

激光增材制造 AF1410 超高强度钢组织与力学性能研究

王志会^{1,2,3} 王华明^{1,2,3} 刘 栋^{1,2,3*}

¹北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100191

²国防科技工业激光增材制造技术研究应用中心, 北京 100191

³大型整体金属构件激光直接制造教育部工程研究中心, 北京 100191

摘要 采用激光增材制造技术制备了 AF1410 超高强度钢厚板试样, 采取均匀化热处理和 AF1410 钢传统热处理工艺相结合的热处理制度。分析了其沉积态和热处理后的微观组织、硬度及室温拉伸性能变化。结果表明: 激光增材制造的沉积态 AF1410 超高强度钢试样组织表现出定向凝固的特征, 硬度约为 360 HV; 经热处理后, 试样中定向胞状凝固组织消失, 组织细化, 获得细小的回火马氏体组织, 硬度达到 510 HV 左右, 室温屈服强度和抗拉强度分别达到 1490 MPa 和 1610 MPa, 延伸率和断面收缩率分别为 12.8% 和 70%。

关键词 光学制造; 激光增材制造; AF1410 超高强度钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG14, TN24 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0403001

Microstructure and Mechanical Properties of AF1410 Ultra-High Strength Steel Using Laser Additive Manufacture Technique

Wang Zhihui^{1,2,3} Wang Huaming^{1,2,3} Liu Dong^{1,2,3}

¹National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China

²Research and Application Center of Laser Additive Manufacturing for Defense Industries, Beijing 100191, China

³Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing for Large Metallic Components, Beijing 100191, China

Abstract AF1410 ultra-high strength steel plate sample is fabricated using the laser additive manufacturing (LAM) technique and homogenization treatment combined with the traditional heat treatment of AF1410 is conducted as the heat treatment. Microstructures, hardness and tensile properties of the steel are investigated. Results show that the microstructures of as-deposited AF1410 exhibit some characteristics of directional solidification with a hardness of about 360 HV. After the heat treatment, the directional solidification microstructure disappears while a refined microstructure and tempered martensite are obtained with hardness of about 510 HV. Meanwhile, yield strength and tensile strength at room temperature of the heat treated steel reach to 1490 MPa and 1610 MPa, respectively, with the elongation of 12.8% and the reduction of area of 70%.

Key words optical fabrication; laser additive manufacturing; AF1410 ultra-high strength steel; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 350.3390; 350.3850; 160.3900

收稿日期: 2015-10-26; 收到修改稿日期: 2015-12-03

基金项目: 北京市科技计划项目(D141100004114001)

作者简介: 王志会(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光材料加工制造方面的研究。E-mail: izhihui1990@126.com

导师简介: 王华明(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事先进材料激光制备与成形制造技术方面的研究。

E-mail: wanghuaming@buaa.edu.cn

*通信联系人。E-mail: liudong@buaa.edu.cn

1 引言

AF1410钢是一种二次硬化高合金超高强度钢^[1],其名义成分为Fe-10Ni-14Co-2Cr-1Mo-0.16C^[2],具有优异的塑韧性、良好的抗应力腐蚀性及焊接性,广泛应用于飞机起落架、轮船主轴等大型承力构件^[3]。然而,由于AF1410钢中含有大量的Ni和Co元素,因此材料价格较高,利用传统方法如铸造、锻造易造成对材料的浪费,增加生产成本。激光增材制造(LAM)技术是我国近几年来迅速发展的新型成型工艺^[4-6],该技术利用计算机辅助设计、数控及激光等技术,能够实现构件的近净成形,节约材料的同时可以缩短生产周期,从而降低成本^[7]。目前,激光增材制造技术已经成功用于多种金属材料的构件制备^[8-10]。

国内外学者针对AF1410钢的热处理工艺及力学性能等做了大量的研究工作。如Handerhan等^[11]对比分析了AF1410钢中添加稀土元素La对拉伸性能的影响;Garrison等^[12]分析了AF1410钢经不同温度回火处理后,析出相间距及显微组织对其断裂韧性的影响;Lee等^[13]研究了奥氏体化温度对AF1410钢二次硬化效果和冲击断口裂纹扩展行为的影响;李阿妮等^[14]研究了AF1410钢时效温度对其抗拉强度和断裂韧性的影响。但上述研究均以铸锻造方法制备的AF1410钢为对象,而激光增材制造的AF1410钢组织及力学性能方面的研究目前国内外鲜有报道。

