

旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60 复合涂层的 显微组织与性能

刘洪喜 纪升伟 蒋业华 张晓伟 王传琦

(昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要 为细化涂层晶粒组织,提高熔覆涂层质量,采用旋转磁场辅助激光熔覆技术在 Q235 钢表面制备了 Fe60 复合涂层。借助扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)和 X 射线衍射(XRD)等表征手段对涂层进行了组织结构和物相分析,利用维氏硬度计测试了激光熔覆复合涂层截面显微硬度分布,通过摩擦磨损实验研究了涂层的磨损性能。结果表明,熔覆涂层主要由 γ -(Ni,Fe) 固溶体、 $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 和 Cr_5Si_3 组成, Cr_5Si_3 晶粒细化且分布均匀致密。旋转磁场辅助下,涂层平均显微硬度为 $685\text{HV}_{0.5}$,约为无磁场涂层的 1.1 倍;磨损失重仅为无磁场涂层的 0.66 倍,耐磨性能得到明显改善。

关键词 激光技术;激光熔覆;复合涂层;旋转磁场;摩擦磨损;显微组织

中图分类号 TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0103007

Microstructure and Property of Fe60 Composite Coatings by Rotating Magnetic Field Auxiliary Laser Cladding

Liu Hongxi Ji Shengwei Jiang Yehua Zhang Xiaowei Wang Chuanqi

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract In order to grain refinement and improve the quality of laser cladding coating, the Fe60-base composite coatings are fabricated by rotating magnetic field auxiliary laser cladding on Q235 steel surface. The microstructures and phase composition of the coating are analyzed by means of scanning electron microscopy (SEM), X-Ray diffraction (XRD) and energy dispersive spectrometer (EDS). The cross-section micro-hardness of the cladding layer is measured by Vickers hardness tester, and the abrasion performance of the cladding is characterized through the friction and wear experiments. The results show that the phase of the laser cladding composite coatings is mainly composed of γ -(Ni,Fe) solid solution, silicides and borides. The Cr_5Si_3 grain is refined and uniform distributed. The average micro-hardness of the composite coating is $685\text{HV}_{0.5}$, which is 1.1 times of that of the coating without rotating magnetic field; the weight loss of laser cladding modified layer is only about 0.66 times of that of the coating without rotating magnetic field. The wear behaviors of the laser cladding composite coatings are improved significantly.

Key words laser technique; laser cladding; composite coatings; rotating magnetic field; friction and wear; microstructure

OCIS codes 140.3390; 310.3840; 310.6870

1 引 言

激光熔覆是以激光束为热源,在基材表面熔覆一层与其具有完全不同成分和性能的合金涂层的表

面改性技术^[1]。利用激光熔覆技术可以在基材表面获得具有优异力学性能和耐磨、耐蚀性能的表面改性涂层^[2~6],进而达到局部修复或整体强化基材的

收稿日期: 2012-07-01; 收到修改稿日期: 2012-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51165015)和昆明理工大学分析测试基金(2011008)资助课题。

作者简介: 刘洪喜(1972—),男,博士,教授,主要从事激光束和离子束表面改性等方面的研究。

E-mail: vipluhx@yahoo.com.cn

目的,以提高其使用寿命,因而具有很好的应用价值^[7,8]。

随着磁控技术在材料制备领域的不断发展,近年来实践表明^[9~17],借助电磁搅拌作用可以细化晶粒组织、减少偏析、降低或消除气孔和裂纹的产生等,但针对旋转磁场辅助自动送粉式激光熔覆技术制备 Fe60 复合涂层的研究仍鲜有报道。基于此,本文采用在旋转磁场辅助下进行自动送粉式激光熔覆,分析了旋转磁场下激光熔覆层的显微组织形貌、显微硬度、摩擦磨损性能,以为旋转磁场下激光熔覆表面改性的应用提供理论基础和实验依据。

表 1 Q235 化学成分

Table 1 Chemical composition of Q235 steel

| Element | C | Mn | Si | S | P | Fe |
|------------------|-----------|-----------|------|-------|--------|------|
| Mass fraction /% | 0.14~0.21 | 0.36~0.64 | ≤0.3 | ≤0.05 | ≤0.045 | Bal. |

表 2 Fe60 化学成分

Table 2 Chemical composition of Fe60 powder

| Element | C | B | Si | Ni | Cr | Fe |
|------------------|-----|---|-----|----|----|------|
| Mass fraction /% | 1.5 | 3 | 3.6 | 3 | 20 | Bal. |

