

# 航空制造中常用材料焊接的性能浅谈

Welding Properties of Common Material in Aviation Manufacturing

中航工业成都飞机工业(集团)公司 李 飞 虞文军 李洪林



李 飞

毕业于华中科技大学,现就职于成都飞机工业(集团)公司,从事于焊接方面的工作。学习和工作期间曾参与多项焊接方面的国家重大科研项目。

在航空工业中,无论是飞机、发动机或机载设备的制造都广泛采用了各种焊接技术。航空产品的结构愈来愈复杂,对性能和可靠性的要求愈来愈高,对寿命的要求则愈来愈长,焊接正在从粗加工向精加工方向发展,各种焊接方法过程精细控制已成为必需。质量是航空产品的生命线,航空零件更高的焊接质量,一直是焊接科技人员的目标。

在航空工业中,无论是飞机、发动机或机载设备的制造都广泛采用了各种焊接技术。航空产品的结构愈来愈复杂,对性能和可靠性的要求愈来愈高,对寿命的要求则愈来愈长,焊接正在从粗加工向精加工方向发展,各种焊接方法过程精细控制已成为必需。质量是航空产品的生命线,航空零件更高的焊接质量,一直是焊接科技人员的目标。

## 航空制造业中特种焊接的需求

特种焊接技术在航空航天领域的应用与需求在航空航天装备和材料加工的过程中,始终处于至关重要的地位。随着新材料和新结构的出现,航空航天业对焊接技术提出了更高的要求,传统的焊接技术已无法满足航空航天业的需求。为了保证这些新材料和新结构在航空航天产品中的有效应用,新的特种焊接技术不断涌现并获得广泛应用。

通过调查发现,在航空航天业常用的焊接方法中,特种焊接技术所占的比例和应用面正在逐渐扩大,以电子束焊接、激光焊接和等离子束焊接为代表的高能束流焊接技术以及固态焊技术(摩擦焊、扩散焊等)的比重正在不断增大,正以其独特的优势在飞行器关键部件的研制和生产中发挥着越来越重要的作用。另外,通过对航空航天用户当前关注的先进焊接技术进行了调查,结果表明电子束焊、激光焊、搅拌摩擦焊是当前航

表1 航空航天用户关注的先进焊接技术<sup>[1]</sup>

电子束焊	激光焊	搅拌摩擦焊	等离子焊	活性 TIG 焊
17.1	14.6	13.8	11.8	7.4
复合焊	真空扩散焊	高频感应焊	自动化/智能化焊	其他
8.8	6.1	4.3	12.9	3.2

航空航天用户关注较多的3种先进焊接技术(见表1)。

### (1) 电子束焊接。

电子束焊接技术是以高能密度电子束作为能量载体对材料和构件实现焊接和加工的新型特种加工方法,具有功率密度高、焊接热输入小,零件变形小、焊后残余应力小、焊缝深宽比大、焊接接头无氧化、焊缝质量好等优点。

当前航空航天对电子束焊接技术的需求主要体现在新材料焊接与特种焊接研制、焊接热过程和应力应变计算机模拟与仿真以及大厚度钛合金焊接工艺技术等方面,进一步扩大电子束焊接技术在航空航天领域的应用,解决高强钛合金、超高强钢以及大厚度材料框和盒形梁等结构的焊接工艺已成为电子束在我国航空航天工业应用中的工作重点<sup>[1]</sup>。

### (2) 激光焊接。

激光焊广泛应用于航空航天制造业,特别是武器装备和飞行器结构制造中,如飞机大蒙皮的拼接、蒙皮与长桁的焊接、机身附件的装配、薄壁零件的制造(如进气道、波纹管等)以及航空涡轮发动机叶片的修复、合金飞行舵翼焊接、燃料贮箱加强筋条激光焊代铆等。激光焊接能够显著降低成本、提高生产效率、减轻武器和飞行器的重量,是传统焊接技术的有效补充,已成为现代航空航天工业生产中必不可少的加工工艺手段之一。

