

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2024.04.005

飞机燃油系统管路焊接性能研究

叶柯华^{1*} 马鹏宇¹ 李南安¹ 李朋杰² 聂才力²

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 燕山大学, 秦皇岛 066004)

摘要: 焊接为飞机燃油系统管路重要的加工手段。为研究燃油系统管路的焊缝处特性, 对不同热处理状态和焊缝等级下对焊和相贯焊的管路, 进行了金相检测和静力拉伸, 分析焊缝力学性能和热影响区分布。通过实验研究, 获得了热影响区的范围、抗拉强度、屈服强度和弹性模量等数据。主要研究结果显示, 在 T6 热处理状态下, 焊缝的等级越低, 其热影响区的范围就越广。此外, 相贯焊接的热影响区受到焊缝等级和材料热处理状态的不同影响。在焊缝区域, 其力学性能与母材存在显著差异, 尤其是在热影响区, 其抗拉强度和屈服强度都有明显下降。

关键词: 飞机; 燃油系统; 焊接管路; 金相检测; 静力拉伸; 热影响区

中图分类号: V222

文献标识码: A

OSID:



0 引言

燃油系统被誉为飞机的“血管”, 用于向发动机长时间稳定提供燃料, 对保证飞行安全具有至关重要的作用^[1-2]。因燃油系统主要安装在空间有限的中机身和机翼内部, 其管路通常需要设计成蜿蜒曲折的路径, 并且包含多个分支。因此, 焊接成为了一种至关重要且必不可少的加工方法^[3-4]。

由于焊接在制造时会产生大量热量, 焊缝附近材料力学性能会因此发生显著变化, 并形成不同的区域, 这将对管路强度和疲劳特性产生巨大影响。

当前国内外学者针对焊接管路性能进行了大量研究。文献[5]基于焊缝宏观尺度建模方法, 对燃油管路流固耦合特性展开研究。文献[6]采用有限元方法建立燃油焊接管路静力学和动力学仿真模型, 提出一种强度可靠性分析方法。文献[7]建立焊缝有限元模型, 研究 RTCA DO-160G 规定耐久振动载荷下的管路疲劳性能。文献[8]推导得到航天器管路焊接位置材料 P-S-N 曲线, 进而推算得到焊缝处疲劳寿命。文献[9]提出一种新型基于梁单位的高效疲劳载荷计算方法, 并运用于火箭发动机

焊接管路振动载荷下疲劳性能计算中。Ficquet 和 Serasli 等^[10]通过有限元方法研究油气输送焊接管路残余应力影响。WANG Zongren 和 ZHU Liujuan 等^[11]基于卷积神经网络方法对焊接管路故障进行识别。

由上述研究可知, 焊接疲劳强度特性分析是当前研究的重点和热点。而对于建立准确的管路仿真分析模型, 获得焊缝处不同位置的力学特性尤为重要。

飞机燃油系统管路壁厚通常为 0.03 in, 直径在 1~3 in 间, 具有薄壁大直径的特征。因此管路焊接处热量传递性能不同于液压等薄壁小直径管路, 两者的热影响区域力学特性和范围存在显著差异。

为了平衡经济性和满足强度要求, 飞机燃油系统的管路采用了不同材料和热处理状态, 并采用不同的焊接等级。常用管路材料为 6061 铝合金, 根据实际需要, 这些材料会被处理至 T4 或 T6 的状态。管路焊缝根据质量标准分为 A 级、B 级和 C 级。不同级别的焊缝在焊接性能上存在显著差异。故为得到准确的疲劳寿命预测, 必须充分考虑材料差异、焊缝质量等因素对管路力学特性

* 通信作者。E-mail: yekehua@comac.cc

引用格式: 叶柯华, 马鹏宇, 李南安, 等. 飞机燃油系统管路焊接性能研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4):25-31. YE K H, MA P Y, LI N A, et al. Research on the welding property of pipelines for the aircraft fuel system[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(4):25-31(in Chinese).

