

核用 SA508-3 钢特厚板焊后热处理有限元分析

陈重毅¹, 麻永林¹, 王文君², 邢淑清¹, 陆恒昌¹

(1. 内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 包头 014010; 2. 包钢西北创业实业有限公司 包钢设计研究院, 包头 014010)

摘 要: 为了得到 SA508-3 钢特厚板焊接残余应力分布及焊后热处理对残余应力分布的影响, 利用有限元方法对焊接及焊后热处理进行了模拟计算。结果表明, 焊后热处理对试板焊接应力分布趋势影响较小, 但焊后热处理可以大大减小接头应力数值, 其中, 纵向应力最大减小幅度为 72%, 横向应力最大减小幅度为 70%; 焊接接头存在应力分布准稳定区, 且接头内部残余应力水平最小, 其次为接头上表面, 接头下表面应力水平最大; 通过残余应力测定试验与模拟结果比对, 两者结果吻合度很高, 说明计算模型及计算方法可靠, 可以指导实际 SA508-3 钢特厚板焊后热处理生产。

关键词: 低合金高强度钢; 焊后热处理; 有限元法; 残余应力; 试验验证

中图分类号: TG 113 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)02-0080-05

0 序 言

核用 SA508-3 钢属于 Mn-Mo-Ni 系钢, 钢中的 V, Ni 和 Mo 等元素提高了材料的淬透性和韧性^[1], 经调质处理后力学性能达到最优, 是制造核压力容器的首选材料。由于核压力容器大多在高温、高压和辐照等复杂环境下工作, 要求容器焊后进行热处理减小或消除焊接残余应力, 提高使用寿命。在容器使用过程中, 残余应力因工作环境而发生变化, 会降低容器的抗疲劳性、耐腐蚀性和耐辐照性等^[2,3], 这些不利影响将直接导致容器失效和使用寿命锐减。为了确保焊后容器的性能, 须对容器进行焊后热处理, 降低残余应力水平, 满足使用要求^[4,5]。

国产核用 SA508-3 钢焊接相关工作已经得到较为全面的研究, 包括对材料的焊接温度场和残余应力进行了有限元分析及试验验证, 为 SA508-3 钢焊接应力场和变形预测提供了数据支持^[6]。Dai H 等人^[7]对 SA508-3 钢焊接应力场进行了模拟预测, 但关于 SA508-3 钢特厚板焊后热处理有限元分析的报道仍较少。为了得到焊后热处理对 SA508-3 钢特厚板焊接残余应力分布及焊后热处理对残余应力分布的影响, 通过有限元方法对热处理前后残余应力进行了预测, 得到接头不同区域残余应力分布, 之后进行 1:1 焊接试验, 将残余应力测定结果与模拟结果对比分析, 两者结果吻合度很高, 证明模拟结果正确

可靠, 为 SA508-3 钢特厚板焊后热处理残余应力分析提供模拟和试验数据支持。

1 有限元模型

1.1 试验材料

试验母材为 SA508-3 钢特厚板, 尺寸(长×宽×厚)为 500 mm×200 mm×100 mm。母材化学成分如表 1 所示, 母材力学性能: $R_m = 600$ MPa, $R_{eL} = 450$ MPa, $\delta \geq 18\%$, $A_{KU} \geq 50$ J。

表 1 SA508-3 的化学成分(质量分数%)
Table 1 Chemical compositions of SA508-3

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Fe
0.19	0.121	1.35	0.2	0.6	0.5	0.08	0.05	余量

1.2 焊接及焊后热处理工艺

焊接采用大型窄间隙埋弧焊机, 焊接坡口为深“U”形, 焊材选用 H10Mn2NiMoA, 焊接工艺参数详见表 2。焊后热处理工艺为 15 h (550±10) °C 电感应热处理。焊接残余应力测定采用盲孔法, 并通过静态应变仪进行数据记录, 测定区域为焊接接头上表面长度 1/2 处, 之后与模拟结果进行比对分析。

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

电压 U/V	电流 I/A	焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	焊接热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	焊接道次 N (道次)
530~550	30~32	38~42	27.3	30

1.3 模型建立

建立 SA508-3 钢特厚板焊接三维有限元模型,采用热-结构间接耦合法,有限元模型如图 1 所示,材料热物性参数见文献[6].

