

钛合金超塑成形壁板化铣工艺研究

张雪锋¹ 王伟龙² 解二伟¹ 殷世坤¹ 冷思特¹

1. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 辽宁沈阳 110034

2. 空军装备部驻沈阳地区第一军事代表室 辽宁沈阳 110034

摘要: 钛合金超塑成形/扩散连接(SPF/DB)技术将复杂薄壁零件整体化,与钛合金化学铣切技术的结合应用,在降低零件重量、提高蒙皮结构设计方面具有重要意义。针对钛合金超塑成形壁板的化铣样板设计、局部化铣区域保护方法、化学铣切等工艺技术进行研究,优化总结出钛合金超塑成形/扩散连接件化铣的过程控制点。

关键词: 钛合金;超塑成形;化学铣切;保护方法

Study on milling technology of titanium alloy superplastic forming panel

Xuefeng Zhang¹, Weilong Wang², Erwei Xie¹, Shikun Yin¹, Site Leng¹

1. Aviation Industry Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd. Shenyang110034, China

2. The First Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Shenyang, Shenyang 110034, China

Abstract: Titanium alloy superplastic forming/diffusion joining (SPF/DB) technology integrated with complex thin-walled parts, combined with titanium alloy chemical milling technology, has an important significance in reducing the weight of parts and improving the design of skin structure. The control points of the milling process of titanium alloy superplastic forming/diffusion connectors were optimized by studying the milling pattern design, local milling area protection method, and chemical milling technology of the titanium alloy superplastic forming panel.

Keywords: titanium alloy, superplastic forming, chemical milling, protection method

前言:

随着整体化设计结构的要求,超塑成形/扩散连接(SPF/DB)技术作为航空、航天工业的一种重要的制造技术被广泛应用,其轻量化整体结构使传统飞行器结构件的制造模式得到改变,将复杂薄壁零件整体化,在降低飞行器结构重量、提高结构完整性和承载效率等方面具有无法替代的技术优势^[1]。

目前,钛及钛合金的加工方法主要为机械加工,与传统的金属材料相比,钛及钛合金的机械加工性能较差,如导热系数低导致磨削温度高,磨削比很低,弹性模量低,化学活化性强,表面质量不易保证,容易出现零件变形、应力集中,无法保证尺寸要求等,机械加工性能较差是长期以来困扰钛合金加工的主要问题之一^[2-4]。

化学铣切(以下简称化铣)是一种腐蚀加工方法,它依靠化学溶液腐蚀溶解金属表面实现加工目的,为飞

机及船舶用钛合金结构和零件的加工及维修提供了一种有效的方法^[5-9]。

超塑成形件形状复杂,多为内部中空且有筋包的整体性结构,通常与化铣技术相结合,以满足重量及特殊功能的需求。

一、超塑成形壁板化铣加工过程设计及分析

1.1 超塑成形壁板分析

超塑成形壁板由内、外两张蒙皮经超塑成形/扩散连接而成,为满足零件加工及减重目的,多采用化铣的方式进行。以某后机身下壁板为例,零件由内蒙皮(2.0厚)和外蒙皮(1.5厚)超塑成形/扩散连接而成,零件外形尺寸为1400mm×1700mm,特殊功能区化铣深度(0.2±0.05)mm,内表面有三个不同厚度(1.6,1.8,2.0)的化铣要求,化铣次数多,零件型面复杂,且不同公差要求的化铣区域,没有成熟经验可借鉴。通过对超塑成

