



## 真空激光焊接技术研究现状与展望

蔡 创<sup>1,2</sup>, 陈 辉<sup>1</sup>, 张卫华<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>西南交通大学材料科学与工程学院, 成都 610003;

<sup>2</sup>西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610003

**摘要:** 真空环境下激光焊接熔深得到显著提高, 焊缝成形及气孔等缺陷得到极大改善, 可以获得常规激光焊接方法难以获得的显著效果。近些年, 有关真空激光焊接过程机理, 低真空甚至局部负压环境激光焊接装置的研究日益完善, 真空激光焊接技术在船舶、核电及压力容器等领域大厚板焊接中展现出良好的应用前景。本文首要概述环境压力变化对激光焊缝熔深, 焊缝表面成形及气孔等缺陷的影响规律, 从焊接过程等离子体羽辉及匙孔、熔池的动态行为特性方面总结国内外学者有关真空激光焊接机理的研究成果, 并介绍了真空焊接技术在工业领域的应用情况, 最后对目前已报道的研究中存在的问题进行分析并对真空焊接技术的发展前景进行展望。

**关键词:** 真空环境; 激光焊接; 等离子体羽辉; 匙孔及熔池行为

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

## Research status and development prospects of laser welding under vacuum

Chuang Cai<sup>1,2</sup>, Hui Chen<sup>1</sup> and Weihua Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610003, China; <sup>2</sup> State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610003, China

**Abstract:** Compared with conventional laser welding, the welding quality was improved significantly while the laser welding was conducted under vacuum. The penetration depth of the weld seam increased sharply. The welding formation was improved and the porosity defects were suppressed effectively. In recent years, numerous researches on the mechanism of welding process, low vacuum and local subatmospheric pressure laser welding equipments have been undertaken. The laser welding under vacuum exhibits the wonderful application prospects to weld the thick plates in the shipbuilding, nuclear instrument and pressure vessel industries. The influences of ambient pressure on the laser welding penetration depth, surface formation and porosity defect were summarized. The domestic and overseas research findings on mechanism of laser welding under vacuum were elaborated from the aspects of plasma plume, keyhole and molten pool behaviors. In addition, the applications of laser welding under vacuum in the industry were introduced. Finally, the problems of reported researches were analyzed and the prospects of the technology were discussed.

**Keywords:** vacuum; laser welding; plasma plume; keyhole and molten pool behaviors

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.10.001

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(10): 945–952

### 1 引言

激光焊接由于其能量密度大自动化程度高, 具备

高质量、低变形、高精度、高效率及高柔性等特点, 已被广泛应用于航空航天、核电、船舶、汽车、电子等领域, 并被称为“21世纪最有发展潜力的高效智能化焊接方法之一”。近年来, 随着大功率、高光束质量激光器制造技术的快速发展, 其在船舶、核电、压力

收稿日期: 2017-08-21; 收到修改稿日期: 2017-09-18

\* E-mail: whzhangswjtu@126.com

容器等工业领域厚板深熔焊方面的应用备受关注。但是,大功率激光焊接过程中,等离子体羽辉对激光的屏蔽作用增强,一方面,致密等离子体羽辉对激光的吸收和散射降低了激光能量的传输效率;另一方面,致密等离子体羽辉对激光的折射影响焊缝的成形。此外,铝合金材料激光深熔焊过程中匙孔的不稳定性和熔池的流动行为对焊缝气孔的影响也是学者们的研究焦点。

目前,学者们抑制等离子体羽辉采取的方法有:

1) 脉冲激光法<sup>[1]</sup>,调整脉冲激光的工艺参数,使脉冲激光作用于等离子体消散时,抑制等离子体对激光的屏蔽作用;

2) 摆动激光法<sup>[2]</sup>,通过激光束沿焊接方向上的来回摆动可有效“规避”等离子体羽辉;

3) 改变保护气成分(采用He和Ar混合保护气)<sup>[3]</sup>,采用He和Ar混合保护气时,等离子体羽辉的温度相比纯Ar气时有明显的降低,He气的加入对等离子体羽辉有一定的抑制作用;

4) 加侧吹气流<sup>[4]</sup>,采用侧吹保护气的方法可以吹散部分等离子体,降低等离子体对激光的折射效应,提高激光能量的传输效率;

5) 外加电磁场<sup>[5,6]</sup>,激光焊接过程中,外加适当的电磁场可以有效“驱散”等离子体,增大激光能量的吸收率。

上述方法虽然在一定程度上增大了激光深熔焊过程中能量的传输效率,但是针对铝合金等材料,对熔深的增大及焊缝成形的改善效果并不明显。

近年来有研究表明,在真空环境下,激光焊缝的熔深显著增大,焊缝气孔缺陷和焊缝成形得到极大的改善。日本的大阪大学,国内的哈尔滨工业大学、上海交通大学、华中科技大学、西北工业大学等单位研究了不锈钢、铝合金和高温合金等材料在真空环境下激光焊接成形特性。基于等离子体形貌及物理特性分析了真空环境下激光能量的传输特性,解释了焊缝熔深增大的原因。基于图像监测、数值模拟的方法分析了环境压力对激光深熔焊过程中匙孔及熔池动态行为的影响。

