

铝合金激光焊接技术的应用与发展

Application and Development of Laser Welding Technology for Aluminium Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室 陈 俐 巩水利



陈 俐

中航工业北京航空制造工程研究所研究员,中国机械工程学会高级会员。1989年获西安交通大学焊接硕士,2005年获华中科技大学材料加工博士,目前主要从事材料加工领域的技术研究。重点研究方向是钛合金、铝合金、金属间化合物等新材料的激光焊接性基础研究和结构焊接质量控制技术研究,发表论文 50 余篇。

随着激光技术和铝合金研制技术的发展,进一步开展铝合金激光焊接应用技术基础研究、开发铝合金激光焊接新工艺,更有效地拓展铝合金激光焊接结构的应用潜力,从而了解

随着激光技术和铝合金研制技术的发展,进一步开展铝合金激光焊接应用技术基础研究,开发铝合金激光焊接新工艺,更有效地拓展铝合金激光焊接结构的应用潜力,从而了解铝合金激光焊接技术的应用现状及发展趋势就显得尤为重要。

铝合金激光焊接技术的应用现状及发展趋势就显得尤为重要。

高强铝合金具有较高的比强度、比刚度,良好的耐腐蚀性能、加工性能和力学性能,已成为航空航天、舰船等载运领域结构轻量化制造不可或缺金属材料,其中飞机应用最多。焊接技术在提高结构材料利用率、减轻结构重量、实现复杂及异种材料整体结构低成本制造方面独具优势,其中铝合金激光焊接技术是倍受关注的热点。

与其他焊接方法相比,激光焊接光束能量密度可达 10^9W/cm^2 ,同时具有加热集中、热损伤小、焊缝深宽比大、焊接变形小等优势,焊接过程易于集成化、自动化、柔性化,可实现高速高精度焊接,并且焊接过程无需真空环境,不产生 X-ray,特别适合复

杂结构的高精度焊接。该技术在工业中所占比重已成为衡量一个国家工业加工水平高低的重要标志。如空客 A380 飞机和奥迪 A8 车就以激光焊接铝合金结构的应用作为其先进性的标志。因此,激光焊接是铝合金焊接技术的重要发展方向。

随着材料技术的发展,各种高强高韧铝合金不断推出,尤其是第三代铝锂合金、新型高强铝合金的出现,对铝合金激光焊接技术提出了更高的要求,同时铝合金的多样性也带来了各种各样的激光焊接新问题,所以必须深入研究这些问题,才能更有效地拓展铝合金激光焊接结构的应用潜力。

大功率激光器

激光焊接是将高强度激光辐射

至金属表面,通过激光与金属间热力学耦合作用使金属熔化再冷却结晶形成焊缝的技术。根据激光焊接的热作用机制可分为热导焊和深熔焊两种,前者主要应用于精密零件的封装焊接或微纳焊接;后者在焊接过程中往往产生类似于电子束焊接的小孔效应,形成深宽比较大的焊缝。激光深熔焊接实现需要的激光功率高,该技术目前应用于激光深熔焊接的大功率激光主要有4种类型,其特点如表1所示。

CO₂ 气体激光的工作介质为 CO₂ 气体,输出 10.6μm 波长激光,按激光激发结构形式分为横流和轴流两种。横流 CO₂ 激光输出功率虽已达 150kW,但光束质量较差,不适合焊接;轴流 CO₂ 激光具有较好的光束质量,可用于对激光反射率高的铝合金焊接,商用激光器功率也达到 25kW。A318 飞机铝合金下壁板就是采用的 CO₂ 双光束激光焊接。

YAG 固体激光工作介质是红宝石、钕玻璃和掺钕钇铝石榴石等,输出波长为 1.06μm 的激光。YAG 激光比 CO₂ 激光更易于被金属吸收,并且受等离子体影响较小,为光纤传输,焊接操作灵活,焊缝位置可达性好,是目前铝合金结构焊接的主要激

