

电磁搅拌辅助钛合金激光沉积修复的电磁场模拟与验证

王 维, 刘 奇, 杨 光, 钦兰云, 岳耀猛

(沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 利用自行研制的电磁搅拌装置辅助钛合金激光沉积修复, 通过有限元软件 ANSYS 进行数值模拟, 并与试验相结合, 研究了钛合金激光熔池内“磁-电-力”的相互作用关系。结果表明, 在旋转磁场的作用下, 激光熔池内的液体表面磁感应强度与激励电流成正比, 与频率成反比; 激光熔池受到径向力和切向力的作用, 但是前者较小, 可以忽略不计, 液体横截面上电磁力密度最大值与激励电流成正比。在旋转磁场的作用下激光沉积修复件表面两侧凸起且修复层内部组织 α/β 片层长径比减小。

关键词: 电磁搅拌; BT20 钛合金; 电磁场; 数值模拟; 显微组织

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2666-06

Numerical simulation and verification of electromagnetic field in titanium alloy laser deposition repair with electromagnetic stirring

Wang Wei, Liu Qi, Yang Guang, Qin Lanyun, Yue Yaomeng

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Using the self-developed electromagnetic stirring device to assist titanium alloy laser deposition repair, numerical simulation was carried on by finite element software ANSYS, the interaction relations of titanium alloy in laser molten pool was studied combined with experiment. The results show that the magnetic flux intensity on liquid surface is proportional to the excitation current and inversely proportional to the current frequency in laser molten pool with the influence of rotary magnetic field; the laser molten pool is impacted by the radial force and tangential force, but the former is lesser and it can be neglected, the maximum of electromagnetic force density on liquid cross-section is proportional to the excitation current. Surface on both sides of laser deposition repair parts bulge under the effect of rotating magnetic field and length to diameter ratio of lamellar α/β in laser repaired zones reduced.

Key words: electromagnetic stirring; BT20 titanium alloy; electromagnetic field; numerical simulation; microstructure

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(51305280); 辽宁省高校创新团队(LT2011004)

作者简介: 王维(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光快速成形的研究。Email: 773509255@qq.com

0 引言

激光沉积修复具有操作简便、无污染、材料利用率高、生产周期短,适合结构复杂的难加工金属零件的修复等优点,因此广泛应用于基于钛合金等难加工材料的航空、航天、船舶等领域^[1]。在钛合金激光沉积修复过程中内部组织不均匀、力学性能不高等问题是影响修复件广泛应用的重要原因,为了提高修复质量及其在工业中的广泛应用,借鉴电磁搅拌技术在铸造和焊接领域的成功应用^[2-7],提出了电磁搅拌辅助钛合金激光沉积修复技术。余本海等人^[8]在激光熔覆基础上辅助电磁搅拌技术,对 WC—Co 基硬质合金进行研究,结果表明熔覆层的组织结构细化,显微硬度提高。刘洪喜等人^[9]利用激光熔覆技术研制复合涂层,并利用电磁搅拌技术辅助,研究结果表明在电磁搅拌技术的作用下涂层晶粒细化,分布均匀。而钛合金激光熔池内“磁-电-力”的相互作用关系及旋转磁场对钛合金激光沉积修复件的宏观形貌和组织的影响尚未有相关报道。

因此,文中在激光沉积修复设备基础上辅助电磁搅拌装置,将旋转磁场的旋转速率和磁场强度均可以调节的电磁搅拌装置引入到 BT20 的激光沉积修复过程中,从数值模拟的角度对钛合金激光熔池内“磁-电-力”的相互作用关系进行研究,并通过试验验证电磁搅拌技术对激光沉积修复件的作用效果。

