

车用双相钢激光焊接接头组织性能研究

董丹阳 王观军 马 敏 姜 涛

(东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要 为提高汽车车身用双相(DP)钢焊接构件在动态载荷下应用的可靠性,利用脉冲 Nd:YAG 激光器,对 DP600 进行激光对接焊,利用光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度计、材料拉伸试验机等分析测试手段,研究了焊接接头的显微组织和高应变速率下的拉伸性能。结果表明,在合适的脉冲激光焊接参数下,DP600 钢板可获得成形均匀的激光深熔焊缝。焊接接头的焊缝区(WZ)主要为马氏体组织,硬度高于母材;热影响区(HAZ)较窄但存在马氏体回火软化现象。焊接接头力学性能对应变速率较为敏感,随应变速率的增加,屈服强度和抗拉强度增加,而塑性均小于母材。不同应变速率下 DP600 对接焊拉伸断口均为韧窝形貌,呈典型的韧性断裂特征。

关键词 激光技术;激光焊接;双相钢;力学性能;应变速率

中图分类号 TG456.7;TG407 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0903002

Study on Microstructure and Properties of Laser Welding Dual Phase Steel Joints for an Auto-Body

Dong Danyang Wang Guanjun Ma Min Jiang Tao

(College of Science, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract It is imperative to increase the service reliability of the laser welding dual phase (DP) steel joints for an auto-body which are subjected to dynamic loading during their manufacturing processes, as well as in an accident. Laser butt welding of DP600 is performed by using a pulsed Nd:YAG laser. Microstructures of the welding joints are analyzed. Microhardness and mechanical properties at various strain rates of the welding joints are tested. The results show that welds with good appearance can be obtained under the proper welding conditions. The microstructure of weld zone (WZ) is mainly martensite, and the microhardness is higher than that of base metal. And the heat affected zone (HAZ) is narrow, and there exists HAZ softening that occurs in welding because of the tempering of the martensite phase. The mechanical property of the DP600 welding joint is sensitive to the strain rates. After welding, the yield and tensile strength of DP600 increase as the strain rate increases, while the fracture elongations are all lower than that of the base metal. All tensile fracture of DP600 welding joints are typical ductile fracture characterized by dimples at various strain rates ranging from 10^{-3} to 10^3 s⁻¹.

Key words laser technique; laser welding; dual phase steel; mechanical properties; strain rate

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390; 160.3900

1 引 言

当前,在全球面临能源匮乏和环境污染的严重形势下,汽车轻量化已成为汽车发展的主要方向。而采用先进高强度钢板是在保证汽车安全性前提下实现汽车轻量化的最有效途径^[1,2]。双相(DP)钢因具有良好的强度与塑性匹配、高的加工硬化率、优异

的成型性等优点而广泛用于汽车车身制造和零部件的生产^[3]。

汽车车身构件通过焊接的方式进行连接,与传统的焊接方法相比,激光焊接具有生产效率高、焊接质量好和易实现自动控制的特点,已被越来越多的汽车厂商用于焊接汽车车身关键部位以及对工艺有

收稿日期: 2012-04-09; **收到修改稿日期**: 2012-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51101029)、高等学校博士学科点专项科研基金新教师类(20110042120025)和东北大学本科业务费青年教师科研创新基金(N110405004)资助课题。

作者简介: 董丹阳(1979—),女,博士,讲师,主要从事激光作用下金属材料组织与性能控制等方面的研究。

E-mail: dongdanyang@mail.neu.edu.cn

特殊要求的部位^[4~6]。

汽车焊接构件作为汽车车身结构的重要组成部分在冲压成形及碰撞过程中不可避免地要承受动态载荷的作用,应变速率在 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ ^[7]。DP 钢在变形过程中表现出明显的应变速率相关性,使得其在动态载荷下的材料强度和塑性变形与静载条件时存在较大差异^[8~10]。因此为确保汽车车身用 DP 钢焊接构件在动态载荷或外加冲击载荷结构上应用的可靠性,研究其焊接接头在动态载荷下的力学行为显得尤为重要。激光焊接后组织的演变对其力学性能的影响已有部分研究,多集中在静态和准静态载荷下的力学性能测试方面^[11~13],而对动态载荷(高应变速率)下 DP 钢焊接接头的变形行为和断裂

