



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.01

厚板窄间隙激光焊接技术研究现状与发展趋势

余强明¹, 刘鸿铭², 盛仲曦²

1. 东方电气(武汉)核设备有限公司, 湖北 武汉 430200
2. 东方电气集团数字科技有限公司, 四川 成都 610218

摘要: 随着大型厚壁结构件在核能、航空航天等关键领域需求的增长,传统焊接技术在厚板连接中面临热输入高、效率低及工艺限制等瓶颈。针对这些挑战,窄间隙焊接技术通过优化坡口设计显著降低填充量和热输入,展现出显著优势。引入激光热源形成的窄间隙激光焊技术兼具窄间隙焊和激光焊的优点,显著提升激光的可焊厚度极限,并结合填充焊丝对焊缝金属成分实施精准调控,有效改善接头力学性能。本文主要介绍了厚板窄间隙激光自熔焊和窄间隙激光焊的技术发展现状,分析了窄间隙激光焊存在的气孔、未熔合等缺陷的形成机理,并从焊接工艺优化、坡口设计、外加辅助手段三方面提出相应的焊缝质量调控策略。最后对窄间隙激光焊的研究现状进行总结并对未来发展趋势提出展望。

关键词: 窄间隙激光焊; 焊接工艺; 气孔缺陷; 侧壁未熔合; 质量调控

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0001-14

Current Status of Research and Development Trends in Thick-Plate Narrow-Gap Laser Welding Technology

YU Qiangming¹, LIU Hongming², SHENG Zhongxi²

Dongfang Electric (Wuhan) Nuclear Equipment Co., Ltd., Wuhan 430200, China

Abstract: The growing demand for large-scale thick-walled structural components in critical sectors such as nuclear energy and aerospace has exposed significant limitations in conventional welding technologies for thick plate joining, particularly regarding excessive heat input, low efficiency, and inherent process constraints. To address these challenges, narrow-gap welding (NGW) technology has demonstrated substantial advantages through optimized groove design, effectively reducing both filler material consumption and thermal input. The developed narrow-gap laser welding (NGLW) technology, which integrates laser heat sources, synergistically combines the benefits of both NGW and laser welding processes. This innovative approach significantly enhances the weldable thickness limit of laser-based techniques while enabling precise compositional control of weld metal through filler wire integration, thereby effectively improving the mechanical properties of welded joints. An overview was provided on the technological advancements of thick-plate narrow-gap laser autogenous welding and narrow-gap laser welding (NGLW). The formation mechanisms of defects in NGLW, including pore formation and lack-of-fusion imperfections, were systematically analyzed. Corresponding strategies for weld quality regulation were proposed through three approaches: optimization of welding parameters, refinement of groove geometry design, and implementation of auxiliary process interventions. Finally, a comprehensive summary was presented regarding current research progress in

收稿日期: 2025-04-10 修回日期: 2025-06-03

作者简介: 余强明(1989—),男,学士,工程师,主要从事核设备制造生产管理。E-mail: yuqm@dongfang.com。

NGLW technology, accompanied by prospective insights into future development directions in this field.

Keywords: Narrow gap laser welding; welding process; porosity defect; sidewall unfused; quality control

引用格式:余强明,刘鸿铭,盛仲曦. 厚板窄间隙激光焊接技术研究现状与发展趋势[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 1-14.

Citation: YU Qiangming, LIU Hongming, SHENG Zhongxi. Current Status of Research and Development Trends in Thick-Plate Narrow-Gap Laser Welding Technology[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 1-14.

0 引言

随着现代工业的快速发展,特别是核能工程、航空航天、海洋船舶及石油化工等关键领域的高速发展,对大型厚壁结构件的需求日益增加^[1-3]。焊接作为实现结构可靠连接的主要技术手段,其工艺质量直接决定了构件的服役性能与安全裕度。为应对工业领域对厚板结构连接在可靠性与安全性方面日益严苛的要求,发展兼具优异工艺性能和高效生产特性的先进焊接技术已成为迫切需求。目前,厚板焊接的主要方法有电弧焊、激光焊、电子束焊等。然而,传统电弧焊在厚板多层多道焊接过程中存在焊接热输入高、接头应力变形大的问题,且大尺寸的坡口设计使得焊接道次增加,导致焊缝填充金属量多、焊接效率低下^[4]。相比之下,激光焊和电子束焊等高能束流焊接方法能量密度高,具有深宽比大、焊接变形小等显著优势,但激光焊对装配间隙要求高,且在焊接钛、铝等高反射率金属时,存在激光能量吸收率不高的问题^[5];电子束焊虽能实现较大厚度的焊接,如Hurrell等人^[6]采用减压电子束单道焊接实现160 mm厚SA508钢构件的焊接,但其对真空环境的苛刻要求、高昂的设备成本以及工件尺寸的限制,制约了其广泛使用^[7-8]。

为突破传统焊接方法在厚板焊接上的局限,经国内外学者的多年研究,窄间隙焊接方法被提出并得到发展^[9],为厚板焊接提供新的解决思路。相较于传统厚板焊接方法,窄间隙焊接通过显著减小焊接坡口尺寸,大幅减少焊缝金属填充量,使焊接热源在较低的热输入条件下完成厚板焊接^[10]。Qian等人^[11]采用窄间隙熔化极活性气体电弧(NG-MAG)多层焊接工艺成功焊接了50 mm厚25Cr2NiMo1V转子钢对接接头,接头组织经580 °C×2 h热处理后,粗晶区侧板条铁素体发生长大,共析铁素体则先优先在细晶区形成并长大。Xiao等人^[12]采用TIG焊

和NG-MAG电弧焊分别进行国际热核聚变实验堆(ITER)装置用AISI 316LN厚板焊接,探究热输入对焊缝金属低温冲击韧性的影响,结果表明,在较低热输入下NG-MAG电弧焊接头最大低温韧性可达100 J以上,与TIG焊接头相媲美,而NG-MAG焊接效率明显高于TIG焊。在窄间隙焊接基础上,Arata等人^[13]引入激光热源,实现50 mm厚SM41A钢板的窄间隙激光填丝多道焊,所制备的接头成形良好且无明显缺陷。

窄间隙激光焊将窄间隙焊与激光焊的优点相结合,进一步提高激光的可焊厚度,同时可以通过引入填充焊丝调控焊缝金属成分,改善接头力学性能,这使得窄间隙激光焊在工业化应用中具有重大意义。本文通过系统论述厚板激光自熔焊接、窄间隙激光焊技术发展现状及质量调控策略等方面,为突破传统焊接方法在厚板制造中的效率瓶颈和质量控制难题提供理论依据和技术参考。

1 厚板激光自熔焊接技术发展现状

近年来随着高功率激光器的进一步开发与利用,用于窄间隙厚壁结构件的激光焊接应用越来越多。其原理是在高能量密度的激光束作用下,母材被迅速加热到熔融状态并填充到窄间隙中,经快速冷却后形成窄间隙激光自熔焊接头,与电弧焊相比,窄间隙激光自熔焊焊接速度快、焊接效率高,接头焊后应力和变形小。Zhang等人^[14]采用10kW光纤激光器实现了12 mm厚不锈钢深熔激光焊接,探究工艺参数对接头显微组织及力学性能的影响,并获得优化后的工艺参数。Kawahito等人^[15]首先进行8 mm厚304不锈钢的窄间隙激光自熔焊接,在4.5 m/min的高速焊接速度下,获得窄宽度的深熔焊道和全熔透焊缝,随后在2.5 kW的激光功率下,实现金属玻璃Zr32Al10Ni5Cu30的超高速焊接。Li等

人^[16]进行10 mm厚不锈钢高功率激光深熔焊接,并研究了焊接参数对截面几何形状的影响。信纪军等人^[17]采用20 kW光纤激光器,在激光负离焦状态下获得成形良好的20 mm厚316LN奥氏体不锈钢焊接接头。为进一步探究高功率激光的最大可焊厚度,Kawahito等人^[18]采用100 kW光纤激光器对304不锈钢进行激光深熔焊研究,焊接速度为0.3~5.0 m/min,单道焊最大焊道深度达70 mm。图1为不同焊接速度下焊缝表面及横截面形貌。由图可知焊缝深宽比和横截面积与激光能量呈线性正

