

# 轻合金T型结构双激光束双侧同步焊接技术研究进展\*

占小红<sup>1,2</sup>, 赵艳秋<sup>1,2</sup>, 陈 帅<sup>1,2</sup>, 康 悦<sup>1,2</sup>

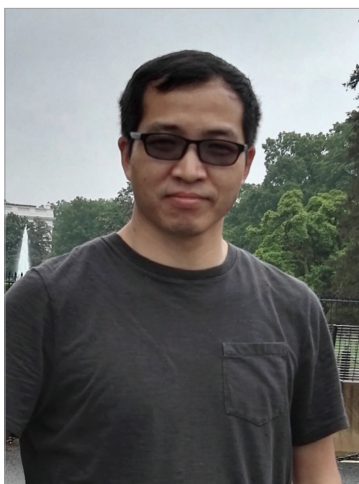
(1. 南京航空航天大学直升机传动技术国家级重点实验室, 南京 211106;

2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106)

**[摘要]** 轻合金双激光束双侧同步焊接(Double Laser-Beam Bilateral Synchronous Welding, DLBSW)技术是一项极具应用前景与发展潜力的先进技术,对实现航空航天壁板结构的轻量化与高效率制造具有重要意义。然而,由于轻合金本身的材料特性与DLBSW技术的特殊性,轻合金T型结构DLBSW技术仍然存在诸多细节问题有待深入探索。分析了轻合金T型结构DLBSW技术的焊接冶金特点与稳定性,重点研究了DLBSW接头中焊接缺陷的形成机理与抑制措施,考察了T型接头的力学性能与断裂机理。此外,探讨了轻合金T型结构DLBSW过程数值模拟研究的重要意义。

**关键词:** 铝合金; 钛合金; 双激光束双侧同步焊接(DLBSW); 焊接稳定性; 焊接缺陷; 力学性能; 数值模拟

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.11.020



占小红

教授、博士生导师,主要从事激光焊接与先进连接技术、激光增材制造技术等研究。主持科研项目30余项,含国家级项目7项、航空航天型号研制多项。发表学术论文130余篇,其中SCI检索论文80余篇;申请发明专利50余项。获江苏省教学成果二等奖两项、江苏省“六大人才高峰”高层次人才、南京航空航天大学“长空英才”。

以钛合金、铝合金为主的轻合金已经广泛应用于航空航天等领域的结构件制造中,以满足现代飞行器对关键结构件轻量化与高性能的发展需求<sup>[1-2]</sup>。航空航天轻合金薄壁结构件制造过程中,通常涉及蒙皮(蒙皮)与桁条(加强筋)的连接,此类连接所用工艺依然以铆接、机械连接等技术为主,或者直接将大厚度材料机加铣削为带筋壁板整体结构,工作量与制造成本极高。如果能采用两束对称的能量将蒙皮与桁条焊接到一起,则能有效减轻结构件的重量、改善气密性、显著提高生产效率。近年来,随着激光器的进步与航空制造业的发展,蒙皮-桁条T型结构双激光束双侧同步焊接(Double Laser-Beam Bilateral Synchronous Welding, DLBSW)技术逐渐兴起并得到广

泛的应用,DLBSW结构与铆接结构的对比如图1(a)和(b)所示<sup>[3]</sup>。DLBSW技术是将两束激光对称布置于T型接头的两侧,并以相同的入射角度作用于蒙皮与桁条之间,同时填入焊丝,最终形成对称美观的角焊缝,如图1(c)所示。2000年,空中客车公司率先将蒙皮-桁条T型结构DLBSW技术成功应用于A318飞机整体机身壁板的制造中,并于2003年实现批量化生产<sup>[4]</sup>。随后,其产品A340、A380、A350等型号都大量采用了基于DLBSW工艺的铝合金整体壁板结构。以A380为例,机身下部有8块壁板采用DLBSW工艺,可节省铆钉重量达7t以上,有效降低机身重量约10%<sup>[5]</sup>。因此,DLBSW技术对实现机身壁板结构的轻量化制造具有重要意义。国内

\* 基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1301600)。

航空制造企业目前也在探索研发基于 DLBSW 技术的整体壁板结构以用于其相关型号中。此外,在航天制造领域,研发机构也开始逐渐关注并尝试开发面向壁板-骨架 T 型结构的 DLBSW 技术以实现燃料贮箱的轻量化制造。

在国内航空航天领域,部分壁板结构主要选用耐高温且耐腐蚀的 TC4 钛合金。而铝合金的应用则比较多样化,机身壁板结构从早期的 6056/6156 铝合金逐渐发展到 2060/2099、2198/2196、2097、2098 等铝锂合金;燃料贮箱结构则从早期的 5A06 铝合金逐渐发展到 2A14、2219 铝合金,再到目前性能更好、质量更轻的 2195 铝锂合金。近年来,国内外知名学者针对轻合金 T 型结构的 DLBSW 工艺已开展大量研究并已经有诸多型号应用的案例。但是,由于铝合金(特别是铝锂合金)、钛合金本身的材料性能与 T 型结构 DLBSW 这一新技术的特殊性,面向铝合金与钛合金的 T 型结构 DLBSW 技术仍然存在诸多细节问题有待深入探索,主要包括:(1) 新型铝锂合金焊接冶金机理有待进一步完善;(2) 双匙孔通道与贯通熔池

稳定性的控制问题;(3) 铝合金 T 型结构激光焊接过程中的缺陷抑制问题;(4) 基于航空航天服役载荷下焊接接头力学性能的进一步提升;(5) 大型复杂薄壁结构件焊后残余应力与变形的控制。此外,航空航天服役环境特殊,飞机适航认证流程复杂,飞行器发展日新月异。因此,面向航空航天领域的轻合金 T 型结构 DLBSW 技术亟待发展,以为实现大型复杂壁板激光焊接结构的批量化制造奠定基础。

## 双激光束双侧同步焊接 试验研究

### 1 焊接冶金特点研究

激光焊接是一个复杂的物理化学反应过程,包括加热、熔化、冶金反应、凝固结晶、固态相变等。目前,国内外对于 DLBSW 工艺冶金性的相关研究较少,主要集中于单激光焊接。DLBSW 包含两束激光热源,几乎继承了单一激光焊接时所面临的所有技术难点,且焊接冶金性更为复杂。焊接过程中不可避免地存在在基体元素与激光的相互作用,并发生不同程度的元素偏析、合金元素挥发等现象。针对轻合金的焊接冶金

特点开展相关研究有助于深入理解 DLBSW 过程。

以钛合金、铝合金为主的轻合金在自身性能方面具有较为活泼的化学性质,在焊接过程中极易与周围环境发生反应,例如 Al、Mg、Li 等元素容易与空气中的水分发生反应生成金属氧化物与原子态氢;氢气、水蒸气等气体发生分解形成气体原子。一般随着焊接温度的升高,液态金属吸收气体的能力更强。金属氧化物与气体的生成会显著降低焊接接头显微组织的均匀性,继而降低其综合力学性能。对于铝合金而言,在焊接过程中极易发生低沸点元素(Li、Mg 等)的蒸发烧损现象,特别是对于目前航空航天领域大量采用的铝锂合金,如 5A90、2060、2099、2198、2196 等, Li 元素在焊接过程中极易发生烧损,继而导致焊缝中有利合金元素含量下降,沉淀相强化效果降低,特别是铝合金对激光束具有较高的反射性,因此对激光能量密度的要求较高。激光器对焊接效果的影响至关重要,已有研究表明,与 CO<sub>2</sub> 激光相比,光纤激光具有更强的穿透力,更适用于机身壁板结构的焊接<sup>[6]</sup>。

