

激光焊接不等厚异种钢接头组织与性能研究

景财年¹ 范吉超¹ 倪晓梅¹ 李怀学² 刘鹏¹ 张宜生³

¹ 山东建筑大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250101

² 北京航空制造工程研究所, 北京 100084

³ 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 针对汽车用钢的焊接问题,利用光学显微镜、扫描电镜、硬度和拉伸试验研究分析了不等厚异种钢激光拼焊板接头的组织及性能。结果表明,焊缝区为板条马氏体组织,板条之间有残留奥氏体组织存在。熔合区附近的组织结构比较复杂,主要由马氏体和贝氏体构成。而相变诱发塑性(TRIP)钢热影响区组织主要由贝氏体和铁素体组成,且晶粒比较细小,双相钢(DP)接头热影响区中存在显著的马氏体组织,但几乎不存在过热区组织。接头焊缝区的硬度达到母材的 1.6 倍以上,此外接头宏观断裂发生在薄板 DP 钢的母材区。

关键词 激光光学; 激光拼焊; 异种钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0803005

Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joints for Dissimilar Steel with Different Thicknesses

Jing Cainian¹ Fan Jichao¹ Ni Xiaomei¹ Li Huaixue² Liu Peng¹ Zhang Yisheng³

¹ School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China

² Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100084, China

³ State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Aiming at the welding problem of steel used in automobile, the microstructure and property of joints in laser welded tailored sheets for dissimilar steel with different thicknesses are analyzed by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), hardness and tensile test. The results indicate that weld zone are lath martensite, and the laths mixed with retained austenite. Microstructure near the fusion line is more complex, mainly consists of martensite and bainite. Heat affected zone (HAZ) of transformation induced plasticity (TRIP) steel is mainly composed of bainite and ferrite, and the grains are relatively small. There are significant martensite existed in HAZ of dual phase (DP) steel, and the overheated zone is almost non-existent. The hardness in weld zone is more than 1.6 times as the parent metal. Macroscopic fracture of joint occurs in base metal of thinner DP steel sheet.

Key words laser optics; laser tailor-welded; dissimilar steel; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 140.3580; 160.3900

1 引言

目前汽车制造理念向着轻量化、节能环保的方向发展。而越来越多的研究表明^[1-2],汽车自重降低 10%,燃油消耗将能够减少 3%~7%。随着材料科学的不断发展,越来越多的材料被投入到汽车用钢的生产中,其中高强钢的用量正逐渐增加。针对

汽车对安全与环保的要求,在结构或车身的设计上采用高强度钢,使用较薄的钢板就能获得更高的强度,从而减轻车重^[3]。先进高强度钢板中相变诱发塑性钢(TRIP)和双相钢(DP)均具有较高的强度和良好的塑性成形能力,已经在汽车制造领域得到了广泛应用^[4]。而采用先进的激光焊接技术对高强度

收稿日期: 2013-12-16; 收到修改稿日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(51305240)、山东省科技发展计划(2013GGX10306)

作者简介: 范吉超(1989—),男,硕士研究生,主要从事 DP 钢板激光拼焊方面的研究。E-mail: fjc105105@163.com

导师简介: 景财年(1973—),男,博士,副教授,主要从事汽车用高强钢方面的研究。E-mail: jcn55@163.com

钢拼焊连接,不仅能够提高产品质量和生产效率,还可以显著地降低生产成本^[5-6],因此倍受汽车制造界和钢铁工业界的关注,是未来高强度钢板拼焊连接技术重要的发展方向。

