

# 激光修复 28CrMoNiV 钢热影响区的组织演变

李允东<sup>1,2</sup> 董刚<sup>1,2\*</sup> 姚建华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310014

<sup>2</sup>浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 浙江 杭州 310014

**摘要** 采用 3 kW 半导体宽带激光器在 28CrMoNiV 钢基板上进行了激光熔覆试验,并结合热影响区(HAZ)温度场模拟优化了再制造工艺。通过光学显微镜、扫描电镜和 X 射线衍射仪对 HAZ 和基体的组织进行了分析。最后通过拉伸试验对修复后的熔覆 HAZ 进行了性能测试。结果表明,单层熔覆 HAZ 主要产生了马氏体相变,并在 HAZ 顶部发现了马氏体和铁素体的不良组织。模拟结果表明,该不良组织可以通过三层以上的多层熔覆方法消除。拉伸性能测试结果表明,三层熔覆 HAZ 的平均抗拉强度达到 927.35 MPa,高于基体或单层熔覆 HAZ;断后伸长率达到 10.23%,较单层熔覆 HAZ 有所提高,更接近基体性能。

**关键词** 激光技术; 28CrMoNiV 钢; 激光熔覆; 热影响区; 温度场模拟

**中图分类号** TN249; TG141

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0802009

## Microstructure Evolution of Heat-Affected Zones of 28CrMoNiV Steel Repaired by Lasers

Li Yundong<sup>1,2</sup> Dong Gang<sup>1,2</sup> Yao Jianhua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

<sup>2</sup>Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

**Abstract** A laser cladding test on a 28CrMoNiV substrate by a 3 kW broadband semiconductor laser is conducted, and the refabrication process is optimized with the aid of simulation of the temperature fields in the areas of heat-affected zones (HAZ). By means of optical microscope, scanning electron microscope, and X-ray diffraction, the microstructures in the HAZ and substrate zone are studied. The tensile test is conducted to investigate the tensile performance of the repaired laser cladding HAZ. The results show that, in the HAZ of the single-layer cladding sample, there exists a martensite phase transformation and an undesirable microstructure composed of martensite and  $\delta$ -ferrite distributes at the top of the HAZ. The simulation results indicate that this undesirable microstructure can be eliminated if the over-three-layer cladding is adopted. The tensile testing results show that the HAZ with three-layer cladding has the average tensile strength up to 927.35 MPa, which is higher than those of the substrate or the HAZ with single-layer cladding. The average fractural elongation of the HAZ with three-layer cladding is 10.23%, which is a little higher than that of the single-cladding and much closer to that of the substrate.

**Key words** laser technique; 28CrMoNiV steel; laser cladding; heat-affected zone; temperature-field simulation

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

汽轮机转子在生产加工以及服役过程中容易发生损伤现象。汽轮机转子的更换不仅价格昂贵而且周期

**收稿日期:** 2016-01-14; **收到修改稿日期:** 2016-04-07

**基金项目:** 浙江省公益技术研究工业项目(2014C31122)

**作者简介:** 李允东(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光表面改性与激光再制造方面的研究。

E-mail: liyundong10@163.com

**导师简介:** 姚建华(1965—),男,博士,教授,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: laser@zjut.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: donggang@zjut.edu.cn

长,用户及汽轮机生产厂家一直在寻求一种经济、快捷、安全的可修复受损转子的方法。激光修复技术由于其自身特点,特别适用于工件的局部修复。封慧等<sup>[1]</sup>采用激光熔覆技术实现了发动机曲轴轴颈的修复,并建立了多拐曲轴连杆轴颈修复的轨迹模型。李凯斌等<sup>[2]</sup>采用光纤激光器,在不锈钢表面进行送丝熔覆修复试验,并研究了工艺参数对熔覆层形貌的影响。

