

# 负压激光焊接技术研究进展

王天鸽<sup>1,2,3</sup>, 唐新华<sup>1,2,3</sup>

- (1. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;  
2. 上海交通大学上海市激光制造与材料表面改性重点实验室, 上海 200240;  
3. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**[摘要]** 传统焊接方法难以满足大型构件厚板焊接对焊接效率和焊接质量的要求, 而高功率激光焊接具有能量密度大、焊接效率高、焊缝深宽比大、接头质量高等特点, 成为业界研究和应用的热点。然而近年来的研究发现, 激光功率增大至一定程度, 由于焊缝熔池的液体金属在激光作用下强烈蒸发而产生的金属蒸气和等离子羽烟对激光产生了吸收、折射、散射等屏蔽作用, 使激光能量进入熔池小孔受阻, 焊接熔深不再随激光功率线性增加。而负压环境却能使相同激光功率下的焊接熔深得到大幅度提升, 获得成形良好的焊缝。根据近些年国内外学者在负压激光焊接方面的研究, 综合介绍了负压环境下的激光焊接及其相关问题的研究进展, 以期对国内相关研究发展起到促进作用。

**关键词:** 负压激光焊接; 熔深; 气孔; 熔池行为; 等离子羽烟

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.048



王天鸽

硕士研究生, 研究方向为铝合金负压激光焊接。

在能源设备、大型船舰、核电压力容器以及近年来发展迅速的轨道车辆、超高层建筑的大型构件中, 厚板的焊接效率和质量一直是人们普遍

关注的重要问题, 成为近些年的研究热点。在目前的实际工程应用中, 厚板的焊接方法依然以传统的焊条电弧焊(SMAW)、埋弧焊(SAW)、熔化极气体保护焊(GMAW), 以及非熔化极气体保护焊(GTAW)等为主, 然而这些焊接方法有一些相似的缺点: 一是需要坡口较大, 所需的焊材填充量比较大, 往往需要多层多道焊, 能耗多、速度慢、焊接时间长、焊接效率低; 二是电弧焊的热输入大, 但电弧能量密度低, 导致焊缝熔深小而热影响区宽, 进而造成焊接变形大, 焊缝中残余应力高, 接头质量差。面对这些问题, 通过减小坡口宽度, 降低焊材填充量的焊接方法——窄间隙焊接得到了发展, 其中以窄间隙埋弧焊、窄间隙 GTAW 焊、窄间隙 GMAW 焊较为流行, 这些焊接方法虽然在很大程度上减少了焊材的填充量, 也提高了效率, 并在一定程度上降低了焊接变形和残余应力, 但是这些方法的

实质是电弧焊, 依然保留了电弧焊热输入大、能量密度低的特点, 热影响区宽、晶粒粗大、变形大和残余应力高等问题依然存在, 接头的焊接质量和力学性能依然需要进一步提高。此外, 窄间隙焊接也容易导致侧壁未熔合等焊接缺陷, 焊接过程控制难度较高。相比于传统电弧焊, 高功率激光焊具有诸多优点, 焊接效率和接头质量有明显提升。但激光焊接目前主要应用在薄板焊接上, 且主要集中在汽车制造以及航空航天领域<sup>[1-4]</sup>, 而厚板焊接的应用相对较少。其原因之一是目前主流的商用激光器的输出功率较小, 一般在 10kW 以下, 激光的穿透能力相对较低; 而输出功率在 20kW 以上的高功率激光器价格又极其昂贵, 难以获得普及和推广。近年来, 随着高功率激光技术的发展, 高端的高功率激光器价格有望得到进一步降低, 为厚板激光焊接提供应用基础和前景。厚板激光深熔

焊接的研究越来越多,如何在一定的激光功率条件下获得焊缝深宽比尽可能大、质量高的焊接接头已成为厚板激光焊接的研究热点之一。

## 激光深熔焊及相关问题

### 1 激光深熔焊原理

高功率激光能实现厚板深熔焊接的主要原理是:待焊工件在高功率激光束的辐射作用下,光子能量迅速转化为材料表面的电子激发能,进而转化为热能,金属表面受热迅速熔化形成熔池,进而产生汽化,而剧烈汽化产生的金属蒸气对金属熔池表面有反冲作用,这种反冲作用使液态熔池表面形成一个凹坑,随着焊接的进行,持续不断的激光能量使液态熔池表面的金属蒸发不断加剧,与此同时,向外喷发的金属蒸气反作用力将凹坑内熔化的液态金属排向熔池周围,使凹坑底部继续暴露在激光的直接作用下,产生进一步的汽化,凹坑进一步加深,最后形成一个小孔。直至液态熔池小孔内的多个力达到平衡,小孔深度不再继续增加而趋于稳定,最终形成熔深较大的焊缝。

### 2 激光深熔焊几个关键问题

激光深熔焊具有热输入小、焊接熔深大、热影响区窄、焊接速度快、焊缝质量高等诸多特点,在中厚板焊接中具有明显的优势。但其在实施过程中也伴随一些不利因素,主要体现在以下几个方面:

