

钢铁材料激光-电弧复合焊接技术研究进展

王晓南¹ 陈长军^{2*} 朱广江³ 张敏² 章顺虎¹

¹苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021

²苏州大学机电工程学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021

³安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243002

摘要 激光-电弧复合焊接技术是高能束焊接领域的研究热点之一,也是厚规格(厚度大于等于5 mm)钢铁材料激光焊接的优选焊接方法。系统地介绍了国内外研究学者及企业在激光-电弧复合焊接钢铁材料方面的研究进展,并简要地阐述了新型纳米强化钢(屈服强度600~700 MPa级)光纤激光-电弧复合焊接方面的最新研究工作,同时对厚规格钢铁材料激光-电弧复合焊接技术的研究方向进行了分析与展望。

关键词 激光技术; 光学制造; 激光-电弧复合焊接; 钢铁; 微观组织性能

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.030008

Research Progress on Laser-Arc Hybrid Welding of Steel

Wang Xiaonan¹ Chen Changjun² Zhu Guangjiang³ Zhang Min² Zhang Shunhu¹

¹Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

²Laser Processing Research Center, School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

³School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

Abstract Laser-arc hybrid welding technology is one of the research focuses in the high-energy beam welding areas, and also the optimal welding method for heavy-gauge steel (thickness not less than 5 mm). This paper systematically introduces the research progress of domestic and foreign researchers and companies in the laser-arc hybrid welding of steel, and our latest research work on fiber laser-arc hybrid welding of new nano-scale strengthened steel (yield strength of 600~700 MPa) steel is briefly described. Finally, the heavy-gauge steel laser-arc hybrid welding technology research directions are analyzed and discussed.

Key words laser technique; optical fabrication; laser-arc hybrid welding; steel; microstructure properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

激光具有高亮度、高方向性、高单色性、高相干性及特殊的空间分布特性等优点,可获得高达 $10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$ 的聚焦功率密度,其巨大的能量集中在非常小的范围内,能迅速将材料局部升温至极高的温度,并能以较高的冷却速度进行冷却,因此激光加工技术已成为一种无与伦比的材料加工方法^[1]。激光材料加工技术在工业领域应用的广泛程度已然成为衡量一个国家工业水平高低的重要标志。激光焊接技术与传统焊接技术相比,具有焊缝深宽比高、热影响区窄、焊接接头质量佳、生产效率高等突出优点,因此逐渐得到科研人员及企业的关注。常见的激光焊接技术包含单纯激光焊接、激光填丝焊接和激光-电弧复合焊接。单纯激光焊接技术在汽车车身用薄板焊接上的应用已证实该技术可显著地改善车身的抗冲击性和抗疲劳性,成为当前汽车制造中薄板焊

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-12-20; 网络出版日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51305285)、江苏省基础研究计划自然科学基金(BK20130315, BK20130304)

作者简介: 王晓南(1984—),男,博士,讲师,主要从事激光焊接及再制造、钢铁材料组织性能控制方面的研究。

E-mail: wxn@suda.edu.cn

*通信联系人。E-mail: chjchen2001@aliyun.com

接的主要技术^[2]。早在20世纪70年代,英国学者Steen^[3]就提出了激光-电弧复合热源焊接方法,然而稳定的加工应用直至近几年才出现,这主要得益于激光技术以及电弧焊设备的发展,尤其是激光功率和电流控制技术的提高,使得激光-电弧复合焊接技术的研究成为目前高能束焊接领域的热点之一^[-4-6]。

本文详细地介绍了国内外研究学者及企业在激光-电弧复合焊接厚规格(厚度大于等于5 mm)钢铁材料方面的研究进展,并简要地阐述了作者在新型纳米强化钢^[7-8](NPS钢,屈服强度600~700MPa级)光纤激光-电弧复合焊接方面的最新研究工作,同时对钢铁材料激光-电弧焊接技术的发展方向进行了分析与展望。

