

# 光纤激光入射角对高强钢对接焊焊接性能的影响

陈根余<sup>1,2</sup> 康 斌<sup>1,2\*</sup> 张 屹<sup>1,2</sup> 李时春<sup>2</sup> 谭力鹏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)  
<sup>2</sup>湖南大学激光研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 研究了光纤激光入射角变化对车用高强钢(B340/590DP)对接焊焊接性能的影响。采用前期试验得出的激光垂直入射状态下的最优焊接参数,在该最优参数条件下,利用 4 kW 光纤激光器进行了 1.6 mm 厚的双相 B340/590DP 不同入射角条件下的对接焊试验。分析入射角变化对焊接件外观形貌、焊缝截面、力学性能和微观组织的影响。试验结果表明:激光入射角小于 40°时焊缝外观形貌良好,组织细密均匀,能承受较大的拉剪载荷且拉剪试验均断裂在母材区;入射角大于 40°时,焊缝背面形成单边焊。

**关键词** 激光技术;激光对接焊;入射角;光纤激光;焊接性能

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0103008

## Effects of Incident Angle on Welding Performance of Fiber Laser Butt Welding of High-Strength Automobile Steel

Chen Genyu<sup>1,2</sup> Kang Bin<sup>1,2\*</sup> Zhang Yi<sup>1,2</sup> Li Shichun<sup>2</sup> Tan Lipeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Body,  
Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China  
<sup>2</sup>Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

**Abstract** The effects of incident angle on welding performance of fiber laser butt welding of high-strength automobile steel are researched. The ideal parameters obtained by the previous test is used. The 4 kW fiber laser is used to weld the dual-phase high-strength steel B340/590DP with the thickness of 1.6 mm at different incident angles with a butt joint. Then the effects of incident angle on the weld topography, cross section topography, tension and shearing property and micro-structure are analyzed. The results show that good weld topography, fine micro-structure and greater tension and shearing property can be obtained when the laser beam incident angle is less than 40°. When the incident angle is more than 40°, the single-sided weld is obtained on the back of the bead.

**Key words** laser technique; laser butt welding; incident angle; fiber laser; welding performance

**OCIS codes** 140.3390; 350.4600; 060.2310; 080.1753

## 1 引 言

近年来,汽车行业得到了前所未有的发展机遇。车身制造是汽车生产中的重要一环。传统的汽车车身焊接一般采用电阻点焊,但是这会增加车身的重量,而激光焊接以其能量密度高、焊接速度快,热影响区小、强度高等优点正日益受到重视,在汽车车身焊接制造中得到广泛应用并成为新一代车身制造

主要焊接工艺<sup>[1~3]</sup>。

传统的对接焊一般都是激光束垂直照射在工件表面上,然而在车身的实际焊接过程中,由于焊接头的形状以及车身零件具体结构和夹具的影响,焊接头和夹具及零件本身有时会产生干涉。在三维零件的焊接过程中,在焊缝拐角处或其他因零件结构尺寸限制的部位,如果不偏转焊接头,焊接将无法实

收稿日期: 2011-08-16; 收到修改稿日期: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(50805045)、国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2009ZX04007-021)和广东省教育部产学研结合项目(2010A090200048)资助课题。

作者简介: 陈根余(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事汽车激光制造研究及激光微细加工等方面的研究。

E-mail: hdgychen@163.com

\* 通信联系人。E-mail: kangbin1984@163.com

现。本课题组对不同入射角对激光搭接焊接性能的影响做了一定的研究<sup>[4]</sup>,而对于激光对接焊的入射角与焊接性能的关系研究还未见报道。因此,本文研究了改变激光入射角度对车用高强钢对接焊接性能的影响,希望为激光对接焊在车身制造中的推广提供一定的参考。

## 2 试验设备与方法

### 2.1 试验设备

试验采用的激光器为 IPG YLS-4000-S2T-CL 型,机器人为 ABB 2400 六轴机器人,焊接头为 YW50,夹具为自制夹具。光纤激光器最大输出功率为 4.0 kW,工作稳定性小于 2%,工作模式为多模,连续输出,波长为 1.07  $\mu\text{m}$ 。传输光纤芯径为 300  $\mu\text{m}$ ,焊接头聚焦光斑直径为 0.4 mm。六轴机器人重复定位精度为 0.07~0.1 mm,并且可以通过指令实现焊接头角度的精确偏转。