形零件的的化铣工艺展开研究, 优化总结出钛合金超塑成形零件化铣的过程控制点, 满足生产需要。图1为后机身下壁板示意图。

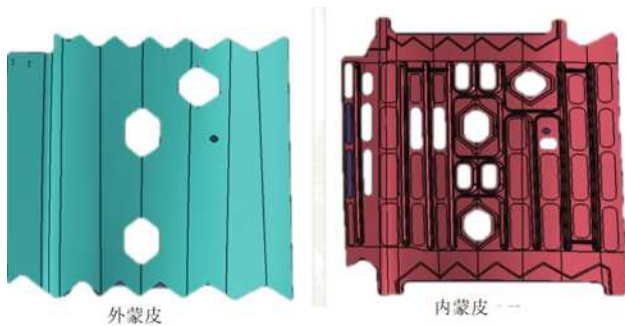


图1 钛合金壁板结构示意图

二、超塑成形壁板的化铣工艺设计

2.1 超塑成形零件一般由两个子零件组成, 加工流程为:

内、外蒙皮分别成形→内、外蒙皮化铣(预处理、涂保护层、刻型、化铣)→超塑成形/扩散连接→预处理→涂保护层→刻型→化铣→铣切外形→成品检验。

2.2 化铣腐蚀顺序的工艺设计

超塑成形零件一般由两个子零件组成, 在进行化铣腐蚀顺序设计时, 需结合零件超塑成形的工艺的加工过程及最终要求的各区域的化铣厚度, 在进行腐蚀顺序的工艺设计时, 需考虑以下内容:

(1) 超塑成形前需要预留气道。气道形状为长(100mm-150mm)×宽(4mm-6mm)的长方形, 深度为0.35mm。气道由化铣方式加工形成。

(2) 化铣的腐蚀顺序需结合零件的成形方式及数模要求, 可适当进行调整, 以最终交付时符合数模厚度视为合格交付。表1为某零件化铣腐蚀顺序调整的结果。

表1 某超塑成形零件化铣腐蚀顺序调整

序号	名称	数模要求化铣区	协调后的化铣区	化铣次数	备注
1	内蒙皮	0.1, 0.2, 0.5, 1.2	1.2, 外表面气道0.35	2	
2	外蒙皮	深度0.2	内表面气道0.35	1	
3	组件蒙皮	无	外表面深度0.2, 内表面1.6, 1.8, 2.0	3	

2.3 气道区域化铣厚度的测量方法

气道化铣区域的腐蚀深度要求为 $0.35 \pm 0.05\text{mm}$, 宽度为4mm-6mm, 而生产中使用的超声波测厚仪的探头直径为8mm, 探头无法直接进行化铣区域厚度的测量, 需要有辅助对比测量方法, 以参比确定气道的腐蚀深度。

2.4 化铣样板及定位的设计

为了准确地限定化铣部位, 在零件化铣前必须进行刻型^[10]。结合超塑成形零件的加工过程, 对于化铣样板及定位方式的设计尤为重要。

首先是超塑成形前气道化铣样板的设计。超塑成形前蒙皮为单一曲率的成形件, 化铣样板一般采用玻璃钢立体化铣样板。立体化铣样板是一种具有精密曲面外形的划线工装, 具有长期反复使用的效果^[11]。化铣刻型样板与零件制造工装均采用同一制造数据集, 减少了零件生产中型面不贴合、定位孔不协调等问题产生。

其次是超塑成形后化铣样板的设计。超塑成形后的壁板组件的化铣区域位于筋包的凹陷处, 整体的玻璃钢样板加工比较困难, 且对零件的成形及定位带来极大的挑战, 因此, 一般结合化铣区域的形状特点, 化铣样板采用局部展开的镀锌板或钢板, 以规则边缘设计定位边, 边缘与凸起的筋包切点位置一致, 四边同时定位^[12]。局部化铣样板示意图见图2。