(1)激光深熔焊的焊接质量与焊接过程中熔池的行为有很大关系,匙孔波动、周围的熔池液态金属的流动规律、动力学行为与焊接过程中气孔等缺陷的形成密切相关,良好的焊缝成形需要有稳定的匙孔。然而在实际的深熔焊过程中,匙孔壁常常处于波动状态中,一方面匙孔前壁上的凸起在高功率激光辐照下产生的金属蒸气会对匙孔后壁处的熔池金属造成冲击;另一方面向匙孔外喷射的蒸气流速接近声速,会在颈口处产

生一个低气压区,引起熔池的振荡,不利于液态金属中气泡溢出,因此改善熔池的流动行为是提高激光深熔焊接质量的关键。

(2)激光深熔焊过程中,从小孔中喷发的金属蒸气在激光的强烈作用下部分产生电离,形成等离子体,其与金属蒸气一起混合形成等离子羽烟(plasma plume),随着激光功率增加,等离子羽烟也会急剧增多。这些等离子体羽烟既存在于匙孔中,也存在于匙孔上方。它们通过逆韧致吸收效应对激光具有较强的吸收作用,同时还对激光具有折射和散射作用,使激光束在向熔池小孔底部传输的过程中一部分能量被等离子羽烟吸收、折射或散射,激光束的能量被衰减,其利用率因此降低<sup>[5]</sup>,当激光功率高达一定程度,焊接熔深难以随激光功率的增大呈线性增加。所以,减少或抑制焊接过程中的等离子羽烟,成为提高激光利用率、增加熔深、提升焊缝质量的关键。

(3)焊接熔深在一定范围内与激光功率呈正相关,因此在一定范围内,大的焊接熔深依然需要更高的激光功率,在目前的技术和市场条件下,高功率的激光器设备较为昂贵,采用更高的激光功率又意味着焊接成本的增加。

### 3 提高焊接熔深的方法

近年来高功率激光器相继问世,高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展<sup>[6]</sup>,使光纤激光器的输出功率得到了快速提升,其中IPG公司生产的光纤激光器功率可达100kW<sup>[7]</sup>,2009年研制的单模激光器,输出功率可达10kW,同时拥有大功率和高光束质量<sup>[8]</sup>。因此,从激光器的制造技术来说,采用高功率的激光器进行厚板激光深熔焊已完全具有可能。然而,由于前面所提及的原因,实际应用中焊接熔深与激光功率并非线性关系,当激光功率达到一定程度后,继续增大激光功率并不

能使焊接熔深继续增加。针对这个问题,国内外许多学者开展了相应的研究<sup>[9-10]</sup>,普遍认为,提高激光焊接熔深的关键之一在于减少等离子体及金属蒸气羽烟,传统方法主要有侧吹法<sup>[11-13]</sup>、侧吸法以及真空法<sup>[14]</sup>等。这几种方法各有优缺点:侧吹法是通过侧吹惰性气体进行保护,操作起来比较简单,所以应用较为广泛,但是这种方法只能带走部分等离子体及金属蒸气羽烟,抑制作用比较有限,稳定性也比较差,特别是由于外部气体吹入熔池,对熔池具有一定的冷却作用,吸收小部分激光能量,同时,侧吹气体遇高温等离子体及金属蒸气羽烟会迅速膨胀,对熔池产生一定的冲击作用,这个冲击作用一方面阻碍了小孔中等离子蒸气羽烟的顺利喷出,使等离子蒸气羽烟在小孔中产生波动,容易导致小孔不稳定乃至坍塌,从而造成焊缝尖端产生工艺性气孔;另一方面这个冲击作用也会对熔池本身产生一定影响,使焊缝表面成形不稳定。侧吸法与侧吹法类似,只是通过抽气方式带走部分等离子体及金属蒸气羽烟,但是抽气过程中会有空气进入熔池周围局部区域,会对焊接熔池造成一定程度的氧化,也会使焊缝出现气孔等缺陷。

相比之下,真空法可以较为彻底地去除等离子蒸气羽烟,从而达到增大焊接熔深、减少气孔、增强对熔池的保护等目的。但相比较于侧吹和侧吸法,真空的焊接环境对焊接装置提出了更高要求。基于此,国内外许多学者针对负压(即压强低于正常大气压)环境下的激光焊接进行了研究,希望能在降低对环境真空度要求的同时,得到焊接熔深大、成形好的焊缝,以提高激光束能量的利用率和一定激光功率条件下的焊缝穿透力,从而提高厚板激光焊接的效率。

