

铝锂合金激光焊接接头组织与缺陷研究进展*

夏令¹, 吴友发¹, 余海松¹, 高雪松², 占小红¹

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106;

2. 南京先进激光技术研究院, 南京 211106)

[摘要] 随着对飞行器性能的要求日趋提高, 结构减重成为航空航天制造中的重要任务。铝锂合金由于其轻质高强等优良性能, 被认为是极具发展前景与优势的航空航天轻质结构材料。同时, 激光焊接技术被认为是最为有效的铝锂合金连接方式之一。但是, 由于合金的特性及飞行器制造产业的要求, 铝锂合金激光焊接技术仍存在诸多难点, 介绍了铝锂合金激光焊缝特殊微观组织及常见焊接缺陷, 重点讨论了等轴细晶区 (EQZ)、焊接气孔、焊接裂纹及接头软化缺陷的形成机理及抑制措施。

关键词: 铝锂合金; 激光焊; 等轴细晶区; 焊接缺陷; 焊接技术

Research Progress on Microstructure and Defects in Al-Li Alloy Laser Welded Joint

XIA Ling¹, WU Youfa¹, YU Haisong¹, GAO Xuesong², ZHAN Xiaohong¹

(1. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 211106, China)

[ABSTRACT] With the increasing demand for aircraft performance, structural weight reduction has become an important task in aerospace manufacturing industries. The Al-Li alloy exhibits many excellent performance including light weight, high strength, etc. These noteworthy advantages make it an ideal aerospace lightweight structural material with great development potential. At the same time, laser welding technology is considered as the most effective joining method for aluminum alloys. Nevertheless, the reliability of the welded structure is recognized as a challenge owing to the unique characteristics of the welded Al-Li alloy and the requirements of the civil aircraft industries. In this paper, the special micro-structure and defects in Al-Li alloy laser welded joint are introduced. The formation mechanism and inhibition measures of equiaxed grain along the fusion boundary (EQZ), welding pores, welding cracks and joint softening defects are analyzed.

Keywords: Al-Li alloy; Laser welding; EQZ; Welding defect; Welding technology

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.23/24.077

轻量化、长寿命、高性能、低成本是现代飞机制造业的发展趋势^[1-2], 因此世界主要飞机制造商都大力开发包括复合材料、先进金属材料、先进连接、自动化装配等众多新材料、新技术、新工艺^[3]。近年来, 随着我国国产大飞机 C919 的立项, 铝锂合金首次被选为我国民机的主要结构材料。基于航空航天领域减重的需求, 铝锂合金激光焊接开始受到国内学者的广泛关注。但是铝锂合金的发展仅 90 余年的历史, 特别是目前大量运用于飞行器结构的第三代新型铝锂合金, 20 世纪 90 年代后期才被研制出来^[4-5]。此外, 我国航空航天领域的激

光焊接技术研究起步较晚, 于 20 世纪末才逐渐发展起来。因此, 我国在铝锂合金激光焊接领域仍存在很多不足, 在先进焊接技术及焊件质量上较之欧美国家仍存在差距。

目前, 铝锂合金激光焊接技术主要存在以下几个难点:

(1) 焊接工艺连续稳定性控制。应用于飞行器的焊接结构, 其单道焊缝长度一般在几米左右, 同时激光焊接由于能量集中, 因此对装配的精度要求很高。且其焊接速度极快, 可达 10m/min, 在高速焊接过程中保证长直线焊缝的连续稳定性是能否获得高质量焊缝的关键之一。工艺连续稳定性的控制需要精准的装夹和各装

