

# 表面强化对壳体结构残余应力影响规律研究

邓 瑛<sup>1,2,3</sup>, 邵 杰<sup>1,2,3</sup>, 赵大龙<sup>1</sup>, 吴 琼<sup>1</sup>, 盖鹏涛<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024;

3. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024)

**[摘要]** 设计、制造了具有真实零部件几何特征的试件并利用湿喷工艺进行表面强化, 试验件一侧表面受强化, 背侧表面不受强化。应变数据及分析表明, 试验件背侧处于压应力状态, 具有纵向加强筋的壳体背侧压应力低于无加强筋结构, 横向约束及刚性影响加强筋壳体背侧残余应力状态, 降低喷丸强度及增加壳体厚度可以降低背侧残余应力。研究成果对优化表面强化工艺以及壳体结构设计具有重要借鉴意义。

**关键词:** 薄壁结构; 表面强化; 残余应力; 应力场

## Effects of Surface Strength on Residual Stress State of Shell Structure

DENG Ying<sup>1,2,3</sup>, SHAO Jie<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Dalong<sup>1</sup>, WU Qiong<sup>1</sup>, GAI Pengtao<sup>1,2,3</sup>

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Science and Technologies Key Laboratory for Plastic Forming, Beijing 100024, China;

3. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** Shell component like specimens were designed and then produced. One side of surface was shot peening processed by wet blast processed and the back surface was not. Experimental date and analytical results indicated that compressive residual stress exists on the back surface, the amount of residual stress is higher on pure shell specimen than shell structure reinforced by ribs on back surface, tensile stress could be produce by increasing transverse stiffness, residual stress is controlled by parameters of wall thickness and shot peening intensity and it can be decreased by the lower shot peening intensity or increasing the wall thickness. The founding of this research can be helpful in improving shot peening parameter and modifying the topology of components.

**Keywords:** Shell structure; Surface strength; Residual stress; Stress field

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.070

薄壳结构具有重量轻、刚性好等优点, 被航空航天领域广泛采用, 近年来, 残余应力被引入到薄壳零件的成形过程中以便获得外形复杂的结构或提高结构的可靠性、完整性<sup>[1-4]</sup>。

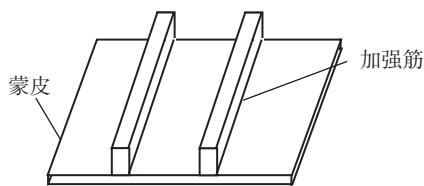
当表面强化后的薄壳结构处于无外力状态时, 内部应力达到静平衡状态, 因此, 在位于结构表层、亚表层压缩应力场下方将产生拉伸应力场<sup>[5-10]</sup>, 但对于典型结构残余应力分布, 特别是背侧表面残余应力状态, 尚未见到相关研究报告。

针对这一现状, 本文采用试验测试的方法开展研究, 通过设计具有真实结构特征的试验件, 开展表面强化试验, 获得工艺参数、结构参数对背侧表面残余应力影响规律, 为优化工艺参数、结构拓扑参数提供可靠依据。

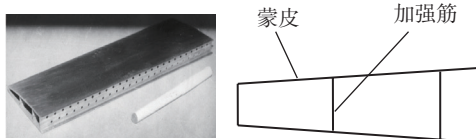
## 1 试验件设计及制备

常见的薄壁结构外形特征如图 1 所示, 图 1(a) 所示为一侧采用加强筋增强的薄壳结构, 常见零件为飞机中的各种壁板等, 另一种零件为信封状结构, 由两层蒙皮和中间的加强筋结构组成, 常见零件有舵翼面、导向器叶片和可调叶片等。

基于图 1 中所示的零部件结构特点, 设计出两种特征试验件, 分别如图 2 和图 3 所示(单位: mm)。图 2 所示为片状试验件, 用于与特征试验件获得的试验数据进行对比, 获得加强筋对背侧应力的影响规律; 图 3 所示为特征试验件(以下称之为“T 形试验件”), 该试验件中的平板结构用于模拟真实结构中的蒙皮, 3 条凸起的加强筋用于模拟真实结构中的加强筋。



