

喷丸强化工艺参数及其与 靶材力学参量之间变化规律的研究

哈尔滨工业大学 李金魁 姚 枚
北京航空材料研究所 王仁智

本文研究了喷丸弧高度曲线随喷丸工艺参数变化的规律；四种热处理状态下40Cr钢的喷丸强度和时间的其它喷丸工艺参数间的关系；喷丸强度和靶材力学参量与残余压应力层深度间的关系。这一研究结果为靶材喷丸强化工艺参数的制定及喷丸强化的计算机控制，提供了一种途径。

The Investigation on the Law of the Change between the Shot Peening Parameters and Their Dependence with the Mechanical Behavior of Peened Materials

Li Jinkui Yao Mei
(Harbin Institute of Technology)
Wang Renzhi
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

The law of the changes of arc high—time curves with the shot peening parameters, the relationship of the peening time and peening intensity with shot peening parameters, mechanical behavior of the peened materials and the depth of residual compressive stress have been investigated in the present paper. According to the investigated results, a way for drawing up shot peening parameters of the peened materials and for computer controlling the shot peening operation have been proposed.

一、前 言

工程上用弧高度度量喷丸强度已有50余年的历史，其测量方法已经标准化，并广为世界各国采用^[1]。弧高度曲线（即Arc high—time curve，下记做 $f-t$ 曲线）随喷丸工艺参数的变化而变化，其变化规律至今尚未得到充分研究。所谓喷丸工艺参数其中主要包括弹丸尺寸（ d ）、弹丸速度（或以空气压力 p 表示）、喷射时间（ t ）、喷射角度等。喷丸强化往往要求达到满覆盖率（100%）或更高些。不同工艺参数下对弧高试片（70号碳钢）和靶材喷丸时，达到满覆盖率所需的时间（ t^* ）及其所对应的弧高度值（ f^* ）也是不同的，目前人们只能逐一测量。喷丸之所以能显著改善材料的疲劳强度，其强化因素之一是引入了残余压应力场。

文献[2、3]系统地研究了喷丸残余压应力场的变化规律，发现，当喷丸参数高于临界参数时，残余压应力的最大值仅由靶材的力学性能决定，而残余压应力层深度不仅与靶材有关，尚与喷丸参数密切相关。但是，为测定残余压应力层深度必须对靶材做逐层电抛光，测定其应力分布，这显然不便于工程应用。应找出一种简单的方法来近似地预示压应力层深度。很自然，人们会想到弧高度与压应力层深度之间的关系。但弧高度值（或喷丸强度）是喷丸参数的综合反映^[4]，不同喷丸参数的组合可能得到相同的喷丸强度，其形成的残余应力场却不尽相同，因此二者之间不会具有一一对应的绝对单调关系。但从宏观上看，喷丸强度越高，压应力层应该越深，因此，喷丸强度与压应力层深度之间可能存在近似的定量关系。

基于以上考虑,本文主要研究下列三个问题:(1) $f-t$ 曲线与喷丸工艺参数的关系;(2) t^c 、 f^c 与喷丸参数和靶材力学参数间的关系;(3) 残余压应力层深度与喷丸强度间的关系。

获得这些规律之后,就有可能根据所需之残余应力场确定合适的喷丸强度,再根据喷丸强度与其他参数(d, p, t)的关系来选择喷丸参数^[5]。这样,使喷丸从经验的工艺状态向量化的科学的状态前进一步。

二、试验方法

1. 喷丸机及喷丸参数

用压缩空气式喷丸机对试样进行喷丸。采用两种直径的铸钢丸: 0.55mm和1.10mm, 其硬度为HRC48~53。空气压强范围为 $P=2\sim6$ bar, 覆盖率范围为 $C=1\sim6$ (即100%~600%), 采用MM6Leitz卧式显微镜观察确定。

2. 试样

靶材为40Cr钢。840℃油淬后不同回火处理的力学性能如表1。

表1 试样(靶材)的力学性能

试样 编号	回火温度 ℃	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_{11} MPa	δ %	ψ %	HRC
A	200	1530	1910	—	—	51.9
B	400	1380	1460	9.5	43.9	44.8
C	550	1060	1120	13.7	50.5	35.2
D	650	670	750	23.4	67.7	20.2