## 负压激光焊接技术研究进展

### 1 负压激光焊接焊缝成形

国内外许多学者研究发现,在低于大气压力的环境下进行高功率激光焊接,随着环境压力的变化,焊缝表面成形、焊缝熔深以及气孔缺陷等均有明显变化。

20世纪80年代,日本大阪大学 Arata 等<sup>[15]</sup>提出了真空焊的想法,采用 CO<sub>2</sub> 激光焊接,在 10<sup>5</sup>~10<sup>-3</sup>Pa 环境压力下进行了研究。研究结果表明在该焊接条件下,等离子体几乎完全被抑制,并且随着环境压力的减小,熔深增大。当功率为 11kW,焊速为 10cm/min,压强为 0.13Pa 时,熔深可超过 40mm。Katayama 等<sup>[16]</sup>对负压下的激光焊接进行了许多研究,使用 CO<sub>2</sub> 激光器和 YAG 激光器在负压环境下对 304 不锈钢和 A5083 铝合金分别进行了激光焊接。试验结果表明,两种激光器在负压环境下焊接得到的焊缝熔深都有一定增加,并且焊缝成形质量提高,气孔数量明显减少,当压强为 0.4kPa 时,不锈钢和铝合金焊缝中无可见气孔。2011 年 Katayama 等<sup>[17]</sup>又设计了新的负压焊接装置,使用两个 Disk 激光器在不同环境压力下对 304 不锈钢和 A5052 铝合金分别进行焊接。结果表明,当压强低至 1kPa 及以下时,焊缝表面形成驼峰焊道,观察焊缝横截面可发现,焊缝的截面形状发生改变,熔深中部出现一个颈结,与此同时,熔深进一步增加,当焊接速度为 0.3m/min 时,不锈钢的熔深可达 70mm,如表 1<sup>[17]</sup>所示。2015 年, Katayama 等<sup>[18]</sup>采用 100kW 超高功率光纤激光器在负压下焊接不锈钢,结果显示,当激光功率为 50kW,环境压力为 0.1kPa 时,焊缝熔深达到约 100mm。但通过焊缝横截面可明显看到,当功率高于 30kW 后,焊缝中出现较大孔洞,如表 2<sup>[18]</sup>所示。Reisgen 等<sup>[19]</sup>使用固体激光器 4~8kW 的焊接功率,在负压环境中焊接了厚板铜合金,铜与铝相似,具有很大的激光反射率,结果表明负压

焊接过程中的金属蒸气明显减少,焊缝熔深可达 3~8 mm。

国内学者也进行了一系列研究,曹丽杰等<sup>[20]</sup>采用 CO<sub>2</sub> 激光器对 4mm 厚不锈钢在不同压强下激光焊接,探究不同的压强对焊缝成形的影响。试验采用了 He、N<sub>2</sub>、Ar 3 种不同气体作为环境保护气体,结果表明,随着压强减少,焊缝熔深增加,焊接过程中产生的等离子体也越少。包海涛等<sup>[21]</sup>采用 YAG 激光器对 3mm 厚不锈钢进行负压激光焊,改变环境压力,分析了不同环境下的能量输入及焊缝熔深,试验结果表明,负压下焊缝表面成形良好,焊接熔深也随压强减小而增加。哈工大 Cai 等<sup>[5]</sup>用 5kW 光纤激光器焊接 10mm 厚 A5083 铝合金板,研究发现,在相同焊接速度下,常压下熔深为 4.9mm,10Pa 时熔深可达 8.7mm,不仅熔深大幅度增加,气孔也得到了减少(图 1),而焊

缝的拉伸性能几乎没有变化。

## 2 负压激光焊接小孔行为

负压下,熔池流动形式发生了改变,小孔也趋于稳定,液态金属流动方式的改变利于熔池内气泡的溢出,小孔状态的稳定也减弱了激光的衰减。

20世纪90年代,法国学者 Verwaerde 等<sup>[22]</sup>选用 CO<sub>2</sub> 激光器在真空下进行试验,发现在真空下,小孔对能量的吸收方式只能通过侧壁进行菲涅尔吸收,常压下的逆韧致辐射吸收方式已不复存在。负压下,等离子体几乎完全被抑制,小孔对能量的吸收减弱,能量利用率高,使焊接熔深增大。Katayama 等<sup>[12,16-17]</sup>一系列研究表明,负压与常压下的熔池流动方式不同。常压下,液态金属从小孔尖端先向下流动,经过熔池底部后再沿后壁向熔池后部流动,此时金属液中的气泡容易滞留在小孔底部形

表1 不同压力下304不锈钢激光焊接的焊缝表面及横截面

位置	压强			
	0.1kPa	1kPa	10kPa	常压
焊缝表面				
焊缝横截面				

表2 0.1kPa环境压力下10~50kW激光焊接的焊缝表面及横截面

位置	激光功率 /kW				
	10	20	30	40	50
焊缝表面					
焊缝横截面					

成气孔。在负压环境下,液态金属直接沿小孔壁直接向上流动至熔池表面,再由熔池表面向熔池后方流动,气泡很容易溢出。研究表明,压强为 0.4kPa 时焊缝中的气孔消失。Cai 等<sup>[5]</sup>采用 5kW 光纤激光器分别在大气环境及负压环境下对 10mm 厚 A5083 铝合金进行激光焊接,并对比两种条件下小孔及熔池行为(图 2<sup>[5]</sup>)。通过研究不同气压下熔池流动及焊缝内气孔,得出气孔与熔池流动的关系,认为气孔的产生与匙孔的稳定性以及匙孔内金属流动模式有关,等离子羽烟的折射作用会影响匙孔的稳定状态,同时激光能量也被减弱,小孔壁的坍塌会造成气孔。而在负压环境下,匙孔前壁几乎与工件表