机制研究的较少,因此本文采用脉冲激光对车用 DP600 钢板进行对接焊试验,对焊接接头组织、显微硬度分布以及不同应变速率下的力学行为进行了研究。该研究结果对于加快我国以“节能减排和保障驾乘安全”为标志的新一代汽车用先进高强钢的发展和具有重要的促进作用。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为 0.7 mm 厚的 DP600 钢板,化学成分如表 1 所示。原始组织(图 1)为铁素体(F)基体上分布着岛状马氏体(M)组织,马氏体质量分数约为 15.4%,显微硬度为 200 HV。

表 1 DP600 钢板的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of DP600 (mass fraction, %)

Grade	C	Mn	Si	Al	Mo	Cr	S	P	Fe
DP600	0.061	1.400	0.890	0.032	0.021	0.026	0.003	0.012	Bal.

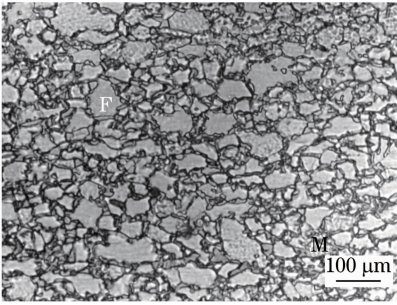


图 1 DP600 原始组织

Fig. 1 Microstructure of DP600 as-received

2.2 激光焊接

选用 JHM-1GY-400 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器进行激光焊接试验,脉冲激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。选用平板对接深熔焊形式,将 DP600 钢板加工成

65 mm×45 mm 的试样,将待焊试样对接面打磨平整,保证精确、均匀的对接间隙。焊接前用丙酮和乙醇溶液清洗焊接部位,避免油污影响焊接质量。将焊接试样在激光器工装台上用自制焊接夹具装配好,保证焊接板材紧密对接放置。焊接过程选用纯度为 99.99% 的氩气作为保护气,侧吹方向与焊接方向相反,气体喷嘴与试板夹角为 50° ,气体流量为 5 L/min。在激光器焦距为 100 mm 的情况下选取不同的离焦量、脉宽、脉冲频率、焊接速度和焊接电流等工艺参数进行对接焊试验,通过观察 0.7 mm 厚的 DP600 钢板激光对接焊缝的表面形貌和横截面形貌,获得焊缝成形均匀的深熔焊接工艺参数,如表 2 所示。

表 2 激光焊接参数

Table 2 Laser welding parameters

Defocus	Pulse width	Pulse frequency	Welding speed	Welding current	Single pulse energy
$\Delta f / \text{mm}$	t / ms	f / Hz	$v / (\text{mm/s})$	I / A	$E / (\text{J/pulse})$
15	3.0	14	1.5	300	4.82

2.3 力学性能测试

利用 Wilson Wdper 401MVD 显微硬度计测量 DP600 焊接试样横截面的硬度,使用载荷为 50 g,加载时间为 10 s。

利用 MTS 810 材料试验机和 Zwick HTM 5020 高速试验机分别进行室温准静态和动态载荷下的拉伸试验,焊接后对焊接接头样品上下表面进行机械研磨,并控制样品厚度为 0.5 mm。参照 ISO

26203-1 标准和高速试验机夹具的具体要求,利用线切割将焊接接头样品加工成图 2 所示的拉伸样品,选择不同应变速率($10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$)对焊接试样进行拉伸变形,每个应变速率选取 3 个平行试样,对载荷和应变进行同步采集,采样频率为 1 MHz。利用 OLYMPUS SZ61 型测量显微镜(测量精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$)分别测定拉伸变形后焊缝样品平行段两部分的长度,并计算断后延伸率。