### 2.2 试验材料

试验材料为车用双相高强度冷轧钢板,型号为 B340/590DP。材料化学成分见表 1,其抗拉强度  $R_m \geq 590$  MPa,屈服强度  $R_{p0.2} \geq 340$  MPa。该型号高强钢具有屈服强度低、初始加工硬化速率高、强度

和延性配合好等特点,在车身各种结构件、加强件和防撞件中有较多应用。

试验试件用激光切割成尺寸为 100 mm  $\times$  30 mm  $\times$  1.6 mm 的平板试件,采用对接焊接方式,对接间隙为 0,试验前将试件的对接面进行打磨,以保证焊接时对接面平整对接。同时为了避免油污对焊接质量产生影响,焊接前用丙酮擦拭焊接部位,去除油污。

表 1 B340/590DP 的材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of B340/590DP (mass fraction, %)

Grade of steel	C	Si	Mn	P	S
B340/590DP	0.18	0.8	2.2	0.035	0.030

### 2.3 试验方法

试验采用氩气做侧吹保护气体,在前期工作中,选取了一组垂直入射时的最佳光纤激光对接焊接工艺参数<sup>[5]</sup>如表 2 所示,焊缝形貌如图 1 所示。在此优化参数条件下,改变入射角度进行对接焊接试验,焊接示意图如图 2 所示。焊接完成后对焊接试件进行焊缝外观形貌、截面形状、力学性能及微观组织等分析,得出在该参数条件下能够得到较好焊接质量的入射角度范围。

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

Group	Laser power /W	Welding speed /( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	Gas-flow rate /( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	Defocusing distance /mm
1.6 mm+1.6 mm	2000	1200	20	+5

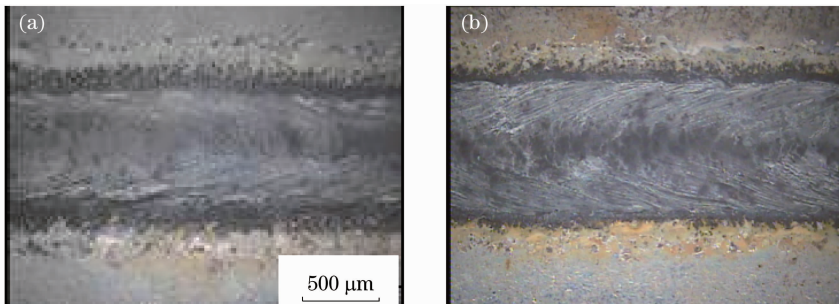


图 1 入射角为 0°时焊缝(a)正面及(b)背面形貌

Fig. 1 Weld topography of (a) front side and (b) back side at 0°

## 3 试验结果分析

### 3.1 焊缝形貌分析

焊缝表面形貌是反映焊接质量的一个重要因素。在表 2 所列参数条件下,分别置激光入射角为 5°,10°,15°,20°,25°,30°,35°,40°,45°,50°进行焊接。图 3 是焊缝在体视显微镜下的表面形貌图。从图中可以看出,随着入射角度的增加,焊缝宽度呈增大的

趋势,焊缝表面平整、均匀连续,无明显的气孔、飞溅和塌陷。随着偏转角度的加大,入射光斑由垂直状态下的圆形变成了椭圆形,光斑照射在工件上的面积变大,因此焊缝宽度随入射角增大有所增加,从而使得激光功率密度降低。激光束的倾斜入射还使得实际焊接部位的厚度较垂直入射时增加,如图 4 所示。