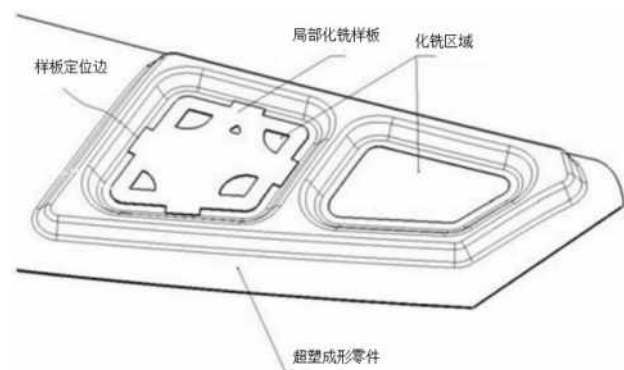


图2 局部样板工作示意图

三、试验过程及结果分析

3.1 气道化铣深度测量试验

取两种材料浸胶完成的试片各三片, 在试片上模拟气道化铣(B区域), 并另选一区域作为辅助测量区域(A区域)进行化铣(如图3所示), 以便测量铣切深度。在刻型完成后, 测量壁板厚度, 并进行化铣, 化铣深度 $0.35 \pm 0.05\text{mm}$, 化铣完成后分别在气B区域所对应背面位置和A区域各选取3个不同位置的点测量剩余壁厚。记录不同位置的剩余壁厚(见表2)。



图3 化铣试件

表2 TC2材料试验记录表

试片编号	TC2-1#			TC2-2#			TC2-3#		
	2.14			2.13			2.17		
原壁厚	2.14			2.13			2.17		
测量位置	A区域	B区域	厚度差(B-A)	A区域	B区域	厚度差(B-A)	A区域	B区域	厚度差(B-A)
1	1.786	1.799	0.013	1.797	1.811	0.014	1.822	1.841	0.019
2	1.792	1.815	0.023	1.800	1.819	0.019	1.829	1.846	0.017
3	1.811	1.818	0.007	1.815	1.826	0.011	1.836	1.850	0.014
平均值	1.816	1.822	0.006	1.817	1.829	0.012	1.838	1.852	0.014

从表2中可以看出,通过对两种不同钛合金材料化铣后A区域(测量区域)与B区域(气道)背面剩余壁厚的测量,实际厚度值相差在0.02mm的范围内,因此在化铣过程中,可以通过辅助区域厚度的测量以达到控制气道区域化铣厚度的目的。

3.2 局部化铣区域保护试验

3.2.1 铅胶带保护试验

取3片TC2材料已经化铣完气道的试片,对气道及测量区域进行局部保护试验,保护方式分为3M421铅胶带、3M421铅胶带+DOW SIL 732#修补胶两种保护方式,结合零件的腐蚀深度,考察不同保护方式的试验效果。具体结果见表3。

表3 不同保护方式化铣后试验结果

序号	腐蚀深度 (mm)	保护方式	
		3M 421	3M421+DOW SIL 732胶
1	0.3	完好	完好
2	0.4	完好	完好
3	0.5	保护区域完好,胶带 去除后有残余铅粉	完好
4	0.8	局部边缘有掀起	完好
5	1.0	搭接区域有渗液现象	完好
6	2.0	失去保护效果	完好

从表3的试验结果可以得出:当铅胶带的铣切深度小于0.5mm时,气道区域能起到很好的保护效果,但当被保护区域增大,铅胶带需要搭接进行保护时,铅胶带搭接处出现了渗液现象,保护效果不佳,需慎重选择;采用铅胶带+DOW SIL 732#修补胶保护,当铣切深度为1.0、2.0mm时,均具有很好的保护效果,能完全保证保护区域不被溶液侵蚀。

3.3 化铣零件的加工验证

3.3.1 气道化铣厚度测量

根据试验结果,内外蒙皮留出余量。在化铣气道时,在零件余量处,另选一区域作为辅助测量区,与气道区

域同步化铣,以此来判断气道铣切深度。在最终化铣后去除保护膜,气道区域的厚度满足公差要求。

3.3.2 下壁板组件的化铣腐蚀顺序

(1) 外表面深度0.2区及内表面1.6区,腐蚀深度0.2。

在蒙皮组件化铣中,按照数模要求进行外表面深度0.2区及内表面1.6区刻型(图10),去除待化铣区保护膜。先去除外表面深度0.2区化铣保护膜,待0.2区化铣符合深度要求后,采用铅胶带+DOW SIL 732#修补胶进行保护,对外表就背面与正面铣切要求剩余壁厚为1.6mm的化铣区域的胶膜,内外表面同时进行化铣。