热影响区(HAZ)是基体(SZ)与熔覆层之间的过渡区域,虽然该区域在加工过程中没有熔化,但其组织和性能都发生了很大的改变<sup>[3-5]</sup>。在实际运行中发现,单层激光熔覆修复的转子会出现电跳值高、抗疲劳性能低等问题,这严重影响了修复后转子的运行稳定性和使用安全性。因此,热影响区的组织变化是影响激光熔覆修复转子的关键因素。研究人员通常更关注熔覆层和稀释区域的组织和性能,对热影响区的研究较少。本文以目前国内外最常用的工业汽轮机转子材料 28CrMoNiV 钢为研究对象,模拟了激光修复过程,并对基体组织变化过程进行了研究;通过 COMSOL 软件,对基体在熔覆再制造过程中的温度场变化进行了数值模拟,根据结果优化了工艺方案;最后对基体及优化前后的熔覆热影响区的拉伸性能进行了测试和对比。

## 2 试验材料和方法

试验采用 3 kW 的半导体宽带激光器,矩形光斑尺寸为 12 mm×2 mm,能量均匀分布,激光熔覆功率密度为 120 W·mm<sup>-2</sup>。利用自行设计的送粉头进行侧向送粉,搭接率为 50%,送粉速率为 10 g/min。试验所用基材为调质态 28CrMoNiV,尺寸为 200 mm×100 mm×20 mm。激光熔覆层材料采用自制的激光专用铁基合金粉末。试验时将基板半浸入循环水中冷却,以避免热积累对试验结果造成影响。

为考察 HAZ 组织在修复过程中的变化情况,分别进行了单层单道和多层多道(三层四道)两种不同形式的试验。所制得的熔覆试样用线切割取样,经打磨、抛光、腐蚀后进行金相观察,腐蚀液为苦味酸 4 g、盐酸 5 ml、乙醇 100 ml 的混合溶液,腐蚀时间为 30 s。采用光学显微镜进行金相观察,利用场发射扫描电镜(SEM)对热影响区进行形貌观察,使用 X 射线衍射仪对特定热影响区进行物相分析,扫描速度为 4(°)/min。工件尺寸示意图如图 1 所示。

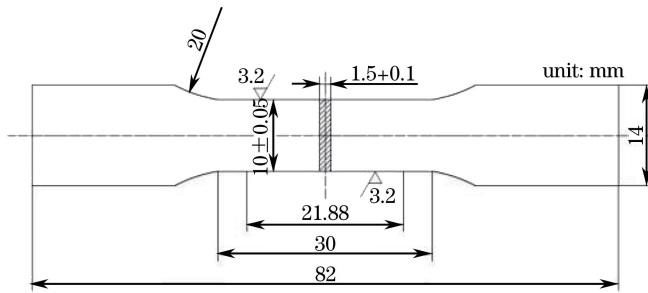


图 1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen for tensile tests

## 3 试验结果与分析

### 3.1 热影响区显微组织分析

图 2 所示为 28CrMoNiV 基体及单层激光熔覆 HAZ 各区域的组织 SEM 照片。图 2(a)所示为基体原有组织。基体经过调质处理后,基体组织为铁素体上分布极细小的碳化物颗粒,即回火索氏体。图 2(b)所示为 HAZ 的中下部组织。在激光熔覆加工过程中,该区域的温度达到奥氏体相变温度,产生了马氏体相变。HAZ 中越靠近表面的位置温度越高,冷却后组织含有的马氏体量也越多。另外,HAZ 中下部组织中碳化物颗粒数量较基体原有组织少,但颗粒体积变大。图 2(c)所示为 HAZ 的顶部组织,该区域受热影响最大。从图 2(c)可以看出,该区域主要为马氏体组织,且碳化物被完全熔解,同时可以观察到马氏体中存在一种块状组织。通过光学显微镜(OM)观察,发现组织中这些块状组织呈亮白色,如图 3(a)所示,周边马氏体组织已经被腐蚀,而块状组织表面光洁,可见该组织中 Cr 含量高,耐腐蚀性能好。将该深度的 HAZ 试样剥离、制样,并单独进行 X 射线衍射(XRD)测试。结果如图 3(b)所示,该区域有 4 个明显的峰,且与 α 铁素体

