

考虑相变的铝合金管焊接残余应力数值模拟

Numerical Simulation of Residual Stresses for Aluminum Alloy Pipe Incorporating Metallurgical Phase Transformation

廖娟, 凌泽民, 彭小洋

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

LIAO Juan, LING Ze-min, PENG Xiao-yang

(School of Materials Science and Engineering, Chongqing

University, Chongqing 400044, China)

摘要: 以铝合金薄壁管的对接接头为研究对象, 根据实际情况建立了其热-冶金-力学耦合的三维有限元模型, 运用 SY-SWELD 软件在考虑相变情况下对其焊接过程温度场与轴向和环向残余应力分布进行数值计算与分析, 与实验结果进行对比验证了该模型的准确性。此外, 还分析了铝合金管半径变化对残余应力分布的影响规律。结果表明: 相变对轴向最大拉应力与环向最大拉应力和压应力都有明显的影响, 且考虑相变能更准确地模拟轴向和环向残余应力; 在考虑相变情况下, 焊接残余应力随半径的增大而增加; 并且在不同的半径条件下, 距焊缝中心不同距离上的应力分布有着一致的变化趋势。

关键词: 铝合金; 相变; 残余应力; 数值模拟

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.04.007

中图分类号: TG457.14

文献标识码: A

文章编号: 1001-4381(2013)04-0034-05

Abstract: Based on the butt joint of thin-walled aluminum alloy pipe, according to the practical situation, three-dimensional thermal, metallurgical and mechanical finite element model was established. The temperature field during welding process, axial and hoop residual stresses of circumferential welds incorporating metallurgical phase transformation were simulated by using SYSWELD software. The model was accurately predict the welding residual stresses and the results coincided with experiment. In addition, the effects of pipe diameter on residual stresses were investigated. The results showed that affected metallurgical phase transformation on the maximum axial tensile stress and maximum hoop tensile stress and compressive stress, and models with metallurgical phase transformation can simulate axial and hoop stresses more accurately; considering phase transformation, the residual stresses increased with increasing the radius, and residual stresses with different radii have a similar trend.

Key words: aluminum alloy; phase transformation; residual stress; numerical simulation

由于铝合金焊接结构具有质量轻、耐腐蚀、加工工艺性能优异、易于连接等优点, 铝合金的运用越来越普遍。薄壁圆筒的对接环焊缝是管系统一种普遍的接头形式, 广泛用于管道运输系统、锅炉、压力容器、航空航天、核工业等工程领域。焊接过程中由于焊接材料局部的、瞬时非均匀加热冷却, 焊后产生残余应力。拉应力会引起疲劳失效, 脆性断裂, 压应力会引起局部或全局的失稳^[1], 从而严重影响了产品的质量和使用过程中的可靠性。因此, 焊接残余应力精确的模拟有助于合理设计焊接结构和确保结构安全。

有限元方法是模拟焊接温度场、焊接残余应力和变形的有效工具, 已得到广泛的应用^[2,3]。目前, 针对铝合金焊接结构的有限元模拟, 国外学者已做过很多研究, C. M. Cheng^[4] 分析比较了铝合金不同坡口角度对残余应力的影响。Zain-ul-abdein M. 等^[5,6] 采用 ABAQUS 预测铝合金焊接的变形与残余应力。很多学者^[7-10] 研究加载和边界条件、试样尺寸、焊接过程参数等对残余应力的影响。但采用有限元方法分析铝合金相变对残余应力影响的研究较少。

SYSWELD 焊接专业有限元分析软件完全实现

了结构力学、热传导和焊接冶金耦合计算。本工作运用 SYSWELD 计算了 5083 铝合金薄壁管焊接后的残余应力,分析了相变对残余应力的影响,并验证了该模型的准确性。此外,还对管内径对环焊缝残余应力的影响规律进行了研究。此成果可为工程实际焊接过程中减少残余应力、控制变形、防止缺陷的产生,提供理论依据。