材料及喷丸参数以Xabc表示: X代表A、B、C、D四种试样; $a=1$ 或5, 分别代表1.1mm和0.55mm直径的弹丸; b代表空气压强; c表示表面覆盖率。本试验共采用了60种规范。

3. $f-t$ 曲线及 t^c 、 f^c 的测定

用多试样法以标准方法[1]测定A试片和C试片的弧高曲线。喷丸时间为 $t=5\sim120$ s, 间隔为5s。根据测定的点对 (f_{A1}, t_1) 、 (f_{A2}, t_2) 、...绘制 $f-t$ 曲线, 然后用光滑曲线拟合点对, 由此获得8条光滑的 $f-t$ 曲线。按规定当A试片的 $f_A > 0.6$ mm时, 则换用C试片, 二者之间按 $f_A = 1/3f_c$ 关系换算。

对四种试样按 p 、 d 组合进行喷丸, 逐步测定出覆盖率为 $C=1$ (即100%)的时间 t^c 。再按这一确定的 p 、 d 、 t^c 值对弧高试片喷丸, 测定弧高度值, 即为 f^c 。

4. 残余应力的测定

在2903型应力仪上用 C_r-K_α 辐射(V滤波)和 $0-45^\circ$ 法测定残余应力 σ_r 。用电解去层法测定 σ_r 沿层深Z的分布曲线 σ_r-Z 。由该曲线确定 σ_r 的最大值 σ_{rmax} , 曲线上 $\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma_{rmax}$ 点的Z值定义为残余压应力场宽度, 并记做 Z^* 。

三、试验结果与分析

1. $f-t$ 曲线与喷丸参数的关系

各种喷丸参数下的A试片的 f_A-t 曲线示于图1 (f_A 以 10^{-2} mm为单位, 下同)。记 $t=120$ s时的 f_A 值为 f_{120} , 又记 $0.95f_{120}$ 值为 f^* , 与 f^* 对应的时间记做 t^* 。 f_{120} 、 f^* 、 t^* 统称为 $f-t$ 曲线的特征值, 其数值列于表2。按表2数据绘制 f^*-p 和 t^*-p 曲线, 示于图2和图3。 f^*-p 曲线类似于对数曲线, 可用下式模拟

$$f^* = a + b \ln p \quad (1)$$

a 、 b 常数用最小二乘法确定, 经计算得:

$$d=0.55\text{mm时}, a=16.09, b=20.70, \gamma=0.9745$$

$$d=1.10\text{mm时}, a=14.24, b=30.02, \gamma=0.9993$$

其中 γ 为相关系数。为了在方程(1)中概括丸径为其它值时的情况, 简单地假定 a 、 b 均与丸径 d 成直线关系。由上面的两组 d 、 a 、 b 值得:

$$a = 17.94 - 3.36d$$

$$b = 11.38 + 16.95d$$

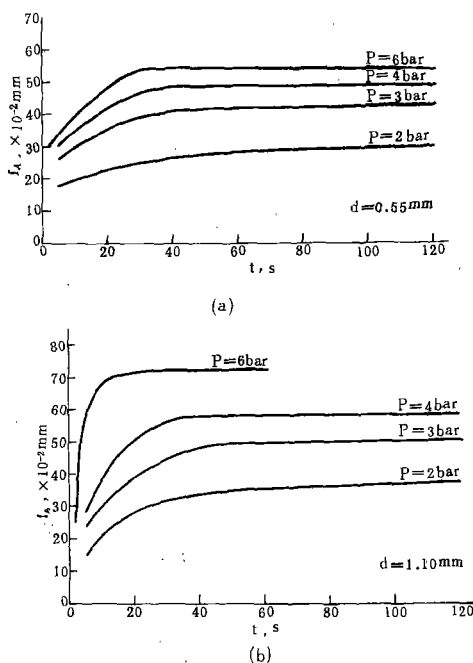


图1 不同喷丸工艺参数下的 f_A-t 曲线

表 2 $f-t$ 曲线特征值

喷丸工艺参数 ab^*	52	53	54	56	12	13	14	16
$f_{120}, 10^{-2}\text{mm}$	30	43	49	54	37	50	58	72
$f^*, 10^{-2}\text{mm}$	28.5/30.4**	40.9/38.8	46.6/44.8	51.3/53.2	35.2/35.0	47.5/47.2	55.1/55.9	68.4/68.0
t^*, s	68.0/66.2***	42.0/43.8	30.0/30.8	24.5/24.0	58.0/56.9	37.0/39.6	28.0/26.4	10.5/10.6