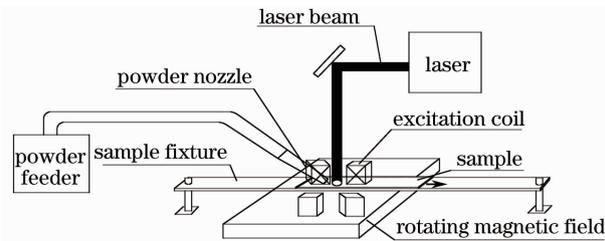


图 1 磁场辅助激光熔覆示意图

Fig. 1 Schematic of rotating magnetic field auxiliary laser cladding

激光熔覆实验在 GS-TFL-6000 型横流多模 CO₂ 激光器上完成,为比较在旋转磁场作用下的激光熔覆效果,进行了正交试验,得出在激磁电流为 9 A、激光功率为 4.2 kW、扫描速度为 300 mm·min⁻¹、离焦量为 55 mm、光斑直径约为 6 mm、同步送粉且送粉量为 30 g·min⁻¹时,制备的单道复合涂层质量较好。熔覆前粉末置于干燥箱中,100 °C 下烘干 2 h。熔覆过程中连续通氩气保护熔池,以防熔池内液态金属被氧化,气流量 20 L·h⁻¹。

激光熔覆后,沿垂直于激光扫描方向切取金相试样,尺寸为 10 mm×20 mm×10 mm,金相试样经打磨抛光后用王水(体积比 HNO₃:HCl 为 1:3)腐蚀。采用 LEICA DFC280 型光学显微镜观察复合涂层显微组织。通过 D/MAX-3BX 型 X 射线衍射(XRD)仪对涂层进行物相分析,角度扫描范围为 10°~90°,Cu 靶 K_α 线波长为 1.5406 nm,管电压为

2 实验材料与性能表征

实验基材为 Q235 钢,其化学成分如表 1 所示,机械加工成 100 mm×20 mm×10 mm 的熔覆试样,表面经除锈、除油、打磨处理后,再用丙酮清洗。熔覆层材料为 Fe60 合金粉末,其粒度为 50~100 μm,化学成分如表 2 所示。所用外加磁场为自制的旋转磁场装置,如图 1 所示。采用交流电激磁,通过对两对激磁线圈顺序通断电以实现磁场的旋转,被熔覆试样放置在磁极中间。

40 kV,管电流为 30 mA,扫描速度为 10°/min。借助 HVS-1000A 型微氏硬度计测试熔覆涂层截面的显微硬度,载荷为 500 g,加载时间为 30 s。

在 MMU-5G 型屏显式材料端面高温摩擦磨损试验机上进行磨损实验,涂层磨损试样尺寸均为 Φ4×6 mm。对磨副为 GCr15 钢,尺寸为 Φ43×5 mm,表面粗糙度为 R_a = 0.8 μm。加载载荷 300 N,转速为 100 r/min,加载时间为 30 min。实验前后把试样置于无水乙醇和丙酮溶液中分别超声清洗 10 min,吹干后用感量为 0.1 mg 的电子天平称重并计算其磨损失重。

3 实验结果与分析

3.1 熔覆涂层显微组织

图 2(a)为无磁场作用下 Fe60 涂层横截面的显微组织形貌。由图 2 可见,该涂层显微组织主要是柱状和树枝状硬质相。其中,涂层底部主要是柱状晶硬质相,中上部为树枝状晶硬质相,柱状和树枝状晶硬质相沿涂层底部向顶部生长。由于高能激光束是从涂层顶部到底部照射,涂层底部与基材产生冶金结合,因此,涂层底部相比中上部的温度梯度要大,所以底部相对中上部要先凝固结晶,使柱状晶和树枝状晶硬质相沿涂层底部向顶部生长。图 2(b)是激磁电流为 9 A 时 Fe60 涂层横截面的显微组织,该涂层显微组织形貌与图 2(a)明显不同,并且此涂

