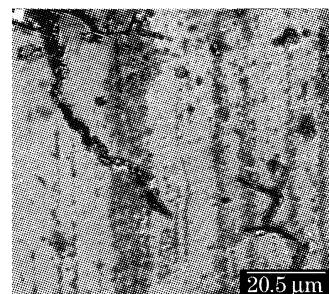


图 8 90 次热疲劳后热影响区对裂纹的阻滞

Fig. 8 Retarding effect of HAZ to cracks after 90 times cyclic

热影响区裂纹的萌生与氧化物的产生有关。在热疲劳循环中,氧气和水分以合金化层中的裂纹为通道,在合金化层底部与材料作用形成块状氧化物,并侵入热影响区见图 9,对其进行能谱分析结果见表 1。氧化物侵入热影响区,导致应力集中和材料弱化<sup>[4]</sup>,在循环热应力作用下萌生新的裂纹。

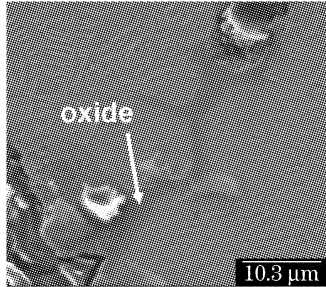


图 9 热影响区氧化物

Fig. 9 Oxide in HAZ

表 1 图 9 中氧化物成分

Table 1 Chemical positions of the oxide

Element	Atomic percent /%	Weight percent /%
O	53.63	25.22
Fe	43.79	71.89
Si	2.20	1.81
Mo	0.37	1.05

## 4 结 论

1) 经过 3 个批次共 18 块试样的热疲劳实验对比,发现合金化点周围的热影响区对热疲劳裂纹的扩展有明显的阻滞作用,该现象对于延缓球墨铸铁热轧辊表面热疲劳失效过程具有重要意义。

2) 热影响区内热疲劳裂纹的萌生与热疲劳过程中氧化物产生有关。

## 参 考 文 献

- Zhang Laiqi, Chen Guangnan, Yang Wangyue *et al.*. Applications of laser melting and cladding to hot rolls [J]. *J. Tianjin Polytechnic University*, 2003, **22**(5): 69~70  
张来启,陈光南,杨王玥等. 激光熔凝和熔敷在热轧辊强化中的应用 [J]. 天津工业大学学报, 2003, **22**(5): 69~70
- Zhang Jianyu, Yang Jiuxia, Ma Guangting *et al.*. Research on wear of roll for section steel [J]. *J. Iron and Steel Research*, 2003, **15**(4): 29~30  
张建宇,杨久霞,马光亭等. 型钢轧辊磨损规律的探讨和实验研究 [J]. 钢铁研究学报, 2003, **15**(4): 29~30
- Wang Tianyi, Cao Jianfang, Rao Jianhua. Present status and development trends of roll material and its heat treatments [J]. *Southern Metals*, 2005, (1): 6~7  
王天义,曹建芳,饶建华. 轧辊材料及其热处理工艺发展的现状与趋势 [J]. 南方金属, 2005, (1): 6~7
- Yang Qingxiang, Wang Airong, Ren Xuejun *et al.*. Effect of rare earth elements on oxidation resistance of hot rolled steel 60CrMoMn [J]. *J. The Chinese Rare Earth Society*, 1996, **14**(1): 39~40  
杨庆祥,王爱荣,任学军等. 稀土元素对 60CrMoMn 热轧辊用钢抗氧化性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 1996, **14**(1): 39~40