光器。光泵浦 Nd:YAG 固体激光由于高功率运转时泵浦灯输入能量产生大部分热损耗,造成激光腔温度升高、导致激光热透镜效应,使得 YAG 激光功率和光电能量转化效率低。近年来以半导体泵浦、激光泵浦代替光泵浦固体激光器,不仅光束质量得到改善,而且能量转换率和泵浦灯的使用寿命明显提高了,如近几年

出现的 Yb:YAG Disc 激光,其激光能量转换效率达 20%,光束质量比肩光纤激光器。

YLR 光纤激光是 2002 年以后发展起来的新型激光器,以光纤为基质材料,掺杂不同的稀土离子,输出波长范围在 1.08μm 左右,也是光纤传输。光纤激光革命性地采用了双包层光纤结构,增加了泵浦长度,提高了泵浦效率,从而使光纤激光器的输出功率大幅提高。与 YAG 激光相比, YLR 光纤激光虽然出现较晚,但具有体积小、运行成本低、光束质量高等优点,而且获得的激光功率高;如图 1 所示,激光功率可达 50kW。可见光纤激光的出现,明显提高了焊接熔深和焊接速度。德国 BIAS 针对

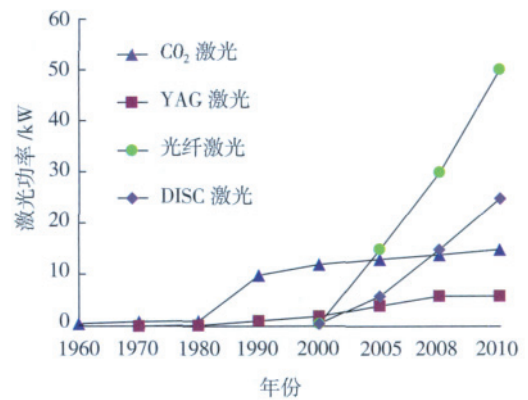


图1 大功率激光器的发展历程

AA6082 铝合金进行的各种激光焊接对比研究结果表明:采用 5m/min 的焊接速度,8kW 的 YLR 光纤激光的熔深为 9mm,6kW 的 YAG 激光焊接熔深为 5mm,4kW 的 YAG 激光焊接熔深为 3mm。而采用 17kW 的 YAG 光纤进行焊接,焊接速度为 6m/min,实焊缝熔深为 12mm,焊接 3mm 厚板,最大焊接速度达到了 20m/min,而且在功率和束流品质间的协调限制减小时,接近电子束焊接特征,而且可实现 2000 和 7000 系列难焊铝合金的焊接。据英国激光协会的调查统计(Dr. J. Powell and Prof. W.M. Steen),英国激光焊接研究的热点光纤激光焊接和铝合金厚板激光焊接,德国 BAM 研究所(20 kW)、BIAS 研究所(17 kW)和 IPG 公司(30 kW)等也在开展铝合金厚板激光焊接的研究,激光深熔焊接可达 25mm。

铝合金激光焊接结构的应用研究

自 20 世纪 90 年代,随着科学技术的发展,大功率高亮度激光器的出现,激光焊技术集成化、智能化、柔性化、多样化发展日趋成熟,国内外更加关注激光焊在各领域铝合金结构中的应用。

德国的高端轿车,如 Audi、Golf、Passat 等品牌均采用铝合金车顶激光焊接结构,从 1999 年起该技术扩大到汽车底盘和车身,而且基于激光

表1 激光焊接应用中主要的大功率激光器

性能	类型	CO ₂ 激光	Nd:YAG 激光	Yb:YAG Disc 激光	光纤激光
波长 /μm		10.6	1.06	1.06	1~2
电转换效率 /%		12~15	2~6	20	8~10
功率密度 / (MW·cm ⁻²)		10	10	100	100
最大功率 /kW		50	6	15	50
光束输出		光学镜片	光纤	光纤	光纤
金属吸收率 /%		8	20	20	20
维修周期 /hr		1000	1000	1000	20000
激光亮度 (10 ⁵ W/mm ² ·steradian) (4kW 时)		--	7.5 (焦距 200, 光纤直径 0.6mm)	134.2 (焦距 200, 光纤直径 0.2mm)	264.4 (焦距 160, 光纤直径 0.1mm) 33.8 (焦距 160, 光纤直径 0.3mm)