相关,当焊接速度为1~3 m/min时,焊缝无咬边、气孔等缺陷;采用高速摄像机观测熔池和匙孔特征,如图2所示,结果表明平均飞溅数量随着焊接速度的增加而增加,而匙孔直径和匙孔前方熔池长度随焊接速度的增加而减小。

然而研究表明,随着激光功率的进一步增大,焊接过程中匙孔开口处会产生剧烈波动,导致熔池稳定性下降,焊缝中缺陷数量也会增加^[19-20]。为解决这一现象对焊缝造成的不利影响,学者们通过机械装置控制或在激光光路中添加反射振镜,使焊接

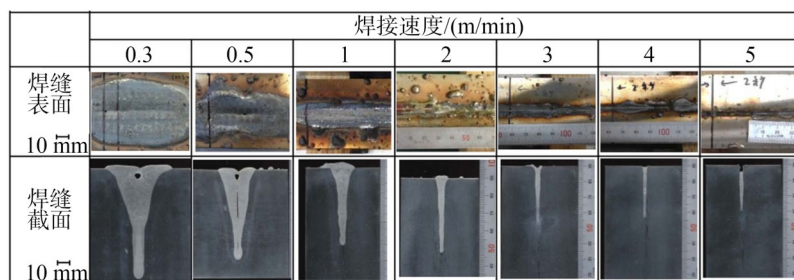


图1 不同焊接速度下焊缝表面及横截面形貌^[18]

Fig. 1 Weld seam surface and cross-sectional morphology at different welding speeds^[18]

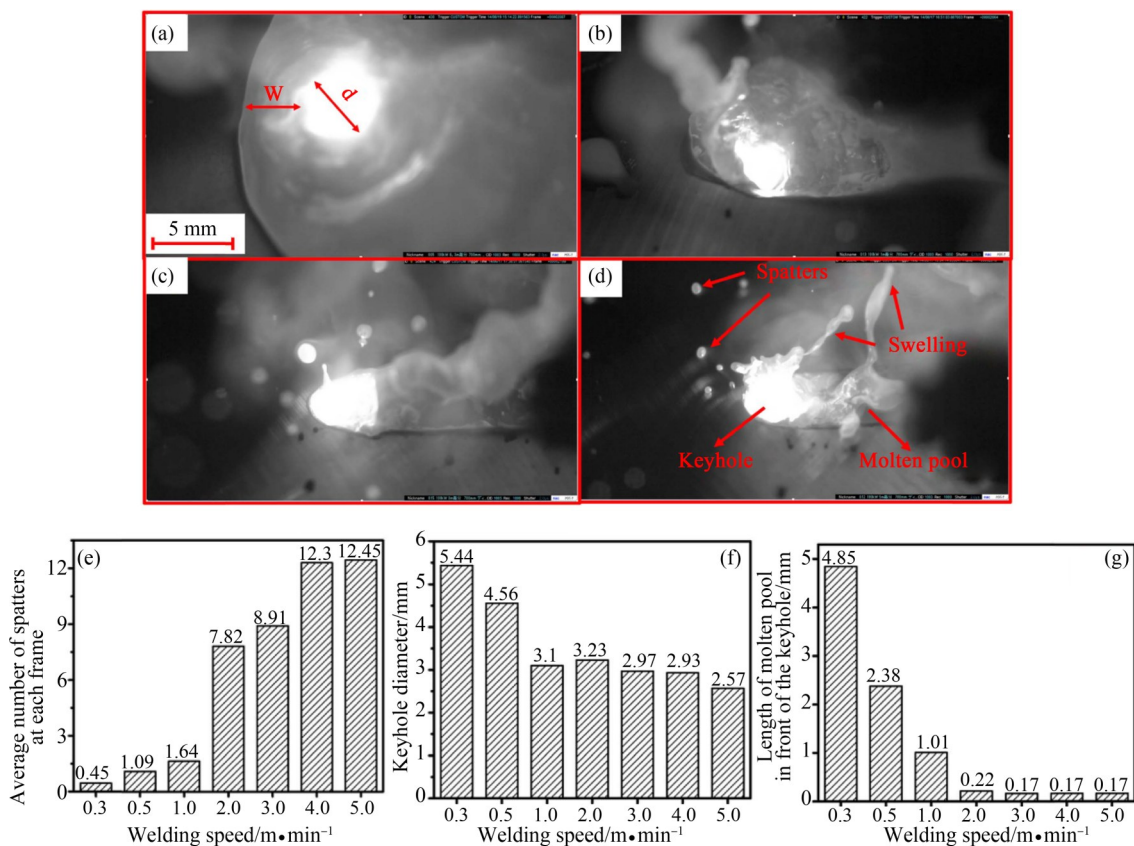


图2 匙孔和熔池特征及焊接速度与熔池特征参数的关系图^[18]

Fig. 2 Keyhole and molten pool characteristics and relationship between welding speed and molten pool parameters^[18]

过程中激光束以特定模式作用在焊接区域^[212],这一举措降低激光焊对间隙装配的依赖性,同时激光束在摆动过程中能充分搅动熔池,有助于气孔排除并改善组织均匀性。Yamazaki 等人^[24]验证摆动激光在窄间隙焊接中的有效性,并指出熔池边缘是焊接过程中飞溅产生的主要位置。在激光摆动过程中,

能量分布特征随摆动参数变化而变化。Hao 等人^[25]的研究结果表明摆动频率或幅度的增加都会使得激光焊接过程由深熔焊转变为热传导焊,这导致焊缝熔深减小,甚至可能出现焊缝两端熔深大,中部熔深小的截面形貌,图3为不同焊接摆动参数下焊缝横截面形貌。

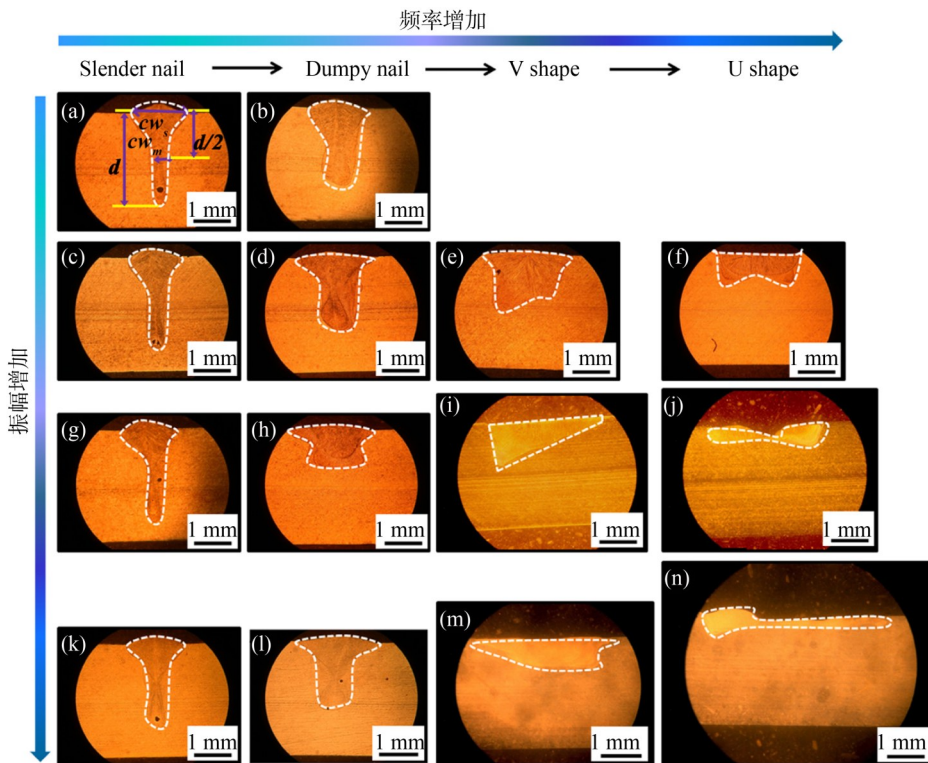
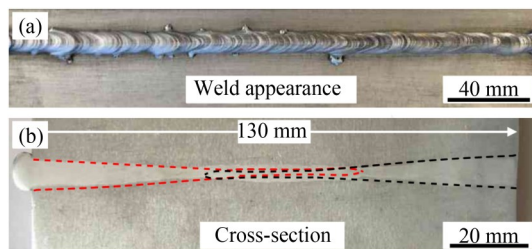


图3 不同焊接摆动参数下焊缝横截面形貌^[25]

