

文章编号: 0258-7025(2009)02-0498-05

# 高铬钢轧辊激光熔凝层组织及性能

李美艳 王勇 韩彬 韩涛 程义远

(中国石油大学(华东)机电工程学院材料科学与工程系, 山东 东营 257061)

**摘要** 利用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)和X射线衍射(XRD)等手段对高铬钢轧辊激光熔凝层的显微组织、相结构、回火稳定性及高温耐磨性能进行了分析。结果表明,高铬钢激光熔凝处理后剖面区由熔凝区、热影响区(HAZ)和基体组成。基体组织为回火马氏体和网状  $M_7C_3$  型碳化物,激光熔凝处理使基体中脆性碳化物完全溶解,表面熔凝区组织得到高度细化,呈现组织梯度,生成奥氏体和  $M_{23}C_6$  型碳化物,热影响区由隐晶马氏体、残余奥氏体和弥散的碳化物组成。激光熔凝区由于细晶强化、固溶强化和位错强化的共同作用,回火稳定性明显提高,560 °C 回火后出现二次硬化,峰值硬度达到 672 HV。高温滑动磨损条件下激光熔凝层具有优良的耐磨性能。

**关键词** 激光技术;激光熔凝处理;高铬钢轧辊;组织;回火稳定性;高温耐磨性

**中图分类号** TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0498

## Structure and Properties of High-Cr Steel Roller by Laser Surface Melting

Li Meiyang Wang Yong Han Bin Han Tao Cheng Yiyuan

(College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum,  
Dongying, Shandong 257061, China)

**Abstract** Microstructure, phase structure, tempering stability and high-temperature wear resistance of laser melted layer of high-Cr steel roller are analysed by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and X-ray diffraction (XRD). The tests show that after laser treatment the cross section of melted surface is divided into melted zone, heat affected zone (HAZ) and the matrix. The matrix consists of martensite and reticular  $M_7C_3$  carbides. Laser surface melting leads to the complete dissolution of brittle carbides, and the structure of the melted zone is refined highly consisting of austenite and  $M_{23}C_6$  carbide particles. The HAZ consists of crypto-crystal martensite, retained austenite and dispersed carbides. Combined effects of grain refining strengthening, solution strengthening and dislocation strengthening lead to the obvious enhancement of tempering stability of laser melted zone and the hardness reaches a peak of 672 HV at 560 °C due to secondary hardening. Laser melted layer has excellent high-temperature wear resistance under high-temperature sliding wear test condition.

**Key words** laser technique; laser surface melting; high-Cr steel roller; microstructure; tempering stability; high-temperature wear resistance

## 1 引言

热轧辊在工作条件下,一方面与高温轧材直接接触,轧面温度达到 500~600 °C,同时受到室温冷却水的冷却,经受温度变化幅度较大,因此,要求热轧辊具有较高的回火稳定性及高温耐磨性能。高铬钢因碳及合金元素含量高,基体中含有大量的一次

碳化物,具有较高的耐磨性,广泛用于热轧工作辊。然而,高铬钢基体中的碳化物呈网状沿晶界分布,在热、力交变的环境下工作一段时间后,轧辊表面易产生疲劳微裂纹,且网状碳化物为裂纹提供了扩展途径,导致轧辊过早失效<sup>[1]</sup>。

激光熔凝处理具有快速加热快速冷却的特点,

收稿日期:2008-09-22;收到修改稿日期:2008-10-10

基金项目:山东省自然科学基金(Y2006F64)资助课题。

作者简介:李美艳(1982-),女,山东人,博士研究生,主要从事金属失效分析及激光表面改性方面的研究。

E-mail: lmy\_102411@163.com

导师简介:王勇(1964-),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事金属失效分析与材料的表面喷焊、电弧喷涂、激光表面改性等方面的研究E-mail: wangyong@hdpu.edu.cn