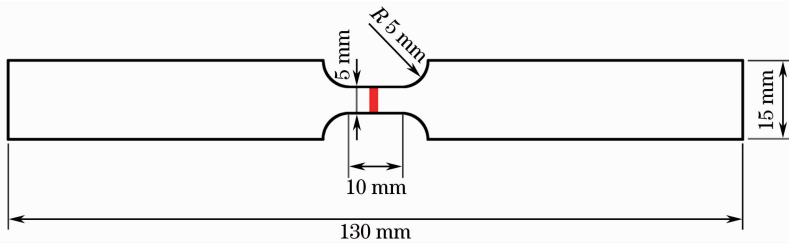


图 2 DP600 激光对接焊接接头拉伸试样尺寸

Fig. 2 Schematic illustration of tensile testing specimen of laser welding DP600

2.4 显微组织与断口形貌观察

利用 OLYMPUS GX71 型光学显微镜(OM)和 JEOL JSM-6510A 型扫描电子显微镜(SEM)观察 DP600 原始组织、焊接接头横截面的显微组织和不同应变速率下的拉伸断口形貌。

3 结果与分析

3.1 焊缝表面形貌及显微组织

优化焊接参数下制备的 DP600 焊缝质量如图 3(a)所示,可见焊缝成形均匀。焊接试样变形

小,未发现气孔、飞溅和裂纹等缺陷。图 3(b)为 DP600 焊接接头组织的低倍金相照片。由图可见,在优化的激光焊接工艺条件下,熔池呈典型的倒梯形,实现了熔透焊,没有明显的气孔等缺陷,焊接质量良好。由于没有填充焊丝或由于焊接过程温度稍高使焊缝材料略有气化现象,焊缝表面出现凹陷。

图 4(a)是 DP600 对接焊接头的 SEM 形貌。可见,焊接接头由焊缝区(WZ)、热影响区(HAZ)和热影响区附近母材(BM)区组成。

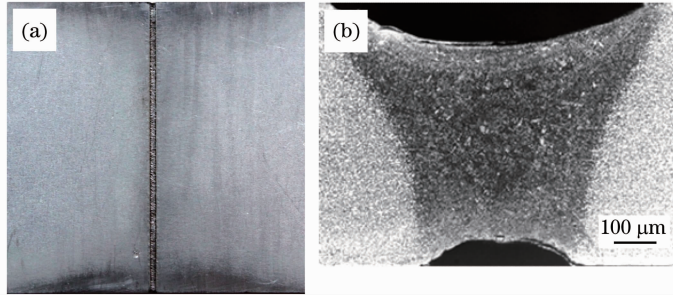


图 3 激光焊接 DP600 接头形貌。(a)表面;(b)截面

Fig. 3 Macromorphology of laser welding joint of DP600. (a) Surface; (b) cross-section

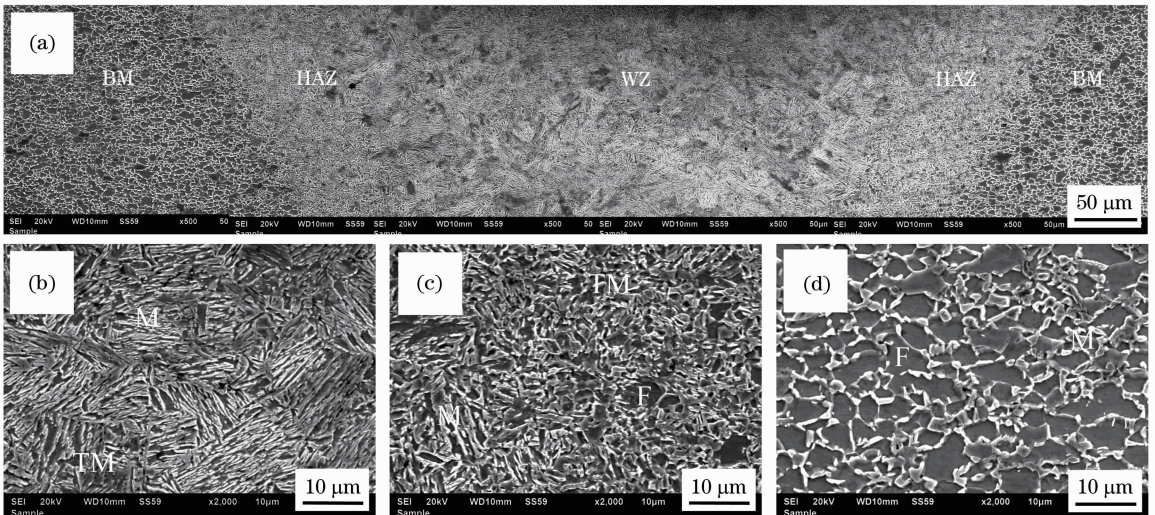


图 4 DP600 焊接接头 SEM 显微组织。(a)焊接接头;(b)焊缝区;(c)热影响区;(d)母材

Fig. 4 SEM microstructure of laser welding joint of DP600. (a) Welding joint; (b) WZ; (c) HAZ; (d) BM