### (3) 搅拌摩擦焊接<sup>[2]</sup>。

在航空工业制造领域中,搅拌摩擦焊作为飞机轻合金结构的新型焊接技术还处于研究开发和工程化阶段。但是以英国焊接研究所、波音、空客以及月蚀公司为代表的搅拌摩擦焊技术开发和应用的先锋,已经取得了丰硕的成果。近期的研究结果表明,搅拌摩擦焊可以在飞机机翼结构、翼盒结构、机身结构、舱门结构、

裙翼结构、机舱气密隔板以及货物装卸结构等方面得到应用。

据2005年《Speed News》报道<sup>[2]</sup>,欧洲空中客车公司也已经正式决定将搅拌摩擦焊应用于A340-500S、600S和A350-800、900型大型民运客机和货机的机身结构的制造。搅拌摩擦焊技术的应用可以使A350飞机的机身纵缝连接壁板从8块减少为4块,这样的设计和制造既可以减轻飞机的结构重量,又可以提高飞机的使用寿命和部件的可维护性<sup>[2]</sup>。

## 常见航空材料焊接质量

不锈钢、高温合金、铝合金、钛合金和镁合金材料是常见的航空焊接用材。随着航空零件对焊接质量和精度要求的提高,焊接科技人员对材料焊接之后的力学性能越来越关注,并进行了大量的试验研究。

### 1 不锈钢和高温合金的焊接

吴家云<sup>[3]</sup>对0Cr15Ni5Cu2Ti不锈钢氩弧焊进行了工艺研究,0Cr15Ni5Cu2Ti不锈钢属于沉淀硬化型马氏体不锈钢,该钢由于含碳量低,马氏体转变温度接近室温,焊缝及附近热影响区为韧性好的低碳马氏体,焊接过程中产生的焊接应力和变形很小,因而焊接接头无形成热裂纹和冷裂纹的倾向,具有优良的焊接工艺性。该不锈钢采用钨极氩弧焊很容易焊接,无需采用特殊的焊接工艺即可获得无缺陷焊缝,故试验采用普通钨极氩弧焊方法进行。

焊接接头在淬火热处理及淬火时效热处理状态下的强度值均达到了母材技术条件规定的最低保证强度值的95%,并且达到了本炉号母材复验值的90%以上。

赵勇桃<sup>[4]</sup>采用钨极氩弧焊研究了在一定焊接工艺条件下,1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢与1Cr13马氏体不锈钢焊接接头的组织及性能,对1Cr18Ni9Ti奥氏体型与1Cr13

马氏体型不锈钢的焊接提供了试验数据。经过拉伸试验,1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢母材的抗拉强度为547MPa,1Cr13马氏体不锈钢母材的抗拉强度为659MPa,1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢和1Cr13马氏体不锈钢组成的焊接接头的抗拉强度是535MPa。由数据可知,马氏体不锈钢和奥氏体不锈钢不同组织的焊接接头抗拉强度与奥氏体不锈钢母材相接近。与奥氏体不锈钢母材相比,抗拉强度下降了2.04%;与马氏体不锈钢母材相比,抗拉强度下降了12.9%,断裂部位发生在奥氏体不锈钢一侧热影响区,说明焊缝的力学性能较好。

苏颜丽<sup>[5]</sup>对1Cr18Ni9Ti不锈钢进行了激光焊接,激光焊接接头的抗拉强度最高可以达到母材的99.4%,屈服强度 $\delta_{0.2}$ 达到母材的115.3%,延伸率可以达到母材的92.5%。

解瑞军<sup>[6]</sup>对35CrMnSi钢电子束焊接接头显微组织和力学性能进行了研究,35CrMnSi钢主要用于制造重负荷、中等圆周速度、高强度的零件,如高压鼓风机叶轮、飞机上用的高强度零件等。该钢可在淬火和低温(200~250℃)状态下使用,也可在调质状态下使用。