* 基金项目: 江苏省自然科学基金(SBK2016022015)。

置的精密配合,其中任一环节出现微小失误都可能通过误差累计最终导致焊缝形貌较差甚至焊接失败。特别是对于蒙皮-桁条T型结构连接所采用的双激光束双侧同步焊接技术而言,更是对装备的设置及定位要求极严。此外,工艺因素也是影响焊接过程稳定性的重要因素。激光焊接过程是一个复杂的物理和化学冶金过程,对于蒙皮-长桁结构而言,双激光束会在桁条下侧形成联合熔池和形态复杂的匙孔,因而其稳定性控制是一个难题。要彻底解决长直线焊缝连续稳定性问题,需要基于匙孔稳定性和熔池流动特征研究,开展大量试验,探讨合适的工艺参数匹配。此外,还要进一步提高装夹精度、焊接过程实时信号检测精度、路径识别和轨迹控制精度等。

(2)焊接缺陷的有效控制,这也是本文主要关注的部分。焊接缺陷的存在会大大降低构件的力学性能和疲劳寿命。本文着眼于铝锂合金激光焊接接头组织及焊接缺陷,结合作者及其团队自身研究工作与国内外研究现状,概述了铝锂合金激光焊接接头组织及缺陷的形成机理和抑制策略,提出了铝锂合金激光焊接的发展方向。

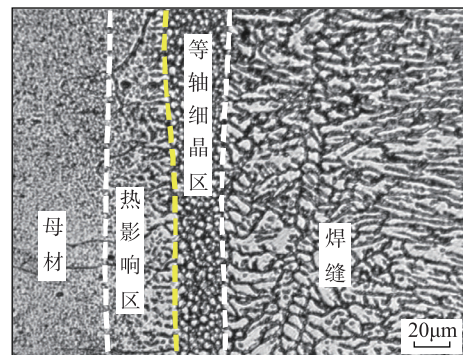
1 铝锂合金焊缝组织研究

一般来说,由于母材金属晶粒提供了优异的生长位置,并且焊缝边界处的生长速率远远超过了该区域的成核速率,所以熔池凝固由熔合区的外延生长开始。但是,在铝锂合金的焊缝边界处发现了EQZ^[6-8],这是铝锂合金熔焊焊缝中典型的微观组织特征。图1所示为2060-T8铝锂合金激光焊接接头典型微观组织形貌,可以看到在焊缝边界存在一条细晶带,该细晶带的宽度一般由几十微米到几百微米不等,其晶粒尺寸通常在几微米左右。由于EQZ的存在,外延生长被抑制,柱状晶基于细小晶粒表面沿着垂直于细晶带的方向向焊缝内部延伸。

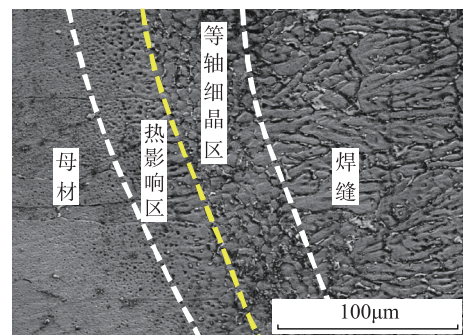
为了了解该特殊微观组织的形成原因,国内外学者对此进行了一定的研究。但是由于Li元素原子序数小,波长较长,现有检测方式很难检测其存在。因此,该区域的形成机理研究主要是基于大量的试验以及一定的合理推测。林德超等^[6]认为EQZ的形成是Li、Zr等元素共同作用的结果。Li元素可以有效降低液态铝的表面张力。当熔池凝固时, Li元素易富集在固-液界面前沿的液相中使溶质浓度梯度增加,从而导致成分过冷度的增加。而Zr元素与Al形成金属间化合物 Al_3Zr ,阻碍了晶粒长大,且 Al_3Zr 与基体的错配度小,作为异质形核质点促进了新晶体的形核,使得临界过冷度减小。当实际过冷度远大于临界过冷度时,联生结晶有可能被抑制,这时熔合区的凝固就完全由新晶粒的形核生

