

激光深熔焊接技术的研究与动向

沈以赴 张盛海

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘要 随着激光器光束质量的改善和输出功率的提高,激光深熔焊接技术在激光加工和焊接领域的份额逐渐增加。对近期国内外激光深熔焊接领域的主要成果进行了概括和总结,讨论了激光深熔焊接的特点和局限性,同时也对激光深熔焊接技术在大功率激光器的开发、激光深熔焊接过程的稳定性、等离子体控制、外加辅助电磁场、激光-电弧复合焊接技术等方面的主要研究特点进行了分析和讨论。结合科技发展趋势和激光焊接技术的特点,对激光深熔焊接技术的研究重点进行了讨论和展望。

关键词 激光技术;激光焊接;激光深熔焊;等离子体;焊接工艺

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s103002

Current Research Status and Development Trends of Laser Welding

Shen Yifu Zhang Shenghai

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract With the improvement of laser beam quality and the increasing of laser power output, the percentage of deep penetration laser welding increases gradually in laser processing and welding field. The recent major research achievements of deep penetration laser welding have been summarized, meanwhile, its characteristics and limitations have been discussed as well. And then many important advances have been analyzed and discussed in the field of deep penetration laser welding, such as the research of high power laser, stability of laser welding process, control of laser-induced plasma, auxiliary electromagnetic fields, laser-arc hybrid welding and so on. Finally, the development foreground of deep penetration laser welding in the future is prospected.

Key words laser technique; laser welding; deep penetration laser welding; plasma; welding technology

OCIS codes 140.3390; 150.5495; 350.3390; 350.3850

1 引言

激光具有优良的单色性、良好的相干性和方向性,尤其是作为一种焊接能量,它的能量密度高,可调节性好,使得激光焊接技术成为材料连接的重要手段之一^[1]。随着激光技术的发展,高性能激光设备的出现使得激光器输出的最大功率越来越高,光束质量也进一步改善,激光深熔焊接技术被日益广泛地应用到航空、航天、汽车、船舶、机械等重要工业领域^[2]。根据工业激光解决方案(ILS)统计和市场研究公司 Optech Consulting 各年度调查报告的结

果^[3]显示:激光加工在加工领域的市场份额逐年提高,全球工业激光系统的产值从 2001 年的 28.75 亿美元增长到 2008 年的 63.06 亿美元,相应的激光器产值从 9 亿美元增长到 18.14 亿美元,虽然在遭遇全球低迷经济后势头均有所回落,但其中用于激光焊接的激光器产值每年保持 7%~13% 的增长率稳步提升。

本文概括了近期激光深熔焊接领域国内外研究的主要成果,总结了目前激光深熔焊接技术亟待解决的问题,并分析和讨论了激光深熔焊接技术近期

收稿日期: 2012-01-01; **收到修改稿日期**: 2012-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(51075205)和江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ11_0205)资助课题。

作者简介: 沈以赴(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事先进材料制造与加工技术等方面的研究。

E-mail: yifushen@nuaa.edu.cn

研究内容的特点和发展新方向。

2 激光深熔焊接的特点及局限性

相对其他焊接技术而言,激光深熔焊接的主要优点有:1) 能量密度高,热输入小,可以焊接钛、石英等难焊材料和异种材料;2) 焊接速度快、焊缝深宽比大、变形小,焊接接头性能很高;3) 在焊接过程中,定位精度高,可以实现非接触式、远距离、精密焊接,特别是光纤传输的激光,对激光的传输、调节和控制十分便利,非常柔性化。