本文采用激光增材制造技术,成功制备了AF1410超高强度钢板状试样。以此为对象,重点分析了其沉积态和热处理后的微观组织、硬度及室温拉伸性能的变化规律,阐明了钢组织对其力学性能的影响,为其工业化应用提供指导。

2 实验材料和方法

AF1410钢的激光增材制造所用球形粉末(图1)材料是从陕西宇光飞利金属材料有限公司购买,其粉末粒度为50~250 μm,化学成分经钢铁研究总院测定,在表1中给出。所用激光器为IPG 10 kW的光纤激光器。AF1410钢的激光增材制造过程如图2所示,其中基板材料为Q235钢。便于行文,这里指定Z轴方向为纵向,Y轴方向为横向。激光增材制造工艺参数如下:激光束功率为8.0 kW,光斑直径为5 mm,扫描速率为1000 mm/min,送粉速率为1250 g/min,单层沉积厚度约为2 mm。在高纯氩气气氛保护下逐层熔化沉积,成形腔内氧含量小于0.0075%,制备出尺寸为190 mm×156 mm×30 mm的AF1410钢板状试样。

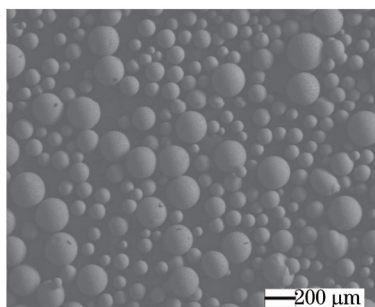


图1 激光增材制造用的AF1410钢球形粉末

Fig.1 Microstructure of AF1410 steel powder used for LAM

表1 AF1410钢球形粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of AF1410 steel powders(mass fraction,%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Co	N	O	Fe
0.17	0.039	0.0067	<0.005	0.005	2.02	10.22	1.07	<0.005	0.012	14.08	0.001	0.0034	bal.

为了消除沉积态中横纵向组织的差异以及可能存在的偏析,首先将沉积态的试样在1200℃下进行3 h的均匀化处理,随后按照AF1410钢传统热处理工艺进行后续热处理^[15],如图3所示,AC表示空冷,AQ表示空淬。采用光学显微镜(OM)、X射线衍射(XRD)以及扫描电子显微镜(SEM)对沉积态和热处理后的试样组织进行分析;利用维氏硬度计测试试样硬度;采用万能测试机对热处理后试样横、纵向拉伸性能进行测试。