焊接和激光电弧复合焊接技术的综合利用,该技术在汽车制造中很好地解决了蒙皮厚度较小的结构焊接时变形的问题,以及变截面和端部焊接的缺陷控制问题。目前,激光焊接技术已成为汽车制造的标准化工艺,遍布汽车车顶、车身、侧框等各个钣金结构,宝马、通用公司在车架顶部采用激光焊接,德国奔驰公司则采用激光焊接传动部件,分别涉及 Al-Mg 系、Al-Mg-Si 系及 Al-Mg-Zn 系铝合金。我国一些汽车制造厂家已经在部分新车型中采用激光焊接技术,随着铝合金厚板激光焊接技术的发展,激光焊接未来将应用于装甲车结构。

为了实现轻量化制造,在舰船和高速列车结构制造中,铝合金三明治结构的激光焊接应用与研究是目前的研究热点。英国焊接研究所为日本高铁制造商 Nippon Sharyo 开发的高速列车车墙板三明治铝合金激光焊接结构,采用 3mm 厚的 AA6063 轧板,利用光纤激光电弧复合焊接实现了各种形式的接头焊接,其中激光器为 IPG 10 kW 光纤激光,填充材料为 ER5356 焊丝,焊接激光功率为 4~5kW。AICAN-Transrapid 的高速列车铝合金车顶结构也采用激光焊接替代 MIG 焊接,采用功率为 4kW 的 YAG 激光,焊接速度为 5m/min,焊缝长度达 20m。

铝合金是航空航天结构重要的金属结构材料,因此在日本、美国、英国、德国等发达国家十分重视铝合金激光焊接技术研究。英国焊接研究所成功地运用 4kW 的 Nd:YAG 激光填丝焊进行了 AA2014 铝合金带筋壁板的双光束 YAG 激光焊接,采用直径为 1.2mm 的 ER2319 铝合金焊丝焊丝,焊接接头质量良好,焊接变形小于 TIG 焊。Gobbi 等研究飞机机翼下的铝合金油箱的 CO₂ 激光焊,接头气孔严重,采用 YAG 激光焊可获得优质的焊接接头。空中客车

公司与 BIAS、Fraunhofer 等研究所合作,经 10 年努力于 2003 年在德国和法国空中客车部件生产厂实现了 A318 客机铝合金下壁板结构双光束 CO₂ 激光填丝焊以及 YAG 激光填丝焊,焊接速度为 4~10m/min,这种以焊代铆结构将减轻飞机的近 20% 机身重量,降低制造成本约 20%,已应用在 A318、A380 和 A340 系列飞机的壁板结构焊接中,如图 2 所示。未来还将应用于 A350 飞机壁板焊接,壁板数量将达到 18 块,焊缝总长度将达到 1000m。随着光纤激光焊接技术的发展,目前先进国家的航空制造领域已将光纤激光焊接和激光电弧复合焊接技术列为铝合金焊接技术的重点,尤其是厚板焊接和异种金属的焊接,如美国 NALI 项目针对民机和 JSF 飞机发动机燃烧室结构正在开展光纤激光焊接和激光电弧复合焊接技术的研究。

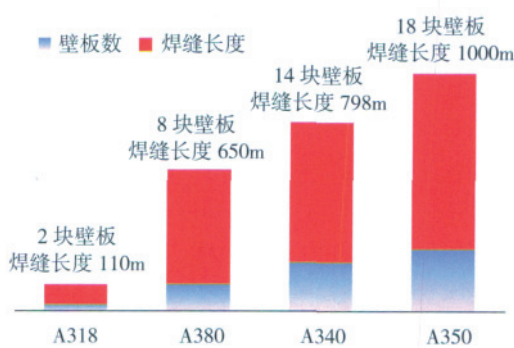


图2 铝合金飞机壁板的激光焊接

铝合金激光焊接的特点

与常规熔化焊相比,铝合金激光焊接加热集中、焊缝深宽比大、焊接结构变形小,但是也存在一些不足,归纳起来有:(1)激光聚焦光斑直径细小导致工件焊接装配精度要求高,通常装配间隙、错边量需小于 0.1mm 或板厚的 10%,增大了具有复杂三维焊缝焊接结构的实施难度;(2)由于室温条件下铝合金对激光的反射率高达 90%,因而铝合金激光深熔焊接要求激光器具有较高的功率。铝