本文首先简要概述真空激光焊接特性,包括环境压力变化对焊缝熔深、焊缝表面成形及气孔等缺陷的影响规律,从焊接过程等离子体羽辉及匙孔、熔池的动态行为特性方面总结国内外学者有关真空激光焊接机理的研究成果,并介绍了真空焊接技术在工业领域

的应用情况,最后对目前已报道的研究中存在的问题进行分析及真空焊接技术的发展前景进行展望。

## 2 真空环境下激光焊接特性

大阪大学 Arata<sup>[7]</sup>在 1985 年率先开展真空激光焊接的研究,作者发现随着环境压力的减小,钢的激光焊熔深显著增大,当环境压力为  $10^{-3}$  Torr(约 0.1 Pa),激光功率为 11 kW,焊接速度为 10 cm/min 时,焊缝熔深可达到 40 mm,如图 1 所示。基于高速摄像和 X 射线透射结果可知,低真空环境下(低于几 Torr)激光致等离子体几乎完全被抑制,并且匙孔特征与电子束焊接几乎相同。此后真空激光焊接技术的研究未见报道,直到 2001 年,大阪大学 Katayama<sup>[8]</sup>研究了环境压力为 30 Pa~30000 Pa 时不锈钢和铝合金的激光焊接特性,同样,作者发现随着环境压力的减小,焊缝的熔深增大,熔宽变小。

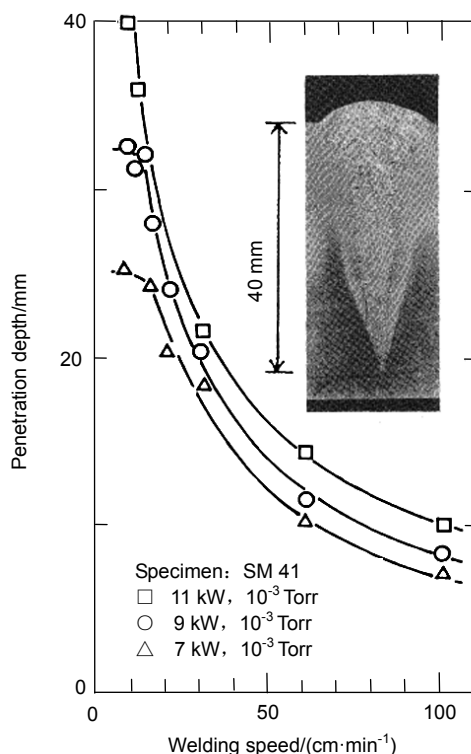


图 1 低真空环境下激光焊缝熔深<sup>[7]</sup>.

Fig. 1 The penetration depth of laser welding under low vacuum<sup>[7]</sup>.

低真空环境下,激光焊接的熔深可大幅增大,在实现大厚板的深熔焊接方面展现出较强的优势。

Katayama<sup>[9, 10]</sup>在 2011 年建立一套可实现大功率真空激

光焊接的装置,如图 2 所示,真空舱内压力可达到 0.1 kPa,组合两台 YAG 激光器使激光输出功率最大可达 26 kW,通过对不锈钢进行真空激光焊接试验(环境压力为 0.1 kPa),发现焊缝熔深最大可达到 73 mm,如图 3 所示。当激光功率较大为 16 kW 时,环境压力降低可以有效抑制焊缝表面的飞溅缺陷,但是,当环境压力低于 1 kPa 时,焊缝出现驼峰缺陷。

从 Katayama 的试验结果可以看出,真空环境下激光焊缝的熔深并非随环境压力的减小线性增大,而是当环境压力低于某一数量级时,焊缝熔深大小趋于稳定,即真空度对焊缝成形和质量的影响存在临界值,

德国学者 Borner<sup>[11]</sup>也发现同样的现象,但是作者并没有对此进行深入的研究。哈尔滨工业大学李俐群<sup>[12, 13]</sup>自主研制一套可实现高真空环境的装置(极限真空度可达到  $10^{-4}$  Pa 数量级),并对真空激光焊接的极限真空度展开系统的研究,作者首先研究了铝合金激光焊缝熔深随焊接环境压力的变化规律,发现当环境压力低于  $10^1$  Pa 时,焊缝熔深基本不再发生变化,如图 4 所示。并且作者也认为焊缝熔深的变化与光致等离子体羽辉特性有关,并观察了铝合金、钛合金、镍基合金和不锈钢真空激光焊接过程中等离子体羽辉形貌,发现当舱内压力低于  $10^1$  Pa 时,等离子体羽辉的截面面积

