

■ 吴圣川 朱宗涛 李向伟 编著

铝合金的激光焊接 及性能评价

LASER WELDING OF ALUMINUM ALLOYS
AND THE PERFORMANCE EVALUATION

14



國防工業出版社

National Defense Industry Press

铝合金的激光焊接 及性能评价

吴圣川 朱宗涛 李向伟 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

利用光学显微镜、透射电镜、扫描电镜、电子背散射衍射技术以及第三代高能同步辐射光源等对铝合金激光复合焊接头不等强性和断裂机理进行了深入研究,获得了不同焊接参数下铝合金的疲劳性能和裂纹扩展特性,揭示了激光-电弧复合焊铝合金接头断裂的微观机制,给出了熔焊气孔与疲劳裂纹交互作用的三维形貌,并采用实验和理论方法对气孔与裂纹的交互行为进行了探索性研究。此外,还介绍了自主开发的三维工程结构疲劳裂纹扩展分析与仿真软件及其在高速列车焊接结构中的应用,同时基于有限元软件对电弧焊接铝合金的热力耦合过程进行了模拟,最后介绍了车体的抗疲劳设计原理及其应用情况,其中包括焊缝疲劳寿命预测的网格不敏感等效结构应力的主S-N曲线法。

本书可供从事冶金、材料研发、材料加工、结构设计、产品可靠性评价等专业的研究人员和工程技术人员参考;还可作为高等院校相关专业教师、高年级本科生或者研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

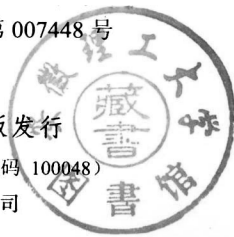
铝合金的激光焊接及性能评价/吴圣川,朱宗涛,李向伟编著. —北京:国防工业出版社,2014.1

ISBN 978-7-118-09294-3

I. ①铝… II. ①吴… ②朱… ③李… III. ①铝合金—激光焊 IV. ①TG457.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第007448号

※
国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售



开本 710×1000 1/16 印张 16½ 字数 320千字
2014年1月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 58.00元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

激光焊接是 21 世纪高性能长寿命铝合金结构的先进制造技术之一。与传统弧焊技术相比,在装配精度、焊接效率、工艺柔性等多个方面具有无可比拟的优越性。近年来,我国的高速铁路和高速列车技术发展迅速,成就举世瞩目。作为一种高效精密焊接技术,以激光作为主要热源的高能束焊接也开始应用于高速列车铝合金车体的制造中。目前我国高速动车组车体主要采用 $5 \times \times \times$ 、 $6 \times \times \times$ 以及 $7 \times \times \times$ 系列铝合金焊接结构组成,材料及焊接工艺相对较新,尤其材料及焊接工艺的国产化过程出现了许多新问题,值得深入研究。此外,虽然我国已经开行最高速度的动车组,但针对车体疲劳强度的设计评定标准尚停留在时速 200km 的阶段,新的动车组技术规范尚在起草阶段,时速 350km 铝合金车体的焊接结构、接头设计、试验方法等尚无统一的标准,也没有积累运用经验,难以指导高速铝合金车体设计与制造。为保证动车组高速安全运行,在充分研究欧洲、日本铝合金车体强度设计标准的基础上,根据我国铁路的运营特点,制定动车组车体用材规范、焊接工艺规范、强度设计、试验规范及服役评价已迫在眉睫。这一背景促使笔者系统整理近年来在激光-电弧复合焊接铝合金及结构疲劳断裂性能评定方面的相关研究成果,以飨各位同仁,并期待共同进步。

全书共 10 章:第 1、5、7、9 章由西南交通大学牵引动力国家重点实验室吴圣川副研究员编写,研究生喻程参与编写第 7.3 节;第 2、3 章由西南交通大学朱宗涛讲师和吴圣川副研究员编写,北京航空工艺制造工程研究所车志刚高工参与编写第 3.6 节;第 4 章由台湾师范大学屠名正副教授和郑钦源硕士编写,吴圣川副研究员参与编写;第 6 章由牛津仪器(上海)有限公司纳米分析部焦汇胜高工和吴圣川副研究员编写;第 8、10 章由齐齐哈尔轨道交通装备有限责任公司李向伟高工和吴圣川副研究员编写。