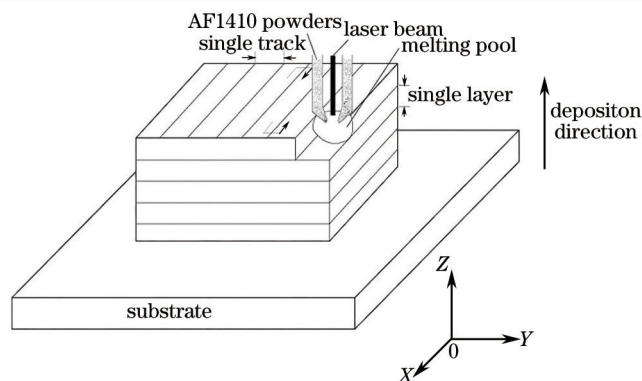


图2 激光增材制造过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of LAM process

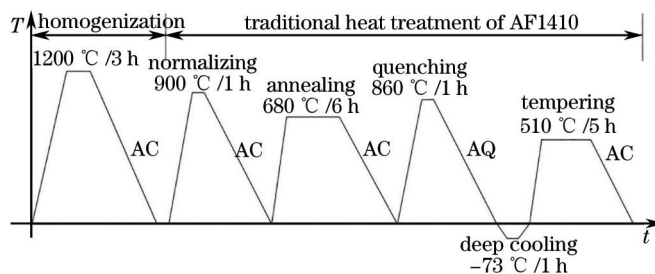


图3 激光增材制造 AF1410 试样的热处理工艺

Fig.3 Heat treatment procedure of LAM for AF1410

3 试验结果与讨论

3.1 沉积态试样显微组织

激光增材制造沉积态 AF1410 钢纵截面和横截面扫描电镜照片如图 4(a)、(b)所示。从图 4(a)中可以看出纵截面是平行排列的柱状形貌,而从图 4(b)中可以看出横截面显微组织为蜂窝形貌,表明激光增材制造 AF1410 钢沉积态组织为定向生长的胞状晶。形成胞状晶是因为在激光增材制造过程中,熔池中的熔体能够通过与已沉积固体材料之间的无界面快速热传导而迅速冷却凝固,并以外延生长的方式形成具有定向凝固特征的非平衡快速凝固组织^[16]。图 4(c)为 XRD 图谱,图中只有三个衍射峰,比标准图谱表明,激光增材制造 AF1410 钢沉积态中主要相为铁素体。

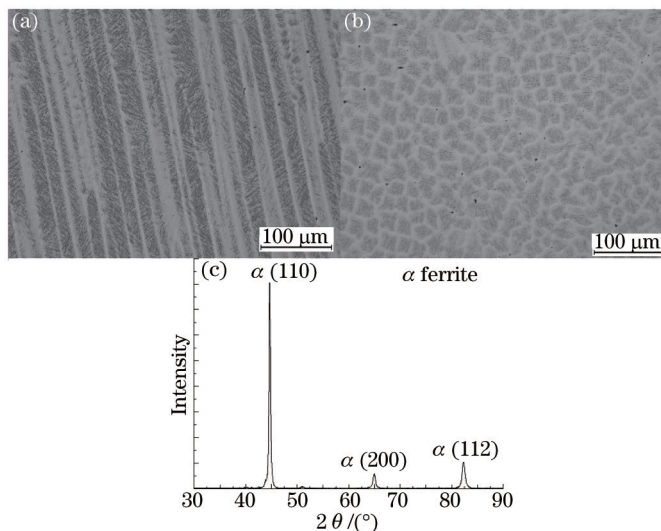


图4 沉积态 AF1410 钢的(a)纵截面,(b)横截面和(c)XRD 图谱

Fig.4 (a) Longitudinal section, (b) cross section and (c) XRD spectra of as-deposited AF1410

3.2 热处理态组织

激光增材制造试样在 1200 °C 保温 3 h 均匀化处理后的金相组织如图 5(a)、(b)所示,可以看出,经高温均匀化处理,沿沉积方向生长的胞状晶组织消失,得到粗大的等轴晶,横纵向晶粒尺寸略有差异。奇怪的是,纵向晶界容易辨别,但横向晶界不易辨别,原因有待于进一步分析。正火-退火处理后金相组织如图 5(c)、(d)所示,可以看出晶界难以分辨,且横纵截面组织已看不出明显的差别,但是组织杂乱,表明组织内形成了较多的亚结构。

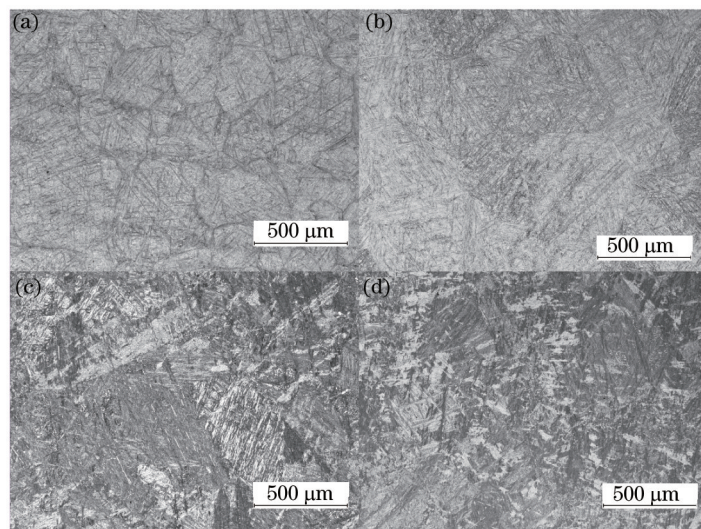


图 5 AF1410 钢均匀化后的以及正火-退火后的纵截面和横截面金相组织。(a) 均匀化后的纵截面; (b) 均匀化后的横截面; (c) 正火-退火后的纵截面; (d) 正火-退火后的横截面

Fig.5 Microstructure at cross section and longitudinal section of AF1410 after homogenization as well as normalizing-annealing.