(a) 典型薄壳结构形式 1



(b) 典型薄壳结构形式 2

图1 钛合金典型薄壁结构外形特点  
Fig.1 Profile of shell structure

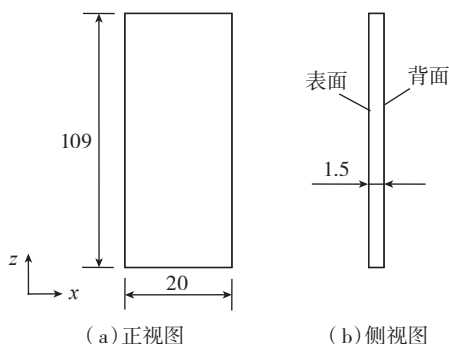


图2 片状试验件外形  
Fig.2 Profile of strip specimen

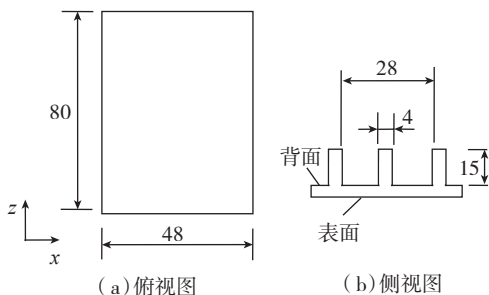


图3 T形试验件外形特点  
Fig.3 Profile of T-like specimen

特征试验件的制备采用慢走丝线切割方法从退火处理后的 TC4 轧制板坯上切取,以便消除板坯制造过程中的残余应力以及避免在试样加工过程中引入加工残余应力,材料性能数据如表 1 所示,片状试验件长、宽、高分别为 109mm、20mm 以及 1.5mm,制备 2 件; T 形试验件有两种结构形式:(1)蒙皮长、宽、高分别为 80mm、48mm、1.5mm;(2)蒙皮长、宽、高分别为 80mm、48mm、3.0mm。两种试件的加强筋尺寸相同,高度为 15mm,宽

度为 4mm,以上两类试验件分别制备 2 件。

## 2 试验测试

采用湿喷工艺强化试验件表面,强化设备如图 4 所示,强化介质为水和陶瓷弹丸的混合物,选用的表面强化参数如表 2 所示,喷丸强度分别为 0.3mmN、0.4mmN 和 0.5mmN,覆盖率均为 200%,强化试验开始前,采用 Almen 试片验证试验参数,强化路径如图 5 所示,两类试验件表面均需要经过 3 次强化才能够实现对表面全部区域的覆盖。

在试验件受强化表面的背面安装应变片,片状试验件应变片安装位置如图 6 所示,位于试验件背侧表面的几何中心,安装数量为 1 片,测量方向与试验件高度方向 ( $z$  方向) 相平行; T 形试验件应变片安装位置如图 7

表1 材料性能数据

弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\mu$	密度 $\rho / (\times 1000\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
115000	0.34	4.44



图4 表面强化设备  
Fig.4 Wet blast equipment

表2 表面强化参数

试验编号	喷丸强度 /mmN	覆盖率 /%
1	0.30	200
2	0.40	200
3	0.50	200

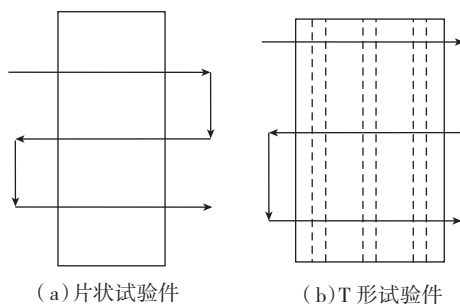


图5 强化路径  
Fig.5 Route of shot peening processes



(a) 受强化表面 (b) 背面

图6 片状试验件应变片安装位置

Fig.6 Strain gauge site on strip specimen

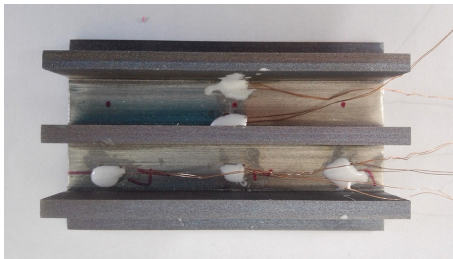


图7 T形试验件应变片安装位置

Fig.7 Strain gauge site on T-like specimen

所示,应变片安装于试验件加强筋之间,共5片,测量方向与试验件高度方向( $z$ 方向)相平行。

将试验件安装在刚性工装上,强化过程中,采用动态应变仪采集应变数据,设置采样率为500Hz,使得分析频率不小于125Hz。

强化过程中片状试验件典型应变-时间曲线如图8所示,从图中可知,试验数据有3次波动,每次波动表示试验件的一个区域受到强化介质的作用,最终应变低于初始值,即对于片状试验件而言,一侧表面强化后,另一侧表面应变为负值。试验表明采用0.4mmN进行表面强化,背侧表面 $z$ 向应变增量为 $-453 \times 10^{-6}$ ,采用0.5mmN进行表面强化,背侧表面 $z$ 向应变增量为 $-740 \times 10^{-6}$ (表4)。