但是,激光深熔焊接依然存在着一定的局限性,有些理论和技术问题还有待解决,主要表现为:1) 激光深熔焊接的激光器所需功率较大,激光器和配套系统的生产成本较高,一次性投入很大,应用中的消耗和维护费用也较大;2) 激光器输出的激光经聚焦后,光束光斑很小(微量级),对焊接构件的装备精度要求比较高,为了减少工艺缺陷和冶金缺陷,构件需要相应的焊前处理;3) 焊接过程的稳定性还没有很好地解决,主要表现为等离子体的不稳定性,等离子体的控制问题仍然是影响焊缝成形和焊接稳定性的关键问题;4) 激光深熔焊接的机理问题还有待进一步完善;5) 总体能量损失严重,主要有两个方面:激光器电光转换效率较低和焊接时激光能量的利用率较低;6) 激光焊接的标准化难以实现。激光焊接是个很复杂的过程,特别是激光深熔焊接,在起始阶段,固态材料在激光的直接作用下,液化、气化和离化,焊接熔池在气团冲击力的作用下形成小孔;小孔形成后,激光与孔壁液相和孔内气团作用,在提供维系等离子体的能量同时,和等离子体一起提供熔池向前推进的驱动能量。能量耦合和转换非常复杂,要维持焊接过程的稳定性,需使等离子体、孔壁蒸气压和辅助气体保持热力学及动力学平衡,因而,优化激光功率、离焦量、焊接速度、辅助气体的种类和

流量等工艺参数的匹配十分困难。并且激光波长不同,光束质量不同,焊接材料的不同,焊接工艺亦差异很大。可见,要实现可推广的行业标准相当困难。

3 激光深熔焊接的主要研究方向

为了突破激光深熔焊接技术的局限性,解决必要的理论和技术问题,国内外的研究者进行了大量的研究。

3.1 大功率激光器的开发和研究

激光深熔焊接所用激光器的研究主要包括提高激光器的输出功率、改善光束质量和增加能量转换效率方面^[4],当然制造成本也是其中的一个重要因素。一直以来,CO₂和YAG激光器一直统治着激光深熔焊接市场,但近10年来,情况正在逐渐发生变化。光纤激光器是高功率激光技术革命的重要成果,在2000年,光纤激光器还在百瓦级水平,而目前的光纤激光器通过耦合技术很容易就能达到5~50 kW,光束质量也获得了极大的改善,最低可达2 mm·mrad,同时也极大地降低了设备空间和维护成本。盘式激光器具有优越的稳定性和良好的散热性能,为激光深熔焊接平添了更多选择。从发展趋势看来,下一代的Nd:YAG激光器的形式将是光纤或盘式激光器。能量转换效率也是大功率激光器开发的研究者普遍关注的问题^[5~7],虽然二极管激光器的光束质量相对较差,可是它的造价成本低廉,同样可用光纤传输,重要的是其转换效率可达到40%甚至更高,而目前工业应用中较多的光纤激光器的能量转换效率一般只能达到30%,YAG激光器最小,仅有3%~5%,各类激光器的具体参数见表1。要在激光深熔焊接领域占领市场,对于Nd:YAG激光器而言,必须着力改善光束质量和能量转换效率,并进一步优化冷却系统,提高最大输出功率。CO₂

表1 激光深熔焊接常用激光器

Table 1 Laser equipment of deep penetration laser welding

Items	Laser					
	Nd:YAG	CO ₂	Fiber	Disc	Diode	
Life of pumping /h	10000	N/A	100000	10000	18000	
λ /nm	1060	10600	1070	1030	About 1000	
Method of transport	Fiber	Mirrors	Fiber	Fiber	Fiber	
Max output power /kW	6	20	50	8	6	
Beam parameter product (reference 4~5 kW) /(mm·mrad)	25	6	2.5	2	80	
Wall-plug efficiency /%	5	10	30	20	40	
Air conditioner	Deionized water	Water	Standard or water	Standard or water	Water	
Area (reference 4~5 kW) /m ²	6	3	1	4	4	

激光虽然在金属材料的焊接过程中比固体激光更容易诱发等离子体,对比光纤激光器无任何优势可言,而塑料、聚合物等其他非金属材料对 CO₂ 激光吸收效果较固体激光器好得多,因而可以在提高转换效率的同时,占领非金属材料连接领域。对于光纤激光器,虽然在多模下很容易实现高功率,但是在单模下的输出功率并不足千瓦。因此,单模光纤激光是一个研究热点;虽然二极管激光器的高转换效率和低制造成本可以适量弥补光束质量的不足,但是要达到激光深熔焊接所要求的能量密度,还有待进一步的技术研究以提高其光束质量。