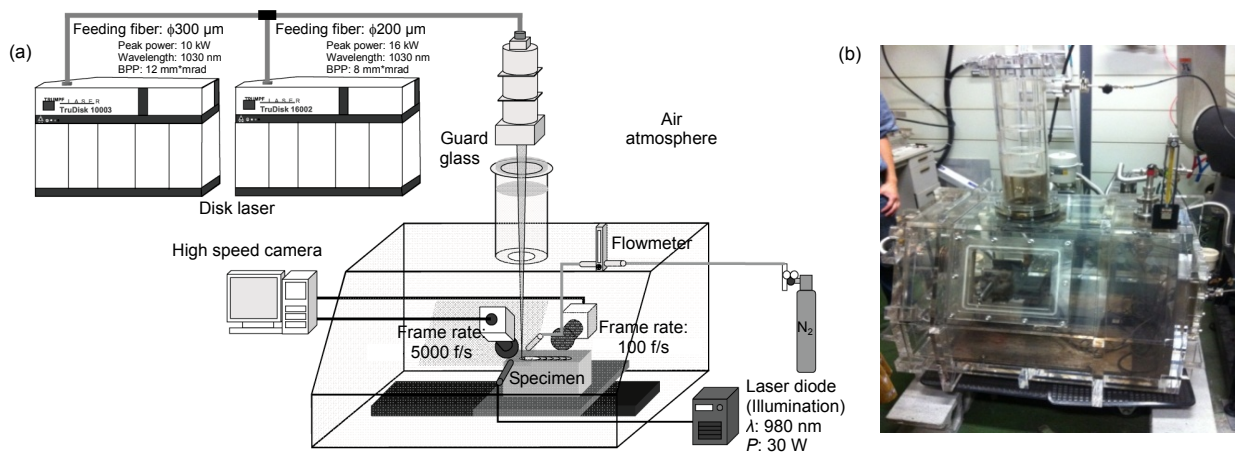


图 2 大功率真空激光焊接装置<sup>[9]</sup>. (a) 总体示意图. (b) 真空舱实物图.

Fig. 2 Vacuum equipment for high-power laser welding<sup>[9]</sup>. (a) Schematic diagram. (b) Photo image of the vacuum chamber.

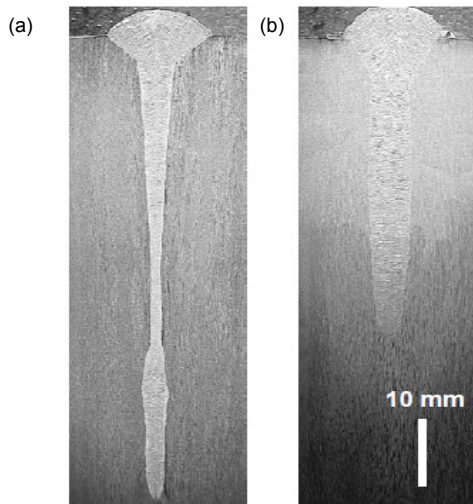


图 3 真空环境下(环境压力 0.1 kPa)不锈钢激光焊缝横截面<sup>[10]</sup>. (a) 离焦量-40 mm. (b) 离焦量+20 mm.

Fig. 3 Cross-sections of laser welds in stainless steel under vacuum (0.1 kPa)<sup>[10]</sup>. (a) Defocused distance of -40 mm. (b) Defocused distance of +20 mm.

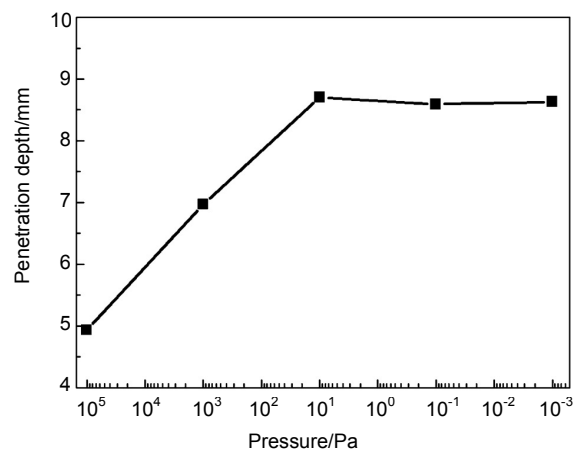


图 4 铝合金激光焊缝熔深随环境压力的变化规律<sup>[12]</sup>.

Fig. 4 The influences of ambient pressure on the penetration depth of laser welded aluminum alloys<sup>[12]</sup>.

变化不明显,如图5所示。作者认为真空激光焊接存在临界真空度,不需要极高的真空度就可以获得熔深较大且气孔缺陷极少的焊缝,并且材料的种类和激光参数对临界真空度的影响不大。

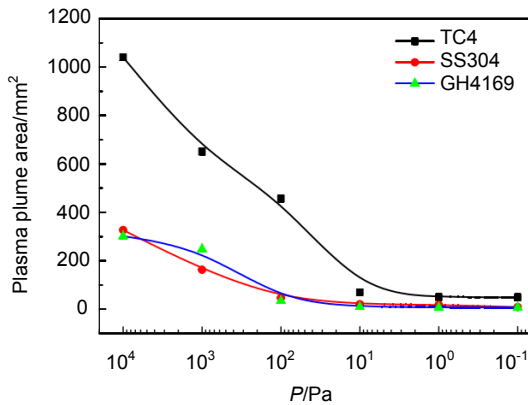


图5 等离子体羽辉面积与真空度关系<sup>[13]</sup>。

Fig. 5 The plasma plume area as a function of vacuum degree<sup>[13]</sup>.