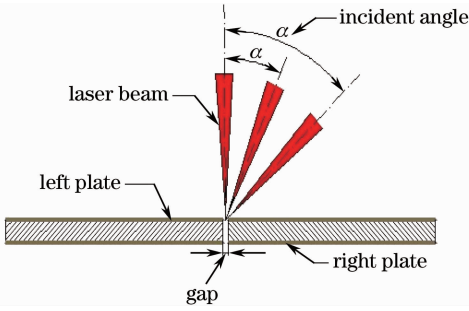


图 2 焊接示意图

Fig. 2 Experimental principle

图 5 是不同入射角焊接时焊缝背面的形貌图，从图中可以看出，当入射角小于 40° 时，背面形貌良好，没有出现明显的焊接缺陷，但当入射角大于 40°

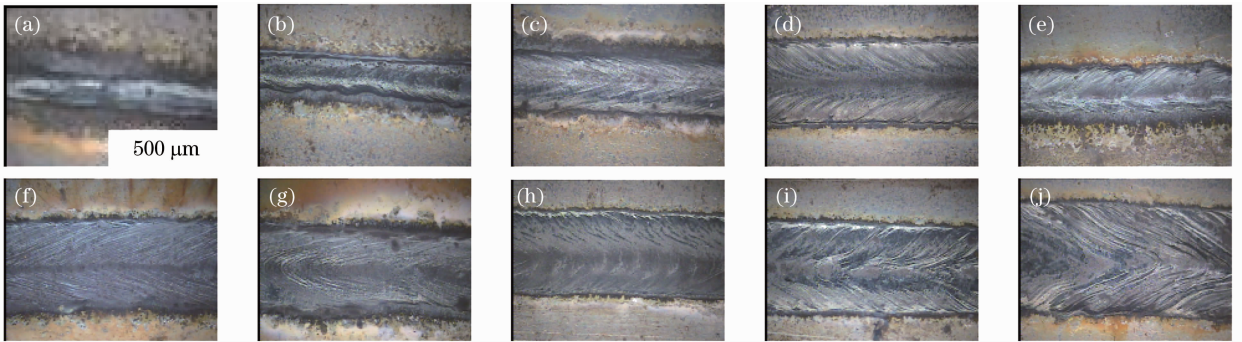


图 3 不同入射角下焊缝上表面形貌图。(a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°; (e) 25°; (f) 30°; (g) 35°; (h) 40°; (i) 45°; (j) 50°

Fig. 3 Bead performance at different incident angles. (a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°; (e) 25°; (f) 30°; (g) 35°; (h) 40°; (i) 45°; (j) 50°

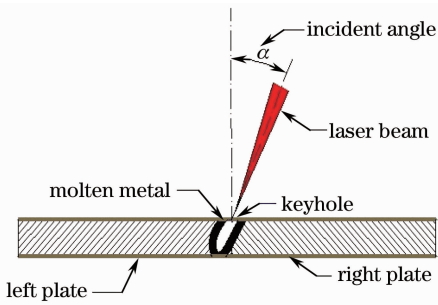


图 4 倾斜入射焊接原理图

Fig. 4 Elementary diagram of lean welding

### 3.2 焊缝截面形貌分析

如图 6 所示，在卧式金相显微镜下观察入射角分别在 5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°、50° 下的截面形貌图。从图中可以看出，随着激光入射角的加大，焊缝正面中心与焊缝背面中心的距离呈现先增加后减小的趋势。这是因为随着激光入射角的增加，板间的连接宽度随之增加。但当入射角增加到一定程度时，随着光斑的逐渐加大，而激光功率保持不变，则功率密度逐渐减小<sup>[6]</sup>，从而出现未焊透的情况，导致板间的连接宽度减小。在保证了工件正面

时，背面出现了单边焊和焊缝不连续的缺陷。这是因为随着倾斜的加剧，光斑逐渐变大，而激光功率和焊接速度等参数保持不变，激光功率密度逐渐减小。在保证光束正面对准的前提条件下，则由于入射角的倾斜，光束就不能在焊缝背面对准，甚至出现光束完全落在单边的情况。焊接质量变差且不稳定，当入射角增加到 40° 以上时就会出现单边焊的情况。同时，对比 0° 和 30° 的焊缝形貌可以看出，随着入射角的增大，焊缝的氧化加剧，这是因为在侧吹状态下，角度加大后保护气体不能充分保护远离接头的一段，导致氧化区域增大，图 5 中焊缝附近黄色的部分为氧化区。

对准的情况下，到达背面焊缝处的能量逐渐降低。当入射角大于 40° 时，工件背面处得到的能量就不足以使材料熔化，从而导致出现单边焊的情况。图 6 中，45° 和 50° 情况下，出现了比较严重的单边焊情况。

