

# 高强钢激光焊接残余应力的研究

伍 强<sup>1</sup> 徐兰英<sup>1</sup> 杨永强<sup>2</sup> 孔春玉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>广东技术师范学院汽车学院, 广东 广州 510635

<sup>2</sup>华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

**摘要** 采用CO<sub>2</sub>激光焊接汽车专用高强钢,得到了性能良好的激光焊接件。为了提高本试验的测量精度,对测量残余应力的小孔法作了必要的修正。使用ANSYS软件对激光焊接残余应力进行了有限元分析,仿真结果与修正后的测试值吻合,在此基础上研究了高强钢激光焊接线能量对残余应力的影响规律。试验结果表明,纵向残余应力在距离焊缝中心约2.5 mm处达到最大,距离焊缝越远残余应力值越小,并最终达到稳定;在被焊试件前添加引弧板,可以使焊接试件起始段的残余应力分布与稳定段接近,消除了起始段残余应力不稳定的现象;线能量增加,则横向残余应力逐渐增大,而纵向残余应力的最大值减小。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 高强钢; 残余应力; 线能量

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0603007

## Study on Laser Welding Residual Stress of High Strength Steel

Wu Qiang<sup>1</sup> Xu Lanying<sup>1</sup> Yang Yongqiang<sup>2</sup> Kong Chunyu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Automotive Engineering Guangdong Polytechnic Normal University,  
Guangzhou, Guangdong 510635, China

<sup>2</sup>School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology,  
Guangzhou, Guangdong 510640, China

**Abstract** The excellent welding joints are obtained when the high strength automobile special steels are welded by CO<sub>2</sub> laser. In order to improve the measuring accuracy of the test, the small hole method of measuring residual stress is revised necessarily. The simulation results coincide with the modified test values after ANSYS software being used to calculate residual stress. The influence of line energy on residual stress is researched for laser welding high strength steel plates by the test method. The test results show that the longitudinal residual stress reaches a maximum at a distance of approximately 2.5 mm far away from the center of welding seam, and the farther away from the weld seam, the smaller the value of residual stress is, and the residual stress ultimately achieves stability. The residual stress distribution of the initial stage is close to that of the stable stage by adding the arc plate in front of the welded specimen, which eliminates unstable phenomenon of residual stress of the initial stage. The transverse residual stress increases gradually and the maximum value of the longitudinal residual stress decreases when the line energy increases.

**Key words** laser technique; laser welding; high strength steel; residual stress; linear energy

**OCIS codes** 140.3390; 140.3470; 350.4600

## 1 引 言

汽车的“安全性”和“轻量化”一直是汽车领域的热点问题<sup>[1-2]</sup>,而遴选优质材料、采用先进制造技术和寻找可靠的检测方法是解决这些问题的有效途径。运用特殊冶炼技术获得的高强钢已经成为汽车“安全性与轻量化”的重要材料<sup>[3]</sup>;而激光焊接是典型的先进制造技术,由于效率高、焊缝深宽比大、热影响区小等特点

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-03-15

基金项目: 广东省自然科学基金(2014A030313638)、国家自然科学基金(51375101)

作者简介: 伍 强(1967—),男,博士,副教授,主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail: 510635wuqiang@163.com

\*通信联系人。E-mail: xulanying2012@126.com

在汽车产业得到了大力推广与应用<sup>[4]</sup>。因此,在激光焊接高强钢的过程中出现的问题理应受到足够的重视。

高强钢由于合金元素含量高,在热作用下容易产生塑性变形,因此在激光焊接工件内部容易出现一定量的残余应力。另外,激光焊接产生的残余应力和工作载荷引起的应力相互叠加,在温度和介质的共同作用下使焊接件的残余应力发生变化,导致二次变形,从而降低了工件的机械性能和尺寸精度,影响汽车的制造质量。因此有必要准确测试高强钢激光焊接接头的残余应力分布,分析其变化规律并采取必要的预防措施来提高激光焊接件的质量,从而提高了汽车的安全性。由于小孔法测量残余应力简单可行,在工程实际中得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>,所以试验选用小孔法研究高强钢激光焊接接头的残余应力,并进行了必要的修正以提高本试验测量数据的精度。