但是,在真空舱内焊接无法满足大尺寸结构件的焊接要求。基于临界低真空的观点,上海交通大学唐新华<sup>[14-17]</sup>设计了局部“真空室”,如图6所示,通过快速抽气在密封腔内产生局部的负压,可使焊接工件熔池上方局部范围内达到低真空。作者通过试验发现当环境压力达到20 kPa时,激光焊缝的熔深会突然增大,并且焊缝的熔深随着局部“真空室”内的压力的减小呈现指数型增大的规律。但是焊接过程中局部“真空室”的移动会导致内部压力的增大,作者对比激光点

焊和连续焊(局部“真空室”随激光头一起运动)焊缝成形发现,连续焊的熔深较点焊有所减小,这是因为缝焊过程中,局部“真空室”的移动造成漏气现象从而导致气压的增大<sup>[16,17]</sup>。

通用中国科学研究院 Yang<sup>[18]</sup>采用局部真空辅助激光焊的方法得到汽车用镀锌钢板无间隙搭接的高质量接头。焊接过程中匙孔保持敞开且更加稳定有助于锌蒸汽及时逸出,此外,等离子体羽辉偏向局部真空的抽气装置,有助于提高熔池的稳定性及激光能量的吸收率。

西北工业大学包海涛<sup>[19,20]</sup>对真空环境下不锈钢和镁合金的激光焊缝缺陷和力学性能进行了研究,发现真空环境下镁合金激光焊缝的裂纹缺陷得到有效控制,并且与大气环境下得到的焊缝相比,真空环境下焊缝中心附近位置的显微硬度值有所增大,这主要是因为真空环境下等离子体羽辉得到抑制,等离子体的热传导作用减弱,焊缝晶粒未明显长大。

### 3 等离子体羽辉特性、匙孔及熔池动态行为

学者们普遍认为真空环境下激光焊接熔深增大的一个主要原因是等离子体羽辉得到有效抑制。日本大阪大学 Katayama<sup>[9,10,21]</sup>通过观察探测激光穿过等离子体羽辉后光斑位置及折射角的变化(如图7所示),认为真空环境下焊接激光束与等离子体羽辉的相互作用减弱是熔深增大的原因,并且真空环境下焊接飞溅得到有效抑制,匙孔的开口尺寸减小且更加稳定。

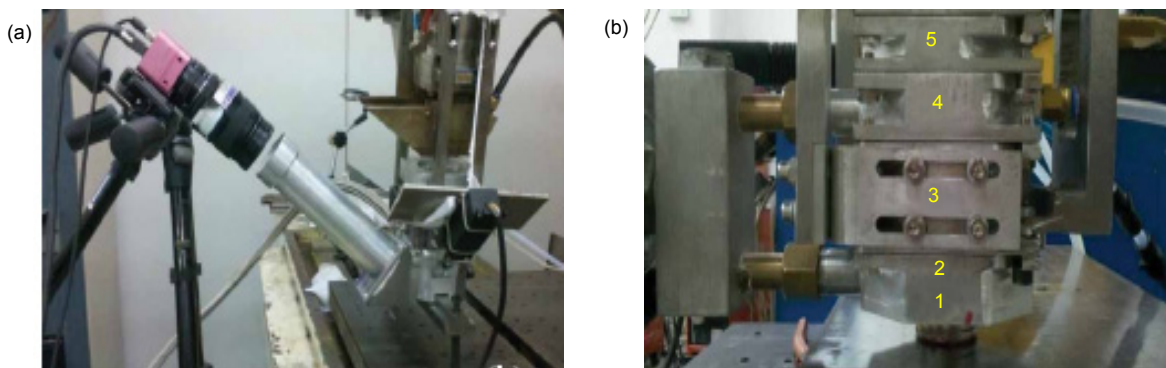


图6 局部负压环境激光焊接装置<sup>[14]</sup>。(a)整体图。(b)结构图(1. 负压模块; 2. 锥形孔模块; 3. 固定模块; 4. 空气刀模块; 5. 透镜模块)。

Fig. 6 Photo images of local subatmospheric equipment for laser welding<sup>[14]</sup>. (a) Overall image. (b) Structure image (1. local subatmospheric module; 2. conical orifice; 3. fixed module; 4. air knife; 5. optical lens).