在焊接冶金反应过程中,熔

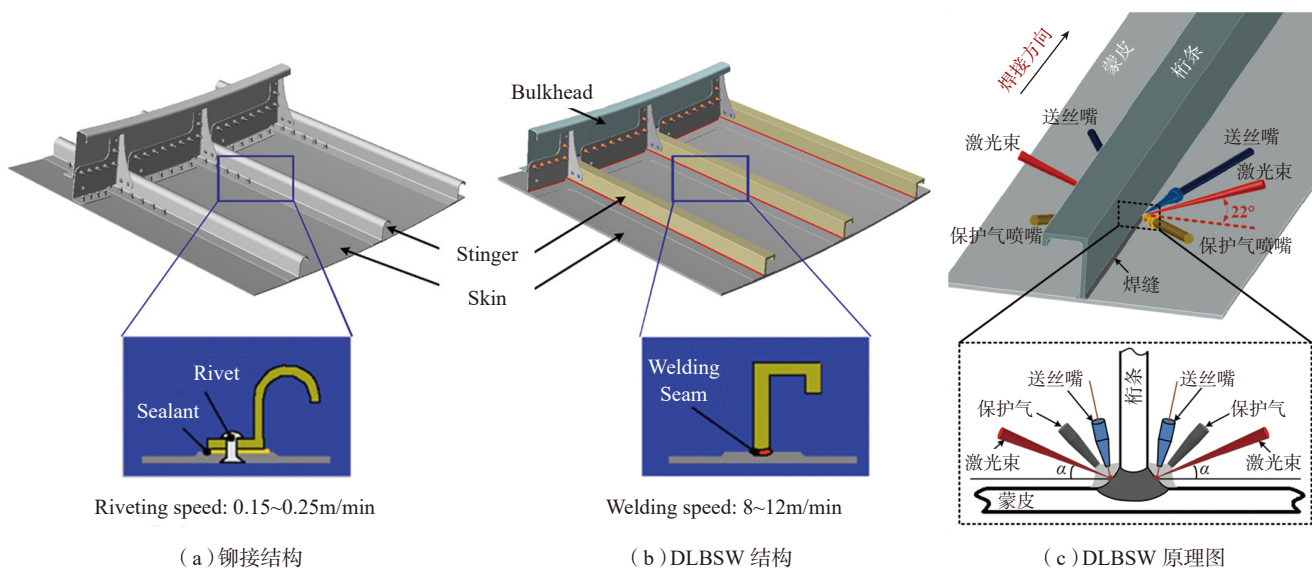


图1 铆接结构与DLBSW结构对比

Fig.1 Comparison between riveting structure and DLBSW structure

池内会发生不同程度的元素偏析现象。德国学者 Enz 等<sup>[7]</sup>针对 2196-T8/2198-T3 铝合金 T 型结构 DLBSW 接头的局部化学成分开展研究,发现由于相分离、熔融母材稀释不足等因素, Li 元素在焊缝区域呈现不均匀分布。Han 等<sup>[8]</sup>较为详细地阐述了铝锂合金 T 型结构 DLBSW 接头下熔合线附近的结晶过程与元素相互扩散过程,在初始结晶阶段,在层流边界层中的  $Al_3Zr$  和  $Al_3(Li, Zr)$  的异质形核机制的作用下,等轴晶开始形核,同时发生 Si、Cu 元素的扩散,如图 2 (a)所示;冷却过程中,等轴晶继续生长,而晶间液体被压缩,导致晶间液体的溶质浓度明显增加,当晶间液体温度下降到某一值时,相界面进一步发生溶质扩

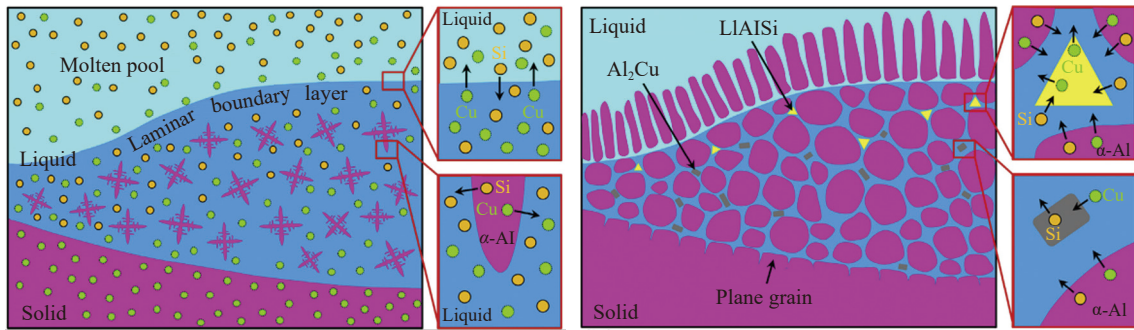
散,继而导致  $LiAlSi$  和  $Al_2Cu$  沉淀相开始在晶间形成,如图 2 (b)所示<sup>[8]</sup>。目前,国内外研究学者主要通过改变焊丝成分这一途径达到改善焊接熔池内化学冶金过程的目的。已有研究表明,加入适当的微量稀土元素,也可起到细化晶粒的作用<sup>[8]</sup>。

## 2 焊接稳定性研究

焊接稳定性差是激光焊存在的普遍问题。T 型结构 DLBSW 过程的稳定性受到多方面因素的影响,主要包括焊接系统与焊接工艺两个方面。

焊接系统的稳定性直接决定了焊接过程的稳定性。激光焊接过程能量集中,能量作用范围小,薄壁 T 型 DLBSW 结构的焊接速度可高达 12m/min。在高速的激光焊接过程中,长直线焊缝存在能量与变形的不

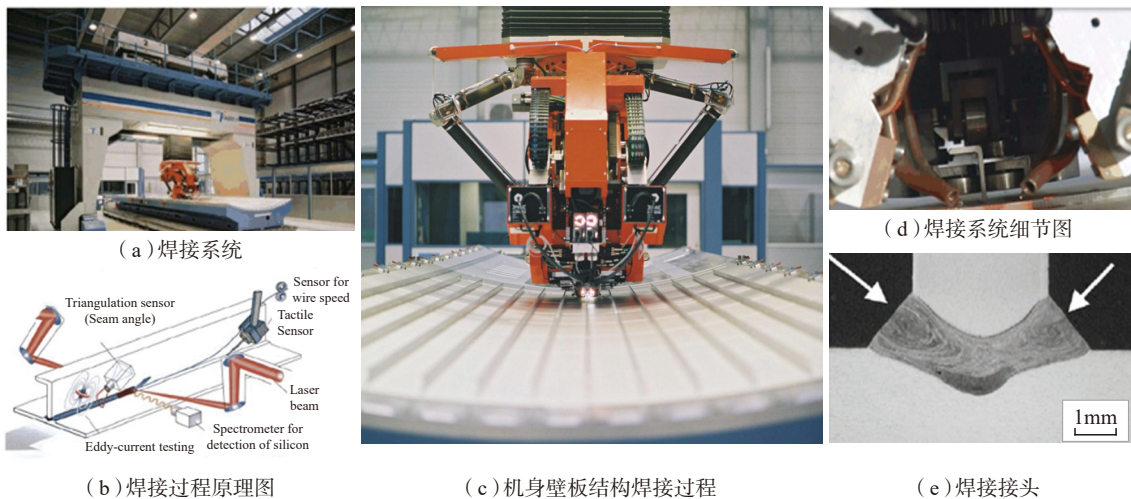
断累积,实际焊缝与原始路径逐渐产生偏差,当偏差值大于某一个临界值时,焊缝的稳定性急剧下降。而且,位置偏差一旦产生,很难在实际焊接过程中得到校正与补偿。因此,长直线焊缝的 DLBSW 技术对焊接系统的数字化、智能化、信息化提出了较高的要求,可实时监控焊接路径、调整轨迹偏差、控制送丝速度的智能化 DLBSW 系统亟待开发。国外研究学者 Brenner 等<sup>[9-10]</sup>针对飞机壁板结构设计了具备焊缝跟踪与质量控制传感单元的激光焊接系统,并且通过滚轮实现桁条的定位与装夹,该焊接系统如图 3 所示。空客公司诺登哈姆工厂设计了一套搭载两台 3.5kW  $CO_2$  激光器的激光焊接系统,焊接过程中,可根据反馈信号进行调



(a) 层流边界层液相中的等轴晶核 (b)  $LiAlSi$  和  $Al_2Cu$  的晶间成核

图2 下熔合线附近焊缝结晶与元素相互扩散过程示意图

Fig.2 Schematic diagrams of weld crystallization and elements interdiffusion near lower fusion line



(a) 焊接系统 (b) 焊接过程原理图 (c) 机身壁板结构焊接过程 (d) 焊接系统细节图 (e) 焊接接头

图3 空客公司诺登哈姆工厂机身壁板结构双侧激光焊接系统

Fig.3 Double-sided laser beam welding system for aluminum alloy fuselage panel structure being installed in Nordenham factory

节以保证焊缝的成形质量<sup>[11-12]</sup>。

在国内,赵志远等<sup>[13]</sup>设计了可随焊缝形状扫略的双激光器,通过实时控制送丝速度弥补长桁与蒙皮在焊接过程中的不贴合,获得的整体壁板如图4所示。Huang等<sup>[14]</sup>提出了一种双面焊缝跟踪与误差补偿方法,可以实现DLBSW过程中的高精度动态偏差补偿,提高焊接系统的稳定性。此外,龚时华等<sup>[15]</sup>研制了十轴六联动双光束激光焊接机床,通过六轴联动控制单元实现了T型结构双光束焊接过程中焊缝的跟踪与补偿。