焊接过程中的快速加热和冷却,使焊接接头各区域组织变化很大。焊缝区主要为马氏体组织,还有部分回火马氏体(TM)组织,如图4(b)所示。焊接过程冷却速度较低,造成部分马氏体产生回火,形成回火马氏体(铁素体板条和碳化物)。

热影响区受焊接热循环的影响,焊缝两侧距焊缝不同距离的位置,其加热和冷却过程都不相同,造成其各点的组织和性能都是不均匀的。在优化的焊接参数下,0.7 mm厚的DP600对接焊热影响区的宽度约为90 μm。从图4(c)中可见,热影响区靠近焊缝区一侧,冷却速度较快,由少量马氏体和铁素体组成,其中靠近焊缝区处马氏体较多,而靠近热影响区外侧则铁素体较多。仔细观察,除了马氏体和铁素体组织之外,还有部分的回火马氏体。

距焊缝较远的母材部分未受到热的影响,没有组织和性能的变化,仍为马氏体和铁素体组织,如图4(d)所示。

3.2 焊接接头力学性能

3.2.1 焊接接头显微硬度分布

图5是距离焊接试样表面180 μm左右的截面硬度分布曲线,可见,整个接头的硬度分布不均匀,存在焊缝区硬化和热影响区软化两个明显特征。

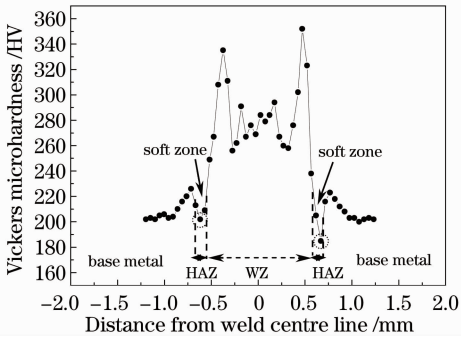


图5 DP600焊接试样截面硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution of laser welding joint of DP600

由于焊接过程中熔池急速冷却形成的马氏体的存在导致了焊接接头焊缝区的硬度大幅上升,最高可达母材(200 HV)的1.7倍,在本文激光焊接参数下,焊缝区除了有马氏体组织外,还有部分回火马氏体,导致了焊缝中央出现了硬度降低现象,但此区域硬度仍高于母材。焊缝区硬度出现的折线式变化是由于焊缝元素和组织的不均匀性而导致的。

在热影响区外侧靠近母材的区域,其硬度较母材低,主要是焊接试样原有的马氏体相在焊接热循

环作用下发生回火软化而导致的。虽然激光焊接具有单位热输入量少、焊接热影响区小、接头焊接强度高优点,但其仍会在焊缝位置产生局部组织变化,对焊接接头的强韧性产生影响,特别是这种软化区的存在,对焊接接头的力学性能将产生不利影响,成为DP钢焊接接头的薄弱部位,导致接头整体在该位置产生局部塑性应变累积,影响DP钢焊接构件的静态拉伸性能^[11~13]、成形性能^[14]和疲劳性能^[15]。

3.2.2 焊接接头拉伸性能

选取7个不同的应变速率(10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 、 10^0 、 10^1 、 10^2 和 10^3 s⁻¹)对接头成形性较好的焊接试样进行了室温准静态拉伸和动态拉伸试验,以获得不同应变速率条件下DP600焊接试样拉伸性能的变化规律。拉伸断口的宏观形貌如图6所示,不同应变速率下的焊接接头,均垂直拉伸轴向,沿焊缝熔合中心线发生断裂。