### 3.3 焊缝力学性能分析

在 WDW-100 微机控制电子万能拉伸试验机上进行拉伸试验，力的加载速度为 2.0 mm/min，由计算机输出机械性能数据。图 7 是不同入射角条件下的接头拉伸强度及最大变形值，从图 7(b) 中可以看出：当焊缝激光入射角小于或等于 40° 时，试件拉伸的断裂处都处于母材区，说明焊接接头的拉伸强度大于母材拉伸强度。而当激光入射角达到 45° 和 50° 时，拉伸试验的断裂处都处于焊缝区，接头的抗拉强度和屈服强度出现突然下降。当入射角度为 50° 时，由于焊缝出现断续、孔洞以及单边焊等缺陷，抗拉强度下降至母材强度的 60% 左右，且在变形只有 1.5 mm 时就发生了断裂。从图 7(b) 不同角度对应的最大拉伸变形可知，激光入射角在 40° 之前对应的变形大，40° 以后对应的变形小，可以推断 45°

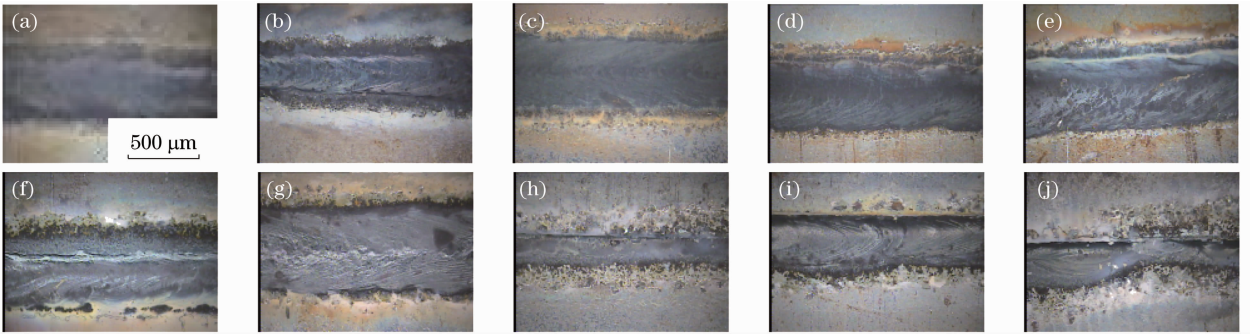


图 5 不同入射角下焊缝背面形貌图。(a) 5°;(b) 10°;(c) 15°;(d) 20°;(e) 25°;(f) 30°;(g) 35°;(h) 40°;(i) 45°;(j) 50°

Fig. 5 Performance of back of bead at different incident angles. (a) 5°;(b) 10°;(c) 15°;(d) 20°;(e) 25°;(f) 30°;(g) 35°;(h) 40°;(i) 45°;(j) 50°

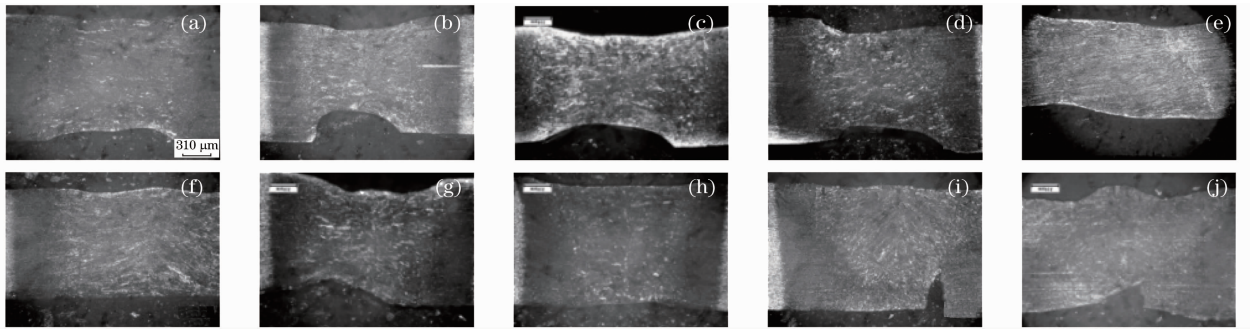


图 6 不同入射角时焊缝截面形状图。(a) 5°;(b) 10°;(c) 15°;(d) 20°;(e) 25°;(f) 30°;(g) 35°;(h) 40°;(i) 45°;(j) 50°