作者感谢国家自然科学基金(激光-电弧复合焊热循环致高强铝合金接头软化的机理研究,51005068)、牵引动力国家重点实验室开放基金(熔焊接头气孔致疲劳损伤的多边形有限元仿真,2012TPL_T18;铝熔焊接头气孔与裂纹相互作用的原位疲劳研究,2013TPL_T05)、中央高校基本科研业务专项资金(铝合金车体熔焊气孔致疲劳损伤的机理研究,2682013CX030)、中国博士后科学基金

(铝合金激光复合焊气孔致疲劳损伤的机理研究, 2013M531980)、高速铁路基础研究联合基金重点项目(高速列车振动行为、振动失效和振动评价研究, U1234208)和汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金(激光-电弧复合焊接汽车用铝合金 7075-T6 及其过程模拟, 30915005; 高强铝合金拼焊板冲压复杂件断裂机理及寿命预测, 31115030)对本书部分研究内容的资助。同时感谢南车青岛四方机车车辆股份有限公司和南车南京浦镇车辆有限责任公司对相关研究项目的支持。在本书的规划和编写过程中, 西南交通大学王元良教授和华中科技大学刘建华教授提出了很多宝贵的建议, 这些建议一一体现在内容的编排和对问题的深入探讨中。感谢王元良教授审阅了全部书稿, 尤其衷心感谢我的博士后合作导师、牵引动力国家重点实验室主任张卫华教授对出版本书予以的支持和建议。

本书是在总结了作者近年来在铝合金高能束流焊接性(尤其是焊接接头“软化”机制)、焊接结构疲劳断裂机理(气孔致疲劳裂纹萌生和扩展行为)以及工程结构三维疲劳裂纹扩展仿真模拟学术成果(ALOF 软件)的基础上完成的。在编写本书过程中参阅了大量有关的国内外经典文献资料, 在此向援引的参考文献作者一并表示衷心的感谢!

作者力求使本书能够较为全面地反映铝合金高能束流焊接的基本特性、焊接过程热力耦合模拟仿真的关键技术、焊接接头性能不均匀性微观机制、焊接缺陷致疲劳损伤和裂纹萌生机制以及焊接结构的服役可靠性评价和设计的基本方法。但由于知识水平与认识能力有限, 加之成文过于匆忙, 校正时间过短, 书中难免有疏漏甚至错误之处, 恳请读者批评指正。

吴圣川

2013年10月于京沪高铁

目 录

第1章 绪 论	1
第2章 铝合金的激光焊接方法	4
2.1 铝合金材料	4
2.2 铝合金的焊接特点	4
2.3 铝合金常规焊接方法	5
2.3.1 GTAW 方法 (TIG)	5
2.3.2 GMAW 方法 (MIG)	6
2.3.3 PAW 方法	6
2.3.4 EBW 方法	7
2.3.5 FSW 方法	7
2.4 铝合金激光焊简介	8
2.4.1 铝合金激光焊的难点	8
2.4.2 激光焊接设备	9
2.5 激光自熔焊	13
2.6 激光填丝焊	15
2.6.1 激光填丝焊的原理	15
2.6.2 填丝焊工艺及组织性能	16
2.7 激光-电弧复合焊接	18
2.7.1 激光-电弧复合焊接原理	18
2.7.2 激光-电弧复合焊的发展及应用	19
2.7.3 激光-电弧复合形式	21
2.8 铝合金激光焊接特性	23
2.9 铝合金激光焊常见缺陷	24
2.9.1 气孔	24
2.9.2 热裂纹	25