长所控制。Lippold等^[7]研究了焊接参数、合金成分、母材热处理状态对EQZ的影响,并由此提出一个异质形核理论。该理论认为在熔化边界存在一个流动近乎停滞的液体边界层。该区域的温度条件和流动条件十分有利,使得母材中的 Al_3Zr 、 $Al_3(Li_x, Zr_{1-x})$ 等金属间化合物既不溶解也不会被扫掠到熔池中,成为异质形核的质点,最终形成等轴细晶区。

此外,由图1(b)可见, EQZ晶间存在大量析出相。这些低熔点共晶相的存在使得凝固裂纹和液化裂纹极易在此处萌生,且相关研究表明, EQZ处的断裂韧性较之母材和其余焊缝组织更低^[7],这会极大地影响焊接结构件的力学性能,不利于其在航空航天服役过程中的寿命。Lin等^[8]和Lippold^[7]等研究了EQZ宽度的影响因素,发现合金中Li和Zr的含量越高, EQZ宽度越大;且随着焊接热输入的增大, EQZ的宽度有增加的趋势。但是,相关元素含量的减少以及焊接参数的调控只能在一定程度上减小细晶带的宽度,而不能完全消除其存在。AIDUN等^[9]通过改变重力环境增强熔池对流,在10g ($1g=9.8m/s^2$)的重力条件下获得了无EQZ的焊缝,但是这种方法在实际的工程应用中存在难度。因此,关于EQZ的形成机理及该区域的消除措施还有待进一



(a)熔合线附近金相照片



(b)熔合线附近 SEM 照片

图1 2060-T8铝锂合金激光焊接接头典型微观组织
Fig.1 Typical microstructure in laser welded joint of 2060-T8 Al-Li alloy

步研究。

2 铝锂合金焊接缺陷研究

2.1 焊接气孔

焊接气孔是铝锂合金焊缝中最常见的焊接缺陷,其存在会导致焊件产生应力集中,从而降低焊件的力学性能。关于该种缺陷的形成机理,国内外学者进行了大量的研究,但目前尚未形成统一的认识。一般认为,焊接气孔主要分为两类:一类为冶金气孔,通常是氢气孔,其形状规则,内表面可见树枝晶凝固花样;另一类为工艺气孔,也称小孔型气孔,呈不规则形状^[10]。铝锂合金激光焊接接头中典型气孔缺陷如图2所示。

氢气孔是铝锂合金本身固有的焊接问题,不论采用何种熔焊工艺都无法避免其产生。氢气孔的产生主要有以下两方面原因:(1)铝锂合金中由于含有多种表面活性元素,因此与氧的亲合力很强,容易与空气中的氧发生反应形成表面氧化膜,氧化膜极易吸附周围环境中的水分,在激光束的高温作用下,所形成的结晶水或化合水发生反应产生大量氢;(2)氢在铝中的溶解度随着温度的变化而急剧变化,在熔池冷却过程中,氢元素大量析出,析出的氢聚集形核长大成为气泡,同时由于激

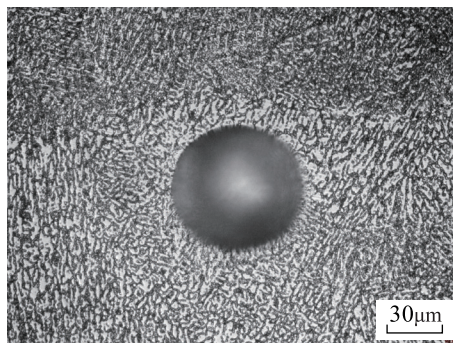
光焊接速度快、铝合金导热率高、铝合金激光深熔焊接熔池体积小等一系列原因,导致铝合金激光焊接熔池冷却凝固速度极快,气泡一旦形成则不可能逸出熔池从而形成气孔^[10-11]。氢气孔的有效抑制要从抑制氢源着手。杨武雄^[11]研究了2mm厚2060-T8/2099-T83铝锂合金T型结构件双激光束焊接接头内部气孔分布特点及形成机理,研究发现由于桁条对熔池中上浮溢出气泡的阻挡作用,使得气孔缺陷更易出现。通过焊前加强焊件表面清理可有效抑制氢气孔产生,并采用小电流摆动电弧阴极雾化去除氧化膜的方法获得了较好的焊缝质量。另外,选择合适的焊接参数匹配,合适的保护气体及保护气流量,合理的激光器皆有助于抑制氢气孔的形成。现有研究表明,焊接速度对气孔率的影响较大,在提高焊接速度的同时,适当地增加激光功率,焊缝中气孔的数量和大小都会随着焊接速度的增加而减小^[12-13],推测与焊接速度增加能在一定程度上抑制母材原始H向熔池的扩散有关。