强化过程中T形试验件典型应变-时间曲线如图9所示,试验中有2件应变片失效,从图中可知,在经历了3次波动后,最终应变高于初始值,即对于片状试验件而言,一侧表面强化后,另一侧表面的展向应变为正值。

如表5、表6所示,当T形试验件蒙皮厚度为1.5mm、喷丸强度分别为0.3mmN、0.4mmN时,背侧应变增量平均值分别为 $45 \times 10^{-6}$ 和 $118 \times 10^{-6}$ 。当T形试验件蒙皮

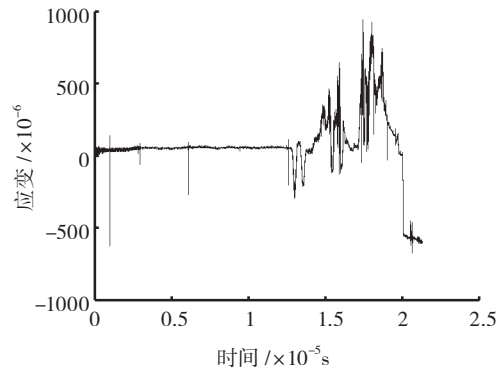


图8 片状试验件应变-时间曲线

Fig.8 Time-strain curve of strip specimen

表4 片状试验件应变测试数据

喷丸强度 / mmN	开始时刻应变 / $\times 10^{-6}$	结束时刻应变 / $\times 10^{-6}$	应变增量 / $\times 10^{-6}$
0.4	63	-390	-453
0.5	500	-240	-740

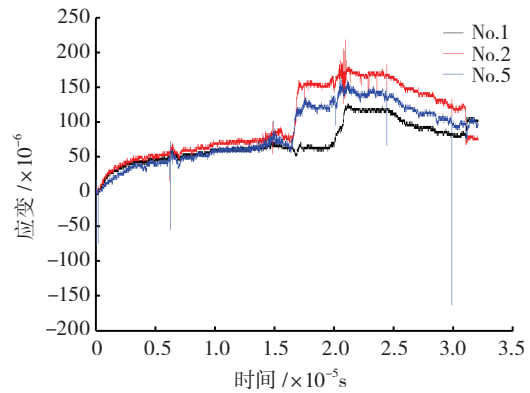


图9 T形试验件应变-时间曲线

Fig.9 Time-strain curve of T-like specimen

表5 壁厚1.5mm T形试验件应变测试数据

喷丸强度 / mmN	开始时刻应变 / $\times 10^{-6}$	结束时刻应变 / $\times 10^{-6}$	应变增量 / $\times 10^{-6}$
0.3	60	105	45
0.4	16	134	118

表6 壁厚3.0mm T形试验件应变测试数据

喷丸强度 / mmN	开始时刻应变 / $\times 10^{-6}$	结束时刻应变 / $\times 10^{-6}$	应变增 / $\times 10^{-6}$
0.3	40	65	25
0.4	5	49	44

厚度为 3.0mm, 喷丸强度 0.3mmN、0.4mmN 时, 背侧应变增量平均值分别为  $25 \times 10^{-6}$  和  $44 \times 10^{-6}$ 。

### 3 试验结果与讨论

根据表 4~5 中的试验数据, 片状试验件、T 形试验件背侧应力状态存在差异, 片状试验件背侧呈现压缩状态, 这与当前的理论研究成果相一致, T 形试验件在与加强筋平行的方向 ( $z$  向) 上的应变分量呈现拉伸状态, 这是由于加强筋增加了试验件长度方向的刚性, 限制了壳体在长度方向上的弯曲变形, 或加强筋的存在使得长度方向上的中性层位置发生变化, 使得测量位置处于中性层受拉伸一侧, 从而造成 T 形试验件内部表面呈现拉伸应变状态。

在此基础上本文引入平面应变假设, 分析两类试验件背侧表面的应力状态, 计算公式为:

$$\sigma_L = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_L + \mu\varepsilon_T)$$