TRIP 钢板的生产是采用临界区等温淬火的热处理工艺,得到铁素体、贝氏体和残留奥氏体的复相组织。铁素体为基体,确保了钢材具有良好的塑性;贝氏体和残留奥氏体的存在能保证钢材的强度^[7]。当钢板受到外加应力作用时,应力集中区域的残留奥氏体产生相变诱发转变为马氏体,提高钢板的塑性和强度^[8]。DP 钢是新开发的一类先进高强度钢,由低碳钢经控制轧制得到,主要是马氏体和铁素体基体组织,马氏体呈块状或岛屿状分布。其加工硬化率高、屈服比低,并且能够连续屈服,具有优良的冲压和成形性能^[9-10]。激光焊接技术具有焊接速度快、生产效率高、热输入小、焊接变形小等优点^[11],可以将不同厚度、不同材质或不同强度的板材焊接在一起,然后一次成形^[12-13],既节省了材料,又减少了成本。很多学者对于异种拼焊板冲压成形进行了有关研究,但对焊接过程组织变化及其力学性能研究较少。

本文利用激光拼焊技术,对先进高强度 TRIP590 和 DP780 钢板进行焊接,着重研究焊接接头的微观组织结构及力学性能,旨在为高强度钢拼焊板在汽车领域的应用提供重要的试验与理论基础。

2 试验方法

试验中采用光纤传输的 Nd:YAG 固体激光器,

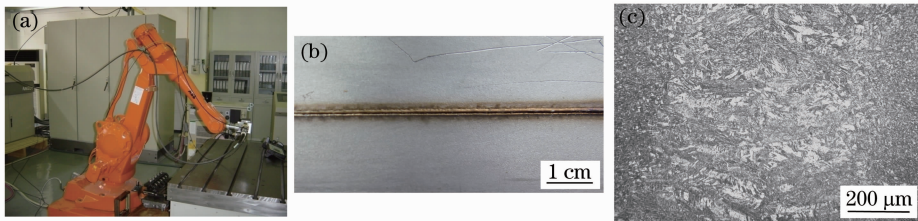


图1 焊接设备及焊缝形貌。(a) 焊接设备;(b) 焊缝表面;(c) 焊缝截面

Fig. 1 Welding equipment and morphology of weld zone. (a) Welding equipment; (b) joint surface; (c) joint section

3.2 焊缝区组织分析

图2为拼焊板焊缝区显微组织结构,接头焊缝区为典型的板条马氏体组织。激光焊接时,激光束投射在钢板材料表面,部分能量被反射,部分被吸收,在到达材料表面的光能中,被吸收的能量通过热传导向内部扩散。光能以电子和原子的振动激发形式被吸收,并转化为热能,扩散至临近原子。随着吸收的光子越来越多,材料的温度不断升高,该过程可引发连锁反

型号为德国 Trumpf Hass Laser 公司生产的 Trumpf HL3006D 型连续激光器,如图 1(a)所示。试验母材为宝钢集团生产的 TRIP590 和 DP780 薄钢板材,二者同属于低碳低硅钢,厚度分别为 1.5 mm 和 1 mm。采用自制的夹具固定工件,平面对接焊接方式,对接焊缝焊前的间隙小于 0.10 mm,为减少激光焊接缺陷,焊前用丙酮清洗焊接部位。激光光束沿试样表面的法线方向,焦距为 150 mm,保护气体为氩气,气体流量为 20 L/min。激光焊接功率为 2800 W,离焦量为 0 mm,焊接速度为 3~7 m/min。

利用线切割取 8 mm×4 mm 试样,热镶嵌后保留焊缝截面作为试验面,试样磨抛后用质量分数为 4% 的 HNO₃ 乙醇溶液腐蚀。采用金相显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对接头焊缝、熔合区及热影响区的显微组织结构进行观察和分析;采用 HVS-1000 维氏硬度计对接头的显微硬度分布进行测试,试验载荷为 300 g,加载时间为 15 s;采用 WDW-200E 型万能试验机进行拉伸试验,试验中拉伸加载速度为 2 mm/min,拉伸方向垂直于焊缝。