的影响。

为充分全面评估管路材料和焊缝等级对性能的影响,本文根据国内某民用飞机燃油系统管路构型加工得到 6061-T4 和 6061-T6 两种不同热处理状态和 A 级、B 级和 C 级不同焊缝等级的对焊和相贯焊试验样件,通过金相检测和静力拉伸试验,研究材料组织特性和力学性能,以为后续仿真计算和燃油系统设计提供数据支撑和理论基础。

1 管路常见焊接形式

焊接通过熔融在两个金属件间填充的焊料实现连接。焊接接头组成主要包括母材区、热影响区和焊缝区,如图 1 所示。

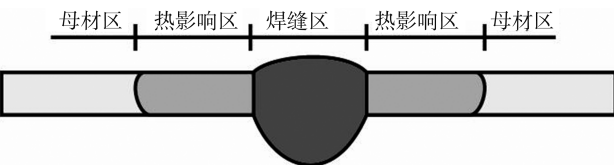


图 1 焊接接头组成

焊缝区域为被融化的填充焊料,其组织结构和性质决定了连接的牢固程度。

热影响区位于焊缝区两侧,在焊接时受大量热量影响,材料虽未融化,但力学性能较母材区域发生显著变化。

母材为金属基体材料,在热影响区外围,未受到焊接释放的热量影响,其力学特性不变。

燃油系统管路常用焊接形式主要包括对焊和相贯焊。

a) 对焊

被加工管路中线对齐,末端截面间添加焊料,熔融后形成整体结构,如图 2 所示。

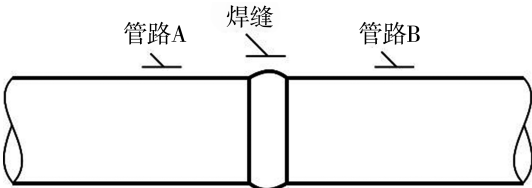


图 2 对焊

b) 相贯焊

相贯焊为“T”型结构,焊缝位于主管中间,如图 3 所示。

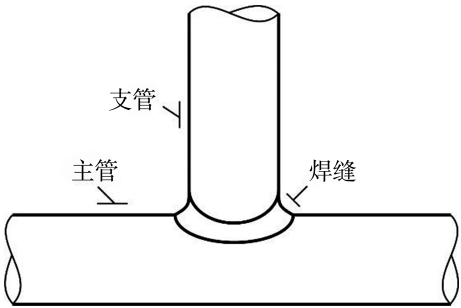


图 3 相贯焊

2 金相检测和静力拉伸试验

2.1 试验件

金相检测试验件依据国内某型民用飞机燃油系统管路构型加工而成,采用 6061-T4 和 6061-T6 铝合金材料,焊缝等级分为 A 级、B 级和 C 级。试验件详见表 1。

表 1 金相检测试验件

试验件		热处理 方式	焊接 等级	试验件编号
焊接形式	尺寸/mm			
相贯焊	主管:150 支管:100	6061-T4	A	A1-00AT4
			B	A1-00BT4
			C	A1-00CT4
相贯焊	主管:150 支管:100	6061-T6	A	A1-00AT6
			B	A1-00BT6
			C	A1-00CT6
对焊	管长:150	6061-T4	A	A2-00AT4
			B	A2-00BT4
			C	A2-00CT4
对焊	管长:150	6061-T6	A	A2-00AT6
			B	A2-00BT6
			C	A2-00CT6

静力拉伸试验仅考虑对焊管路。试验件如表 2 所示。

表 2 静力拉伸试验件

试验件		热处理 方式	焊接 等级	试验件编号
焊接形式	尺寸/mm			
对焊	管长:150	6061-T4	A	A2-00AT4
			B	A2-00BT4
			C	A2-00CT4

表2(续)

试验件		热处理 方式	焊接 等级	试验件编号
焊接形式	尺寸/mm			
对焊	管长:150	6061-T6	A	A2-00AT6
			B	A2-00BT6
			C	A2-00CT6

对焊和相贯焊试验件如图4所示。



(a) 对焊试验件



(b) 相贯焊试验件

图4 试验件

2.2 金相检测

金相检测依据 GB/T 13298-2015《金属显微组织检验方法》开展相关工作,旨在获取燃油管路焊接接头热影响和焊缝区尺寸特征,并对各部分材料组织的相面积分数、粒子间距和晶粒尺寸展开分析。试验设备包括金相显微镜(放大倍数为50倍、100倍、200倍、500倍和1 000倍)、自动抛磨机、金刚石精密线切割机、热镶嵌机及锯片切割机。

金相检测步骤如下:

- 1) 试验件制备:切割→磨光→抛光→侵蚀→吹干;
- 2) 将试验件置于金相显微镜上,开始试验;
- 3) 调节倍镜,按照低倍至高倍的次序进行仔细观察;

4) 依次观察不同区域金相组织,并显微照相记录结果;

5) 关闭金相显微镜;

6) 保存并处理试验数据。

2.3 静力拉伸试验

静力拉伸试验依据 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》开展相关工作,旨在获取燃油焊接管路焊缝区、热影响区材料屈服强度、抗拉强度等力学特性。试验设备为万能材料试验机,最大试验力 250 kN。

静力拉伸试验步骤如下:

- 1) 对试验件进行制样;
- 2) 用数显卡尺量取不同截面处的试验件宽度求平均值作为平均宽度,并测量试验件长度并做好标距;
- 3) 启动万能材料试验机,将试验台位移和数值显示清零,设置系统参数;
- 4) 对试验件分别进行加载,测出试验件屈服载荷、最大载荷;
- 5) 拆除试验件,电子力学性能试验机关机,测量试验件断后尺寸;
- 6) 保存并处理实验数据。

在静力拉伸试验中,试验件根据 GB/T 2651《焊接接头拉伸试验方法》进行制样。具体要求如表3和图5所示。

表3 制样尺寸

参 数	符号	尺寸/mm
试样总长度	L_t	根据试验机调整
夹持端长度	b_1	$b+12$
平行部分宽度	b	12
平行部分长度	L_c	$\geq L_s+60$
过渡半径	r	≥ 25

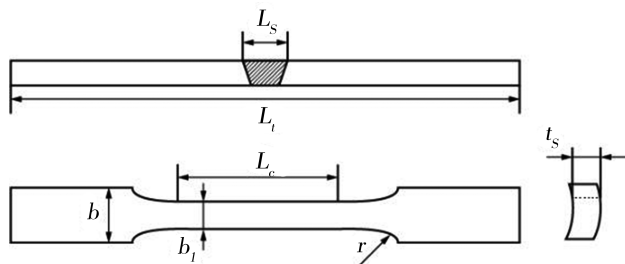


图5 制样要求

3 结果分析

3.1 金相检测结果

3.1.1 对焊结果

不同热处理状态和焊缝等级对焊热影响区域如表 4 所示。由表可知,6061-T4 焊缝平均热影响区域为 6.35 mm,6061-T6 焊缝为 5.57 mm。后者热处理后,材料强度优于前者,故其热影响区域范围更小。对比不同焊缝等级,A 级焊缝质量最佳,其热影响区域范围明显小于 B 级和 C 级。

表 4 对焊试验件热影响区域尺寸

热处理状态	焊缝等级	左热影响区/mm	右热影响区/mm
6061-T4	A	6.38	6.06
	B	6.29	6.31
	C	6.46	6.64
6061-T6	A	4.60	5.46
	B	5.51	6.16
	C	6.12	5.57

各个试验件焊缝区域材料组织特性如表 5 所示。由表可知,不同热处理状态和焊缝等级材料相面积分数稳定在 86% 附近,波动幅度不超过 2%。6061-T4 和 6061-T6 焊缝粒子间距均值分别为 7.17 μm 和 7.31 μm 。粒子尺寸在两种焊缝等级下均值分别为 35.5 μm 和 38.3 μm 。粒子的间距和尺寸 6061-T6 焊缝粒子的间距和尺寸略大于 6061-T4 焊缝。

表 5 对焊试验件材料组织特性

热处理状态	焊缝等级	相面积分数	粒子间距/ μm	粒子尺寸/ μm
6061-T4	A	87%	7.08	28(右) 30(左)
	B	87%	7.48	42(右) 47(左)
	C	84%	6.95	33(右) 33(左)
6061-T6	A	86%	6.54	41(右) 35(左)
	B	84%	7.92	34(右) 25(左)
	C	88%	7.48	47(右) 51(左)

3.1.2 相贯焊结果

相贯焊试验件分别在直角焊处和平角焊处取样检测,如图 6 所示。

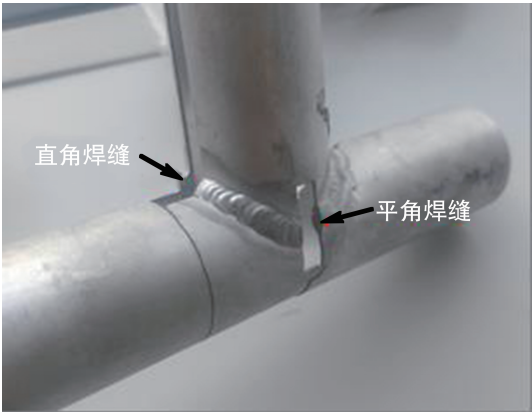


图 6 相贯焊制样位置

直角焊处热影响区尺寸如表 6 所示。主管热影响区大于支管处,支管热影响区约为 5.80 mm,主管处热影响区约为 6.49 mm。6061-T6 焊缝热影响区域较 6061-T4 更大。高等级焊缝热影响区趋于更大。

表 6 相贯焊试验件直角焊缝热影响区域尺寸

热处理状态	焊缝等级	支管热影响区/mm	主管热影响区/mm
6061-T4	A	5.27	6.15
	B	4.91	7.86
	C	4.89	5.66
6061-T6	A	7.81	8.02
	B	6.17	5.53
	C	5.79	5.76

