

文章编号: 0258-7025(2008)11-1795-06

铝合金不等厚板的 CO₂ 激光拼焊及数值模拟

余淑荣¹ 樊丁² 熊进辉² 王刚²

(兰州理工大学¹ 机电工程学院,² 有色金属新材料省部共建国家重点实验室,甘肃 兰州 730050)

摘要 采用 CO₂ 激光器,在填加和不填加合金粉末两种条件下,进行了不等厚铝合金(5A02,5A06)薄板的激光拼焊,研究了影响焊接过程稳定性和焊缝成形性能的主要因素,并用有限元方法(FEA)对焊接过程的温度场和应力场进行数值模拟,分析了拼焊板的残余应力分布和变形特点。试验结果表明,镁含量较高的铝合金对激光束的吸收率高,因此达到稳定深熔焊的临界功率密度较低,容易获得稳定的深熔焊过程;填粉能提高铝合金对激光的吸收率,使激光焊接中等离子体更加稳定,使焊接过程更趋稳定,更易得到成形优良的焊缝。模拟结果表明,不等厚铝合金板激光拼焊的温度场不对称,不等厚板的残余应力场和应变场也分布不对称,薄板上残余拉应力范围比厚板大,薄板整体变形大于厚板且比厚板复杂。

关键词 激光焊接;数值模拟;铝合金;不等厚

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083511.1795

CO₂ Laser Welding of Tailored Aluminum Alloy Sheets with Different Thickness and Numerical Simulation

Yu Shurong¹ Fan Ding² Xiong Jinhui² Wang Gang²

(¹College of Mechanical and Electrical Engineering, ²State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract CO₂ Laser welding of 5A02 and 5A06 aluminum alloys sheet with different thickness is performed with or without the addition of filler metal powder. The main factors affecting welding process stability and formability of weld are investigated. Meanwhile, based on the finite element analysis (FEA), temperature field and the stress-strain field of aluminum alloy with different thickness on laser welding are simulated. The residual stresses distribution and deformation features of tailored welded blanks (TWB) are analyzed. The results indicate that with the increasing of magnesium in aluminum alloys, the absorptivity is also improved, so a stable welding process can be obtained for a higher content of magnesium in aluminum alloys. The addition of the metal powder can enhance the energy coupling efficiency during laser welding of aluminum alloys sheet with different thickness, and the weld formation and process stability can be improved greatly. The simulated results indicate that temperature field distribution is unsymmetrical. The distributions of the stress-strain are also asymmetric. The distributions of pulling stress field in the thinner plate are larger than that in the thicker one and the deformations in thinner plate are more serious than that in thicker one.

Key words laser welding; numerical simulation; aluminum alloy; different thickness

1 引言

目前,国际上对于汽车的开发研究正朝着低能耗、低排放、低成本方向发展,汽车工业的轻量化是

一个主要发展方向。剪裁拼焊板(TWB)正是在这种背景下发展起来的一种新技术,它是将不同材质、不同厚度的板料经剪裁后,用焊接方法拼成坯板,然

收稿日期:2008-09-16; 收到修改稿日期:2008-10-10

基金项目:国家重大项目前期预研项目(2004CCA04900);甘肃省自然科学基金(3ZS041-A25-031)资助项目。

作者简介:余淑荣(1968—),女,副教授,博士研究生,主要从事铝合金激光焊接及数值模拟方面的研究。

E-mail: yushur@lut.cn

导师简介:樊丁(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事金属焊接控制及模拟方面的研究。

E-mail: fand@lut.cn

后整体冲压成形的一种加工工艺。剪裁拼焊钢板在汽车工业中的使用,有效地节省材料、降低车身重量、降低成本、降低油耗,从而获得很大的经济效益。相对于一般钢材,铝合金材料具有较低的密度、较高的比强度,可在满足强度等力学性能要求下,大大降低材料的消耗及构件的重量,因而铝合金剪裁拼焊板技术成为目前国际上的一个研究热点^[1]。

铝合金的激光焊接存在不少技术难点,如铝合金表面对激光束极高的初始反射率、焊缝的气孔、裂纹等,而铝合金不等厚板的激光拼焊,由于激光束对接口间隙的敏感性,以及由于材料厚度和材质的不同,使得拼焊工艺不仅存在铝合金激光焊接的一般问题,还存在焊缝成型困难、受热不均及应力集中等^[1,2]。同时,对于不等厚铝合金薄板的激光拼焊,由于板厚小、铝合金的导热系数高以及不等厚造成的温度场分布不对称等,在拼焊板上形成不可忽略的残余应力和变形,对后续的冲压成形工艺和拼焊板的使用性能造成影响。因此,研究铝合金不等厚板的激光拼焊,并对不等厚铝合金激光拼焊的温度场、应力应变场进行有限元模拟,具必要性和现实意义。