2.9.3	咬边与焊穿	25
2.9.4	夹渣	26
2.10	铝合金激光焊接发展趋势	26
第3章	典型铝合金材料的激光焊接	27
3.1	焊前清理	28
3.2	铸造铝合金的激光-电弧复合焊	29
3.2.1	铸造铝合金	29
3.2.2	试件规格	30
3.2.3	实验设备及方法	30
3.2.4	焊缝形貌及组织分析	31
3.2.5	接头力学性能	34
3.3	铝合金5×××的激光-电弧复合焊接	35
3.3.1	5×××系铝合金	35
3.3.2	焊接试样准备	36
3.3.3	焊接参数及成型性	36
3.3.4	热裂倾向	38
3.3.5	接头微观组织	39
3.3.6	接头力学性能	39
3.4	铝合金6×××的激光-电弧复合焊接	43
3.4.1	6×××系铝合金	43
3.4.2	试样准备及焊接参数	43
3.4.3	焊缝成型	44
3.4.4	接头微观组织	45
3.4.5	接头力学性能	45
3.5	铝合金7×××的激光-电弧复合焊接	48
3.5.1	7×××系铝合金	48
3.5.2	焊接试样准备及工艺参数	48
3.5.3	焊缝成型	49
3.5.4	热裂倾向	49
3.5.5	显微组织观察	50
3.5.6	接头力学性能	50
3.6	铝合金接头强化技术	53

3.6.1	焊后接头强化方法概述	53
3.6.2	激光冲击强化技术	54
3.6.3	超声冲击强化技术	55
3.6.4	焊趾修形强化技术	56
3.6.5	焊后热处理技术	57
第4章	焊接热力过程的有限元模拟	58
4.1	焊接过程有限元仿真进展	58
4.1.1	焊接模拟理论基础	59
4.1.2	焊接热力场模拟进展	60
4.1.3	焊接过程模拟的关键技术	63
4.2	铝合金 7075-T6 焊接过程模拟	66
4.2.1	材料及焊件尺寸	66
4.2.2	单元、网格与边界条件	67
4.2.3	热源模型	69
4.3	铝合金焊接模拟流程	72
4.3.1	焊接变形的模拟	73
4.4	结果与讨论	79
4.4.1	温度场结果	79
4.4.2	应力分析	82
4.4.3	变形分析	84
4.5	结论与建议	87
4.5.1	铝合金焊接过程模拟结论	87
4.5.2	铝合金焊接过程模拟建议	88
第5章	铝合金激光复合焊接头的软化	89
5.1	接头软化的研究进展	89
5.2	复合焊接头的力学性能	91
5.2.1	材料与方法	91
5.2.2	静载拉伸性能	92
5.2.3	微区硬度	93
5.3	软化行为研究	94
5.3.1	微观组织	95

5.3.2	强化相变异	96
5.3.3	强化元素分布	99
5.4	气孔影响	103
5.4.1	种类及来源	103
5.4.2	气孔率表征	104
5.4.3	接头的弹性模量	106
5.4.4	接头强度模型	106
5.4.5	验证与讨论	108
5.5	软化机理	109
第6章	焊接接头的 EBSD 分析	111
6.1	多晶体结构及其表征	111
6.1.1	多晶体的结构	111
6.1.2	结构的表达	112
6.2	EBSD 技术的应用	115
6.2.1	EBSD 系统的组成	115
6.2.2	EBSD 技术的一般应用	118
6.2.3	铝合金结构特征	119
6.3	铝焊接头的结构	120
6.3.1	样品制备	120
6.3.2	焊缝能谱分析	121
6.3.3	接头的 EBSD 分析	123
第7章	铝合金接头的疲劳性能及断裂机理	134
7.1	接头疲劳性能	134
7.1.1	S-N 疲劳寿命曲线	135
7.1.2	疲劳裂纹扩展速率	139
7.2	疲劳断裂机理	145
7.2.1	裂纹萌生及扩展机理	145
7.2.2	基于原位 SEM 的疲劳裂纹扩大	146
7.2.3	基于同步辐射成像的疲劳裂纹萌生机理	149
7.2.4	基于 EBSD 的疲劳裂纹萌生机理	153
7.2.5	断口形貌特征及分析	156