## 2 试验条件及方法

试验材料是汽车专用高强钢(DOGAL800DP),显微金相组织是铁素体+珠光体,如图1所示,其力学性能与化学成分分别如表1和表2所示。

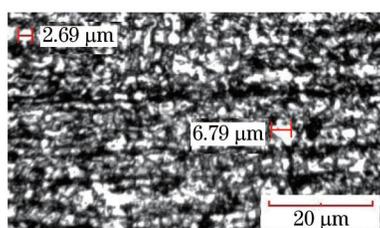


图1 材料的原始组织

Fig.1 Microstructure of material

表1 高强钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of test materials

Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%
1260	590	≥10

表2 试验材料的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of test materials (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Others
≤0.18	≤0.5	≤2.0	≤0.025	≤0.015	≥0.015

将试件加工成 200 mm×120 mm×1.5 mm 的平板,对接焊接方式,清边并采用脱脂棉球蘸取丙酮清洗试件。CO<sub>2</sub>激光器的最大功率可达 3 kW,焦深为 3.2 mm,TEM01 连续模式。为保证残余应力的测量精度,调整自制夹具的压板,轻微贴紧试件的一边,并控制接缝间隙在 0.12~0.16 mm 之间,使试件均匀平整,激光焊接的工艺参数如表3所示。

表3 激光焊接工艺参数

Table 3 Process parameters of laser welding

Number	Laser power $P$ /W	Welding speed $v$ /(m/min)	Linear energy $E$ /(kJ/m)	Defocus $L$ /mm
1	1400	1.0	84	-04
2	1300	1.0	78	-04
3	1200	1.0	72	-04

主要检测设备包括 CM-1J-20 数字静态应变仪、CCZ-1 型磁力测钻台、CF120-3BA-L 箔式电阻应变计和水平工作台等,以及游标卡尺和百分表等量具。使用专用胶水对 BE120-2CA-K 电阻应变花贴片,钻孔直径  $\phi 0.6$  mm,最后基于弹性理论计算接头的残余应力。

## 3 激光焊接残余应力的测量

### 3.1 小孔法测量残余应力

试验过程中严格按照 ASTM 标准 E837-2008 对小孔法的要求进行残余应力的测量。在试件上建立如图

2所示的坐标系,原点位于焊缝的中轴线上。

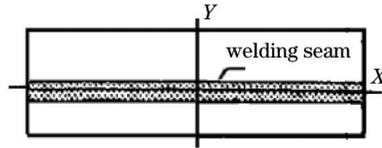


图2 对接焊接试件

Fig.2 Welding butt joint specimen

设  $x$  方向上的纵向残余应力为  $\sigma_x$ ,  $y$  方向上的横向残余应力为  $\sigma_y$ , 对应的释放应变分别是  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ , 根据标定试验可以确定应变释放系数  $A$  和  $B$ 。残余应力的主应力方向假设为纵向残余应力和横向残余应力方向<sup>[7]</sup>。残余应力由下式确定<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{1}{4AB}[\varepsilon_x(A+B) - \varepsilon_y(A-B)] \\ \sigma_y = \frac{1}{4AB}[\varepsilon_y(A+B) - \varepsilon_x(A-B)] \end{cases} \quad (1)$$

根据(1)式计算得到试件1的残余应力分布如图3所示,可以看出沿  $x$  轴方向的纵向残余应力较高,甚至出现了超过材料屈服极限的现象,说明在本试验条件下存在一定的测量误差。