1 数值模拟

1.1 电磁搅拌装置的几何模型描述

图 1 为电磁搅拌辅助激光沉积修复试验的工作示意图。当电磁线圈中通入三相交流电时,会在搅拌器中产生的旋转磁场,旋转磁场的大小与方向由输入的电流和频率决定,当激光熔池中的金属熔液与磁感线切割时则会产生感应电流^[10]。感应电流与金属熔液作用产生电磁力。图 2 为对试验装置的简化建立计算模型。其中:电磁搅拌器内径 300 mm、高 150 mm,励磁电流 $I=100\sim 300\text{ A}$,电流频率 $f=2\sim 12\text{ Hz}$ 。利用 ANSYS 有限元软件对电磁场的分布情况进行模拟。对电磁搅拌器及激光熔池采用映射网格划分。对空气进行 FREE 网格划分。网格划分的疏密对计算结果影响较大,计算模型中的金属熔液及其磁场

分布是主要研究对象,因此对其进行较密的网格划分。电磁辅助激光沉积修复工艺中主要用到的材料物性参数如表 1 所示^[10-12]。

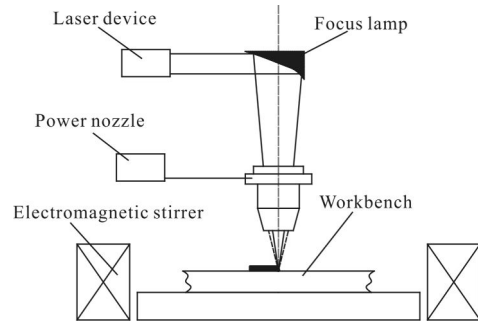


图 1 电磁搅拌辅助激光沉积修复示意图

Fig.1 Schematic of electromagnetic stirrer auxiliary laser deposition repair

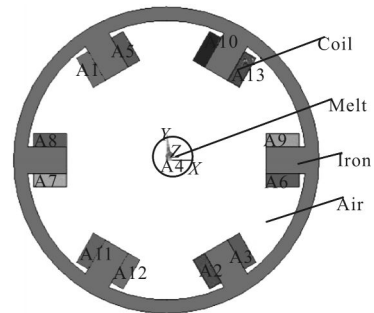


图 2 电磁搅拌几何模型

Fig.2 Geometrical model of EMS

表 1 材料物性参数

Tab.1 Material physical parameters

| Material | Relative permeability | Electrical permeability/($10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}$) |
|----------|-----------------------|--|
| BT20 | 1 | 1.85 |
| Coil | 1 | - |
| Iron | 2 000 | - |
| Air | 1 | - |

1.2 数学模型

实际工况较为复杂,为了便于计算研究并且保证意义不便,做如下假设:(1)电磁搅拌磁场频率较低,是磁准静态场,可以忽略位移电流;(2)电磁搅拌器中,磁 Reynolds 数很小,忽略液体运动对电磁场的影响;(3)假设液体为稳态不可压缩流动,钛合金液体,铁芯为各向同性材料,磁导率为常数;(4)将钛合金激光沉积修复熔池假设为圆形。

1.3 电磁场控制方程

Maxwell 方程组为电磁场控制方程,用矢势 A 和

标势 φ 表示空间中的电磁场,则根据 $B=\nabla\times A$ 和 $E=-\nabla\varphi$ 推导出:

$$\nabla^2 A - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\mu J \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2)$$

式中: B 为磁感应强度; E 为电场强度; μ 为磁导率; ϵ 表示介电常数; ∇^2 表示的是 Laplace 算子, $\nabla^2 = (\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2})$ 。

通过对公式(1)和(2)进行有限元法数值计算求解可得电磁场的物理量磁矢 A 和电势 φ 的分布值。

电磁力的表示如下:

$$F = J \times B = \frac{1}{\mu} (B \cdot \nabla) B - \frac{1}{2\mu} \nabla B^2 \quad (3)$$

在整个区域外部施加磁力线平行边界条件: $n \times A = 0$ 。

2 模拟结果与分析

2.1 磁场的分布特征

电磁搅拌辅助激光沉积修复的过程中,在三对绕组线圈上分别施加相位差为 120° 且方向相同的电流密度。随着时间的变化,电磁搅拌器会产生旋转磁场。图 3 为励磁电流为 100 A,频率为 6 Hz 时电磁搅拌器内磁场强度分布图。图 3 和图 4 中,在电磁搅拌器中心横截面上,磁感应强度从边缘到中心逐渐衰减,越靠近磁极磁场越强。在中间一定区域磁场强度变化不是很大,近似为匀强磁场,为试验的准确性提供保证。