3 结果与讨论

3.1 焊接接头形貌

图 1(b)为焊缝表面照片。不同焊接速度下产生的焊缝形貌不同,焊接速度低时焊缝较宽,热影响区大;焊接速度过高时,焊缝宽度窄,焊接质量降低;当焊接速度为 5 m/min 时,焊缝宽度适中,表面平整光滑,如图 1(b)所示。图 1(c)所示为焊缝截面照片,中间脊为焊缝中心,焊缝宽度为 0.8~1 mm。

应,使温度在毫秒时间内急剧升高。钢板材料产生蒸发并形成小孔,小孔几乎吸收全部的入射光束能量,使包围着这个小孔四周的金属熔化,小孔内充满在光束照射下材料连续蒸发产生的高温蒸气,小孔四壁包围着熔融金属。随着光束的移动,小孔始终处于流动的稳定状态。熔融金属充填着小孔移开后留下的空隙并随之冷凝,形成焊缝。焊缝金属运动状态下结晶。此时,由于焊缝熔池小,冷却速度快,焊缝金属在

熔池壁与母材连接处形核长大,形成柱状奥氏体组织。随后焊缝经历一个快速冷却过程,冷却速度远远大于马氏体的形成速度,碳原子来不及扩散,奥氏体

发生无扩散性马氏体转变。而由于采用激光非填丝熔化焊接,相当于基体组织发生淬火,进而易形成低碳的板条马氏体组织(如图2所示)。

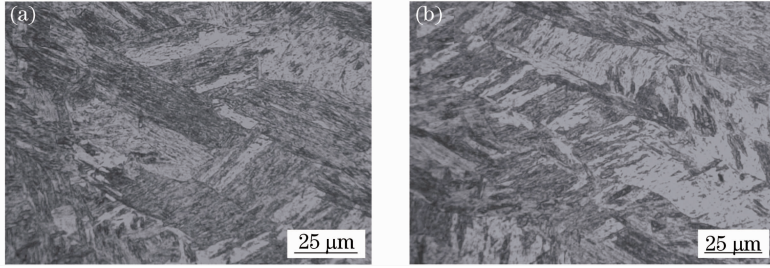


图2 拼焊板焊缝光镜下的显微组织。(a) TRIP 钢;(b) DP 钢

Fig.2 Microstructure of laser welded tailored sheets in optical microscope (OM). (a) Transformation induced plasticity (TRIP) steel; (b) dual phase (DP) steel

图3为焊缝区在扫描电镜下的组织结构,马氏体形态也呈现出相同的板条结构,且马氏体板条的宽度和长度相差不大,板条之间都存在有奥氏体薄层,这主要与两种母材相近的化学成分以及焊缝熔池经历相同的焊接热循环过程有关。TRIP590 钢

和 DP780 钢同为低硅低碳高强度钢,由于焊接熔池小,焊缝区金属在焊接热循环作用下经历了相同的高温熔化和快速冷却过程,并且焊缝熔池在经历高温过程中成分更加均匀,因此在快速冷却之后焊缝形态基本相同。

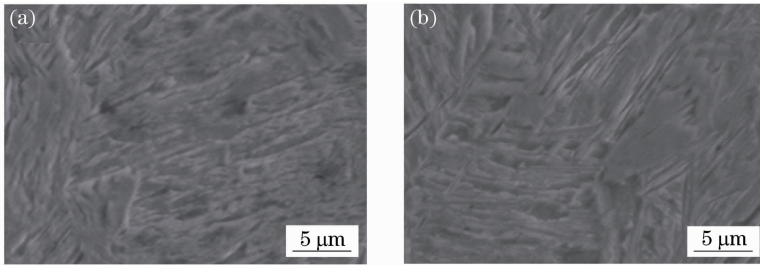


图3 拼焊板焊缝扫描电镜下的微观组织。(a) TRIP 钢;(b) DP 钢

Fig.3 Microstructure of laser welded tailored sheets in scanning electron microscope (SEM).