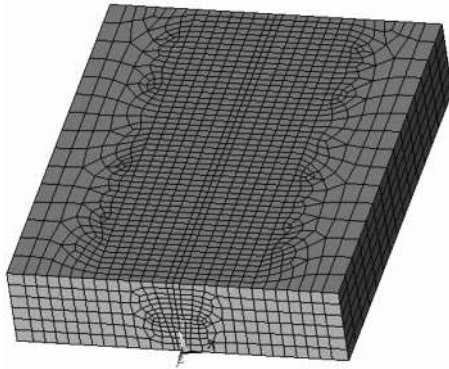


图1 有限元模型

Fig. 1 Model of finite element

2 有限元计算结果与分析

2.1 焊接应力场结果及分析

图 2 为试板热处理前焊接应力分布云图。由图 2a 可知,试板上表面熔合区横向应力最大,约为 408 MPa,焊缝中心应力为压应力,约为 -163 MPa,热影响区均为拉应力,随着到焊缝中心距离的增加,拉应力逐步减小为压应力。由图 2b 可知,厚度方向应力最大出现在引弧端,约为 326 MPa,试板上表面应力分布较小,约为 53 MPa。由图 2c 可知,试板上表面焊缝处纵向应力最大,约为 484 MPa,随到焊缝中心距离的增加,应力逐步减小,在试板长度 1/2 处,最大应力区域较宽,最大应力区域宽度到试板两端逐步减小。由图 2d 可知,等效应力为各方向应力的综合体现,可判定材料是否发生塑性变形。焊缝和接头端部等效应力最大,约为 458 MPa,随到焊缝中心距离的增加应力逐步下降。综上可知,试板端部应力分布较为复杂,主要是由端部效应和引弧收弧电流电压不稳定引起。在试板长度 1/2 区域存在一定的应力分布准稳定区与温度场的准稳定区基本保持一致。应力场分布规律与温度场的瞬时分布有很大联系,温度场分布决定了应力场分布。同时,残余应力分布特征可以为实际应力测定工作提供一定指导,即在分析接头实际应力分布时要选取试板长度的中心区域,排除试板的引弧端和收弧端,从而可以提高应力分析的精度。

2.2 焊后热处理应力场结果及分析

图 3 为焊后热处理应力分布云图。各方向残余

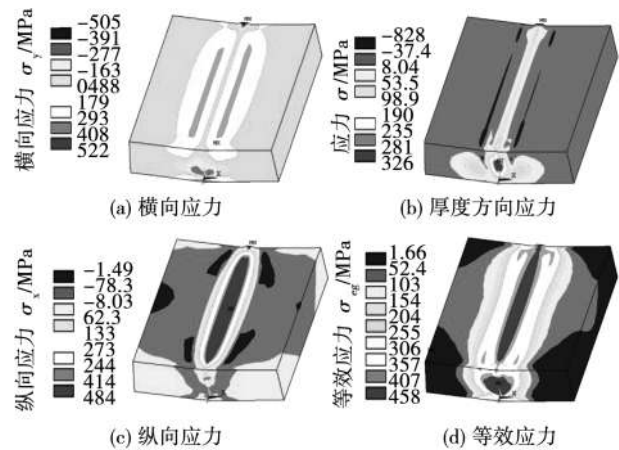


图2 热处理前焊接应力分布

Fig. 2 Welding stress distribution before heat treatment

应力分布与热处理前基本保持一致,且存在应力分布准稳定区,对比图 2 可知,残余应力分布水平下降幅度较大。横向应力最大值由 522 MPa 减小为 172 MPa,厚度方向应力由 326 MPa 减小为 130 MPa,纵向应力由 484 MPa 减小为 167 MPa,等效应力由 458 MPa 减小为 162 MPa。同时,接头最大应力分布区域宽度有所增大,进一步说明接头各部位应力趋于一致,各部位应力差距逐步减小。