2 钢铁材料激光-电弧复合焊接的研究现状

图1示出的是激光-电弧复合焊接与单独激光焊接或电弧焊接相比的优势、焊接过程示意图及焊接接头实物照片。由图可见,与单独激光焊接/电弧焊接相比,激光-电弧复合焊接生产率高、间隙容忍度大且接头综合性能好,是厚规格钢板激光焊接的优选焊接方法^[9-12]。因此,随着高功率激光器的快速发展,国内外学者在采用激光-电弧复合焊接厚规格钢板方面开展了一些非常有价值的研究工作,下面进行详细的归纳与总结。

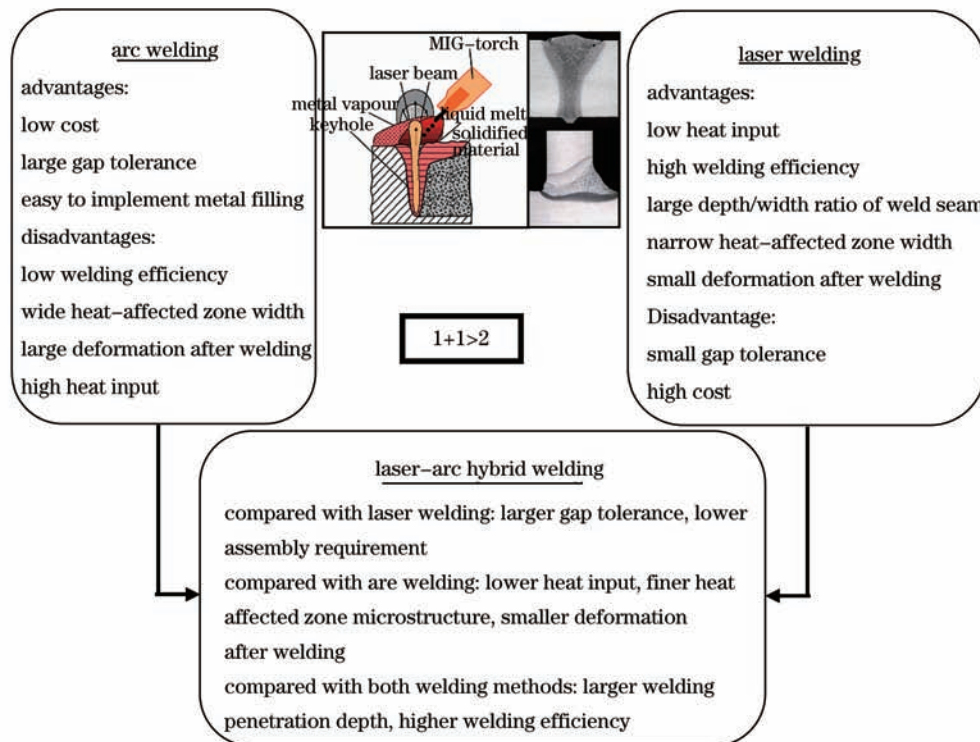


图1 激光-电弧复合焊接的优势、焊接过程示意图及不同形状的焊接接头

Fig.1 Laser-arc hybrid welding advantages, welding process schematic and different shapes of welded joints

2.1 CO₂激光-电弧复合焊接

最初,只有CO₂激光器能够提供数千瓦(最高可达45kW)的高能量来焊接厚规格钢铁材料,因此,国内外学者对采用CO₂激光-电弧复合焊接开展了大量的研究工作。由于CO₂激光-电弧复合焊接容许的装配间隙大,使得该技术在德国的Meyerwerft和丹麦的欧登塞钢造船厂得到广泛应用^[13]。上海交通大学黄坚等^[14-15]自2004年中德合作项目CHINLAS起开展了中国船用钢板的激光焊接研究,陆续采用15 kW连续CO₂激光-熔化极惰性气体(MIG)复合焊成功实现了8 mm厚CCS-B、10 mm厚A36、8 mm厚SUS304钢、15 mm厚微合金钢的对接头或T形接头的激光焊接,如图2所示。Petring等^[16]采用15.5 kW的CO₂激光-MIG复合焊接实现15 mm厚S355NL低碳钢板的单道次全熔透焊接,焊接速度为1.2 m/min。近期,南京航空航天大学Zhang等^[17]采用20 kW CO₂激光-钨惰性气体(TIG)复合焊接技术实现了16 mm厚高强度低合金结构钢10CrNiMnMoV连接,证实了激光复合焊接接头的强度及冲击韧性跟母材持平,性能优于CCS标准要求,具体性能列于表1。