Fig. 6 Section topography at different incident angles. (a) 5°;(b) 10°;(c) 15°;(d) 20°;(e) 25°;(f) 30°;(g) 35°;(h) 40°;(i) 45°;(j) 50°

和 50°对应的断裂形式为脆性断裂,其他为韧性断裂,如图 8 所示。

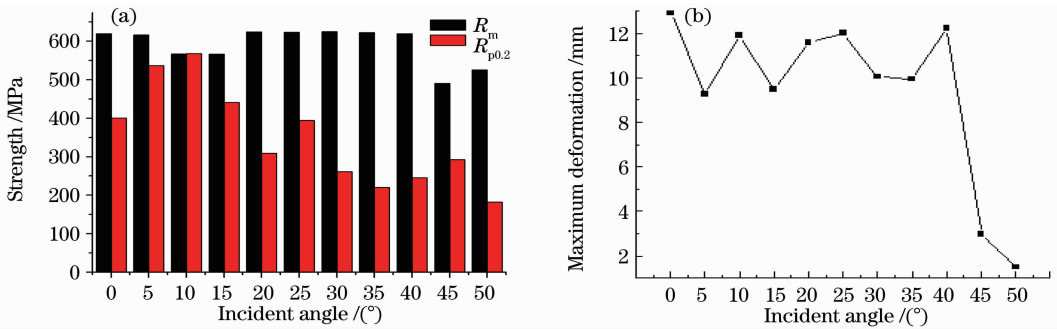


图 7 不同入射角时的(a)拉伸强度及(b)最大拉伸变形

Fig. 7 (a) Strength and (b) maximum deformation at different incident angles



图 8 不同入射角的拉伸断裂图。(a) 5°;(b) 40°;(c) 45°

Fig. 8 Tensile fracture topography at different incident angles. (a) 5°;(b) 40°;(c) 45°

### 3.4 焊缝微观组织分析

利用 MM-6 卧式金相显微镜对激光焊接接头进行显微组织分析。图 9(a)~(d) 分别为母材区、粗晶区、细晶区和焊缝区的金相组织图。从图中可以看出,焊缝组织比较均匀细密,无气孔和裂缝等缺陷,焊缝组织中存在一定数量的贝氏体,并伴有少量魏氏体组织。它们是焊缝金属在中高温转变、连续快速冷却的条件下形成的<sup>[7]</sup>。魏氏体组织的形成是因为焊缝金属在高温区停留时间过长或者冷却速度过快,但是关于魏氏体对接头性能的影响目前存在一定争议,多数认为魏氏体组织降低接头塑韧性,但也有学者认为魏氏体组织不但不降低反而提升钢的

冲击韧性和塑性<sup>[8,9]</sup>。焊缝区有许多大致平行且方向一致的羽毛状和针状组织,这种组织具有较高的硬度和强度及很好的韧性和耐磨性,可应用于非常重要的场合。在母材区,金相组织为铁素体和屈氏体。而在细晶区,金相组织呈现出在铁素体基体上分布着细密的链状合金碳化物颗粒,组织成分与母材类似,但碳化物颗粒明显细小且分布较紧密,这是由于在激光焊接过程中,从熔池区至母材区的温度梯度很大,在接近母材区的细晶区中的碳化物来不及完全熔化,或者熔化后经历了纯化和重结晶,因此金相组织呈现出细晶区的特征。对比不同入射角下的焊缝金相组织,发现其组织无明显差异。

