

TC4 钛合金薄板的蜂窝状喷丸研究

孙雨桐 徐刚 王世浩

(中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089)

摘要: 对 TC4 钛合金材料薄板试件进行蜂窝状喷丸试验, 测量试件在不同喷丸条件下得到表面粗糙度、弹坑直径和变形量数值。结果显示对于弹丸介质、陶瓷丸介质、硬铸钢丸介质等出现不同的数值变化。手工操作超声波撞针无法形成稳定均匀的弹坑群, 大直径撞针喷丸后弹坑更稳定, 表面粗糙度更小, 试件变形量更小。

关键词: TC4 钛合金; 蜂窝状喷丸; 粗糙度; 弹坑直径; 弧高值

0 引言

TC4 钛合金中具有优秀的比强度、耐腐蚀等性能, 在航空航天领域中, 常用于制造叶轮、叶片等重要零部件。但即便是比强度最高的金属, 发动机转速一旦超过设计转速, 也可能会导致叶片强度不足, 产生疲劳断裂。因

此, 一些公司将钛合金叶片设计成中空的夹层结构, 把两片钛合金薄板通过超塑成形/扩散连接 (Superplastic forming/diffusion bonding, 简称 SPF/DB) 工艺做成中间有蜂窝状结构的叶片, 在降低质量的同时提升了叶片强度。但是使用 SPF 工艺加工的零件, 外观上普遍存在表面沟槽、接差、凹坑和气道塌陷等缺陷, 内部容易产生焊合率低和预置板定位偏移等问题。同时 SPF 工艺需要预制模具, 成本较高。而喷丸是一种无模冷工艺, 成本低廉, 喷丸后凹坑均匀无接差。本文通过不同喷丸介质对 TC4 薄板的影响进行研究, 分析喷丸后 TC4 钛合金薄板的变形和粗糙度变化规律, 探究以喷丸工艺代替 SPF 工艺实现蜂窝状叶片加工的可能性。

1 TC4 钛合金薄板试验

1.1 试件制备

采用 Ti-6Al-4V 材料, 热处理状态与通常叶片一致。根据钛合金叶片常见厚度, 试件加工为 1mm 薄板 (图 1)。

1.2 喷丸介质选择

试验设备采用铸钢丸喷丸设备、陶瓷丸喷丸设备、超声波喷丸设备, 喷丸强化介质见图 2, 介质参数见表 1。

1.3 实验设计

设置不同喷丸介质、喷丸工艺参数组, 以 TC4 材

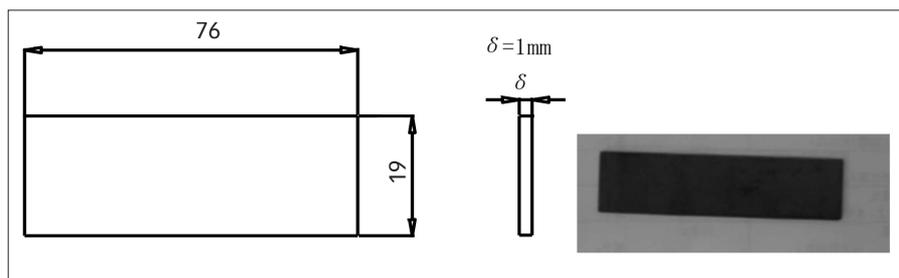


图 1 TC4 钛合金薄板试件

料表面覆盖率 60% ~ 65% 为控制目标, 喷丸角度均为 90°, 设计不同介质喷丸参数, 各介质喷丸参数见表 2。

1.4 工艺试验流程

设置不同喷丸介质、喷丸工艺参数组, 以 TC4 材料表面覆盖率 60% ~ 65% 为首次评判条件, 再以相同参数下弹坑直径最大为辅助选择条件, 测量筛选出的试件弯曲变形度及表面粗糙度。具体喷丸工艺试验流程如图 3 所示。

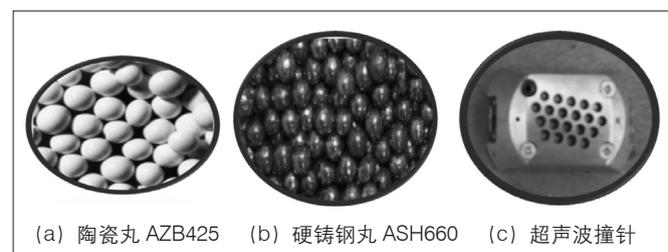


图 2 喷丸强化介质

表 1 喷丸强化介质参数

喷丸介质	材料	硬度	介质直径/mm	设备选型
AZB425	陶瓷丸	HRC58 ~ 63	0.4	MP4000
ASH660	硬铸钢丸	HRC55 ~ 62	1.7	MPR10000
超声波撞针	高强度钢	≥ HRC55	1.2	Stress Voyager
超声波撞针	高强度钢	≥ HRC55	2.0	Stress Voyager