2 试验材料与方法

试验材料为 5000 系铝合金 5A02 和 5A06,属铝-镁系防锈铝合金,这类铝合金的主要特点是具有优良的成形性和抗腐蚀性,主要用于汽车、飞机、船舶等的承力零件。铝合金 5A02 厚度分别为 1.0 mm 和 1.4 mm。1.0 mm 薄板为半硬态(H24),表面显微硬度为 HV 77.4;1.4 mm 的厚板为退火态(O),表面显微硬度为 HV 64.5。大小为 150 mm×100 mm。铝合金 5A06 厚度分别为 1.0 mm 和 2.0 mm,大小为 100 mm×250 mm,两种板材均为退火态,表面显微硬度约为 HV 84.5。两种材料的化学成分见表 1。

表 1 5A02、5A06 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table1 Chemical composition of 5A02 and 5A06 aluminum alloy(mass fraction %)

	Mg	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Al
5A02	2.10	0.20	0.2	0.24	0.10	—	Bal
5A06	5.92	0.44	0.38	0.20	0.19	0.10	Bal

激光加工器为 3 kW CO₂ 激光器,光斑直径 0.15 mm,连续输出,模式 TEM₀₁。

焊前用丙酮清洗试样以去除油污,再用先碱洗后酸洗的方法去除氧化膜。试验中,两板材下表面

处于同一平面,激光光束微偏于厚板一边。焊接前在焊道处均匀涂刷铝和镁的混合粉末。保护气体为氩气,保护方式为同轴保护+侧面保护+背面保护。

3 试验结果与分析

3.1 填加粉末的影响

在不填加粉末的条件下,分别采用不同的激光功率、焊接速度、焦点位置对铝合金 5A02 和 5A06 不等厚板进行激光焊接试验。结果发现,铝合金 5A02 的焊接过程很不稳定,易产生焊穿和焊不透等焊缝不连续缺陷,很难获得没有明显缺陷的焊缝,而且焊缝成形与各工艺参数之间没有明显的规律性。为此焊接前在试板焊道处涂刷自配的粉末,进行对比试验,发现在填加粉末的情况下,不等厚度铝合金板的焊接过程变得明显平稳,而且选用合适的激光焊接工艺,可以得到均匀、平滑、成形良好的焊缝,当激光功率 $p = 1.6$ kW,焊接速度 $v = 1.2$ m/min,离焦量 $\Delta f = -0.2$ mm 时,填粉和不填粉时分别得到的拼焊板焊缝表面如图 1 所示。由图中可观察到,填粉时得到的焊缝光滑均匀,成型良好。

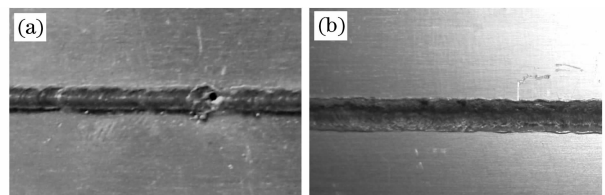


图 1 填加粉末对 5A02 焊缝成型的影响
(a) 未填加粉末;(b)填加粉末

Fig.1 Effect on weld appearance when using powder for aluminum 5A02. (a) weld face without powder; (b) weld face with powder

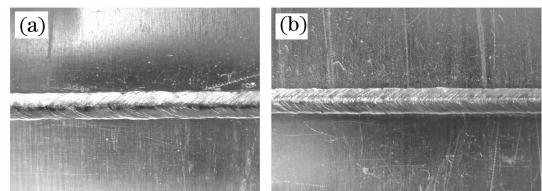


图 2 填加粉末对 5A06 激光拼焊焊缝外观的影响
(a) 未填加粉末;(b)填加粉末

Fig.2 Effect on weld appearance when using powder for aluminum 5A06. (a) weld face without powder; (b) weld face with powder

而对材料 5A06,在本试验条件下,不填加粉末就能得到稳定的深熔焊过程。主要原因是铝合金 5A06 的电阻率高,对激光束的吸收率高,同时其导热性低,从而在试验条件下形成了稳定的深熔焊。