1 焊接过程物理模型的建立

1.1 三维有限元模型的建立

为了准确预测焊接温度场和应力场,采用三维实体计算模型,模型尺寸为内径 200mm,壁厚 2mm,长度 300mm,模型的网格划分如图 1 所示。

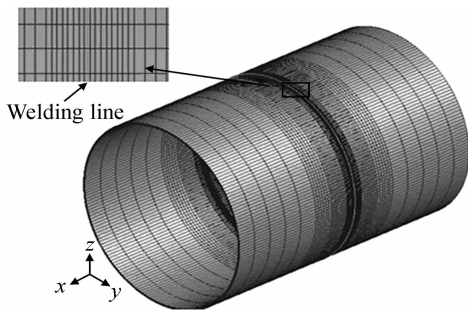


图 1 整体网格及焊缝局部模型

Fig. 1 Finite element model of global and local welds

网格划分采用从焊缝到远离焊缝区域由密到疏的过渡方式,对焊缝及其附近温度梯度变化大的区域网格进行加密处理,而离焊缝较远处和温度变化不明显的区域采用较稀疏的网格,这样就可以在不增加单元和节点量的条件下提高计算精度,并节省计算时间。采用规则的六面体单元,模型的节点数为 72185,单元数为 87136。

1.2 热源模型与边界条件

由于电子束焊接的能量高度集中并且沿厚度方向作用,常用的高斯、双椭圆等平面热源模型不适合这种焊接工艺的数值模拟^[11]。Piotr Lacki 等^[12]采用锥体热源对电子束焊钢管对接温度场模拟,说明锥体热源模型对电子束焊的可行性。因此采用 SYSWELD 软件所配备的三维锥体热源模型,三维锥体热源表达式为

$$q_v(r, z) = \frac{9\eta IUe^3}{\pi(e^3 - 1)} \times \frac{1}{(z_e - z_i)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

式中: $r_0 = r_0(z) = r_i + (r_e - r_i) \frac{z - z_i}{z_e - z_i}$; q_v 为热流密度;

η 为焊接热源热效率; U 为焊接电压; I 为焊接电流; r 为热流分布半径; z_e, z_i 分别是焊接上、下表面的 Z 坐标值,三维锥体热源的高度是 $z_e - z_i$; r_e, r_i 分别是焊件上、下表面的热流分布半径。

计算时需对热源各项参数进行校核获得符合实际的三维锥体热源,校核后的各参数分别为:热源热效率 $\eta = 0.95$,热输入量 $P = 880 \text{ W}$,焊接速率 $v = 50.8 \text{ mm/s}$,热源半宽 $b = 0.5 \text{ mm}$,热源深度 $z_e - z_i = 1.8 \text{ mm}$ 。同时,模型的所有表面都加上了对流换热边界,并设定环境温度为 20°C 。

1.3 冶金模型

材料的冶金变化用式(2)来表示:

$$\dot{p}_i = \frac{p_{eq}(T) - p_i}{\tau(T)} \quad (2)$$

式中: \dot{p}_i 为相 i 的体积分; p_i 为冶金变化前相 i 的体积分; $p_{eq}(T)$ 为 T 时刻平衡状态相的体积分,随温度变化而变化; $\tau(T)$ 为 T 时刻相变延迟时间。

焊接模拟过程中,定义母材为相 1;热影响区的再结晶和弱化的材料定义为相 2;熔化金属定义为相 3。相变反应用动力学表示为 4 个反应:1,2,3 为加热过程,4 为冷却过程。

反应 1:相 1→相 2

反应 2:相 1→相 3

反应 3:相 2→相 3

反应 4:相 3(死单元)→相 3(活单元)

填充金属 ER5356 是 Al-Mg 合金,但是在焊缝金属中没有明显的沉淀相^[13]。所以模拟采用的材料为 5083-O,模拟过程中,考虑了材料的热物理性能与力学性能随温度变化的特性,同时假定焊缝金属与母材金属具有相同的热物理性能和力学性能。

1.4 力学模型

假定材料遵循各向同性硬化性能的弹塑性准则(Von Mises 塑性模型)。总应变如式(3)分解:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p + \epsilon_{th} \quad (3)$$