7.3 气孔致疲劳损伤	161
7.3.1 气孔与裂纹交互作用研究进展	161
7.3.2 杂交有限元的气孔行为研究	162
7.3.3 熔焊气孔与裂纹耦合作用	171
第8章 焊接结构疲劳强度分析方法	175
8.1 焊接结构疲劳特点及研究进展	175
8.1.1 焊接结构的工艺特点	175
8.1.2 焊接结构的疲劳特点	176
8.1.3 焊接接头典型的疲劳破坏形式	177
8.1.4 焊接结构疲劳分析现状与进展	178
8.2 焊接结构疲劳分析方法	179
8.2.1 名义应力法及接头强度等级	179
8.2.2 热点应力法定义及其 <i>S-N</i> 曲线	183
8.2.3 等效缺口应力法	186
8.3 网格不敏感主 <i>S-N</i> 曲线法	186
8.3.1 方法概述	186
8.3.2 网格不敏感应力计算原理	187
8.3.3 等效应力计算	190
8.3.4 主 <i>S-N</i> 评定流程	192
8.3.5 主 <i>S-N</i> 曲线法实例及验证	194
第9章 焊接结构疲劳断裂仿真分析	199
9.1 断裂力学概述	199
9.1.1 断裂力学的形成与发展	199
9.1.2 断裂力学的分类	200
9.1.3 裂纹扩展模式	201
9.2 裂纹扩展仿真研究进展	202
9.2.1 断裂分析研究进展	202
9.2.2 裂纹扩展仿真软件	203
9.3 焊接部件裂纹扩展分析	206
9.3.1 裂纹扩展分析技术与方法	207
9.3.2 典型结构的裂纹扩展分析	212

第 10 章 车体结构的抗疲劳设计	222
10.1 常用抗疲劳设计标准	222
10.1.1 AAR 标准评定理论	223
10.1.2 BS 标准评定理论	225
10.1.3 IIW 标准评定理论	227
10.1.4 ASME 标准评定理论	228
10.1.5 4 种标准比较	231
10.2 车体疲劳分析方法	232
10.2.1 车体有限元分析概论	232
10.2.2 载荷工况及载荷谱的确定	234
10.2.3 S-N 曲线的选择	235
10.2.4 抗疲劳设计的主要流程	235
10.3 车体结构抗疲劳设计实例	236
10.3.1 货车体有限元强度校核	236
10.3.2 载荷谱的确定	236
10.3.3 重点评估部位	237
10.3.4 各工况结构应力分析结果	237
10.3.5 结果分析	239
10.4 技术展望	239
参考文献	241

第1章 绪 论

全球气候变暖与能源危机的日益突出,使得各国政府对交通运输业惊人的能耗问题愈加重视,而最大限度减轻运载工具本身的质量是节能增效的关键。铝合金因具有密度小、塑性好、价格低、耐腐蚀、强度高、易于加工成形和无低温脆性等优点,成为高速列车轻量化设计的首选结构材料。世界上主要高铁发达国家高速列车结构制造中常用的铝合金主要有 $2\times\times\times$ 系列、 $5\times\times\times$ 系列、 $6\times\times\times$ 系列、 $7\times\times\times$ 系列以及铸造铝合金。与普通客车车体相比,高速列车车体的一个基本特点是大量采用轻质高强度的铝合金材料。研究指出,铁路车辆采用铝合金结构后,能够增效和节能10%以上,轻量化效果十分显著,也为进一步提升速度奠定了坚实的技术基础。

焊接是先进制造领域的关键技术,是结构和装备制造的“连接器”。目前,焊接已经取代铆接和螺栓等机械连接方式成为金属结构最主要和最重要的制造技术。焊接技术在解决复杂结构制造、优化材料成形工艺和降低制造成本等方面发挥着重要作用,已成为衡量一个国家装备制造业水平的重要指针。近年来,我国高速铁路和高速列车发展迅速,截止2013年底,我国高速铁路运营里程已突破1万km。在短短6年的时间内,跨越了高铁发达国家40多年的发展历程,一举成为运营里程最长、开行速度最高、在建规模最大、系统技术最全和集成能力最强的国家。其中,铝合金及其焊接技术在轨道车辆轻量化和高速化过程中的作用和地位不可小觑。如图1.1所示现代高速列车车体均已普遍采用铝合金焊接制造。