平角焊处热影响区尺寸如表 7 所示。主管热影响区均值为 5.28 mm,支管热影响区约为 5.96 mm。相同焊缝等级不同热处理状态下的热影响区范围无明显规律性。

表 7 相贯焊试验件平角焊缝热影响区域尺寸

热处理状态	焊缝等级	支管热影响区/mm	主管热影响区/mm
6061-T4	A	5.41	4.11
	B	6.46	8.32
	C	7.46	3.79

表7(续)

热处理状态	焊缝等级	支管热影响区/mm	主管热影响区/mm
6061-T6	A	4.74	6.06
	B	5.40	4.75
	C	6.29	4.67

直角焊材料组织特性如表 8 所示。相面积分数约为 85.2%。粒子间距和尺寸均值分别约为 7.19 μm 和 36.75 μm 。材料组织特性和对焊结果类似,受热处理状态和焊缝等级影响较小。

表 8 相贯焊试验件直角焊材料组织特性

热处理状态	焊缝等级	相面积分数	粒子间距/ μm	粒子尺寸/ μm
6061-T4	A	86%	5.57	53(支管) 33(主管)
	B	84%	9.38	28(支管) 38(主管)
	C	86%	7.47	27(支管) 35(主管)
6061-T6	A	83%	5.00	42(支管) 37(主管)
	B	88%	6.47	43(支管) 35(主管)
	C	84%	9.20	37(支管) 33(主管)

平角焊材料组织特性如表 9 所示。相面积分数略高于其他类型焊缝,约为 91.7%。其他材料组织特性前述三个类型焊缝类似。

表 9 相贯焊试验件平角焊材料组织特性

热处理状态	焊缝等级	相面积分数	粒子间距/ μm	粒子尺寸/ μm
6061-T4	A	89%	5.05	29(支管) 26(主管)
	B	92%	4.04	38(支管) 24(主管)
	C	92%	4.08	40(支管) 32(主管)
6061-T6	A	89%	3.41	38(支管) 37(主管)
	B	93%	6.10	35(支管) 42(主管)
	C	92%	3.54	29(支管) 30(主管)

3.2 静力拉伸试验结果

铝合金材料力学特性如表 10 所示。

表 10 铝合金材料力学特性

热处理状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
6061-T4	207	110
6061-T6	290	241

对焊试验件典型失效位置如图 7 所示。不同热处理状态和焊接等级试验件失效位置均出现在热影响区域。



图 7 对焊试验件典型失效位置

对焊试验件热影响区抗拉强度和屈服强度如表 11 所示。热影响区域抗拉强度均值为 151.3 MPa,屈服强度均值为 107.8 MPa,较母材发生大幅度衰减。故失效位置均出现于热影响区处。相同焊接等级下,6061-T6 热处理方式下的热影响区强度高于 6061-T4 热处理方式。

表 11 对焊试验件热影响区抗拉强度和屈服强度

热处理状态	焊接等级	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
6061-T4	A	152.5	103.5
	B	151	103.5
	C	136	98.5
6061-T6	A	152.5	113
	B	153.3	113.5
	C	162.5	114.5

对焊试验件弹性模量和泊松比如表 12 所示。焊接后,焊缝区和热影响区的弹性模量有所提高,其中焊缝区增幅更为明显。泊松比在不同区域差异较小,约为 0.33。不同热处理状态和焊接等级对焊缝各区域弹性模量和泊松比无明显影响。

表 12 对焊试验件弹性模量和泊松比

热处理状态	焊接等级	焊缝划分	弹性模量/ MPa	泊松比
6061-T4	A	母材区	79	0.35
		热影响区	97	0.31
		焊缝区	109	0.35
	B	母材区	79	0.35
		热影响区	98	0.31
		焊缝区	90	0.31
	C	母材区	79	0.35
		热影响区	86	0.31
		焊缝区	98	0.36
	A	母材区	75	0.35
		热影响区	104	0.29
		焊缝区	99	0.36
6061-T6	B	母材区	75	0.35
		热影响区	95	0.29
		焊缝区	90	0.32
	C	母材区	75	0.35
		热影响区	108	0.29
		焊缝区	109	0.30

4 结论

焊接为飞机燃油系统管路重要的加工方法。本文对国内某型民用飞机燃油系统管路试验件开展金相检测和静力拉伸试验,研究不同铝合金热处理状态和焊缝质量下,焊接管路力学特性,以期为后续理论研究和工程实践提供参考依据和数据支持。主要研究结论如下:

1) 对焊管路 6061-T6 焊缝的热影响区大于 6061-T4 焊缝。焊缝质量有助于减小热影响区范围。

2) 相贯焊在直角焊缝处,热影响区受材料热处理状态和焊缝等级影响较为明显。

3) 由静力试验失效位置可知,焊接导致热影响区域抗拉强度和屈服强度显著下降。失效位置通常出现于热影响区处。

4) 相同焊接等级下,6061-T6 热处理状态的热影响区强度高于 6061-T4 焊缝。

5) 焊缝各区域弹性模量和泊松比受热处理状态和焊缝等级影响较小。

综上所述,不同材料和焊缝等级的管路力学性能具有显著差异。对焊管路采用 T6 热处理状态及提高焊缝质量后,可有效减少热影响区大小。燃油压力加油和供油子系统管路,因内部压力载荷更高,应尽可能采用对焊,铝合金材料应处置至 T6 状态,且焊缝等级应为 A 级,以满足强度要求。

参考文献:

- [1] 兰顿. 飞机燃油系统[M]. 颜万亿,译. 上海:上海交通大学出版社,2010.
- [2] 祝世兴,田静. 飞机液压与燃油系统[M]. 北京:兵器工业出版社,2004.
- [3] 戚佳睿,张丹峰,孙海霞,等. 焊接技术在飞机修理中的应用[J]. 设备管理与维修,2017(2):107-108.
- [4] 权凌霄,狄梦然,孙世博,等. 基于概率有限元法的飞机燃油焊接管路可靠性分析[J]. 液压与气动,2023,47(12):124-132.
- [5] 丁继东. 飞机燃油管路焊缝宏观尺度建模的流固耦合振动分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2023.
- [6] 温锐杰. 民机燃油焊接管路单元可靠性研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.
- [7] 吴剑飞,张鹏飞,栾涛. 民用飞机焊接管路建模及高周疲劳分析[J]. 民用飞机设计与研究,2021(2):84-88.
- [8] 李志强,于洋,刘艳,等. 管路焊接结构的随机振动疲劳损伤分析[J]. 航天器环境工程,2022,39(2):125-132.
- [9] 张亚琪,廖日东. 液体火箭发动机用小直径管路焊接疲劳分析方法研究[J]. 推进技术,2021,42(7):1628-1635.
- [10] FICQUETX, SERASLI K, KINGSTON E J. Residual stress measurement, finite element mapping and flaw simulation for a girth welded pipe [C]. International Conference on Ocean. [S.l. :s. n.], 2015.
- [11] WANG Z R, ZHU L J, HOU H S, et al. Research on classification and recognition of industrial stainless steel welded pipe defects based on convolution neural network [C]// Journal of Physics: Conference Series. 2450 012087. International Conference on Electrical Mechanical and Computer Engineering. [S.l.]:Journal of Physics, 2022.
- [12] 刘德刚,王澍,朱德轩. 民用飞机燃油系统管路设计研究[J]. 装备制造技术,2014(8):223-225.
- [13] 顾涌芬. 飞机总体设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.

[14] 修忠信. 民用飞机系统安全性设计与评估技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013.

作者简介

叶柯华 男,博士,工程师。主要研究方向:民用飞机燃油系统设计。E-mail:yekehua@comac.cc

马鹏宇 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:民用飞机燃

油系统设计。E-mail:mapengyu1@comac.cc

李南安 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机燃油系统设计。E-mail:linanan@comac.cc

李朋杰 男,硕士。主要研究方向:飞机燃油系统管路性能分析。E-mail:1348287984@qq.com

聂才力 男,硕士。主要研究方向:飞机燃油系统管路性能分析。E-mail:2634830638@qq.com

Research on the welding property of pipelines for the aircraft fuel system

YE Kehua^{1*} MA Pengyu¹ LI Nan'an¹ LI Pengjie² NIE Caili²

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China

2. Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Welding is an important processing method for aircraft fuel system pipelines. In order to study the welding property of fuel system pipelines, the paper uses the metallographic detection and static stretching to analyze to weld joints' distribution and mechanical property for pipelines with two typical welding form, butt welding and intersecting welding. The weld quality grade and heat treatment method of pipelines are also taken into consideration. The main results show that: the 6061-T6 butt welding with the low quality grade has the wider heat-affected zone; the quality grade and heat treatment method show the different influence for the each zone of intersecting weld; the property of weld joint is unlike the base material zone, the tensile strength and yield strength of heat-affected zones decrease most significantly.

Keywords: aircraft; fuel system; welding pipeline; metallographic detection; static stretching; heat-affected zone

* Corresponding author. E-mail: yekehua@comac.cc