Fig. 3 cross section morphology of welds at different welding oscillation parameters^[25]

与摆动激光焊通过调控熔池流动抑制气孔缺陷形成的机理不同,真空激光焊通过优化焊接环境参数有效减少焊缝气孔缺陷^[26]。Katayama 等人^[27]在 0.1 kPa 负压环境下,将 10 kW 和 16 kW 光纤激光器进行组合,在焊接速度 0.3 m/min、离焦量 -40 mm 的试验条件下成功制备出熔深超过 70 mm 的 304 不锈钢接头。彭根琛^[28]系统研究真空度对 5A06 铝合金激光焊接特性的影响规律,结果表明焊缝熔深随环境真空度的提高而增大,气孔缺陷和羽辉现象得到有效抑制,焊缝组织均匀度高,并且在 30 kW 高功率及 101 Pa 真空度下制备出单道 104 mm 厚高质量焊缝,如图4所示。然而该工艺对环境要求极为严苛,设备成本大,难以满足工业领域对大厚板结构件规模化生产的需求。



(a)焊缝表面;(b)焊缝横截面

图4 铝合金单道真空激光焊焊缝形貌^[28]

Fig. 4 Weld seam morphology of aluminum alloy in single-pass vacuum laser welding^[28]

2 窄间隙激光填丝焊接技术发展现状

与激光自熔焊相比,窄间隙激光填丝焊通过引入填充材料,调控焊缝合金元素以改善接头质量,

同时可适应比激光自熔焊更大的间隙公差,进一步拓展了工艺调控维度^[29-31],其焊接示意图如图5所示^[32]。此外与传统电弧焊的大坡口相比,窄间隙坡口减少了填充金属量和焊接道次,提高了焊接效率。

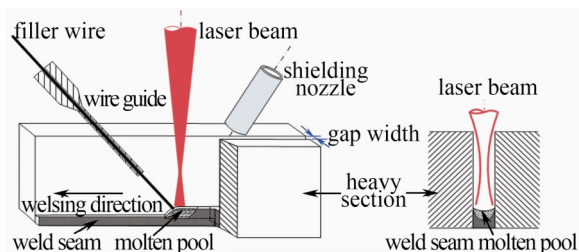
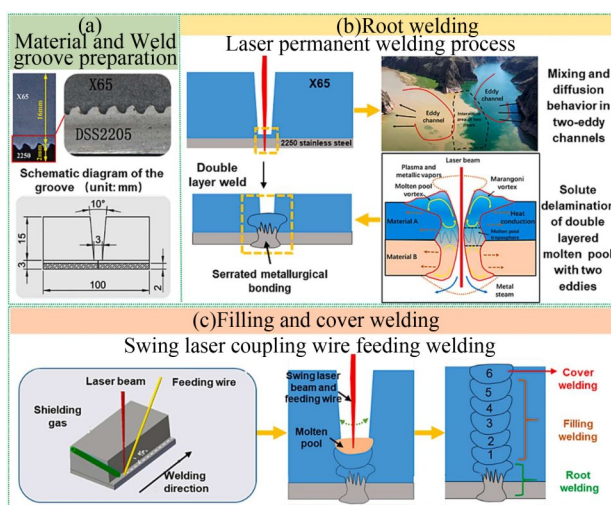


图5 窄间隙激光填丝焊示意^[32]

Fig. 5 Schematic of narrow-gap laser wire-feed welding^[32]

Nilsen 等人^[33]提出一种基于双模传感模式的激光填丝焊智能控制系统,通过集成视觉特征提取和激光三角测量构建实时间隙检测体系,采用卡尔曼滤波算法融合双模数据,建立前馈控制系统实现填丝速率的动态调控,实现间隙宽度和填丝参数闭环控制。Feng 等人^[34]进行 30 mm 厚铁素体钢的多道次窄间隙散焦激光填丝焊接研究,结果表明在平行坡口 4~5 mm 条件下,获得高质量接头的具体焊接参数为激光功率 7.5~8 kW,焊接速度 0.4 m/min。Elmeslamy 等人^[35]研究发现与传统电弧焊相比,使用窄间隙激光填丝焊进行 20 mm 厚不锈钢焊接时,焊接道数从 43 次减少到 20 次。Zhang 等人^[36]采用激光熔透根部焊接和窄间隙激光填丝焊接的混合焊接方式,进行 DSS2205/X65 双金属厚板的分层接头焊接,焊接示意如图6所示,通过调节焊接参数,形成具有冶金结合和机械结合夹层的分层根部焊缝。

光束摆动激光焊接可以提高填充焊丝激光焊接的适应性,有助于接头的良好形成。Li 等人^[37]在进行 40 mm 厚 316 不锈钢窄间隙激光填丝焊时,发现激光摆动提高了匙孔的稳定性,并提高熔池中液态金属的流动性,从而促进气泡溢出,获得质量良好的接头。Kessler 等人^[38]首先进行 72.5 mm 厚窄间隙激光多道次填丝焊工艺开发,基于两级因子设计原则,描述适用于激光功率及振荡频率的回归模型,实现 72.5 mm 厚 617 occ 合金管道元件的焊接;在此基础上,Kessler^[39]通过调整回归模型参数,在接头深度方向使用两种振荡策略,如图7所示,成功焊接 140 mm 厚 617 occ 合金管道元件,焊缝无裂纹



(a)接头形式;(b)根部焊接策略;(c)填充焊接策略

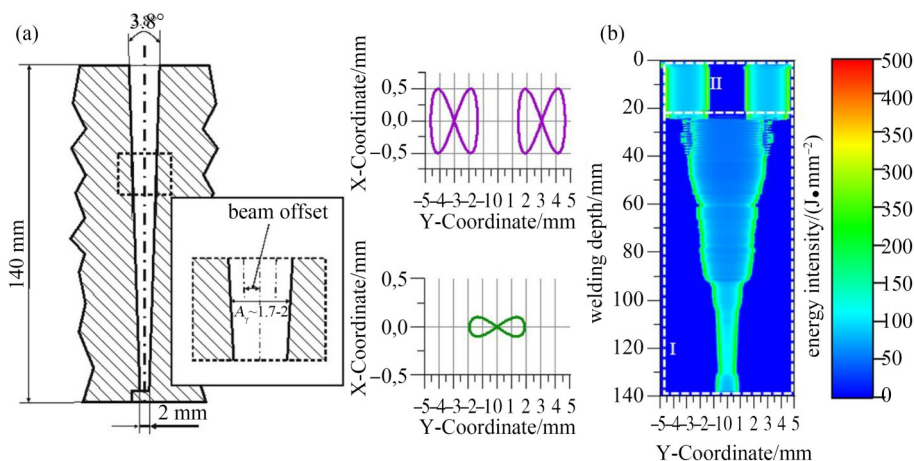
图6 焊接示意图^[36]

Fig. 6 Welding schematic^[36]

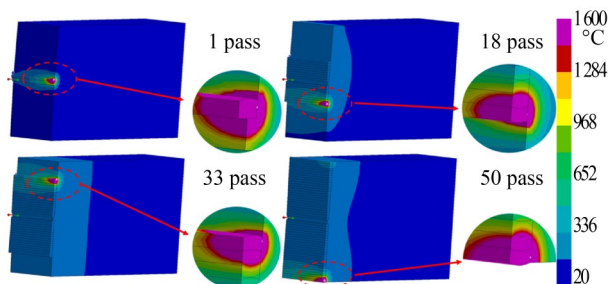
及未熔合缺陷,并表现出与母材相近的蠕变强度和疲劳强度。王树良^[40]在进行 18 mm 和 50 mm 厚 5A06 铝合金的焊接过程中,发现匙孔与熔池随激光摆动参数的变化而存在两种模式:当激光摆动幅度 < 1.5 倍时,匙孔开口面积增大,形成叠加形匙孔,熔池中的液态金属呈周期性往熔池尾部流动,反之匙孔不发生叠加,液态金属随激光摆动而流动。

