



铝合金薄壁壳体焊接件缺陷分析与控制

王燕

【摘要】 本文针对典型的铝合金薄壁壳体焊接件进行失效分析，从焊接结构完整性与材料焊接性两方面分析该类焊接件缺陷形成原因，并通过改进焊接结构设计、优化焊接参数，有效控制焊接缺陷的产生，提高了产品可靠性。

关键词： 铝合金；焊接；焊接缺陷

1. 概述

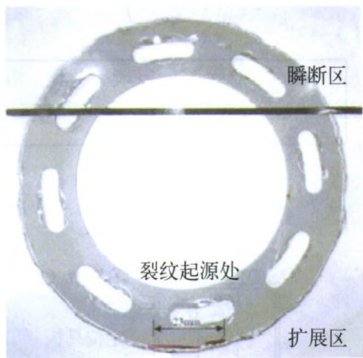
铝合金薄壁壳体焊接件是飞机安装支座、支架、油箱等产品常采用的焊接结构型式。飞机上焊接结构件承受着包括大气紊流、机动、振动、过载与应力腐蚀等多因素形成的载荷，其载荷值高，并具有循环载荷特点；而薄壁壳体焊接结构残余变形与应力较大，且铝合金材料焊缝又易产生气孔、夹杂及未焊透等缺陷，因此在该类产品焊接结构设计方面，需充分考虑金属焊接性、焊接结构内部应力分布状态与缺陷形态对结构完整性的影响。为此在产品制造工艺方面，要严格控制工艺过程、选择合理的工艺参数控制焊缝缺陷的产生，并结合有效的无损检测方法，保证交付产品合格。

2. 典型件失效分析

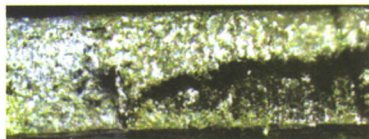
在焊接生产过程中产生的缺陷，可能最终导致焊件功能失

效。图1为飞机上安装支座在下端盖焊缝位置断裂失效照片。该安装支座选用了典型的圆筒形薄壁壳体焊接件结构，由三部分组成：上、下端盖各为一圆环形板材，中间是钣金对接焊成的圆筒，圆筒与上、下两部分通过外角接形式焊接连接，如图2a

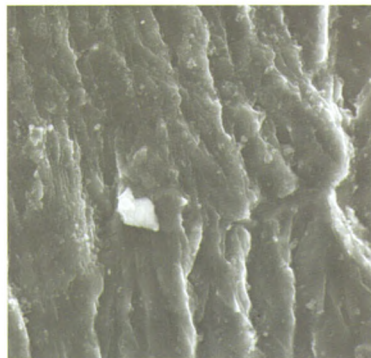
所示。该焊件通过下端盖的螺母固定在安装平面，上端盖的螺栓连接支撑件，起到安装支座的功能。焊件的材料为厚度2.0mm的5A06防锈铝，采用手工钨极氩弧焊方法焊接。对失效件进行断口分析，通过目视观察断口形貌，如图1a所示的上部约占周长1/3区



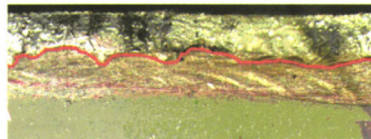
(a) 残余下端盖断口



(c) 裂纹扩展区SEM



(b) 裂纹扩展区低倍金相组织



(d) 未焊透缺陷低倍金相组织

图1 安装支座断口分析

域变形严重,为瞬断区域;下部2/3区域为裂纹扩展区域,采用低倍金相观察裂纹扩展区域,发现典型裂纹源宏观形貌:断口较为平坦,并可观察到断裂之后的黑色铝合金磨损产物,如图1b所示。进一步通过SEM观察,可见致密的疲劳条带(见图1c),因此推断该断口为疲劳断口。

针对裂纹源区检测焊缝质量发现:裂纹源区23mm范围内(约占焊缝全长3%)存在未焊透缺陷(见图1d),焊缝熔透区宽度为1.2~1.4mm,熔透深度为母材厚度60%~70%,未发现其他内部缺陷。未焊透不仅严重影响焊接接头强度,而且它是最容易应力集中的地方,且该安装支座在飞行中同时承受着气动载荷和振动载荷,焊缝处承受气动载荷产生的弯矩、剪力和拉力。据此分析得到该安装支座断裂失效原因为:下端盖与筒体外角接焊缝的未焊透缺陷造成焊接结构应力集中,在交变载荷作用下产生疲劳裂纹,其后在交变载荷作用下逐渐扩展,当剩余部分强度不足时,最终导致安装支座断裂。