3.2 激光深熔焊接稳定性研究和工艺创新

激光深熔焊接过程的稳定性,主要是小孔稳定性的问题,与之密切相关的是激光诱导的等离子体稳定性问题。主要表现为等离子体形状尺寸的大小波动和位置的上下起伏。在合适的工艺条件下,等离子体能增强激光和焊接材料的能量耦合,有利于激光焊接,但是若功率密度与其他工艺条件不匹配,会引起等离子体的膨胀和上浮,在负透镜效应的作用下,会对激光产生屏蔽效应,不利于激光焊接。

3.2.1 采用辅助气体控制等离子体

辅助气体对等离子体的作用主要体现在以下方面:1) 对等离子体的冷却作用,影响等离子体的冷却效果的是辅助气体的种类、热容、热导率和气体的解离能与电离能等因素;2) 对等离子体的流体压力,影响其作用效果的主要有辅助气体的流量与流态分布。为了让辅助气体具备理想的流态和易于实现各种辅助气体的优化配比,文献[8~11]设计和应用了双层喷嘴、圆锥同轴等各类喷嘴,采用同轴和旁轴的送气方式,配合辅助气体的种类、流量和不同的焊接速度与方向进行了激光焊接实验^[8,12~16],部分研究者结合数值计算和模拟对实验结果进行了分析^[10,11,13,17]。结果表明,辅助气体的热导率越大,导热性越好,传输等离子体能量的速率越高;同时辅助气体的解离能与电离能越大,辅助气体被离解电离所需要的能越大,因此需要从等离子体获得的能量越多,这样等离子体的能量损失加快,为维持自身的燃烧波(LSC),等离子体自发协同地减小尺寸;当辅助气流流量增加时,气体与等离子体的能量转换速度加快,等离子体界面温度可以很好地维持在辅助气体温度,加大了等离子体在辅助气体的界面附近的温度梯度,更有利于等离子体能量向环境的传递,同样也使等离子体的尺寸减小;另外,随着辅助气流流量的增加,对等离子体的流体压力越大,能够对等

离子体的上浮有效地抑制;但若辅助气流流量过大,会增加流体对等离子体的扰动,甚至造成对熔池的冲击,加剧等离子体的不稳定性,造成焊接过程的不稳定和恶化焊缝成形,并增加焊缝气孔倾向,影响接头的机械性能。

3.2.2 采用填充材料的激光深熔焊接

激光深熔焊接时所采用填充材料的方式主要有填充焊丝、填充粉末和预制材料^[18~22]。其中,由于预制材料的制备工艺复杂,若非是对焊件接头性能有特殊要求,很少采用,近来也鲜见报道。填充材料对激光深熔焊接的作用主要有如下几点:1) 通过填充材料的加入,可以改善激光和材料的能量耦合,降低激光深熔焊接的功率阈值,同时明显地增大焊缝截面积,从而改善激光对焊件的装备精度要求;2) 填充材料可以改善焊缝金属的冶金性能,改善焊缝组织。另外,通过选取合适的填充材料,还可以改善熔池的流动性,降低熔池金属液的粘度,减小表面张力,使熔池内的气体易于排出,降低焊缝的气孔倾向;3) 填充材料可以改善等离子体、激光与焊件的能量耦合,填充材料的液化、气化和离化需要从等离子体获取能量。因此,可以通过填充材料和等离子体的能量耦合控制等离子体的稳定性。填充材料带来的困难就是填充材料送入熔池的方式、位置和速度等工艺参量加大了优化工艺参数的工作量;实验结果表明^[23],填充材料能够吸收等离子体的能量,可以提高等离子体的稳定性,但是等离子体尺寸有增加的趋势,如图1所示,填充材料的加入使激光焊接过程更加复杂,其作用机制还有待进一步研究。

3.2.3 激光复合的深熔焊接技术

早在20世纪80年代,Steen^[24]就提出了激光-电弧复合焊接的概念,最初因为激光输出功率和功率密度的局限,进展缓慢。近年来,随着激光技术的迅速发展和焊接工艺研究的进一步推进,激光-电弧复合焊接技术的优越性越来越明显地表现出来,成为国内外研究的热点^[25~29],很多技术成果也被广泛应用,特别是厚板材料的连接,如造船领域的知名公司 Meyer Werft、Odense、Aker Yards 等船厂均采用了激光电弧复合焊接技术焊接钢夹芯板和常规加强筋板及制造平板。复合形式主要包括激光-TIG焊、激光-MIG焊、激光-MAG、激光-等离子体弧焊及激光-双电弧等。复合焊接的优越性主要体现在焊接过程中,激光焊接和电弧焊接的优势均可充分发挥,同时又可以互补不足:1) 相对于激光焊接,可以显著增加焊缝截面积,改善焊接对焊件的装备要