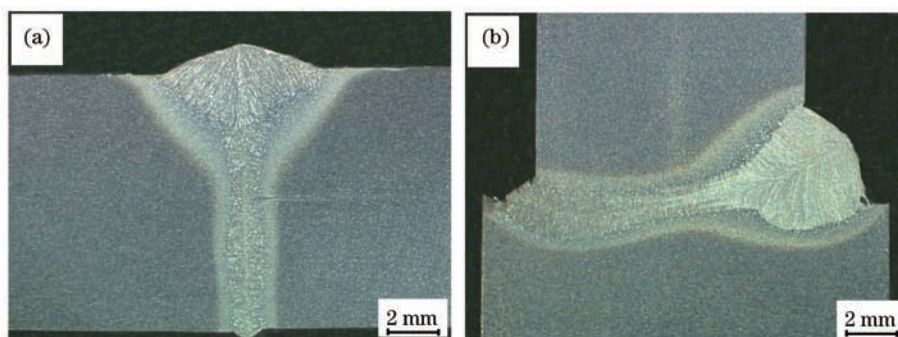


图2 10 mm厚 A36钢板焊接接头宏观照片(激光功率 12kW,焊接速度 2 m/min)。(a)对接接头;(b) T型接头

Fig.2 Macroscopic photo of 10 mm thick A36 plate welded joints (laser power 12 kW, welding speed 2 m/min). (a) Butt joints; (b) T-joints

表1 16 mm厚 10CrNiMnMoV 的 CO₂激光-TIG 接头力学性能^[17]

Table 1 Mechanical properties of 16 mm thick 10CrNiMnMoV with CO₂ laser-TIG welding^[17]

	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation /%	-40°C impact energy/J
HAZ	445	597	24.7	107, 94, 96, 94, 101, 87
Base metal	445	596	25.1	106, 110, 98

国内外学者在关于 CO₂激光-电弧复合焊接的功率匹配、保护气体对焊接接头微观组织及焊接质量的影响方面也开展了较多的研究工作。Liu 等^[18]研究了激光和熔化极活性气体(MAG)保护焊的功率匹配问题,以 MAG 为主的复合焊在熔深和焊缝横截面形状方面具有明显优势。Roepke 等^[19-20]认为 CO₂激光-电弧复合焊接的热输入主要取决于电弧,增加电弧功率、激光与电弧之间距离均会促进针状铁素体(AF)的形成,而激光功率对焊缝微观组织的影响不明显。保护气体是实现激光-电弧有效复合、获得最大熔深的关键参数,尤其是针对高功率 CO₂激光焊接。常用的保护气体主要为 He、Ar、CO₂、N₂、O₂和 H₂。由于 He 具有高电离能,可很好地抑制光致等离子体屏蔽效应^[21],Sathiya 等^[22]在 AISI904 奥氏体不锈钢 CO₂激光-金属极气体电弧(GMA)焊接的最新研究中也证实了这一点,采用 100% He 气保护时复合焊接接头的强度及韧性最优。但 He 使用成本是 Ar 的 15 倍左右,故可考虑采用混合气体来降低激光焊接成本。华中科技大学曾晓雁等^[21]证实了 He-Ar 混合保护气焊缝具有更大的熔深和更高的显微硬度,可提高焊缝质量;对于厚度和性能要求较低的焊接结构件,可采用 CO₂-Ar 混合保护气体替代进而降低成本,但 CO₂含量需控制在 30%以下。Tani 等^[23]认为,对于 304 不锈钢 CO₂激光-MIG 复合焊接而言,保护气(He+Ar+O₂)中 He 气含量不宜超过 40%,否则会导致电弧不稳且熔深无明显增加。现有研究表明,激光-电弧复合焊接中适宜的保护气体流量为 15~30 L/min^[21-23]。在激光-电弧复合焊接中,提高预热温度将会提高微观组织中 AF 含量,降低熔合区和热影响区的硬度,文献[24]认为 10Ni3CrMoV 钢 15 kW CO₂激光-MIG 复合焊接时最佳预热温度为 120 °C。