注: * a 代表弹丸直径 d ; b 代表压强 p 。** f_A-t 曲线上的值/式(2)的计算值。*** f_A-t 曲线上的值/式(6)的计算值。

须先将式(3)化成对数方程形式:

$$\ln(t^* - A) = \ln a + n \ln(B - p)$$

经计算得

$$a = 1.10, n = 2.62, \gamma = 0.9972$$

即 $d = 0.55\text{mm}$ 时,

$$t^* = 24 + 1.10(6 - p)^{2.63} \quad (4)$$

$d = 1.1\text{mm}$ 时, 下延图3中的曲线知其原点为(9, 5), 经同样处理得

$$t^* = 5 + 0.31(9 - p)^{2.63} \quad (5)$$

同前假定式(3)中的 A 、 B 、 a 与丸径 d 成直线关系, 由此得

$$A = 43.0 - 34.55d$$

$$B = 3.0 + 5.45d$$

$$a = 1.90 - 1.45d$$

借助于这三个方程可将式(4)、(5)合并为

$$t^* = (43.00 - 34.55d) + (1.90 - 1.45d) \{ (3.00 + 5.45d) - p \}^{2.63} \quad (6)$$

按式(6)计算各喷丸参数的 t^* 值, 列于表3, 最大误差为7% ($d = 1.1\text{mm}$, $p = 3\text{bar}$)。

应该指出, 式(2)、(6)是假设丸径与其它参数为线性关系而得的, 因此它的适用范围不应偏离基础 d 值(0.55~1.1mm)太远。

由图1可见, 当 $t > t^*$ 之后, f_A-t 曲线基本平直, 可以认为 $t = 120\text{s}$ 时的 f_A 值已达到饱和, 相应的 f^* 、 t^* 可分别视为准饱和值。 $t < t^*$ 时, 曲线变化不大, 有必要以适当的方程描述。观察曲线的形态, 知其亦类似于对数曲线, 即

$$f_A = a + b \ln t \quad (7)$$

$d = 0.55\text{mm}$, $p = 2\text{bar}$ 时, 利用实测的 $t < t^*$ 时的系列点 (f_A, t) 及最小二乘法确定常数 a 、 b , 得

$$a = 10.66, b = 4.20, \gamma = 0.9981$$

而 f_A-t 曲线的方程为

$$f_A = 10.66 + 4.2 \ln t \quad (t < t^*)$$

对其它规范作同样处理, 得到式(7)中的 a 、 b 及相关系数 γ , 一并列于表3。将 a 、 b 值代入式(7), 即可得出各规范下的 f_A-t 曲线方程。

由表3知 a 、 b 均随 d 、 p 变化, 对两种丸径分别

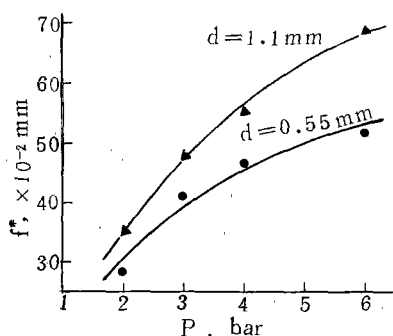


图2 两种丸径下的 f^*-p 曲线

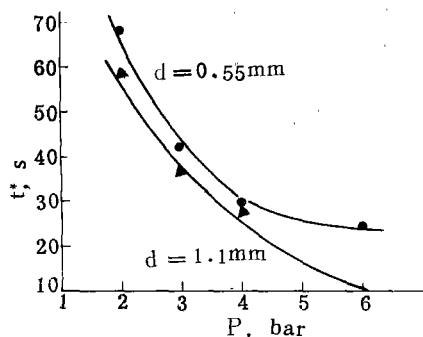


图3 两种丸径下的 t^*-p 曲线

将此二式代入(1)式, 便可获得 f^* 与 p 、 d 的关系:

$$f^* = (17.94 - 3.36d)$$

$$+ (11.38 + 16.95d) \ln p \quad (2)$$

按式(2)计算的各喷丸参数下的 f^* 值同时列入表2, 与 f_A-t 曲线上的相应数值比较, 最大误差为6.7% ($d = 0.55\text{mm}$, $p = 2\text{bar}$)。