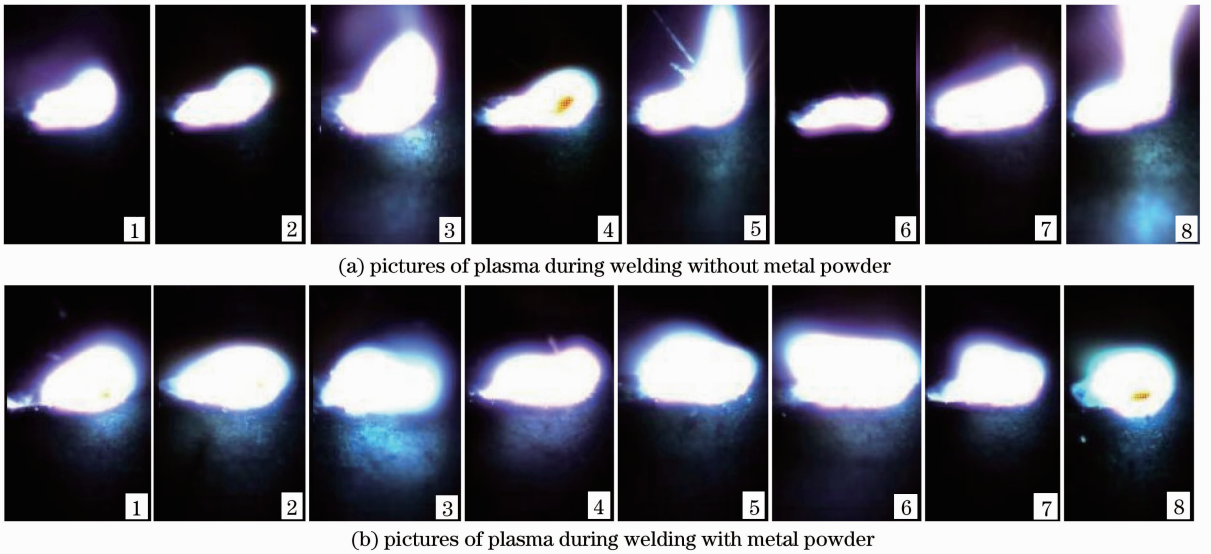


图 1 等离子体的稳定性
Fig. 1 Stability of plasma

求。文献[25]采用 CO₂ 激光-TIG 复合接焊接技术焊接 1.2 mm 厚的低碳钢板,实现间隙适应性较激光焊接提高了 300%;2) 焊接过程更容易获得稳定,一方面,复合焊接过程中,激光对焊接电弧有明显的吸引和压缩作用,与电弧作用后,电弧电压趋于稳定;另一方面,在激光-MIG 复合焊接时,激光深熔焊接产生的金属等离子体对电弧焊接的熔滴有很强的热作用效果,有利于促进熔滴过渡;同时,由于激光对电弧的吸引对电弧作用下的熔滴会产生一定影响,金属蒸气对熔滴的反冲作用力又抑制着熔滴的过渡,可通过焊接工艺相关参数的调节引起熔滴过渡方式和过渡频率的改变。通过优化工艺参数,可以使熔滴过渡的频率加快,使其过渡形式转变为

稳定的射滴过渡,获得稳定焊接电弧;3) 激光和电弧相互作用,可以改善能量耦合效率,改变熔池和小孔形态及金属液的流动性,有利于提高焊缝熔深和焊接速度。研究者^[30,31]采用 X 射线观测,研究了 YAG 激光与 TIG 电弧复合焊接时的小孔及熔池的流动行为。实验结果表明,电弧的作用使小孔变长、变窄,稳定性明显改善;分析认为,电弧对小孔内部金属蒸发的强化作用,有效地抑制了保护气体进入小孔,从而降低小孔倾向。文献[25]采用 CO₂ 激光-TIG 复合焊接技术焊接的速度可达激光焊接时的 3 倍。图 2 为激光和电弧相关参数不变的条件下,得到的焊缝截面图^[32]。