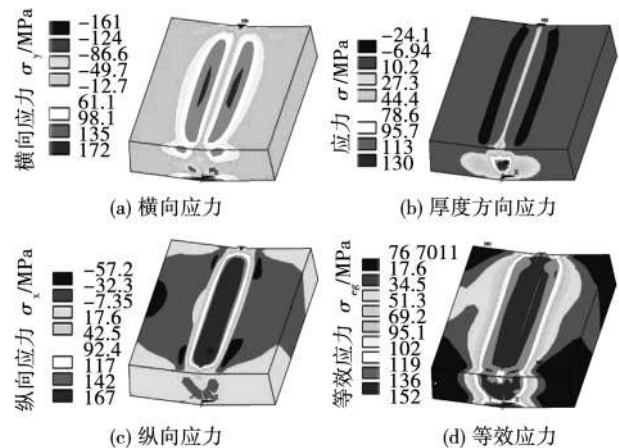


图3 热处理后焊接应力分布

Fig. 3 Stress distribution of heat treatment after welding

2.3 应力-路径结果及分析

为了掌握焊接接头在不同厚度上残余应力分布规律及内部残余应力分布情况,制订了应力-路径分析方法,路径共有三条,分别位于试板长度 1/2 处的上表面、中间截面和下表面,路径分布见图 4。

图 5 为不同路径纵向应力热处理前后对比图。热处理前后纵向应力分布在不同路径上表现基本一致,应力分布呈正态分布曲线。热处理前,纵向应力

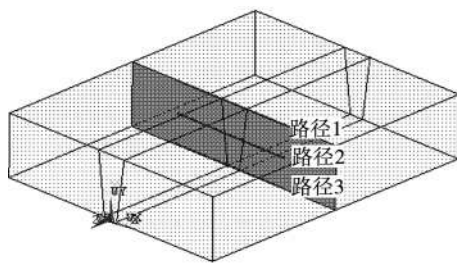


图 4 路径布置图

Fig. 4 Path layout diagram

在焊缝区最大,随着到焊缝中心距离的增加,纵向应力逐渐下降,在母材区减小为无应力状态. 路径 1 焊缝区纵向应力最大,约为 490 MPa. 热处理后,最大纵向应力仍位于焊缝区,路径 1 焊缝区纵向应力最大,约为 140 MPa. 热处理后的残余应力水平大幅下降,路径 1 焊缝区下降幅度最大,减小幅度约 72%,其次是路径 3,最后为路径 2. 同时,热处理后各区域纵向应力差值也大幅下降,应力分布水平趋于零. 接头内部纵向应力分布水平较低.

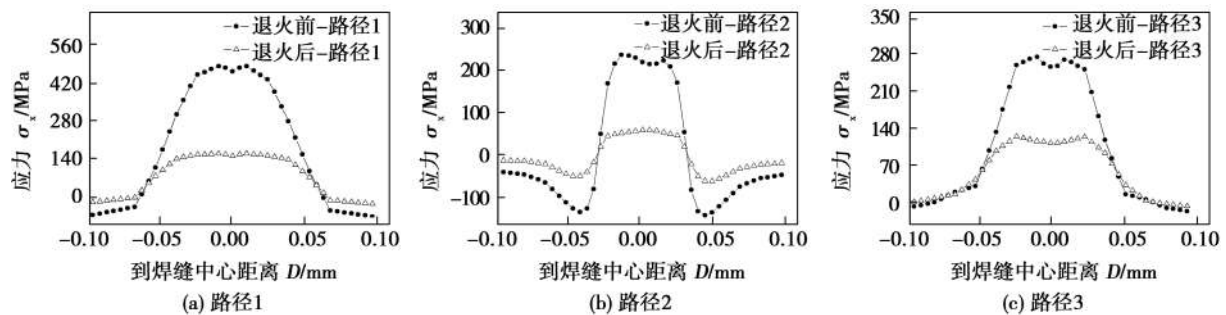


图 5 不同路径纵向应力热处理前后对比

Fig. 5 Longitudinal stress comparison on different paths before and after heat treatment

图 6 为不同路径厚度方向应力热处理前后对比图. 厚度方向应力水平较小,最大应力位于路径 2 焊缝区,约为 80 MPa. 三条路径应力分布区别较大,这主要由于厚度方向温度梯度和位移约束较大引

起. 热处理前后应力分布趋势基本一致,但热处理后的应力水平大幅下降,应力分布更为平缓. 接头内部应力分布水平较大.