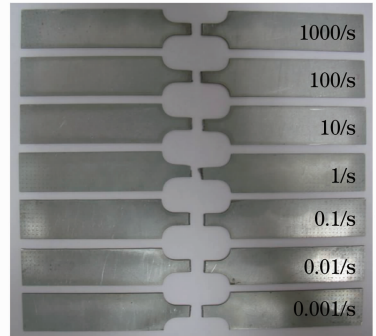


图6 不同应变速率下焊接试样拉伸断口宏观形貌
Fig. 6 Macromorphology of tensile fracture of laser welding joint of DP600 at various strain rates

试验获得不同应变速率下DP600焊接试样的拉伸应力-应变曲线,从中得到不同应变速率下屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 和断裂延伸率 δ 等拉伸性能指标,如图7所示。

可见,随着应变速率的增加,焊接试样的屈服强度和抗拉强度均呈上升趋势。而焊接试样的延伸率随应变速率的增加,呈现先下降,后上升再基本不变的趋势。具体而言,当应变速率处于 $10^{-3} \sim 10^0$ s⁻¹的范围内时,随应变速率增加,焊接试样的延伸率逐渐下降;当应变速率大于 10^0 s⁻¹后,延伸率开始升高;当应变速率达到 10^1 s⁻¹之后,材料延伸率随应变速率继续增加而变化很小。但在所有测试的应变速率范围内,焊接构件的延伸率均小于母材准静态(10^{-3} s⁻¹)拉伸时的断裂延伸率(40.5%^[16]),说明焊接后试样的塑性明显下降。

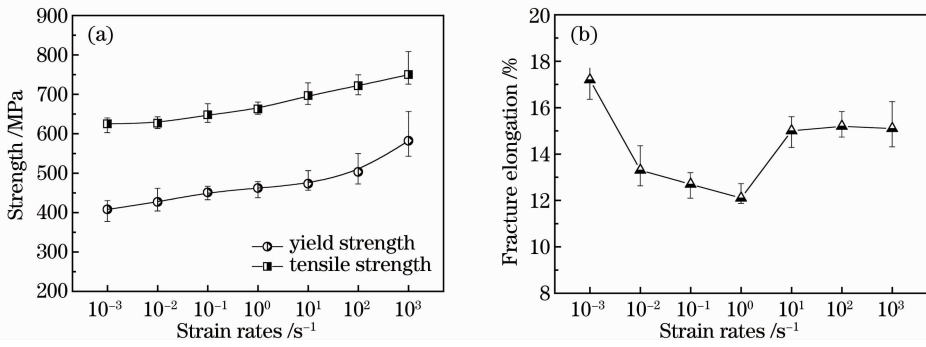


图 7 DP600 焊接试样拉伸性能随应变速率的变化。(a)屈服强度和抗拉强度;(b)断裂延伸率

Fig. 7 Variation of tensile properties of laser welding joint of DP600 at various strain rates.

(a) Yield strength and tensile strength; (b) fracture elongation

3.2.3 焊接接头力学行为及断裂机制

利用 SEM 对 7 组不同应变速率条件下试样的拉伸断口形貌进行观察,图 8 分别为 DP600 焊接试样室温拉伸断口显微形貌特征,可见不同应变速率下拉伸断口均为韧窝形貌,为典型的韧性断口,可见应变速率未改变 DP 钢拉伸试样的微观断裂机制。

应变速率较低时(10⁻³~10⁰ s⁻¹),断口韧窝较深,尺寸不均匀,表明低应变速率时,焊接试样局部塑性变形能力较强;随应变速率的继续增加,断口表面韧窝尺寸减小、数量增多,且韧窝分布均匀,这说明随应变速率的增加,焊缝位置的塑性变形协调能力降低,微孔生成及联通形成裂纹的速度加快^[17]。