式中,  $E$  为弹性模量,  $\mu$  为泊松比,  $\varepsilon_L$  为  $z$  方向应变,  $\varepsilon_T$  为  $x$  方向应变,  $\sigma_L$  为  $z$  方向应力。

对于片状试验件, 由于材料各向同性,  $x$ 、 $z$  方向状态相同, 因此假设两方向的应变相同, 即  $\varepsilon_L = \varepsilon_T$ ; 对于 T 形试验件, 由于加强筋不影响试验件  $x$  方向刚性, 因此对于加强筋之间区域  $x$  应变, 采用同厚度片状试验件数据近似代替, 根据此假设获得 1.5mm 蒙皮试验件背侧  $z$  向应力, 如表 7 所示。

表7 壁厚1.5mm试验件背侧应力

试验件名称	$z$ 向应力 /MPa
片状试验件	-78.9
T 形试验件	-4.68

从表 7 中可知, 片状背侧  $z$  向应力为 -78.9MPa, 由于加强筋的作用下, 相同壁厚的 T 形试验件展向应力为 -4.68MPa, 相对片状试验件提高了 74.2MPa。根据公式 (1) 及应变测试结果, 展向残余应力水平与试验件横向刚度密切相关, 如果横向刚度 ( $x$  方向) 较大, 将使得  $z$  向应力进一步提高, 有可能为拉伸应力状态。

### 4 结论

开展试验研究, 获得特征试验件表面强化后背侧表面残余应力变化规律, 得出如下结论:

(1) 壁厚为 1.5mm 的 T 形试验件在受到 0.3mmN 的表面强化, 其后背侧表面为压缩应力状态, 但应力水平低, 为 -4.68MPa;

(2) 通过降低喷丸强度、增加壁厚可以调控背侧残

余应力水平。

### 参考文献

- [1] SPITTLE P. Gas turbine technology [J]. Physics Education, 2003, 38(6): 504-511.
- [2] 陈光. 新型发动机的一些新颖结构 [J]. 航空发动机, 2004(1): 3-10.  
CHEN Guang. New type of structure in future aero-engine [J]. Aeroengine, 2004(1): 3-10.
- [3] 尚建勤. 厚度对喷丸成形的影响 [J]. 锻压技术, 1999(3): 38-39.  
SHANG Jianqin. Effects of thickness on peening forming [J]. Forging & Stamping Technology, 1999(3): 38-39.
- [4] 李国祥. 机翼整体壁板喷丸成形技术的发展 [J]. 航空工艺技术, 1990(3): 30-32.  
LI Guoxiang. Development of peen forming technology for wing integral panel [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1990(3): 30-32.
- [5] 邓瑛, 韩秀全, 邵杰, 等. 钛合金三层结构模拟件设计及高周疲劳试验 [J]. 航空制造技术, 2013(16): 157-159.  
DENG Ying, HAN Xiuquan, SHAO Jie, et al. Titanium alloy three layers hollow component-like specimen design and high cycle fatigue test [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16): 157-159.
- [6] JAMES M N, NEWY M, HATTINGH D G, et al. Shot-peening of steam turbine blades: residual stress and their modification by fatigue cycling [J]. Procedia Engineering, 2010, 2: 441-451.
- [7] SOADY K A, MELLOR B G, WEST G D, et al. Evaluating surface deformation and near surface strain hardening resulting from shot peening a tempered martensitic steel and application to low cycle fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 54: 106-117.
- [8] KIM T, LEE H, KIM M, et al. A 3D FE model for evaluation of peening residual stress under angled multi-shot impacts [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(19-20): 3981-3988.
- [9] 王梅, 陆山, 古远兴, 等. 喷丸强化对 TC11 合金模拟叶片高周疲劳寿命影响的试验 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 507-513.  
WANG Mei, LU Shan, GU Yuanxing, et al. Experiment of effect of shot peening strengthening on TC11 alloy simulation blades HCF life [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 507-513.
- [10] 邓瑛, 李志强, 韩秀全, 等. 表面强化钛合金薄壁结构残余应力分布规律研究 [J]. 航空制造技术, 2015(17): 93-95.  
DENG Ying, LI Zhiqiang, HAN Xiuquan, et al. An investigation on residential stress distribution on a shot-peened titanium hollow structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(17): 93-95.

通讯作者: 邓瑛, 博士、高级工程师, 研究方向为轻量化结构设计、疲劳及可靠性, E-mail: yingdeng@buaa.edu.cn。

(责编 大漠)