式中: ϵ 为总应变; ϵ_e 为弹性应变; ϵ_{th} 为热应变; ϵ_p 为塑性应变。

对于各向同性材料,弹性应变取决于弹性模量和泊松比,而热应变取决于热膨胀系数。对铝合金而言,相变与晶格结构体积的变化无关,因此,热膨胀系数是随温度线性变化的。

塑性准则是关于塑性流动开始和终止的三维应力状态,因此,弹性区域可表示为由应力、温度、硬化决定的三维空间,并用屈服函数加以限定,如式(4)所示:

$$f(\sigma, T, H_{iso}) < 0 \quad (4)$$

式中: f 为屈服函数,定义了只发生弹性变形的区域; σ

为应力; T 为温度; H_{iso} 为各向同性硬化参数。弹性区域内, 应力由屈服强度 σ_y 决定, 在热力学中, $\sigma_y = \sigma_y(\epsilon_p, T)$ 。当材料发生塑性流动时, 塑性区域的应变表示为:

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{dg}{d\sigma} = \dot{\lambda} \frac{3}{2} \cdot \frac{S}{\sigma_{eff}} \quad (5)$$

式中: $\dot{\lambda} = \left(\frac{\langle f \rangle}{\eta} \right)^n$, $\sigma_{eff} = \sqrt{\frac{3}{2} S : S}$; $\dot{\epsilon}_p$ 为塑性应变率; $g(\sigma, T, H_{iso})$ 为最大流量; σ_{eff} 为 Von Mises 有效应力; S 为偏应力; η 和 n 为黏性参数^[5]。

在考虑相变的情况下, 屈服强度表示为 $\sigma_y = \sigma_y(\epsilon_p, T, p)$, 其中 p 为相变分数。文献[14]表明, 随温度变化的材料屈服强度和相变分数会对数值模拟结果产生影响。

2 数值模拟结果及分析

2.1 焊接温度场

$t=18.5s$ 时的环焊缝焊接温度场分布如图 2 所示。可知, 焊接为不均匀加热, 焊缝中心线附近的温度梯度很高, 加热时温度迅速升高, 熔池温度最高且最高温度为 $948.8^\circ C$; 随着热源离开, 焊件逐渐降低为室温。

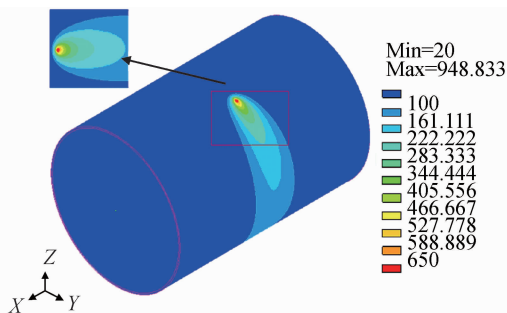


图 2 环焊缝焊接温度场

Fig. 2 Temperature field of circumferential welds

2.2 焊接残余应力

铝合金筒体环焊缝在 $0, 90, 180, 270^\circ$ 四个典型位置处, 距焊缝中心不同距离处的轴向和环向残余应力分布如图 3 所示。

比较这四个位置处的轴向和环向残余应力分布曲线, 发现环焊缝在 $90, 180, 270^\circ$ 位置处的轴向和环向残余应力基本相同, 而 0° 位置处是焊接开始点与结束点重叠区域, 历经两次加热过程, 其应力分布趋势与其他三个位置处有微小差别。从图 3(a) 看出, 外表面 0° 位置处的轴向应力分布趋势与其他三个位置处相同, 但最大压应力值比其他三个位置处小。从图 3(b) 看出, 在焊缝附近区域 0° 位置处的环向应力分布趋势略

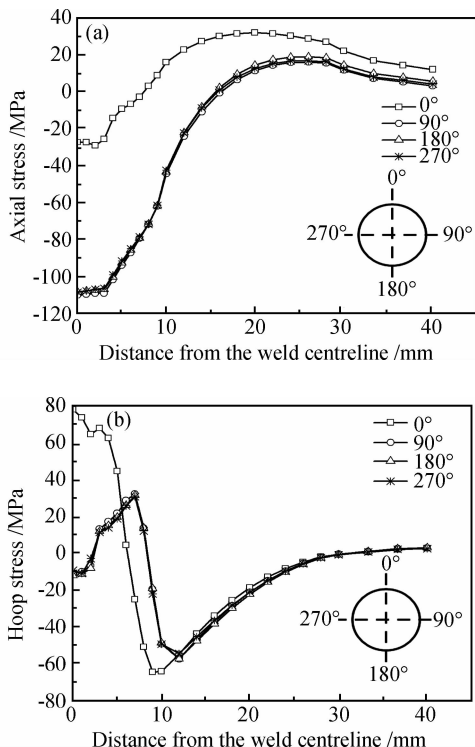


图 3 壳体外侧轴向残余应力(a)和环向残余应力(b)