由图3可见, 对于 $d = 0.55\text{mm}$ 的曲线, 它近似于以点(6, 24)为原点的指数曲线, 可用下式模拟

$$t^* - A = a(B - p)^n \quad (3)$$

这里 $A = 24$, $B = 6$ 。常数 a 、 b 可由最小二乘法确定,

做出 $a-p$ 和 $b-p$ 曲线, 示于图4。根据曲线的形态分别选择合适的方程模拟, 得到如下结果:

$d=0.55\text{mm}$ 时,

$$a=8.09+5.23\ln p, \quad \gamma=0.9955$$

$$b=0.35+5.87\ln p, \quad \gamma=0.9218$$

表3 f_A-t 关系式中的常数

d mm	p bar	a	b	γ
0.55	2	10.66	4.20	0.9981
	3	14.86	7.00	0.9920
	4	16.44	8.73	0.9945
	6	16.38	10.66	0.9875
1.10	2	0.57	8.82	0.9962
	3	2.15	12.31	0.9926
	4	2.22	15.88	0.9988
	6	15.86	23.47	0.9829

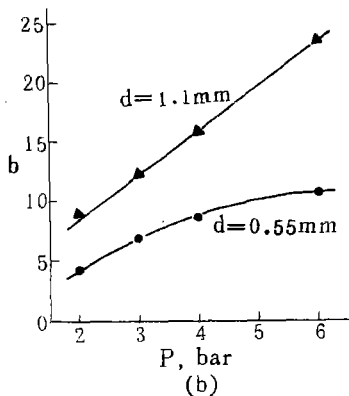
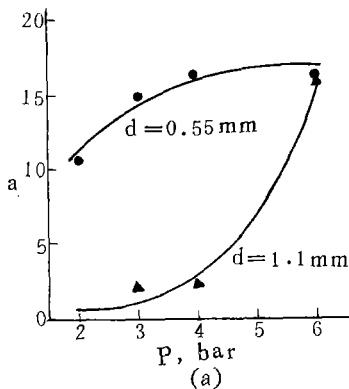


图4 f_A-t 关系式中的常数 a 、 b 随 d 、 p 的变化

$d=1.1\text{mm}$ 时,

$$a=0.50+0.085(p-1)^{3.21},$$

$$\gamma=0.9700$$

$$b=1.36+3.67p,$$

$$\gamma=0.9998$$

将上述结果代入式(7), 获得以 p 为参数的 f_A-t 曲线方程

$d=0.55\text{mm}$ 时,

$$f_A = (0.35+5.87 \ln p) + (8.09+5.23 \ln p) \ln t \quad (8)$$

$d=1.1\text{mm}$ 时,

$$f_A = \{0.5+0.085(p-1)^{3.21}\} + (1.36+3.67 \ln p) \ln t \quad (9)$$

式(8)、(9)的计算结果及验证见后文表7。当 d 为其它值时, 可由以上二式线性插值得到 f_A-t 曲线。

图1及式(8)、(9)表明: p 值越大, f_A-t 曲线越向离 f_A 方向移动, 曲线进入平直部分所需的时间越短, f^* 值相应地增大, 而 t^* 减小(见图2、3和式(2)、(6))。 p 值相同时, 丸径 d 较小者, f_A-t 曲线位置较低, 曲线也较平缓, 相应地 f^* 值较小, 而 t^* 值较大。这些变化规律与喷丸的物理过程是符合的。