而添加粉末等离子体的稳定性提高,可使焊接过程更加稳定,焊缝成形优良,如图 2 所示。

3.2 激光焊接参数对焊接过程稳定性的影响

激光焊接工艺参数对焊接过程的稳定性有较大影响,这些参数主要为激光功率和焊接速度。激光功率对铝合金激光焊接过程的稳定性影响很大,它主要是通过影响激光功率密度来影响焊接过程的。功率太小时,不能实现小孔效应,难以得到稳定的深熔焊接;随着功率的增大,熔深也相应增大。而功率太大时,由于光致等离子体对激光的屏蔽作用,使得焊接过程难以进行。试验中,对铝合金 5A02 填粉焊接功率在 1.4~2.0 kW 之间比较合适;而对铝合金 5A06,合适的功率范围为 1.2~2.0 kW。

在铝合金的激光扫描焊接中,较慢的焊接速度导致较大的热输入,容易出现焊穿、或导致焊缝中产生纵向热裂纹;而焊接速度较快时,焊缝出现明显的缺陷,或不能形成连续的焊缝。试验中,对 5A02 填粉焊接,合适的焊接速度为 1.1~2.2 m/min;而对铝合金 5A06,合适的焊接速度范围为 1.1~2.4 m/min。

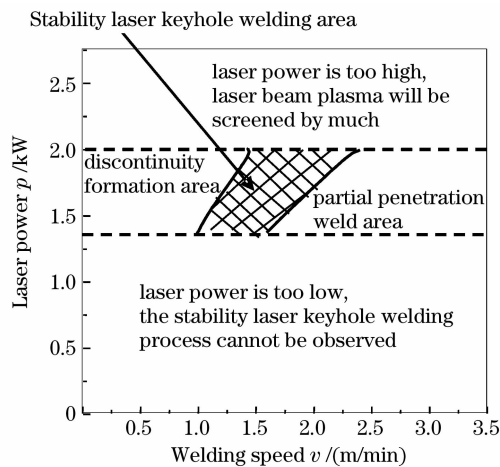


图 3 激光功率和焊接速度对铝合金 5A02 激光填粉拼焊过程稳定性的影响

Fig. 3 Effect on weld process stability of welding speed and laser power for aluminum 5A02

焦点位置一定时,激光功率与焊接速度对 5A02 焊接过程的耦合影响如图 3 所示。图 3 中有五个区域,功率太低或功率太高时,无论采用多大的焊接速度,都不能实现稳定的深熔焊,在合适的激光功率范围内,选取适宜的焊接速度,可得到稳定的深熔焊接过程。对铝合金 5A06,激光功率与焊接速度对其焊接过程的耦合影响与图 3 形状相似,取值范围略有不同。

4 激光焊接过程数值模拟

4.1 温度场数值模拟

4.1.1 有限元模型的建立及网格划分

模拟材料为铝合金 5A06。三维有限元模型尺寸为 270 mm×100 mm,薄板一侧厚度为 1 mm,厚板一侧厚度为 2 mm。定义在水平面内沿焊接方向为 x 向,垂直于焊接方向为 y 向,而沿板厚方向向上为 z 向。采用过渡网格划分,远离焊缝位置的地方,温度变化不明显,温度梯度小,所以采用比较大的网格尺寸;在焊缝中心位置附近,温度场变化剧烈,需要采用较细密的网格划分。有限元网格共生成 167350 个单元,132280 个节点,对接中心处最小网格尺寸为 0.1 mm。有限元网格划分如图 4 所示。

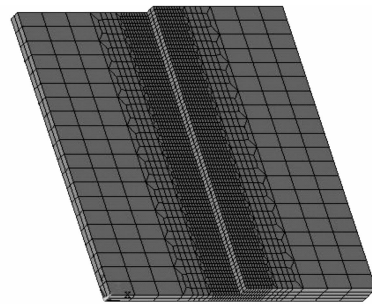


图 4 有限元网格划分

Fig. 4 Finite element mesh

4.1.2 热源模型的选取

建立热源模型的主要目标是寻找符合相应焊接条件下的热流分布形式,使模拟的熔池(液-固)边界线与实验观测的焊缝熔合线相符。因此,可以使用基于傅里叶定律和能量守恒定律的固体热传导理论来求解焊接温度场的分布,考虑改变材料的高温热物理特性来简化模型而不计熔池中的对流等复杂热物理过程。在相应的热输入条件下,只要热源模型所模拟的熔池的形状和尺寸与实际焊缝熔合线相一致,就可以认为该种激光深熔焊热源模型是基本合理的^[3]。