(a) Longitudinal section after homogenization; (b) cross section after homogenization; (c) longitudinal section after normalizing-annealing; (d) cross section after normalizing-annealing

试样经淬火、深冷及回火处理后的组织如图 6(a)、(b)所示。可以看出,激光增材制造 AF1410 钢热处理后组织主要有回火马氏体板条,马氏体板条宽度为 1~2 μm。文献[17]指出 AF1410 钢在 510 °C 回火会形成细小弥散起二次硬化作用的碳化物以及逆转变奥氏体,但是光镜和扫描电镜照片中均分辨不出,而图 6(c)的 XRD 图谱中也只检测到回火马氏体的衍射峰,因此,想要观察碳化物只能借助于放大倍数更高的透射电子显微镜。

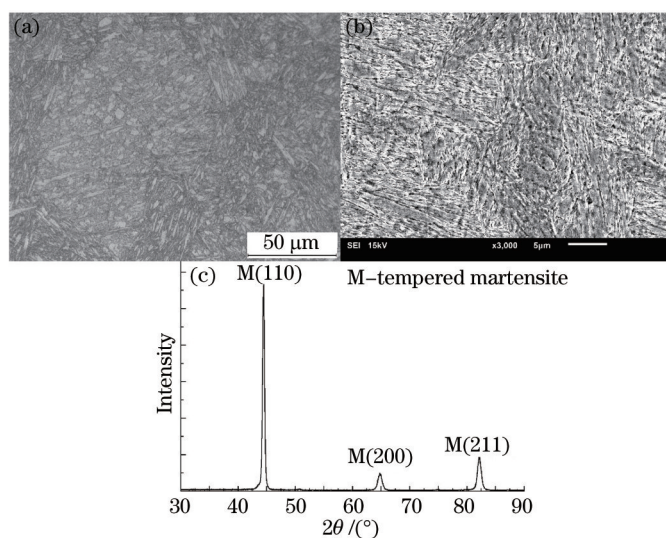


图 6 (a) AF1410 钢回火后的金相照片; (b) SEM 图像; (c) XRD 图谱

Fig.6 (a) OM image of AF1410 steel after tempering; (b) SEM image; (c) XRD spectra

3.3 力学性能分析

经热处理后试样的拉伸性能以及锻件的拉伸性能在表2中列出。可以看出,与相同热处理条件下锻件性能相比,试样的屈服强度和断面收缩率达到或超过了锻件,而抗拉强度和伸长率偏低,其中抗拉强度较锻件低 50~80 MPa(4%左右),伸长率低 3%,但其拉伸性能均达到 AF1410 钢的阈值,基本满足工程应用要求。造成抗拉强度和伸长率偏低的原因可能是较锻态组织,激光增材制造的 AF1410 钢晶粒粗大,通过后续热处理虽可进一步细化,但其作用效果有限。激光增材制造构件屈服强度超过锻件而抗拉强度却不如锻件的原因可能为激光增材制造保留了 AF1410 钢中弥散粒子与基体的共格关系^[18],因此对合金的屈服强度和抗拉强度会产生不同程度的影响。

试验钢拉伸断口 SEM 照片如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,拉伸断口为典型的韧性断裂形貌,由纤维区、放射区和剪切唇三个区域组成。纤维区区域较小,占断面面积不足 1%,由微孔聚集形成的大空洞组成;放射区约占断面面积的 40%,可观察到大量裂纹扩展形成的二次裂纹和韧窝,且韧窝小而浅,因此试验钢的延伸率仅有 13%;剪切唇较为平整,有撕裂棱,与拉伸轴大致呈 45°,且在高倍下观察到了大量细小韧窝和舌状花纹。

表 2 激光增材制造与锻造 AF1410 钢拉伸性能对比

Table 2 Tensile properties contrast of AF1410 steel manufactured by LAM and forging

Material states Orientation	LAM after heat treatment		Forging ^[15]	Threshold ^[19]
	Z direction	Y direction		
σ_b /MPa	1606.7±4.9	1630.7±6.8	1680	>1620
$\sigma_{0.2}$ /MPa	1491.3±3.8	1511±7.0	1480	>1480
δ /%	13.1±0.5	12.4±0.3	16	>12
ψ /%	70.3±0.7	68.5±0.4	69	>60

