doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.01.016

喷丸处理对机翼加筋壁板压缩强度的影响*

刘 存,李 健,赵谋周

(中航工业第一飞机设计研究院,西安 710089)

摘 要:现代大型飞机机翼壁板广泛采用喷丸成形和强化工艺,但喷丸处理对加筋壁板静强度性能的影响研究较少, 目前工程上还难以定量评估。通过对壁板失效模式的分析,梳理了喷丸处理影响机翼壁板压缩强度的主要因素,即剖 面压损强度以及压缩模量,规划了典型机翼上壁板喷丸试件和未喷丸试件的压损对比试验,研究了喷丸处理对压损强 度和局部屈曲载荷的影响。试验结果表明:喷丸后壁板的压损强度和局部屈曲载荷均有所降低。根据试验结果提出了 采用基于喷丸处理前后压损应力下降幅度确定的喷丸影响系数 κ₁,以及压缩模量下降幅度确定的喷丸影响系数 κ₂ 修正 JOHNSON-EULER 方程的方法。该方法客观准确地将喷丸处理影响计入到加筋壁板的压缩强度设计中,实现了对喷 丸处理影响的定量评估,工程应用简便易行。

Influences of Shot Peening on Compressive Strength of Wing Stiffened Panel

LIU Cun, LI Jian, ZHAO Mou-zhou (AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089)

Abstract: Shot peening forming and strengthening is widely taken in modern large aircraft wing stiffened panels, however, the influence of shot peening on static-strength properties is studied scarcely, and can not be quantitatively assessed in the engineering presently. The main factors that affect the compressive strength of wing stiffened panels were combed by analyzing failure mode of stiffened panels, including crippling strength and compressive modulus. Crippling comparison test were carried out on shot peened and unpeened specimens of typical stiffened panels. The effects of shot peening on crippling strength and local buckling load were studied. The results show that the crippling strength and local buckling load of shot peened specimens are reduced. Therefore, a new Johnson-Euler formula amendment methodology is developed to consider the shot peening influence coefficient κ_1 based on the fall range of crippling stress and κ_2 based on the fall range of compressive modulus. In this way, the influences of shot peening are included in the stiffened panels compressive strength design objectively and accurately, and the quantitative evaluation of shot peening can be simply and feasibly applied in the engineering.

Keywords: shot peening; stiffened panel; crippling; amendment; influence coefficient

0 引 言

喷丸成形是一种利用高速弹丸流撞击金属 零件的表面,使受喷表面的表层材料产生塑性变 形,从而使零件达到外形曲率要求^[1]的先进制造 技术。该技术已在现代大型飞机金属机翼壁板 制造中得到广泛应用,如空客 A310-A340、波音 707-777、MD80、MD10 和 ARJ21 等机型。同时, 由于喷丸后在零件表面产生残余压应力,从而提

收稿日期: 2015-08-07; 修回日期: 2015-10-29; 基金项目: * 航空科学基金(2012ZB53012)

通讯作者: 刘存(1984-), 男(汉), 工程师, 硕士; 研究方向: 飞行器结构强度设计; Tel: (029) 8683 2310; E-mail: liuc@nuaa. edu. cn

网络出版日期: 2016-01-30 18:02; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg. 20160130.1802.032.html

引文格式:刘存,李健,赵谋周. 喷丸处理对机翼加筋壁板压缩强度的影响[J]. 中国表面工程,2016,29(1):111-117. LIU C, LI J, ZHAO M Z. Influences of shot peening on compressive strength of wing stiffened panel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1):111-117. 高了零件的疲劳性能以及抗应力腐蚀能力,因此,也常常对零件表面进行喷丸强化处理,以提高其疲劳寿命。

目前国内外学者在喷丸处理提高铝合金疲 劳强度方面进行了大量的深入研究。Benedetti 等^[2]采用多轴疲劳准则准确预测了7075-T651 铝合金零件喷丸后的表层裂纹萌生寿命;Honda T^[3]等分析了7075-T7351 SENB喷丸试件的裂 纹扩展现象,结果表明:残余应力延迟了裂纹扩 展速度;李鹏等^[4]提出在合理的喷丸强化参数范 围内,7055-T7751 铝合金疲劳性能显著提高;王 欣等^[5]通过喷丸介质的对比发现:陶瓷丸喷丸后 铝合金的疲劳寿命增益最多;对于同样材料和结 构形式的壁板,喷丸强化比非喷丸强化的疲劳额 定值提高了8.5%~12.5%^[6]。