合金薄板激光焊接研究表明:铝合金激光深熔焊接取决于激光功率密度和线能量双阈值,激光功率密度和线能量共同制约着焊接过程的熔池行为,并最终体现到焊缝的成形特征上,对于全熔透焊缝的工艺优化可通过焊缝成形特征参量背宽比进行评价;(3)铝合金熔点低,液体金属流动性好,在大功率激光作用下产生强烈的金属汽化,在焊接过程中伴随小孔效应所形成的金属蒸汽/光致等离子体云影响铝合金对激光能量的吸收,导致深熔焊接过程不稳定,焊缝易于产生气孔、表面塌陷、咬边等缺陷;(4)激光焊接加热冷却速度快,焊缝硬度比电弧的高,但由于铝合金激光焊接存在合金元素烧损,影响合金强化作用,铝合金焊缝仍然存在软化问题,从而降低铝合金焊接接头的强度。因此铝合金激光焊接的主要问题是控制焊缝缺陷和提高焊接接头性能。

铝合金激光焊接缺陷控制技术

在大功率激光的作用下,铝合金激光深熔焊缝的主要缺陷是气孔、表面塌陷和咬边,其中表面塌陷、咬边缺陷可以通过激光填丝焊接或激光电弧复合焊接改善;而焊缝气孔缺陷控制则比较困难。现有的研究结果表明:铝合金激光深熔焊接存在两类特征气孔,一类为冶金气孔,同电弧熔化焊一样,由于焊接过程材料污染或空气侵入所导致的氢气孔;另一类为工艺气孔,是由于激光深熔焊接过程所固有的小孔不稳定波动所致。在激光深熔焊过程中,小孔因液体金属粘滞作用往往滞后于光束移动,其直径和深度受等离子体/金属蒸汽的影响产生波动,随着光束的移动和熔池金属的流动,未熔透深熔焊接因熔池金属流动闭合在小孔尖

端出现气泡,全熔透深熔焊接则在小孔中部细腰处出现气泡。气泡随液体金属流动而迁移、翻滚,或逸出熔池表面,或被推回到小孔,当气泡被熔池凝固、被金属前沿俘获,即成为焊缝气孔。显然冶金气孔主要靠焊前表面处理控制和焊接过程合理的气保护所控制,而工艺气孔关键就是保证激光深熔焊接过程小孔的稳定性。根据国内激光焊接技术的研究,铝合金激光深熔焊接气孔控制应综合考虑焊接前、焊接过程、焊接后处理各个环节,归结起来有以下新工艺和新技术。

(1) 焊前处理方法。焊前表面处理是控制铝合金激光焊缝冶金气孔的有效方法,通常表面处理方法有物理机械清理、化学清理,近年来还出现了激光冲击清理,这将进一步提高激光焊接自动化程度。

(2) 焊接工艺参数稳定性优化控制。铝合金激光焊接过程工艺参数通常主要有激光功率、离焦量、焊接速度,以及气保护的成分和流量等。这些参数既影响焊接区域的保护效果,又影响激光深熔焊接过程的稳定性,从而影响焊缝气孔。通过铝合金薄板激光深熔焊接发现,小孔穿透稳定性影响熔池稳定性,进而将影响焊缝成形造成焊缝气孔缺陷,而且激光深熔焊接稳定性与激光功率密度与线量匹配有关,因此确定合理的稳定焊缝成形的工艺参数是有效控制铝合金激光焊缝气孔的有效措施。全熔透稳定焊缝成形特征研究结果显示:采用焊缝背面宽度与焊缝表面宽度之比(焊缝背宽比),评价铝合金薄板焊缝成形及其稳定性。当薄板激光焊激光功率密度与线能量合理匹配时,可保证一定焊缝背宽比,并可有效地控制焊缝气孔。