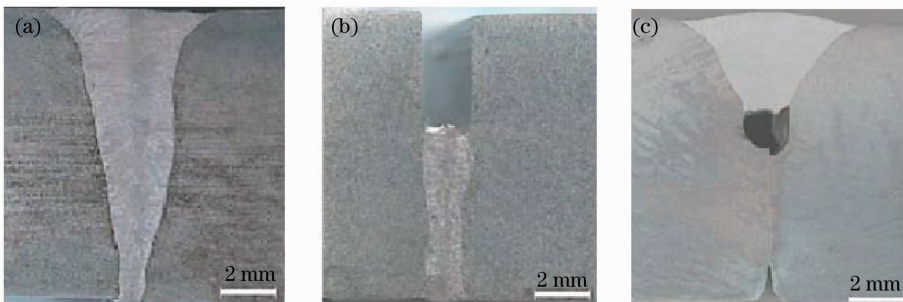


图 2 焊缝横截面。(a)复合焊接;(b)激光焊接;(c)电弧焊接

Fig. 2 Cross-section of weld. (a) Hybrid welding; (b) laser welding; (c) arc welding

虽然激光对电弧有很好的压缩作用,但是随着电弧电流及激光功率的增加,等离子体开始膨胀长大,文献[33]表明,在电弧电流大于临界值时,会出现等离子体的过度膨胀,并且电弧等离子体对激光的吸收及负透镜效应会使激光能量衰减和发散,这

是一种负面效应,由于复合焊接相对单一形式而言,焊接过程更加复杂,对焊接过程的分析中涉及到小孔的应力场、熔池的表面张力场、光与电磁场等错综复杂的作用过程,进行深入的理论分析比较困难。深入研究复合焊接过程中激光对电弧的影响机制,

实现对复合焊接过程的便利控制,是复合焊接技术要解决的根本性问题。

3.2.4 外加电磁场对激光深熔焊接的影响

外加电磁场控制法是利用激光焊接过程中光致等离子体的电磁学特性控制等离子体。在外加电磁场的作用下,等离子体中的带电粒子将会受到电磁力作用,通过控制和调节电磁场的方向和大小,可以影响到等离子体中带电粒子的运动和分布,从而实现对等离子体的控制。研究发现^[34,35],焊接过程中,其他条件不变时,激磁电流越大,对等离子体的控制效果越好,相对而言,磁场的正极对光致等离子体有更强的作用。文献^[36]表明,在其他条件不变时,外加磁场的强度越大,焊缝的熔深也越大,研究还发现,在一个最佳电压值下,焊接能获得最大熔深。研究表明^[37],用氩气作保护气体时,磁场抑制等离子体的效果比用氦气作保护气体时更明显,且熔深有显著增加,这与不加磁场时的结果^[16]矛盾,从而验证了磁场对焊接过程的影响。这种方法对焊接过程和焊缝的影响不是特别显著,电磁场对等离子体和熔池的作用机制还需完善,实验电磁场的强度调节也还局限于一定区间,还有待进一步的实验研究。

3.2.5 其他工艺方法

为了有效控制激光焊接过程中的等离子体,技术人员尝试了很多工艺手段。文献^[38]提到了在焊接过程中使用激光摆动法(LSSW),使激光束在小孔出现后而等离子体产生以前,迅速移至熔池的后缘,激光在焊接方向上来回移动,使等离子体来不及扩展。但是等离子体的点燃时间为纳秒量级,这种方法在实际焊接过程中不易控制。文献^[39,40]尝试了低气压或真空条件下的激光焊接,结果表明在较低气压下激光诱导的等离子体密度低,对入射激光的影响小;另外,在较低气压下焊件材料的沸点降低,因为材料的熔点和沸点更接近,小孔液相壁厚减小,从而容易维持其稳定性,小孔也因此更加稳定,并易于得到更大的熔深。但是这一方法所需成本很大,且掩盖了激光焊接不需真空的优越性,不利于工业化推广应用,近年来少有研究。此外还有通过调节激光频率和多光束不同布置等方法来控制等离子体,未见突出成果报道。