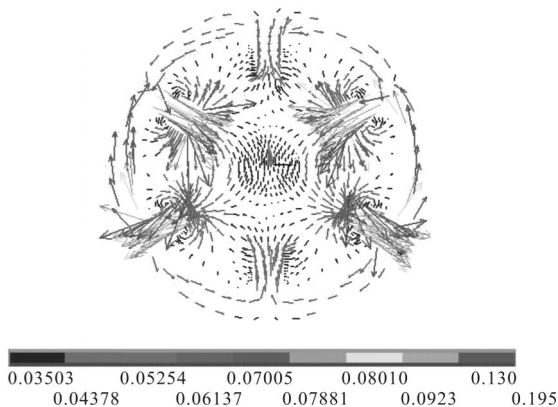


图 3 磁场强度分布图(6 Hz, 100 A)

Fig.3 Distribution of magnetic flux density(6 Hz, 100 A)

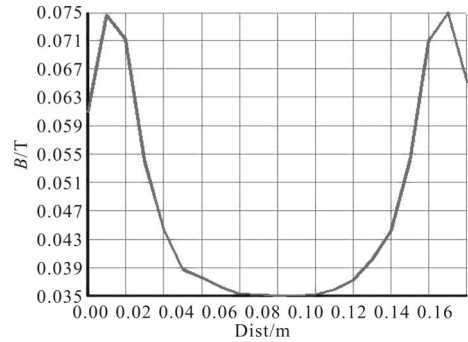


图 4 沿水平面中心轴线上磁感应强度分布(6 Hz, 100 A)

($x=-0.08\sim 0.08$ m)

Fig.4 Distribution of magnetic flux density along the x -axis (6 Hz,100 A)

图 5 所示电流频率为 6 Hz,不同激励电流时,中心磁场强度分布计算值与测量值对比,随着激励电流的增加中心磁场相应提高,激励电流增加 50 A,则电磁场增加约 10 mT。将数值模拟结果与实验结果对比可验证模拟的可靠性,从图中可以看出实验和模拟结果的变化规律完全一致,但是由于不可避免的测量及计算误差,二者并非完全相同,计算值与测量值最大误差不超过 3%,不影响模拟结果的参考意义。其原因可能有:(1)SHT-6A 型数字高斯计测量仪的测量误差和修复环境影响产生的误差;(2)模拟计算过程中将电磁搅拌器实际工作过程中的磁漏忽略漏磁,所以测量值略低于计算值。

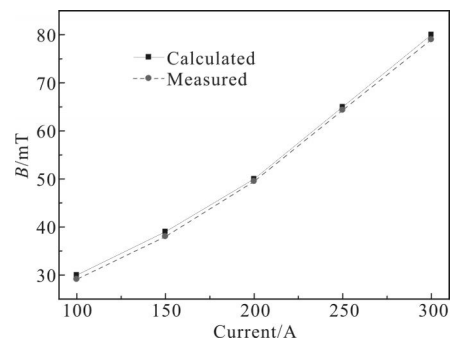


图 5 中心磁场强度随激励电流变化的实测值与模拟值

Fig.5 Measured and simulated values of magnetic flux density at center with different excitation current

图 6 所示激励电流为 100 A,不同电流频率时,中心磁场强度分布计算值与测量值对比图。随着电流频率的降低,熔池内的感应电流减小,导致磁感应强度降低。测量值与计算值最大误差不超过 3%,模拟结果与实际测量值相吻合,不影响模拟结果的参考意义。

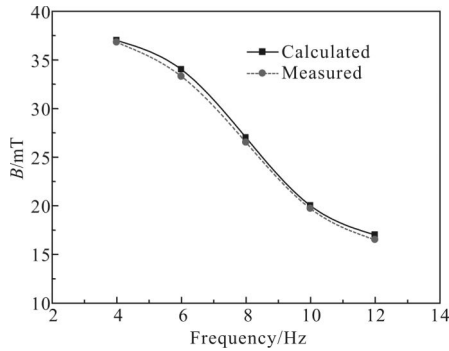


图6 中心磁场强度随电流频率的变化的实测值与模拟值

Fig.6 Measured and simulated values of magnetic flux density at center with different current frequency