Fig. 3 Residual stress distributions of outer surface for pipe
(a) axial residual stress; (b) hoop residual stress

有不同, 其他区域分布趋势相似, 且 0° 位置处的最大拉应力比其他三个位置大。模拟结果得出, 壳体外侧轴向残余应力的分布特征是焊缝及附近区域为压应力, 远离焊缝中心线的区域为拉应力。这是由于焊接时焊件的局部加热导致的。由于焊接过程中随着焊接热源的移动, 高温加热熔化金属的顺序冷却沉淀, 筒体内部约束空间上有所改变, 导致环焊缝轴向残余应力的变化。对于薄壁筒体, 单层即可焊透, 加热时的高温足够使筒体厚度上温度相同, 因此, 薄壁筒径向上的膨胀和收缩变形引起的环向应变导致热应力产生。而环向的收缩使焊缝产生弯矩导致焊缝附近引起局部向内的变形。由于焊接中, 焊接经历快速加热-冷却过程, 半径的膨胀收缩产生环向残余应力。受轴向残余应力的影响, 环向焊缝中心为较小压应力, 近缝区产生环向拉应力, 远离焊缝区产生环向压应力。

2.3 相变对残余应力的影响及实验验证

由于环焊缝 0° 位置处残余应力分布反常, $90, 180, 270^\circ$ 位置处残余应力分布均相同, 所以选取远离 0° 位置处的区域进行讨论。将不考虑相变的模拟与前述的模拟结果进行对比。图 4 为考虑相变和不考虑相变两种情况下, 环焊缝 180° 处壳体外侧轴向和环向残余应力分布模拟结果。

图 4(a) 为轴向残余应力分布图, 可以观察到, 焊

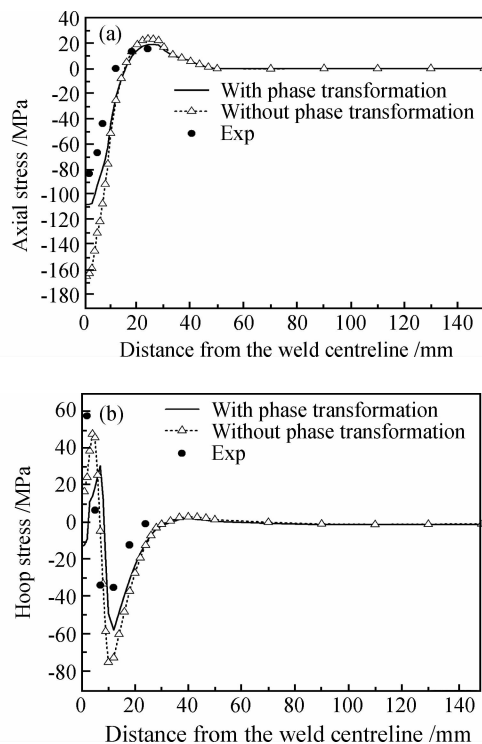


图4 壳体外侧180°位置考虑相变和未考虑相变残余应力分布

(a)轴向残余应力;(b)环向残余应力

Fig. 4 Residual stress distributions on the outer surface of pipe with and without phase transformation where circumferential angle is 180°

(a)axial residual stress;(b)hoop residual stress

缝及近缝区圆筒外表面为压应力。这是因为焊缝区附近在焊接过程中圆周方向产生弯矩导致局部向内的变形引起的。焊缝及附近区域,考虑相变的残余应力值小于不考虑相变值。这是由于不考虑相变时,熔化区、热影响区、母材屈服强度相同;考虑相变时,熔化区在加热过程中屈服强度小于母材屈服强度导致的,远离焊缝中心位置处,屈服强度等于母材屈服强度,此位置处两种情况下残余应力几乎相同。

图4(b)为环向残余应力分布模拟结果,可以看出,在壳体外侧为轴向压应力的位置,环向残余应力拉应力小,在焊缝附近甚至为压应力。这是由于环向残余应力的大小受轴向应力的影响。考虑相变时,残余应力较小是因为熔化区材料屈服强度小于母材屈服强度,由于焊接过程中屈服强度和相变分数的改变得到较小的应力。熔化区之外,屈服强度逐渐接近母材屈服强度,最后当屈服强度等于母材屈服强度时,两种情况下的残余应力分布几乎相似。