和马氏体组织 $\alpha+M$ 相对应。文献[3]和文献[6]均指出由于Cr、Mo、V等元素的作用,马氏体 $\gamma$ 相区会缩小,而 $\delta$ 相区会增大。由图2(c)已知HAZ顶部的碳化物在加热过程中完全溶解,但由于降温速度极快,而Cr、Mo、V等元素扩散速度有限,这些元素发生局部偏析,在局部区域Cr、Mo、V等元素含量高的位置就有可能产生 $\delta$ 铁素体<sup>[7]</sup>。因此推断这些亮白色的组织很可能为 $\delta$ 铁素体。马氏体中存在 $\delta$ 铁素体是一种典型的不良组织。 $\delta$ 铁素体的存在会加快裂纹的产生和扩展,降低材料的抗冲击韧性和抗疲劳性能。因此在转子的服役过程中,HAZ的 $\delta$ 铁素体周围易产生裂纹,最终使得转子失效。

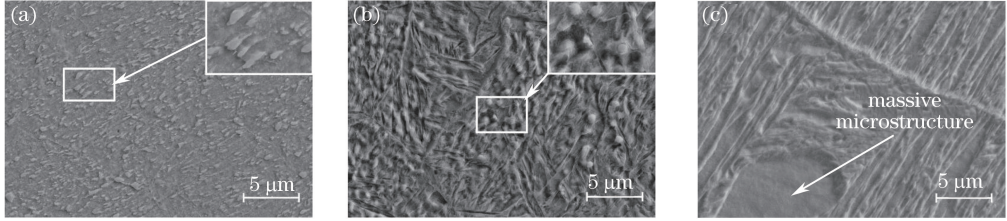


图2 (a)基体组织及单层激光熔覆HAZ组织的(b)中下部和(c)顶部的SEM照片

Fig. 2 SEM images of microstructures of (a) substrate, (b) lower part and (c) top part of HAZ with single-layer cladding

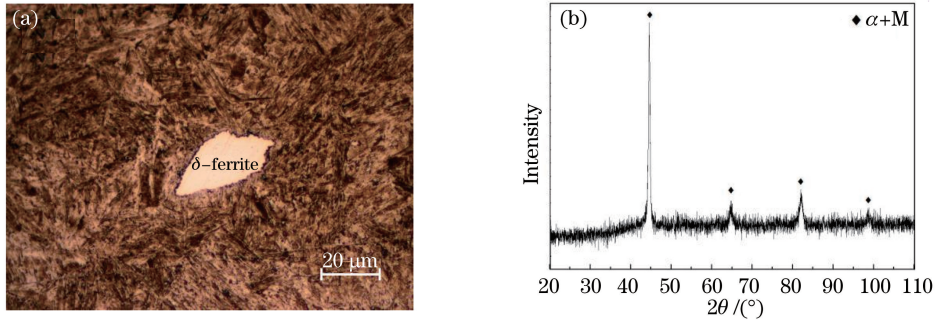


图3 (a) HAZ中的 $\delta$ 铁素体;(b) HAZ顶部组织XRD谱

Fig. 3 (a) Ferrite inside HAZ; (b) XRD spectra of the top part of HAZ

图4所示为多层熔覆HAZ上部和中部的组织照片,多层熔覆HAZ下部组织与单道熔覆HAZ下部组织相同。从图4可以看出,经过多道熔覆,HAZ上部和中部组织中的马氏体有所分解,其中的碳化物虽然保留着原来层片状的形态,但是已经有部分开始熔解,出现了球化的趋势。虽然后续熔覆可以将HAZ加热到较高温度,但由于加热时间较短,马氏体只是部分分解,没有成为标准的回火组织。另外,在多层熔覆的HAZ随机取样10组进行OM观察,均未发现 $\delta$ 铁素体存在。

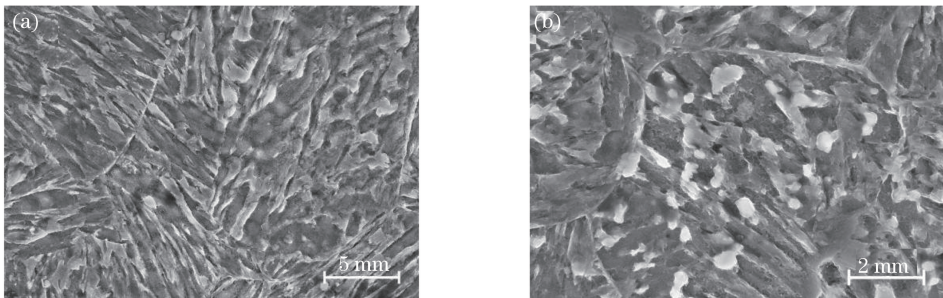


图4 多层熔覆HAZ微观组织SEM照片。(a)上部;(b)中部

Fig. 4 SEM images of microstructures of HAZ with multi-layer cladding. (a) Top part; (b) middle part