2. t^c 、 f^c 与喷丸参数和靶材力学参量的关系

t^c 、 f^c 分别为 $c=1$ (100%) 的喷丸时间和弧高度。同一喷丸参数下不同靶材的 t^c 是不同的。图5给出了四种靶材在两种丸径、四种压强条件下 t^c 与靶材拉伸强度 σ_b 间的关系。图中可见每种规范下的 t^c 都与 σ_b 成直线关系, 可用以下方程描述

$$t^c = A + B \sigma_b \quad (10)$$

式中常数 A 、 B 由最小二乘法确定, 计算结果列

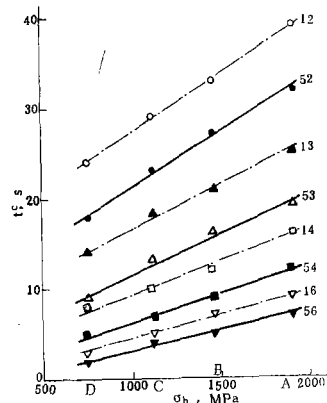


图5 以 p 、 d 为参数的 $t^c-\sigma_b$ 曲线于表4, 它们与 p 的关系示于图6。图中 A 、 B

表4 $t^c - \sigma_b$ 曲线中的常数

d mm	p bar	A	B 10^{-4}	γ
0.55	2	9.26	120	0.9989
	3	3.00	86	0.9934
	4	0.34	60	0.9987
	6	-0.99	42	0.9951
1.10	2	14.43	128	0.9997
	3	7.17	94	0.9987
	4	2.52	69	0.9916
	6	-0.83	52	0.9982

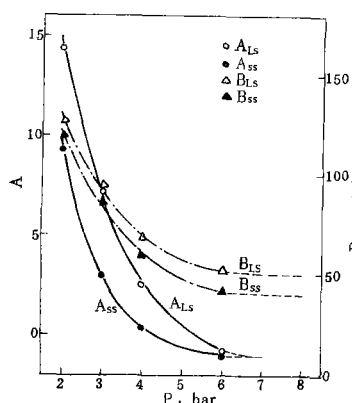


图6 常数A、B随p、d的变化

的脚标LS示 $d=1.1\text{mm}$ ，SS示 $d=0.55\text{mm}$ 。将 B_{LS} 曲线向右端延伸，渐近于点 $(8, 0.005)$ ，且形状近于指数曲线，故 $B_{LS}-p$ 曲线可表示为

$$B_{LS} = 50 + a(8-p)^n$$

改写为对数形式

$$\ln(B_{LS} - 50) = \ln a + n \ln(8-p)$$

由此式确定常数a和n

$$a = 0.1941, n = 3.3456, \gamma = -0.9997$$

于是

$$B_{LS} = [50 + 0.1941(8-p)^{3.3456}] \times 10^{-4}$$

同样方法可获得

$$B_{SS} = [40 + 0.1915(8-p)^{3.3775}] \times 10^{-4}$$

$$\gamma = -0.9998$$

$$A_{LS} = -1 + 0.17(7-p)^{2.80}$$

$$\gamma = -0.9999$$

$$A_{SS} = -1 + 0.03(6.7-p)^{3.80}$$

$$\gamma = -0.9999$$

B_{LS} 、 B_{SS} 表达式中 $(8-p)$ 项的系数和指数可统一为： $a=0.19$ ， $n=3.36$ 。于是

材料工程

$$B_{LS} = [50 + 0.19(8-p)^{3.36}] \times 10^{-4}$$

$$B_{SS} = [40 + 0.19(8-p)^{3.36}] \times 10^{-4}$$

将A、B表达式代入式(10)，得

$d=0.55\text{mm}$ 时，

$$t^c = [0.03(6.7-p)^{3.80} - 1] + [40 + 0.19(8-p)^{3.36}] \times 10^{-4} \sigma_b \quad (11)$$

$d=1.10\text{mm}$ 时

$$t^c = [0.17(7-p)^{2.80} - 1] + [50 + 0.19(8-p)^{3.36}] \times 10^{-4} \sigma_b \quad (12)$$