在厚板窄间隙焊接过程中,焊丝在间隙中熔化并凝固,形成一个复杂的瞬态温度场。由于目前的技术和成本限制,很难通过实验测量熔池的温度场,而焊接数值模拟可以在一定程度上预测焊接参数的可行性。张智慧等人^[10]基于验证的激光焊接热源模型,揭示了厚板焊接残余应力分布规律:焊缝区存在多轴残余应力集中,多层焊接导致硬度梯度和组织呈非均匀性,通过降低热输入可显著降低残余应力。Hou 等人^[41]设计了一种窄间隙激光焊丝填充焊接工艺,实现 100 mm 厚海洋用钢的焊接,通过数值仿真结果发现,在焊接过程中,由于焊接热循环的影响和窄间隙冷却的约束,焊缝中部长时间保持相对较高的温度,如图8所示,这导致该区域晶粒组织发生粗化。邓德安等人^[42]针对多层焊对接接头的温度场演化与残余应力分布特征展开数值分析,通过引入可变长度热源模型并集成生死单元技术,建立焊接过程热-应力间接耦合数值模型。

由此可见,窄间隙激光填丝焊通过窄间隙坡口



(a) 接头形式; (b) 激光束振荡策略

图7 接头形式及激光束振荡策略^[39]Fig. 7 Joint configuration and laser beam oscillation strategy^[39]图8 温度场分布云图^[41]Fig. 8 Contour map of temperature field distribution^[41]

设计与工艺协同,极大降低了对高功率激光的依赖,在厚板焊接中表现出良好的适配性。但现有研究大多集中在平焊位置上,对于横、仰、立焊等位置的研究明显不足,且需要深入探究激光束与填充焊丝之间的耦合作用机理,这在一定程度上对设备的动态响应提出较高的要求。

3 窄间隙激光焊焊缝质量调控策略

3.1 焊接工艺缺陷

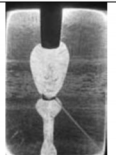
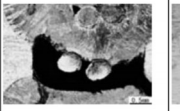
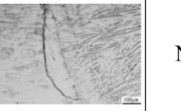
未熔合和气孔缺陷是厚板窄间隙激光焊存在的主要问题。由于这些工艺缺陷的存在,往往导致接头成形质量较差,表现出较低的力学性能,不利于厚板结构件的长期服役。因此,亟需对厚板窄间隙激光焊接过程中缺陷的形成机理展开研究,并提出相应的焊缝质量调控策略。

3.1.1 未熔合缺陷

Zhang 等人^[43]讨论了 50 mm 厚不锈钢窄间隙激

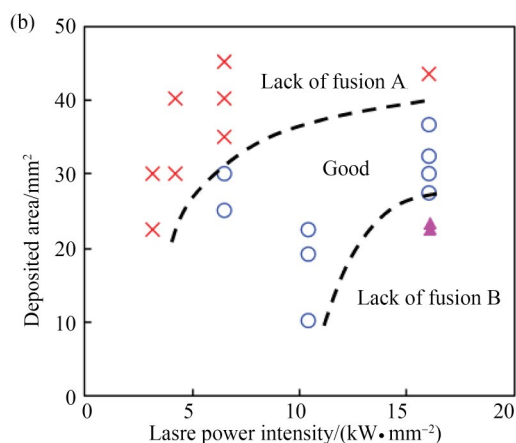
光填丝焊层间未熔合与侧壁未熔合的形成原因,两种缺陷分别对应于图9中的A、B缺陷。结合图9工艺参数与未熔合缺陷的关系图表明,层间未熔合缺陷是由于工艺参数不匹配所致,过大的送丝量、过快的焊接速率和较低的焊接热输入均导致填充焊丝无法完全熔化,且根部焊缝无法被激光重新熔化,焊缝中熔融金属填充量不足,最终形成层间未熔合缺陷;侧壁未熔合缺陷是由于送丝量不足,导致熔融金属无法铺满整个焊缝,此外根部焊缝在激光作用下重新熔化,形成深且窄的匙孔,匙孔宽度小于根部焊缝,靠近根部焊缝的侧壁没有熔化,从而形成侧壁未熔合缺陷。Wu 等人^[44]也获得类似的研究结果。

Feng 等人^[45]从光丝重叠角度对侧壁未熔合缺陷进行研究,结果表明,当激光与焊丝重叠部分达 3 mm 以上时,接头形成侧壁未熔合缺陷。这是因为熔融金属是由填充焊丝尖端吸收激光能量形成,而过大的光丝重叠长度会导致熔融金属不与熔池直接接触,通过滴落或飞溅的方式进入熔池,导致焊缝金属填充量不足,形成未熔合缺陷。Yang 等人^[46]从熔滴过渡角度对未熔合缺陷进行研究,通过对 8 mm 厚奥氏体不锈钢超窄间隙激光填丝焊接头的分析表明,焊缝根部未完全熔化、熔滴过渡驱动力不足及熔滴过渡形式是造成焊缝未熔合缺陷的主要原因。当熔滴采用球状过渡形式时会引起熔池的剧烈扰动,严重影响熔池传热效果。

(a)	Lack of fusion A	Lack of fusion B	Good
Cross section			
Defect			No defect
*Welding condition	P=6 kW V=0.4 m/min vf=6 m/min d=1.5 mm	P=6 kW V=0.3 m/min vf=3.5 m/min d=0.69 mm	P=6 kW V=0.4 m/min vf=5.5 m/min d=0.69 mm

* P: laser power, v: welding speed,
vf: wire feed speed, d: beam spot size

(a) 焊缝未熔合缺陷形貌



(b) 未熔合缺陷影响因素

图9 未熔合缺陷特征^[43]

Fig. 9 Characteristics of lack-of-fusion defects^[43]

由此可见,未熔合缺陷本质上是由于焊接过程中激光束与填充焊丝相互作用的不匹配,通过工艺参数优化实现二者协同作用,从而达到抑制未熔合缺陷的效果。

3.1.2 气孔缺陷

张波^[47]从焊接工艺角度探究其对窄间隙焊缝气孔缺陷的影响规律,结果表明,激光功率的提升加剧匙孔动态失稳行为,蒸气压激增导致匙孔前移并缩短闭合周期,匙孔开口处金属蒸汽产生大幅涡流现象,加剧窄间隙环境下气体卷入形成气孔。同时,激光功率的增大使熔深增加,导致匙孔底部气泡逸出路径延长,进一步促进气孔形成;送丝速度的降低使更多激光能量作用于匙孔前壁,垂直于匙孔前壁方向喷射的金属蒸汽冲击后方熔池,降低匙

孔稳定性。

Wang 等人^[48]研究发现造成窄间隙激光填丝焊接工艺中气孔缺陷形成的主要成因在于焊接过程中匙孔的动态失稳,导致熔池与母材交界面拼接不均匀,由于匙孔不稳定引起熔池扰动,卷入的金属蒸气及保护气体难以有效溢出,最终形成气孔缺陷。而 Dirrich 等人^[21]采用窄间隙激光填丝焊进行 20 mm 厚铝合金焊接试验时发现采用低扫描频率的摆动激光会导致较大的气孔形成,而较高频率会使气孔数量增加、孔径减小,如图 10 所示。

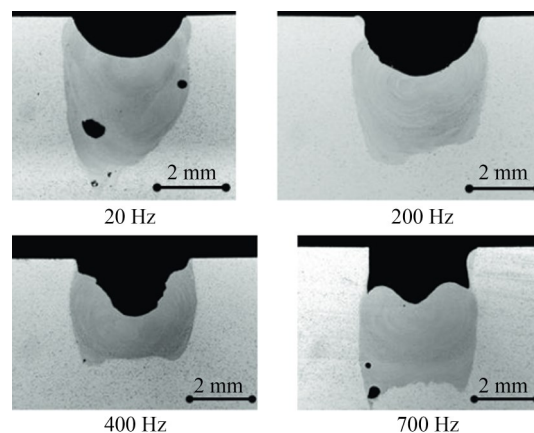


图 10 不同摆动频率下接头截面形貌^[21]

Fig. 10 Cross-sectional morphology of joints at different oscillation frequencies