### 3.2 温度场模拟分析

文献[7-8]指出 $\delta$ 铁素体需要在较高温度下淬火才会产生,因此适当降低基体在激光熔覆再制造过程中的表面温度就可以避免该不良组织的产生。降低激光功率密度可以达到该目的,但降低功率密度可能造成粉末不能完全熔化,最终造成熔覆层内出现缺陷。所以应采用多层熔覆的工艺方法,利用后续热循环来消除



不良组织。

此处所讨论的 HAZ 未涉及熔池的流动及固液相变过程,因此采用瞬态热传导模型。考虑到熔池流动、熔覆层增材过程以及激光能量吸收率对 HAZ 温度的影响不可忽略,引入修正系数来表征上述因素对 HAZ 的影响。利用 K 型热电偶对熔覆层周围基体 6 个点位的温度进行采集,与数值模型中对应点温度进行对比。结果发现,模拟值与试验测量值吻合度较高,如图 5 所示。图 6 所示为熔覆 HAZ 轮廓仿真与试验对比图,可以发现仿真与实际测量的 HAZ 轮廓一致,这也说明该模型具有一定的精确度,可为后续分析提供理论依据。

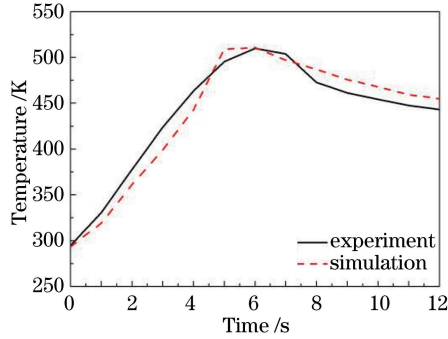


图 5 数值模拟与实际测试得到的温度随时间变化曲线

Fig. 5 Changing of temperature versus time obtained by numerical simulation and practical test

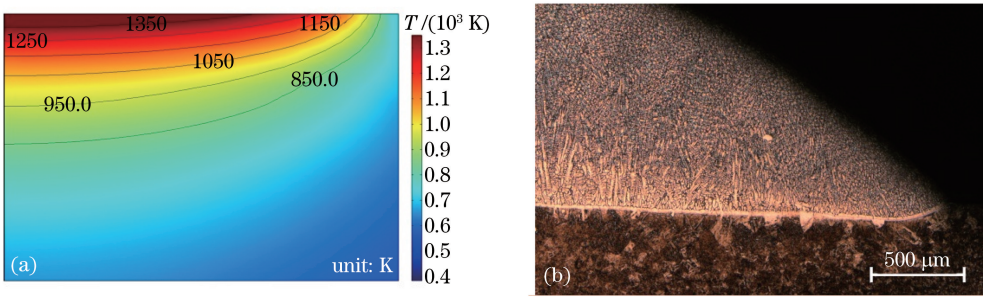


图 6 (a) 单道单层熔覆 HAZ 温度场模拟; (b) 实际熔覆结合面形貌

Fig. 6 (a) Simulation of temperature fields of HAZ with single-layer cladding; (b) morphology of real interfaces of cladding

图 7 所示为单道单层熔覆层激光熔覆加工时距表面特定距离的 HAZ 温度变化数值模拟曲线。由图 7 可知,HAZ 在激光熔覆过程中经历了一次快速升温(3.4 s)和一次快速冷却(13 s)过程。图 7 中所标注的温度为各深度的最高温度,它随着深度增加而降低。测量结果显示,HAZ 的平均深度为 1.556 mm,即在加热过程中当基体温度超过 839 K 时,基体组织开始产生相变。

在距表面 0.947~1.556 mm 区域内,加热的最高温度为 839~965 K,该部分为 HAZ 的中下部。在该区域内大量铁素体转变为奥氏体并快速长大。冷却时奥氏体转变为马氏体,且冷却起始温度越高的位置马氏体含量越多,硬度越高。研究表明,当温度分别高于 450 °C、500 °C 和 550 °C 时,Cr、Mo 和 V 三种合金元素