在本试验条件下,由于激光焊接过程为小孔焊接模式,为模拟焊缝截面形状,旋转体热源较为合适^[4]。建立面-体-面组合热源模型如图 5 所示。根据 Steen 热源叠加的观点可以认为,铝合金激光熔透焊的焊缝成形是焊接过程中两个面热源和一个体热源叠加作用的结果。体热源的热作用使焊缝中部出现一段近平直区域,而面热源的热作用使焊缝上部和焊缝下部分别出现熔宽较大的区域。

4.1.3 材料物理性能参数的选取

金属材料的物理性能参数如比热容、导热系数、

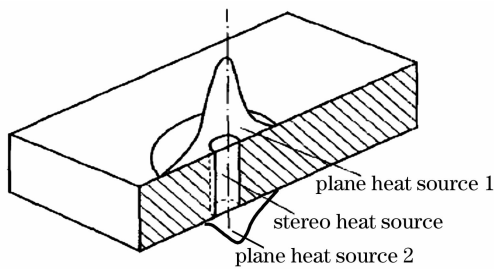


图 5 面—体—面组合热源模型

Fig. 5 Heat source model of plane—stereo—plane

弹性模量、屈服应力等一般都随温度的变化而变化。当温度变化范围不大时,可采用材料物理性能参数的平均值进行计算。但焊接过程中,焊件局部加热到很高的温度,整个焊件温度变化十分剧烈,如果不考虑材料的物理性能参数随温度的变化,计算结果会有很大的偏差。所以在焊接温度场的模拟计算中一定要给定材料的各项物理性能参数随温度的变化值。通过查阅文献[5],可以获得部分温度下的物理性能,通过插值法与外推法可以获得更高温度条件下的物理性能参数。

4.1.4 温度场模拟结果与分析

考虑了初始条件和边界条件,并考虑了相变潜热和熔池对流及光致等离子体的影响后,可计算得到温度场结果。当激光入射功率 $P_0 = 1.5 \text{ kW}$,焊接速度 $v = 20 \text{ mm/s}$,离焦量为 0,焊接进行 6 s 时(总的焊接时间为 13.5 s)整体温度场模拟结果如图 6 所示。由图可见,移动的激光热源经过一定时间后,焊件上形成了准稳定温度场,这时焊件上各点温度虽然随时间而变化,但各点以固定的温度跟随热源移动,也就是说,温度场与热源以同样的速度跟踪。

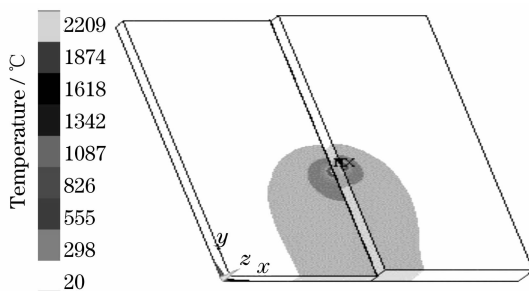
图 6 焊接时间 $t = 6 \text{ s}$ 时的温度场分布图

Fig. 6 Temperature distribution at time of 6 s

当薄厚两板上光斑分布相同、所加热流密度相同时,可以明显看到薄板上温度场范围比厚板大,熔池尺寸比厚板稍大,薄板熔化范围比厚板大,薄厚两板上对应点的温度,薄板高于厚板。这是由于在输入相同热量时,薄板用于加热的体积小而升温高的

缘故。

4.2 应力应变场的数值模拟

4.2.1 模拟方法及过程

利用间接耦合法模拟应力应变场。模型建立与网格划分与温度场模拟相同。在准确模拟温度场的基础上,重新进入前处理模块,读入温度场模型,把热单元转化为结构单元即(SOLID70→SOLID45,定义弹性模量 E ,线膨胀系数 α_l ,泊松比 μ 等随温度变化的材料力学参数值,通过查阅文献[5],可以获得部分温度下的物理性能,再通过插值法与外推法可以获得更高温度条件下的物理性能参数。此外,指定塑性分析选项为经典的双线性随动强化(BKIN)模式,并用插值法与外推法定义随温度变化的屈服应力值。