式(11)、(12)表明，满覆盖率（即 $C=1$ ）的喷丸时间随压强的增大和靶材强度的减小而缩短，这与喷丸的物理过程是一致的。按式(11)、(12)计算的 t^c 与实测值一并列于表5，最大误差为5.5%（D试样， $d=0.55\text{mm}$ ， $p=3\text{bar}$ ）。丸径为其它值的 t^c 可由式(11)、(12)的计算值线性插值得到。

表5 满覆盖率($C=1$)下的喷丸时间 t^c ，s

d mm	p bar	A	B	C	D
0.55	2	32/32.3	27/27.0	23/23.0	18/18.6
	3	19/19.1	16/15.4	13/12.6	9/9.5
	4	12/11.8	9/9.1	7/7.0	5/4.8
	6	7/7.0	5/5.1	—	—
1.10	2	39/38.9	33/33.1	29/28.8	24/24.0
	3	25/24.9	21/20.7	18/17.6	14/14.2
	4	16/16.1	12/12.6	10/10.5	8/7.9
	6	9/9.1	7/6.8	5/5.0	3/3.1

注：表中为实测值/计算值。

据给定的喷丸参数和靶材(d ， p ， σ_b)，由式(11)或/和式(12)算得 t^c 后，代入 f_A-t 曲线表达式(8)或/和(9)即可算得 t^c 。实测和计算结果列于表6，二者符合很好。表6的数据表明， t^c 随 d 、 p 、 σ_b 的增大而增高。

表6 满覆盖率($C=1$)下的弧高度 t^c ， 10^{-2}mm

d mm	p bar	A	B	C	D
0.55	2	25.5/27.1	24.5/26.2	23.5/25.5	22.5/24.0
	3	35.0/33.9	33.5/32.4	31.5/31.0	29.5/29.1
	4	36.5/36.3	34.5/34.1	32.5/31.9	30.5/28.7
	6	37.0/38.6	34.5/35.2	—	—
1.10	2	33.0/32.5	32.0/31.1	31.0/29.9	29.5/28.3
	3	41.5/41.1	39.0/39.0	36.5/36.8	33.5/34.1
	4	46.5/48.0	41.5/44.0	38.5/41.2	35.0/36.7
	6	66.5/67.1	62.5/60.1	56.0/53.0	43.0/41.6

3. 弧高度 f_A 与残余压应力层深 Z^* 的关系

A、C二试样在各种喷丸参数下的 f_A 值列于表7。其 Z^* 值见文献〔2〕,二者统绘于图7。由图可见,

表7 A、C试样的 f_A 值

p bar	覆盖率 C ×100%	$f_A, 10^{-2}mm$			
		A试样		C试样	
		d=0.55mm	d=1.1mm	d=0.55mm	d=1.1mm
2	1	—	33.0	—	31.0
2	3	29.0	37.0	28.5	36.0
2	6	—	38.0	—	39.0
3	1	35.0	41.5	32.0	36.5
3	2	40.5	49.0	38.0	47.0
3	3	41.5	49.5	40.5	49.0
4	1	36.5	46.5	32.5	38.0
4	2	44.0	56.5	38.0	50.0
4	3	47.5	57.5	42.5	56.0
6	1	—	66.5	—	56.5
6	3	49.0	72.0	41.5	70.5
6	6	—	72.0	—	72.0

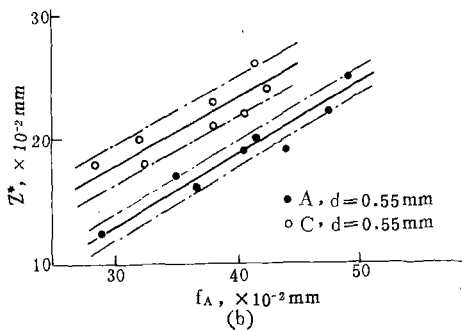
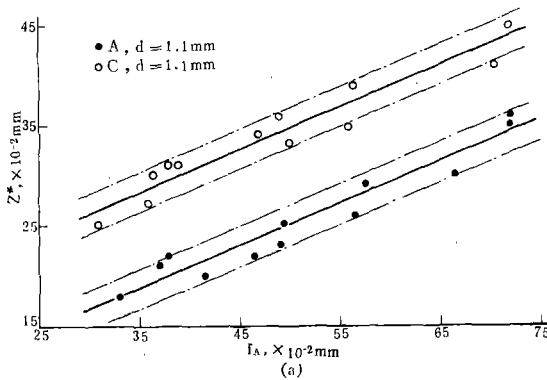