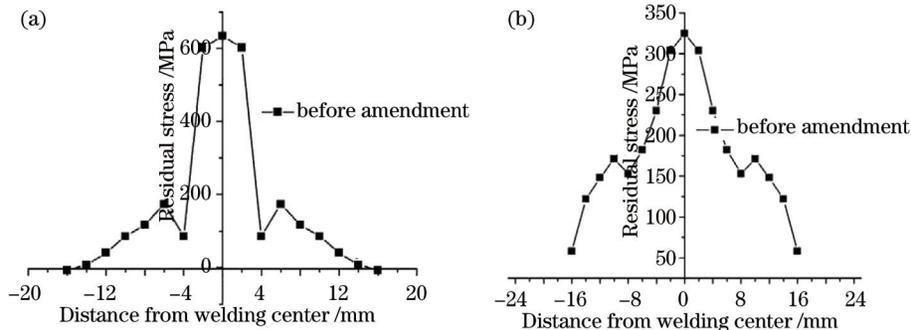


图3 修正前测量的残余应力。(a) 纵向残余应力; (b) 横向残余应力

Fig.3 Residual value stress before correction. (a) Longitudinal residual stress; (b) transverse residual stress

### 3.2 误差分析

分析认为出现这种误差的原因存在于基本理论的假设、孔位偏移、应变仪零漂、应变片粘贴质量、灵敏系数和钻孔产生的附加应力等方面。部分区域的残余应力大于屈服应力的主要原因是小孔边缘材料产生了塑性变形。在激光焊接过程中材料经历的相变过程非常复杂,加热部位相对集中,温度变化剧烈,受热极不均匀,使材料产生较大的残余应力而出现较大的变形,并在小孔应力集中的影响下,可能导致部分区域的叠加应力大于材料的屈服极限,从而产生塑性变形。如果工件中出现这种塑性变形,那么必然与基于弹性变形和叠加法的小孔测量理论相悖。检测采用通孔方式时的应变释放系数为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} A = -\frac{1+\mu}{2E} \times \frac{1}{r^2} \\ B = -\frac{1+\mu}{2E} \left( \frac{4}{1+\mu} \times \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $E$  为杨氏模量,  $\mu$  为泊松比,  $r$  为应变片中心距测量点的距离与小孔半径的比。

工件在应力作用下因屈服而产生塑性变形,其材料的力学性能发生了较大的变化,测量的释放应变可能因此受到塑性变形的影响,使应变释放系数  $A$  与  $B$  成为变量,造成测量误差较大。

### 3.3 测量方法的修正

在误差分析的基础上,构造与材料的形状改变比能相关的判断函数  $S$ 。函数  $S$  的表达式如下<sup>[9]</sup>

$$S = (1 + \mu^2 - \mu)(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) - (1 + \mu^2 - 4\mu)\varepsilon_x\varepsilon_y \quad (3)$$

通过标定试验能够确定小孔边缘的  $S$  恰好发生塑性变形时的极限值  $S_y$ 。于是有:

- 1) 当  $S < S_y$  时,小孔边缘没有出现屈服现象,可以根据常规的小孔法直接计算残余应力;
- 2) 当  $S > S_y$  时,由于小孔边缘发生塑性变形,因此需要按下式修正应变释放系数:

$$\begin{cases} A' = -(\alpha_A + \beta_A S) \\ B' = -(\alpha_B + \beta_B S) \end{cases} \quad (4)$$

可由标定试验确定(4)式中  $\alpha_A$ 、 $\beta_A$ 、 $\alpha_B$ 、 $\beta_B$  的值。使用修正后的应变释放系数计算残余应力,即可修正塑性变形对测量精度的影响。这是由于函数  $S$  能够反应材料的形状改变比能的大小;当函数  $S$  中包含小孔边缘塑性变形的影响时,对应的应变释放系数  $A$ 、 $B$  修正后,就能将小孔边缘的影响反馈到修正后的应变释放系数,从而提高测量精度,如图4所示,发现修正后的测量数据合理。