层显微组织在整体上比较统一,主要为折断或破碎的枝晶状硬质相。

通过以上对比可知,在旋转磁场辅助作用下进行激光熔覆,采用交流电激磁,磁场的变化导致在熔池内产生微电流,从而使熔池内液态金属成为带电导体。因此,熔池内液态金属必然受到洛伦兹力,液态金属在洛伦兹力搅拌作用下做复杂运动并冲击刚形成的晶体,使晶体生长受到抑制,从而获得晶核增多、晶粒细小的组织。新形成的晶粒在洛伦兹力作用下做复杂运动,加快搅拌熔池液态金属并起到打碎粗大晶粒的作用。另外,熔池液态金属本身在洛伦兹力作用下也做复杂运动,引起熔池中液态金属

对结晶前沿的冲刷,使得柱状晶或树枝晶状硬质相断裂、重熔,并形成新的形核中心;同时使结晶区浓度过冷度减小,从而提高了结晶前沿的稳定性,促进了均匀扩散,达到细化晶粒的目的。同时,熔池液态金属在洛伦兹力搅拌作用下,加速了其传热和传质,致使熔池最大散热方向不断变化,这样,粗大晶粒沿最大散热反方向生长的时间极短,从而减小了晶粒尺寸。所以,液态金属流动性加剧,降低了液态熔池的温度梯度和液态金属的粘度,使液态金属能及时填充结晶过程中因金属原子有序排列面体积收缩时所造成的空隙,减小了形成缩松或缩孔的可能性,改善了涂层质量。

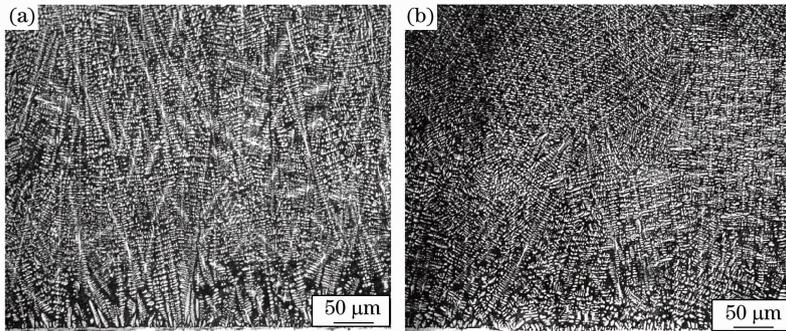


图2 Fe60 熔覆层显微组织形貌(OM 200 \times)。(a)无磁场涂层;(b)激磁电流为 9 A 的涂层

Fig. 2 Microstructure of Fe60 cladding coating (OM 200 \times). (a) Without magnetic field; (b) excitation current of 9 A

3.2 熔覆涂层物相结构

图3为涂层XRD图谱。图谱表明,旋转磁场激磁电流分别为 0 A 和 9 A 时,试样涂层物相都主要由 $\gamma(\text{Fe,Ni})$ 、 $\text{Fe}_{23}(\text{C,B})_6$ 和 Cr_5Si_3 组成。在 $2\theta = 52.28^\circ$ 时,9 A 试样涂层的衍射峰强度高于 0 A。由显微组织分析可知,旋转磁场激磁电流为 9 A 时,其显微组织在电磁搅拌作用下得到了细化并均匀分布,可以断定,9 A 试样涂层在衍射过程中参与的晶粒数目多于 0 A,在 XRD 衍射峰上表现为 9 A 试样涂层的衍射峰强度高于 0 A。另外,由图谱还可以看出,在本实验磁场强度范围内,施加旋转磁场熔覆

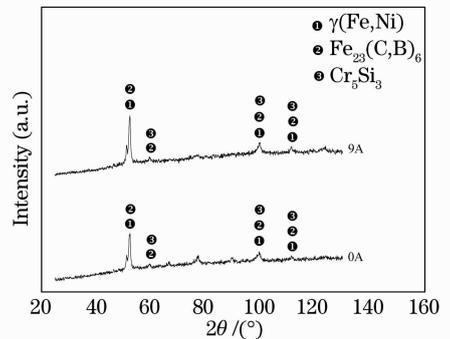


图3 Fe60 涂层 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of Fe60 cladding coatings