3.3 焊接过程的动力学与热力学研究

对激光深熔焊接的机制和小孔形成机理的深入研究,必须要对焊接的动力学与热力学过程进行分析研究。激光深熔焊接过程中,激光、等离子体和熔

池保持着复杂的能量耦合过程,稳定的等离子体和小孔都是动力学与热力学动态平衡的结果,要对其进行动力学与热力学分析,需要适时监测所包含物理量的物理特性,如离子温度、电子温度、热导率等,并且有些物理量是温度的函数,采集数据量大,过程复杂,因此,在分析中处理起来相当困难。目前的研究^[41~46]主要通过简化边界条件,将各物理量理想化处理之后作定性分析。这方面的研究主要还是依赖数值计算及模拟技术进行的,有很大的局限性。研究者^[10,44,45,47,48]结合内生热模型、高斯分布热流模型、双椭球热源模型、高斯分布体热源模型、激光等离子体复合模型,利用实验测量的等离子体、熔池及焊件的相关数据,对焊接过程进行动力学和热力学分析,计算和模拟等离子体、熔池、试件的温度场、速度场和应力场。用到的模型大多均弱化甚至不考虑等离子体的影响,忽略小孔效应。而实际上,在焊接过程中,等离子体与激光、激光与材料、等离子体与材料始终保持能量转换与耦合,等离子体熄灭或者膨胀上浮都会引起小孔形态的波动,导致焊接过程的不稳定。上述模型有一定的局限性,激光深熔焊接有待进一步的研究去建立更合理、更接近实际的焊接模型,为激光深熔焊接机理研究方面起到重要指导作用。

4 结论与展望

激光深熔焊接过程中光致等离子体的稳定性依然是制约焊接过程稳定性的重要问题,激光-电弧复合焊接技术能有效地改善等离子体和小孔的稳定性,获得广泛的工业应用。但是等离子体的控制和小孔的成形机理及电弧对激光深熔焊接的作用机制还需进一步研究,这也需要数值计算和模拟技术更深入地应用到激光深熔焊接过程的分析中去,为实验和实践起到重要的指导作用。

随着激光技术的发展,激光器的光束质量和输出功率将进一步提高,激光深熔焊接将逐步扩大在材料连接领域的市场,厚板构件的激光焊接将变得更加容易,在航空、航天、核反应等领域,特别是对焊接接头性能要求较高的相关结构连接,激光深熔焊接将获得更大的利用空间。

因此,厚板的激光焊接技术,特别是大厚板的快速激光深熔焊接技术需要进一步的完善以满足市场和应用的迫切需求。随着人类宇宙探索的深入和激光器的轻型化,激光的真空焊接技术研究将成为一个重要的研究方向,为空间站构件的高质量连接提

供必要的技术支持。同时,随着计算机的革新,计算机的计算能力不断增强,计算方法日新月异,等离子体和小孔的热力学和动力学分析将变得易于实现和更加可靠,结合计算和模拟,激光深熔焊接过程中等离子体的稳定性研究将进一步完善,小孔的形成机理研究可能会得到更好的解决,这也是激光深熔焊接机理研究亟待解决的问题,依然是一个重要的研究内容。