而工艺气孔的产生主要与低沸点合金元素的蒸发及匙孔坍塌有关^[10-11]。激光焊接过程中,匙孔一直处于快速波动的不稳定状态,当表面张力大于蒸汽压力时,匙孔将不能维持稳定而塌陷。匙孔中的气体包括氢气及金属蒸汽等来不及逸出,滞留在焊缝中形成气孔。特别对于蒙皮-桁条T型结构双激光束双侧同步焊接件来说,由于焊接工艺的特殊性,在焊接过程中激光束与蒙皮成一定倾角,使得匙孔的受力状态和熔池的流动状态更为复杂,更容易导致匙孔的塌陷闭合。关于该类气孔的形成机理,主要有3种理论,即凸台模型理论、匙孔底部聚焦效应模型以及液柱稳定性理论^[14],这些理论都能在在一定程度上解释小孔型气孔的形成,但同时都具有一定的局限性。目前,由于匙孔受力的复杂性和检测设备的限制,对于小孔型气孔的形成机理仍存在很多争议。该类气孔的抑制措施,一般是从工艺角度出发,通过控制焊接过程中匙孔和熔池的稳定性来控制该类气孔的形成。

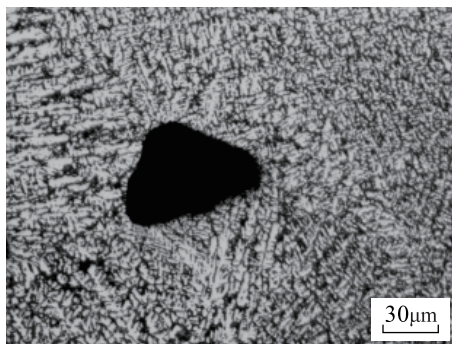
2.2 焊接裂纹

铝锂合金是典型的共晶合金,由于Li元素的添加,合金的凝固温度范围和线性膨胀系数很大,因此裂纹问题更加突出。在熔池凝固末期,晶体交织生长形成枝晶骨架,晶间残余的液相不易自由流动,在拉应力作用下容易产生微小缝隙,这种情况在焊缝中心的粗大等轴晶区尤为突出,如图3所示。

这类缺陷的控制主要在于选择合理的填充材料及适当的工艺参数。安娜等^[15]研究了2mm厚2060-T8铝锂合金填充5087(Al-Mg-Zr)焊丝激光焊接接头的热裂纹敏感性,发现结晶裂纹敏感性随激光功率



(a) 冶金气孔



(b) 工艺气孔

图2 2060-T8/2099-T83铝锂合金激光焊焊缝典型气孔缺陷
Fig.2 Typical pore defects in laser welded joint of 2060-T8/2099-T83 Al-Li alloy