35CrMnSi钢平板电子束焊焊接接头焊缝、热影响区及母材3个区域洛氏硬度的测量结果见表2。

焊接接头的抗拉强度分别为611.1MPa和710MPa。焊接接头的延伸率分别为1.5%~5.5%,试验结果见表3。

在航空工业中,高温合金主要用于制造燃气涡轮发动机的高温工作构件,如燃烧室、涡轮盘和叶片、导向器叶片和机匣、扩散器和加力燃烧室等,其中多数板材合金构件是采用焊接工艺制造,有些锻件和铸件也需要焊接。因此,高温合金的焊接性和焊接工艺对其推广和应用是非常重要的。GH4169合金是高推重比

表2 洛氏硬度 (HRC) 测试结果

板厚/mm	焊缝硬度			热影响区硬度			母材硬度		
2	57	56.4	57.4	42	50.5	48.6	20.4	21.7	20.8
	平均 56.9			平均 47			平均 21		
10	58.5	57.5	57.2	42.6	42.2	47	20.5	22.1	29.4
	平均 57.7			平均 43.9			平均 24		

表3 拉伸试验结果

试验板厚/mm	测试区域	拉伸强度 / MPa	延伸率 (A) / %	断面收缩率 (Z) / %	断裂位置	组织状态
2	接头	611.1	1.5	13.3	热影响区	—
10	接头	710	5.5	11.37	热影响区	—
3	母材	834.9	3.0	18.2	—	F+P

航空发动机的热端部件广泛采用的高强度高合金之一,许鸿吉进行了氩弧焊研究。焊后热处理规范为:(950~980)℃、±10℃保温1h后空冷,+720℃、±5℃保温8h,以50℃/h炉冷至620℃、±5℃保温8h,空冷。

GH4169合金母材及氩弧焊接头高温拉伸试验结果,可以看出:在650℃高温下,GH4169合金母材的抗拉强度在812MPa左右,其高温延伸率可高达57.4%,具有相当优良的高温强度和塑性。与母材相比,在相同的高温条件下,氩弧焊接头,其高温抗拉强度较母材有所提高,达943MPa,但延伸率还是有显著下降,只有5.9%(见表4)。

## 2 铝合金的焊接

张伟华<sup>[8]</sup>等人研究了ZL109铝硅合金CO<sub>2</sub>激光焊接头力学性能,采用CO<sub>2</sub>激光器在无填充金属的条件下对ZL109铝硅合金进行焊接,接头抗拉强度和断后伸延率达到最大值,分别为121.2MPa和4.3%,达到母材强度的93.2%和母材断后伸延率的89.6%。

纯铝电子束焊接接头焊缝区的硬度平均值为49.9HV;而HAZ的硬度值比焊缝低,平均值为26.9HV;母材的硬度值是最高的,为64.2HV左右。因此,纯铝电子束焊接接头的热

影响区具有软化倾向。

纯铝焊接接头的断裂位置在母材。这说明纯铝电子束焊接接头的强度一般均高于母材的强度,相应地其塑性则比母材低,见表5。究其原因,主要是由于焊缝中心组织为细小的等轴晶。

秦占领<sup>[10]</sup>等人对ZL114A铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能进行了研究,ZL114A铸造铝合金的搅拌摩擦焊与母材相比,焊缝区的硬度分布较均匀,变化幅度小,拉伸试验大都断裂在接头热影响区处,接头的抗拉强度可达母材的70%左右,表

现出了较好的机械性能。试验结果表明,搅拌摩擦焊焊接ZL114A铝合金,可以得到成形美观、内部无缺陷、几乎无变形的焊接接头。

从表6可知,ZL114A铸造铝合金搅拌摩擦焊接头的拉伸试样大都断裂在接头前进边的热影响区上,接头抗拉强度达到了母材的70%,延伸率提高。

P M G P Moreira<sup>[11]</sup>等人分析了6082-T6和6061-T6的FSW接头和MIG接头的疲劳行为。FSW接头 $\sigma_{\max-N}$ 的曲线数据显示区域较窄,数据点的分散度低。而在MIG接头的 $\sigma_{\max-N}$ 曲线数据点的分散度高。FSW接头疲劳裂纹起源于焊核,MIG接头的疲劳裂纹起源于焊缝和母材结合处。两种材料的MIG接头的疲劳寿命低于FSW接头的疲劳寿命。Ericsson<sup>[12]</sup>等人也比较了FSW接头和TIG焊、MIG焊接头的疲劳行为。在应力范围的S-N曲线图中(见图1),6082-T6铝合金无论是在高焊速还是在低焊速下,当循环数为 $5 \times 10^5$ 次时,疲劳强度均为90MPa,而TIG焊和MIG焊的疲劳强度为70MPa和60MPa。FSW接头与熔焊接头局部几何形状不同,导致利用熔焊疲劳设计曲线IIW FAT40和Eurocode 9对