参 考 文 献

- Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong *et al.*. Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets [J]. *Opt. & Lasers in Engng*, 2009, **47**(11): 1117~1124
- D. A. Belforte. Comments on David Belforte's annual industrial laser forecast[C]. 2010 Annual Economic Review and Forecast, Industrial Laser Solutions, 2011
- R. T. Brown. Keyhole welding studies with a moderate-power, high-brightness fiber laser[J]. *J. Laser Appl.*, 2008, **20**(4): 201~208
- I. P. Mercer, A. Comley, S. Davis-Ansted *et al.*. Euv light source and laser considerations for stability and high-energy conversion efficiency[C]. *SPIE*, 2002, **4760**: 463~473
- Sumpf Bernd, Adamiec Pawel, Zorn Martin *et al.*. Nearly diffraction-limited tapered lasers at 675 nm with 1-W output power and conversion efficiencies above 30%[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(4): 266~268
- Sumpf Bernd, Zorn Martin, Staske Ralf *et al.*. 3-W broad area lasers and 12-W bars with conversion efficiencies up to 40% at 650 nm[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(5): 1188~1193
- A. Ancona, T. Sibillano, L. Tricarico *et al.*. Comparison of two different nozzles for laser beam welding of AA5083 aluminium alloy [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005, **164-165**: 971~977
- T. W. Juhl, F. O. Olsen. A plasma control and gas protection system for laser welding of stainless steel[C]. San Diego: Laser Materials Processing Conference, 1997. G248~G255
- A. Ancona, T. Sibillano, P. M. Lugara *et al.*. An analysis of the shielding gas flow from a coaxial conical nozzle during high power CO₂ laser welding[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(3): 563~574
- Tang Xiahui, Zhou Jingxing, Zhou Yi *et al.*. Control of laser-induced plasma by assistant gas through co-axial double nozzle [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, **14**(14): 15~17
唐霞辉, 周鑫, 周毅等. 同轴双层喷嘴辅助气体对激光深熔焊接光致等离子体的控制[J]. *中国机械工程*, 2003, **14**(14): 15~17
- R. Fabbro, M. Hamadou, L. Sabatier *et al.*. Study and optimization of shielding gas nozzle used for laser welding[C]. Dearborn: Laser Materials Processing Conference, 2000. C166~C172
- Wang Hong, Shi Yaowu, Gong Shuili *et al.*. Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, **184**(1-3): 379~385
- Reisgen Uwe, Schleser Markus, Mokrov Oleg *et al.*. Shielding gas influences on laser weldability of tailored blanks of advanced automotive steels [J]. *Appl. Surface Sci.*, 2010, **257**(5): 1401~1406
- T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi *et al.*. A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminium alloys by in-process spectroscopic investigation [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2006, **44**(10): 1039~1051
- Xiao Rongshi, Mei Hanhua, Zuo Tiechuan. Influence of assistant gases on the shielding thresholds of laser induced plasma during high power CO₂ laser penetration welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(11): 86~91
肖荣诗, 梅汉华, 左铁钊. 辅助气体对 CO₂ 激光焊接光致等离子体屏蔽的影响[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(11): 86~91
- Hu Jun, Guo Shaogang, Luo Lei *et al.*. Dynamic characteristic analysis of impinging jet in laser drilling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1250~1254
胡俊, 郭绍刚, 罗磊等. 激光穿孔中辅助气体动力学性能分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1250~1254
- J. T. Norris, C. V. Robino, D. A. Hirschfeld *et al.*. Effects of laser parameters on porosity formation: Investigating millimeter scale continuous wave Nd: YAG laser welds [J]. *Welding J.*, 2011, **90**(10): 198S~203S
- A. Salminen. The effects of filler wire feed on the efficiency of laser welding[C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 263~268
- J. M. Lin, B. C. Hwang. Clad profiles in edge welding using a coaxial powder filler nozzle[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(4): 267~275
- H. C. Wu, L. W. Tsay, C. Chen. Laser beam welding of 2205 duplex stainless steel with metal powder additions [J]. *ISIJ International*, 2004, **44**(10): 1720~1726
- T. Forsman, J. Powell, C. Magnusson. Nd: YAG laser lap welding of coated aluminium alloys [C]. San Diego: Laser Materials Processing Conference, 1997. G113~G120
- Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. Influence of metal powder on high power CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 860~863
张盛海, 陈铠, 肖荣诗等. 填充粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 860~863
- W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- 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
- C. Roepke, S. Liu, S. Kelly *et al.*. Hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel [J]. *Weld. J.*, 2010, **89**(7): 140S~150S
- Y. B. Chen, Z. L. Lei, L. Q. Li *et al.*. Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser tig hybrid welding process [J]. *Sci. & Technol. Weld. & Join.*, 2006, **11**(4): 403~411
- C. Kim, W. Choi, J. Kim *et al.*. Relationship between the weld ability and the process parameters for laser-tig hybrid welding of galvanized steel sheets [J]. *Mater. Trans.*, 2008, **49**(1): 179~186
- R. Kaul, H. Kumar, B. T. Rao *et al.*. Studies on characteristics of CO₂ laser-gtaw hybrid welding of austenitic stainless steel [J]. *J. Laser Appl.*, 2010, **22**(2): 79~85
- Y. Naito, S. Katayama, A. Matsunawa. Keyhole behavior and liquid flow in molten pool during laser-arc hybrid welding [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 357~362
- Y. Naito, M. Mizutani, S. Katayama. Penetration characteristics in YAG laser and tig arc hybrid welding, and arc and plasma/plume behavior during welding. Welding phenomena in hybrid welding using YAG laser and tig arc [J]. *Weld. Inter.*, 2006, **20**(10): 777~784