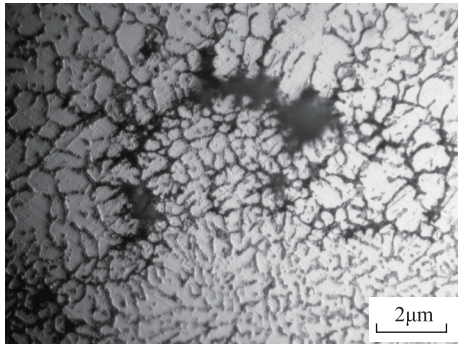
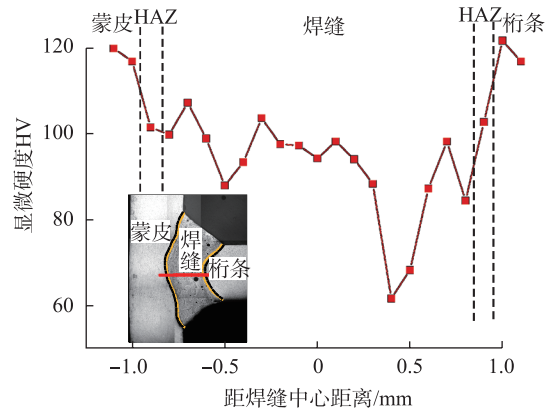


图3 2060-T8/2099-T83铝锂合金激光焊焊缝裂纹缺陷
Fig.3 Crack defects in laser welded joint of 2060-T8/2099-T83 Al-Li alloy

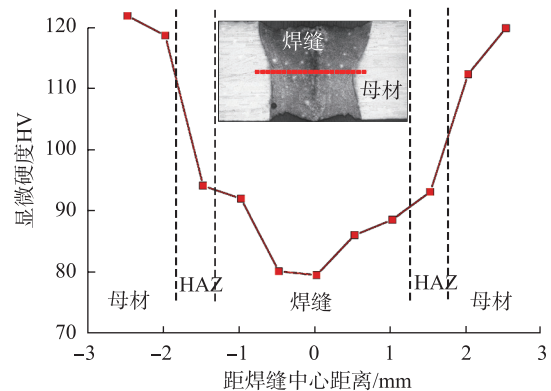
和焊接速度的增加而增加,随送丝速度的增加而降低。适当增加送丝速度可细化晶粒,增加焊缝中共晶含量和离散分布的共晶比例,有利于及时愈合凝固过程中产生的裂纹。另外,填充含有高含量Si元素的焊丝也可以明显提高Al-Cu-Li合金抗热裂纹能力。Han等^[16]对2.0 mm厚2060-T8/2099-T83铝锂合金T型结构件开展了双激光束双侧同步焊接研究,分析了填充焊丝的元素成分对焊缝微观组织和力学性能的影响。发现与使用商业AA4047焊丝相比,使用CW3 (Al-6.2%Cu-5.4%Si)焊丝可以将EQZ内的主要晶粒间沉淀相由T (AlLiSi)相转变为具有更好结合力与塑性的 T_2 (Al₆CuLi₃)相,因此在晶界上产生了由 T_2 相覆盖的更丰富的亚结构树枝状结构,以桥接一次柱状树枝晶,使得热裂纹受到极大限制,从而获得少裂纹甚至无裂纹的高质量焊接接头。

2.3 接头软化

一般来说,对于沉淀强化合金,母材的强度越高,焊后焊缝的强度损失越大。图4所示为较优工艺参数下2060-T8铝锂合金激光焊对接接头和2060-T8/2099-T83铝锂合金激光焊T型接头硬度分布。两种焊接工艺下,焊缝及热影响区硬度均低于母材硬度。这是由于激光焊接能量密度高,造成材料中的有益合金元素如Mg、Li等的烧损,因而焊缝内部强化相的比重减小;同时激光焊接熔池冷却速度极快,焊缝时效不足,溶质元素大量偏析在枝晶间导致固溶体的过饱和度不足^[17]。通过选择合理的工艺参数以及与母材性能及焊接工艺相匹配的填充焊丝可以改变晶界相组成、焊缝化学元素含量及分布,有效改善接头软化现象。研究表明,优化工艺参数下的铝锂合金对接接头抗拉强度和T型接头环向抗拉强度均可达母材强度的80%以上^[16,18-19]。占小红等^[20]研究了填充ER2319焊丝和填充ER4047焊丝时2060-T8/2099-T83铝锂合金T型结构激光焊接接