2.2 光纤激光-电弧复合焊接

与其他类型的激光器相比,光纤激光器在占地空间、冷却成本和设备方面具有良好的经济性,且具有较短的波长和较好的光束质量^[25]。因此,国内外学者在采用光纤激光-电弧焊接钢铁材料方面也开展了一些探索性研究。Shin 等^[26-28]分别采用 4 kW、5.2 kW 和 8 kW 光纤激光-MAG 复合焊接实现了 12 mm 厚 SM490 钢、9.3 mm 厚 HSLA-65 钢、9.5 mm 厚 X65 管线钢的单道次全熔透连接,而 Turichin 等^[29]采用 15 kW 光纤激光-MAG 复合焊接实现了 15 mm 厚 X80 管线钢的连接。德国联邦材料试验研究院 Rethmeier 等^[30]采用 20 kW 光纤激光-GMA 复合焊接实现了 20 mm 厚 API5L X65 管线钢的单道次熔透,若采用多层焊接,最大焊接厚度可达到 32 mm。Caccese 等^[31]开展了关于光纤激光-MAG 复合焊接“十字型”接头形状对疲劳寿命的影响,采用近圆弧过渡的“十字型”接头的疲劳性能明显优于其他类型的过渡。

我们针对具有较强应用前景的新型热轧纳米析出强化钢(NPS 钢,屈服强度 600~700 MPa 级)采用传统 MAG 焊接方式时热影响区韧性及疲劳性能出现骤降的问题,采用光纤激光-电弧复合工艺对该钢进行了焊接实验,初步研究了光纤激光-电弧复合焊接接头微观组织及性能与传统 MAG 焊接接头之间的差异。

图 3 和图 4 分别示出的是新型热轧 NPS 钢在光纤激光-电弧复合焊接、MAG 焊接时焊接接头热影响区

(HAZ)组织。激光-电弧复合焊接接头热影响区的微观组织均以板条马氏体和板条贝氏体为主,各个区域的原始奥氏体晶粒尺寸略有不同。而MAG焊接接头粗晶区(CGHAZ)、细晶区(FGHAZ)、混晶区(MGHAZ)的微观组织分别为粒状贝氏体、铁素体+珠光体+M/A组元、粒状贝氏体+先共析铁素体。这主要是由于焊接热输入大小差异,导致焊后冷却速率不一致,激光焊接的冷却速率远远大于MAG焊接,因此极易获得奥氏体中温/低温转变产物,即板条马氏体和板条贝氏体。