不需要额外的冷却介质,不改变表面的化学成分,熔池发生非平衡转变,形成均匀细小的组织及新的亚稳相,从而改善材料的表面性能<sup>[2-4]</sup>。目前,国内外研究者对铸铁<sup>[5]</sup>、低碳钢<sup>[6]</sup>、高速钢<sup>[7,8]</sup>等材料激光表面强化做了大量的研究,并分析了激光表面强化机制,但对高铬钢激光熔凝后的组织及性能的研究较少。为了探索高铬钢表面激光熔凝处理的可能性,本文分析了高铬钢激光处理后熔凝层的组织、相结构、回火稳定性及高温耐磨性等,以期提高轧辊的性能及使用寿命。

## 2 试验材料及方法

试验材料取自高铬钢热轧辊,化学成分(质量分数,%)如表 1 所示。基体组织由马氏体和碳化物组成,如图 1 所示。碳化物呈网状沿晶界分布,硬度高达 1023 HV,使晶界脆化,降低了高铬钢轧辊的塑性。

表 1 轧辊钢化学成分(质量分数%)

Table 1 Chemical composition of the roller steel  
(mass fraction %)

C	Cr	Mo	Ni	V	Mn	P	S
1.09	10.48	1.04	0.56	0.39	0.53	0.031	0.017

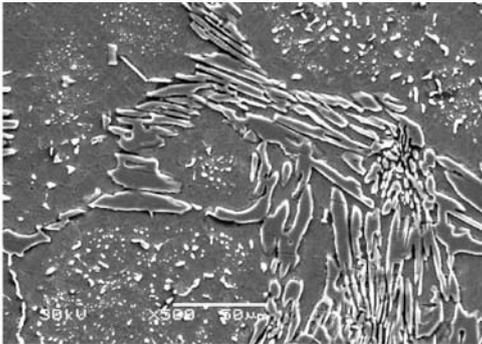


图 1 高铬钢的基体组织

Fig. 1 Microstructure of high-Cr steel

采用 5 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器在氩气保护下进行激光熔凝处理,激光功率为 2.7 kW,扫描速度为 5~25 mm/s,光斑直径  $\phi$  3.0 mm,搭接 1.0 mm。激光熔凝处理后,采用 D/max-RA 型 X 射线衍射(XRD)仪对激光熔凝层进行物相分析,采用 JSM-6380LA 型扫描电镜(SEM)和 H-800 型透射电镜(TEM)分析熔凝层的组织及磨损形貌,利用 MH-3 型显微硬度计进行显微硬度测定。

## 3 熔凝层的组织分析

### 3.1 组织 SEM 分析

激光熔凝后剖面显微形貌如图 2 所示。由于激光光斑能量分布不均匀,中心高,边缘低,硬化层呈月牙状,由熔凝区、热影响区(HAZ)和基体三部分组成。

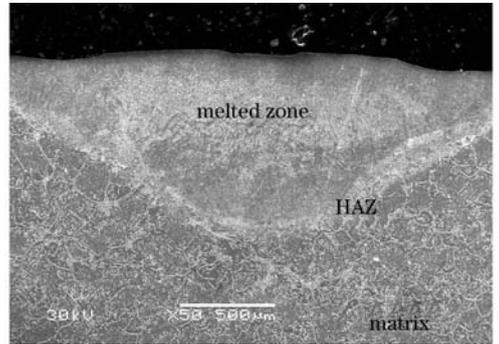


图 2 试样剖面的显微形貌

Fig. 2 Microstructure of sample's cross-section

激光处理使基体中脆性碳化物完全溶解,快速凝固过程由熔池边缘向熔池中心方向进行,在熔池的横截面内存在组织梯度,即在同一熔池内,由于熔池的整个截面上存在温度梯度和晶体长大速度的变化,使得最终凝固组织表现为一种复合型的凝固组织特征。沿着合金熔池中心线的深度方向,熔凝区由表及里依次为等轴晶-树枝晶-胞状晶,如图 3(a)~(c)所示。熔凝层的结晶形态取决于熔池内结晶参数  $G/R$  值( $G$  为温度梯度, $R$  为凝固速度)。在熔池底部  $R$  趋近于 0,而温度梯度最大, $G/R$  值很大,形成胞状晶组织。熔池中部随  $R$  的增大和  $G/R$  逐渐减小,形成树枝状的晶体生长形态。表层由于本