图 7 为不同路径横向应力热处理前后对比图.

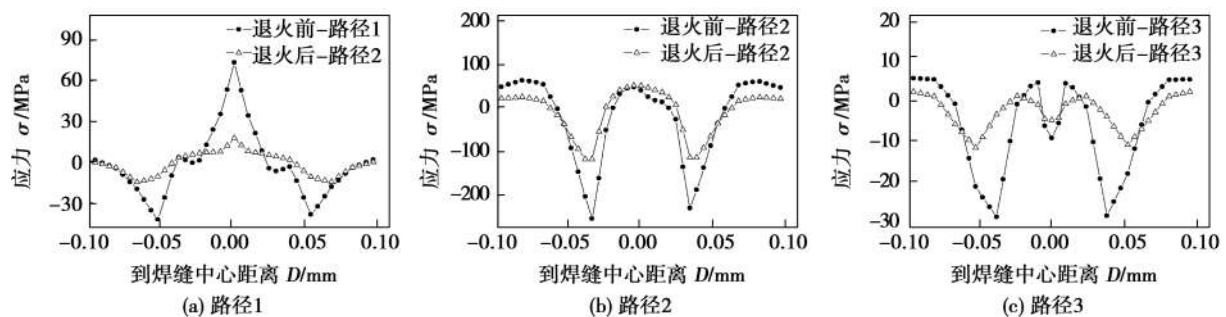


图 6 不同路径厚度方向应力热处理前后对比

Fig. 6 Thickness direction stress comparison on different paths before and after heat treatment

不同路径横向应力分布差异很大,说明试板厚度对接头横向应力分布有较大影响. 路径 1 焊缝区残余应力最小,热影响区应力最大,约为 295 MPa,母材区残余应力趋于零. 路径 2 母材区应力为零,随着到焊缝中心距离的增加,热影响区应力不断减小,焊缝区应力最小,约为 -245 MPa. 路径 3 焊缝区应力最大,约为 500 MPa,随着到焊缝中心距离的增加残余应力逐步减小,母材区应力最小. 同样,热处理前后应力分布趋势仍保持一致. 热处理前接头各区域

应力分布非常不均匀,差值较大. 热处理后残余应力水平大幅下降,各个区域应力差值减小,路径 3 焊缝区应力减小最大,减小幅度约 70%. 接头内部横向应力分布水平较小.

图 8 为不同路径等效应力热处理前后对比图. 不同路径等效应力分布趋势基本一致,焊缝区应力最大,约为 500 MPa,随着到焊缝中心距离的增加,应力逐步下降,母材区应力最小. 热处理前后等效应力分布趋势保持一致,但热处理后等效应力分布

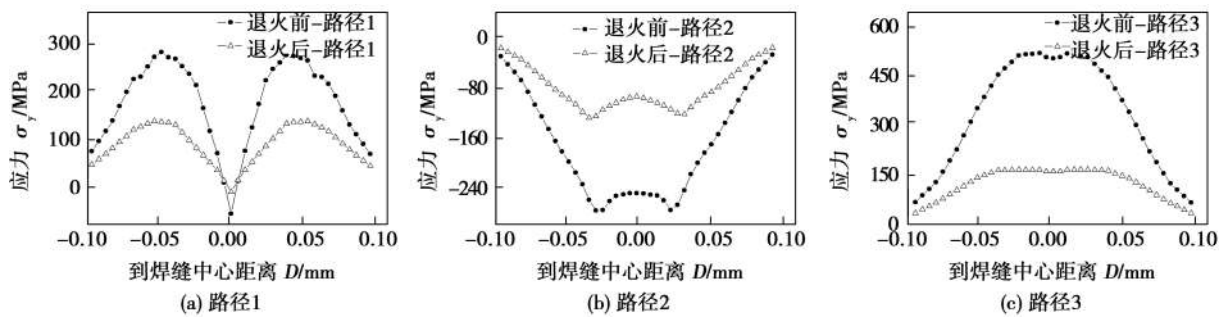


图7 不同路径横向应力热处理前后对比

Fig. 7 Transverse stress comparison on different paths before and after heat treatment

更为平缓,各区域等效应力差值减小. 热处理前焊缝等效应力最大,热处理后该区域等效应力迅速下

降,减小幅度约为68%,热处理效果明显. 接头内部等效应力分布水平较小.