面垂直,且匙孔底部宽度加大,金属向上流动,利于气孔释出。此外,一些研究还发现,随着环境压力降低,匙孔内电子密度也降低,逆韧致吸收减少,匙孔对激光的吸收主要为菲涅尔吸收,因此可以使熔深增加<sup>[23-26]</sup>。Sokolov 等<sup>[27]</sup>的研究表明,在负压下进行焊接,钢的熔深增加了一倍以上。

焊接过程的熔池流动往往不易观察,尤其是在封闭试验空间中。Pang 等<sup>[24]</sup>采用模拟手段对负压激光焊接过程中的熔池流动及小孔行为进行研究。通过模拟,认为负压下小孔侧壁温度的变化是引发熔深增加的重要原因。通过其计算模型对 304 不锈钢在负压下的激光焊接过

程进行模拟,当功率为 2kW 时,得到真空环境下小孔侧壁温度比常压下减少 600K,这一定程度上验证了他们提出的理论。Fabbro 等<sup>[28]</sup>研究了负压条件下对激光深熔焊有所改进的不同物理机理,认为负压下激光焊接熔深增加主要是由于蒸发温度降低,每单位熔深所需要的能量降低,所以入射的激光能量可以到达更深的距离。

### 3 负压激光焊接等离子体行为

环境压力的降低明显改变了焊接过程中的等离子体行为,小孔内及小孔上方的金属蒸气羽烟随之减少。2013 年 Börner 等<sup>[29]</sup>使用 CO<sub>2</sub> 激光器对 10mm 厚钢板进行焊接,研究真空环境对焊接过程中等离子体的影响,结果表明当压强降至 1kPa 时,等离子体几乎消失。上海交通大学罗燕等<sup>[30-34]</sup>搭建了基于全封闭及半封闭负压腔的试验平台,研究了负压下激光焊接等离子体的频谱变化规律及金属羽烟对激光能量的衰减作用,认为金属蒸气羽烟的亮度、尺寸、温度等随着环境压力的降低都有不同程度的减小,如图 3<sup>[32]</sup>所示,当压强为 3kPa 时,扇状羽烟已消失,仅剩接近匙孔的孔口区域有小尺寸的明亮区。

金属蒸气羽烟的屏蔽和折射作用使其既吸收了激光能量,又改变了激光的传播角度,使激光无法直入小孔底部。Jiang 等<sup>[35]</sup>采用探测激光,研究其从侧面穿过蒸气羽烟后的偏转角,接收屏上采集到的探测激光光点见表 3<sup>[35]</sup>,发现负压下等离子体对激光的衰减及折射作用得到了减弱,对比常压和 5kPa 的焊接环境,激光的偏转角由 1.76mrad 减少至 0.06mrad,激光的衰减率由 17.2% 减少至 3%。

### 4 负压激光焊接装置研究

为了控制焊接环境,同时便于焊接过程的观察,不少学者对负压焊接的装置进行了研究,设计了真空腔以

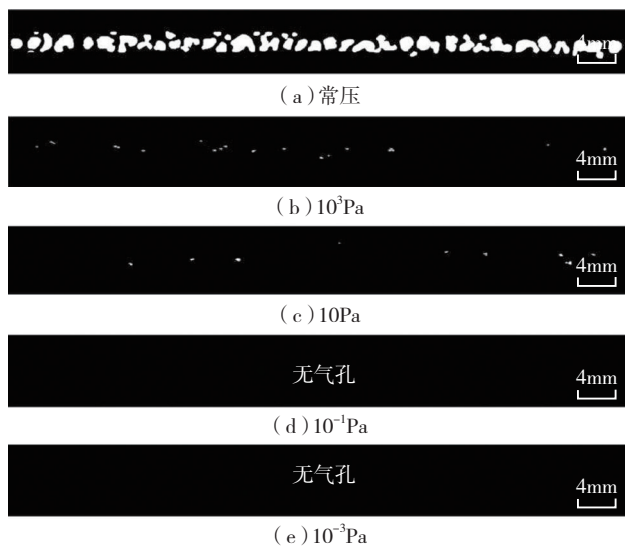
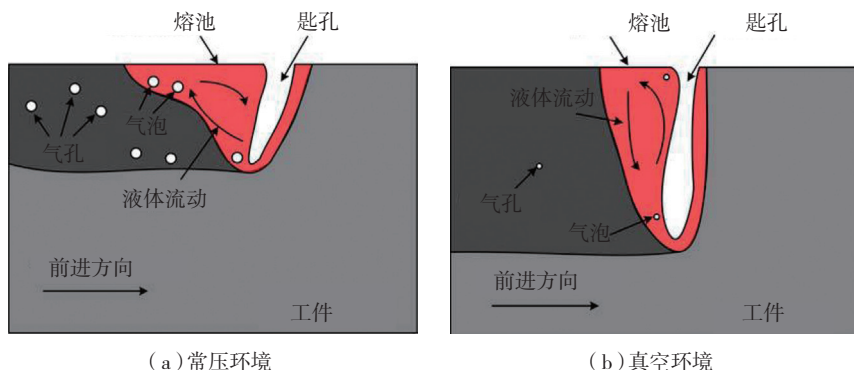