焊接工艺方法对焊接稳定性的影响也十分显著。焊接过程中,两束激光热源共同作用于壁板与桁条之间并形成了双匙孔通道与贯通熔池。双激光束形成的两侧匙孔时刻都在以不同的频率与振幅波动,其相互作用机理较为复杂,目前难以通过试验监测手段进行观察。匙孔的波动容

易受到外界条件的干扰而发生变化,导致激光匙孔的形状发生变化,增加了焊接过程的不稳定性。此外,在两束激光的交汇处,相互会对另一侧熔池的流动产生影响,降低焊接过程的稳定性<sup>[6]</sup>。在焊接工艺稳定性的提升方面,Tao等<sup>[16]</sup>研究了送丝姿势对焊接工艺稳定性的影响,设计了3种送丝过渡模式,分别为液体桥接过渡模式、熔滴过渡模式和铺展过渡模式,其中,液体桥接传递模式能保证焊接过程的稳定进行。Zhao等<sup>[17]</sup>采用预置尺寸为1.5mm×1.5mm双小凸台的蒙皮与桁条开展DLBSW试验,如图5所示,力求弥补填丝过程的不稳定性,试验结果表明,在该结构下的焊接过程稳定性较好,且获得的T型焊接接头成形质量良好。

### 3 焊接缺陷研究

焊接缺陷的形成直接影响整体焊接结构的综合质量。与平板对接

接头相比,T型接头的缺陷形成机理更为复杂,但最容易形成的缺陷同样是气孔与裂纹,如图6所示<sup>[3]</sup>。其中,气孔缺陷是一个较为普遍且值得关注的问题。由于T型结构DLBSW工艺的特殊性,贯通熔池与匙孔形成于桁条的下侧,桁条对熔池内气泡的上浮与逸出具有明显的阻碍作用。已有研究发现,T型接头上熔合线附近区域的气孔数量一般较多且体积较大<sup>[2]</sup>。此外,熔池与匙孔的受力情况较为复杂,导致气孔缺陷的形成难以控制。

与常规铝合金激光焊接过程一样,T型结构DLBSW焊接过程气孔缺陷一般可分为冶金气孔与工艺气孔两类来研究分析。铝合金激光焊接过程中的冶金气孔以氢气孔为主,形状一般较为规则,其形成与焊接过程中生成的原子态氢密切相关。对于Al-Mg、Al-Li等系列的合金,Mg、Li等合金元素可能会增加熔池吸收气体原子的倾向,加剧冶金气孔的形成。冶金气孔的形成与母材表面的氧化膜、母材焊前清洁程度、焊接环境湿度也存在一定的关系。此外,氢气孔的形成与氢元素在熔池中的溶解度密切相关,氢元素会在熔池冷却过程中因溶解度下降而大量析出,进而形成氢气泡。而工艺气孔通常呈不规则形状,其形成主要与匙孔坍塌有关,且DLBSW熔池内的匙孔与水平面之间呈一定的角度,匙孔在熔融金属的作用下发生坍塌的概率更高。目前普遍认为,焊接过程中保证双激光束的空间同步性与空间对称性,获得相互贯通的匙孔,对减少焊接缺陷具有重要意义。已有研究表明,在非同步双激光束焊接过程中,匙孔无法相互贯通,匙孔的形态稳定性急剧下降,坍塌频率更高,导致气泡形成并被困在匙孔底部无法逸出而形成严重的链状气孔<sup>[18]</sup>。

在气孔缺陷抑制方面,杨武雄等<sup>[19]</sup>提出了小电流摆动电弧阴极雾

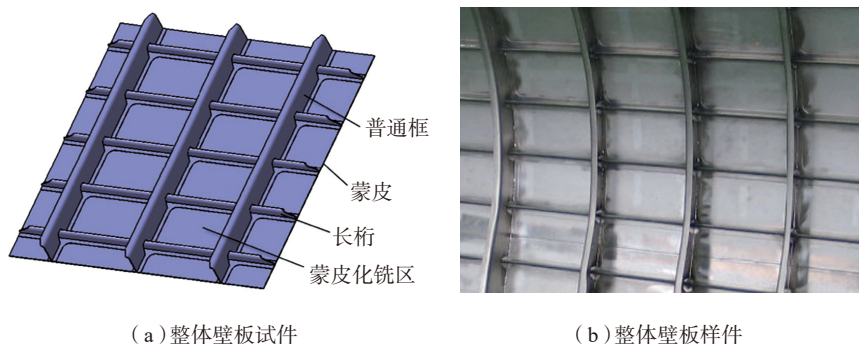


图4 TC4钛合金双激光束填丝焊接整体壁板

Fig.4 Integrated panel of TC4 titanium alloy by double-laser filler wire welding

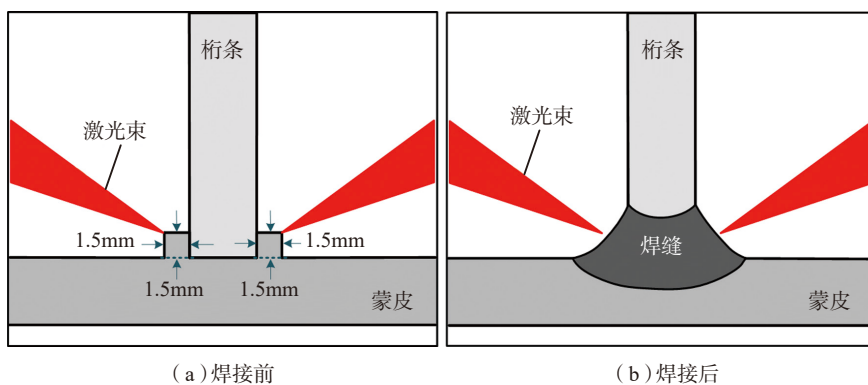


图5 预置双小凸台蒙皮-桁条T型焊接结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of skin-stringer T-structure with double small boss in skin

化去除材料表面氧化膜的方法,有效降低了T型焊接接头气孔率。张滢龙等<sup>[20]</sup>通过试验证明了采用较高的焊接速度可以有效降低接头的气孔数量与大小,如图7所示。Tao等<sup>[21]</sup>深入分析了焊接速度对气孔缺陷形成与演化过程的影响机理,如图8所示,随着焊接速度的增加,气泡析出的效率显著提高,而在较低的焊接速度下,气泡容易被强大的对流捕获,难以逸出。李希彬等<sup>[22]</sup>发现,较大的激光功率与较小的光斑直径均会降低匙孔的稳定性,容易产生气孔,而较快的焊接速度则有利于提高匙孔的稳定性,降低接头气孔率。虽然目前在降低T型接头气孔率方面取得了一定的研究成果,但仍然无法较好地满足实际航空航天应用需求,关于T型结构DLBSW气孔缺陷的相关研究还远远不够。

铝合金的热裂纹敏感性一直以来都是激光焊接中非常重视的问题。激光焊接具有较快的加热与冷却速度,温度梯度大,焊缝结晶组织的方向性强,导致铝合金的激光焊接具有较大的热裂纹敏感性。在焊接结构方面,T型接头的焊缝根部与焊趾处存在较大应力集中,会促使裂纹的形成。已有研究表明,随着激光功率和焊接速度的增加,结晶裂纹敏感性增加;而随着送丝速度的增加,结晶裂纹敏感性降低<sup>[23-24]</sup>。在焊接材料

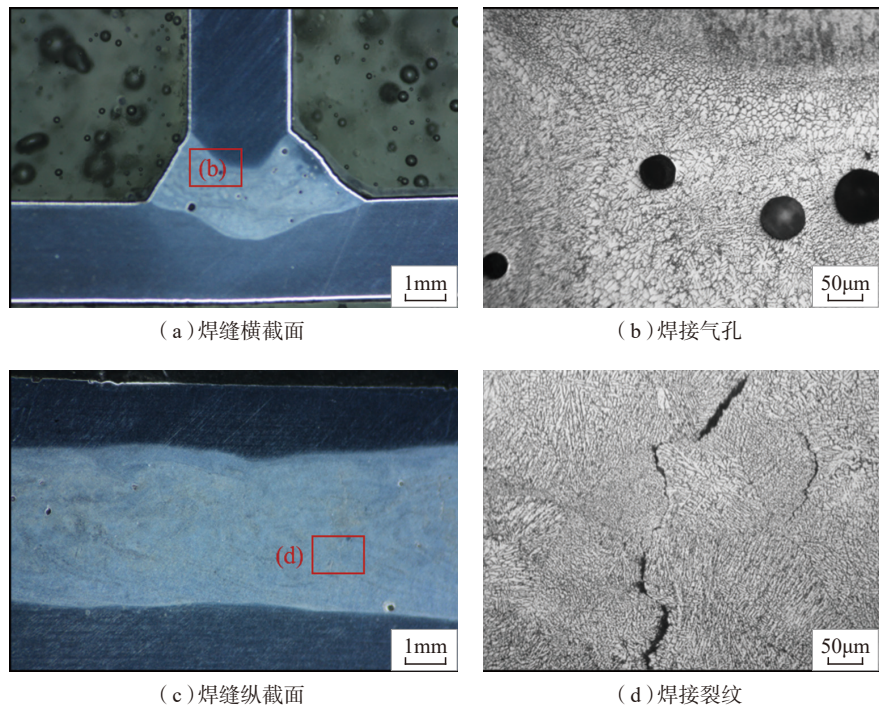


图6 2060/2099铝锂合金T型结构DLBSW接头中的微裂纹  
Fig.6 Microcracks in laser welded T-joint of 2060/2099 Al-Li alloy