由此可见,匙孔稳定性与否是造成气孔缺陷的关键因素。可以通过调整焊接工艺参数改善匙孔稳定性来消除气孔缺陷。

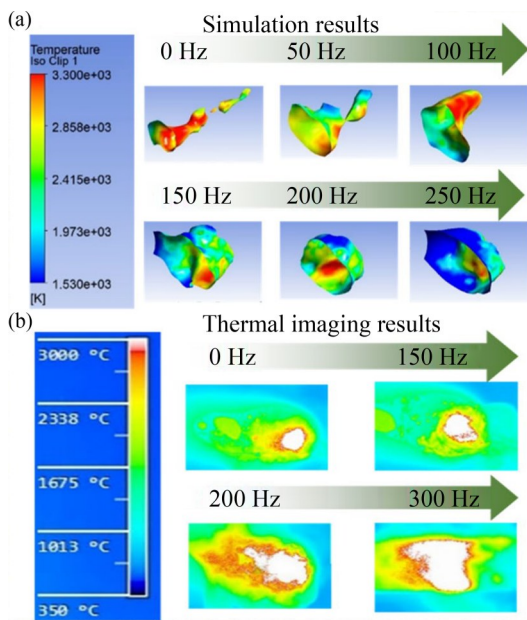
3.2 焊缝质量调控策略

3.2.1 焊接工艺优化

焊接工艺优化是改善焊缝质量的有效方法之一。目前国内外学者通过调节焊接工艺参数、添加摆动激光、优化焊接热源等方式进行相关试验,并取得一定进展。Feng 等人^[45]采用优化后的焊接工艺参数:激光热输入 1.2 kJ/mm,送丝速率 5~6 m/min,焊接速度 0.3~0.4 m/min,光丝重叠长度 1 mm,由直径为 15 mm 的管子以 15 L/min 的流速从焊缝顶部吹入保护气体,制备出无工艺缺陷的窄间隙激光填丝焊接头。张国伟等人^[32]采用优化后的工艺参数同样获得无气孔、未熔合缺陷的 25 mm 厚 5083 铝合金接头。

摆动激光、双焦点激光焊接等光束调制手段通

过增大匙孔尺寸,改善匙孔稳定性,以抑制气孔、未融合等缺陷形成。曹浩^[49]开展 120 mm 厚高强钢立向上窄间隙摆动激光填丝焊接试验,发现在激光摆动幅度 2~2.5 mm,摆动频率 60~90 Hz 的垂直摆动模式下,气孔缺陷的形成得到抑制。Wu 等人^[50]采用激光圆形振荡模式有效降低焊缝气孔率,在振荡频率超过 150 Hz 时,匙孔孔径增加,熔深减小,匙孔转变为稳定的碗形,有利于气泡溢出熔池并防止气孔形成,图 11 为不同振荡频率下匙孔状态的仿真和热成像结果。武震东等人^[51]研究摆动激光参数对高强钢窄间隙激光填丝横焊焊缝成形及气孔的影响,获得相似的结果,摆动参数的增加引起能量峰值密度降低,匙孔深宽比减小,有利于气泡溢出。



(a)模拟结果;(b)热成像结果

图 11 不同振荡频率下匙孔仿真和热成像结果^[50]

Fig. 11 Simulation and thermography results of keyhole at different oscillation frequencies

宫建锋^[52]采用并行排布的双焦点激光进行铝合金窄间隙坡口的填充焊接,结果表明双焦点激光作用下熔池存在两个独立匙孔,焊丝尖端也存在两个独立的液桥,熔池流动和焊丝熔化过渡趋于稳定。熔池热-流耦合模型揭示双焦点激光焊接使熔体流动方向反转、流速降低,匙孔闭合现象消除,熔池动态稳定性较单焦点模式得到明显提升,图 12 所示为单、双焦点激光焊接熔池流动行为模拟仿真结果。Li 等人^[53]研究发现双焦点激光模式下匙孔深

度的波动减少,熔体流速均匀,由于熔体在匙孔后壁向上运动且没有产生涡流,使焊缝合金元素分布更加均匀,试验验证获得的焊缝形貌表面光滑,没有缺陷存在,这与数值模拟结果一致。

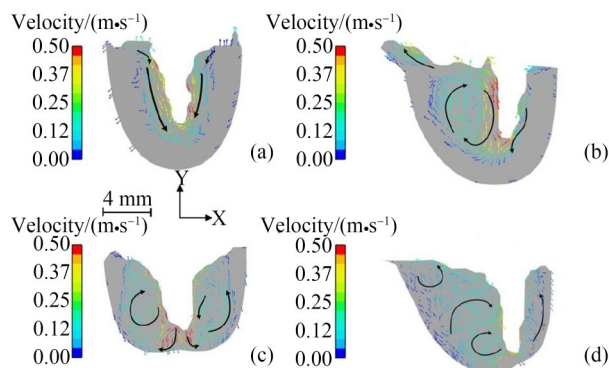


图 12 单、双焦点激光焊接熔池流动行为模拟仿真结果^[52]

Fig. 12 Simulation results of single- and dual-focus laser welding molten pool flow behavior simulations^[52]

激光-电弧复合焊兼具激光焊高能量密度,大焊缝深宽比和电弧焊较强的焊接适应性的特点^[54-55],将激光-电弧复合热源应用在窄间隙焊接中能有效改善间隙适应性,提高可焊厚度。Song 等人^[56]采用窄间隙激光-TIG 复合焊接技术,通过协同优化激光-电弧-焊丝三者的空间位置偏差,实现 24 mm 厚 TC4 钛合金焊接。在激光感应下电弧稳定偏转,将激光-电弧错位从 0 mm 增加到 2 mm 时,电弧偏转角增加 16.06%,这允许电弧热更有效地作用于激光侧的侧壁,从而改善侧壁熔合不良的问题;通过增加焊丝-电弧错位,可以获得倾斜的焊缝,这有助于层间熔合。同时,焊缝整体向侧壁移动,改善了焊缝与坡口根部之间的过渡,抑制了气孔的形成。Rethmeier 等人^[57]采用激光自熔打底焊+窄间隙激光-电弧复合填充焊,分别实现 28 mm 厚与 32 mm 厚 X65 钢板焊接,然而由于需要使用较大激光功率熔透坡口钝边,造成焊接过程不稳定,形成少量气孔缺陷。蔡创等人^[58]研究了铝合金窄间隙激光-MIG 复合焊过程中摆动激光的引入对熔滴过渡、焊缝成形、气孔缺陷的影响规律,结果表明,摆动激光的引入强化了电弧对熔滴过渡的主导作用,有效改善焊缝成形,焊缝气孔率显著降低,这归因于摆动激光增大匙孔尺寸并增强稳定性,使得气泡得以及时溢出。

由此可见,合理的优化焊接工艺参数可以达到

抑制缺陷的目的;摆动激光或双焦点激光等光束调制手段通过增强匙孔稳定性,有效避免气孔缺陷的生成;窄间隙激光-电弧复合焊接利用激光焊与电弧焊二者的特点,在厚板焊接领域也得到十分广泛应用。但通过调节焊接工艺并不能完全消除缺陷;光束调制研究目前大多采用摆动激光或多焦点激光,对于其他如脉冲激光等调制手段研究不足;激光-电弧复合焊虽然能够改善窄间隙激光填丝焊存在的局限,但由于影响激光-电弧复合焊接过程的因素较多,目前仍缺乏对其系统性的研究。

3.2.2 坡口设计

通过合理的坡口槽形设计,可以避免因焊缝收缩引起的侧壁烧蚀和送丝阻塞,减少焊丝的偏转,从而达到抑制未熔合缺陷的目的。Yang等人^[46]研究发现优化后的坡口设计:底部间隙1.4 mm,顶部间隙1.6 mm,结合液桥转移模式能形成稳定熔池并有效改善侧壁熔合。与球状转移模式相比,在液桥转移模式下,大部分激光能量作用于母材表面,形成稳定的熔池,焊丝根据液桥平稳地过渡到熔池中。这表明熔滴尺寸与坡口间隙的匹配度及热源分布合理性对抑制未熔合缺陷具有决定性作用。方乃文等人^[59]采用Y型坡口结构制备钛合金厚板试件,设置4 mm钝边厚度与3.2 mm根部间隙,单边坡口角为1°并预设2°反变形角,实现96 mm厚TC4超窄间隙激光填丝焊,获得的焊缝呈钉形结构,且无气孔、裂纹及侧壁未熔合等缺陷。

张成竹^[60]采用超窄间隙激光填丝焊对20 mm、50 mm、70 mm厚贝氏体钢进行焊接,坡口设计如图13所示,并研究试样厚度对接头残余应力分布特征的影响。结合微剪试验和X射线衍射法进行分析,结果表明不同厚度试件表面残余应力均呈现特征性“W”形分布,多层填丝工艺引起的中间层应力积累与熔合区马氏体脆硬相形成的“软-硬-软”夹心组织共同引起接头非典型应力分布特征。