表2 喷丸介质与对应的喷丸参数

喷丸参数		喷丸介质					
		陶瓷丸	硬铸钢丸	超声波撞针			
		AZB425	ASH660	1.2mm	2.0mm	3.0mm	4.0mm
参数 1	压力 / 振幅	0.2MPa	0.20MPa	20%	40%	40%	40%
	流量	2kg/min	10kg/min	—	—	—	—
	速度	3000mm/min	150mm/min	—	—	—	—
	距离	800mm	500mm	—	—	—	—
参数 2	压力 / 振幅	0.4MPa	0.40MPa	40%	80%	80%	80%
	流量	2kg/min	10kg/min	—	—	—	—
	速度	6000mm/min	300mm/min	—	—	—	—
	距离	800mm	500mm	—	—	—	—

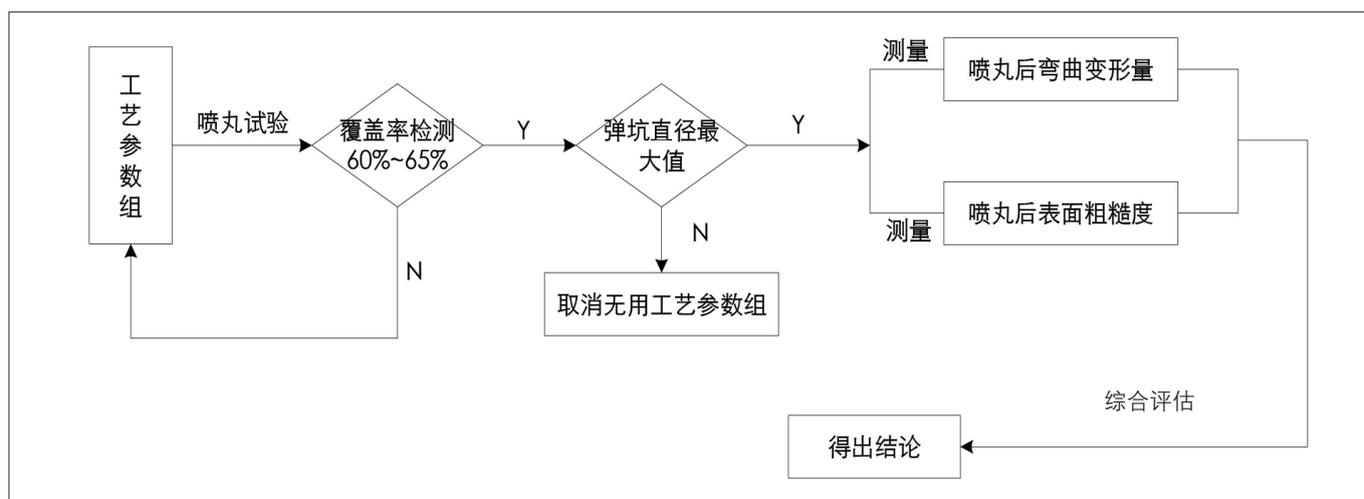


图3 喷丸工艺试验流程图

1.5 数据测量及结果分析

1.5.1 TC4 试件陶瓷丸介质试验数据分析及结论

喷丸压力由 0.2MPa 提升至 0.4MPa 后,有以下参数变化。

- (1) 速度由 3000mm/min 提升至 6000mm/min。
- (2) 喷丸后试件覆盖率变化较小,陶瓷丸介质可以通过调整喷丸压力/速度参数的方式控制覆盖率。
- (3) 弹坑直径由 0.178 ~ 0.182mm 增大至 0.275 ~ 0.294mm,弹坑直径明显变大。由于喷丸速度仅影响覆盖率,因此喷丸压力可作为凹坑直径的主要控制手段。
- (4) 粗糙度无明显变化,均在 Ra1.6 以下。在覆盖率一定的情况下,喷丸参数的改变对粗糙度影响较小。
- (5) 试件弧高值由 0.448 ~ 0.619mm 变为 0.590 ~ 0.612mm,可知通过调整喷丸压力与速度的配比,可有效控制试件的变形量。
- (6) 采用相同参数双面喷丸后,试件弧高值与喷丸前基本一致,双面喷丸可对喷丸导致的试件变形进行修正,也可对未进行喷丸的零件进行保形加工。
- (7) 陶瓷丸为非金属丸介质,喷丸冲击钛合金