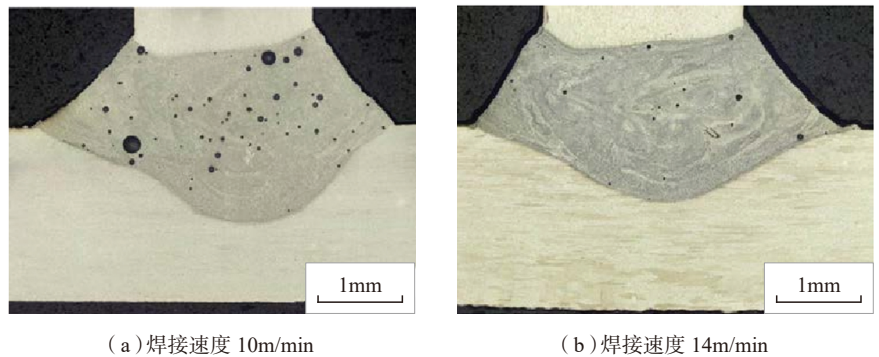


图7 2060/2099铝锂合金T型结构DLBSW接头  
Fig.7 DLBSW joint for T-structure of 2060/2099 Al-Li alloy

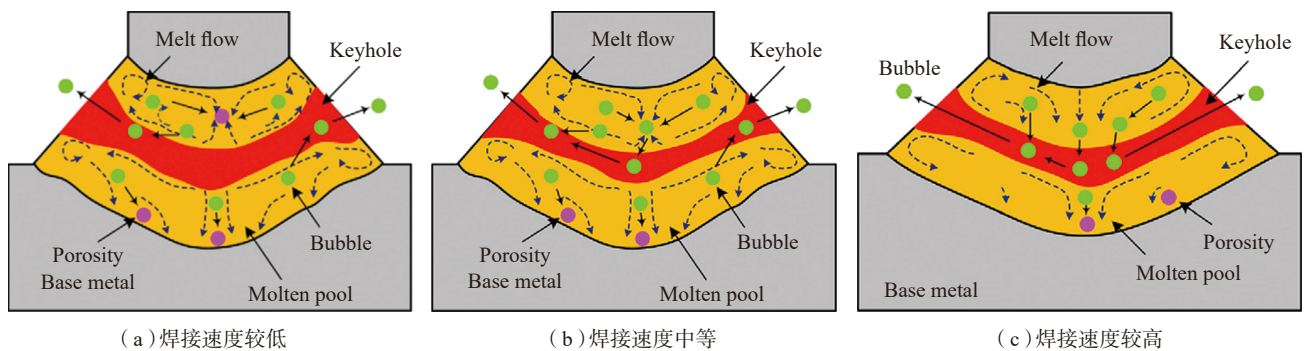


图8 不同焊接速度对气孔缺陷形成与演化过程的影响机理

Fig.8 Schematic representation of porosity defects formation and evolution influencing mechanism at different welding speeds

方面,焊丝对焊缝裂纹缺陷具有一定程度的抑制效果。Enz<sup>[25]</sup>和Prisco<sup>[26]</sup>等采用Al-Si焊丝对异种铝合金T型结构进行激光焊接试验,研究发现焊丝中Si元素含量的增加可显著改善裂纹缺陷。德国弗劳恩霍夫(Fraunhofer)研究协会选用ER4047对2198铝锂合金开展DLBSW试验,在抑制裂纹方面取得了较好的效果<sup>[4]</sup>。Tian等<sup>[27]</sup>将焊接有限元模型与二维热裂纹敏感性模型相结合,提出了一种新的耦合模型,以预测AA2198/AA2196铝合金T型结构DLBSW接头在不同工艺参数下的热裂纹敏感性,并对不同功率下焊缝内部裂纹缺陷进行X射线检测,检测结果显示,裂纹的数量随着激光功率的增加而增加,如图9所示。目前,国内学者也提出了一种将预埋焊丝新工艺与合适的焊丝相互配合使用的工艺改进方法,可有效抑制T型接头热裂纹的萌生和扩展<sup>[28]</sup>。

#### 4 力学性能研究

焊接结构的力学性能是最终评判焊件是否满足实际应用需求的重要标准。T型结构DLBSW工艺还存在接头软化、抗疲劳性能不足等问题,国内外学者对T型结构DLBSW接头的硬度、拉伸性能、剪切性能、疲劳性能等力学性能也开展了研究。

钛合金T型结构DLBSW接头的力学性能较好,芦伟等<sup>[29]</sup>通过试

验获得了与母材抗拉强度较为接近的T型结构DLBSW接头。许良等<sup>[30]</sup>发现,与激光点焊试件相比,TC4钛合金T型结构DLBSW接头的抗拉强度较高,其中值疲劳寿命也提高了2.23倍。

铝合金T型结构DLBSW接头的软化行为较为严重,焊接缺陷较多,接头力学性能往往低于母材。国外学者较早针对铝合金T型结构DLBSW接头的力学性能开展了相关研究。Schumacher等<sup>[31]</sup>研究了焊接工艺参数对铝合金T型结构DLBSW接头的拉伸性能的影响,研究表明,激光入射位置向长桁的偏移量显著影响T型接头的轴向拉伸强度,且该偏移量的选择与桁条的厚度密切相关。Squillace等<sup>[32]</sup>探讨了填充金属对AA7475/PA765铝合金T型结构DLBSW接头力学性能的影响,研究发现,采用焊丝AA4047可获得较高的接头强度,热影响区的硬度也显著提高。Dittrich等<sup>[4]</sup>对2139铝合金T型结构DLBSW接头的综合力学性能进行测试与研究,通过调整焊接工艺参数与热处理条件,T型接头的径向抗拉强度可达到368MPa。Enz等<sup>[7]</sup>对比了AA2198/AA2196铝合金与AA2198/AA2198铝合金两种T型结构DLBSW接头的显微硬度与拉伸强度分布特征,研究发现,AA2198/AA2198铝合

金T型结构DLBSW接头的显微硬度分布更加均匀,且局部区域的拉伸强度分布也更加均匀,如图10所示。Kashaev等<sup>[33]</sup>研究了AA2198/AA2196铝合金T型结构DLBSW接头的硬度分布,发现熔合区的硬度值最低,约为母材的60%,焊缝中心的硬度约为母材的75%。

在国内,何恩光等<sup>[34]</sup>采用X射线衍射法测量了2198铝锂合金激光焊接T型结构的残余应力,研究发现,随着焊接热输入的增大,纵向残余应力峰值最低。张灏龙<sup>[20]</sup>针对2mm厚的2060/2099铝锂合金T型结构DLBSW接头的拉伸性能开展测试与分析,横向拉伸性能最高,可达到2060铝合金的77.9%,该研究认为气孔缺陷、裂纹和接头软化是接头力学性能下降的主要因素。邓景煜等<sup>[35]</sup>针对1.8mm厚的6156/6056铝合金T型结构DLBSW接头的力学性能开展研究,各向拉伸试验与剪切试验检测结果显示,接头的断裂位置均发生在焊趾处,再沿着熔合线发生扩展。Han等<sup>[36]</sup>探讨了新型焊丝CW3与传统焊丝AA4047对2060/2099铝锂合金T型结构DLBSW接头微观组织与力学性能的影响,研究发现,焊丝CW3对环向力学性能均有明显的改善作用。夏令<sup>[3]</sup>研究了组织形态对2060/2099铝锂合金T型结构DLBSW接头环