图1.1 高速动车组车体铝合金焊接结构

针对材料和结构对制造方法的多样性,工业科学家开发了种类繁多的焊接方法。目前已知所开发的焊接方法均可应用于铝合金结构的制造,并且各有优势。铝合金

结构常用的焊接方法有钨极氩弧焊 (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW 或 TIG)、熔化极氩弧焊 (Gas Metal Arc Welding, GMAW 或 MIG)、等离子弧焊 (Plasma Arc Welding, PAW)、电子束焊 (Electron Beam Welding, EBW)、自熔激光焊 (Autogeneous Laser Welding, ALW)、填丝激光焊 (Laser Filler Welding, LFW)、激光-电弧复合焊 (Hybrid Laser Arc Welding, HLAW) 以及搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 等。

GTAW 和 GMAW 是高速列车车体用得较多的两种焊接方法, 其中 GTAW 多用于 2mm 以下的薄板焊接, 而 GMAW 用于焊接大厚件板材和型材。现场经验和理论研究皆表明, 这两种熔化焊技术在用于铝合金车体焊接时的主要不足是生产效率低、焊缝形貌美观度差、结构变形大以及接头强度下降严重等。因此, 近年来国内外积极开发新型焊接工艺以提升焊接品质, 其中 HLAW 和 FSW 是最有发展前景的新型高效焊接技术。日本在以上两个领域内都进行了有益的探索, 并进行了较为系统的强度验证等。最近, 国内相关单位尤其是西南交通大学等高校在国家和企业重点支持下也开展了新一代更高速动车组国产铝合金 HLAW 的焊接性及接头性能评价等工作, 并已成功研制出样件, 即将进入试车阶段。搅拌摩擦焊被誉为“继激光焊接后的又一革命性的焊接新技术”, 它能够部分解决传统熔化焊接时的质量问题。然而与高效和高柔性的激光焊接技术相比, FSW 存在着如焊接速度低、工艺柔性差、设备投资大以及焊后留有匙孔和熔合不良等严重缺陷。大量实验室研究表明, 基于 FSW 的接头强度和疲劳性能要优于熔焊接头, 焊接结构变形小, 焊接过程低碳环保, 无需焊后矫形等, 预计在不久的将来, FSW 将成为轨道车辆的重要焊接技术之一。本书重点论述激光和熔化极气体保护的复合焊在铝合金结构制造中的应用。

作为一种新型高能束流加工技术, 激光-电弧复合焊充分利用两种热源的优势 (如气体、固体、光纤、半导体等激光热源和钨极氩弧、熔化极氩弧、等离子弧等常规电弧热源) 共同作用于工件表面同一区域, 产生了“ $1+1>2$ ”的协同效应, 从而实现了优质、高效和大熔深焊接, 是当前最具发展潜力和应用前景的高强度铝合金的特种焊接技术。近年来, 激光-电弧复合热源焊接的研究日趋活跃, 出现了专业化的激光复合焊枪, 已开始走向大规模的工业应用。本书综合物理实验、理论模型和计算机仿真, 首先简要介绍了可用于铝合金焊接的几种常规的和最新的焊接方法, 探讨了典型铝合金材料的激光-电弧复合焊接性, 然后以高强度铝合金 7075 为对象, 对其电弧焊热力耦合过程进行了有限元模拟, 重点阐述了该型铝合金光纤激光-熔化极电弧复合焊接 (光纤激光和熔化极氩弧的组合) 的微观组织特性及其强度特性, 包括静载拉伸强度和强度的不均匀性 (即接头的“软化行为”)、疲劳断裂机理及常规疲劳性能等, 还对焊接结构的疲劳断裂行为进行了实验和数值仿真方面的综合研究, 最后探讨了焊接结构可靠性设计与评定的若干技术要点。

目前我国对于高效新型焊接方法在动车组铝合金车体制造中的应用以及结构服役性能的设计和评定技术革新的重视程度仍不够深入,决策信心仍显不足。本书较为系统地总结了著者近年来在铝合金焊接技术方面的相关研究成果及最新进展,对于进一步推进先进焊接工艺的发展以及促进高能束流焊接在我国新一代更高速级高速动车组车体制造中的应用具有借鉴意义。