(a) TRIP steel;(b) DP steel

3.3 热影响区组织分析

热影响区(HAZ)是焊接接头的薄弱区域,对于激光拼焊板的热影响区,没有普通焊接方法焊后会出现的典型的四大区域^[14],其中过热区几乎不存在,而且热影响区晶粒细小,生成的组织也较致密。

3.3.1 熔合线组织

由于激光焊缝小,熔池较窄,在接头结构中熔合区基本呈现一条线,可称之为熔合线。此处微观结

构十分复杂,焊缝与母材的不规则结合,形成了参差不齐的分界面。由于两种母材厚度不同,散热速度不同,薄板一侧(DP 钢)热影响区宽度大于厚板一侧(TRIP 钢),图4所示为熔合区的精细组织结构。显然,熔合区组织均由马氏体与贝氏体构成,马氏体与贝氏体之间夹有奥氏体薄层,并且 TRIP 钢熔合线处[图4(a)]贝氏体含量高,DP 钢熔合线处[图4

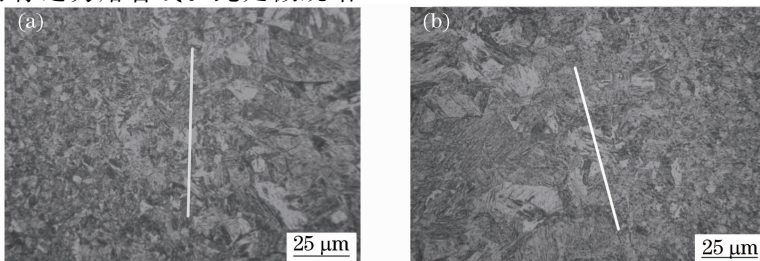


图4 熔合线显微组织。(a) TRIP 钢;(b) DP 钢

Fig.4 Microstructure of fusion line. (a) TRIP steel; (b) DP steel

(b) 马氏体含量高,这主要与焊缝两侧冷却速度和母材成分有关。厚板 TRIP 钢在相同热输入的条件下,高温停留时间相对要长,又由于熔合区的热循环峰值温度在 1100 ℃ 以上,奥氏体化的晶粒在加热与冷却过程中都在不断长大,碳原子在小的范围内扩散富集,结合 Mn、Al 等碳化物元素的作用,促进了贝氏体非均匀形核。薄板 DP 钢冷却速度快,能产生更高的过冷度,促使碳含量更低的组织易转化为马氏体,导致了马氏体的体积分数较高。

3.3.2 热影响区组织

图 5 所示是焊缝两侧热影响区在扫描电镜下的形貌,图 5(a)是 TRIP 钢一侧,主要由贝氏体和铁素体组成,且在贝氏体与铁素体晶界上分布着一定量的残留奥氏体。激光焊接热源集中、加热速度快,热

循环温度使熔合线附近的母材组织全部奥氏体化,但整个热影响区内的金属并未全部转变成奥氏体。形成奥氏体和铁素体的高温组织,在加热冷却过程中,碳原子在较小的奥氏体范围内扩散,随后连续冷却促进奥氏体转变为贝氏体。图 5(b)是 DP 钢一侧,主要为贝氏体、马氏体和铁素体,在贝氏体与铁素体晶界上同样分布着少量的残留奥氏体。薄板散热速度快,热影响区中的奥氏体晶粒在高温停留时间短,晶粒来不及长大,碳原子来不及扩散,形成均匀细小的奥氏体晶粒,在随后的快速冷却过程中奥氏体发生马氏体转变,形成的马氏体板条尺寸较小,分布均匀。其中部分奥氏体在碳原子的作用下转变成贝氏体,最终形成了室温条件下的热影响区组织。