表4 GH4169合金母材及氩弧焊接头高温拉伸试验结果<sup>[7]</sup>

平均值	试验温度/℃	抗拉强度/MPa	伸长率 A / %	断裂位置
母材	650	812	57.4	—
接头	650	943	5.9	焊缝

表5 纯铝电子束焊接接头拉伸和母材拉伸力学性能试验结果<sup>[9]</sup>

试样厚度/mm	测试区域	抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa		伸长率 $\delta$ / %		断面收缩率 $\phi$ / %		断裂位置
10	母材	1	110.0	110.0	50.2	27.56	26.66	母材
		2	106.7		53.96			
		3	113.3		47.95			
10	接头	1	77.5	77.0	83.4	45.7	45.7	母材
		2	76.5		88.7			
		3	77.0		88.6			

表6 FSW接头的拉伸试验

序号	旋转速度 $n$ / (r·min <sup>-1</sup> )	焊接速度 $v$ / (r·min <sup>-1</sup> )	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率 $\delta_5$ /%	断裂位置
1	950	95	173.0	1.80	HAZ (AS)
2	950	118	173.5	2.40	HAZ (AS)
3	600	95	172.4	2.10	HAZ (AS)
4	1180	95	172.2	1.65	HAZ (AS)
母材	—	—	250.8	1.40	—

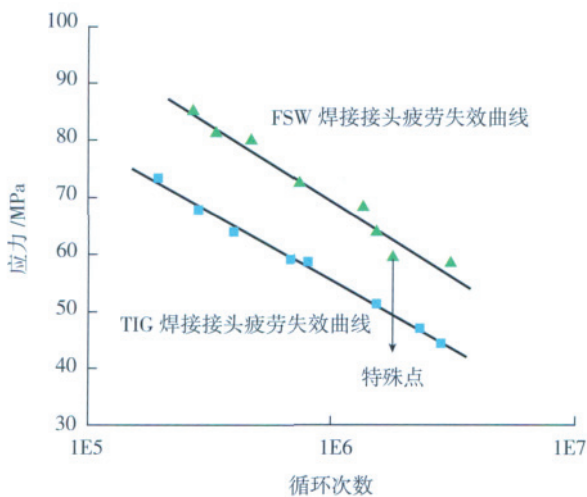


图1 FSW和TIG焊接接头疲劳曲线

FSW 接头进行疲劳设计得到的疲劳强度偏高。SEM 分析疲劳条纹形貌，MIG 接头的疲劳条纹比 FSW 宽，粗大条纹内有低熔点共晶  $Mg_2Si$  在焊缝凝固过程中形成的热裂纹<sup>[13]</sup>。

王快社<sup>[14]</sup>等人对搅拌摩擦与氩弧焊铝合金接头疲劳性能进行了比较，在相同的载荷条件下，搅拌摩擦焊接接头的疲劳寿命高于氩弧焊接接头，在加载应力较高的情况下更加明显，两条曲线的变化趋势表明，FSW 焊接接头和 TIG 焊接接头的疲劳强度均随着循环次数的增加而降

低，但是随着循环次数的增加，TIG 焊接接头的疲劳强度降低的程度小于 FSW 焊接接头疲劳强度降低的程度。在高应力下，两种焊接方法对疲劳性能的影响有显著的差异，随着应力的降低，两种焊接方法对疲劳性能的影响的差异逐渐减小。