考虑相变与不考虑相变下,圆筒轴向和环向残余应力分布的变化趋势模拟值和实验趋势一致,但考虑相变的模拟结果更接近实验值,所以考虑相变因素能更准确地模拟残余应力。

3 圆管半径对焊接应力的影响

由于应力值的大小受圆筒的半径 R 、壁厚以及塑性变形区的宽度等因素影响。现仍采用前述模型,仅改变圆筒半径,其他参数不变,对半径20,50,100mm三种不同半径的圆筒进行模拟,分析圆管半径对焊接应力的影响规律。

图5为180°位置处不同圆管半径下的轴向和环向残余应力分布的数值模拟结果,结果揭示了筒体半径对残余应力的影响。壳体内外侧焊缝及附近区域轴向应力有拉应力和压应力。由于焊件内外表面存在不同的温度梯度,所以焊件厚度上的不同收缩模式导致焊缝附近内外表面的拉压残余应力不同。环向的收缩使焊缝产生弯矩导致焊缝附近引起局部向内的变形,壳体外侧产生的轴向压应力与壳体内侧的轴向拉应力平衡。相应的,远离焊缝中心壳体外侧的轴向拉应力与内侧的压应力平衡。

图5(a)为壳体外侧的轴向残余应力。可知,壳体外侧焊缝及其附近的残余应力都为压应力,而且随着 R 的增加,最大轴向压应力随之增大。图5(b)为壳体内侧的轴向残余应力。可以发现,焊缝及附近区域的残余应力为拉应力,与壳体外侧的应力值相对应。随着 R 的增加,最大轴向拉应力随之增大。对于不同半径的铝管,内外侧轴向残余应力的减小和应力反转有相似的趋势。图5(c)为壳体外侧环向残余应力,随 R 的增加,最大拉应力和最小拉应力增加。不同半径条件下,距焊缝中心不同距离上的应力分布有相同的趋势。图5(d)为壳体内侧环向残余应力。在不同半径条件下,距焊缝中心距离内外侧环向残余应力变化有相似的趋势。

4 结论

(1)采用热-冶金-力学耦合的三维模型模拟了焊接过程,并在考虑了焊接过程的相变条件下,实现了铝合金薄壁管环焊缝焊接温度场和残余应力模拟,得出了环焊缝轴向和环向的残余应力分布情况。

(2)在考虑相变与不考虑相变两种情况下,将环焊缝轴向和环向残余应力分布与实验结果进行对比,结果表明,相变对轴向最大拉应力和环向最大拉应力和压应力都有明显的影响;考虑相变能更准确地模拟环焊缝轴向和环向残余应力。

(3)铝合金薄壁管环焊缝的轴向和环向残余应力受管径大小的影响;壳体内外侧轴向和环向残余应力随着 R 的增大而增加;对于不同半径的铝管,随着距焊缝中心距离的增加,应力变化趋势一致。