Wu等人^[44]提出一种基于光纤激光器的超窄坡口热传导焊接方法,实现3 mm坡口宽度、60 mm厚不锈钢板焊接,焊缝无气孔及未熔合缺陷,且变形角控制在0.6°以内。这是因为热传导模式通过消除匙孔效应有效抑制气孔等缺陷形成。此外该模式下熔深阈值特性与坡口形貌的协同作用可拓展至

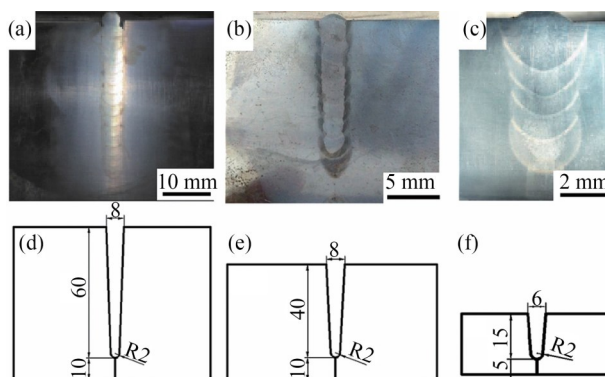


图13 超窄间隙激光填丝焊接头坡口尺寸设计^[60]

Fig. 13 Groove dimension design for ultra-narrow gap laser wire-feed welded joints^[60]

坡口宽度4.5 mm、厚度120 mm的不锈钢高质量焊接。

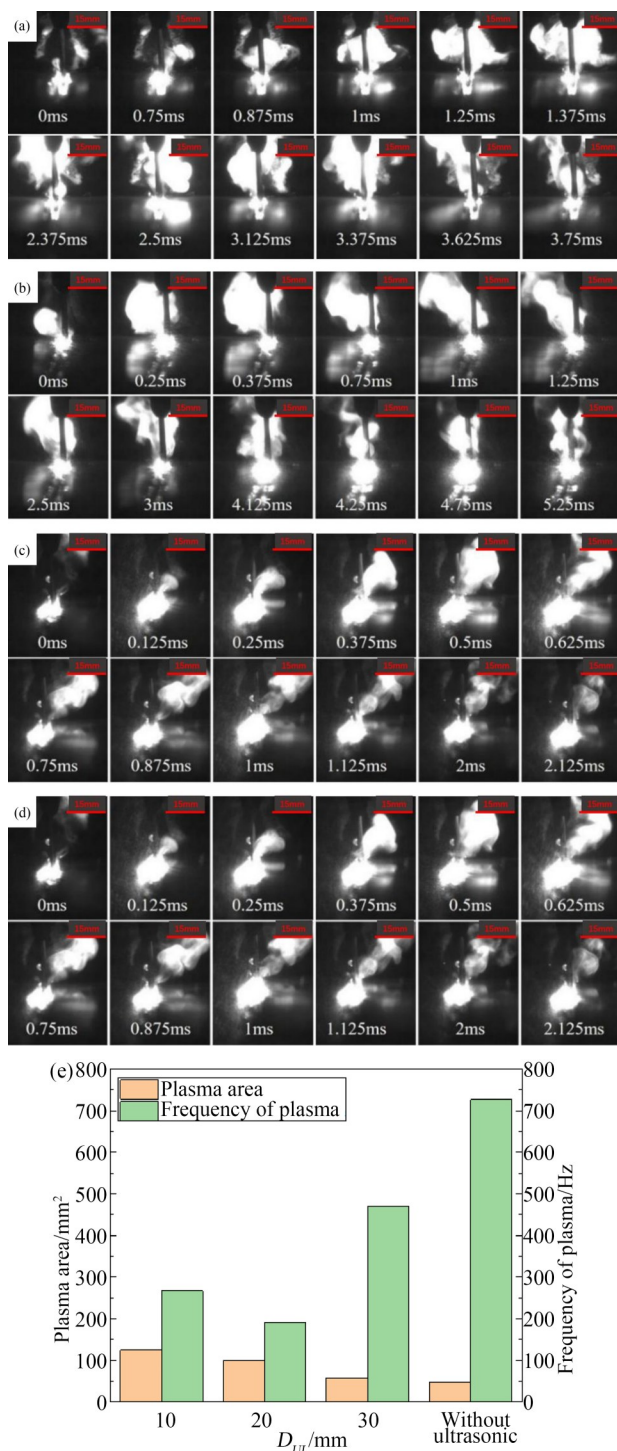
由此可见,通过合理的坡口设计,通常是在更小的坡口间隙下,超窄间隙激光填丝焊在抑制气孔、侧壁未熔合等缺陷上表现出明显优势。然而其工艺窗口相对较窄,对坡口加工精度、超窄间隙下光丝耦合精度及多道次参数匹配具有较高敏感度。未来应结合复合传感检测系统和智能工艺优化算法,以提升超窄间隙条件下对复杂工况的适应性。

3.2.3 外加辅助手段

目前已有学者的研究表明,在焊接过程中通过外加气体喷射、电磁场、超声振动等物理辅助手段能够有效抑制缺陷产生,改善焊缝质量。

Wang等人^[48]将超声振动应用到窄间隙激光焊中,并实现12 mm厚Q345D板窄间隙激光填丝焊,结果表明,在超声辅助作用下熔池上方产生空化效应和声流效应,显著降低气孔问题,并细化晶粒提高焊接接头的力学性能。通过光谱系统结合高速摄像研究熔池上方等离子体特征变化,发现随着超声加载位置到熔池距离(DUL)的增加,超声对熔池的振动和搅拌作用减弱,对等离子体的激发作用也逐渐减弱,导致等离子体的高度和面积逐渐减小,这是因为超声传播过程中距离的延长引起的能量衰减。图14分别为不同DUL下等离子体图像及等离子体面积、频率变化图。Watanabe等人^[61]的研究获得类似的结果,通过超声振动填充金属将振动能量直接导入熔池,促使焊缝中心区域形成等轴晶组织,晶粒细化程度与焊接速率呈正相关。

外加磁场通过改变熔池上方等离子体和熔池



(a-d)等离子体图像;(e)等离子体面积、频率与DUL关系图
图14 不同DUL下等离子体图像及等离子体面积、频率变化图^[48]

Fig. 14 Plasma images, plasma area and frequency variations at different DUL^[48]

行为,实现焊缝组织均匀化,减少气孔及未熔合等缺陷的形成。Fu等人^[62]采用Nd-Fe-B永磁体构建

磁场辅助系统,对S32101双相不锈钢实施窄间隙激光填丝焊。通过高速摄像与光谱分析技术监测焊接过程,结合宏观形貌表征探讨磁场作用机制。实验结果表明:磁感应强度增强使等离子体高温区域增大,促使等离子体电子温度自坡口底部至边缘呈梯度上升。磁场产生的洛伦兹力对熔池形成有效搅拌,当磁感应强度达到特定阈值时,熔池均匀性与稳定性显著提升。相较于无磁场辅助焊接,磁场辅助焊接的熔深与熔合面积明显增加,此外磁感应强度与其他工艺参数协同作用可有效改善焊缝成形质量。Meng等人^[63]从熔池流动和合金元素传递的角度研究了电磁搅拌(EMS)在激光填丝焊中的作用机制,结果表明,磁场产生的洛伦兹力显著改变了熔池流动形态,其中熔池后部与下部区域流速提升导致匙孔上部塌陷频率增加,同时在电磁搅拌作用下加快了液态金属向前-向下的复合流动,促使填充合金元素均匀分布。

Zhang等人^[43]搭建了一套气体喷射辅助激光焊接的试验装置,结果表明与无气体喷射辅助焊接的焊缝相比,气体喷射辅助装置的引入使得焊缝深宽比增大,焊接过程区域稳定且产生的羽辉减弱。这是因为在喷射气体作用下,匙孔尺寸增大,激光束在几乎没有阻碍的情况下直接作用在匙孔底部,致使熔深增大。图15a为传统激光焊与气体喷射辅助激光焊对比图,图15b为气体喷射辅助激光填丝焊获得的50 mm厚316L对接接头。

由此可见,通过外加物理辅助手段可以改善熔池流动,达到抑制气孔及未熔合缺陷、促进焊缝组织均匀化的目的,从而提高焊缝质量。但目前对外加物理手段与窄间隙激光焊影响因素的耦合作用机制研究不够深入,大部分研究仅从表征角度对试验现象进行讨论。