(2) 保护外表面深度0.2区,去除1.8区化铣保护膜,腐蚀深度0.2。

当零件背面化铣区深度达到要求时,采用铅胶带+DOW SIL 732修补胶保护后继续进行后续的腐蚀,后续总腐蚀深度

(3) 去除2.0区的胶膜,铣切深度0.7mm。

去除2.0区的胶膜,继续化铣至满足零件加工要求。通过试验及零件的化铣加工验证,零组件已经顺利保质保量地完成化铣生产,顺利交付到下一道工序。

四、结论

结合试验过程及零件化铣的加工验证,对于钛合金超塑成形零件化铣总结如下:

4.1 超塑成形零件局部化铣样板的应用。

采用镀锌板进行局部化铣样板的加工,化铣刻型时采用扩散边界定位,保证了化铣零件的生产。

4.2 采用铅胶带+DOW SIL 732局部保护方法。

因工艺需要,当已化铣区域需要进行保护时,当后续铣切深度较大时,单独的铅胶带无法满足腐蚀需要,采用铅胶带+DOW SIL 732#修补胶进行钛化铣区域的保护,在后续腐蚀最大深度为2.0mm时,能完全保证保护区域不被槽液侵蚀,具有良好的保护效果,可以保证已化铣区域的加工质量,此方法为局部化铣区域的保护提

供了技术支持。

4.3 气道区域的化铣加工及厚度测量方式的确定。

对于狭长气道区域由于测厚仪探头无法直接测量,通过增加辅助测量区域的方式进行,保证了气道区域的化铣厚度可控,满足了设计要求。

4.4 蒙皮组件化铣时加工顺序优化。

结合化铣的腐蚀深度及化铣区域的特征,将外表面深度0.2区的腐蚀顺序进行了调整,由最后一次的腐蚀调整到与内表面1.6区同时进行腐蚀,化铣的次数由传统的4次改为3次,提高了化铣的加工效率,保证了紧公差区的精度要求。

参考文献:

[1]段奇锐.盒形件超塑成形材料流动规律研究[硕士学位论文].南京航空航天大学,2012年.

[2]杨海燕,陆联弟,王家颖,等.HX-01A化学铣切保护胶的应用[J].化学工程师,1998(4):48-49,18.

[3]GRAH R T. Chemical milling of aluminum alloys: Choosing the latest technology to achieve a competitive advantage[J]. Metal Finishing, 2003, 101(3):8-12.

[4]万斌,孟金州,李文戈.钛及钛合金化学铣切技术的研究进展[J].腐蚀与防护,2022年1月,第1期.

[5]杜楠.精密化学铣切加工技术[J].军民两用技术与产品,2018(21):49.

[6]王毅.基于化铣剥层和挠度变化的钛合金铣削加工表面内应力的测量[J].组合机床与自动化加工技术.

[7]孟龙晖,何宁,李亮等.TC4零件铣削加工残余应力自平衡前值的测量及其有限元分析[J].稀有金属材料工程,2014(8):1991-1996.

[8]舒平生,左敦稳.TB4试件铣削加工表面内应力的测量及零件相应变形方法分析[J].制造技术与机床,2015(8):124-128.

[9]赵永岗,张春刚,王辉,孙杰,孙慧艳.化学铣切在钛合金加工中的研究及应用[J].表面技术,2009年12月,第6期.

[10]任萍,杨秀娟,李霞,张大威,李广辉.网格结构加力筒体制造技术[J].航空制造技术,2015年10月,第20期.

[11]甘忠,王亮,谭海兵,黄官平.大型立体化铣样板设计与制造方法探索[J].航空制造技术,2013年9月,第17期.

[12]韩颖杰.超塑成形/扩散连接零件连接方法,CN111168171B,2021年9月.