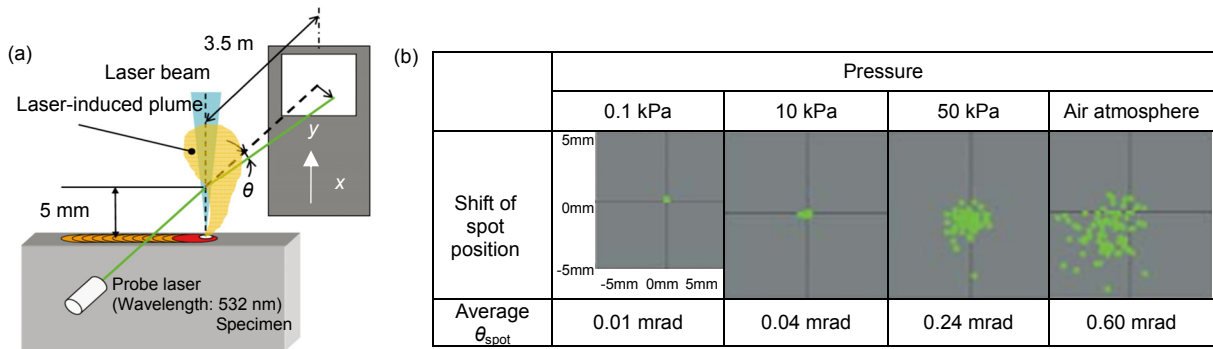


图7 不同环境压力下探测激光穿过等离子体羽辉后特征。(a) 装置示意图<sup>[21]</sup>。(b) 光斑位置变化和折射角<sup>[9]</sup>。  
Fig. 7 The characteristics of probe laser through the plasma plume. (a) Schematic diagram of equipment<sup>[21]</sup>. (b) Change of spot positions and refracted angles<sup>[9]</sup>.

基于等离子体的光谱结果及理论计算，法国 Fabbro<sup>[22]</sup>和国内哈尔滨工业大学李俐群<sup>[12, 23, 24]</sup>分析了真空激光焊接过程中等离子体羽辉的物理特性，激光焊接过程中等离子体的电子密度由环境压力所决定，等离子体的电子密度随着环境压力的降低而减小，等离子体对产生的透镜效应及对激光能量的逆韧制吸收可完全被抑制，激光能量的吸收模式以菲涅尔吸收为主，大气环境下激光焊缝的“钉子状”截面形状消失，熔宽变小，熔深变大。上海交通大学唐新华<sup>[14, 25]</sup>分析不同环境压力下探测激光透过等离子体羽辉的光谱结果，建立探测激光衰减的三维分布规律，由此得到了环境压力与等离子体羽辉被抑制的关系，即等离子体外侧扩散型羽辉、中部压缩型羽辉和匙孔附近驻留型羽辉被完全抑制时对应的压力值分别为 80 kPa、20 kPa

和 3 kPa。

焊缝成形良好及气孔缺陷消失与匙孔的稳定性及熔池的流动行为密切相关。日本大阪大学 Katayama<sup>[8]</sup>发现环境压力减小后焊缝的气孔缺陷得到有效改善，当环境压力为 400 Pa 时，在不锈钢和铝合金焊缝中均未观察到气孔，作者首次通过 X 射线透射系统观察了真空激光焊接过程中匙孔及熔池的动态行为，发现与大气环境下不同，当环境压力为 400 Pa 时，在匙孔的尖端并未发现气泡的产生，并且熔池液态金属沿着匙孔壁向上流动(大气环境下液态金属沿着熔池底部向后方流动，如图 8 所示)，有助于气泡快速逸出熔池，如图 9 所示。

上海交通大学唐新华<sup>[14]</sup>从一侧透明玻璃观察了真空焊接过程中小孔内壁的动态行为，发现随着环境压

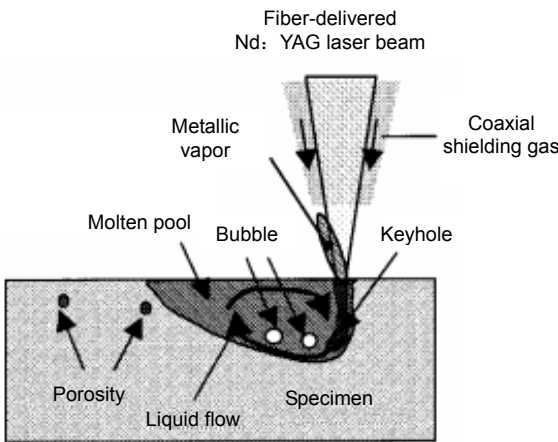


图8 大气环境下激光焊接熔池流动及气孔形成示意图<sup>[8]</sup>。  
Fig. 8 Flow behavior and formation of porosity defect under atmospheric pressure<sup>[8]</sup>.

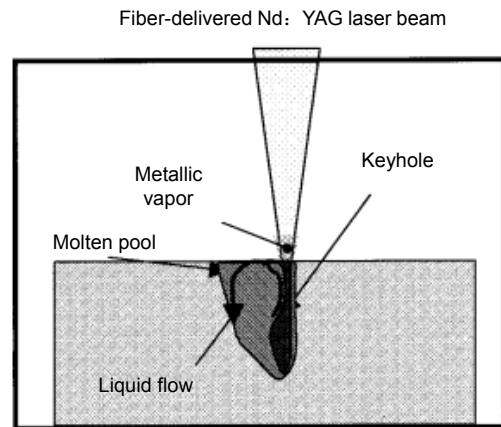


图9 真空环境下激光焊接熔池流动行为示意图<sup>[8]</sup>。  
Fig. 9 Flow behaviors of molten pool during laser welding process under vacuum<sup>[8]</sup>.