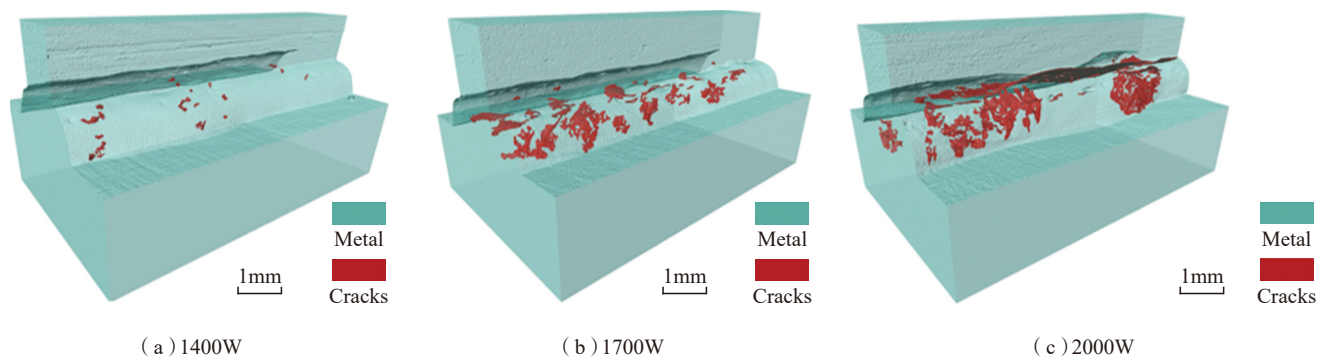


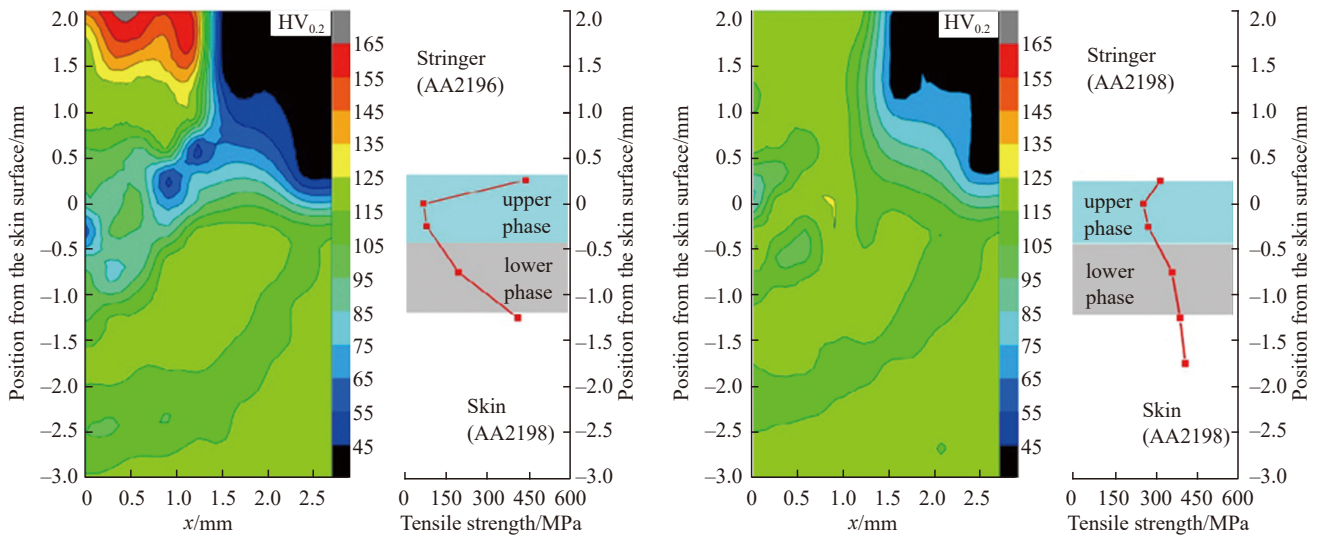
图9 不同激光功率下焊缝内部裂纹的X射线检测结果

Fig.9 X-ray results of cracks inside welds obtained through various laser welding powers

向拉伸性能的影响,发现拉伸试样局部断裂于等轴细晶区,如图 11 所示,该研究认为,在拉伸力的作用下,等轴细晶区内晶间存在的大量低熔点共晶相极易发生断裂,降低接头的环

向拉伸性能。因此,等轴细晶区的形成机理以及对力学性能的影响也有待开展进一步研究。此外,Zhao 等<sup>[17]</sup>针对蒙皮预置双小凸台的 2219 铝合金 T 型结构 DLBSW 接头开展了

剥离性能研究,研究发现 T 型接头的剥离强度可达到 317.46MPa,剥离强度的下降主要归因于焊接接头塑性的下降以及氧化杂质相( $TiO_2$  与  $Al_2O_3$ )的形成,如图 12 所示。

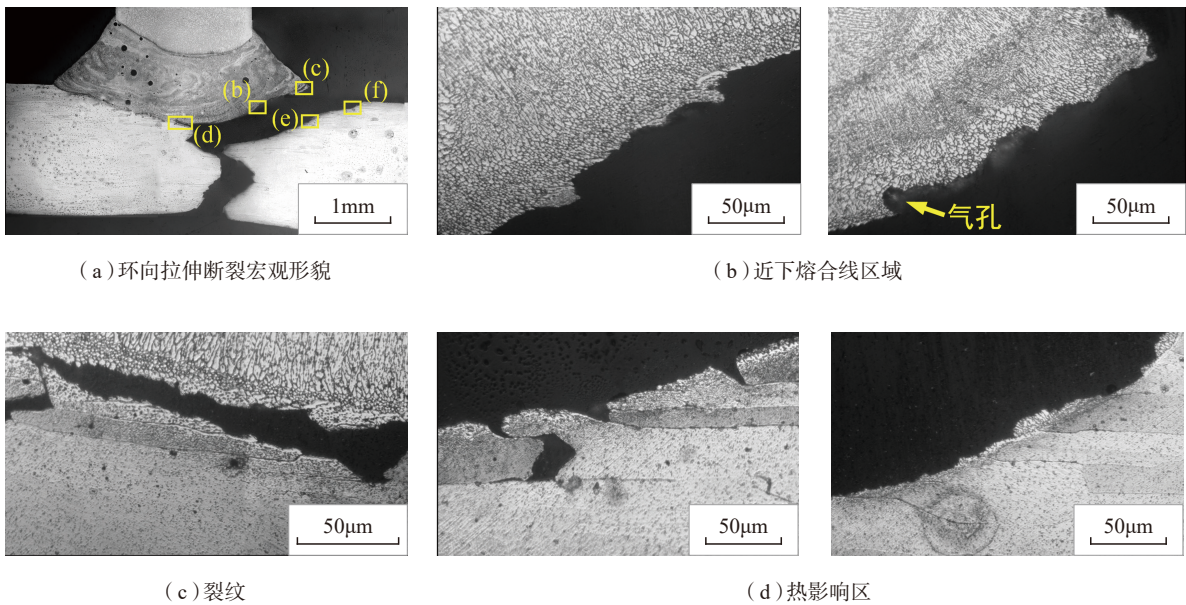


(a) AA2198/AA2196 铝合金 T 型接头

(b) AA2198/AA2198 铝合金 T 型接头

图10 焊缝显微硬度与焊缝不同位置拉伸强度的分布

Fig.10 Distribution of micro-hardness of weld seam and micro-tensile strength of different layers of weld seam



(a) 环向拉伸断裂宏观形貌

(b) 近下熔合线区域

(c) 裂纹

(d) 热影响区

图11 T型结构DLBSW接头环向拉伸断裂形貌

Fig.11 Morphology of hoop tensile fracture of DLBSW joint for T-structure

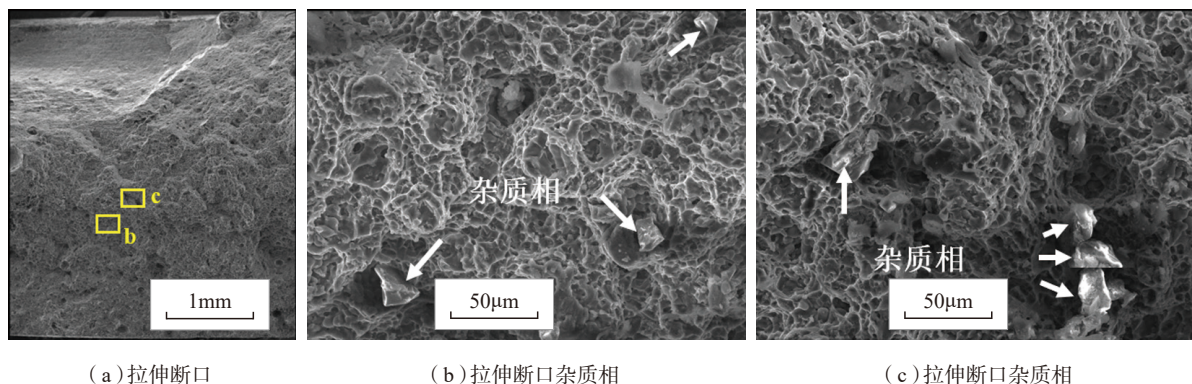


图12 2219铝合金T型结构DLBSW接头剥离断面形貌

Fig.12 Morphology of stripping fracture in DLBSW joint for T-structure of 2219 aluminum alloy