2.2 熔池中电磁力分布模拟结果

激光沉积修复过程中,激光的高密度热量使修复件局部熔化产生熔池,电磁搅拌器产生旋转磁场,磁力线不断的与钛合金液体切割,在熔池中感应出电动势^[13]。电磁场中任意一点的磁感应强度随时间做周期性变化,在任意时刻某点处取一个微元体^[14],设此点的磁感应强度矢量为*B*,将*B*分解为径向分量*B_r*和切向分量*B_θ*,如图7所示。

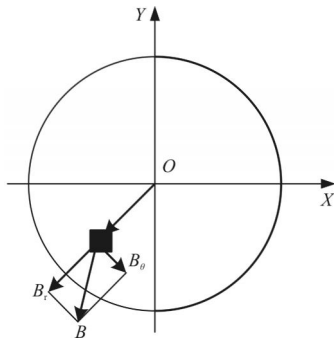


图7 某点磁感应强度*B*矢量分解图

Fig.7 *B* vector diagram of magnetic flux density at some point

如图所示在任意时刻,微单元体处的磁感应强度*B*的大小和方向。由于*B_r*和*B_θ*的作用使单元体受到切向力和径向力的作用,感生电流方向为*z*向,表示为*j_z*,因此

$$F = j_z \times B \tag{4}$$

设径向分量为*F_r*,*F*的切向分量为*F_θ*,由于*B_r*作用使磁场中产生*F_θ*,*F_θ*作用在熔体中使金属熔液绕*O*点作旋转运动,由于*B_θ*作用使磁场中产生*F_r*,*F_r*作用在金属熔体中使其绕*O*点径向运动。

联立 Maxwell 方程和边界条件可求出两极对搅拌器所受的力:

$$\overline{F_r} = -\frac{1}{8} B_0^2 \sigma_0^2 \mu_0 (\omega - \frac{V_\theta}{r})^2 r^3 \tag{5}$$

$$\overline{F_\theta} = -\frac{1}{2} B_0^2 \sigma_c (\omega - \frac{V_\theta}{r}) r \tag{6}$$

式中:*r*为微元体矢径;*θ*为与水平轴夹角;*ω*为交变电流角频率;*B₀*为熔体边界处磁感应强度。由于激光沉积修复熔池的深度较小,且*F_r*远小于*F_θ*。因此*F_r*可以忽略不计,认为熔体只受到*F_θ*的作用。利用有限元软件 ANSYS,采用二维模型对熔池的水平截面(*XY*平面)所受到的力进行模拟。图8所示水平剖面内激光熔池所受电磁力分布矢量图。由图8和公式(6)可知熔池受与磁场方向一致的电磁力,大小随着熔池半径增大的而增大。在电磁搅拌过程中,由于旋转磁场的作用,离心力会使液体有向边缘扩散的趋势,对修复层的表面形貌会产生影响。

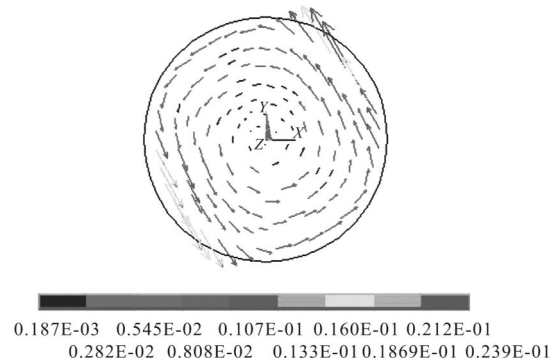


图8 水平剖面熔池内电磁力分布矢量图

Fig.8 Distribution of electromagnetic force in molten pool in horizontal section

电磁搅拌器中熔池内液体所受的电磁力密度的最大值随着激励电流的增大近似呈抛物线型增大,如图9所示,这是因为,电流强度与磁感应强度呈线性关系,而*F ∝ B²*即电磁力与磁感应强度的平方成