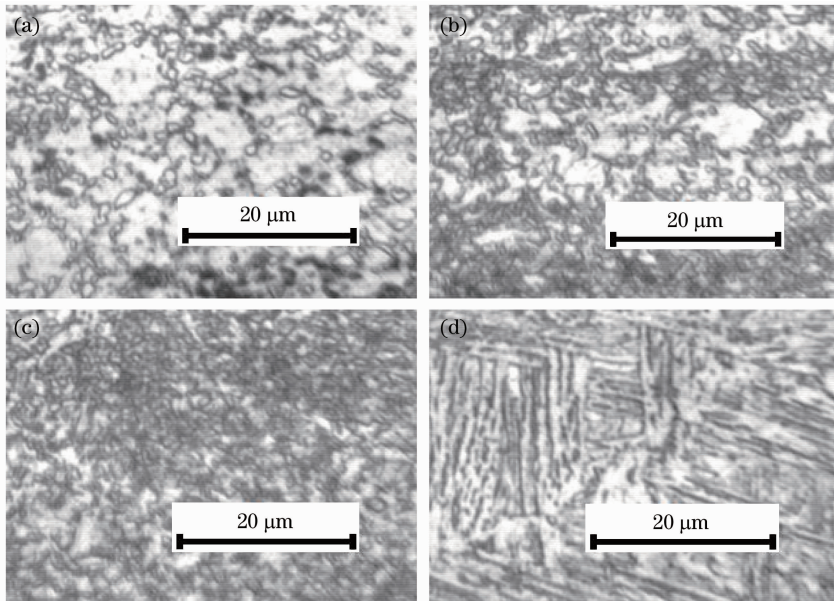


图 9 焊缝各区域金相组织图。(a)母材区;(b)粗晶区;(c)细晶区;(d)焊缝区

Fig. 9 Micro-structure of different zones of bead. (a) Base metal; (b) coarse-grain area; (c) fine-grain area; (d) bead area

## 4 结 论

采用高功率光纤激光对车用高强钢对接头进行焊接时,在对接间隙为 0,激光功率为 2 kW,焊接速度为 20 mm/s,保护气体为 20 L/min,离焦量为 +5 mm 的条件下,只改变激光入射角进行激光对接焊试验。试验结果表明,当入射角小于 40°时,焊缝外观良好,接头处无明显缺陷,焊接接头的拉伸强度屈服强度优于母材。焊缝熔池区主要组织为贝氏体,入射角变化得到的金相组织无明显差异,焊接接头强度高,焊缝组织较均匀细密。

### 参 考 文 献

1 Lifang Mei, Genyu Chen, Xiangzhong Jin *et al.*. Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets

- [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2009, **47**(11): 1117~1124
- 2 N. Farabia, D. L. Chen, J. Lib *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints [J]. *Mater. Sci. & Engng. A*, 2010, **527**(4-5): 1215~1222
- 3 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO<sub>2</sub> laser welding of zinc coated high strength steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1133~1138
- 伍 强, 陈根余, 王 贵 等. 高强度镀锌钢的 CO<sub>2</sub> 激光焊接 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1133~1138
- 4 Chen Genyu, Wang Zujian, Yang Lifang *et al.*. Effect of laser incident angles on welding performance of galvanized sheet for vehicle body [J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(6): 729~732
- 陈根余, 王祖健, 杨丽芳 等. 激光入射角度对车用镀锌板焊接性能的影响 [J]. *激光技术*, 2010, **34**(6): 729~732
- 5 Chen Genyu, Chen Fei, Kang Bin *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603013
- 陈根余, 陈 飞, 康 斌 等. 对接间隙对车用高强钢光纤激光焊接的影响 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603013

- 6 Li Yaling, Huang Jian, Gao Zhiguo *et al.*. Structure and properties of high power laser welding of high strength steel B450LAD for vehicles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2047~2051  
 李亚玲, 黄 坚, 高志国 等. 高功率激光焊接汽车用高强度 B450LAD 组织与性能 [J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 2047~2051
- 7 T. Han, S. S. Park, K. Kim *et al.*. CO<sub>2</sub> laser welding characteristics of 800 MPa class TRIP steel[J]. *ISIJ Int*, 2005, **45**(1): 60~65
- 8 Liu Jiheng, Zhao Ming, Wu Xiuzhen *et al.*. The influence on the mechanical properties of Widmanstatten in ZG25[J]. *Metal Heat Treatment*, 1986, **6**(1): 19  
 刘继恒, 赵 明, 吴秀贞 等. ZG25 钢中魏氏组织对力学性能的影响[J]. 金属热处理学报, 1985, **6**(1): 19
- 9 Liu Jiheng, Zhao Ming, Qian Hanying *et al.*. Widmanstatten F sub-structure and its influence on crack propagation[J]. *Metal Technology*, 1986, **22**(5): A448  
 刘继恒, 赵 明, 钱汉英 等. 魏氏组织 F 的亚结构及其对裂纹扩展的影响[J]. 金属学报, 1986, **22**(5): A448

栏目编辑: 宋梅梅