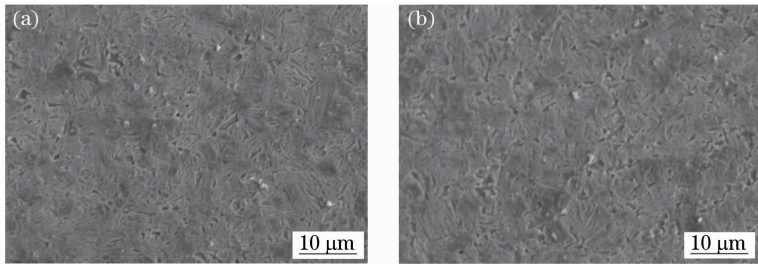


图 5 焊缝两侧热影响区组织。(a) TRIP 钢;(b) DP 钢

Fig. 5 Microstructure of heat affected zone (HAZ) on both sides of weld. (a) TRIP steel; (b) DP steel

激光焊接热量集中、焊缝熔池小、冷却速度快,焊缝区金属经历急速的加热和冷却,最终形成室温下的板条马氏体组织,焊接参数的变化主要对热影响区产生影响。如图 6 所示,焊接速度低时,贝氏体含量较高,晶粒粗大,主要是由于热输入量大,焊接熔池的高温停留时间长,有利于碳原子在较小的奥氏体范围内扩散富集,随后以碳化物形式析出形成

粒状贝氏体组织。随着焊接速度的提高,热影响区组织逐渐细化,且马氏体逐渐增多,贝氏体减少,主要原因是由于过冷度大,晶粒来不及长大以及碳原子来不及扩散,促进了细小马氏体的形成,并且在热影响区固态相变过程中,马氏体形成和热循环过程限制了奥氏体晶粒的长大,从而避免了粗大板条马氏体的形成。

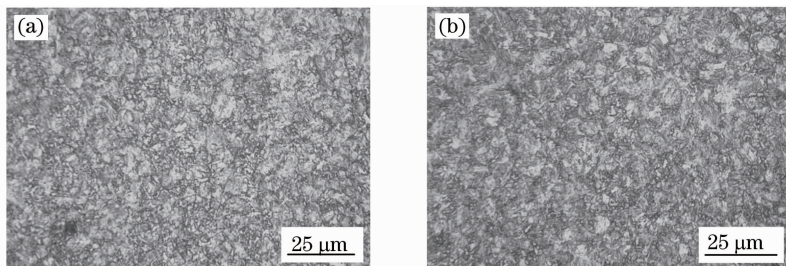


图 6 不同焊速下的 HAZ 组织结构。(a) 3 m/min; (b) 5 m/min

Fig. 6 Microstructure of HAZ in different welding speeds. (a) 3 m/min; (b) 5 m/min

3.4 DP 钢热影响区的软化区

软化区位于 DP 钢热影响区中靠近母材的一侧^[15],只有母材焊前经过冷加工变形才会形成软化区。图 7(a)为软化区的微观组织,由粗大的和细小的铁素体、回火马氏体以及贝氏体铁素体构成。该

区只有一部分组织发生了相变重结晶过程,另一部分组织在 150 ℃~250 ℃ 时发生回火,生成回火马氏体,而始终未溶入奥氏体的铁素体在经历热循环时会发生长大,变成较粗大的铁素体,因而冷却后的组织由发生相变的细小组织和未发生相变的粗大组

织组成。由扫描电镜下组织结构[图 7(b)]也可以看出部分铁素体体积较大,并伴有粒状贝氏体铁素体。此区硬质相减少,内应力消减,强度与硬度略有

降低,但塑性会有所增加。软化区的宽度与焊接速度有关,随着焊接速度增加,软化区变窄,软化程度将减弱。

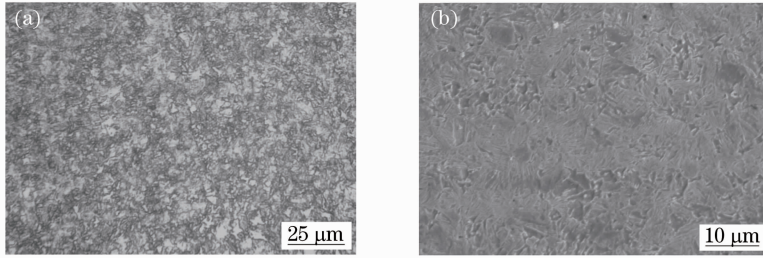


图 7 DP 钢软化区。(a) 光镜下的组织;(b) 电镜下的组织

Fig. 7 Soft zone of DP steel. (a) Microstructure in OM; (b) microstructure in SEM