第2章 铝合金的激光焊接方法

激光焊接是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法，应用于铝合金时具有高速度、大熔深、小变形以及工艺柔性好等特点。因此，激光焊接被誉为本世纪最有发展前景的铝合金先进制造技术之一。自上世纪80年代以来，出现了多种以激光作为主要热源的铝合金焊接方法，如激光自熔焊、激光填丝焊以及激光-电弧复合焊等^[1]。其中复合热源焊接工艺大多以其他成熟焊接方法作为辅助手段增强激光能量，从而取得成本、效率和某些焊接性能上的优势。为叙述方便，本书统称为激光焊接方法。本章简要介绍铝合金激光焊接的应用前景、常用铝合金激光焊的设备、工艺特点以及影响铝合金焊接质量的因素。

2.1 铝合金材料

铝的比重2.7，熔点660℃，具有面心立方结构，塑性高、强度低。由于纯铝的强度和硬度难以满足工程结构设计要求，常通过在铝中加入一定元素以获得强度和硬度更高的铝合金。铝合金是以铝为基的合金系总称，主要合金元素有锌、镁、铜、锰、硅，次要合金元素有镍、钛、铬、铁、锂、锆等。按合金元素和成材方式，铝合金可分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。按时效强化方式，又可分为非时效强化铝合金、时效强化铝合金和铸造铝合金。在轨道车辆工业，大部分使用的是时效强化型铝合金。根据美国铝业协会铝合金代号规则，铝合金目前以四位数字体系命名牌号，然后在再加入加工或热处理工艺的状态代号。

与传统钢铁材料相比，铝合金不仅具有较高的比强度、比模量、断裂韧度、疲劳强度及优良的耐腐蚀性能，而且还具有良好的工艺成形性，能够适应传统产业改造升级和现代高新科技发展的需要，目前广泛应用于机械、电力、化工、航天、军工、高铁、汽车和大飞机制造等领域，发展潜力和应用前景巨大^[2]。

2.2 铝合金的焊接特点

焊接是一种用于铝合金结构的重要加工工艺。常见的铝合金焊接方法可简单分为三大类：熔化焊、压力焊和钎焊。各种电弧焊、激光焊、电子束焊等都属于熔化焊；电阻焊和摩擦焊等属于压力焊；而铝合金应用于电子行业及散热器件等多采用钎焊。其中熔化焊是目前应用最广泛和最主要的铝合金焊接技术。然而由

于铝合金具有热导性好（约为钢铁材料的3倍）、线膨胀系数大（约为钢铁材料的2倍）等诸多特点，但焊接时存在如下问题^[3]：

(1) 铝合金在常温常压下极易氧化，并在表面生成一层附着力强且难熔的氧化膜（ Al_2O_3 ，熔点为2060℃，远高于纯铝的熔点），氧化膜的存在不仅阻碍了电弧能量的传递，使得焊接过程稳定性变差，而且容易形成焊缝夹渣和气孔等缺陷；

(2) 铝合金母材、保护气、焊材表面、大气环境和保护气套管壁等皆含有一定量的氢和水分，由于氢的溶解度在固液状态下差别较大，导致熔池中氢呈现过饱和状态，为焊缝形成气孔提供了前提条件；

(3) 铝合金属于典型的亚共晶合金，具有较宽的脆性温度区间，加之线膨胀系数大，熔池在快速凝固过程中易在固相线高温区附近形成热裂纹；

(4) 铝合金的线膨胀系数大，凝固收缩率达6.6%，焊件的变形和残余内应力较大，热裂纹和残余应力是影响焊接结构疲劳性能的重要因素之一；

(5) 合金元素Mg的沸点（1090℃）远低于铝的沸点（2467℃），焊接时发生严重的蒸发烧损，降低了其在焊缝中的组成，减少了或者不利于强化相颗粒的形成，另外合金元素Li氧化性极强，是高强度Al-Li合金焊接的一大问题；

(6) 由于热导率和比热容大，相同板厚条件下需要能量更集中和功率更大的热源，有时还需要对焊件进行合适的预热处理，这必然导致铝合金接头的过度“软化”，服役性能严重下降，且制造成本的大幅度提高；