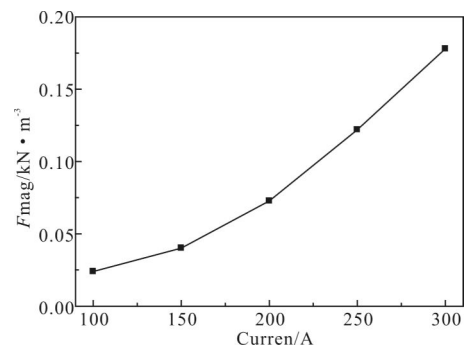


图9 电磁力密度最大值与激励电流之间的关系(*f*=6 Hz)

Fig.9 Relationship between maximum electro-magnetic force and excitation current at current frequency of 6 Hz

成正比,因此电磁力与电流强度的平方成正比。由此可知随着激励电流的增大,电磁力逐渐增强,进而使液体流动加速,熔池内温度梯度减小,冷却速率降低,进而影响修复层的内部组织^[15-17]。

3 电磁搅拌对激光沉积修复作用的实验验证

实验过程中选用的激光器为 5 kW CO₂ 激光器,采用同轴送粉方式。通过调节激光功率、送粉速率、分层厚度、扫描速率、搭接率 5 个工艺参数实现不同的修复效果。在三维工作台上安装电磁搅拌装置辅助激光沉积修复。

实验前需要对 BT20 钛合金工件表面进行打磨抛光及丙酮清洗,目的是去除工件表面氧化层,增加加工工件的表面光洁度。将电磁搅拌装置通入的电流大小和频率大小作为参变量进行多层多道及多层单道电磁搅拌辅助激光沉积修复实验。固定激光工艺参数,其中激光功率为 1 500 W,扫描速度 3 mm/s,送粉率为 0.7 g/min,扫描间距 3 mm,电磁搅拌装置激励电流为 100 A,电流频率为 4 Hz,6 Hz,8 Hz,10 Hz。单道修复长度 20 mm,多道修复尺寸 20 mm×20 mm,成形层数为 10。

3.1 电磁搅拌对激光沉积修复件宏观形貌的影响

图 10(a)未施加电磁搅拌,图 10(b)~(e)施加电磁搅拌的激励电流为 100 A,频率分别为 4 Hz,6 Hz,8 Hz,10 Hz。图 10(b)~(e)激光沉积修复的单道两侧均出现凸起,呈现中心低外围高的特征。是因为在旋转磁场中,激光熔池中的液体受到与旋转磁场方向一致的电磁力的作用,熔池中液体的对流加强,径向温度梯度减小^[18],外侧熔体粘度减小,由于离心力的作用,液态金属向熔池边缘运动,而且在熔池的边缘熔体的粘度小,因此会在熔池边缘会有堆积,产生图示现象。

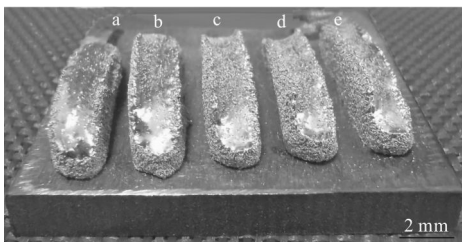


图 10 施加磁场前后修复试样宏观形貌

Fig.10 Surface of repair parts with magnetic field

3.2 电磁搅拌对激光沉积修复件微观组织的影响

图 11 为是未施加与施加电磁搅拌的微观组织对比图。激光沉积修复 BT20 钛合金修复区具有典型的片状 β 转变近 α 钛合金组织。图 11(a)为典型网篮组织, α 片层的厚度约 0.5 μm ,长度约 6.2~9.8 μm 。施加磁场作用后,旋转磁场产生的电磁搅拌使初生 β 晶的溶质富集减轻, α 层片析出的驱动力减少,使初生 β 相需要在更大的过冷度下才会发生 α 片层的析出,而过冷度的增大最终使析出的 α 片层细化,图 11(b) α 片层长度约为 3.1~4.8 μm , α 片层厚度约为 0.4~0.5 μm 。