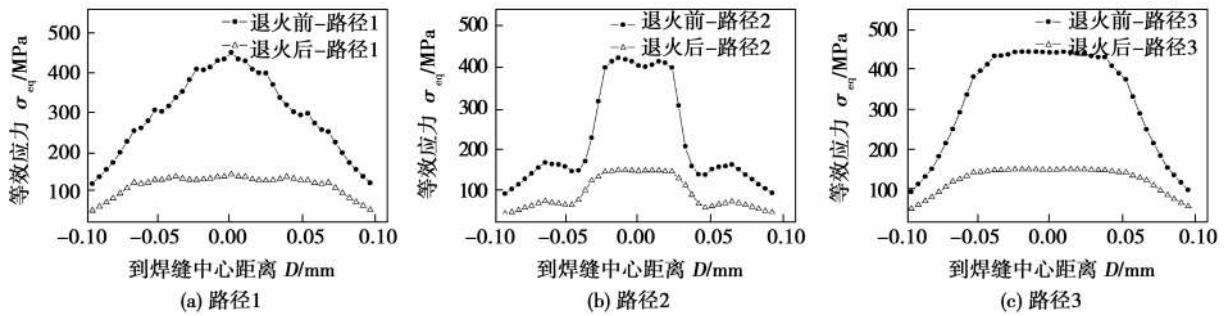


图8 不同路径等效应力热处理前后对比

Fig. 8 Equivalent stress comparison on different paths before and after heat treatment

2.4 模拟与试验结果对比分析

为了验证模拟结果的正确性和精确性,进行了1:1焊接试验和热处理试验,通过盲孔法对接头残余应力测定,之后对比模拟值和试验值.

图9为热处理前后残余应力模拟值与试验值对

比图. 模拟值与试验值在分布趋势上保持高度一致,具有很高的吻合度. 经计算,两者均误差在10%以内,说明计算模型和计算方法可靠,可以对核用SA508-3钢焊接热处理进行模拟计算,计算结果可以为其实际生产服务.

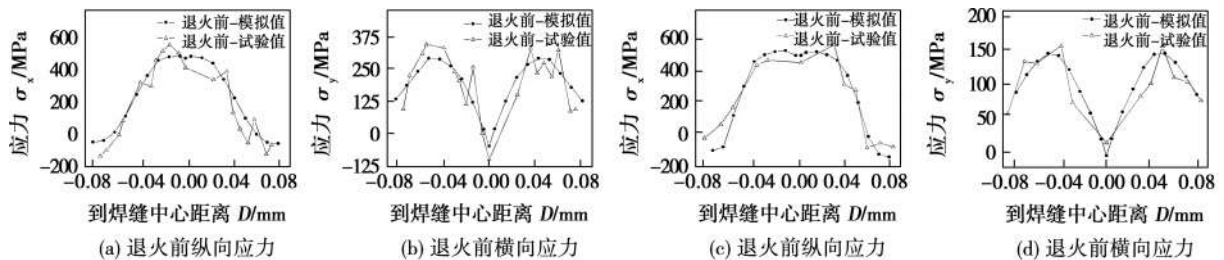


图9 模拟值与试验值对比

Fig. 9 Comparison of simulation and experiment results

3 结 论

(1) SA508-3 钢特厚板焊后热处理对焊接应力分布趋势影响较小,但可以大大降低残余应力水平,

纵向应力最大减小幅度为72%,横向应力为70%;残余应力越大的区域,焊后热处理效果越明显.