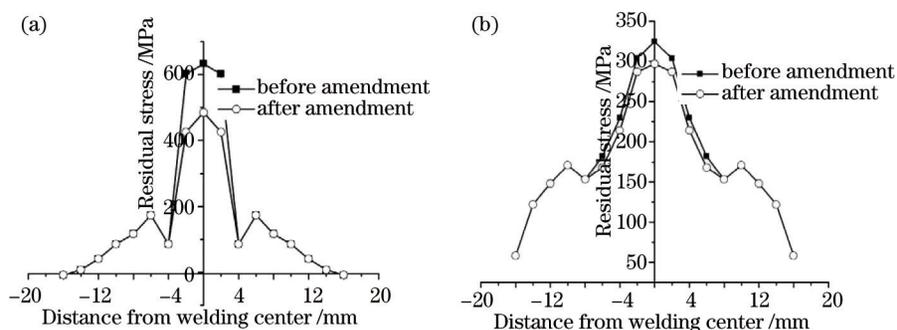


图4 修正前后测量的残余应力比较。(a) 纵向残余应力;(b) 横向残余应力

Fig.4 Comparison of residual stress before and after amendment. (a) Longitudinal residual stress; (b) transverse residual stress

### 3.4 有限元分析

选用软件 ANSYS 对激光焊接试件进行有限元分析。三维移动热源模型如下<sup>[10-11]</sup>

$$Q(r, z) = \frac{9P}{\pi r_0^2 z_0} \exp\left(-3\frac{r^2}{r_0^2} - 3\frac{z}{z_0}\right), \quad (6)$$

$$r = \sqrt{(x - Vt)^2 + y^2}, \quad (7)$$

式中  $r_0$  为激光作用的有效半径,  $z_0$  为能量深度,  $r$  为距热源中心的距离,  $z$  为当前能量作用深度,  $P$  为激光有效功率,  $t$  为焊接时间,  $V$  为焊接速度。

考虑激光能量的各种损失,激光功率的有效系数取 0.70,由于试件对称,因而取焊接件的一边建模。对试件 1 沿  $x$  轴方向的残余应力进行分析,仿真结果与试验值的比较如图 5 所示,显然仿真结果与本试验小孔法修正后的测量结果吻合。

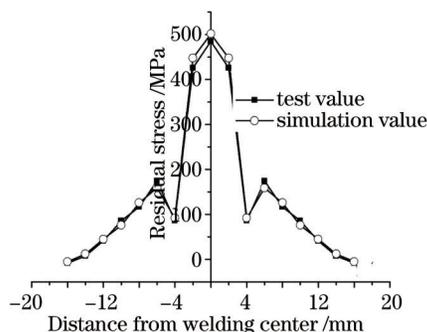


图5 纵向残余应力的测量值与有限元分析结果的比较

Fig.5 Comparison of longitudinal residual stress measured value and finite element analysis result

## 4 结果和讨论

### 4.1 激光焊件的残余应力分布

按照表 3 的工艺参数对试件 1 进行激光焊接,使用修正后的小孔法进行测试,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出焊缝附近的纵向残余拉应力和横向残余拉应力较大;无论是纵向还是横向,离焊缝的距离越远,其

残余应力快速衰减,甚至出现压应力的现象。

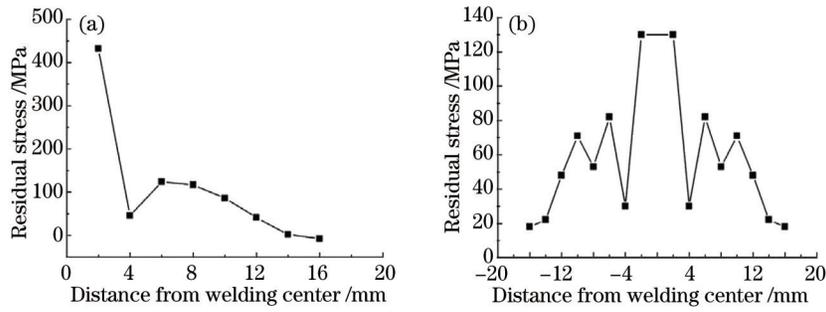


图6 试件1残余应力分布。(a)纵向残余应力分布;(b)横向残余应力分布

Fig.6 Residual stress distribution of specimen 1. (a) Longitudinal residual stress; (b) transverse residual stress

对试件2采用表3的工艺参数进行激光焊接后进行残余应力测试,结果如图7所示。纵向残余应力在距离焊缝中心约2.5 mm处最大,远离焊缝逐渐下降,距离焊缝中心约12 mm处下降趋于平缓并达到稳定。