图1 不同环境压力下的焊接气孔缺陷

Fig.1 Weld porosity defects under different ambient pressures



(a) 常压环境

(b) 真空环境

图2 熔池流动示意图

Fig.2 Schematic illustration of liquid flow in molten pool

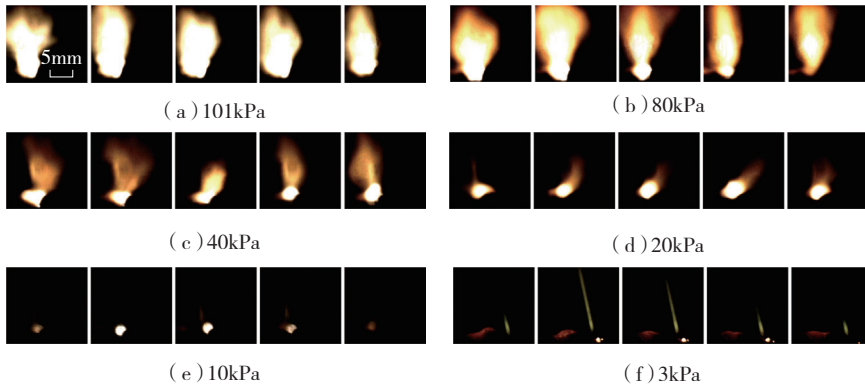


图3 不同压强下的金属蒸气羽烟 (采集频率1000f/s)

Fig.3 Plasma plume under different pressures

表3 不同压强下的偏转角和位置分布

环境压力 /kPa	101	50	10
偏转角			
环境压力 /kPa	5	1kPa	0.5kPa
偏转角			

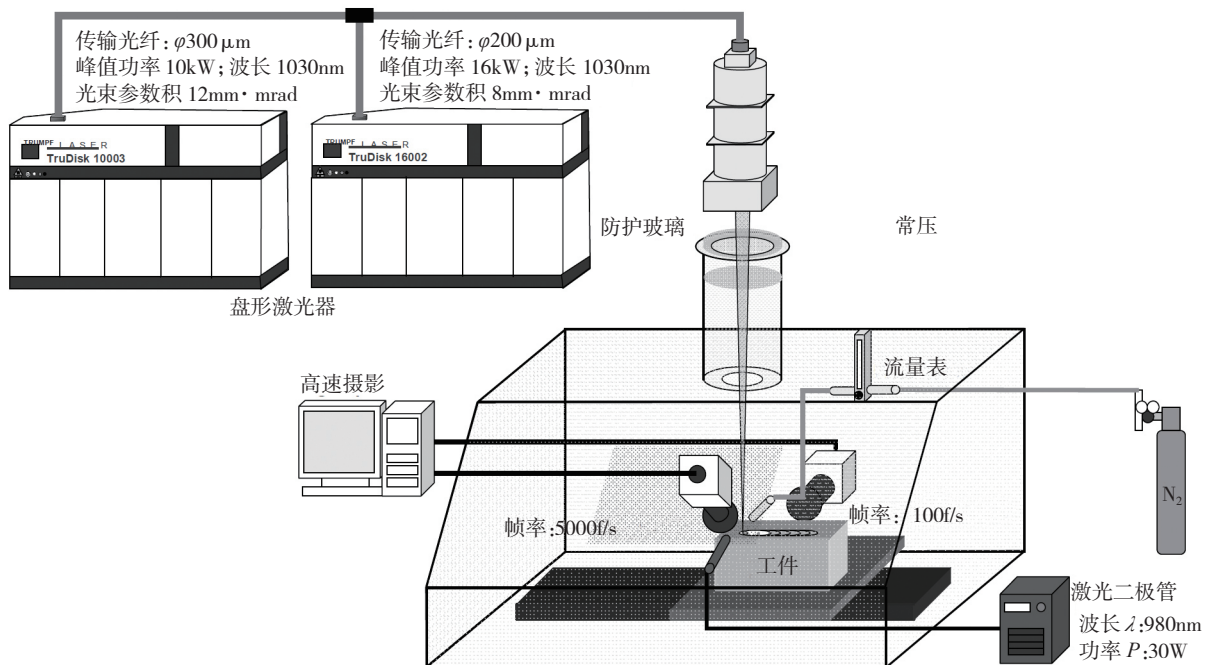


图4 真空激光焊试验装置

Fig.4 Schematic diagram of modified vacuum welding experimental device

及局部负压装置。2001年 Katayama 等<sup>[16]</sup>设计了一套与 YAG 激光器相连的激光焊接真空装置,并于 2011 年对其进行了改进<sup>[17]</sup>,整个系统由两种功率不同的盘形激光器、真空腔、抽气泵等构成,采用 N<sub>2</sub> 作为保护气体,同时增加了焊接过程的观察角度,如图 4<sup>[17]</sup>所示。采用此装置进行负压激光焊接试验,结果表明负压环境使焊缝熔深大幅度增大,飞溅明显减少。