## 双激光束双侧同步焊接 数值模拟研究

### 1 焊接热场流场研究

轻合金T型结构DLBSW熔池流动行为难以通过现有技术手段进行直接的试验观察。因此,基于DLBSW过程热场与流场的数值模拟研究开始逐渐受到研究学者的关注。数值模拟技术不仅为进一步分析焊接过程中的熔池流动行为以及匙孔受力特征提供了新思路,并且为深入开展DLBSW技术研究奠定了理论基础。

欧阳自鹏<sup>[37]</sup>建立了6056/6156铝合金T型结构DLBSW接头的热-流场模型,考察DLBSW熔池内的液态金属流动行为,进而对焊接过程的稳定性进行分析,研究表明,由

表面张力导致的Marangoni剪切力是熔池中流体流动的主要驱动力,如图13所示,表面张力温度系数越大,熔池内部的流动速度越快。杨志斌<sup>[6]</sup>建立了三维准稳态6056/6156铝合金T型结构DLBSW过程的热-流耦合数学模型,计算获得了T型结构DLBSW过程的熔池流场与匙孔形状,该研究表明匙孔的贯通性消失会加剧匙孔底部旋涡流动,同时增加了熔池尾部液态金属向底部流动的倾向,保证了匙孔贯通性与同步性在一定程度上有助于促进熔池的流动,从而提高了气泡的逸出几率。Tao等<sup>[21]</sup>通过数值模拟技术分析了不同焊接速度下的熔池流动与匙孔行为,以探讨焊接速度对焊接气孔缺陷的影响,研究表明气孔数量与匙孔上方熔池的对流以及熔池

尾部的流动方向密切相关,提高焊接速度有利于气泡从熔池中逸出。

### 2 焊接应力与变形研究

T型结构拘束度大,焊接过程中容易产生残余应力与变形,焊后变形会导致焊接质量低、结构强度低、使用寿命低等问题。装配精度与焊接顺序对焊后变形存在十分显著的影响,但其影响机理尚无系统定论。随着计算机技术的发展,基于数值模拟技术的焊接应力应变分析方法开始受到国内外学者的高度关注<sup>[38]</sup>。有限元方法是目前模拟焊接过程应力与变形的最主要方法,不仅可以定量分析焊接结构的残余应力与变形分布特征,还可模拟其产生与演变过程,对调整焊接工艺、提升焊接结构装配性能而言具有重要意义,特别是对于大型薄壁结构而言,焊缝长且分布复杂,焊后残余应力与变形的分布往往较为复杂,具有更多的不确定性,图14为数值模拟技术在大型薄壁DLBSW结构中的应用<sup>[39-40]</sup>。目前,大型薄壁结构的焊接数值模拟技术仍然存在计算时间长、计算精度不足、计算难收敛等难题亟待解决。

在国外,Zain-ul-Abdein等<sup>[41]</sup>针对AA6056-T4铝合金T型结构DLBSW过程开展有限元分析,探索了残余应力对有限元计算所得的应力强度因子的影响,研究发现,残余应力导致裂纹前端的应力强度因子增

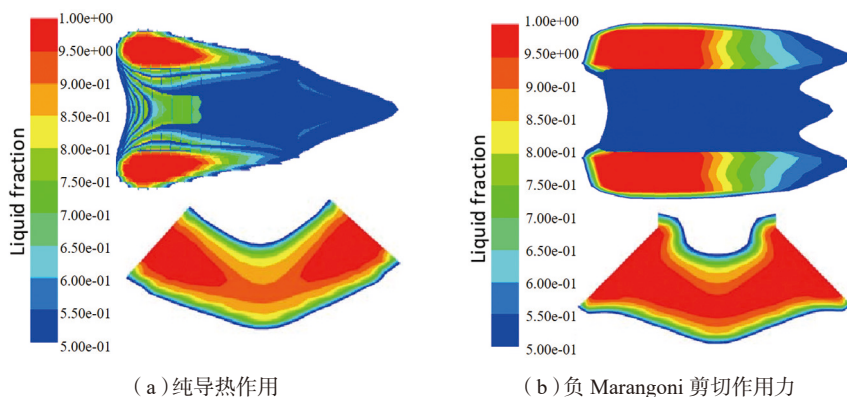


图13 不同Marangoni剪切力作用下的熔池形状

Fig.13 Shape of molten pool under different Marangoni shear forces

加。此外,基于 Abaqus 与 Sysweld 两个软件分别开展数值模拟研究,均获得了与试验结果较为吻合的模拟结果<sup>[42]</sup>。Ploshikhin 等<sup>[43]</sup>针对 AA6056 铝合金 T 型结构 DLBSW 飞机壁板的焊后变形开展数值模拟研究,该结构的焊缝长度约为 10m,如图 15 (a) 所示,通过数值模拟获得了与试验测量结果较为一致的焊后变形分布,如图 15 (b) 所示。

近年来,国内外学者针对激光焊接过程开展了大量的数值模拟研究,但针对大型薄壁 DLBSW 结构应力应变场的数值模拟研究较少。郑文健<sup>[44]</sup>针对 6156/6056 铝合金飞机壁板大型构件的三桁条典型件与七桁

条模拟段的焊后应力与变形开展有限元分析,并相应地提出了控制该结构焊后变形的方案。苏阳<sup>[45]</sup>针对薄板铝合金单桁条、多桁条 T 型结构的应力与变形开展数值模拟分析,研究发现对于多桁条 T 型结构,焊接顺序的选择尤为重要,采用交叉对称焊接方案,获得的焊后变形最小。李建波<sup>[46]</sup>在焊接设备、焊接工艺试验的基础上,采用 Abaqus 软件针对 2A97 铝锂合金激光焊接 T 型接头的焊后应力变形开展数值模拟研究,获得了与实际残余应力分布基本趋于一致的结果。占小红等<sup>[39]</sup>针对 6056/6156 铝合金七桁条结构开展 DLBSW 数值模拟研究,计算了 4 种不同的焊接顺序对

焊后变形的影响,研究表明,当采用焊接顺序“1463752”时,焊接结构的变形最小,如图 16 所示。Wu 等<sup>[47]</sup>通过数值模拟技术探讨了不同服役载荷对 5A90 铝锂合金 T 型结构残余应力的影响,如图 17 所示,研究表明服役载荷对表层纵向应力的影响显著,焊趾处是服役过程中的应力突变区。

### 结论

轻合金 T 型结构 DLBSW 技术在航空航天领域具有十分广阔的应用前景,国内外针对轻合金 DLBSW 技术已开展了相关研究,主要涉及焊接冶金特点、焊接稳定

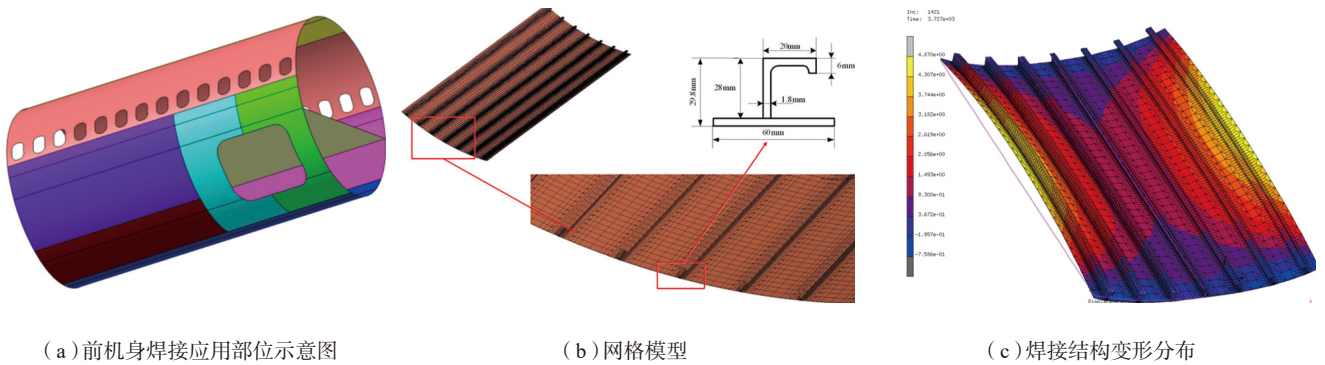
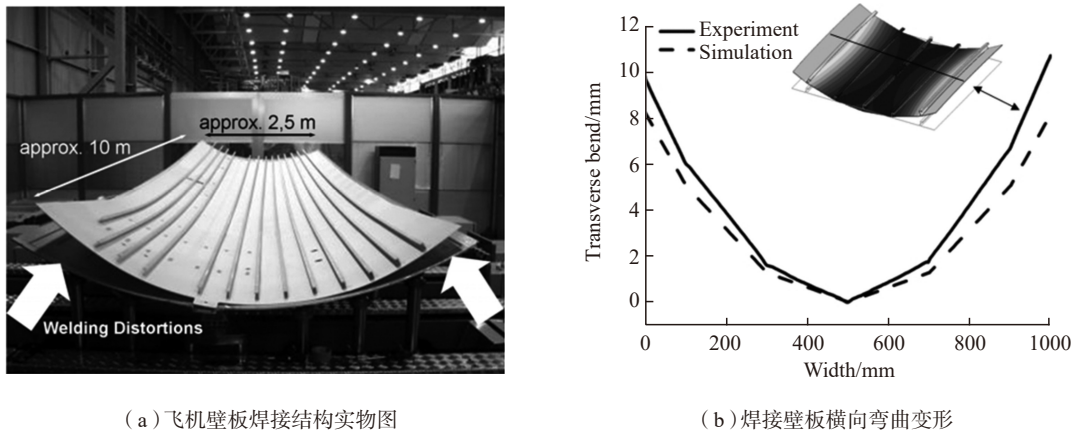