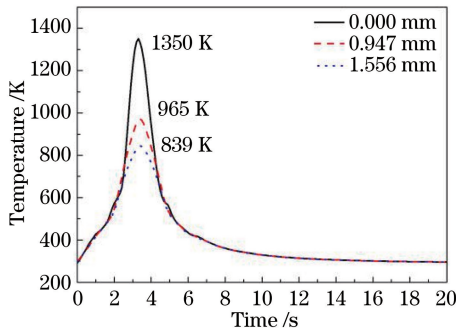


图 7 距表面特定距离温度变化模拟结果

Fig. 7 Simulation results of temperature versus time at certain distance from surface



可以在铁素体中快速扩散<sup>[9]</sup>。由此可知,当温度达到 839 K(即 566 °C)以上时,各合金元素均可以在铁素体中快速扩散。因此在该区域可观察到小颗粒碳化物熔解而大颗粒碳化物长大的现象。文献[10]指出碳化物在较高温度区域呈球状,这与图 2(b)中观察到的情况相符。

表面至 0.947 mm 的深度范围对应图 2(c)所示的组织区域,铁素体存在于该区域。在 HAZ 中该区域的加热温度最高,为 1065~1350 K。该区域在高温时,铁素体完全转变为奥氏体,且碳化物完全熔解于奥氏体中。由于 Cr、Mo、V 等合金元素的扩散速率远小于 C 元素,且加热时间短暂,因此 Cr、Mo、V 等合金元素在局部富集,这导致了铁素体的出现并在快速冷却中一直保留直至室温。

在相同的工艺条件下更改模型来模拟第二层熔覆及第三层熔覆的再制造过程。根据实践经验,将每一层熔覆层的高度设定为 1 mm。图 8 所示为多层熔覆 HAZ 上沿的温度变化情况。由于熔覆层变厚,传热至相同位置的时间变长,第三层的 HAZ 上沿达到最高温度的时间比第二层稍晚,最高温度也低于第二层。在制备第二层熔覆层的时候,HAZ 上沿温度达到 1042 K,HAZ 中最高温度在 965~1042 K 之间的区域依然可能在冷却过程中产生马氏体和  $\delta$  铁素体的不良组织。在制备第三层熔覆层的时候,HAZ 上沿所经历的最高温度只有 919 K,高于马氏体相变温度,同时低于  $\delta$  铁素体的产生温度。根据模拟结果,在该工艺条件下,激光熔覆再制造需要制备至少三层熔覆层才能消除 HAZ 中存在的不良组织,防止转子性能下降,而熔覆层超出尺寸要求的部分可通过车削去除。

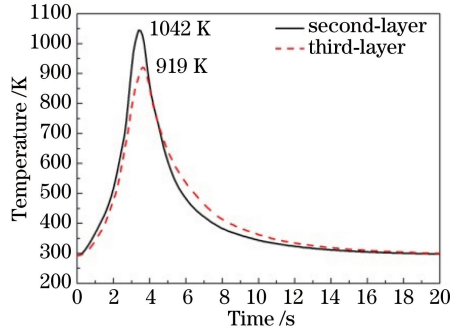


图 8 多层熔覆 HAZ 的温度场分布情况

Fig. 8 Temperature field distribution of HAZ with multi-layer cladding

### 3.3 热影响区拉伸性能分析

为表征不同工艺对 HAZ 性能的影响,分别在单层熔覆和三层熔覆的 HAZ 中各取样三个,制成 HAZ 拉伸试样,另外在基体中取三个拉伸试样作为对照,拉伸测试结果见表 1。由表 1 可知,单层熔覆 HAZ 的相变使基体的抗拉强度上升 9%,但 1~3 号试样平均断后伸长率仅为 5.09%,远小于基体的平均断后伸长率 14.60%,塑性明显下降。三层熔覆 HAZ 平均抗拉强度达到 927.35 MPa,高于单层熔覆 HAZ,同时平均断后伸长率也达到 10.23%,与基体原有性能相近。