负压激光焊接的研究目的往往是针对厚板焊接,在实际应用过程中厚板多是大构件,因此仅仅是提供一个封闭的焊接环境无法满足实际生产中构件焊接的尺寸要求。如何让大构件的局部能在负压的环境下进行焊接,成为未来负压焊接方法实际生产应用的关键。

罗燕等<sup>[33]</sup>设计了真空腔及局部负压装置,整个焊接系统由光纤激光器、抽气系统、水冷装置以及局部负压腔构成,如图 5<sup>[33]</sup>所示,采用 2~8kW 激光功率对 16Mn 钢进行局部负压激光焊接试验,试验设定环境

压力为 25kPa。试验过程中,由于工件与腔体的相对运动,使得气密性难以保证,因此实际压强为 35kPa,这说明设备在焊接过程中并不能良好地密封,仍需进一步改善。

2015 年, Schneider 等<sup>[36-37]</sup> 制作了一套局部负压装置对 S335 钢进行焊接,并利用空气动力学实现局部负压,如图 6<sup>[36]</sup>、图 7<sup>[37]</sup> 所示。此结构可以在焊接过程中的相互作用区周围产生 20kPa 的压强。在结构内部,有一个由拉瓦尔喷管组成的空气动力学窗,它使空腔内部的负压与大气压分离,气流通过喷管中的收缩与扩展区后,流速以超音速流入拱形路径。拱形区域根据涡流势能原则设计,可在漩涡中心产生同轴气流。随着与漩涡中心的距离增大,流速减慢而压强增加。此时,漩涡中心的腔内压力比远处的环境压力更低,并在周围形成一个负压区域。送入空气动力学窗的压缩气体需达到 0.5~1MPa。负压装置被安装在激光头上,并且维持恒定的焦距不变,整个装置在焊接不同板厚的试板时是可以调节的。Schneider 等用此装置进行了试验,在试验过程中,真空帽内压强为 20kPa,结果表明,在焊接速度小于 1m/min 时,熔深增加了 50%。

## 结论

随着高功率激光器的发展,激光焊接技术的研究逐渐从薄板深入到大厚板的焊接。但在激光深熔焊接过程中,等离子体及金属蒸汽羽烟会随功率增大而急剧增多,其对激光的屏蔽和衰减作用降低了能量的利用率,减少了激光能到达的深度,衰减的能量和波动的熔池不利于焊缝成形质量控制。负压环境可以使等离子蒸汽羽烟减少,焊缝熔深增大,提高能量的利用率。同时,负压条件下熔池流动机制与小孔行为的变化,使得匙孔更加稳定,减少了焊缝中的气孔缺陷,明显提高了焊缝质量。局部