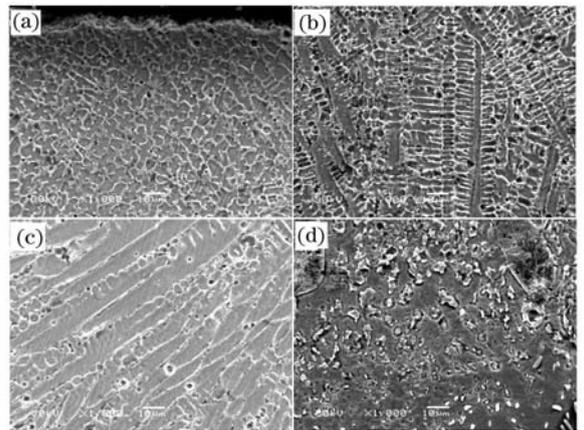


图 3 激光处理后的显微组织

(a) 上部组织 ;(b) 中部组织 ;(c) 底部组织 ;(d) 热影响区

Fig. 3 Microstructures after laser surface melting

(a) top region ;(b) middle region ;(c) bottom region ;(d) HAZ

体和表面空气的双重冷却则形成细小的等轴晶。由于激光熔凝过程中的温度梯度和凝固速度都非常快,使熔凝层的晶粒得到高度细化。

热影响区由隐晶马氏体、残余奥氏体和弥散碳化物组成(图 3(d))。与高铬钢原始组织对比,碳化物主要呈球状弥散分布在基体中,可有效阻止轧辊在使用过程中热裂纹的扩展,利于发挥轧辊的使用性能。激光超快速加热使回火马氏体瞬间被加热到奥氏体化温度以上,甚至高于平衡熔化温度,造成了极大的过热度,从而使回火马氏体向奥氏体转变的相变驱动力很大,导致了极高的奥氏体形核率,快速冷却时奥氏体来不及长大,组织明显细化<sup>[9]</sup>。

### 3.2 物相分析

图 4 中 XRD 分析结果表明,高铬钢基体主要是马氏体组织,激光处理后熔凝区的显微组织为奥氏体,无碳化物衍射峰。激光熔凝处理使脆性网状碳化物完全溶解,碳及合金元素固溶于奥氏体中,产生固溶强化作用,提高了奥氏体的稳定性。

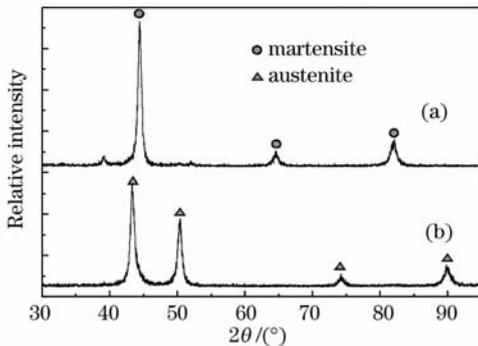


图 4 X 射线衍射图谱

(a) 未处理试样;(b) 激光熔凝试样

Fig. 4 XRD profiles of the top surface

(a) untreated sample ;(b) laser melted sample

熔凝区枝晶内存在大量的位错、相互交错的位错网格及滑移痕迹等精细亚结构(见图 6(d))。激光熔凝过程中产生很大的热应力和组织转变应力,

### 3.3 TEM 分析

图 5 中 TEM 像及衍射斑点标定结果,高铬钢轧辊基体中的一次碳化物主要为  $M_7C_3$  型,是典型的高碳高合金钢的铸态组织。此类型碳化物脆性大,明显降低钢的韧性,轧制过程中易导致裂纹的产生和扩展,是造成轧辊早期失效的主要原因。