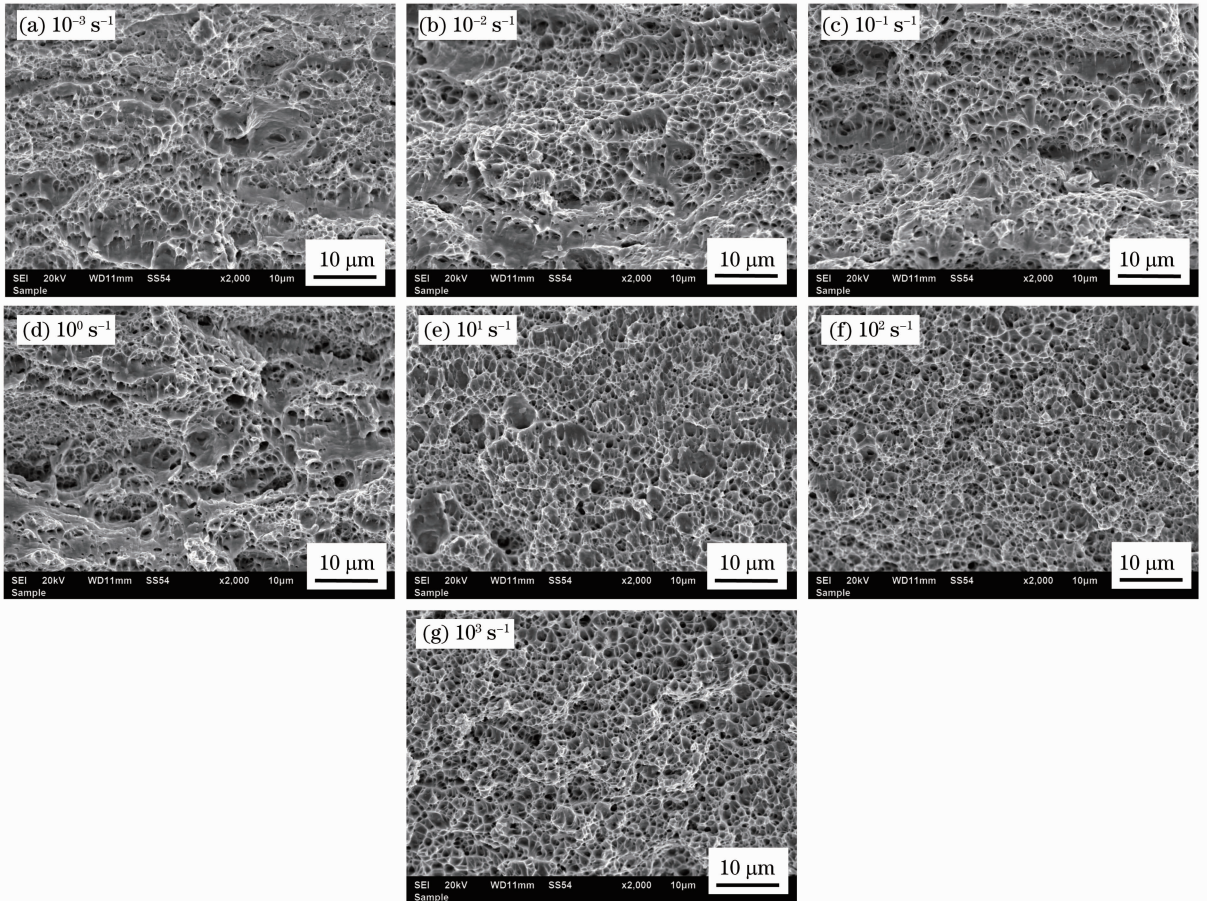


图 8 不同应变速率下 DP600 激光焊接试样拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 8 SEM morphology of tensile fracture of laser welding joint of DP600 weld at various strain rates