表 1 HAZ 及 SZ 拉伸测试结果

Table 1 Tensile test results of HAZ and SZ

No.	Tensile strength /MPa	Elongation /%	
HAZ of single-layer cladding	1#	829.13	6.00
	2#	826.87	4.63
	3#	854.40	4.63
HAZ of three-layer cladding	7#	939.67	9.96
	8#	914.02	10.67
	9#	928.37	10.07
SZ	10#	764.07	14.50
	11#	756.00	13.25
	12#	769.94	16.06

## 4 结 论

对激光熔覆再制造过程中 HAZ 的组织演变进行了研究,利用 COMSOL 软件成功模拟了激光熔覆时基体的温度变化,对温度和组织变化的规律进行了量化,并提出通过三层熔覆的方法消除 HAZ 中  $\delta$  铁素体的方法。对再制造区域进行了拉伸性能测试,测试结果表明:单层熔覆 HAZ 的抗拉伸强度比基体高 9%,但塑性大幅下降;多层熔覆 HAZ 的平均抗拉强度达到 927.35 MPa,塑性较单层熔覆 HAZ 有所上升,更接近基体塑性。证明了采用激光多层熔覆再制造技术修复汽轮机转子是可行的。

为进一步推广激光熔覆再制造技术在汽轮机行业中的应用,仍有许多后续的研究需要进行,如再制造转子的疲劳性能、高温性能等。

## 参 考 文 献

- Feng Hui, Li Jianfeng, Sun Jie. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803003.  
封 慧, 李剑峰, 孙 杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.
- Li Kaibin, Li Dong, Liu Dongyu, *et al.* Research of fiber laser cladding repairing process with wire feeding [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103006.  
李凯斌, 李 东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103006.
- Xu Qingdong, Lin Xin, Song Menghua, *et al.* Microstructure of heat-affected zone of laser forming repaired 2Cr13 stainless steel [J]. Acta Metall Sin, 2013, 49(5): 605-613.  
徐庆东, 林 鑫, 宋梦华, 等. 激光成形修复 2Cr13 不锈钢热影响区的组织研究[J]. 金属学报, 2013, 49(5): 605-613.
- Wang Jinfeng, Wang Lijun, Yang Lijun, *et al.* Research on microstructure and properties of laser welding DP1000 high-strength steel weld joints [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903003.  
王金凤, 王立君, 杨立军, 等. DP1000 高强钢激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903003.
- Jing Cainian, Fan Jichao, Wang Conglei, *et al.* Characterization and formation mechanism of the weld interface of TRIP590 steel laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403004.  
景财年, 范吉超, 王丛雷, 等. 激光焊接 TRIP590 钢焊缝微观结构及形成机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403004.
- Zhao Meilan. Characteristics of  $\delta$ -ferrite and its effect on impact property in martensitic heat resistant steel [J]. CFHI Technology, 2011(2): 31-35.  
赵美兰. 马氏体钢中  $\delta$ -铁素体的表征及影响[J]. 一重技术, 2011(2): 31-35.
- Liu Zhengdong, Cheng Shichang, Bao Hansheng, *et al.* Formation and influence factors of  $\delta$  ferrite in high Cr martensitic heat resistant steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(11): 61-67.  
刘正东, 程世长, 包汉生, 等. 高铬马氏体耐热钢中  $\delta$  铁素体形成及影响因素[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(11): 61-67.
- Tan Wei, Ji Genshun, Zhang Jianbin, *et al.* *In-situ* observation of  $\gamma$ -austenite to  $\delta$ -ferrite phase transformation in a nickel-saving austenitic stainless steel during heating [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(10): 90-95.  
谭 威, 季根顺, 张建斌, 等. 节镍奥氏体不锈钢加热过程中  $\gamma \rightarrow \delta$  转变的原位观察[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(10): 90-95.
- Zhang Shouhua. Alloy-steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981: 10-37.  
章守华. 合金钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981: 10-37.
- Liu Qingdong, Peng Jianchao, Liu Wenqing, *et al.* 3D atom probe characterization of alloy carbides in tempering martensite. II. Growth [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(11): 1288-1296.  
刘庆冬, 彭剑超, 刘文庆, 等. 回火马氏体中合金碳化物的 3D 原子探针表征. II. 长大 [J]. 金属学报, 2009, 45(11): 1288-1296.