力的降低,匙孔的深度增大,匙孔后壁上由于匙孔内局部不稳定的金属蒸汽产生的不稳定波动得到改善,当环境压力低于 10 kPa 时,匙孔后壁变得平滑且稳定,从而可以有效抑制气孔缺陷的产生。

法国 Fabbro 和国内华中科技大学庞盛永<sup>[26-28]</sup>对匙孔壁蒸汽反作用力计算模型进行改进,首次计算了环境压力对激光深熔焊过程中匙孔动态行为的影响。作者发现真空环境下匙孔壁的平均温度较大气环境下有所降低,如图 10 所示,导致真空环境下焊缝熔深增大。并且作者认为匙孔表面温度的不同会影响匙孔附近液态金属的流动行为,相比之下,大气环境下匙孔壁温度较高导致匙孔附近热传输作用明显使熔池流动行为更加复杂,从而使焊缝截面形貌发生变化,如图 11 所示。此外,作者还发现随着焊接速度的增大,真空环境下焊缝的熔深的增大幅度逐渐变小,这是因为随着焊接速度的增大匙孔壁的温度升高。当焊接速度较高(6 m/min)时,真空环境下焊缝熔深和大气环境下趋

于一致,这是因为高速焊接时,环境压力的变化不会改变金属的蒸发温度<sup>[28]</sup>。

#### 4 真空激光焊接的应用

德国 Borner<sup>[29]</sup>自制一套真空激光焊接设备,如图 12 所示,真空舱尺寸为 1.5 m<sup>3</sup>,极限真空度可以达到 10<sup>-1</sup> Pa,作者对 3 mm, 10 mm 和 15 mm 不同厚度的钢的真空激光焊接特性进行研究,发现焊接过程飞溅缺陷得到有效抑制,焊缝的几何形状得到改善。作者认为真空环境下激光焊缝质量得到有效改善,拓宽了大功率固态激光器在工业领域的应用范围。

2015 年,德国 PTR 公司<sup>[30]</sup>与亚琛工业大学合作开发了一套真空激光焊接设备,激光头置于真空舱内部,如图 13 所示。将真空激光焊接技术应用于电站大型齿轮焊接上,获得了表面光滑、无缺陷的焊缝,如图 14 所示。该研究为真空激光焊接技术在工业领域的应用提供宝贵的参考。

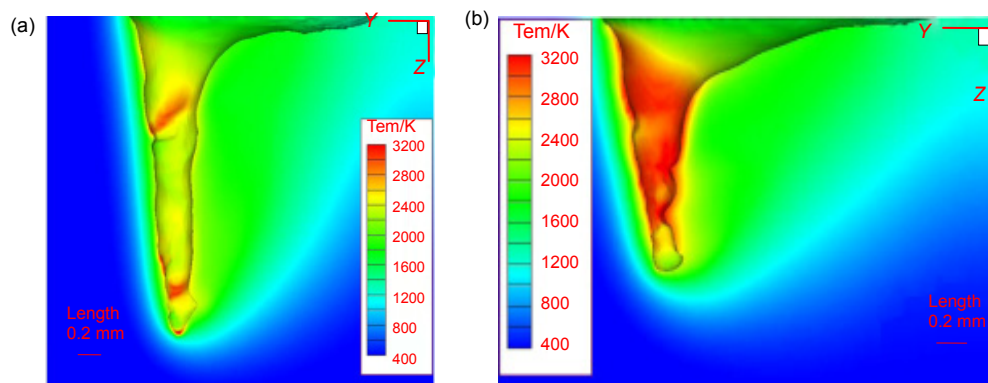


图 10 激光深熔焊匙孔纵截面温度分布云图. ( $t=31.5 \text{ ms}$ )<sup>[26]</sup>. (a) 真空环境. (b) 大气环境.

Fig. 10 Longitudinal distribution of transient temperature during laser welding process ( $t=31.5 \text{ ms}$ )<sup>[26]</sup>. (a) Under vacuum. (b) Under atmospheric pressure.

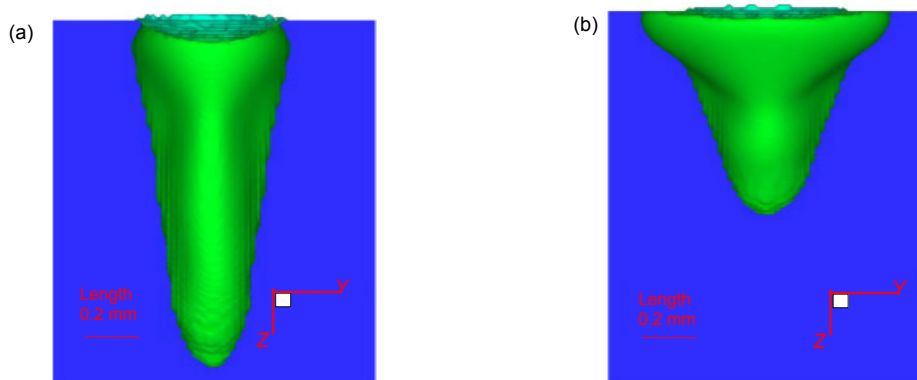


图 11 激光焊缝截面形貌<sup>[26]</sup>. (a) 真空环境. (b) 大气环境.