图7 弧高度 f_A 与残余压应力层深度 Z^* 间的关系

Z^* 与 f_A 基本成直线关系,可用方程

$$Z^* = a + b f_A$$

表示。用最小二乘法确定常数 a 、 b ,得到

$d=0.55mm$ 时,

$$A: a = -4.15, b = 0.57, \gamma = 0.9588$$

$$C: a = 1.58, b = 0.54, \gamma = 0.9097$$

$d=1.10mm$ 时,

$$A: a = 4.09, b = 0.42, \gamma = 0.9668$$

$$C: a = 13.42, b = 0.42, \gamma = 0.9564$$

对每种丸径近似认为A、C试样的常数 b 相等,而 a 与试样的 σ_b 成直线关系,于是

$d=1.10mm$ 时,

$$a = 26.65 - 0.0118 \sigma_b$$

$$Z^* = (26.65 - 0.0118 \sigma_b) + 0.42 f_A \quad (13)$$

$d=0.55mm$ 时,

$$a = 9.69 - 0.0072 \sigma_b$$

$$Z^* = (9.69 - 0.0072 \sigma_b) + 0.555 f_A \quad (14)$$

式(13)、(14)表明:(1)用同一丸径对同一靶材喷丸时,弧高度越高则 Z^* 值越大;(2)不同丸径对同一靶材喷丸时,丸径小时 Z^* 随 f_A 值增大而增大的速度快;(3) f_A 值相同时,靶材的强度越高则 Z^* 值越小。这些宏观规律成立的同时还应该看到, Z^* 与 f_A 并不是绝对单调对应的。 d 、 p 、 c 的不同组合可以得到相同的 f_A ,用这种 f_A 即使对同一种靶材进行喷丸,可能获得不同的 Z^* 值。因此在图6的 Z^*-f_A 关系中出现一分散带。 $d=1.1mm$ 时分散带较宽,为 $\pm 12 \mu m$; $d=0.55mm$ 时分散带较窄,C试样为 $\pm 16 \mu m$,A试样为 $\pm 10 \mu m$,但有个别点越出这一范围。

四、结论

本文以40Cr钢为例研究了材料的力学参量(σ_b)、喷丸工艺参数(d 、 p 、 t 、 f)以及靶材中形成的残余压应力层深(Z^*)之间的变化规律,得出如下结论。

1. 喷丸准饱和时间 t^* 及其相应的强度 t^* 满足以下方程:

$$t^* = (43.00 - 34.55d) + (1.90 - 1.45d)$$

$$[(3.00 + 5.45d) - p]^{2.63}$$

$$f^* = (17.94 - 3.36d) + (11.38 + 16.95d) \ln p$$

2. 当 $t \leq t^*$ 时, f_A-t 曲线方程为:

$d=0.55mm$ 时,

$$f_A = (0.35 + 5.87 \ln p) + (8.09$$

$$+ 5.23 \ln p) \ln t$$

$d=1.10mm$ 时,

$$f_A = [0.5 + 0.085(p-1)^{3.21}] + (1.36$$

$$+ 3.67 \ln p) \ln t$$

3. 满覆盖率下的 t^c 与喷丸参数、材料力学参量之间的关系为:

$d=0.55\text{mm}$ 时,

$$t^c = [0.03 (6.7-p)^{3.80} - 1] + [40+0.19 (8-p)^{3.36}] \sigma_b \times 10^{-4}$$

$d=1.10\text{mm}$ 时,

$$t^c = [0.17 (7-p)^{2.80} - 1] + [50 + 0.19 (8-p)^{3.36}] \sigma_b \times 10^{-4}$$

与 t^c 相应的 f^c 由 f_A-t 曲线方程确定。

4. 残余压应力层深 Z^* 与弧高值的关系为:

$d=0.55\text{mm}$ 时,

$$Z^* = (9.69 - 0.0072 \sigma_b) + 0.555 f_A$$

$d=1.10\text{mm}$ 时,

$$Z^* = (26.65 - 0.0118 \sigma_b) + 0.42 f_A$$

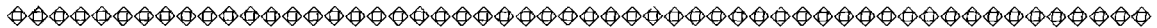
获得上述诸关系后,便可通过计算确定喷丸参数,进而实现喷丸的计算机控制。

如前所述,当喷丸强度超过某一定值时,残余应力的最大值 σ_{rmax} 由材料参数控制,而喷丸参数主要影响残余压应力层深度 Z^* 。对于给定材料,据其服役承受的应力状态和高低确定所需之 Z^* 值,然后,再据 f_A-Z^* 关系确定一系列产生同一 Z^* 的 (f_i, d_i)

点对 $(i=1, 2, 3, \dots)$ 。将 (f_i, d_i) 逐个代入 f^*-p, d 表达式,得到一系列 p^*_{i0} 。将 (f_i, d_i) 代入 t^c-p, d 关系式中,得到 t^c_i-p, f_i, d_i 关系,再代入 f_A-t 曲线方程,得到一系列 p^*_{i0} 。当选择了足够多的 (f_i, d_i) 点对时,可以找到一组 (f_{i0}, d_{i0}) ,使得与其相应的 P^*_{i0}, P_{i0}^c 之差小于既定误差。记 $P^0 = \frac{1}{2} (P^*_{i0} + P^c_{i0})$,以 d_{i0}, p^0 为喷丸参数,即可保证 $f^*=f^c$,同时产生足够的 Z^* 。此时喷丸时间 t 也已随之确定。

参考文献

- [1] 《机械零件喷丸强化工艺》,中国机械工程学会指导性技术文件 (CMES0006/MI001), 1985。
- [2] 李金魁、姚枚、王仁智,“喷丸残余应力特征规律的研究”,第三届全国残余应力会议论文, 1988。
- [3] 李金魁、姚枚、王仁智,“喷丸残余应力场解析模型”,待发表。
- [4] H.O.Fuchs, Proceedings of International Conference on Shot Peening (ICSP-II), Chicago, 1984, p.74。
- [5] 刘锁 (王仁智),金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺,国防工业出版社, 1977, P90。
- [6] 《喷丸弧高度试片》,GSB A69001—86,国家标准局, 1986。



三叉戟飞机恒速装置易损双金属件技术鉴定会在京召开

本刊讯 由航空航天部航空材料研究所和空军及民航北京维修基地共同研制的三叉戟飞机恒速装置易损双金属件,于1988年8月17日在民航北京维修基地通过了专家技术鉴定。

我国从本世纪70年代初购买了英国生产的三叉戟民用客机。该机的每台发动机上均装有一套恒速装置,其功用在于:当发动机以3300~6750转/分之间的任何转速输入恒速装置时,通过其复杂系统的调节作用,恒速装置可以稳定地输出8000转/分的转速去驱动发电机,从而达到发动机输出的交流电有恒定的频率,以保证飞机电器仪表的稳定工作,达到安全飞行之目的。

我国自购买三叉戟后,为了保证飞机的正常飞行,每年要花大量外汇去购买恒速装置中的双金属易损件,特别是英国早已停止生产这类零件,这就严重地影响了我国民航飞机的正常使用。为了解决国产化问

题,空军与民航北京维修基地于1985年初委托航空材料研究所研制三叉戟恒速装置用的旋板和侧板,即双金属易损件,共6种类型14个零件。该所从1985年底至1988年6月共提供了三套研制件。

与会专家一致认为:该双金属易损件为三叉戟恒速装置的关键零件,其结构复杂,加工精度要求高,加工及钎焊等难度大。经地面试车、试飞和装机试用后,证明性能良好,完全满足设计要求,现已在飞行中使用1300小时,因此,本项研制是成功的;在钎焊工艺方面,采用钎焊工艺及一系列技术措施,解决了粉末冶金件钎焊和面积钎焊的技术难关,较英国原工艺先进;该恒速装置易损双金属件已达到与英国原件的同等水平,是我国航空工业的一种新产品,为飞机零件国产化做出了贡献,也获得了明显的社会和经济效益。

(赵义善)