4 结论与展望

窄间隙激光焊接技术因其间隙适应性强、可焊厚度大等特点,在厚板连接领域表现出明显的优势,也因此得到广泛研究与应用。气孔和未熔合是窄间隙激光焊焊缝中存在的主要焊接缺陷,这些缺陷的产生往往与焊接过程中匙孔的稳定性紧密相

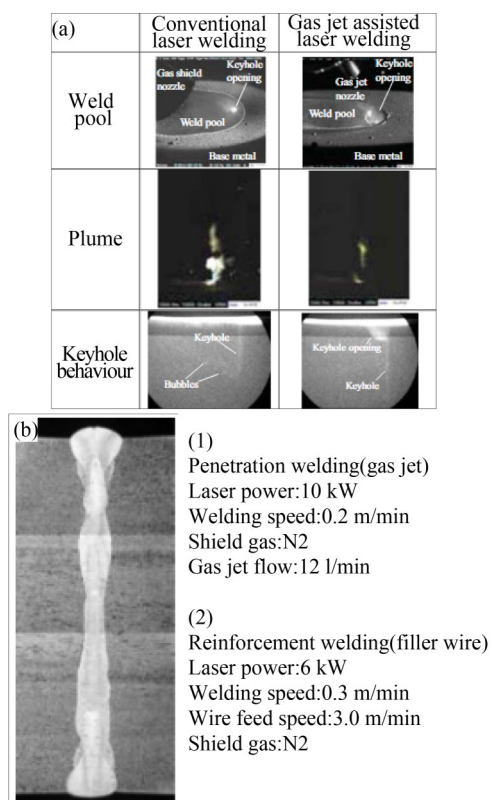


图15 (a)传统激光焊与气体喷射辅助激光焊对比图, (b) 气体喷射辅助激光焊接头^[43]

Fig. 15 (a) Comparison of conventional laser welding and gas jet-assisted laser welding; (b) Gas jet-assisted laser welded joint

关,通常采用焊接工艺优化、合理坡口设计及其他外加辅助手段如超声振动、电磁场、气体喷射辅助等,改善匙孔稳定性从而达到抑制焊缝缺陷的产生。然而,目前对于焊缝缺陷形成的成因大多停留在采用表征手段进行观测分析,且调制策略多为摆动激光,缺乏对其他调制策略的系统性研究,同时也缺乏对焊接过程的动态数值模拟仿真分析,且大部分仿真模型仍针对焊接工艺参数,缺乏对其他影响因素的数值仿真模型建立。因此未来应进一步拓展对窄间隙激光焊接过程影响因素的研究,如脉冲激光,多焦点激光,并建立起系统的数值模型来预测焊缝质量。此外未来可以结合复合传感检测系统和智能工艺优化算法进一步拓宽焊接工艺窗口。

参考文献:

- [1] 龚岩. Q355ND厚板窄间隙激光填丝焊工艺及接头组织性能研究[D]. 甘肃:兰州理工大学,2022.
- GONG Y. Narrow gap laser wire filling welding process for Q355ND thick plate and the microstructure and

properties of joints [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2022.

- [2] 郭雪洋,董彬,秦国梁,等. 窄间隙激光焊接研究现状与存在的问题[J]. 电焊机,2024,54(07):1-11.
- GUO X Y, DONG B, QIN G L, et al. Current status of reswarch and problems of narrow gap laser welding[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(07): 1-11.
- [3] 黄德骅. 高强度中厚板高功率激光-MAG复合焊接工艺及熔透状态视觉检测研究[D]. 湖北:华中科技大学,2022.
- HUANG D H. Research on process and penetration state visual detection during high power laser-MAG hybrid welding of high strength steel medium plate [D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [4] 谈睿. 激光-电弧复合焊接中厚板底部驼峰抑制研究[D]. 湖南:湖南科技大学,2020.
- TAN R. Research on root humping suppression of medium-thick plate by laser-arc hybrid welding [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2020.
- [5] Casalino G, Mortello M, Leo P, et al. Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy [J]. Materials and Design, 2014, 61: 191-198.
- [6] Hurrell P R, Pellereau B M E, Gill C M, et al. Development of residual stress profiles for defect tolerance assessments of thick section electron beam welds [J]. Pressure Vessels and Piping Conference, 2014, 6B.
- [7] Fang N W, Guo E J, Huang R S, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of TC4 titanium alloy ultra-narrow gap welded joint by laser welding with filler wire [J]. Materials research express, 2021, 8: 016511.
- [8] Fang N W, Guo E J, Xu K, et al. Effect of shielding gas on microstructures and mechanical properties of TC4 titanium alloy ultra narrow gap welded joint by laser welding with filler wire [J]. Advances in materials science and engineering, 2021: .
- [9] Meister R P, Martin D C. Narrow-gap welding process [J]. British welding journal, 1966, 13(5): 252-257.
- [10] 张智慧. 7A52铝合金厚板窄间隙激光填丝焊接特性及组织性能调控研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2018.
- ZHANG Z H. Research on characteristics and control of microstructure and properties of narrow-gap laser welding with filler wires for thick 7A52 aluminum al-

- loy plate[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [11] Qian X Y, Ye X, Hou X Q, et al. Narrow gap MAG welding and joint performance analysis of 25Cr2NiMo1 V thick plate[J]. Journal of physics conference series, 2022, 2160(1): 012022.
- [12] Xiao W K, Zhu L, Zhang F J, et al. Effect of heat input on cryogenic toughness of 316L austenitic stainless steel NG-MAG welding joint with large thickness[J]. Materials and design, 2015, 86: 160-167.
- [13] Arata Y, Maron H, Miyamoto I, et al. High power CO₂ laser welding of thick plate[J]. Transaction of JWRI, 1986, 15(2): 27-33.
- [14] Zhang M J, Chen G Y, Zhou Y, et al. Optimization of deep penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser[J]. Materials and design, 2014, 53: 568-576.
- [15] Kawahito Y, Terajima T, Kimura H, et al. High-power fiber laser welding and its application to metallic glass Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀[J]. Materials Science and Engineering B, 2007, 148(1-3): 105-109.
- [16] Li S C, Chen G Y, Zhou C. Effect of welding parameters on weld geometry during high-power laser welding of thick plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1-4): 177-182.
- [17] 信纪军, 方超, 宋云涛, 等. 20 mm厚316LN不锈钢板的超高功率光纤激光自熔焊[J]. 中国激光, 2018, 45(05): 94-101.
- XIN J J, FANG C, SONG Y T, et al. Autogenous laser welding of 20 mm-thick 316LN stainless steel plate by ultra high power fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(05): 94-101.
- [18] Kawahito Y, Wang H Z, Katayama S, et al. Ultra high power (100 kW) fiber laser welding of steel[J]. Optics letters, 2018, 43(19): 4667-4670.
- [19] Wang Y L, Jiang P, Geng S N, et al. Influence of the wrinkle surface structures on the vapor flow and key-hole stability in 20 kW high power laser welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 193: 122958.
- [20] Li S C, Chen G Y, Katayama S, et al. Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding[J]. Applied Surface Science, 2014, 303: 481-488.
- [21] Ditttrich D, Schedewy R, Brenner B, et al. Laser-multi-pass-narrow-gap-welding of hot crack sensitive thick aluminum plates[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 225-233.
- [22] Li S R, Mi G Y, Wang C M. A study on laser beam oscillation welding characteristics for the 5083 aluminum alloy: Morphology, microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 12-20.
- [23] Li J Z, Yu H, Kong B, et al. Welding characteristics of medium titanium plates with autogenous laser welding and narrow-gap laser filling welding modes[J]. Materials, 2024, 17(19): 4722-4722.
- [24] Yamazaki Y, Yohei A, Hioki Y, et al. Fundamental study of narrow-gap welding with oscillation laser beam[J]. Welding International, 2016, 30(9): 699-707.
- [25] Hao K D, Gao M, Zeng X Y. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 77-83.
- [26] 王继明. 5A06铝合金厚板超高功率真空激光焊接特性研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Wang J M. Research on characteristics of ultra high laser power welding of thick 5A06 plates under subatmospheric pressures[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [27] 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.
- [28] 彭根琛. 铝合金真空激光焊接特性及能量传输机理研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2020.
- PENG G C. Research on characteristics and energy transfer mechanism of laser welding under vacuum for aluminium alloys[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [29] Ning J, Zhang L J, Yang J N, et al. Characteristics of multi-pass narrow-gap laser welding of D406A ultra-high strength steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 270: 168-181.
- [30] Han B, Tao W, Chen Y B, et al. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum-lithium alloy aircraft fuselage panels: Effects of filler elements on microstructure and mechanical properties[J]. Optics and Laser Technology, 2017, 93: 99-108.
- [31] 方乃文, 郭二军, 徐锴, 等. 钛合金激光填丝焊缝晶粒生长及相变原位观察[J]. 中国有色金属学报, 2022,