(a) 2060-T8/2099-T83 铝锂合金 T 型接头显微硬度分布



(b) 2060-T8 铝锂合金激光焊对接接头显微硬度分布

图4 铝锂合金激光焊接接头显微硬度分布
Fig.4 Microhardness distribution in the laser welded joint of Al-Li alloy

头各向抗拉强度,发现填充ER2319焊丝得到的接头强度普遍低于使用ER4047填充焊丝焊接所得到的接头强度。其原因在于ER4047焊丝富含硅元素,对焊缝裂纹有良好的“愈合”作用,导致其接头性能更佳。王永等^[21]通过填充含钪元素的焊丝使得2195铝锂合金焊缝组织细化,且焊缝中形成了Al₃(Sc_{1-x}Zr_x)和Al₃Sc强化相,焊缝强度显著提高。

此外,由于铝锂合金是典型的可热处理强化合金,通过适当地热处理工艺消除焊缝元素偏析可以使焊缝的强度大大提升。然而热处理工艺的质量控制难度很大,不当的热处理工艺反而会降低焊缝强度。庄蕾^[22]和林凯莉等^[23]采用热处理工艺使得铝锂合金激光焊接接头的抗拉强度大大提高,达到母材强度的95%左右,但是焊件经热处理后,接头延伸率降低,塑性不足,不利于焊件的疲劳性能。随着航空航天领域对减重的需求逐渐增大,铝锂合金在结构上的应用也越来越大。长期以来,对于如何提高铝锂合金及其焊缝强度,一直是国内外的研究热点。在国内,关于铝锂合金热处理工艺

的起步较晚且研究较少,在质量及能耗方面较之世界先进水平有很大差距,还需更深入的研究。

3 结论

铝锂合金激光焊接技术由于其独特的优点而在航空航天领域极具发展应用前景。关于铝锂合金激光焊接接头组织与缺陷,国内外已经开展了大量的研究,并有诸多学者关注了气孔问题,取得了一定的成果。但是由于铝锂合金发展历史较短,我国相关研究还不够广泛深入,因此铝锂合金激光焊接结构件的性能离最终的型号使用需求还有一定的距离。目前,国内外只有欧洲空中客车公司成熟掌握该技术,将其成功运用在了其主流产品 A318、A340、A380、A350 等型号的飞机中,并获得了可观的减重收益。可以确定,我国航空航天领域对该技术有明确而巨大的应用需要。

从长远来看,铝锂合金激光焊接技术的发展方向必然是智能化、数字化、柔性化——实现大型复杂结构的机器人智能焊接、大型复杂结构焊缝位置精准识别、高速高精度的运动控制、系统误差实时补偿等。此外,要想实现其在型号上的应用,还需要进一步针对铝锂合金激光焊接工艺,探索其焊接冶金行为,并基于大量试验,实现大尺寸薄壁结构件变形的精准控制,提高焊接结构件的疲劳性能与损伤容限。