喷丸处理在提高结构疲劳性能的同时,对屈服强度、延伸率等材料静力学性能也产生不同程度的影响。李国祥^[1] 阐述了喷丸成形对板材力 学性能的影响;曾元松^[7]进行的2024-T351 拉伸 试样喷丸成形及强化工艺试验表明,试件的屈服 强度和延伸率均有不同程度的降低。这些研究 揭示了喷丸对部分力学性能的影响,但仅局限在 材料级或元件级,未结合结构实际的工作状态, 对工程设计中如何考虑喷丸处理的影响价值 有限。

机翼上翼面壁板以承受机翼弯曲引起的压 缩载荷为主,对屈服强度等材料性能变化较为敏 感,且通常采用喷丸成形及强化工艺。但喷丸处 理对其承载能力的影响如何评估尚未有公开研 究文献。因此,在机翼壁板强度分析中如何量化 喷丸处理的影响,是一个值得深入研究的问题。 从大量的设计及工程经验来看,机翼上壁板的主 要失效形式是柱强度破坏,破坏应力通常采用半 经验公式 JOHNSON-EULER 方程表达,其中, 喷丸处理可能产生影响的主要是喷丸前后剖面 压损强度的变化以及压缩模量的变化。

为此,文中通过喷丸和未喷丸的加筋壁板压 损对比试验,分析JOHNSON-EULER方程中压 损应力和压缩模量这两个主要影响因素的差异, 进而引入喷丸影响系数,对JOHNSON-EULER 方程进行适当修正,从而将喷丸影响量化计入加 筋壁板的压缩强度设计,以便于工程应用。

1 试验件设计

1.1 试验件结构

根据研究目标,设计两类材料、结构形式和 尺寸完全相同的喷丸与未喷丸对比试验件。每 类分为蒙皮厚度 3.5 mm 和 7 mm 两种,各 5 件。 其中,未喷丸试件蒙皮厚度 3.5 mm 和 7 mm 编 号分别为 No.1 和 No.2,喷丸试件则为 No.3 和 No.4。试验件剖面如图 1 所示。



图 1 试验件的剖面示意图

Fig. 1 Cross section schematic diagram of the specimen

具体剖面参数见表 1。试验件宽度 150 mm, 长度 100 mm。以保证试验件属于短柱范围。其 中,*t* 为长桁腹板厚度,*t*₁ 和 *b* 分为长桁自由凸缘 的厚度和宽度,*t*₂ 和 *b*₁ 分别为长桁底边凸缘的厚 度和宽度,*h* 为长桁高度,*R* 和 *R*₁ 为倒圆半径。

表 1 试验件的剖面参数

Table 1 Cross section parameter of the specimens

Skin thickness/			Pa	rame	ter/1	mm		
mm	t	t_1	t_2	b	b_1	h	R	R_1
3.5	3.5	3.5	1.0	28	20	61.7	6	5
7.0	6.4	6.5	1.1	28	40	61.7	6	5

1.2 喷丸参数

喷丸成形和喷丸强化均采用硬度为 55~ 66 HRC的铸钢丸,壁板喷丸成形工艺参数见 表 2,表中气压 0.3 MPa 和 0.5 MPa 分别对应蒙 皮和长桁。喷丸强化工艺参数见表 3。其中,喷 丸成形及强化的弹丸流量均为 12 kg/min,喷射 距离均为 500 mm。

Та	ble 1	2]	Parameter	of	the	shot-	peened	forming
----	-------	-----	-----------	----	-----	-------	--------	---------

Skin	Diameter/	Gas pressure/	Impact velocity/
thickness/mm	mm	MPa	$(mm \cdot min^{-1})$
3.5	3	0.25	6 000
7.0	3	0.3/0.5	3 000

表 3 喷丸强化工艺参数表

Table 3 Parameter of the shot-peened

Skin	Diameter/	Gas pressure/	Impact velocity/
thickness/mm	mm	MPa	$(mm \cdot min^{-1})$
3.5	0.7	0.18	500
7.0	0.7	0.18	500

1.3 材料力学性能

试验件材料为毛料 76.2 mm 的铝合金 7150-T7751 预拉伸厚板,材料性能参数^[8]见表 4。

表 4 试验件材料的性能参数表

Table 4 Material properties of the specimen

$E_{ m c}/{ m GPa}$	Poisson's ratio	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	$\sigma_{0.2c}/MPa$
73.72	0.33	565	530