图14 数值模拟技术在大型薄壁DLBSW结构中的应用

Fig.14 Application of numerical simulation technology in large thin-walled DLBSW structure

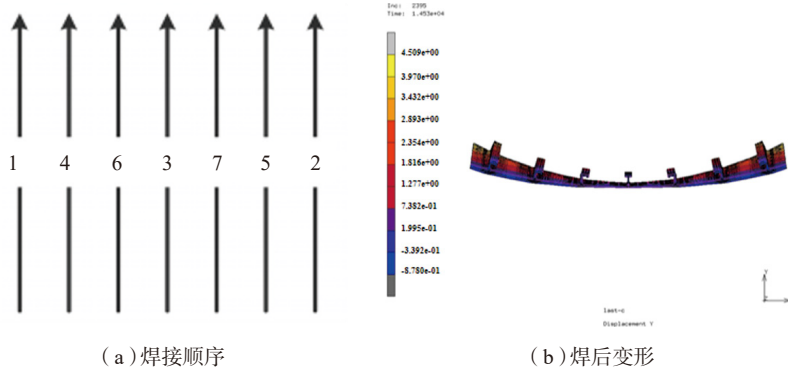


(a) 飞机壁板焊接结构实物图

(b) 焊接壁板横向弯曲变形

图15 AA6056铝合金飞机壁板焊接结构与焊后变形

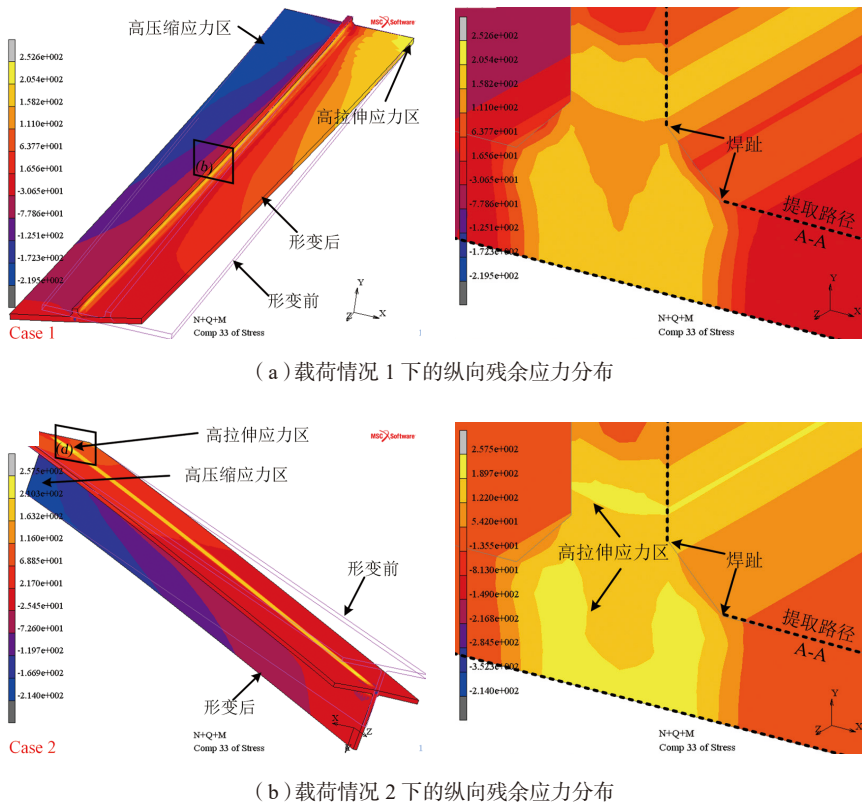
Fig.15 Aircraft panel welding structure for AA6056 aluminum alloy and welding deformation



(a) 焊接顺序 (b) 焊后变形

图16 最优焊接顺序下的焊后变形

Fig.16 Welding deformation under optimal welding sequence



(a) 载荷情况 1 下的纵向残余应力分布

(b) 载荷情况 2 下的纵向残余应力分布

图17 不同服役载荷下的纵向残余应力分布特征

Fig.17 Distribution of longitudinal residual stress under different service loads

性、焊接缺陷、焊接接头力学性能以及焊后残余应力与变形等方面的研究,已取得一定的研究成果,但还需深入开展。

为达到航空航天适航要求的轻合金 DLBSW 壁板结构,轻合金 T 型结构 DLBSW 技术必然向智能化、数字化与信息化的方向发展。面向大型薄壁复杂结构的焊缝路径识别与监控、轨迹偏差补偿、焊接工艺参

数实时调整与控制等技术难点亟待攻克。

### 参考文献

[1] 占小红, 欧文敏, 魏艳红, 等. 飞机壁板先进焊接技术应用现状[J]. 航空制造技术, 2013, 56(22): 42-44.  
ZHAN Xiaohong, OU Wenmin, WEI Yanhong, et al. Application status of advanced welding technology of aircraft panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013,

56(22): 42-44.

[2] MA X Y, GONG S L, ZHANG J X, et al. Formation, microstructure and mechanical properties of double-sided laser beam welded Ti-6Al-4V T-joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 729-735.

[3] 夏令. 铝锂合金激光焊接组织形态及其形成机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

XIA Ling. Study on the morphology and formation mechanism of microstructures in Al-Li alloy laser welded joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[4] DITTRICH D, STANDFUSS J, LIEBSCHER J, et al. Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design-first results[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 113-22.

[5] RENDIGS K H. Airbus and current aircrafts metal technologies[R]. Chicago: Presentation for the 8th MMPDS, 2005.

[6] 杨志斌. 铝合金机身壁板结构双侧激光焊接特征及熔池行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

YANG Zhibin. Study on double-sided laser beam welding characteristics and weld pool behavior for aluminium alloy fuselage panel structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[7] ENZ J, RIEKEHR S, VENTZKE V, et al. Influence of the local chemical composition on the mechanical properties of laser beam welded Al-Li alloys[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 51-58.

[8] HAN B, CHEN Y B, TAO W, et al. Nano-indentation investigation on the local softening of equiaxed zone in 2060-T8/2099-T83 aluminum-lithium alloys T-joints welded by double-sided laser beam welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 756: 145-162.

[9] BRENNER B, STANDFUSS J, DITTRICH D, et al. Laser beam welding of aircraft fuselage structures[J]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2008, 1801: 838-845.

[10] BRENNER B, DITTRICH D, MORGENTHAL L, et al. New technological aspects of laser beam welding of aircraft structures[C]//Deutscher Verband für Schweißtechnik, Dusseldorf, 2004: 19-24.

[11] MANUEL M T, MANFRED W, GEDRAT O, et al. Laser welding machine for the welding of sections in large structural components: EP 098548581[P]. [1999-08-20].