边界条件主要是约束焊接构件的自由度,要根据具体使用夹具情况而定。有限元分析中,在焊缝下底面中心点施加约束防止焊件整体刚性位移,在焊件两边若干点上施加 z 向约束,以模拟夹具的作用。在焊缝的起始两端施加一定的约束力,以模拟焊缝材料之间的拘束作用。定义参考温度为环境温度。

4.2.2 应力场模拟结果分析

图 7 所示为焊接进行 6 s(总焊接时间 13.5 s)时,瞬态应力场分布图。可见,在熔池附近区域,工件温度很高,材料处于软化和熔化状态,应力值很小,特别是在熔池内,可认为是处于零应力状态。在熔池前端,由于熔池的金属受热膨胀,熔池前端较冷的区域受到这种膨胀的挤压,存在一个比较大的压应力区。

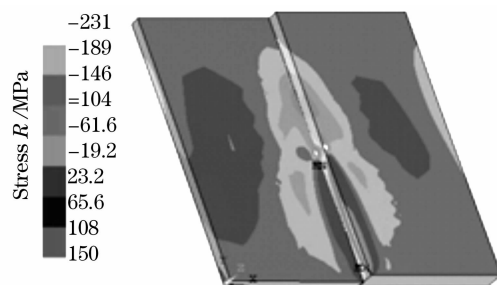


图 7 瞬态应力场

Fig. 7 State stress field

图 8 所示为焊接后 120 s 时纵向残余应力场分布图。可见焊缝及其附近区域中的纵向应力为拉应力,远离焊缝逐渐过渡到压应力,距离焊缝中心越远,焊接热过程的影响越小。薄板的残余拉应力范围比厚板略大,热影响区略宽。焊后 120 s,残余应力场分布状态基本稳定,残余应力场中最大拉应力不到 100 MPa,小于铝合金的屈服强度。对比文献

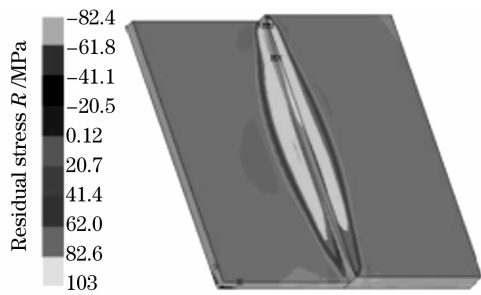


图 8 残余应力场

Fig. 8 Residual stress field

[6]中模拟得到的 TIG 焊时最大纵向拉应力 201 MPa,可知激光焊接时的拉应力峰值要小得多。

4.2.3 应变场模拟结果分析

图 9 所示为焊接进行 7 s 时,瞬态应变场分布图,为了显示的更加清楚,变形效果放大 10 倍。

焊接过程中,随着光束的移动,熔池也在不断移动,应变场也在不断变化中,熔池附近由于热作用,呈现膨胀状态,熔池后方温度下降,冷却后呈现收缩状态。

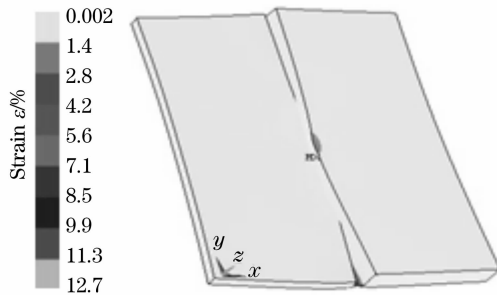


图 9 瞬态应变场

Fig. 9 State strain field

图 10 所示为焊接后 120 s 时,残余应变场分布图,为了显示的更加清楚,变形效果放大 50 倍。

由图 10 可见,异厚度铝合金激光拼焊残余变形比较复杂,既有角变形,还有横向、纵向收缩,薄板上甚至呈现波浪变形。激光焊接时,焊接速度快,热输入量小,工件整体变形较小,但是在焊缝附近还是有较大的残余变形,薄板整体变形大于厚板。

4.3 模拟结果的验证

采用小孔释放法检测异厚度铝合金激光拼焊板的残余应力,测试结果与模拟结果对比,验证模拟结果的准确性。应力场的对比结果如图 11 所示。由图可见,实测值与模拟值吻合较好。尤其是厚板上二者吻合良好,但薄板的模拟值与试验值间存在一定的偏差。主要原因是考虑到计算速度,模型的网格划分还不够小,而薄板厚度很小,所以薄板温度场模拟结果本身存在偏差,另外,建立的数学物理模型