由图6和图7可知,试件1和2的横向残余应力较小,不到屈服强度的1/3;而纵向残余拉应力的最大值较大,已经超过了材料屈服强度的一半,在工作过程中存在因外应力的叠加作用而使焊接件出现屈服失效的风险,因此在进行高强钢激光焊接件的校核时,主要校核纵向残余拉应力。同时激光焊接具有焊接效率高特点,使试件焊接后具有较大的温度梯度,而材料的热膨胀系数高,因此激光焊接试件的残余应力分布的梯度较大。

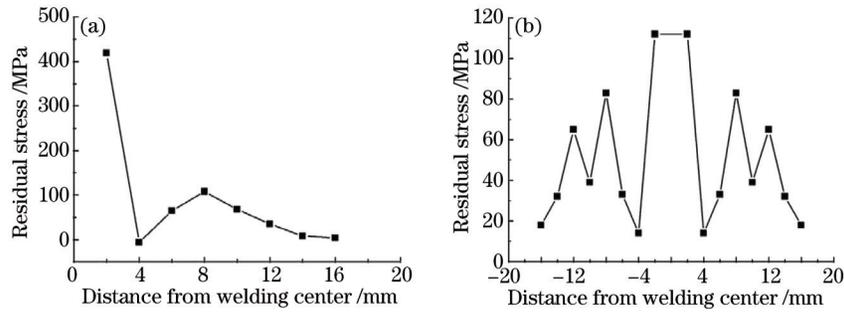


图7 试件2残余应力分布。(a)纵向残余应力;(b)横向残余应力

Fig.7 Residual stress distribution of specimen 2. (a) Longitudinal residual stress; (b) transverse residual stress

#### 4.2 起始段熔宽不稳定的残余应力分布

图8是试件编号1~3的焊缝宏观形貌。发现激光焊接接头起始段熔宽不稳定导致局部焊缝未焊透,在缩颈处形成缺口,使焊接接头的残余应力发生较大的波动。

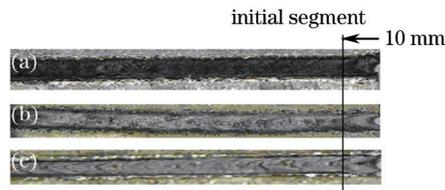


图8 试件的宏观形貌。(a) 编号1; (b) 编号2; (c) 编号3

Fig.8 Macro morphology of test pieces.(a) Number 1; (b) number 2; (c) number 3

出现这种现象的主要原因是激光深熔焊接的小孔形成需要一个较小的时间段。在小孔形成通孔前,材料通过盲孔的内孔壁吸收能量,这时能量主要分布在熔池上部,导致焊缝上表面增大,此时金属蒸气急剧增强,形成的等离子体云密度增大,因此宽深比较大。穿透小孔形成后,激光能量沿厚度方向分布相对均匀,熔池上部吸收的能量降低,焊缝趋于准稳态。试验表明,在被焊试件前后添加引弧板,寻求焊缝的不稳定部分出现在引弧板上,使焊接试件的焊缝和起始段的残余应力稳定。距离激光焊缝起始段3 mm对试件1进行残余应力的测试,结果与稳定段的残余应力比较如图9所示。发现在被焊试件前添加引弧板前,残余应力高的区域较宽,残余应力的最大值较高;添加引弧板后,激光焊接试件的残余应力分布与稳定段接近。