(2) 接头应力分布存在不随位置变化的区域,即存在应力分布准稳定区;接头各区域残余应力分布差异较大,接头内部残余应力水平最小,上表面居

中,下表面最大。

(3) 残余应力试验结果与模拟结果两者吻合度很高,说明计算模型和计算方法可靠,可指导实际 SA508-3 钢特厚板焊后热处理生产。

参考文献:

- [1] Spence J, Nash D H. Milestones in pressure vessel technology [J]. *Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81(2): 89–118.
- [2] 姜运建, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 焊接残余应力对 P92 钢 IV 型蠕变开裂的影响[J]. *焊接学报*, 2011, 32(1): 16–20.
Jiang Yunjian, Jing Hongyang, Xu Lianrong, *et al.* Effect of welding residual stress on type IV creep failure of P92 steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(1): 16–20.
- [3] Mark A F, Francis J A, Dai H, *et al.* On the evolution of local material properties and residual stress in a three-pass SA508 steel weld[J]. *Acta Material*, 2012, 60(8): 3268–3278.
- [4] Lee Yoon-Sun, Kim Min-Chul, Lee Bong-Sang, *et al.* Evaluation of microstructure and mechanical properties on post-weld heat treatment in the heat affected zone of SA508 Gr. 4N Ni-Mo-Cr low alloy steel for reactor pressure vessel [J]. *Journal of the Korean*

Institute of Metals and Materials, 2009, 47(3): 139–146.

- [5] 蒋文春, 王炳英, 巩建鸣. 焊接残余应力在热处理过程中的演变[J]. *焊接学报*, 2011, 32(4): 45–48.
Jiang Wenchun, Wang Bingying, Gong Jianming. Development of welding residual stress during post-welding heat treatment [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(4): 45–48.
- [6] 迟露鑫, 麻永林. 核电 SA508-3 钢大型筒体环焊残余应力分析[J]. *焊接学报*, 2013, 34(8): 85–88.
Chi Luxin, Ma Yonglin. Analysis of residual stresses on large-scale wall pipe circular weld of SA508-3 steel for nuclear power [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(8): 85–88.
- [7] Dai H, Francis J A, Withers P J. Prediction of residual stress distributions for single weld beads deposited on to SA508 steel including phase transformation effects [J]. *Materials Science and Technology*, 2010, 26(8): 940–949.

作者简介: 陈重毅,男,1983 年出生,博士研究生,讲师. 主要从事特厚钢铁材料和特种材料焊接冶金及焊接组织性能控制研究工作. 发表论文 6 篇. Email: czychenzhongyi@imust.cn

通讯作者: 麻永林,男,教授,博士研究生导师. Email: malin@imust.cn

[上接第 12 页]

参考文献:

- [1] 逯 瑶, 陈芙蓉, 解瑞军. 7A52 铝合金焊接接头表面纳米化前后的性能分析[J]. *焊接学报*, 2011, 32(1): 57–61.
Lu Yao, Chen Furong, Xie Ruijun. Properties of 7A52 aluminum alloy welded joint before and after surface nanocrystallization [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(1): 57–61.
- [2] Zhao X H, Wang D P, Huo L X. Analysis of the S–N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(1): 88–96.
- [3] 徐文利, 孟庆国, 方洪渊, 等. 高强铝合金板双丝焊温度场 [J]. *焊接学报*, 2004, 25(3): 11–14.
Xu Wenli, Meng Qingguo, Fang Hongyuan, *et al.* Temperature field of high strength aluminum alloy sheets by twinwire welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(3): 11–14.
- [4] 莫春立, 钱百年, 国旭明, 等. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. *焊接学报*, 2001, 22(3): 93–96.
Mo Chunli, Qian Bainian, Guo Xuming, *et al.* The development of models about welding heat sources' calculation [J]. *Transac-*

tions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 93–96.

- [5] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(2 卷) [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] Huang J W, Yin Z M, Lei X F. Microstructure and properties of 7A52 Al alloy welded joint [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18: 804–808.
- [7] Liu Y, Wang L J, Wang D P. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211: 2106–2113.
- [8] Wu C Y, Li L Y, Thornton C. Rebound behaviour of spheres for plastic impacts [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28: 929–946.
- [9] Wahab M A, Painter M J. Numerical models of gas metal arc welds using experimentally determined weld pool shapes as the representation of welding heat source [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1997, 73(2): 153–159.
- [10] 方洪渊, 董俊慧, 王文先, 等. 焊接结构学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

作者简介: 贾翠玲,女,1980 年出生,博士研究生,讲师. 主要从事铝合金焊接及其有限元模拟方面的研究. 发表论文 5 篇. Email: jialing_jlu2004@163.com

通讯作者: 陈芙蓉,女,博士,教授. Email: cfr7075@163.com