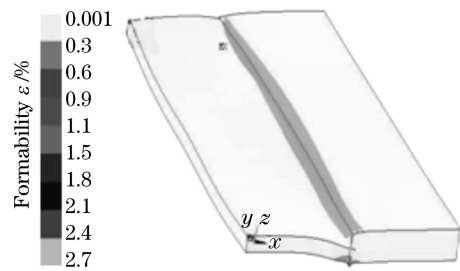


图 10 拼焊板的整体变形

Fig. 10 Whole formability of TWB

还需进一步完善。

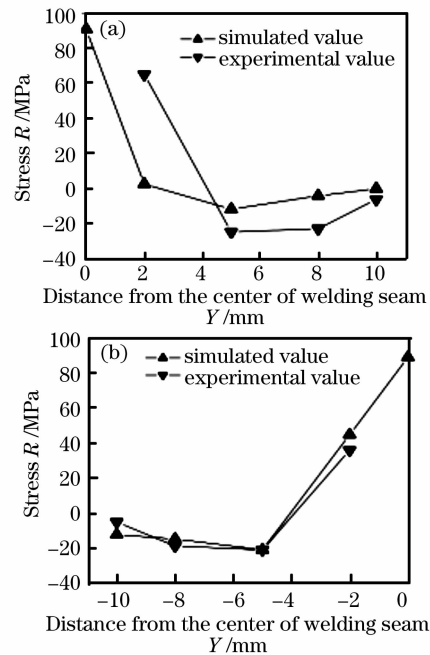


图 11 模拟值与实测值的比较

(a) 薄板模拟与试验值比较;(b)厚板模拟与试验值比较

Fig. 11 Comparison between experiment and simulation.

(a) Simulated value and experimental value for thin plate;(b) Simulated value and experimental value for thick plate

5 结 论

1) 添加混合粉末后,材料 5A02 的激光拼焊过程稳定性显著提高,可以得到稳定的深熔焊过程,焊缝成形明显改善。铝、镁混合粉末能提高铝合金对激光的吸收率,在相同的焊接条件下,使激光焊接临界功率密度降低。对材料 5A06,添加粉末亦能提高吸收率,焊缝熔宽增加。

2) 温度场模拟结果显示,不等厚铝合金板激光拼焊的温度场不对称,薄板峰值温度较高,且薄板熔化范围比厚板大。

3) 激光拼焊不等厚板的残余应力场分布不对

称,在焊缝区域纵向残余应力为拉应力状态,薄板上残余拉应力范围比厚板大。

4) 不等厚铝合金激光拼焊板的变形也不对称,而且比较复杂,薄板整体变形大于厚板,在薄板上同时存在多种变形,主要为收缩变形和角变形,同时薄板上有挠曲变形。

5) 用有限元方法对不等厚铝合金激光拼焊的温度场和应力应变场的数值模拟,为预测和控制拼焊板的残余应力与变形、优化焊接工艺以及冲压成型工艺提供了试验基础和理论依据。

参 考 文 献

- 1 S. Ramasamy, C. E. Albright. CO₂ and Nd: YAG laser welding of 6111-T4 aluminum alloys for automotive applications [J]. *Journal of Laser Applications*, 2000, **12**(3): 101~115
- 2 H. Zhao, D. R. White, T. Debroy. Current issues and problems in laser welding of automotive aluminum alloys [J]. *International Materials reviews*, 1999, **44**(6):238~266
- 3 Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer[M]. Second edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. 5~6
陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安.:西安交通大学出版社, 2001. 5~6
- 4 Wang Hong, Shi Yaowu, Gong Shuili. Modelling of the keyhole formation under high intensity laser power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):564~568
王 宏, 史耀武, 巩水利. 大功率激光作用下小孔形成数值模拟. *中国激光*, 2007, **34**(4):564~568
- 5 Tian Rrongzhang, Wang Zhutang. Aluminum and its processing handbook[M]. First Edition. Changsha: Zhongnan University Press, 2000. 33~36
田荣璋, 王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 第1版. 长沙:中南大学出版社, 2000. 33~36
- 6 Zhang Jianqiang, Zhang Guodong, Zhao Haiyan *et al.*. 3D-FEM numerical simulation of welding stress in thin aluminum alloy plate[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(6):5~9
张建强, 张国栋, 赵海燕 等. 铝合金薄板焊接应力三维有限元模拟[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(6):5~9