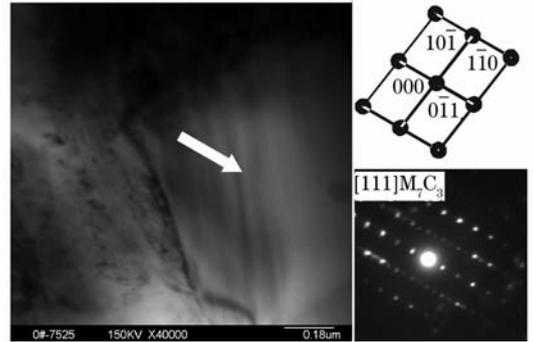


图 5 基体中碳化物 TEM 像及其衍射斑点

Fig. 5 TEM microstructure of the carbides of the matrix and electron diffraction pattern

图 6 为熔凝区组织的 TEM 像及其衍射斑点。标定结果,枝晶为初生奥氏体,枝晶间为  $M_{23}C_6$  型碳化物(图 6(a)),二者满足  $[\bar{1}35]M_{23}C_6 // [\bar{1}11]\gamma$  位向关系,如图 6(b),(c)所示。根据 Fe-C-Cr 相图,高铬钢激光熔凝处理时,枝晶状初生奥氏体先从液相中析出并保持到室温,枝晶间发生共晶三相平衡转变  $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$ ,随后又发生包晶三相平衡转变  $\gamma + M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ ,直至  $M_7C_3$  消失。激光加热温度很高,基体中大量的碳化物完全溶解,碳和合金元素固溶于奥氏体中,降低了马氏体的转变温度,在快速冷却条件下,马氏体转变被强烈抑制,奥氏体组织保持到室温<sup>[10]</sup>。由于熔凝层中碳化物细小且量少,故 XRD 中无碳化物衍射峰。

高度应力集中使得位错集中、堆积,在熔凝过程中位错运动加剧,从而产生位错强化作用。

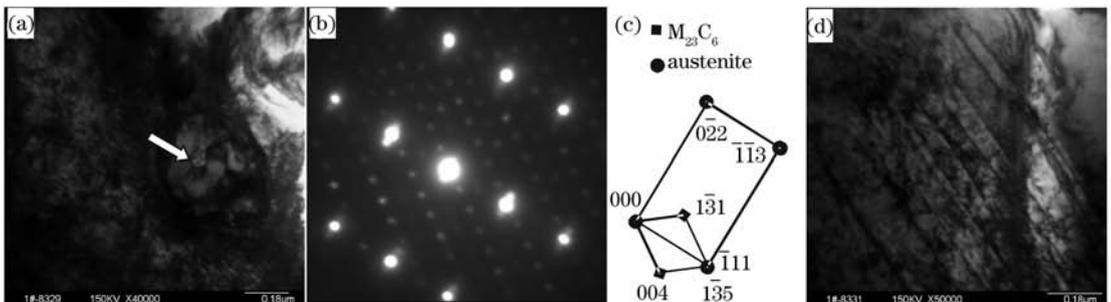


图 6 (a) 熔凝区 TEM 像;(b)(c) 衍射斑点;(d) 枝晶内滑移带及位错

Fig. 6 (a) TEM micrograph of laser melted zone; (b) (c) electron diffractive pattern ;(d) slipping band and dislocation

## 4 熔凝层的性能

### 4.1 回火稳定性

由图 7 可见,熔凝区由于生成大量奥氏体组织,硬度较低,但奥氏体由于细晶强化、固溶强化及位错强化的共同作用得以强化,硬度高于传统热处理得到的奥氏体。硬度最大值在热影响区,可达 759 HV。450 °C 回火熔凝区硬度基本不变,560 °C 回火后熔凝区硬度达最大值 672 HV,650 °C 回火硬度仍保持在 400 HV 以上。这是由于激光熔凝处理使脆性碳化物溶解,碳及合金元素在奥氏体中的固溶度显著提高,从而提高奥氏体的回火稳定性。560 °C 时碳化物的弥散析出显著增强二次硬化效果,温度升高至 650 °C,组织转变成回火索氏体,故硬度降低<sup>[11]</sup>。