3.5 拼焊板接头的力学性能

图 8 所示为焊接接头的显微硬度分布曲线,最高硬度值出现在焊缝处,主要是因为焊缝处存在大量的板条马氏体。焊缝与热影响区硬度都高于母材,并且焊缝的硬度值均为母材的 1.6 倍以上,最高硬度为 389 HV,焊缝区宽度约 1 mm。焊缝中心两侧硬度不成轴对称分布,从焊缝到母材两侧硬度逐渐下降,最终达到原始母材的硬度。由此可见,硬度分布规律与焊接接头的显微组织的变化相一致。此外,TRIP 钢母材硬度略高于 DP 钢母材,DP 钢热影响区内的软化区显微硬度下降很小,约为母材的 1%。由于两种母材热影响区主要是铁素体与马氏体或贝氏体,且越靠近母材马氏体与贝氏体含量越少,所以导致硬度不断下降。接头硬度始终高于母材,在硬度性能方面,焊接参数变化对拼焊板的实际应用不会产生影响。

光焊接时,热影响区很窄,DP 钢软化区的软化程度小,并没有影响接头整体的抗拉强度。同时由于板厚差的存在,薄厚两侧的应力分布不均匀,并且 TRIP 钢在拉伸过程中产生相变诱发塑性转变,残留奥氏体转变成马氏体,强度与塑性提高,大应力集中在薄板钢材一侧,造成应力集中,宏观断裂发生在薄侧。综上所述,拼焊板在汽车上的应用不会降低整车的安全性,并且会由于拼焊板的大量应用会带来更大的经济与社会效益。

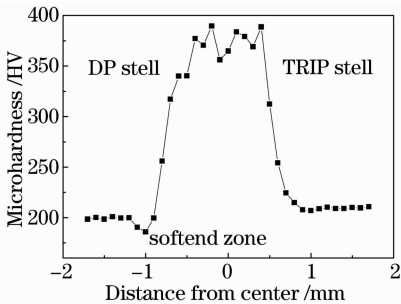


图 8 接头显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution of joint

对焊接试样按照 GB/T228-2002 标准进行薄板单向拉伸试验,利用线切割取样,对不同速度下的焊接试样进行拉伸。图 9 为拉伸试验断裂照片,接头均断裂于 DP 钢母材区,说明焊接接头的抗拉强度高于两侧母材。图 10 为拉伸试验数据,垂直焊接方向拉伸时,焊接速度对接头抗拉强度影响不大。激