参 考 文 献

- [1] 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(1): 113–122.
- [2] 姜丽萍. C919 的制造技术热点及最新研制进展[J]. 航空制造技术, 2013, 56(22): 26–31.
- [3] JIANG Liping. Hot topic and the latest advances in manufacturing technology of C919[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(22): 26–31.
- [4] 李亚江, 吴娜. 先进焊接技术在航空航天领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(9): 36–40.
- [5] LI Yajiang, WU Na. Application of advanced welding technology in aviation and aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(9): 36–40.
- [6] WILLIAMS J C, JR E A S. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5775–5799.
- [7] 孙中刚, 郭旋, 刘红兵, 等. 铝锂合金先进制造技术及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012, 55(5): 60–63.
- [8] SUN Zhonggang, GUO Xuan, LIU Hongbing, et al. Development trend of advanced manufacturing technology for aluminum-lithium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(5): 60–63.
- [9] 林德超, 贺勇, 贺运佳, 等. 铝锂合金焊缝熔合区组织特征分析[J]. 机械工程材料, 1996, 20(4): 10–12.
- [10] LIN Dechao, HE Yong, HE Yunjia, et al. Solidification Structures of fusion zone in Al-lialloy weld metal[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1996, 20(4): 10–12.
- [11] GUTIERREZ A, LIPPOLD J C. A proposed mechanism for equiaxed grain formation along the fusion boundary in aluminum-copper-lithium alloys[J]. Welding in the World, 2006, 50 (11–12): 24–34.
- [12] LIN D C, WANG G X, SRIVATSAN T S. A mechanism for the formation of equiaxed grains in welds of aluminum–lithium alloy 2090[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 351(1): 304–309.
- [13] AIDUN D K, DEAN J P. Effect of enhanced convection on the microstructure of Al-Cu-Li welds[J]. Welding Journal, 1999, 78(10): 349–354.
- [14] 辜诚, 魏艳红, 占小红. 铝合金激光焊接气孔形成机理研究现状及发展 [C]// 第二十次全国焊接学术会议论文集, 2015.
- [15] GU Cheng, WEI Yanhong, ZHAN Xiaohong. Research status and development of formation mechanism of laserwelding pores in aluminum alloys[C]// The 20th National Welding Conference Proceedings, 2015.
- [16] 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.
- [17] YANG Wuxiong. Investigation of dual beam high brightness laser welding of aluminum alloy with T-joint[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [18] 王威, 徐广印, 王旭友, 等. 1420 铝锂合金激光焊接气孔抑制技术[J]. 焊接学报, 2008, 29(2): 5–7.
- [19] WANG Wei, XU Guangyin, WANG Xuyou, et al. Porosity formation mechanism in laser welding 1420 Al-lialloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(2): 5–7.
- [20] 张灏龙. 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.
- [21] ZHANG Yunlong. Study on the characteristics of laer beam welding for aluminum-lithium alloy fuselage panel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [22] 何文佩. 激光焊接 5A90 铝锂合金气孔抑制方法研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2016.
- [23] HE Wenpei. Study on pore inhibition measures of laser welded 5A90 Al-Li alloy[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2016.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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 & Laser Technology, 2017, 93: 99–108.
- [27] 巴瑞章. 5A90 铝锂合金激光焊接力学性能 [C]// 中国机械工程学学会年会, 2005.
- [28] BA Ruizhang. Mechanical properties of laser welded 5A90 Al-Li alloy[C]// China Mechanical Engineering Society Annual Conference, 2005.

(下转第86页)

research on composite forming mould[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(1): 13-17.

[2] 王霖,程杰,苏佳智,等. 浅析复合材料框架式成型模具设计技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(12): 100-104.

WANG Lin, CHENG Jie, SU Jiazhi, et al. Analysis of composites frame molding mould design technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 100-104.

[3] 晏冬秀,刘卫平,黄钢华,等. 复合材料热压罐成型模具设计研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(7): 49-52.

YAN Dongxiu, LIU Weiping, HUANG Ganghua, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 49-52.

[4] 李育锋,何彦,黄桃,等. 考虑产品制造过程环境影响的轻量化设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(9): 2306-2313.

LI Yufeng, HE Yan, HUANG Tao, et al. Lightweight design method considering environmental impacts in products manufacturing stage[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(9): 2306-2313.

[5] 刘立美,焦爱胜,严慧萍,等. 基于 ABAQUS 的提升机箱体有限元分析和结构拓扑优化设计[J]. 矿山机械, 2013, 41(9): 52-55.

LIU Limei, JIAO Aisheng, YAN Huiping, et al. FEA and structural topology optimization design of hoist housing based on ABAQUS[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(9): 52-55.