- 32 Wu Shikai. Investigation on Laser-Arc Interaction and Novel Laser-TIG Arc Hybrid Welding Processes[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010
吴世凯. 激光-电弧相互作用及激光-TIG 复合焊接新工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010
- 33 Chen Yanbin, Chen Jie, Li Liqun *et al.*. Properties of arc and weld in laser-tig hybrid process[J]. *Trans. China Weld. Inst.*, 2003, **24**(1): 55~57
- 34 C. Thomy, F. Vollertsen. Influence of magnetic fields on dilution during laser welding of aluminium[J]. *Adv. Mater. Res.*, 2005, **6-8**: 179~186
- 35 H. C. Tse, H. C. Man, T. M. Yue. Effect of magnetic field on plasma control during CO₂ laser welding[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1999, **31**(5): 363~368
- 36 J. Zhou, H. L. Tsai, Asme. Application of electromagnetic force in laser welding[C]. Seattle: ASME 2007 International Engineering Congress and Exposition, 2008. 1025~1030
- 37 H. C. Tse, H. C. Man, T. M. Yue. Effect of magnetic field on plasma control during CO₂ laser welding[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1999, **31**(35): 363~368
- 38 Yoshiaki Arata, Nobuyuki Abe, Tatsiharu Oda. Fundamental phenomena in high power CO₂ laser welding[J]. *Trans. JWRI*, 1985, **14**(1): 5~11
- 39 Katayama S., Kobayashi Y., Mizutani M. *et al.*. Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. *J. Laser Appl.*, 2001, **13**(5): 187~192
- 40 S. Spruk, L. Koller, D. Railic *et al.*. Vacuum tight laser welds [J]. *Vacuum*, 1992, **43**(5-7): 769~771
- 41 Zhao Haiyan, Niu Wenchong, Zhang Bin *et al.*. Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2011, **44**(48): 485302
- 42 Y. Javid, M. Ghoreishi, S. Shamsaei. A three-dimensional heat transfer simulation of laser full penetration welding of rene-80 super alloy[J]. *Lasers in Engng.*, 2012, **22**(1-2): 1~11
- 43 Y. Peng, W. Z. Chen, C. Wang *et al.*. The behavior and its control of plasma produced during laser welding [C]. Jacksonville: Congress on ICALEO 2001: Application of Laser & Electro-Optics, 2001. 475~482
- 44 G. Ehlen, A. Ludwig, P. R. Sahn. Simulation of time-dependent pool shape during laser spot welding: Transient effects [J]. *Metall. & Mater. Trans. a-Phys. Metall. & Mater. Sci.*, 2003, **34A**(12): 2947~2961
- 45 B. Ribic, R. Rai, T. DebRoy. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in gta/laser hybrid welding[J]. *Sci. & Technol. Weld. & Join.*, 2008, **13**(8): 683~693
- 46 D. V. Bedenko, O. B. Kovalev, I. V. Krivtsun. Simulation of plasma dynamics in a keyhole during laser welding of metal with deep penetration[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, **43**(10): 105501
- 47 J. Zhou, H. L. Tsai. Effects of electromagnetic force on melt flow and porosity prevention in pulsed laser keyhole welding[J]. *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 2007, **50**(11-12): 2217~2235
- 48 Pang Shengyong, Chen Liliang, Zhou Jianxin *et al.*. A three-dimensional sharp interface model for self-consistent keyhole and weld pool dynamics in deep penetration laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2011, **44**(2): 025301

栏目编辑: 宋梅梅