Fig. 11 Cross-sections of laser welds<sup>[26]</sup>. (a) Under vacuum. (b) Under atmospheric pressure.



图 12 真空激光焊接设备<sup>[29]</sup>. (a) 激光头. (b) 真空舱. (c) 抽真空装置.

Fig. 12 Laser welding equipment with vacuum chamber<sup>[29]</sup>. (a) Laser head. (b) Vacuum chamber. (c) Pumping station.

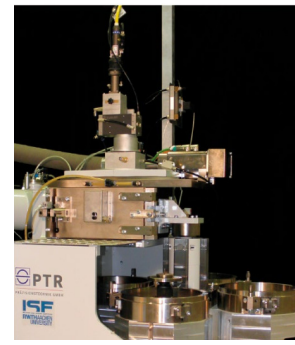


图 13 德国 PTR 公司真空激光焊接设备<sup>[30]</sup>.

Fig. 13 Laser welding equipment with laser beam in vacuum manufactured by PTR GmbH<sup>[30]</sup>.

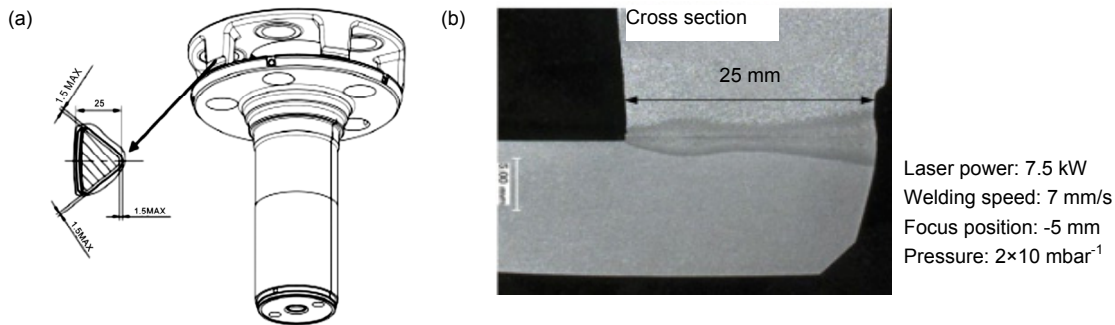


图 14 大型齿轮真空激光焊接<sup>[30]</sup>. (a) 焊接位置示意图. (b) 焊缝横截面.

Fig. 14 Laser welding of planet wheel carrier under vacuum<sup>[30]</sup>. (a) Schematic diagram of welding position. (b) Cross-section of weld seam.

## 5 总结及展望

自 1985 年提出真空激光焊接技术以来,学者们普遍发现在低真空或者局部负压环境下,激光焊接焊缝熔深得到大幅提高,焊接过程飞溅及焊缝气孔等缺陷得到有效改善,并且环境压力对激光焊接熔深及缺陷的影响存在临界值。真空环境下焊接特性的变化与等离子行为及熔池流动行为密切相关。随着大型真空舱及局部真空装置的出现,真空激光焊接技术已在电站大型齿轮焊接中得到应用,并在船舶、核电、压力容器等工业领域大厚板焊接中展现出较强的应用前景。

但是目前对真空环境下激光能量传输特性的研究尚不完善。对于真空环境下熔池液态金属流动行为发生改变缺乏科学的解释。真空激光焊接时,合金元素的蒸发、熔池液态金属的流动行为对焊缝金属凝固特性及接头性能的影响也有待进一步明确。在工程应用方面,真空激光焊缝“窄而深”的特点对工件装配的适应性较差,对真空激光焊接在工业领域的广泛应用

有一定的限制。

未来真空焊接技术的发展需要从以下方面突破:

1) 有关真空环境下激光能量传输特性的研究,还需考虑真空环境下材料物性的变化、离子碰撞特性对等离子体羽辉团聚及扩散的影响。需借助图像在线监测、数值模拟、匙孔壁受力理论分析等方法系统的研究真空环境下熔池传热传质特性,并进一步阐明真空环境下焊缝金属的凝固行为。

2) 真空或局部真空装置应向高适应性和高度集成化的方向发展。针对大尺寸复杂结构件的焊接,需研制保压性能更好且结构适应性强的局部真空装置。并且,要在真空环境下实现激光填丝甚至激光复合焊接,对真空焊接舱或局部真空装置的设计和制造提出了更高的要求。

## 参考文献

- 1 Ishide T, Shono S, Ohmae T, *et al.* Fundamental study of laser plasma reduction method in high power CO<sub>2</sub> laser welding[C]//*Proceedings of the International Conference on Laser*