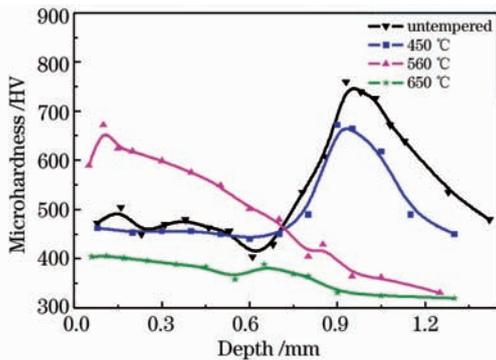


图 7 沿层深方向硬度分布

Fig. 7 Hardness distribution along depth

( $P=2.7$  kW,  $v=5$  mm/s)

### 4.2 高温耐磨性

磨损试验采用天津大学的 MS-1 高温耐磨试验机,磨损试样尺寸为 50 mm×20 mm×10 mm,对偶件圆环外径  $\phi$  70 mm,内径  $\phi$  40 mm,材料为调质态 45# 钢,干摩擦,试验温度为 560 °C,载荷 72 N,转速 120 r/min,时间 2 h。采用 BS224S 型精度 0.1 mg 的电子天平称重。

结果表明,基体磨损量为 45.4 mg,而激光熔凝试样的磨损量为 8.9 mg,是基体的 1/4,说明激光熔凝处理明显改善高铬钢的高温磨损性能。由图 8 (a)可知,560 °C 时基体磨损表面存在犁削特征,暴露出大量的碳化物粒子,这是典型的磨粒磨损。摩擦过程中,基体的马氏体组织发生回火,硬度、强度降低,失去了对硬质相碳化物的支持,在摩擦力的作用下,轧辊磨损面的碳化物与基体分离以及部分碳化物破碎,形成磨屑作为磨料加速磨损<sup>[12]</sup>。激光熔凝试样磨损面平整,存在少量的粘着痕迹(见图 8 (b))。激光处理后虽生成大量奥氏体组织,但由于

碳化物完全溶解,在细晶强化、固溶强化及位错强化作用下,组织稳定性及高温性能明显提高,摩擦过程中产生的磨屑极易被氧化为铁的氧化物,硬度较低,因此磨粒磨损程度减小<sup>[13]</sup>,磨损量较小。

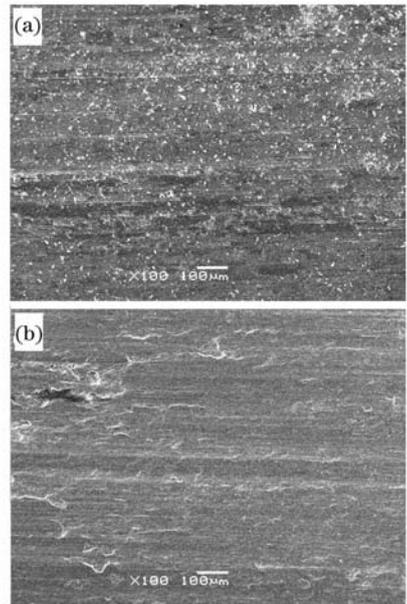


图 8 试样 560 °C 时的磨损形貌

(a) 未处理试样; (b) 激光熔凝试样

Fig. 8 Wear surface topographies at 560 °C

(a) untreated sample; (b) laser melted sample

## 5 结论

通过对高铬钢轧辊表面激光熔凝层的组织、相结构、回火稳定性及高温耐磨性的研究,得出结论为:1)由于激光光斑能量分布不均匀,硬化层剖面呈月牙状,分为熔凝区、热影响区和基体。基体组织为回火马氏体和  $M_7C_3$  型碳化物,表面激光熔凝区组织高度细化,呈现组织梯度,由表及里为等轴晶-树枝晶-胞状晶,由奥氏体和枝晶间  $M_{23}C_6$  型碳化物组成,热影响区由隐晶马氏体、残余奥氏体和细小碳化物组成;2)熔凝区的强化机制为细晶强化、固溶强化和位错强化,回火稳定性明显提高,560 °C 回火出现二次硬化,峰值硬度达到 672 HV;3)基体 560 °C 高温磨损机制为磨粒磨损,激光熔凝后试样耐磨性是基体的 3 倍,并伴随轻微的粘着痕迹。