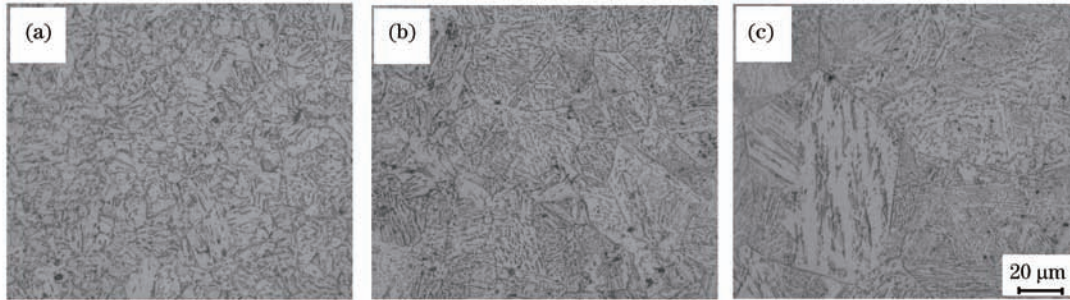


图3 新型热轧NPS钢激光-电弧复合焊接接头的热影响区组织。(a)混晶区;(b)细晶区;(c)粗晶区

Fig.3 Microstructure of HAZ on laser-arc hybrid welding joint of NPS steel. (a) MGHAZ; (b) FGHAZ; (c) CGHAZ

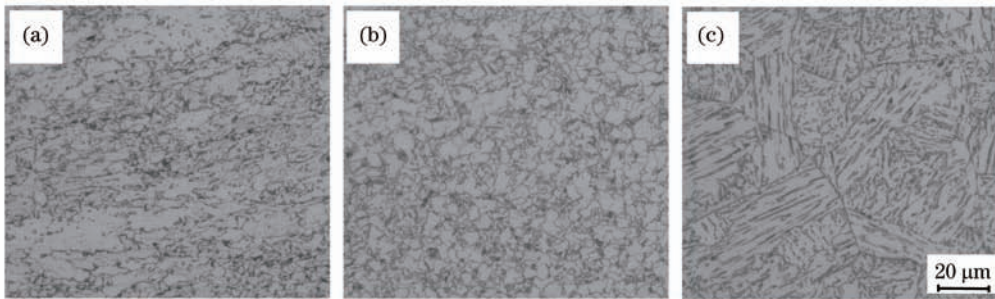


图4 新型热轧NPS钢MAG焊接接头的热影响区组织。(a)混晶区;(b)细晶区;(c)粗晶区

Fig.4 Microstructure of HAZ on MAG welding joint of NPS steel. (a) MGHAZ; (b) FGHAZ; (c) CGHAZ

图5示出的是新型热轧NPS钢焊接接头显微硬度变化规律。由图可见,激光-电弧复合焊接接头的焊缝区(WS)硬度值最低,热影响区硬度值最高,母材(BM)硬度值居中;而传统MAG焊接接头热影响区硬度最低,焊缝稍高,母材最高。此外,激光-电弧复合焊接接头热影响区宽度(2 mm左右)明显小于MAG焊接接头热影响区宽度(5 mm左右)。

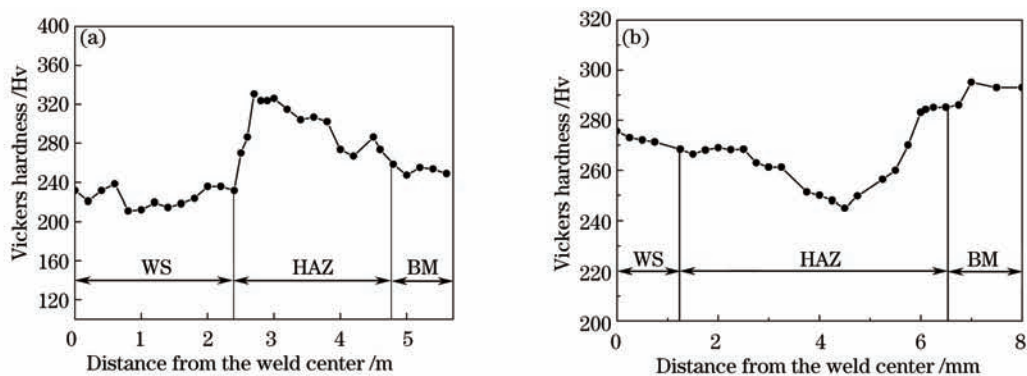


图5 新型热轧NPS钢焊接接头硬度变化规律。(a)激光-电弧复合焊接接头;(b)MAG焊接接头

Fig.5 Microhardness law of NPS steel welded joint. (a) Laser-arc hybrid welding joint; (b) MAG welding joint