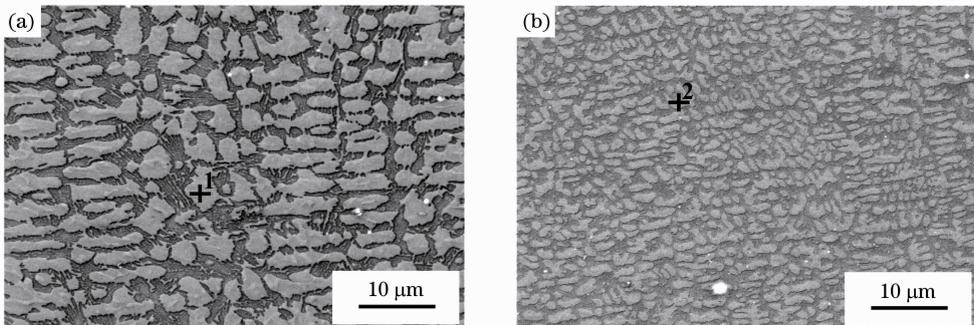


图4 Fe60 涂层能谱标记点(扫描电子显微镜 2000 \times)。(a)无磁场;(b)旋转磁场激磁电流为 9 A

Fig. 4 EDS test points of Fe60 cladding coating (SEM 2000 \times). (a) Without magnetic field; (b) excitation current of 9 A

涂层的物相组成与未施加旋转磁场时的涂层物相种类并未发生明显变化。

图 4 是旋转磁场激磁电流分别为 0 和 9 A 时, 熔覆涂层的能谱仪(EDS)能谱标记点, 图 5 为对应标记点处的能谱及标记点处元素的原子分数。由图

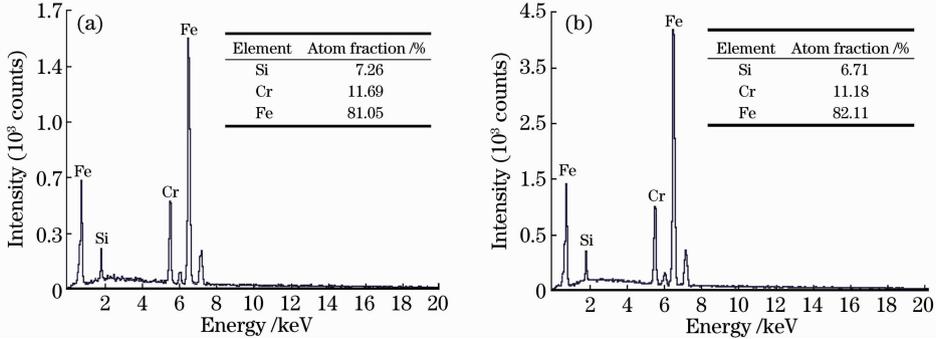


图 5 标记点处的能谱及原子分数。(a)标记点 1;(b)标记点 2

Fig. 5 EDS spectra of test points and atom fraction. (a) Point 1; (b) point 2

3.3 熔覆涂层显微硬度

图 6 为无磁和施加磁场后熔覆涂层横截面的显微硬度分布曲线。可以看出, 激磁电流为 9 A 时, 涂层显微硬度波动较小且较平缓, 其平均硬度值为 685 HV_{0.5}; 而无激磁电流时, 涂层显微硬度曲线波动较大, 其平均硬度值只有 620 HV_{0.5}, 激磁电流为 9 A 时涂层平均显微硬度约为无激磁电流涂层的 1.1 倍。旋转磁场辅助作用下的激光熔覆涂层显微硬度明显提高, 这是因为白色硬质相 Cr₅Si₃ 在磁场辅助作用下被细化并均匀分布在涂层中, 整体上起到了硬质相增强效果, 从而使熔覆涂层显微硬度得到了提高。

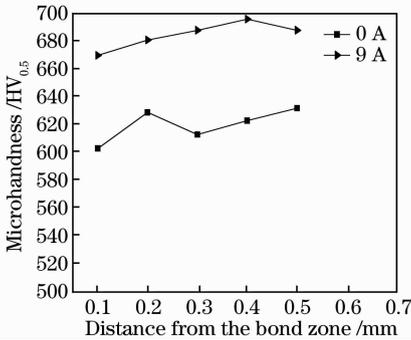


图 6 熔覆涂层显微硬度对比

Fig. 6 Microhardness of cladding coating

图 7 为无磁和施加磁场后涂层的磨损失重对比。由图 7 可见, 无磁复合涂层的磨损失重为 6.5 mg, 而激磁电流为 9 A 的涂层磨损失重仅为 4.3 mg, 只有无磁场复合涂层磨损失重的 0.66 倍。