(a) Skin thickness=3.5 mm, unpeened

2 试 验

2.1 试验方法

将试验件放置在型号为 YAM-2000F(5000) 结构稳定试验机的上下压盘之间进行加载。试 件的横截面形心与上下压盘中心重合,以保证试 验件受力均匀。正式试验前先进行预试,根据试 验件长桁自由凸缘中心和长桁轴线对应蒙皮外 表面中心位置应变测量值的均匀性来判断加载 状态是否良好。根据需要调整试验件状态,直至 达到压损试验要求。

2.2 破坏模式

壁板压损试验件在低载时,剖面应力均匀分 布,蒙皮完全有效地承受压缩载荷。随着试验载荷 增加,长桁两侧的蒙皮屈曲,进而增加的载荷主要 由长桁与蒙皮角区承受,当达到其极限承载能力 时,壁板发生整体破坏。在连续加载过程中,试验 件均产生了明显的局部失稳现象,部分出现长桁与 蒙皮的撕裂分离现象。未喷丸试件和喷丸试件的 破坏形貌如图2所示。



(b) Skin thickness=7 mm, unpeened



(c) Skin thickness=3.5 mm, shot-peened (d) Skin thickness=7 mm, shot-peened

图 2 蒙皮 3.5 mm 和 7 mm 厚的喷丸试件的破坏形貌

Fig. 2 Failure morphologies of the unpeened and shot-peened specimen with 3.5 mm and 7 mm

2.3 结果及分析

当薄壁剖面型材的长度较短时(长度与回转 半径比 L/ρ小于 20),剖面发生局部失稳后,型材 还能承受较大的载荷,直到发生破坏(折皱、断 裂)时,剖面的轴线仍保持直线。这种破坏形式 被称为"压损",其对应的破坏应力称为压损强 度^[9]。未喷丸试件的压缩屈曲和破坏载荷见 表 5,喷丸试件的屈曲和破坏载荷见表 6。

表 5 局部屈曲载荷试验结果

Table 5 Test results of the local buckling load

No.		Local	buckling kN	; load/		Average/ kN
1	288.0	289.0	297.0	270.0	284.0	285.6
2	828.0	840.0	830.0	834.0	825.0	831.4
3	271.0	260.0	257.0	255.0	263.0	261.2
4	800.0	817.0	792.0	813.0	808.0	806.0

表 6 破坏载荷试验结果

Table 6 Test results of failure load

No.		Average/ kN				
1	357.8	364.4	408.2	359.6	360.2	370.0
2	960.0	970.5	963.0	974.5	955.5	964.7
3	357.8	355.5	364.2	356.6	356.6	358.1
4	962.5	931.0	951.0	967.5	945.5	951.5

压损强度的计算由破坏载荷平均值与试验 件截面面积的比值得到。

喷丸影响系数 κ₁ 的定义见公式(1),计算结 果见表 7。

$$\kappa_1 = \frac{\sigma_{\text{f-unp}} - \sigma_{\text{f-p}}}{\sigma_{\text{f-unp}}} \tag{1}$$

式中:σ_{f-unp}为未喷丸试件压损强度,MPa; σ_{f-p}为喷丸试件压损强度,MPa。

可见,喷丸后试件压损强度有所降低,降低 幅度与喷丸强度和试件厚度有关。与未喷丸试 件相比,蒙皮厚度 3.5 mm 的喷丸试件压损强度 降低了 3.21%;蒙皮厚度 7 mm 的喷丸试件压损 强度降低了 1.35%。这与喷丸成形和强化层(称 等效塑性变形层)所占试件截面面积比例大小有

表 7 喷丸影响系数 κ₁ 计算表 Table 7 Shot-peened influence coefficient κ₁

No.	Failure load/ kN	Area/ mm²	Crippling strength/ MPa	$\kappa_1/\frac{0}{0}$
1	370.0	876	422.4	2 91
2	358.1	876	408.8	5.21
3	964.7	1 655	582.8	1 25
4	951.5	1 655	574.9	1.30

关,即蒙皮 3.5 mm 厚喷丸试件的等效塑性变形 层所占整个截面面积的比例与蒙皮 7 mm 的相 比,比例偏大,所以影响较为显著。等效塑性变 形层的组织结构及应力状态有以下几个特点,其 一,存在较高的残余压应力;其二,晶格畸变达到 最大饱和值,即微观应力达到最大值;其三,晶粒 破碎以及晶粒内嵌镶块(亚晶粒)极大的细化。 上述 3 个因素在不同的条件下以不同程度影响 压损强度。