利用CSM仪器化纳米压入测试系统测定激光-电弧复合焊接接头不同区域的平均纳米压痕加载-位移曲线(载荷30 mN,保压时间10 s),如图6所示。焊缝区、母材和热影响区的最大位移平均值分别为753 nm、662 nm和644 nm,平均纳米硬度分别为1.99 GPa、2.55 GPa和2.77 GPa,这表明热影响区的纳米硬度最高、母材次之、焊缝最低。热影响区和母材的弹性模量均在195 GPa左右,而焊缝区弹性模量仅为172 GPa。此外,研究发现激光-MIG/MAG复合焊接接头热影响区内的纳米硬度是不均匀的。在相同载荷和保压时间条

件下,压入渗入深度波动范围在 570~715 nm 之间,纳米硬度波动范围在 2.25~3.52 GPa 之间,弹性模量波动范围在 179.5~218.8 GPa 之间。

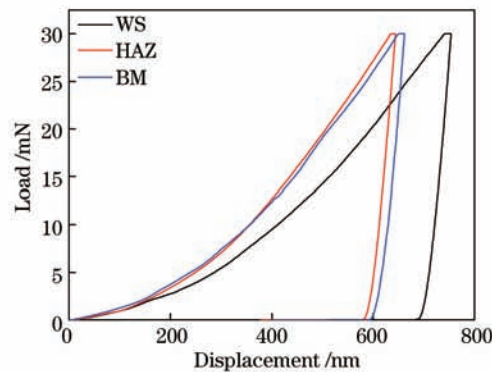


图6 新型热轧NPS钢激光-电弧复合焊接接头典型纳米压痕加载-位移曲线

Fig.6 Typical nanoindentation load-displacement curves of NPS steel laser-arc hybrid welding joints

综上所述,采用光纤激光-电弧复合焊接新型热轧NPS钢获得了不同于传统MAG焊接热影响区的微观组织及力学性能,而微观组织形成机理及其对韧性及疲劳性能的影响有待于进一步的深入研究与探讨。

2.3 半导体激光-电弧复合焊接

激光加工用的大功率激光器经历了CO₂激光器、大功率固体Nd:YAG激光器,目前正朝着以半导体激光器为基础的直接半导体激光器和光纤激光器的方向发展^[32]。目前,大功率半导体激光器主要用于汽车工业的薄钢板焊接,可焊钢板厚度为0.1~2.5 mm,半导体激光器功率在300~3000 W,光斑大小为0.4~1.5 mm。与其他激光器焊接相比,半导体激光器在焊接质量、成本上具有明显的优势,非常适合工业焊接的不同需要,将有可能逐渐取代传统的焊接方法^[33]。

表2 不同类型激光器在汽车行业中金属焊接上的对比

Table 2 Comparison of different types of lasers on metal welding in the automotive industry

	Semiconductor lasers	CO ₂ lasers	Nd:YAG lasers
Total conversion efficiency /%	35	6	1
Cost per hour /\$	1.5	10.0	30.0
Wavelength / μm	0.8	10.6	1.06
Absorption rate of steel/%	40	12	35
Power density /(W/cm ²)	10 ³ ~10 ⁶	10 ³ ~10 ⁸	10 ³ ~10 ⁷
Cooling capacity of the cooling system /kW	8	50	100
Service interval /h	10000	20~30000	1000
Power consumption (per kilowatt) /kW	16	66	400

3 结束语

综上所述,尽管CO₂激光器能够提供数千瓦的高能量来实现厚规格钢铁材料焊接,但CO₂激光(波长10.6 μm)只能通过反射镜控制传输方向,而不能通过具有柔性的光学纤维来传导,限制了它在柔性制造环境的应用;Nd:YAG激光器可较好地适应柔性制造环境,但其能量利用率低(仅为3%)、投资成本较高;光纤激光器不但可很好地适应柔性制造环境,而且其能量利用率可达到20%左右,但光纤激光器在激光-电弧复合焊接技术中的研究与应用处于初级阶段;而半导体激光器在厚规格钢铁材料焊接方面的研究与应用有待于进一步开展。