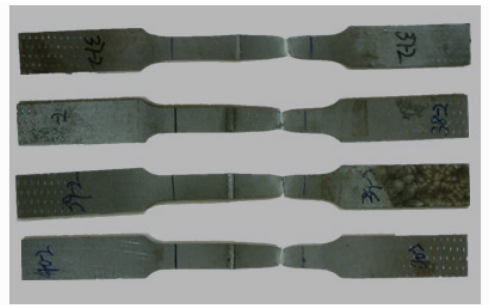


图 9 试样拉伸试验断裂后照片

Fig. 9 Breakage photo of samples after tensile test

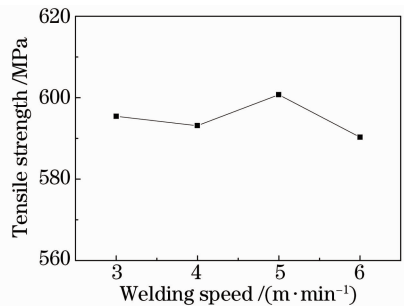


图 10 不同焊接速度下的抗拉强度

Fig. 10 Tensile strength in different welding speeds

4 结 论

1) 焊缝区组织在光学显微镜与扫描电镜下均

显示板条马氏体结构,且板条的宽度和长度相差不大;熔合线处组织主要由马氏体与贝氏体构成,其体积分数的变化取决于焊缝冷却速度;工艺参数变化对接头力学性能的影响不大。

2) 热影响区 TRIP 钢一侧主要由贝氏体和铁素体组成,且晶粒比较细小,在贝氏体与铁素体晶界上分布着少量的残留奥氏体,DP 钢一侧存在部分的马氏体组织,几乎不存在过热区;DP 钢软化区硬质相减少,主要由铁素体与回火马氏体组成。

3) 硬度最高值出现在焊缝,焊缝区硬度均为母材的 1.6 倍以上,主要是因为焊缝存在大量的板条马氏体。DP 钢软化区硬度值下降,但不影响焊缝的强度,单向拉伸试验宏观断裂发生在薄板 DP 钢母材区。

参 考 文 献

- Ahmed E, Reisgen U, Schleser M, *et al.*. On formability of tailor laser welded blanks of DP/TRIP steel sheets[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(5): 337-342.
- Bettaieb M B, Lemoine X, Bouaziz O, *et al.*. Numerical modeling of damage evolution of DP steels on the basis of X-ray tomography measurements[J]. *Mechanics of Materials*, 2011, 43(3): 139-156.
- Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1680-1685.
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1680-1685.
- Huh H, Kim S B, Song J H, *et al.*. Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(5): 918-931.
- Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie, *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(2): 261-268.
- 虞 钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 261-268.
- Reisgen U, Schleser M, Mokrov O, *et al.*. Statistical modeling of laser welding of DP/TRIP steel sheets[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 92-101.
- Reisgen U, Schleser M, Mokrov O, *et al.*. Uni- and bi-axial deformation behavior of laser welded advanced high strength steel sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(15): 2188-2196.
- Kim J, Chung K H, Lee W, *et al.*. Numerical evaluation of hydro-formed DP-steel tubes on crash-performance with welding heat effects[J]. *Materials Transactions*, 2012, 53(5): 812-819.
- Mukherjee M, Chintla A R, Raj A, *et al.*. Effect of short duration tempering on the microstructure and mechanical properties of a continuously annealed dual phase steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 28(8): 971-979.
- Miles M P, Ridges C S, Hovanski Y, *et al.*. Impact of tool wear on joint strength in friction stir spot welding of DP 980 steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(7): 642-647.
- Imlau J, Bleck W, Zaefferer S, *et al.*. Comparison of damage development depending on the local microstructure in low alloyed Al-TRIP-steels, IF steel and a DP steel[J]. *International Journal of Materials Research*, 2009, 100(4): 584-593.
- Piccini J, Svoboda H. Effect of the plasma arc welding procedure on mechanical properties of DP700 steel[J]. *Procedia Materials Science*, 2012, 1: 50-57.
- Al-Abbaso F M, Nemes J A. Characterizing DP-steels using micromechanical modeling of cells[J]. *Computational Materials Science*, 2007, 39(2): 402-415.
- Qu J, Dabboussi W, Nemes J, *et al.*. Effect of microstructure and chemical composition on dynamic factor of high strength steels[J]. *Materials Science and Technology*, 2008, 24(8): 957-963.
- Tsipouridis P, Koll L, Kremaszky C, *et al.*. On the strength of grain and phase boundaries in ferritic-martensitic dual-phase steels[J]. *International Journal of Materials Research*, 2011, 102(6): 674-686.

栏目编辑:张浩佳