图 3 所示的试验件破坏点(Point1 和 Point2 参见图 2 中 1 #)的载荷应-变曲线可以看出喷丸 试件先于未喷丸试件发生破坏。其中,应变测量 点 1 和 2 为试验件长度方向二分之一截面上背对 背的长桁腹板两侧中心点。

此外,试验结果表明,喷丸不仅影响壁板的 压损强度,而且还对局部屈曲载荷有影响。从工 程应用的角度,喷丸对屈曲载荷的影响可通过压 缩模量来表达,具体过程叙述如下。

各向同性平板轴压载荷作用下的弹性稳定 性临界应力 σ_{er}方程^[10]如下:

$$\sigma_{\rm cr} = \frac{K_{\rm c} \pi^2 E}{12(1-\mu_{\rm c}^2)} \left(\frac{\delta}{b}\right)^2 \tag{2}$$

式中:E为材料的弹性模量, MPa;b为加载 边的宽度, mm; δ 为板的厚度, mm; μ_e 为材料的 弹性泊松比; K_e 为压缩临界应力系数, 与板的边 界条件及长宽比(a/b)有关。

可见在材料、几何参数和边界条件不变的情况下,模量是影响临界应力的唯一因素。从工程设计角度看,机翼加筋壁板设计长细比一般在 30 左右,模量对 JOHNSON-EULER 方程的影响有限,因此,喷丸试件和未喷丸试件的模量的差异可以从简单地临界失稳应力得到。喷丸影响系数 κ₂ 的定义见公式(3),计算结果见表 8。



图 3 未喷丸试件与喷丸试件破坏点的载荷-应变曲线

Fig. 3 Load-strain curves of the unpeened and shot-peened samples at failure

$$\kappa_2 = \frac{E_{\rm unp} - E_{\rm p}}{E_{\rm unp}} \tag{3}$$

式中: E_{unp} 为未喷丸试件压缩模量,MPa; E_p 为喷 丸试件压缩模量,MPa。

可见,与未喷丸试件相比,蒙皮厚度为 3.5 mm的喷丸试件的蒙皮局部屈曲载荷降低的幅度 (8.54%)比蒙皮厚度为 7 mm 的蒙皮局部屈曲载 荷降低幅度(3.06%)更为显著。分析其原因为: 喷丸试件的壁板截面上残余拉应力和残余压应 力相结合,导致材料的压缩模量略有降低。具体 影响量值与喷丸工艺参数及结构参数有关。未 喷丸试件和喷丸试件局部屈曲点(Point3 和 Point4 参见图 2 中 3 #),即背对背的单侧蒙皮中 心应变测量点的载荷应-变曲线如图 4 所示,可见,喷丸试件明显先于未喷丸试件发生局部 屈曲。

表 8 喷丸影响系数 κ₂ 计算表

Table 8 Shot-peened influence coefficient κ_2

No.	Buckling load kN	Area / mm²	Critical stress/MPa	$\kappa_2/\%$
1	285.6	876	326.0	0 E1
2	261.2	876	298.2	0.04
3	831.4	1 655	502.4	2.00
4	806.0	1 655	487.0	3.00





Fig. 4 Load-strain curves of the unpeened and shot-peened samples at local buckling

3 JOHNSON-EULER 方程的修正

机翼受压壁板结构的长细比处于中长柱过

渡区(有效长细比 20<L[']/ρ<60),壁板会发生局 部失稳与总体弯曲失稳复合的破坏,许用强度按 柱强度考虑,采用半经验公式 JOHNSON-EUL- ER 方程进行计算。

$$\sigma_{\rm c} = \sigma_{\rm f} - \frac{\sigma_{\rm f}^2}{4\pi^2 E} (\frac{L'}{\rho})^2 \tag{4}$$

$$L' = \frac{L}{\sqrt{C}} \tag{5}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{6}$$

式中: σ_c 为加筋板的破坏应力, MPa,; σ_i 为 加筋板的压损应力, MPa; E 为壁板材料的弹性 模量, MPa; L 为加筋板的长度, mm; C 为端部支 持系数; I 为加筋板剖面的惯性矩, mm⁴; A 为加 筋板剖面的面积, mm²。

由公式(4)可知,壁板的压损应力是计算破 坏应力的前提。喷丸影响系数 k1 直接表征了喷 丸成形并强化给壁板压损强度带来的影响大小。 而喷丸影响系数 κ₂则表示了喷丸引起压缩模量的差异。