目前,采用激光-电弧复合焊接技术进行厚规格钢铁材料焊接的对象主要为造船用钢、管线钢、不锈钢及结构钢,研究内容主要集中在论证钢材进行激光-电弧复合焊接的可行性、焊接工艺参数研究和焊接接头性能测试与质量评估等方面。随着新型钢铁材料的不断出现,激光-电弧复合焊接技术为实现新型纳米析出强化钢、工程机械用钢等钢材的高品质连接提供了新的途径,因此,亟需开展热影响区相变机理、微观组织与性能之间的本质关系等方面的基础理论研究及焊接工艺研究工作,进而拓宽激光-电弧复合焊接技术

的应用领域,从而有力提升我国在该前沿领域的研究水平。

参 考 文 献

- 1 Liu Shunhong. Laser Manufacturing Technology [M]. Wuhan: HuazhongUniversity of Science and Technology Press, 2011. 1-4.
刘顺洪. 激光制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011. 1-4.
- 2 W Xu, D Westerbaan, S S Nayak, *et al.*. Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints [J]. Materials and Design, 2013, 43: 373-383.
- 3 W M Steen. Arc augmented laser processing of materials [J]. J Appl Phys, 1980, 51(11): 5636-5641.
- 4 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.
- 5 Ji Yipeng, Chen Jiaqing, Jiao Xiangdong, *et al.*. Laser-arc hybrid welding technology [J]. Welding Technology, 2009, 38(12): 1-7.
姬宜朋, 陈家庆, 焦向东, 等. 激光-电弧复合热源焊接技术[J]. 焊接技术, 2009, 38(12): 1-7.
- 6 Cui Li, Zhang Yanchao, He Dingyong, *et al.*. Research progress of high power fiber laser welding [J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 154-159.
崔 丽, 张彦超, 贺定勇, 等. 高功率光纤激光焊接的研究进展[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 154-159.
- 7 X N Wang, L X Du, H S Di, *et al.*. Effect of deformation on continuous cooling phase transformation behaviors of 780MPa Nb-Ti ultra-high strength steel [J]. Steel Research International, 2012, 82(12): 1417-1424.
- 8 Song Yongjun, Wang Xiaonan, Xu Zhaoguo, *et al.*. Development of 700 MPa grade ultra-high strength heavy duty automobile carriage strip [J]. J Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 69-73.
宋勇军, 王晓南, 徐兆国, 等. 700 MPa级超高强重载汽车车厢板的研制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 69-73.
- 9 Li Xiaoyan, Wu Chuansong, Li Wushen. Study on the progress of welding science and technology in China [J]. J Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 19-30.
李晓延, 武传松, 李午申. 中国焊接制造领域学科发展研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 19-30.
- 10 Liu Jichang, Li Lijun, Zhu Xiaodong, *et al.*. Discussion on laser welding combined with other heat resources [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 486-489.
刘继常, 李力钧, 朱小东, 等. 试析几种激光复合焊接技术[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 486-489.
- 11 S Katayama, Y Kawahito, M Mizutani. Latest progress in performance and understanding of laser welding [J]. Physics Procedia, 2012, 39: 8-16.
- 12 C M Allen. A brief review of recent developments in laser welding processes for ferritic pipe steels [J]. Australasian Welding Journal, 2007, 52(4): 21-22.
- 13 Steve Shi, David Howse. Laser welding and laser-MAG compound welding of shipbuilding [J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(6): 32-39.
石功奇, David Howse. 船用钢结构的激光焊接以及激光-MAG复合焊接[J]. 电焊机, 2007, 37(6): 32-39.
- 14 Huang Jian, Gao Zhiguo, Cai Yan, *et al.*. High power CO₂ laser welding of shipbuilding steel [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(3): 7-11.
黄 坚, 高志国, 蔡 艳, 等. 船用钢板的高功率CO₂激光焊接[J]. 电焊机, 2008, 38(3): 7-11.
- 15 J M Ni, Z G Li, J Huang, *et al.*. Strengthening behavior analysis of weld metal of laser hybrid welding for microalloyed steel [J]. Materials and Design, 2010, 31(8): 4876-4880.
- 16 D Petring, C Fuhrmann, N Wolf, *et al.*. Investigations and applications of laser-arc hybrid welding from thin sheets up to heavy section components [C]. 22nd International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, 2003.
- 17 S H Zhang, Y F Shen, H J Qiu. The technology and welding joint properties of hybrid laser-TIG welding on thick plate [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 381-388.
- 18 Z J Liu, M Kutsuna, L Q Sun. CO₂ laser-MAG hybrid welding of 590 MPa high strength steel[J]. Quarterly J Japan Welding Society, 2006, 24(1): 17-25.
- 19 C Roepke, S Liu. Hybrid Laser arc welding of HY-80 steel [J]. Welding Journal, 2009, 88(Suppl): 159-167.
- 20 C Roepke, S Liu, S Kelly, *et al.*. Hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel [J]. Welding Journal, 2010, 89(suppl): 140-150.