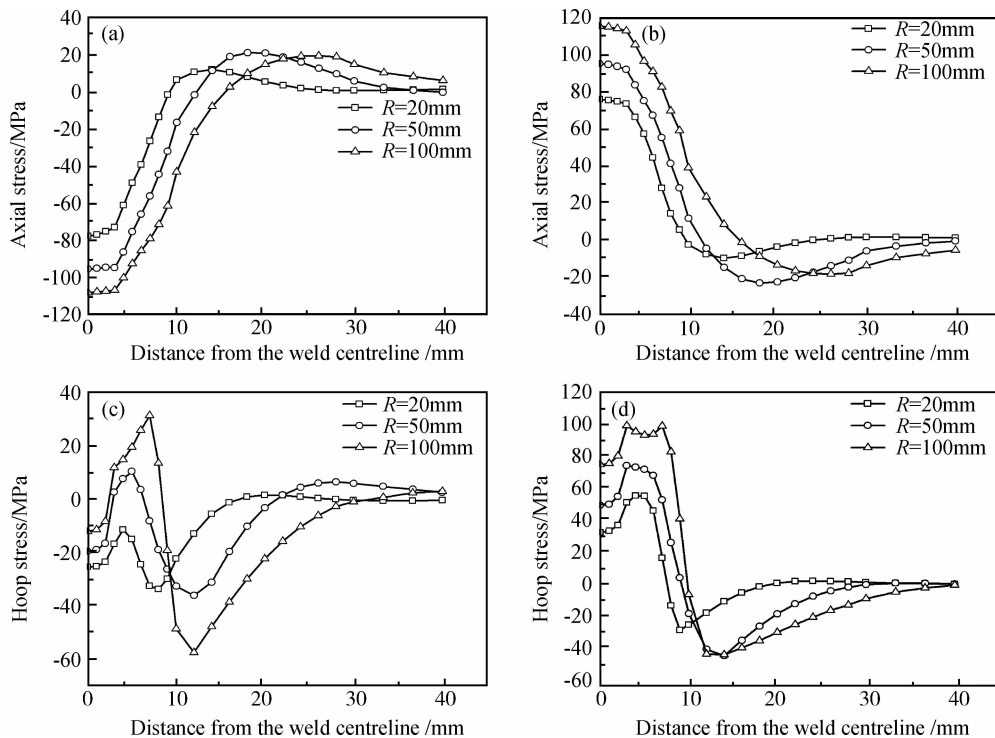


图 5 不同半径下的轴向和环向残余应力 (a)外表面轴向;(b)内表面轴向;(c)外表面环向;(d)内表面环向

Fig. 5 Axial and hoop residual stress distributions with different radial sizes

(a)axial of outer surface;(b)axial of inner surface;(c)hoop of outer surface;(d)hoop of inner surface

参考文献

- [1] CAÑAS J, PICÓN R, PARIÍS F, et al. A simplified numerical analysis of residual stresses in aluminum welded plates[J]. Computers and Structures, 1996, 58(1): 59—69.
- [2] TENG TSO-LIANG, CHANG PENG-HSIANG. Three-dimensional thermo-mechanical analysis of circumferentially welded thin walled pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(3): 237—247.
- [3] ARTEM P. Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding, their mitigation techniques[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2001.
- [4] CHENG C M. Butt-welding residual stress of heat treatable aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2007, 23(2): 217—222.
- [5] ZAIN-UL-ABDEIN M, NÉLIAS D, JULLIEN J F, et al. Prediction of laser beam welding-induced distortions and residual stresses by numerical simulation for aeronautic application[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(6): 2907—2917.
- [6] ZAIN-UL-ABDEIN M, NÉLIAS D, JULLIEN J F, et al. Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(12): 3025—3039.
- [7] DUNCAN CAMILLERI, TUGRUL COMLEKCI, THOMAS G F GRAY. Thermal distortion of stiffened plates due to fillet welds computational and experimental investigation [J]. Journal of Thermal Stresses, 2006, 29(2): 111—137.
- [8] ZAIN-UL-ABDEIN M, NÉLIAS D, JULLIEN J F, et al. Thermo-mechanical analysis of laser beam welding of thin plate with complex boundary conditions[J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(S1): 1063—1066.
- [9] MURPHY A, MCCUNE W, QUINN D, et al. The characterisation of friction stir welding process effects on stiffened panel buckling performance[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(3): 339—351.
- [10] SCHENK T, RICHARDSON I M, KRASKA M, et al. A study on the influence of clamping on welding distortion [J]. Computational Materials Science, 2009, 45(4): 999—1005.
- [11] 吴甦, 赵海燕, 王煜, 等. 高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 91—94.
- [12] PIOTR LACKI, KONRAD ADAMUS. Numerical simulation of the electron beam welding process[J]. Computers and Structures, 2011, 89(11—12): 977—985.
- [13] YANG Shang-lei, LUO Bin, LV Ren-yuan, et al. Microstructures and properties of MIG joint of AA5083 aluminum alloy used in high-speed vehicle[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(3): 1098—1102.
- [14] EL-AHMAR W. Robustesse de la simulation numérique du soudage TIG de structures 3D en acier 316L[D]. France: Institut National des Sciences Appliquées (INSA), 2007.

收稿日期: 2012-01-07; 修订日期: 2012-12-12

作者简介: 廖娟(1987—), 女, 硕士研究生, 从事金属焊接与焊接数值模拟的研究, 联系地址: 重庆市沙坪坝区重庆大学 A 区五舍 265 室 (400044), E-mail: juanzilz@163.com