- Materials Processing-Science and Application*, Osaka, Japan, 1987: 187–191.
- 2 Arata Y, Abe N, Oda T. Fundamental phenomena in high power CO<sub>2</sub> laser welding[J]. *Transactions of JWRI*, 1985, **14**(1): 5–11.
  - 3 Beck M, Berger P, Hugel H. The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO<sub>2</sub> Lasers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, **28**(12): 2430–2442.
  - 4 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.
  - 5 Tse H C, Man H C, Yue T M. Effect of magnetic field on plasma control during CO<sub>2</sub> laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(5): 363–368.
  - 6 Peng Yun, Chen Wuzhu, Wang Cheng, et al. Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, **34**(21): 3145–3149.
  - 7 Arata Y, Abe N, Oda T. Fundamental phenomena in high power CO<sub>2</sub> laser (Report II): vacuum laser welding[J]. *Transactions of JWRI*, 1985, **14**(2): 217–222.
  - 8 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.
  - 9 Katayama S, Abe Y, Mizutani M, et al. Deep penetration welding with high-power laser under vacuum[J]. *Transactions of JWRI*, 2011, **40**(1): 15–19.
  - 10 Katayama S, Youhei A, Mizutani M, et al. Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum[J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**: 75–80.
  - 11 Börner C, Dilger K, Rominger V, et al. Influence of ambient pressure on spattering and weld seam quality in laser beam welding with the solid-state laser[C]//*Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Orlando, FL, USA, 2011: 621–629.
  - 12 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 and Technology of Welding and Joining*, 2014, **19**(7): 547–553.
  - 13 Peng Genchen. Laser welding characteristics of aluminum and nickel-base alloys under vacuum environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 28–44.  
彭根琛. 铝与镍合金的真空环境激光焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 28–44.
  - 14 Luo Yan. Research on plasma plume and molten pool behavior in fiber laser welding under subatmospheric pressure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 32–33.  
罗燕. 负压激光焊接过程蒸气羽烟及熔池行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 32–33.
  - 15 Chen Quintao, Tang Xinhua, Lu Fenggui, et al. Study on the effect of laser-induced plasma plume on penetration in fiber laser welding under subatmospheric pressure[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, **78**(1-4): 331–339.
  - 16 Luo Yan, Tang Xinhua, Lu Fenggui, et al. 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.
  - 17 Luo Yan, Tang Xinhua, Lu Fenggui, et al. Effects of welding parameters on bead formation of laser welding under subatmospheric pressures[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(6): 0603008.  
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, **41**(6): 0603008.
  - 18 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–s–204-s.
  - 19 Bao Haitao, Liu Jinhe, Liu Kun, et al. Effect of vacuum laser welding parameter on AZ31 magnesium alloy penetration and flaw analysing[J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(5): 366–370.  
包海涛, 刘金合, 刘锬, 等. 真空激光焊接工艺参数对 AZ31 镁合金熔深的影响及缺陷分析[J]. 应用激光, 2008, **28**(5): 366–370.
  - 20 Bao Haitao, Liu Jinhe, Liu Kun, et al. Low-power YAG laser welding process under vacuum condition[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008(23): 92–95.  
包海涛, 刘金合, 刘锬, 等. 低功率 YAG 激光真空焊接工艺[J]. 航空制造技术, 2008(23): 92–95.
  - 21 Youhei A, Yousuke K, Hiroshi N, et al. Effect of reduced pressure atmosphere on weld geometry in partial penetration laser welding of stainless steel and aluminium alloy with high power and high brightness laser[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, **19**(4): 324–332.
  - 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 Jiang Meng. Study on the characteristics of plasma in laser welding under vacuum conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 37–48.  
姜梦. 真空环境下激光焊接等离子体特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 37–48.
  - 24 Jiang Meng, Tao Wang, Chen Yanbin, et al. Characteristics of bead formation and plasma plume in fiber laser welding under vacuum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(4): 0403010.  
姜梦, 陶汪, 陈彦宾, 等. 真空激光焊接焊缝成形及等离子体特征[J]. 中国激光, 2016, **43**(4): 0403010.
  - 25 Luo Yan, Tang Xinhua, Lu Fenggui, et al. Spatial distribution characteristics of plasma plume on attenuation of laser radiation under subatmospheric pressure[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(5): 1090–1096.
  - 26 Pang Shengyong, Hirano K, Fabbro R, et al. Explanation of penetration depth variation during laser welding under variable ambient pressure[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, **27**(2): 022007.
  - 27 Pang Shengyong, Chen Xin, Zhou Jianxin, et al. 3D transient multiphase model for keyhole, vapor plume, and weld pool dynamics in laser welding including the ambient pressure effect[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, **74**: 47–58.
  - 28 Fabbro R, Hirano K, Pang Shengyong. 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]//*Proceeding of the SPIE Volume 8603, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications II*, San Francisco, CA, US, 2013: 86030M.
  - 30 Reisgen U, Olschok S, Jakobs S, et al. Welding with the laser beam in vacuum[J]. *Laser Technik Journal*, 2015, **12**(2): 42–46.