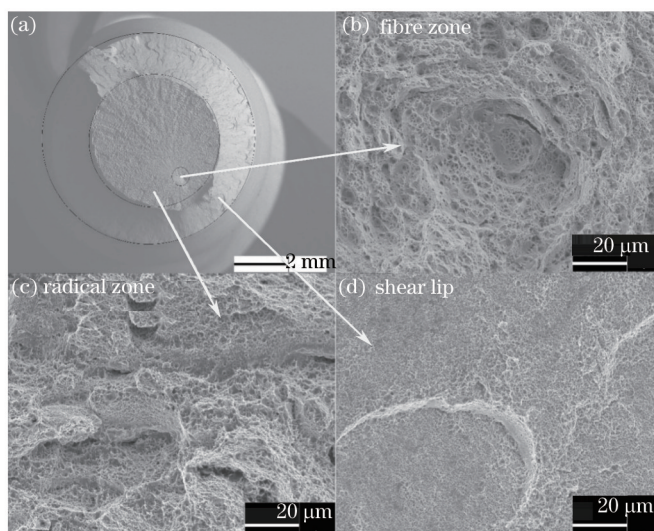


图 7 激光增材制造 AF1410 钢拉伸断口 SEM 图像。(a) 宏观; (b) 纤维区; (c) 放射区; (d) 剪切唇

Fig.7 SEM images of tensile fracture of laser additive manufactured AF1410 steel. (a) Macroscopic; (b) fibre zone;

(c) radical zone; (d) shear lip

硬度测试结果如图 8 所示。可以看出,激光增材制造 AF1410 钢沉积态硬度仅有 360 HV 左右,硬度较低。经均匀化处理后空冷使试样发生了淬火形成了马氏体,因此硬度较高,达到 470 HV 左右。正火和回火处理虽能细化晶粒,但却使试样的硬度降低,导致这一现象产生的原因是在 680 °C 保温 6 h 使马氏体分解为铁素体,同时位错数目减少,硬度降低^[20]。经淬火后,形成了马氏体组织,试样硬度迅速增加大至 500 HV,而后续的深冷处理继续增加了试样的硬度,表明残余奥氏体发生了马氏体转变。经回火后,硬度约为 510 HV,试样的硬度并没有明显下降,表明产生了二次硬化现象,这佐证了碳化物的存在。

4 结 论

采用激光增材制造技术成功制备了 AF1410 钢厚板试样,激光增材制造沉积态组织具有定凝固组织特征,表现为沿沉积方向生长的胞状柱晶,且硬度相对较低,只有 350 HV 左右。

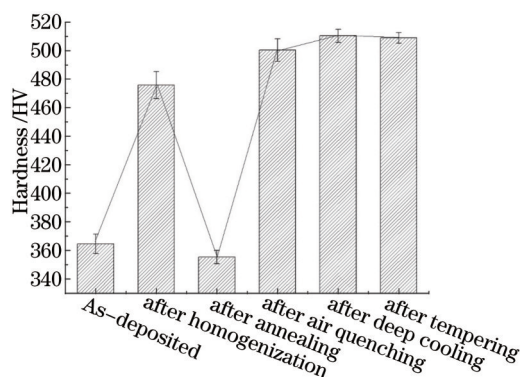


图8 激光增材制造 AF1410 钢热处理后的硬度

Fig.8 Hardness changes of the tested steel at different heat treatment processes

经 1200 °C 均匀化处理, 定向生长的胞状柱晶形貌消失, 组织发生等轴化转变, 但晶粒粗化明显。经过后续热处理后, 组织得到细化, 获得了细小的回火马氏体组织, 硬度增加到 510 HV, 屈服强度达到 1490 MPa, 抗拉强度达到 1610 MPa, 延伸率和断面收缩率分别达到 12.8% 和 70%, 且拉伸断口表现为典型的韧性特征。