### 3 钛合金的焊接

杨慧等<sup>[15]</sup>人采用手工 TIG 焊对 TC4

钛合金进行了焊接试验，试验结果表明，试样拉伸的主要变形区域在热影响区及其邻近的母材部位，断裂部位在熔合区附近，母材的抗拉强度为 853MPa，延伸率  $\delta_5$  为 10.4%，说明焊接接头的延伸率有所下降，这主要是由于焊缝中出现魏氏组织以及较粗大的晶粒所致，但焊接接头的强度并未发生明显变化，与母材的相当，获得了相对满意的试验结果。

许鸿吉等<sup>[16]</sup>人的试验结果表明：TC4 钛合金电子束焊接接头的室温抗拉强度与母材很接近，焊接接头的

延伸率和断面收缩率也很高，通过对室温拉伸试样断裂部位的观察，可以看出，TC4 钛合金电子束焊接接头室温拉伸时，其断裂部位均在距焊缝中心较远的母材上，说明接头与母材等强。因此采用电子束焊接 TC4 钛合金可获得室温拉伸性能良好的焊接接头。

母材硬度大约为 350HV，焊缝区硬度比母材硬度平均高出 40~50 HV，比热影响区硬度比母材硬度平均高出 10~20HV，由焊缝区硬度向母材硬度依次降低。

姚伟等<sup>[17]</sup>人对 2.5mm 厚 BT20 钛合金激光焊接接头力学性能进行了研究，激光焊接接头各区域焊缝背面等离子体和高温金属蒸气在背面保护气的衬托下起到热沉的作用，对焊缝背面进行持久加热。这就造成了焊缝上部冷却速度明显快于焊缝下部，因此焊缝上部的硬度值（约为 390 HV0.2）远高于焊缝下部（低于 370 HV0.2），尤其在焊缝表面附近显微硬度值最高，超过 400 HV。焊缝的拉伸和弯曲性能接近母材（见表 7）。

对 BT20 钛合金母材及激光焊接接头疲劳寿命进行测试。轴向加载，三角波循环，应力比  $R=0.1$ ，最大应力水平分别取接头静载强度  $\sigma_b$  的 0.65、0.75 和 0.85，试验频率为 25Hz，其中值疲劳寿命如图 2 所示。由图可以看出，在较高的应力水平（0.75 和 0.85）作用下，激光焊接接头的中值疲劳寿命远低于母材，而在较低应力水平作用下，激光焊接接头的中值疲劳寿命与母材相当。

梁春雷<sup>[18]</sup>等人对 TC4 钛合金薄板激光焊接接头疲劳性能进行了研究，焊接接头在低应力水平时疲劳寿命高于母材，如图 3 所示，而在高应力水平时则低于母材。其原因可能是：疲劳寿命包含裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命，由于激光焊接头显著的非均质性，在高应力水平时某些局部区

表7 母材及其激光焊接接头的拉伸和弯曲性能

测试对象	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率 $\delta_5$ /%	弯曲角 $\alpha$ /°
母材	1030.5	17.2	27.4
接头	1047.0	12.7	25.7

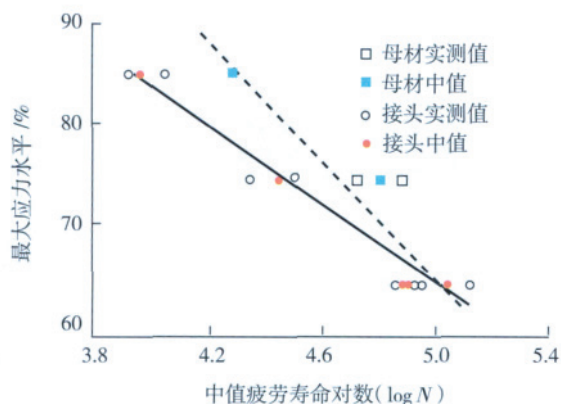


图2 母材和激光焊接接头中值疲劳寿命

域应变集中严重,过早产生塑性变形进而发展成为疲劳微裂纹,裂纹萌生寿命降低,致使高应力水平时总的疲劳寿命与母材相比要低。

#### 4 镁合金材料的焊接

综合国内外研究结果可以发现,镁合金焊接接头的力学性能由于采用不同的焊接方式而有不同的表现。TIG 焊、GTA 焊和摩擦焊焊接接头的抗拉强度、延伸率和屈服强度比母材的低;电子束焊和激光焊焊接效率较高,抗拉强度、延伸率和屈服强度与母材相当或略低于母材;硬度都和母材相差不大,断裂多发生在热影响区。由于镁合金的熔点低,导热快,焊接加热时需要大功率,热影响区容易过热,吸收的热量使热影响区晶粒长大,从而导致热影响区的组织晶粒粗大,这是引起镁合金焊接接头力学