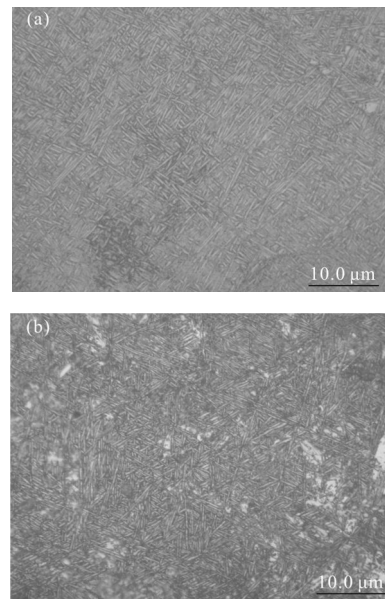


图 11 修复层显微组织

Fig.11 Microstructures of laser deposition repair

4 结论

(1) 激光熔池内的液体表面磁感应强度与电流频率成反比,与激励电流成正比。

(2) 在旋转磁场的作用条件下,可以认为激光熔池只受到切向力的作用,电磁力密度的最大值与激励电流成正比。

(3) 电磁搅拌影响激光沉积修复件的宏观形貌,修复件表面两侧凸起。

(4) 在旋转磁场辅助 BT20 激光沉积修复作用下,修复层显微组织内的 α 片层长径比减小。

参考文献:

[1] Liu Zhijian, Qu Xuanhui, Huang Boyun. Advanees in

- producing TIAI alloy with P/M processing [J]. *Materials Review*, 1995, 2: 3–28. (in Chinese)
- [2] Kore S D, Date P P, Kulkarni S V. Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(8): 1327–1341.
- [3] Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 56–65.
- [4] Bai Fudong, Sha Minghong, Li Tingju, et al. Influence of rotating magnetic field on the microstructure and phase content of Ni–Al alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(14): 4835–4838. (in Chinese)
- [5] Barman N, Kumar P, Dutta P. Studies on transport phenomena during solidification of an aluminum alloy in the presence of linear electromagnetic stirring [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(18–19): 5912–5923.
- [6] Luo Jian, Ma Jie, Wang Xiangjie, et al. Microstructure and property of Ni60CuMoW composite coating treated prepared with magnetic field and laser cladding process [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38 (3): 215–219. (in Chinese)
- [7] Xu Jialu. Development and application of magnetic controlled submerged arc surfacing welding equipment with alternating double pulses [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013: 1–61. (in Chinese)
- [8] 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 Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2672–2677. (in Chinese)
- [9] Liu Hongxi, Ji Shengwei, Jiang Yehua, et al. microstructure and property of Fe60 composite coatings by rotating magnetic field auxiliary laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 1–6. (in Chinese)
- [10] Chen Xingrun, Zhang Zhifeng, Xu Jun, et al. numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in semi–solid slurry preparation by electromagnetic stirring [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(5): 932–945. (in Chinese)
- [11] Zhang Qi, Jin Junze, Wang Tongmin, et al. analysis of molten metal flow in rotating magnetic field [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17 (1): 98–104. (in Chinese)
- [12] Zhou Wuzhuang. Titanium Handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 1–78. (in Chinese)
- [13] Li Wenbin. Magnetism Stress Engineering [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [14] Karl–Heinz Spitzer, Mathias Dubke, Klaus Schwerdtfeger, et al. Rotational electromagnetic stirring in continuous casting of round strands [J]. *Metall Trans B*, 1986 (17B): 119–131.
- [15] Hu Renxi. Anays 13.0 electromagnetic finite element analysis from entry to the master [M]. Beijing: China Machine Press, 2011, 12: 1–419. (in Chinese)
- [16] Trindade L B, Vilela, Antonio C F, et al. Numerical model of electromagnetic stirring for continuous casting billets [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, 38(6): 3658–3660.
- [17] Wang Baofeng, Li Jianchao. Application of electromagnetic stirring technology in continuous casting [J]. *Angang Technology*, 2009, 1: 1–5. (in Chinese)
- [18] Taylor R S, Leopold K E, Tan K O. Continuous Bv X excimer fluorescence using direct current discharge excitation [J]. *A P L*, 1991, 59(5): 525–527.