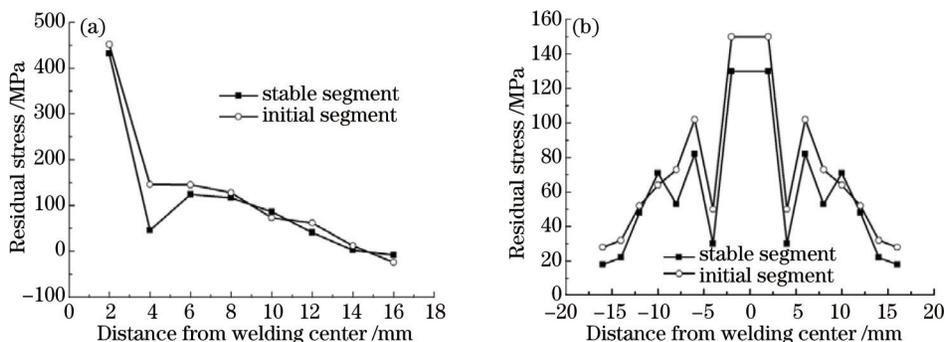


图9 试件1起始段与稳定段的残余应力分布对比。(a)纵向残余应力分布; (b)横向残余应力分布

Fig.9 Residual stress distribution comparison of initial segment and stable segment. (a) Longitudinal residual stress distribution; (b) transverse residual stress distribution

### 4.3 线能量对残余应力分布的影响

激光焊接后焊件开始冷却<sup>[12]</sup>,因为散热条件不同使试件不同部位的冷却速度不同,因而材料中出现高温区和低温区,并表现出流动性的差异,出现低温区金属阻碍高温区金属流动的现象,导致焊缝金属和平衡焊缝的金属出现拉应力,产生了拉伸塑性变形。当温度进一步下降,低于材料的弹性温度时,试件内部出现了弹性拉应力和弹性拉应变。拉伸状态的最大塑性应变通常出现在熔合线附近,对应的残余拉应力最大<sup>[13-14]</sup>。

试件1~3的激光焊接工艺参数和残余应力分布的对比如图10所示,其中工艺参数如表3所示。发现随着激光焊接高强钢的线能量增加,纵向残余拉应力最大值降低,而横向残余应力最大值升高。这是因为线能量较小时,热输入较低,形成的焊缝和塑性区域的宽度也相对较窄,导致纵向残余应力的拉应力分布在较窄的区域,但其最大值较大;当焊接线能量增大时,横向收缩变形增大,横向残余应力最大值升高。

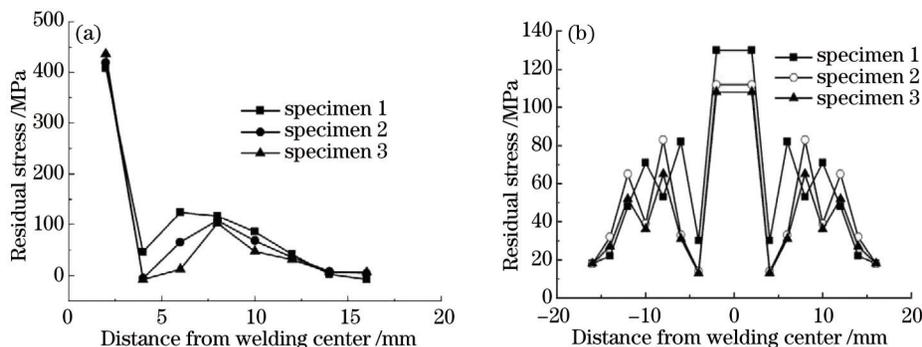


图10 不同线能量下的残余应力分布。(a)纵向残余应力; (b)横向残余应力

Fig.10 Residual stress distributions under different line energy. (a) Longitudinal residual stress; (b) transverse residual stress

## 5 结 论

1) 钻削时在小孔边缘产生的应力集中容易诱发塑性变形,导致小孔法测量残余应力偏高;修正后能减少本试验的测量误差,测量的残余应力合理。仿真分析与计算结果与修正后的测试值吻合。

2) 高强钢激光焊接后,试件最大的纵向残余拉应力偏高,应注意去应力处理,以降低残余应力对工件的制造精度和安全性的影响。

3) 在被焊试件前添加引弧板前,产生残余应力高的区域变宽,残余应力的最大值较高;添加引弧板后,焊接试件的残余应力的分布与稳定段接近。

4) 激光焊接试件的横向残余拉应力较小,纵向拉应力偏高,因此对工件进行校核应以纵向拉应力为主。激光焊接的线能量影响试件的残余应力,当线能量增加时,横向残余拉应力增大,但是最大纵向残余拉应力出现下降的趋势。