3.4 熔覆涂层摩擦磨损性能

图 8 为熔覆涂层的磨损形貌。从图 8 中可见,

4 可知, 1 和 2 处标记点都含有 Cr、Si 和 Fe 三种元素, 且两处 Cr 和 Si 原子分数比接近于 5:3。结合图 3 可知, 涂层中的物相应包括 Cr₅Si₃。又因为 B 的含量较低, EDS 难以检测到量, 由此可推断涂层中白色颗粒或树枝晶状硬质相可能为 Cr₅Si₃。

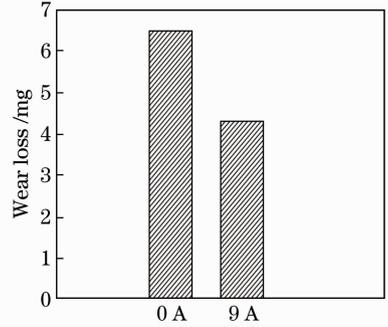


图 7 熔覆涂层磨损失重

Fig. 7 Wear weight loss of cladding coating

无磁场涂层磨损面磨痕[见图 8(a)]分布较多宽而深的磨削犁沟, 由涂层显微硬度分析可知, 无磁场涂层显微硬度明显低于激磁电流为 9A 时的涂层。在磨损过程中, 由于无磁场熔覆涂层硬度较低, 因此出现较多宽而深的犁沟; 而激磁电流为 9 A 时, 其涂层硬度明显高于未加旋转磁场时的涂层, 所以磨损面磨痕[见图 8(b)]出现窄而浅的磨削犁沟。磨削犁沟的存在证明涂层材料发生转移, 转移的材料一部分堆积在犁沟两侧, 一部分脱落而成为磨屑, 并参与随后的磨损, 同时起到磨粒的作用, 在载荷作用下, 磨粒对涂层进行切削和挤压, 在涂层表面形成犁沟^[18]。在磨粒磨损过程中, 磨屑前部受压, 后部受拉, 磨屑在拉压作用下破碎成更小的磨屑, 当涂层受到更多磨粒作用时, 涂层出现较多的磨削犁沟, 但旋转磁场激磁电流为 9A 时的硬度较高, 因此涂层出现窄而浅的磨削犁沟。

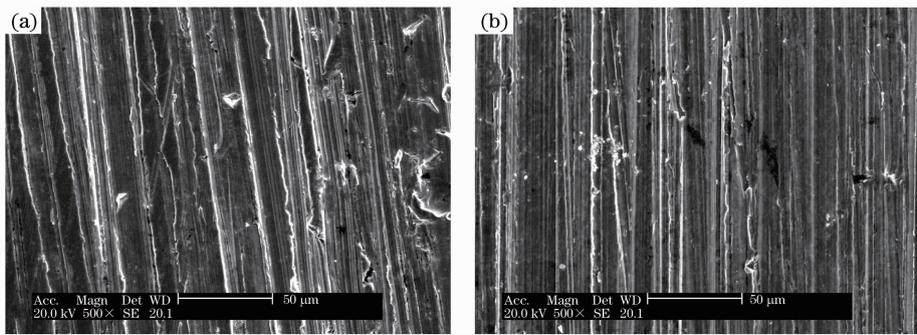


图 8 涂层摩擦磨损形貌(SEM 500×)。(a)无磁场的涂层;(b)激磁电流为 9 A 的涂层

Fig. 8 SEM wear images (SEM 500×) of (a) no magnetic field and (b) excitation current of 9 A

4 结 论

1) 在 Q235 钢表面通过磁场辅助激光熔覆制备了 Fe60 复合涂层。在磁场作用下,熔覆涂层晶粒组织被细化且分布均匀致密;涂层主要由 γ -(Ni, Fe) 固溶体、 $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ 和 Cr_5Si_3 等物相组成。

2) 激磁电流为 9 A 时,熔覆涂层平均显微硬度达到 685 $\text{HV}_{0.5}$, 而无磁涂层显微硬度只有 620 $\text{HV}_{0.5}$, 约为无磁涂层的 1.1 倍。

3) 相同磨损条件下,激磁电流为 9 A 的熔覆涂层磨损失重仅为 4.3 mg, 比无磁场作用的熔覆涂层降低了 33%。磁场辅助作用下熔覆涂层的磨损形貌浅而窄, 无磁作用下涂层的磨损形貌深而宽。