- [12] PLAM F. Can welded fuselage structures fulfil future A/C damage tolerance requirements[C]//First International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures. TU Delft, 2007.
- [13] 赵志远, 江少华, 周煜青. 机身钛合金壁板激光焊接技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 134-138.
- ZHAO Zhiyuan, JIANG Shaohua, ZHOU Yuqing. Research and application of laser welding technology in titanium-alloy fuselage panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 134-138.
- [14] HUANG Y, LI G, SHAO W J, et al. A novel dual-channel weld seam tracking system for aircraft T-joint welds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1-4): 751-761.
- [15] 龚时华, 郑忠香, 王平江, 等. 十轴六联动双光束激光焊接及其跟踪控制技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(11): 34-39, 47.
- GONG Shihua, ZHENG Zhongxiang, WANG Pingjiang, et al. Control technology for dual-beam laser welding and seam tracking with ten-axis six-linkage CNC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(11): 34-39, 47.
- [16] TAO W, YANG Z, CHEN Y, et al. Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 52: 1-9
- [17] ZHAO Y Q, WU Y F, CHEN M L, et al. Research on the stripping performance during dual laser-beam bilateral synchronous welding of 2219 aluminum alloy T-joint for spacecraft[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 33-45.
- [18] 张盛海. 高强铝合金 T 型接头的激光焊接[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- ZHANG Shenghai. Laser welding of the high strength aluminum alloy in T-joint[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [19] 杨武雄. 铝合金 T 型接头高亮度固体激光双光束焊接技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- YANG Wuxiong. Investigation of dual beam high brightness laser welding of aluminum alloy with T-joint[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [20] 张溪龙. 铝锂合金机身壁板结构激光焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- ZHANG Yunlong. Study on the characteristics of laser beam welding for aluminum-lithium alloy fuselage panel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [21] TAO W, YANG Z, SHI C, et al. Simulating effects of welding speed on melt flow and porosity formation during double-sided laser beam welding of AA6056-T4/AA6156-T6 aluminum alloy T-joint[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 699: 638-647.
- [22] 李希彬. T 型结构激光深熔焊接过程中小孔型气孔形成机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- LI Xibin. Research on the formation mechanism of the keyhole induced porosities during laser welding T-type joint[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [23] 安娜, 张心怡, 王启明, 等. 2060 铝锂合金光纤激光填丝焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 94-99.
- AN Na, ZHANG Xinyi, WANG Qiming, et al. Fiber laser welding of 2060 aluminum-lithium alloy with filler wire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 94-99
- [24] 杨武雄, 张心怡, 肖荣诗. 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头双光束激光焊接工艺[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 89-93.
- YANG Wuxiong, ZHANG Xinyi, XIAO Rongshi. Dual-beam laser welding of T-joint of aluminum-lithium alloy 2060-T8/2099-T83[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 89-93.
- [25] ENZ J, KHOMENKO V, RIEKEHR S, et al. Single-sided laser beam welding of a dissimilar AA2024-AA7075T-joint[J]. Materials and Design, 2015, 76: 110-116
- [26] PRISCO A, ACERRA F, SQUILLACE A, et al. LBW of similar and dissimilar skin-stringer joints Part I: process optimization and mechanical characterization[J]. Advanced Materials Research, 2008, 38: 306-319.
- [27] TIAN Y T, ROBSON J D, RIEKEHR S, et al. Process optimization of dual-laser beam welding of advanced Al-Li alloys through hot cracking susceptibility modeling[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(7): 3533-3544.
- [28] 韩冰. 铝锂合金 T 型接头双侧激光焊接组织特征及裂纹控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- HAN Bing. Microstructure characteristics of double-sided laser beam welded aluminium lithium alloys T-joints and its crack control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [29] 芦伟, 巩水利, 马旭颀, 等. 双光束激光焊接钛合金 T 形接头的组织特征与力学性能[J]. 航空制造技术, 2015, 58(17): 104-106, 109.
- LU Wei, GONG Shuili, MA Xuyi, et al. Microstructure characteristics and mechanical properties of double-sided laser beam welded titanium T-joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(17): 104-106, 109.
- [30] 许良, 苏居季, 周松, 等. TC4 钛合金激光双光束焊 T 形接头疲劳性能及断裂机理[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(7): 1408-1416.
- XU Liang, SU Juji, ZHOU Song, et al. Fatigue performance and fracture mechanism of dual-beam laser welded T-joints of TC4 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(7): 1408-1416.
- [31] SCHUMACHER J, ZERNER I, NEYE G, et al. Laser beam welding of aircraft fuselage panels[C]//Proceedings of the Conference ICALEO Section A. Scottsdale, 2002.
- [32] SQUILLACE A, PRISCO U. Influence of filler material on micro-and macro-mechanical behaviour of laser-beam-welded T-joint for aerospace applications[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2009, 223(3): 103-115.
- [33] KASHAEV N, VENTZKE V, ÇAM G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 571-600.
- [34] 何恩光, 巩水利, 陈俐, 等. 铝锂合金双光束激光焊接 T 型接头残余应力分布研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(S2): 102-105.
- HE Enguang, GONG Shuili, CHEN Li, et al. Residual stress distribution feature for T-joints of aluminium-lithium alloy by double sided synchronization fiber laser welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 102-105.
- [35] 邓景煜, 刘红兵, 李昊, 等. 铝合金 T 型接头双激光束焊接断裂行为研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(S1): 11-13, 17.
- DENG Jingyu, LIU Hongbin, LI Hao, et al. Research on fracture behavior of aluminum alloy T-joint welded by double laser beam[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(S1): 11-13, 17.
- [36] HAN B, TAO W, CHEN Y, 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.

[37] 欧阳自鹏. 铝合金 T 型接头双激光束双侧同步焊接稳定性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

OUYANG Zipeng. Study on the stability of dual laser-beam bilateral synchronous welding for T-structure of aluminium alloys[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[38] ZHAN X H, CHEN J, WEI Y H, et al. Heat source analyses of dual laser-beam bilateral synchronous welding for T-joint[J]. China Welding, 2011, 20(1): 28–33.

[39] 占小红, 欧文敏, 魏艳红, 等. 大型客机机身壁板激光焊接工艺性分析[J]. 航空制造技术, 2014, 57(17): 42–45.

ZHAN Xiaohong, OU Wenmin, WEI Yanhong, et al. Manufacturability analysis on laser welding process of large passenger aircraft fuselage panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(17): 42–45.

[40] ZHAN X, MI G, WEI Y. Simulated investigation on the deformation of double laser beam bilateral and simultaneous welding for aircraft panel[J]. Journal of Laser Applications,

2015, 27(2): 022011.

[41] ZAIN-UL-ABDEIN M, NÉLIAS D, JULLIEN J F, et al. Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA6056–T4[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(12): 3025–3039.

[42] ZAIN-UL-ABDEIN M, NÉLIAS D, JULLIEN J F, et al. Finite element analysis of metallurgical phase transformations in AA 6056–T4 and their effects upon the residual stress and distortion states of a laser welded T-joint[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2011, 88(1): 45–56.

[43] PLOSHIKHIN V, PRIHODOVSKY A, ILIN A, et al. Advanced numerical method for fast prediction of welding distortions of large aircraft structures[J]. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2010, 5(4/5): 423–425.

[44] 郑文健. 铝合金 T 型接头双束激光双侧同步焊接的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

ZHENG Wenjian. Numerical simulation of bilateral synchronous laser beam welding for

T-joint of aluminum alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[45] 苏阳. 薄板铝合金 T 型接头双激光束双侧焊接应力和变形的有限元分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

SU Yang. Finite element analysis of stress and distortion for sheet aluminum alloy T-joint in double laser beam bilateral welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[46] 李建波. 铝锂合金 T 型构件双激光束焊接机构开发及工艺变形分析[D]. 天津: 天津大学, 2018.

LI Jianbo. Analyses of welding procedure & deformation and development of double beam laser welding actuator of T-shape joint for aluminum-lithium alloy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[47] WU Y F, ZHAN X H, YU H S, et al. FE analysis of the residual stresses for the laser welded T-joint of Al–Li alloy under service loads[J]. Materials Research Express, 2019, 6(9): 096515.

通讯作者: 占小红, E-mail: zhanxiaohong@126.com。

## Research Progress on Double Laser-Beam Bilateral Synchronous Welding of T-Joints for Light Alloy

ZHAN Xiaohong<sup>1,2</sup>, ZHAO Yanqiu<sup>1,2</sup>, CHEN Shuai<sup>1,2</sup>, KANG Yue<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission; Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**[ABSTRACT]** Double laser-beam bilateral synchronous welding (DLBSW) of T-joints for light alloy is an advancing technology with promising applications and potential development. It is significant for the aerospace panel structures in the lightweight and efficient manufacturing. However, there are still many unresolved details in DLBSW technology of T-joint for light alloy owing to the material properties of light alloy and the particularity of DLBSW technology. In this paper, the welding metallurgy characteristics and stability of DLBSW process for light alloy T-joints are analyzed. The formation mechanism and suppression measures for welding defects in DLBSW T-joint are emphatically researched. The mechanical properties and fracture mechanism of the T-joint are investigated. Besides, the significance of the numerical simulation study on DLBSW of T-joints for light alloy is discussed.

**Keywords:** Aluminum alloy; Titanium alloy; Double laser-beam bilateral synchronous welding (DLBSW); Welding stability; Welding defects; Mechanical properties; Numerical simulation

(责编 古素)