[6] 张铨,梁宪珠,胡江波,等. 拓扑优化在框架式模具结构选型中的应用[J]. 航空制造技术, 2012, 55(9): 62-63.

ZHANG Cheng, LIANG Xianzhu, HU Jiangbo, et al. Application of topology optimization in structure selection of frame mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(9): 62-63.

[7] 陈远帆,李舜韶,苏玉青. 拓扑优化与尺寸优化相结合的割草车车架轻量化设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(1): 28-35.

CHEN Yuanfan, LI Shunming, SU Yuqing. The light-weight design of the cutting grass car frame combined the topology optimization with the size optimization[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(1): 28-35.

[8] 谢元丕,冯刚. ANSYS 三维实体单元与板壳单元的组合建模研究[J]. 机械设计, 2009, 26(4): 5-7.

XIE Yuanpi, FENG Gang. Study of ANSYS modelling on the combination of 3D entity unit and plate-shell unit[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(4): 5-7.

[9] 闻邦椿,张义民,鄂中凯,等. 机械设计手册[M]. 第5版. 北京:机械工业出版社, 2010.

WEN Bangchun, ZHANG Yimin, E Zhongkai, et al. Mechanine design handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2010.

[10] 何彬,李响. 冷镦机床身的多约束拓扑优化与再设计[J]. 机械设计, 2016, 33(02): 90-94.

HE Bin, LI Xiang. Multi-constraint topology optimization and redesign of heading machine bed[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(2): 90-94.

[11] 王有宝. 自由曲面单层网壳结构形态创构方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.

WANG Youbao. Study on morphogenesis technique for the free-curved single-layer reticulated shells[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[12] 江丙云,孔祥宏,罗元元. ABAQUS 工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2014.

JIANG Bingyun, KONG Xianghong, LUO Yuanyuan. Detailed annotation of engineering project of ABAQUS[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2014.

通讯作者: 鲍益东,副教授,研究方向为板料成形工艺及仿真、复合材料成型工艺仿真、飞机数字化装配等, E-mail: baoyd@nuaa.edu.cn.

(责编 古京)

(上接第81页)

[18] 黄敏,李国爱,张坤,等. 2A97 铝锂合金激光焊接特性[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 100-104.

HUANG Min, LI Guoai, ZHANG Kun, et al. Laser welding characteristics of 2A97 Al-Li alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 100-104.

[19] ZHANG X, HUANG T, YANG W, et al. Microstructure and mechanical properties of laser beam-welded AA2060 Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 301-308.

[20] 占小红,陈纪城,陈洁,等. 铝锂合金双激光束双侧同步焊接各向拉伸性能分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 33-36.

ZHAN Xiaohong, CHEN Jicheng, CHEN Jie, et al. Analysis on multidirectional joint tensile properties for dual laser-beam bilaterally synchronous welding joint of aluminum-lithium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 33-36.

[21] 王永,李德富,胡捷,等. 含钪焊料对 2195 铝锂合金焊缝组织性能的影响[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 842-844.

WANG Yong, LI Defu, HU Jie, et al. Effect of scandium on microstructure of 2195 joint aluminium-Li enhance[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 842-844.

[22] 庄蕾,罗宇,王亚军,等. 1420 铝锂合金激光焊接工艺研究[J]. 焊接, 2006(1): 39-42.

ZHUANG Lei, LUO Yu, WANG Yajun, et al. Study on laser welding process of 1420 Al-Li alloy[J]. Welding, 2006(1): 39-42.

[23] 林凯莉. 2198 铝锂合金激光焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.

LIN Kaili. Microstructures and mechanical properties of laser beam welded 2198 aluminum lithium alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.

通讯作者: 占小红,博士,教授,研究方向为激光增材制造工艺与装备、激光焊接与先进连接技术、航空航天先进制造工艺、材料加工工艺建模与仿真等, E-mail: xiaohongzhan_nuaa@126.com.

(责编 古京)