参 考 文 献

- Zuo Tiechuan. The 21st Century's Advanced Manufacturing-Laser Technology and Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. 234~235
左铁钊. 21 世纪的先进制造-激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 234~235
- Shen Longguang, Zhang Qingmao, Song Jie. Wear behavior under high temperature and lubrication condition of Fe-based alloy coating formed by laser cladding[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1628~1632
沈龙光, 张庆茂, 宋杰. 铁基合金激光熔覆层高温润滑磨损性能[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(11): 1628~1632
- Chun Guo, Jiansong Zhou, Jianmin Chen *et al.*. High temperature wears resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings[J]. *Wear*, 2011, **270**(7-8): 492~498
- Liu Hongxi, Zeng Weihua, Zhang Xiaowei. Microstructures and properties of multiple-pass laser cladding Ni-based coatings on stainless steel surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1515~1523
刘洪喜, 曾维华, 张晓伟. 不锈钢表面多道激光熔覆 Ni 基涂层的组织与性能[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1515~1523
- J. Leunda, C. Soriano, C. Sanz *et al.*. Laser cladding of vanadium-carbide tool steels for die repair[J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**: 345~352
- M. Pleterski, T. Muhič, B. Podgornik *et al.*. Blanking punch life improvement by laser cladding [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, **18**(6): 1527~1537

- Shi Yan, Zhang Hong, Liu Shuangyu *et al.*. Improving resistance of cobalt-based alloy coating formed laser fine cladding on high-hardness and microporous [J]. *J. Mechanical Engineering*, 2011, **47**(2): 95~101
石岩, 张宏, 刘双宇等. 高硬度多孔小型零件激光表面精密熔覆钴基合金涂层提高耐冲蚀性能研究[J]. *机械工程学报*, 2011, **47**(2): 95~101
- Shen Bin, Yan Guangchao, Wu Gang. Laser cladding on complex disc cam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 244~248
沈斌, 闫广超, 吴钢. 复杂盘形凸轮表面激光熔覆工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 244~248
- S. D. Kore, P. P. Date, S. V. Kulkarni. Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **208**(1-3): 486~493
- M. Gatzert, Z. Tang, F. Vollertsen. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire [J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**: 56~65
- Fudong Bai, Minghong Sha, Tingju Li *et al.*. Influence of rotating magnetic field on the microstructure and phase content of Ni-Al alloy [J]. *J. Alloys & Compounds*, 2011, **509** (14): 4835~4838
- N. Barman, P. Kumar, P. Dutta. Studies on transport phenomena during solidification of an aluminum alloy in the presence of linear electromagnetic stirring [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, **209**(18-19): 5912~5923
- P. G. Tennyson, P. Kumar, H. Lakshmi *et al.*. Experimental studies and phase field modeling of microstructure evolution during solidification with electromagnetic stirring[J]. *Transa. of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, **20**(S3): 774~780
- Yu Benhai, Hu Xuehui, Wu Yu'e *et al.*. Studies of the effects and mechanism of electromagnetic stirring on the microstructures and hardness of laser cladding WC-Co based alloy coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2672~2677
余本海, 胡雪惠, 吴玉娥等. 电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基合金涂层的组织结构和硬度的影响及机理研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2672~2677
- Luo Jian, Ma Jie, Wang Xiangjie *et al.*. Effect of magnetic field on weld microstructure and crack of AZ31B magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **38**(3): 215~219
罗键, 马杰, 王向杰等. 外加磁场对镁合金焊缝组织与裂纹影响机制的研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, **38**(3): 215~219
- D. Y. Lee, K. B. Kim, D. H. Kim. Influence of the electromagnetic stirring on globularization of primary solid phase in solid liquid region [J]. *Materials Science Forum*, 2005, **486-487**: 550~553
- Liu Zhengjun, Su Yunhai, Lu Hailong. The influence of magnetic

field frequency on the properties of Fe5 self-fluxing alloy powder
[J]. *J. Welding*, 2008, **29**(2): 53~56

刘政军, 苏允海, 鲁海龙. 磁场频率对 Fe5 自熔合金性能的影响
[J]. 焊接学报, 2008, **29**(2): 53~56

18 Chen Huahui, Xing Jiandong, Li Wei. Application Handbook of

Wear-Resisting Materials [M]. Beijing: China Machine Press,
2006. 38~52

陈华辉, 邢建东, 李 卫. 耐磨材料应用手册 [M]. 北京: 机械
工业出版社, 2006. 38~52

栏目编辑: 宋梅梅