3. 焊接结构设计优化

图2a所示的安装支座的仅需将三个部分经简单钣金工艺成形的薄板材焊接而成,这种角接型式的焊接结构虽然降低了工艺难度和制造成本(不采用整件棒料或厚板料机加,大大节省了材料费用,也不采用冲压结构件组装,制造过程中无冲压工序,因此不需设计特殊工装),但角接接头相比对接接头传力线受干扰大,在角焊缝部位产生应力集中系数大,角焊缝承受更为复杂的

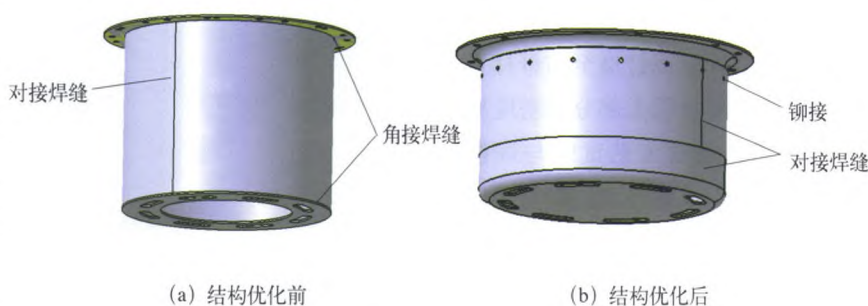


图2 典型圆筒形薄壁壳体焊接件

应力(有拉应力、压应力、剪切应力、弯曲应力和复合应力);并且与对接接头相比,其焊缝易产生未焊透、气孔、夹渣等缺陷,图3是在科研生产试验中,通过低倍金相检查发现的铝合金角焊缝缺陷。

另外,角焊缝的质量可检性差,目视检查不易发现壳体内部的焊缝外观缺陷,即使增加X射线检测,也会因角接焊缝在拐角处X射线成像时存在虚影,也难以识别角接焊缝的内、外部缺陷。因此,在特定的承载环境下,为避免角接焊缝产生的应力集中造成疲劳裂纹,将安装支座的组成零件连接形式优化更改,如图2b所示。

具体优化方案如下:

(1)改进后的上端盖与中部圆筒的连接采用16颗 $\phi 4\text{mm}$ 铆钉铆接方式,与改进前的内角接焊接形式相比,消除了焊接缺陷等不利因素对连接性能的影响。

(2)改进后的中部圆筒与下端盖连接采用了对接焊接方式,与改进前外角接焊接形式相比,焊接工艺操作性得到较大提高,并且易于进行目视检查及X射线检测发现焊接缺陷,进一步保证焊接质量,确保装机产品合格。

对安装支座结构设计优化后的焊缝进行强度分析计算得到:

在气动载荷、振动载荷作用下,安装支座焊缝处承载的强度远低于其材料安全疲劳极限,满足疲劳强度要求。

4. 焊接参数优化

将角焊的结构设计优化成对接焊后,在生产中可有效控制焊件的未焊透等外观缺陷产生,但经X射线检测常发现底片常存在形状不规则的单个亮点、单个或链状暗点,导致产品不合格。底片中的暗点为典型的单个气孔或链状气孔缺陷,而凭经验初步判断亮点为夹钨缺陷,但经工艺试验严格控制钨极污染焊缝的情况,仍出现亮点缺陷,因此,排除夹钨缺陷的可能。

进一步采用金相及SEM检测分析亮点缺陷的化学成分为 Al_2O_3 , Al_2O_3 的密度约为铝合金材料的4倍,经分析得知底片中亮点为高密度非金属夹渣缺陷。控制气孔、夹渣缺陷措施:①需要保证母材、焊丝、夹具焊前清理干净。②存储周转时避免二次污染,在要求的存储时间内完成焊接。③焊接电流与焊接速度适中。因此,在工艺试验与生产中,除按HB/Z119要求保证焊接环境温湿度,焊前清洗焊丝与零件外,严格要求焊前采用刮刀清理对接接头的端部。另外,由于高密度夹渣在焊缝金属凝固过

程，一般沉于焊缝底部，所以要将焊缝背面余高打磨至与母材平齐，这样可排除大部分高密度夹渣缺陷。通过工艺试验与焊接生产验证，采取焊前控制与焊后排除的方法，基本可避免夹渣缺陷。但是，焊缝仍常存在超出标准允许范围的链状气孔缺陷。为有效控制焊缝气孔缺陷的产生，通过工艺试验优化工艺参数，试验件材料牌号：5A06，试验件规格：300mm×100mm×2mm，焊丝：5A06， $\phi 2.0\text{ mm}$ ，ER5356， $\phi 1.6\text{ mm}$ ，具体试验参数如附表所示。