因此,用 κ_1 和 κ_2 修正 JOHNSON-EULER 方程中的压损应力和弹性模量,即把喷丸的两个 影响因素计入到壁板柱强度的设计中。引入喷 丸影响系数 κ_1 和 κ_2 后的 JOHNSON-EULER 方程如下:

$$\sigma_{\rm c} = (1 - \kappa_1) \sigma_{\rm f} - \frac{(1 - \kappa_1)^2 \sigma_{\rm f}^2}{4\pi^2 (1 - \kappa_2) E} (\frac{L'}{\rho})^2 \qquad (7)$$

将壁板压损试验得到的喷丸影响系数计入 JOHNSON-EULER 方程得到对比曲线如图 5 所示。可见,在中长柱范围内,与未喷丸相比,引 入喷丸影响系数后修正的 JOHNSON-EULER 方程曲线明显有所降低。这将使机翼壁板的强 度分析更加准确。



图 5 JOHNSON-EULER 对比图 Fig. 5 Comparison curves of the Johnson-Euler

4 结 论

通过相同结构参数、同一试验条件下喷丸试 件和未喷丸试件的加筋壁板压损对比试验,研究 了喷丸对蒙皮局部屈曲载荷和压损强度的影响, 引入了喷丸影响系数,进而将喷丸的影响量化计 入壁板的压缩强度分析。研究结果发现:

(1)喷丸后加筋壁板的压损强度有所降低, 用喷丸影响系数 κ₁ 来表征喷丸对压损强度的影 响量。κ₁ 与喷丸工艺参数、结构几何参数相关, 根据未喷丸和喷丸试件的压损值对比确定。

(2)喷丸后加筋壁板的局部屈曲载荷有所降低,对薄蒙皮的局部屈曲影响较厚蒙皮更为显

著,此降低量用与喷丸工艺参数、结构几何参数 相关的影响系数 κ₂ 来表征。

(3)提出了用喷丸影响系数 κ1 和 κ2 修正 JOHNSON-EULER 方程中的压损应力和压缩 模量的方法来考虑喷丸处理对加筋壁板压缩强 度设计的影响,使用修正后的 JOHNSON-EUL-ER 方程在中长柱范围内机翼壁板设计结果更加 客观、准确,且便于工程应用。

参考文献

[1] 李国祥. 喷丸成形[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 1-113.

LI G X. Shot peen forming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 1-113 (in Chinese).

- [2] BENEDETTI M, FONTANARI V, SCARDI P, et al. Reverse bending fatigue of shot peened 7075-T651 aluminum alloy: The role of residual stress relaxation[J]. Interna
 - tional Journal of Fatigue, 2009, 31(8/9): 1225-1236.
- [3] HONDA T, RAMULU M, KOBAYASHI A S. Fatigue of shot peened 7075-T7351 SENB specimen-A 3-D analysis
 [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2006, 29(6): 416-424.
- [4] 李鹏,刘道新,关艳英,等.喷丸强化对新型7055-T7751
 铝合金疲劳性能的影响[J].机械工程材料,2015,39(1): 86-93.

LI P, LIU D X, GUAN Y Y, et al. Effects on shot peening on fatigue property of new aluminum alloy 7055 – T7751[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39 (1): 86-93 (in Chinese).

- [5] 王欣,王强,宋颖刚,等. 陶瓷丸喷丸对 2124 铝合金疲劳 性能的影响[J]. 材料保护, 2011, 44(9): 9-11.
 WANG X, WANG Q, SONG Y G, et al. Effect of ceramic shot peening on fatigue behavior of aluminum alloy[J].
 Materials Protection, 2011, 44(9): 9-11 (in Chinese).
- [6] 飞机设计手册编委会. 飞机设计手册(10)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 751.

Aircraft Design Manual Editorial Board. Aircraft design manual(10)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 751 (in Chinese).

- [7] 曾元松. 航空钣金成形技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2014:118-123.
 ZENG Y S. Aeronautical sheet metal forming technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014:118-123 (in Chinese).
- [8] RICHARD C R, JANA L J, JOHN B, et al. Metallic materials properties development and standardization [M].
 Washington D C: Federal Aviation Administration, 2003: 3-429.
- [9] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京: 航空工业出版 社, 1996: 123-136.
 CUI D G. Handbook of structural stability design[M].
 Beijing: Aviation Industry Press, 1996: 123-136 (in Chinese).
- [10] 飞机设计手册编委会.飞机设计手册(9)[M].北京:航空 工业出版社,2001:391-396.
 Aircraft Design Manual Editorial Board. Aircraft design manual(9)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 391-396 (in Chinese).

(责任编辑:黄艳斐)