(7) 铝合金对光、热的反射能力很强，熔化与冷却凝固时没有明显的色泽变化，给焊接操作和熔池检测带来极大困难；

为获得高性能的铝合金焊接接头，需要选用高能量密度、低线能量的焊接方法，其中激光焊接是最具发展前景的铝合金高效熔焊技术之一。随着大功率高品质激光器和激光加工技术的发展，激光焊接在铝合金结构制造中的优势日益明显，目前已在航天、军工、船舶、汽车、高速列车等领域获得了广泛应用。

2.3 铝合金常规焊接方法

2.3.1 GTAW方法（TIG）

GTAW是一种分别以钨棒和焊件为电极和以惰性气体作为保护气体实现材料连接的方法。作为一种常用的焊接方法，GTAW有如下优点：①熔池可见性好，操作灵活、方便；②熔渣较少，无需焊后清理；③可小电流焊接，易于焊接6mm以下的薄板；④具有阴极清理作用，有利于铝合金表面氧化膜的破碎。GTAW是目前高强铝合金薄件成型中应用最广泛的焊接方法。

然而由于GTAW焊接速度慢，导致焊接热输入量较大，焊后铝合金的变形

和残余应力较大,接头软化程度也比较严重,不适宜焊接大厚件。此外,GTAW受作业现场影响较大,影响了该方法在田野大型工程金属结构中的应用。徐正等对超硬铝合金7075的焊接性研究表明,发现焊根处有大量气孔,熔合线处有约40mm的穿透裂纹,焊接质量较差,接头强度仅有200MPa左右(约为母材的三分之一),因此不建议采用GTAW焊接高强度铝合金^[4]。

2.3.2 GMAW方法(MIG)

GMAW是一种以惰性气体作为引弧介质,并保护金属熔滴、焊接熔池和焊接区高温金属的熔化焊接方法。该工艺成本低、操作灵活,是世界上应用最广泛的焊接方法之一。GMAW电弧燃烧稳定,熔滴向熔池过渡平稳,惰性气体(如氩气或氦气)对焊道有保护作用,焊缝成形均匀、美观。与GTAW相比,其热输入和焊接变形小,能够实现大速度自动化焊接,生产效率获得了大幅度提高,尤其适用于50mm以下中厚板铝合金的高效焊接。目前,国外铝合金结构的焊接90%以上是采用GMAW方法,我国的高速列车车体制造也采用了自动GMAW为主的制造工艺。

一般而言,高强铝合金氩弧焊接头的强度仅为母材的60%左右^[5]。但在进行高强铝合金的弧焊时,除需满足接头的机械性能、疲劳性能与耐蚀性能外,还应充分考虑结构的刚性及抗裂性能,因此,应根据生产需要和铝合金基体材料选择合适种类的焊丝和开发相应的焊前焊后处理工艺(如表面清理、热处理、接头强化等)。

2.3.3 PAW方法

经机械、电磁和热三种作用压缩后的电弧,集束性好,能量更加集中。这种具有高温、长弧特性的拘束态热源应用于熔化焊接时,被称为PAW方法。铝合金焊接时,常采用直流反接或交流。直流PAW主要用于6mm以下板厚接头,采用全熔透法焊接,与GTAW相比优势不大。由于等离子体电弧焊枪结构和压缩喷嘴相对复杂特殊,气体消耗量大,较适合室内焊接。对于纯铝和防锈铝,等离子弧的焊接性良好,硬铝的等离子弧焊接性尚可,而超硬铝则不多见。

于20世纪70年代开发的变极性等离子弧焊(Variability Polarity PAW, VP-PAW)综合了变极性和等离子弧焊的优点,完美解决了铝合金表面氧化膜的阴极清理和钨极烧损两者的矛盾,在铝合金焊接中具有广阔的发展前景。在实际生产中通常采用立向上焊工艺,既有利于焊缝正面成形,又有利于熔池中氢的逸出,一定程度上减少了气孔的生成概率。VP-PAW焊接变形小、成本低、柔性好,且气孔和夹渣等缺陷较常规弧焊少,是近年来铝合金结构焊接的新型加工技术。但VP-PAW的工艺稳定性较差,如焊接规范区间窄、只能自动焊接以及喷嘴易于烧损等。因此,这些不足也成为制约VP-PAW进一步发展和应用的重要