## 参 考 文 献

- 1 X Gu, G Sun, G Li, *et al.*. A comparative study on multiobjective reliable and robust optimization for crashworthiness design of vehicle structure[J]. *Struct Multidisc Optim*, 2013, 48(3): 669-684.
- 2 W Patrick. Advanced materials in automotive: Newer steels, aluminum, magnesium, and other materials lead to more lightweight, economical vehicles[J]. *Manufacturing Engineering*, 2009, 143(3): 153-159.
- 3 Zhang Yi, Tan Lipeng, Zhang Chenglei. Research on gap margin in laser butt welding of high-strength automobile steel with hot wire filler[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0703003.  
张 屹, 谭力鹏, 张成磊. 车用高强度钢激光填充热丝对接焊间隙裕度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0703003.
- 4 Wu Qiang, Chen Genyu, Xu Lanying, *et al.*. CO<sub>2</sub> laser welding of vehicle body[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(12): 1726-1731.  
伍 强, 陈根余, 徐兰英, 等. CO<sub>2</sub>激光焊接车身拼焊板[J]. *中国激光*, 2007, 34(12): 1726-1731.
- 5 Wang Qingming, Sun Yuan. Research development on the test methods of residual stress[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, 28(1): 11-15.  
王庆明, 孙 渊. 残余应力测试技术的进展与动向[J]. *机电工程*, 2011, 28(1): 11-15.
- 6 Y F Kao, T D Lee, S K Chen, *et al.*. Electrochemical passive properties of Al<sub>x</sub>FeCrCoNi( $x=0,0.25,0.5,1.0$ ) alloys in sulfuric acids[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(3): 1026-1034.
- 7 Tang Muyao. *Welding Test Technology*[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.  
唐慕尧. *焊接测试技术*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- 8 Zhao Haiyan, Chen Yuejun, Shi Yaowu, *et al.*. The measurement of residual stresses in welds zone[J]. *Welding Pipe and Tube*, 1997, 20(4): 12-17.  
赵海燕, 陈岳军, 史耀武, 等. 焊缝区域残余应力的测试[J]. *焊管*, 1997, 20(4): 12-17.
- 9 Zhao Haiyan, Pei Yi, Shi Yaowu, *et al.*. The influence and correction to the measuring error of high welding residual stress when using hole-drilling method[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 1996, 18(3): 17-20.  
赵海燕, 裴 怡, 史耀武, 等. 用小孔释法测量焊接高残余应力时孔边塑性变形对测量精度的影响及修正方法[J]. *机械强度*, 1996, 18(3): 17-20.
- 10 He Xiaodong, Zhang Jianxun, Pei Yi, *et al.*. Effects of heat input on laser welding residual stress and distortion of TC4 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(5): 774-777.  
何小东, 张建勋, 裴 怡, 等. 线能量对 TC4 钛合金激光焊接残余应力和变形的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(5): 774-777.
- 11 P Lacki, K Adamus, P Wiczorek. Theoretical and experimental analysis of thermo-mechanical phenomena during electron beam welding process[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 94: 17-26.
- 12 Shi Yifei, Shen Zhonghua, Ni Xiaowu, *et al.*. Welding stress measurement using laser-generated Rayleigh waves in aluminum alloys [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(10): 1627-1631.  
石一飞, 沈中华, 倪晓武, 等. 激光激发瑞利波测量铝合金焊接残余应力[J]. *中国激光*, 2008, 35(10): 1627-1631.
- 13 He Enguang, Gong Shuili, Wu Bing, *et al.*. Residual stress measurements of the T-joints by the laser beam welding[J]. *Electro Machining & Mould*, 2010, (6): 32-35.  
何恩光, 巩水利, 吴 冰, 等. 激光焊接 T 型接头残余应力测试[J]. *电加工与模具*, 2010, (6): 32-35.
- 14 Wang Zhechang. Rediscussion on welding stress-strain[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(8): 108-112.  
王者昌. 关于焊接应力应变问题的再探讨[J]. *焊接学报*, 2006, 27(8): 108-112.

栏目编辑: 宋梅梅