- 21 Zeng Xiaoyan, Gao Ming, Yan Jun. Effects of shielding gas in laser-arc hybrid welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601005.
曾晓雁, 高明, 严军. 保护气体对激光-电弧复合焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601005.
- 22 P Sathiya, M K Mishra, R Soundararajan, *et al.*. Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 46-55.
- 23 G Tani, G Campana, A Fortunato, *et al.*. The influence of shielding gas in hybrid laser-MIG welding [J]. Appl Surf Sci, 2007, 253(19): 8050-8053.
- 24 L H Hu, J Huang, Z G Li, *et al.*. Effects of preheating temperature on cold cracks, microstructures and properties of high power laser hybrid welded 10Ni3CrMoV steel [J]. Materials and Design, 2011, 32: 1931-1939.
- 25 Hu Peipei, Wang Chunming, Hu Xiyuan. Research progress of fiber laser welding and fiber laser-arc hybrid welding [J]. Welding, 2011, (7): 40-45.
胡佩佩, 王春明, 胡席远. 光纤激光及其复合焊接研究进展[J]. 焊接, 2011, (7): 40-45.
- 26 M Shin, K Nakata. Single pass full penetration welding of high-tensile steel thick-plate using 4 kW fiber laser and MAG arc hybrid welding process[J]. Quarterly J Japan Welding Society, 2009, 27(2): 80-84.
- 27 X Cao, P Wanjara, J Huang, *et al.*. Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high strength low alloy steel [J]. Materials and Design, 2011, 32(6): 3399-3413.
- 28 S Grünenwalda, T Seefeld, F Vollertsen. Solutions for joining pipe steels using laser-GMA-hybrid welding processes [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 77-87.
- 29 G Turichin, E Valdaytseva, I Tzibulsky, *et al.*. Simulation and technology of hybrid welding of thick steel parts with high power fiber laser [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 646-655.
- 30 M Rethmeier, S Gook, M Lammers, *et al.*. Laser-hybrid welding of thick plates up to 32 mm using a 20 kW fiber laser [J]. Quarterly J Japan Welding Society, 2009, 27(2): 74-79.
- 31 V Caccese, P A Blomquist, K A Berube, *et al.*. Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes [J]. Marine Structures, 2006, 19(1): 1-22.
- 32 Wang Qiming. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in China [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2190-2197.
王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2190-2197.
- 33 Wang Yonggang, Ma Xiaoyu. The application and present situation of lasers in the automobile industry [J]. J Applied Optics, 2004, 25(5): 1-2.
王勇刚, 马骁宇. 激光在汽车工业中的发展现状与应用[J]. 应用光学, 2004, 25(5): 1-2.