参考文献

- Xu Changgan, Zhang Shaorui. Ultra-high strength steel AF1410 with high toughness[J]. *Special Steel*, 1993, 14(6): 11-14.
许昌淦, 张少锐. 高韧性超高强度钢 AF1410[J]. *特殊钢*, 1993, 14(6): 11-14.
- Grujicic M. Coherent precipitation of M_2C carbides in AF1410 steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 1989, 117(5): 215-220.
- Yu Wei, Han Peng, Wu Bing. Influence of pre-corrosion on fatigue property of AF1410 EBW joint[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, (20): 86-88.
余伟, 韩鹏, 吴冰. 预腐蚀对 AF1410 电子束焊接头疲劳性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2010, (20): 86-88.
- Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 1-4.
- Shi Yusheng, Li Ruidi, Zhang Wenxian, *et al.*. Study on rapid prototyping process of stainless steel powder by selective laser melting[J]. *Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing Technology*, 2010, B04(1): 67-72.
史玉升, 李瑞迪, 章文献, 等. 不锈钢粉末的选择性激光熔化快速成形工艺研究[J]. *电加工与模具*, 2010, B04(1): 67-72.
- Zhao Jianfeng, Ma Zhiyong, Xie Deqiao, *et al.*. Metal additive manufacturing technique[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(5): 675-683.
赵剑峰, 马智勇, 谢德巧, 等. 金属增材制造技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(5): 675-683.
- Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components (invited paper)[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3204-3209.
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文)[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3204-3209.
- Chen Yongcheng, Zhang Shuquan, Tian Xiangjun, *et al.*. Microstructure and micro-hardness of 4045 Aluminum alloy fabricated by laser melting deposition[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303008.
陈永城, 张述泉, 田象军, 等. 激光熔化沉积 4045 铝合金显微组织及显微硬度[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303008.
- Jiang Hua, Tang Haibo, Fang Yanli, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of rapid solidified ultra-fine columnar grain Ni-base superalloy DZ408 by laser melting deposition manufacturing[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0203004.
姜华, 汤海波, 方艳丽, 等. 激光熔化沉积 DZ408 镍基高温合金微细柱晶显微组织及性能[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0203004.
- Feng Shurong, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Wear resistance of laser clad hard particles reinforced intermetallic composite coating on TA15 Alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0203002.
冯淑蓉, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0203002.
- Handerhan K J, Garrison W M, Moody N R. A comparison of the fracture behavior of two heats of the secondary hardening steel AF1410 [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 1989, 20(1): 105-123.
- Garrison W M, Moody N R. Influence of inclusion spacing and microstructure on the fracture toughness of the secondary hardening steel AF1410[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 1987, 18(7): 1257-1263.

- 13 Lee K B, Kwon H, Kwon H, *et al.*. Effects of alloying additions and austenitizing treatments on secondary hardening and fracture behavior for martensitic steels containing both Mo and W[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2001, 32(7): 1659–1670.
- 14 Li Ani, Li Yong, Wang Chunxu, *et al.*. Influence of Mo on secondary hardening behavior of ultra-high strength AF1410 steel[J]. *Iron and Steel*, 2007, 42(9): 60–62.
李阿妮, 厉 勇, 王春旭, 等. Mo含量对AF1410钢二次硬化效果的影响[J]. *钢铁*, 2007, 42(9): 60–62.
- 15 Davis J R. *ASM handbook*[M]. Allama Iqbal Town: ASM International, 2003: 733–735.
- 16 Sun Xiaomin, Liu Dong, Tang Haibo, *et al.*. Solid-state phase transformation and microstructure of laser direct manufactured TC17 titanium alloy components[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(4): 724–729.
孙晓敏, 刘 栋, 汤海波, 等. TC17钛合金构件激光直接成形固态相变行为及显微组织[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(4): 724–729.
- 17 Han Shun, Li Yong, Wang Chunxu, *et al.*. Behavior of rotating-bending fatigue failure of AF1410 steel[J]. *Iron and Steel*, 2013, 48(3): 82–85.
韩 顺, 厉 勇, 王春旭, 等. AF1410钢的旋转弯曲疲劳破坏行为[J]. *钢铁*, 2013, 48(3): 82–85.
- 18 Zhong Qunpeng, Zhao Zihua. *Fractography*[M]. Beijing: High Education Press, 2006.
钟群鹏, 赵子华. *断口学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 19 Gan Yong, Tian Zhiling, Dong Han, *et al.*. *Chinese Materials Engineering Canon*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
干 勇, 田志凌, 董 瀚, 等. *中国材料工程大典*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 20 Cui Zhongqi, Tan Yaochun. *Metallurgy and heat treatment*[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
崔忠圻, 覃耀春. *金属学与热处理*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

栏目编辑: 宋梅梅