性能下降的主要原因之一<sup>[19]</sup>。

主要内容之一,为了适应今后全数字化制造的要求,在实现焊接专机和焊接机器人自动化中要考虑采用网络技术,预留网络接口,因此,焊接过程的质量传感、信息处理和现代控制是焊接设备未来发展的必然趋势,焊接设备数字控制是今后的发展方向。

#### 2 焊接模拟技术的应用

焊接的热过程是极其复杂的,其复杂性主要表现为:焊接热源能量密度分布梯度大,加热极不均匀;焊接加热速度极快,在很短的时间内热源把大量的热能传递给焊件,焊接热源相对于工件移动,传热过程不稳定;焊接熔池中金属强烈运动,内部进行一系列的物理化学反应。

焊接热过程的数值分析开始于20世纪70年代,迄今已有30多年的发展历程。通过数值模拟可以分析各类焊接过程的热循环和温度场分布特征,分析高能束焊接过程中束孔形状分布特征以及温度分布对组织和性能的影响等情况。目前的研究结果认为,钛合金电子束焊接时,表面温度的高温区集中在焊缝两侧很窄的范围内,焊缝两侧温度梯度较大,在深度方向上,由于电子束

的穿透能力强,温度梯度较小。

在发展焊接数值模拟技术和建立数学模型的过程中,应十分重视试验验证工作,充分考虑相关现象的所有知识,使数学模型能真实地反映现象的本质和规律。只有这样才能使焊接数值模拟得到真正发展和成功应用<sup>[20]</sup>。

#### 3 焊接领域的拓展

焊接成形是一种直接制造金属零件工艺,它类似于熔融沉积成形,不同之处在于焊接快速成形采用焊接工艺通过电弧使金属熔化与过渡。但由于材料的堆积以液态金属过渡的方式进行,且堆积过程中存在液态金属熔池,使零件边缘形状及零件的精度控制变得困难。同时焊接成形是一个冶金过程,伴随零件内部组织转变、焊接变形、残余应力等问题,影响零件的性能与几何尺寸。

激光快速成形技术是一种新型、快速、高效的材料热成形技术,它的出现为我们实施轻质有色金属构件热成形代替数控加工成形、局部修补受损构件、提高原材料利用率、减少构件报废率、缩短产品制造周期、降低产品成本提供了可能。

#### 结束语

与世界发达国家的航空工业焊接技术水平相比,我国航空焊接技术还有很大的差距,为满足我国正在从航空大国向航空强国快速发展的需求,还需要继续努力工作。各种新材料的连接迫切需要研发焊接和连接的新方法、新工艺、新技术。当前,航空产品正面临着材料革命,各种新材料在航空工业上的应用正在快速发展,我国航空制造业中焊接技术迎来了一个迅速发展的时期。

本文共有参考文献20篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)

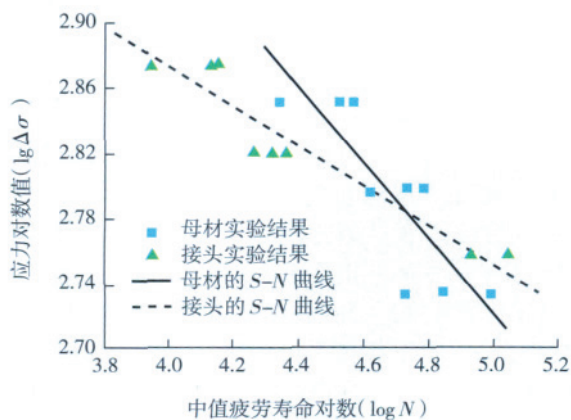


图3 母材和激光焊接接头S-N曲线