### 参 考 文 献

- 1 R. D. Mercado-Solis, J. Talamantes-Silva, J. H. Beynon *et al.*. Modelling surface thermal damage to hot mill rolls[J]. *Wear*, 2007, **263**(7~12): 1560~1567
- 2 Yang Sen, Huang Weidong, Su Yunpeng *et al.*. Microstructure characteristics and microsegregation of DD2 single crystal by laser surface remelting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):

- 186~188  
 杨 森,黄卫东,苏云鹏 等. DD2 单晶合金激光表面熔凝处理的组织特征及微观偏析行为[J]. 中国激光, 2001, **A28**(2):186~188
- 3 I. R. Pashby, S. Barnes, B. G. Bryden. Surface hardening of steel using a high power diode laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **139**(1-3):585~588
- 4 Chen Jufang, Zhang Yongkang, Xu Renjun. Microstructure and corrosion resistant property of laser surface melting layer of AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):307~310  
 陈菊芳,张永康,许仁军. AM50 镁合金表面激光熔凝层的组织与耐蚀性能[J]. 中国激光, 2008, **35**(2):307~310
- 5 Janez Grum, Roman Sturm. Microstructure analysis of nodular iron 400-12 after laser surface melt hardening[J]. *Materials Characterization*, 1996, **37**(2-3):81~88
- 6 Yao Ningjuan, Lu Wei, Chen Kai *et al.*. Study on Co-based alloy coatings of hot roller made by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):759~762  
 姚宁娟,陆 伟,陈 铠等. 激光熔覆技术制造热轧辊的钴基金属层研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(8):759~762
- 7 C. T. Kwok, F. T. Cheng, H. C. Man. Microstructure and corrosion behavior of laser surface-melted high-speed steels[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, **202**(2):336~348
- 8 Yu. Ivanov, W. Matz, V. Rotshtein *et al.*. Pulsed electron-beam melting of high-speed steel: structural phase transformations and wear resistance[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2002, **150**(2-3):188~198
- 9 Lu Gang, Xi Shoumou. Investigation on laser transformation strengthen mechanism of 4Cr13 steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2002, **23**(4):25~30  
 路 纲,席守谋. 4Cr13 钢激光相变强化机理研究[J]. 材料热处理学报, 2002, **23**(4):25~30
- 10 R. Colaco, R. Vilar. On the influence of retained austenite in the abrasive wear behaviour of a laser surface melted tool steel [J]. *Wear*, 2005, **258**(1-4):225~231
- 11 Run Wu, Changsheng Xie, Mulin Hu *et al.*. Laser-melted surface layer of steel X165CrMoV12-1 and its tempering characteristics[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, **278**(1-2):1~4
- 12 Li Changhong, He Qingfu. Study on alloy steel guide roller with wear resistance at high temperature and characteristic of wear resistance[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, **37**(4):86~88  
 李长虹,何庆复. 耐高温磨损的合金钢导辊及高温耐磨性能研究[J]. 机械工程学报, 2001, **37**(4):86~88
- 13 Qiao Yulin, Liang Zhijie, Sun Xiaofeng *et al.*. The high temperature tribological behaviors of hot rolling steel/steel pairs at dry friction[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, **31**(1):30~32  
 乔玉林,梁志杰,孙晓峰 等. 热轧钢/热轧钢摩擦副干摩擦高温摩擦行为的研究[J]. 金属热处理, 2006, **31**(1):30~32