试验结果：电流为65A、60A、55A、95A经X射线检测，未发现链状气孔及其他内部缺陷；但焊接电流为60A、55A时，因电流过小，焊丝与母材熔化困难，影响焊缝成形。焊接电流值为95A时，焊接电流过大，焊缝鱼鳞纹不明显，试件后段焊缝出现焊漏缺陷。当气流量为 $15\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ，试验X射线检测未发现链状气孔及其他内部缺陷，但气流量过大影响焊缝成形。分别采用国内牌号5A06与国外牌号光亮ER5356焊丝的试样X射线检测结果一致，焊丝焊前清理干净，对气孔缺陷的影响不大。试验结果表明：①通过减小焊接热输入，延缓熔池凝固时间，有利于气孔逸出焊缝表面，电流为65A时，试件焊缝按HB/Z119检测合格。②采取增大热输入，缩短焊接时间，控制冶金物理化学反应产生气体的方法，检测未发现气孔缺陷，但焊缝存在焊漏缺陷，外观检测不合格。③增大气体保护流量，排除空气中氢的方法同

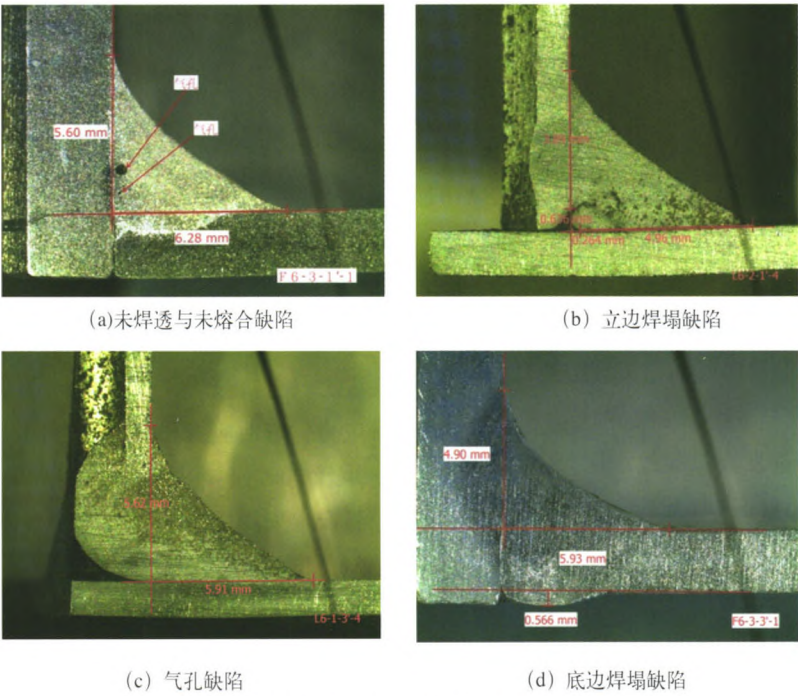


图3 角接试验件宏观金相检测照片

5A06— $\delta 2\text{ mm}$ 对接焊试验参数

焊接电流/A	电弧电压/V	气体流量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	焊接速度/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$
55	10~13	8	12
65	10~13	8	15
75	10~13	8	18
85	10~13	8	25
95	10~13	8	30
75	10~13	12	18
75	10~13	15	18
60	10~13	15	12
80	10~13	15	18

样有效，但会影响焊缝成形，试样外观检测不合格。因此，在铝合金薄壁壳体焊件焊接生产中推荐选用小焊接热输入方法控制气孔缺陷的产生。

5. 结语

(1) 5A06材料薄壁壳体安装支座采用角接焊接结构，易产生未焊透、气孔等缺陷，在承受动载荷情况下，因焊缝缺陷造成的应力集中，会导致安装支座疲劳失效。

(2) 将安装支座的焊接接头型式由角接更改为对接接头，

可有效避免未焊透等外观缺陷产生，且焊缝可检性提高，经强度分析其疲劳强度合格。

(3) 在铝合金薄壁壳体焊件生产中，必须严格控制焊接环境与焊前清理过程。采取刮削清理接头端部、去除焊缝余高的方法可避免夹渣缺陷的产生。通过减小热输入的方法有效控制5A06材料焊缝气孔缺陷，焊接厚度为2.0mm的5A06材料，推荐电流值为65A。

作者简介：王燕，中航工业昌河飞机工业（集团）有限责任公司。

MW 20170504