- 32(6):1655-1672.
- FANG N W, GUO E J, XU K, et al. In-situ observation of grain growth and phase transformation in laser welding of titanium alloy with filler wire[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6):1655-1672.
- [32] 张国伟, 肖荣诗. 5083 铝合金厚板超窄间隙光纤激光焊接接头组织与性能[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 108-114.
- ZHANG G W, XIAO R S. Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy joint of heavy section by ultra-narrow gap fiber laser beam welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 108-114.
- [33] Nilsen M, Sikstrom F, Christiansson A K. Adaptive control of the filler wire rate during laser beam welding of squared butt joints with varying gap width[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9-12):3667.
- [34] Feng J C, Guo W, Francis J, et al. Narrow gap laser welding for potential nuclear pressure vessel manufacture [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022421.
- [35] Elmesalamy A, Francis J A, Li L. A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2014, 113:49-59.
- [36] Zhang Y Q, Yang S K, Wang Z Y, et al. Research on hybrid technology involving laser penetration and narrow gap laser filler welding of thick bimetallic composite plates [J]. Optics and Laser Technology, 2024, 175: 110710.
- [37] Li J Z, Liu Y B, Zhen Z Y, et al. Analysis and improvement of laser wire filling welding process stability with beam wobble[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 134:106594.
- [38] Kebler B, Brenner B, Dittrich D, et al. Laser-multi-pass-narrow-gap-welding of nickel super alloy-Alloy 617oc[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 022412.
- [39] Kebler B, Dittrich D, Brenner B, et al. Extension of the process limits in laser beam welding of thick-walled components using the laser multi-pass narrow-gap welding (laser-MPNG) on the example of the nickel-based material Alloy 617 oc[J]. Welding in the World, 2021, 65(7):1-13.
- [40] 王树良. 铝合金厚板超窄间隙摆动激光焊接特性研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2018.
- WANG S L. Study on the characteristics of ultra narrow gap oscillating laser welding of thick aluminium alloy[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [41] Hou Z L, Guo H Q, Wang J L, et al. Research on the low-temperature impact toughness of a new 100-mm ultra-thick offshore steel fabricated using the narrow-gap laser wire filling welding process [J]. Materials, 2024, 17(6):1363.
- [42] 邓德安, 青岛祥一. 用可变长度热源模拟奥氏体不锈钢多层焊对接接头的焊接残余应力[J]. 金属学报, 2010, 46(2):195-200.
- DENG D A, Kiyoshima S. Numerical simulation of welding residual stresses in a multi-pass butt-welded joint of austenitic stainless steel using variable length heat source [D]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2):195-200.
- [43] Zhang X D, Ashida E, Tarasawa S, et al. Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers [J]. Journal of Laser Applications, 2023(2):1-7.
- [44] Wu S K, Zou J L, Xiao R S, et al. Ultra-narrow-groove laser welding for heavy sections in ITER [J]. Welding Journal, 2016, 95(8):300s-308s.
- [45] Feng J C, Guo W, Irvine N, et al. Understanding and elimination of process defects in narrow gap multi-pass fiber laser welding of ferritic steel sheets of 30 mm thickness [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5-8):1821-1830.
- [46] Yang T, Liu J F, Zhuang Y, et al. Studies on the formation mechanism of incomplete fusion defects in ultra-narrow gap laser wire filling welding [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 129:106275.
- [47] 张波. 高强钢厚板窄间隙激光填丝焊缝缺陷行为及其控制[D]. 上海:上海交通大学, 2016.
- ZHANG B. Weld defects behavior and its control in narrow gap laser wire multilayer welding of thick high strength steel plate [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2016.
- [48] Wang R, He Z X, Kan X Y, et al. Dynamic characteristics of plasma in ultrasonic-assisted narrow-gap laser welding with filler wire [J]. Materials, 2023, 16(2): 502-502.
- [49] 曹浩. 大厚度高强钢板窄间隙激光摆动填丝焊接工艺研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2019.

- CAO H. Narrow gap scanned laser welding with filling wire for thick high-strength steel[D]. China Academy of Machinery Science and Technology, 2019.
- [50] Wu Z D, Wang S Y, Huang R S, et al. Study on the methods and mechanisms for suppressing porosity in narrow-gap oscillating laser wire-fill horizontal welding[J]. *Welding in the World*, 2025, 69: 1799–1812.
- [51] 武震东, 黄瑞生, 曹浩, 等. 光束摆动对窄间隙激光横焊焊缝成形及气孔的影响[J]. *焊接*, 2025(1): 8–16.
- WU Z D, HUANG R S, CAO H, et al. Effect of beam oscillating on formation and porosity of weld by narrow gap laser horizontal welding[J]. *Welding and Joining*, 2025(1): 8–16.
- [52] 宫建锋. 铝合金厚板窄间隙双焦点激光焊接特性研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2018.
- GONG J F. Research on the characteristics of dual-spot laser welding of thick aluminum alloy with narrow gap [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [53] Li L Q, Xia H B, Ma G L, et al. Flow dynamics during single and dual spot laser welding with one common keyhole of 321 stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 225: 841–852.
- [54] 方乃文, 黄瑞生, 闫德骏, 等. 低镍含氮奥氏体不锈钢激光-电弧焊电弧特性及组织性能[J]. *焊接学报*, 2021, 42(1): 70–75+102.
- Fang N W, Huang R S, Yan D J, et al. Laser arc welding behavior of low-Ni N-bearing austenitic stainless steel: Arc dynamics and property-microstructure relationships[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(1): 70–75+102.
- [55] Yu J, Cai C, Xie J, et al. Weld formation, arc behavior, and droplet transfer in narrow-gap laser-arc hybrid welding of titanium alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 91: 44–52.
- [56] Song G, Xu Z J, Lang Q, et al. A laser-induced TIG arc narrow-gap welding technique for TC4 titanium alloy thick plates based on the spatial position control of laser, arc and filler wire[J]. *Metals*, 2024, 14(5): 510.
- [57] Rethmeier M, Gook S, Lammers M, et al. Laser-hybrid welding of thick plates up to 32 mm using a 20 kW fiber laser[J]. *Quarterly of the Japan Welding Society*, 2009, 27(2): 74–79.
- [58] 蔡创, 谢佳, 刘致杰, 等. 铝合金摆动激光-MIG 复合焊接特性及气孔控制[J]. *中国激光*, 2021, 48(18): 17–26.
- CAI C, XIE J, LIU Z J, et al. Oscillating laser-MIG hybrid welding characteristic and porosity control in aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(18): 17–26.
- [59] 方乃文, 黄瑞生, 谢吉林, 等. 大厚度 TC4 钛合金超窄间隙激光填丝焊接接头组织性能研究[J]. *电焊机*, 2022, 52(6): 25–34.
- FANG N W, HUANG R S, XIE J L, et al. Study on properties and microstructures of large thickness TC4 titanium alloy welded joint by ultra-narrow gap laser welding using filler wire [J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(6): 25–34.
- [60] 张成竹, 陈辉. B950CF 高强度钢超窄间隙激光焊接组织对残余应力的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 43–54.
- ZHANG C Z, CHEN H. Effect of microstructure on residual stress in ultra-narrow gap laser welding of B950CF high-strength steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 43–54.
- [61] Watanabe T, Shiroki M, Yanagisawa A, et al. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(12): 1646–1651.
- [62] Fu J, Zhao Y, Zou J S, et al. Influence of the magnetic field on the melting and solidification behavior of narrow-gap laser welding with filler wire[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(3–4): 1123–1131.
- [63] Meng X M, Artinov A, Bachmann M, et al. Numerical and experimental investigation of thermo-fluid flow and element transport in electromagnetic stirring enhanced wire feed laser beam welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 144: 118663.