材料“火花”效应较小,对钛合金材料表层材料损坏较小。

1.5.2 TC4 试件硬铸钢丸介质试验数据分析及结论

喷丸压力由 0.2MPa 提升至 0.4MPa 后,有以下参数变化。

- (1) 喷丸速度由 3000mm/min 提升至 6000mm/min,喷丸后试件覆盖率变化较小。铸钢丸介质可以通过调整喷丸压力/速度参数的方式控制覆盖率。
- (2) 弹坑直径由 0.498 ~ 0.522mm 增大至 0.648 ~ 0.666mm,弹坑直径明显变大。由于喷丸速度仅影响覆盖率,喷丸压力可作为凹坑直径的主要控制手段。
- (3) 粗糙度由 0.668 ~ 0.859 变为 0.403 ~ 0.944,出现了表面不稳定的现象。通过合力研究,结合陶瓷丸试验结果,采用复合喷丸可有效解决铸钢丸喷丸后粗糙度过大的问题。
- (4) 试件弧高值由 0.585 ~ 0.785mm 变为 0.950 ~ 1.072mm,试件变形量明显增大,根据蜂窝状叶片凹坑大小需求,喷丸可能会导致叶片变形超差。
- (5) 采用相同参数双面喷丸后,试件弧高值变

小,但未恢复至喷丸前状态,双面喷丸可对喷丸导致的试件变形进行一定程度的修正。喷丸过程中保形能力有限。

(6) 硬铸钢丸为金属丸介质,喷丸冲击钛合金时“火花”效应较大,容易导致钛合金材料表层材料易脆化。

1.5.3 TC4 试件撞针介质试验数据分析及结论

对于 DIA 1.2mm 的撞针,振幅由 20% 提升至 40%,粗糙度由 0.278 ~ 0.348 变为 0.351 ~ 0.700,随振幅增大而增加;弧高值由 0.485 ~ 0.653mm 变为 0.48 ~ 1.03mm,随振幅增大而增大。喷丸后弹坑形状不一,难以形成稳定的蜂窝状凹坑。对于 DIA 2.0mm 的撞针,振幅由 40% 提升至 80%,粗糙度由 0.202 ~ 0.224 变为 0.199 ~ 0.210,未随振幅改变;弧高值由 0.158 ~ 0.178mm 变为 0.130 ~ 1.88mm,未随振幅改变,整体试件变形幅度较小。喷丸后弹坑均匀,但存在叠加现象。

2 参数变化规律

通过对 TC 钛合金薄板进行蜂窝状喷丸试验,研究陶瓷丸 AZB425、硬铸钢丸 ASH660、超声波撞针 DIA 1.2mm、DIA 2.0mm 撞针喷丸后弹坑直径、表面粗糙度、弧高值变化规律如下:

- (1) 对于弹丸介质,喷丸压力越大,弹坑直径越大;
- (2) 对于陶瓷丸介质,喷丸压力变化对表面粗糙度影响较小,且能够稳定在 $Ra1.6$ 以下;
- (3) 对于陶瓷丸介质,随压力增大试片变形量增大,双面喷丸可完全校正变形;
- (4) 对于硬铸钢丸介质,喷丸后粗糙度不稳定,整体数值高于 $Ra3.2$;
- (5) 对于硬铸钢丸,随压力增大试件变形量增大,双面喷丸可降低变形程度,无法完全校正变形;
- (6) 超声波撞针在手工操作下,无法形成稳定均匀的弹坑群;

(7) 大直径撞针比小直径撞针喷丸后弹坑更稳定,表面粗糙度更小,试件变形量更小。

3 结语

综上所述,陶瓷丸喷丸表面质量好、弹坑稳定,可以实现无变形加工,但陶瓷丸直径小,喷丸后覆盖率易偏高,弹坑直径上限小,目标凹坑直径超出一定范围则无法加工。硬铸钢丸喷丸表面粗糙度较高,弹坑稳定,无法实现无变形加工,但铸钢丸直径大,喷丸后覆盖率控制容易,弹坑直径上限大,可满足大尺寸凹坑要求。超声波撞针受人工影响明显,喷丸后弹坑不稳定,DIA 2.0mm 喷丸后表面质量好,弹坑上限最大,若能采用数控设备加工,解决弹坑稳定性问题,则最具优势,潜力巨大。

参考文献:

- [1] 刘锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [2] 孙超. TC4 钛合金中空叶片扩散连接—超塑成形技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] 高玉魁, 陆峰, 殷源发, 等. 喷丸强化技术及其工程应用 [J]. 材料工程, 2002(10): 315-316.
- [4] 朱晨, 姜传海. 17Cr2Ni2Mo 钢的表面复合喷丸强化 [J]. 机械工程材料, 2011, 35(9): 98-99+103.
- [5] 王治国, 张炜, 徐刚. TC21 钛合金通孔复合喷丸强化研究 [J]. 科技部西南信息, 2021(5): 84-85.

作者简介: 孙雨桐(1991.10-),男,汉族,陕西西安人,本科,工程师,研究方向:金属成形、金属材料性能;徐刚(1981.11-),男,汉族,陕西渭南人,本科,高级工程师,研究方向:金属成形、金属材料性能;王世浩(1997.12-),男,汉族,陕西渭南人,本科,助理工程师,研究方向:金属成形、金属材料性能。