而随应变速率的增加,焊缝位置断裂延伸率在降低之后有所升高的现象,与不同应变速率条件下

钢中位错滑移有关,是一定应变速率下多系滑移机制控制的结果,这与前期关于 DP 钢母材断裂延伸

率随应变速率的变化规律与机制相类似^[16]。当应变速率小于 10^0 s^{-1} 时, DP600 在塑性变形时, 位错发生滑移, 出现位错的缠结, 使晶粒拉长、破碎和纤维化, 即产生加工硬化现象, 且随应变速率的增加, 位错缠结程度加剧, 加工硬化现象明显, 导致延伸率即塑性下降。当应变速率从 10^0 s^{-1} 增加到 10^2 s^{-1} 时, 已滑移晶粒晶界附近的位错塞积群数目增加, 导致应力集中程度增加, 可激发相邻晶粒滑移系中的位错源, 从而进行协调性的多系滑移; 此外高应变速率变形过程中的温升现象, 也可降低位错运动的阻力, 使 DP600 钢的塑性变形能力提高。然而, 由于位错的交滑移需要一定时间来完成, 所以当应变速率继续增加超过 10^2 s^{-1} 时, 位错缠结不易在短时间内以交滑移方式得到释放, 应力集中程度反而有所增加(高应变速率变形过程中温升效应对塑性的贡献, 已不足以抵消此时塑性变形能力的下降), 因此延伸率基本保持不变。

4 结 论

1) 采用脉冲激光可实现 DP600 钢板对接深熔焊接, 在优化的工艺参数下制备的焊接接头无明显气孔等缺陷, 焊接质量良好。

2) 焊接接头组织和硬度分布不均匀。焊缝区主要为马氏体组织, 其硬度高于母材。热影响区外侧靠近母材区域存在由马氏体回火造成的硬度低于母材的软化区, 成为 DP 钢焊接接头的薄弱部位。

3) DP600 焊接接头的力学性能对应变速率较为敏感, 随应变速率的增加, 焊接试样的屈服强度和抗拉强度增加, 而断裂延伸率均小于母材。

4) 不同应变速率下 DP600 对接焊试样均在焊缝处断裂, 断口均为韧窝形貌, 呈典型的韧性断裂特征。

参 考 文 献

- 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钢 B450LAD 组织与性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 2047~2051
- Ma Mintu. *Advanced Steel for Automobile Application*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. 010~015
马鸣图. *先进汽车用钢*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 010~015

- H. Huh, S. B. Kim, J. H. Song *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
- Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe *et al.*. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1132~1137
石 岩, 张 宏, 渡边武弘等. 连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1132~1137
- Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile and steel of fiber laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603013
陈根余, 陈 飞, 张 屹等. 对接间隙对车用高强度钢光纤激光焊接的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603013
- N. Farabi, D. L. Chen, J. Li *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, **527**(4-5): 1215~1222
- M. Itabashi, K. Kawata. Carbon content effect on high-strain-rate tensile properties for carbon steels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, **24**(2): 117~131
- S. Curtze, V. T. Kuokkala, M. Hakka *et al.*. Deformation behavior of TRIP and DP steels in tension at different temperatures over a wide range of strain rates[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, **507**(1-2): 124~131
- H. Huh, J. H. Lim, S. H. Park *et al.*. High speed tensile test of steel sheets for the stress-strain curve at the intermediate strain rate[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2009, **10**(2): 195~204
- B. L. Boyce, M. F. Dilmore. The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from 0.0002 s^{-1} to 200 s^{-1} [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, **36**(2): 263~271
- M. Hazratinezhad, N. B. Mostafa Arab, A. R. Sufizadeh *et al.*. Mechanical and metallurgical properties of pulsed neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser welding of dual phase steels[J]. *Materials and Design*, 2012, **33**: 83~87
- U. Reisinger, M. Schleser, O. Mokrov *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
- R. S. Sharma, P. Molian. Yb:YAG laser welding of TRIP780 steel with dual phase and mild steels for use in tailor welded blanks[J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(10): 4146~4155
- S. K. Panda, V. H. Baltazar Hernandez, M. L. Kuntz *et al.*. Formability analysis of diode-laser-weld tailored blanks of advanced high-strength steel sheets [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, **40**(8): 1955~1967
- N. Farabi, D. L. Chen, Y. Zhou. Fatigue properties of laser welded dual-phase steel joints[J]. *Procedia Engineering*, 2010, **2**(1): 835~843
- D. Y. Dong, Y. Liu, L. Wang *et al.*. Dynamic tensile characteristics of DP600 steel sheets for automotive applications [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **509**: 40~45
- Cheng Donghai, Huang Jihua, Chen Yiping *et al.*. Microstructure evolution characterization of weld joints by laser welding for superplastic deformation of titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, **41**(2): 368~371
程东海, 黄继华, 陈益平等. 钛合金激光焊接接头超塑变形组织演变表征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, **41**(2): 368~371