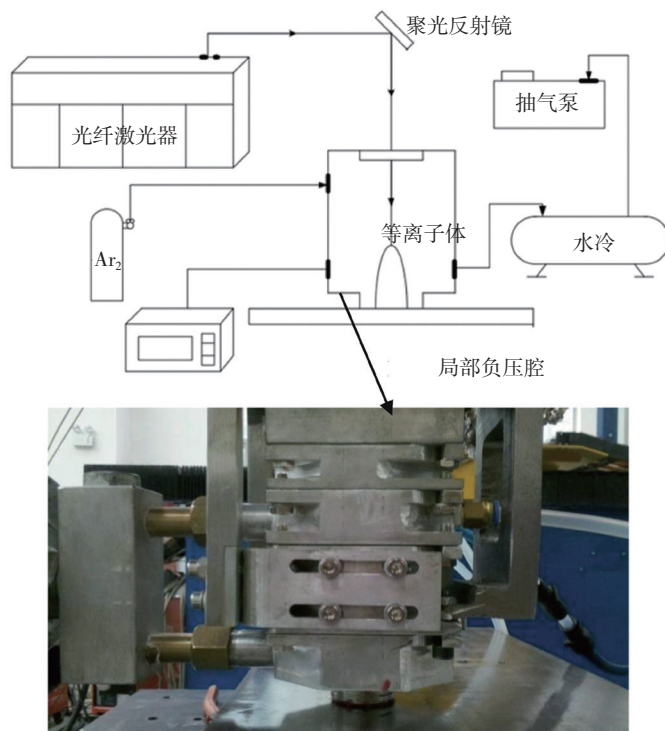


图5 局部负压激光焊接装置

Fig.5 Experimental setup for laser welding under subatmospheric pressure

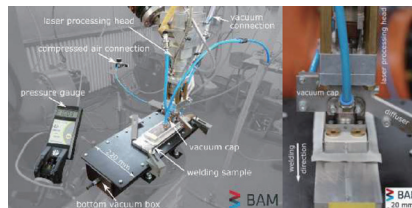


图6 负压装置

Fig.6 Experimental setup of under subatmospheric pressure

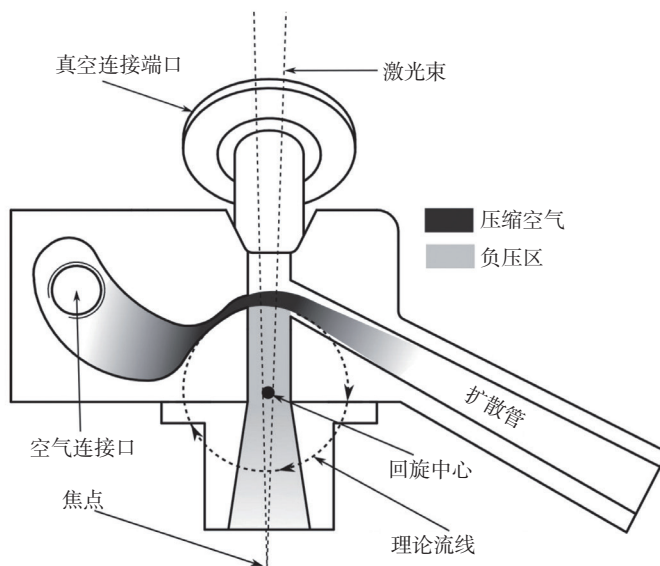


图7 真空帽内部结构

Fig.7 Interior structure of vacuum cap

负压装置的设计与研究,也为未来负压焊接方法在实际生产中的应用提供了思路。负压激光焊接技术的研究会对未来激光焊接应用于大构件厚板焊接有十分重要的作用。

### 参考文献

[1] WU Q, GONG J, CHEN G, et al. Research on laser welding of vehicle body[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(2): 420-426.

[2] BORRISUTHEKUL R, MIYASHITA Y, MUTOH Y. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-0[J]. Science & Technology of Advanced Materials, 2005, 6(2): 199-204.

[3] IQBAL S, GUALINI M M S, REHMAN A U. Dual beam method for laser welding of galvanized steel: experimentation and prospects[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(1): 93-98.

[4] ZHAO Y, ZHANG Y, HU W, et al. Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(9): 1267-1273.

[5] CAI C, PENG G C, LI L Q, et al. Comparative study on laser welding characteristics of aluminium alloy under atmospheric and subatmospheric pressures[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2014, 19(7): 547-553.

[6] 王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 45-58.

WANG Shiling, FANG Fengzhou. High power laser and its development[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 45-58.

[7] GAPONTSEV V P, FOMIN V, OUNT A, et al. 100kW ytterbium fiber laser[C]// Proceedings of Optoelectronics'99 - Integrated Optoelectronic Devices. San Jose, 1999.

[8] CUI L, ZHANG Y C, HE D Y, et al. Research progress of high power fiber laser welding[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 154-159.

[9] 黄坚, 李铸国, 唐新华. 中厚板的高功率激光焊接[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 26-29.

HUANG Jian, LI Zhuguo, TANG Xinhua. High-power laser welding of plate[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(2): 26-29.

[10] 吴世凯, 肖荣诗, 陈铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.

WU Shikai, XIAO Rongshi, CHEN Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.

[11] WANG C M, MENG X X, HUANG W, et al. Role of side assisting gas on plasma and energy transmission during CO<sub>2</sub> laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 668-674.

[12] KATAYAMA S, KAWAHITO Y, MIZUTANI M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 9-17.

[13] 李耿, 张林, 高明, 等. 保护气体对不锈钢光纤激光焊接的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23): 126-129.

LI Geng, ZHANG Lin, GAO Ming, et al. Influence of shielding gas on fiber laser welding of stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(23): 126-129.

[14] YANG S, WANG J, CARLSON B E, et al. Vacuum-assisted laser welding of zinc-coated steels in a gap-free lap joint configuration[J]. Welding Journal, 2013, 92(7): 197-204.

[15] ARATA Y, ABE N, ODA T, et al. Fundamental phenomena during vacuum laser welding[M]. Orlando: Laser Institute of America, 1985.

[16] KATAYAMA S, KOBAYASHI Y, MIZUTANI M, et al. Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(5): 187-192.

[17] KATAYAMA S, YOHEI A, MIZUTANI M, et al. Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 75-80.

[18] KATAYAMA S, MIZUTANI M, KAWAHITO Y, et al. Fundamental research of 100kW fiber laser welding technology[C]// Proceeding of Lasers in Manufacturing Conference. Munich, 2015.

[19] REISGEN U, OLSCHOK S, TURNER C. Welding of thick plate copper with laser beam welding under vacuum[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(2): 022402.

[20] 曹丽杰, 张朝民. 气体对激光焊接熔深和等离子体行为的影响[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2001, 19(2): 171-174.

学报(自然科学版), 2001, 19(2): 171-174.

CAO Lijie, ZHANG Chaomin. Effect of gas on penetration depth[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2001, 19(2): 171-174.