(3) 双光点激光焊接。双光点激光焊接是指两束聚焦激光束同时作用于同一熔池的焊接过程中。在激光深熔焊接的过程中,瞬间闭合将

小孔中的气体封闭在熔池中是焊缝气孔形成的主要原因之一。当采用双光点激光焊接时,由于两束光源的作用,造成小孔开口较大有利于内部金属蒸气逸出,也有利于小孔的稳定,从而能减少焊缝气孔。对 A356、AA5083、2024 和 5A90 铝合金激光焊接的研究均显示:双光点激光焊可显著减少焊缝气孔。

(4) 激光电弧复合焊接。激光电弧复合焊接是将激光与电弧作用于同一熔池的焊接方法。一般以激光为主要热源,利用激光与电弧的相互作用,提高激光焊接熔深和焊接速度,降低焊接装配精度。利用填充焊丝调控焊接接头的组织性能,利用电弧的辅助作用改善激光焊接小孔的稳定性,从而有利于减少焊缝气孔。在激光电弧复合焊接过程中,电弧影响激光过程诱发的金属蒸汽/等离子体云,有利于材料对激光能量的吸收和小孔的稳定性。对铝合金激光电弧复合焊接焊缝研究结果也证实了其效果。

(5) 光纤激光焊接。激光深熔焊接过程的小孔效应源于激光作用下金属产生强烈汽化。金属汽化蒸汽力与激光功率密度和束流品质密切相关,不仅影响激光焊接的熔深,也影响小孔稳定性。Seiji 等对 SUS304 不锈钢大功率光纤激光研究显示:高速焊接时熔池拉长,抑制了飞溅,小孔波动稳定,小孔尖端无气泡产生,当光纤激光用于钛合金、铝合金高速焊接时,同样可获得无气孔的焊缝。Allen 等对钛合金光纤激光焊接保护气体控制技术研究显示:通过控制焊接保护气体的位置,可防止气体的卷入,减少小孔闭合时间,稳定焊接小孔,并改变熔池的凝固行为,从而减少焊缝气孔。

(6) 脉冲激光焊接。与连续激光焊接相比,激光输出采用脉动方式输出,可促使熔池产生周期性稳定流动,有利于熔池气泡逸出而减少焊

缝气孔。T Y Kuo 和 S L Jeng 研究了 YAG 激光焊接激光功率输出方式,对 SUS 304L 不锈钢和 inconel 690 高温合金焊缝气孔及性能的影响结果表明:对于方波脉冲激光焊接来说,当基值功率为 1700w 时,随着脉冲幅值 ΔP 的增加,焊缝气孔减少,其中不锈钢的气孔率由 2.1% 降至 0.5%,高温合金的气孔率由 7.1% 降至 0.5%。

(7) 焊后复合处理技术。在实际工程应用中,即使焊前进行了严格的表面处理,焊接过程稳定性较好,铝合金激光焊接也会不可避免地产生焊缝气孔,因此利用焊后处理消除气孔的方法是很重要的。该方法目前主要是修饰焊。热等静压技术是铝合金铸件消除内部气孔和缩松的方法之一,将其与铝合金激光焊后应力热处理结合,形成铝合金激光焊接构件热等静压与热处理组成复合工艺,既消除焊缝气孔,又改善接头性能。

结束语

由于激光深熔焊接本身的优点,使激光焊接铝合金在国外受到了广泛地关注,并已成为航空航天、车辆、舰船等载运工具结构制造技术的重要研发方向,尤其是光纤激光与 Disc 激光等新型高亮度大功率基础的发展,进一步拓展了铝合金激光焊接结构应用前景。但是,由于铝合金特性,大功率激光焊接应用还存在许多问题有待深入研究,其主要问题就是控制焊缝气孔缺陷,提高焊接质量。铝合金激光焊缝气孔工程化控制应综合考虑焊接前、焊接过程、焊接后处理的各个环节,从而提高焊接过程稳定性。由此已衍生出很多新技术新工艺,如焊前激光清理、焊接工艺参数背宽比控制优化、双光束激光焊、激光电弧复合焊、脉冲激光焊和光纤激光焊接等。

(责编 岭雾)