[21] 包海涛, 刘金合, 刘锟, 等. 低功率YAG激光真空焊接工艺[J]. 航空制造技术, 2008, 51(23): 92-95.

BAO Haitao, LIU Jinhe, LIU Kun, et al. Low-power YAG Laser welding process under vacuum condition[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(23): 92-95.

[22] VERWAERDE A, FABBRO R, DESHORS G. Experimental study of continuous CO<sub>2</sub> laser welding at subatmospheric pressures[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(5): 2981-2984.

[23] SVENUNGSSON J, CHOQUET I, KAPLAN A F. Laser welding process—a review of keyhole welding modelling[J]. Physics Procedia, 2015, 78: 182-191.

[24] PANG S, CHEN L, ZHOU J, et al. A three-dimensional sharp interface model for self-consistent keyhole and weld pool dynamics in deep penetration laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 44(2): 025301.

[25] FABBRO R. Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(44): 445501.

[26] COURTOIS M, CARIN M, LE MASSON P, et al. A complete model of keyhole and melt pool dynamics to analyze instabilities and collapse during laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2014, 26(4): 042001.

[27] SOKOLOV M, SALMINEN A, KATAYAMA S, et al. Reduced pressure laser welding of thick section structural steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219: 278-285.

[28] FABBRO R, HIRANO K, PANG S. Analysis of the physical processes occurring during deep penetration laser welding under reduced pressure[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022427.

[29] BÖRNER C, KRÜSSEL T, DILGER K. Process characteristics of laser beam welding at reduced ambient pressure[C]//Proceedings of the SPIE, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications II. San Francisco, 2013.

[30] LUO Y, TANG X H, DENG S J, et al. (下转第66页)

treatment (PWHT). The results show that the levels of longitudinal and transverse residual stress is all high on the weldment surface. The residual stresses on the lower surface are little higher than that on the upper surface, especially for transverse residual stress. The residual stresses peak value of the weldment exists in the high temperature heat affect zone, which reaches 50%–60% of the material yield strength. After 650°C vacuum post-welding heat treatment, longitudinal and transverse stresses on the weldment surface are significantly reduced, maximum stress reduction is more than 50%, the residual stress peak value left on the surface doesn't exceed 200MPa, and the original welding residual stresses on the surface go to redistribute.

**Keywords:** TC4 Ti-alloy; Narrow gap TIG welding; Residual stress; Vacuum post-welding heat treatment; Indentation strain-gage method

(责编 逸飞)

(上接第54页)

al. Dynamic coupling between molten pool and metallic vapor ejection for fiber laser welding under subatmospheric pressure[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 431–438.

[31] LUO Y, TANG X H, LU F G, et al. Spatial distribution characteristics of plasma plume on attenuation of laser radiation under subatmospheric pressure[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 1090–1096.

[32] LUO Y, TANG X H, LU F G, et al. Effect of subatmospheric pressure on plasma plume in fiber laser welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 219–224.

[33] LUO Y, TANG X H, LU F G.

Experimental study on deep penetrated laser welding under local subatmospheric pressure[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(5–8): 699–706.

[34] 罗燕, 唐新华, 芦凤桂, 等. 局部负压激光焊缝成形特点及其影响因素[J]. *中国激光*, 2014(6): 96–101.

LUO Yan, TANG Xinhua, LU Fengui, et al. Effects of welding parameters on bead formation of laser welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2014(6): 96–101.

[35] JIANG M, TAO W, WANG S L, et al. Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding[J]. *Vacuum*, 2017, 138: 70–79.

[36] SCHNEIDER A, GUMENYUK A, RETHMEIER M. Mobile vacuum device for laser beam welding of thick materials[C]//Proceeding of 3rd International Conference in Africa and Asia on Welding and Failure Analysis of Engineering Materials. Luxor, 2015.

[37] SCHNEIDER A, GUMENYUK A, RETHMEIER M. Laser beam welding of thick materials under the influence of a local reduced ambient pressure[C]//Proceedings of Conference 8th, Beam Technologies and Laser Application. Petersburg, 2015.

通讯作者: 唐新华, 教授, 研究方向为重大构件材料控性焊接、先进焊接方法与控制, E-mail: xhtang@sjtu.edu.cn。

## Review of Laser Welding Under Subatmospheric Pressure

WANG Tiange<sup>1,2,3</sup>, TANG Xinhua<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

**[ABSTRACT]** Compared with traditional welding methods, high-power laser welding is characterized by high efficiency and good welding quality, especially in the welding process of thick plates. However, it was found out in recent researches when the laser power increased to a certain level, the welding penetration won't get deeper any longer due to the absorption, refraction and the scattering effect of the plasma plume. That is generated by the evaporation of metal, and to prevent the laser beam from entering the keyhole. Welding under subatmospheric pressure is regard as an effective method and has an impressive promotion on both welding penetration and porosity defects. The development of the high-power laser welding under subatmospheric pressure, as well as some relevant issues are summarized according to recent researches.

**Keywords:** Laser welding under subatmospheric pressure; Penetration depth; Porosity; Molten pool behavior; Plasma plume

(责编 李丹)