

## TC4 钛合金喷丸强化表面性能对比研究

## Comparison Research on Surface Performance of Shot Peening TC4

中航工业北京航空制造工程研究所 张新华

**[摘要]** 采用干式喷丸与湿式喷丸两种工艺方法对 TC4 钛合金薄板表面进行了处理,然后对其表面宏观形貌、表面硬度以及两种喷丸工艺所引入的残余应力沿厚度方向分布状态进行了测试,根据测试结果分析干式喷丸与湿式喷丸两种工艺处理效果的特点。结果表明:对于 TC4 钛合金,经湿式喷丸处理后其材料表面粗糙度值与干式喷丸试件相比降低了 29.1%;两种处理方法对材料均有不同程度的表层硬化作用,与干式喷丸相比湿式喷丸处理后试件表面硬化程度略高;湿式喷丸引入的最大压缩残余应力比干式喷丸增大了 11.2%。

**关键词:** 湿式喷丸 TC4 钛合金 表面形貌 力学性能

**[ABSTRACT]** Traditional and wet shot peening are applied on TC4 titanium alloy respectively. Surface profiles are observed and the mechanical properties are tested. Result indicates that: as for TC4 titanium, surface roughness of wet shot peening specimen is of 29.1% of the traditional shot peening one; both these two processes can make the surface hardened to some degree, while the hardening effectiveness of ultrasonic shot peening is a little better; the maximum compressive stress of wet shot peening specimen is increased by 11.2%, compared to the traditional shot peening one.

**Keywords:** Wet shot peening TC4 titanium alloy Surface profile Mechanical property

喷丸强化技术已经被广泛应用于航空发动机叶片、起落架和机翼壁板等重要零部件如的表面强化处理,以达到提高疲劳强度、延长零件使用寿命的目的。一般普遍采用铸钢丸为介质,近年来,随着零件表面质量和疲劳寿命要求的不断提高,对环境保护的重视,使用钢丸为介质的喷丸强化工艺在残余应力分布、受喷表面粗糙度和环保等方面还存在不足,尤其是使用铸钢丸喷丸,将对钛合金零件表面造成铁污染,影响钛合金零件的性能。采用陶瓷弹丸的湿式喷丸技术,具有环保、节能、强化效果好、零件表面形变与畸变小、喷丸零件表面不存在铁污染、弹丸破碎率低等优点,成为继铸钢弹丸、玻璃弹丸喷丸之后的最新热点,近年来在航空发动机、飞机铝合金和钛合金零件上得到了重要应用,成为喷丸技术

发展的一个重要趋势<sup>[1-2]</sup>。

湿式喷丸工艺一般采用陶瓷丸介质,将弹丸以一定比例与水、油或乳化液混合在一起,以压缩空气或离心介质泵驱动丸液混合介质喷射到工件表面上,由于液体的存在,使得湿喷丸强化具有喷丸强度高、工艺过程稳定、环境污染小、表面质量好等独特的优点<sup>[3-7]</sup>。

钛合金具有比重轻、比强度高、耐热性好和耐腐蚀性强等优点,已广泛地用于航空航天、民用工业、航海、精密机械等领域,但其塑性、剪切抗力以及加工硬化性能低,不足以抵抗摩擦磨损,耐磨性能较差,从而限制了它在某些领域的应用。有鉴于此,常采用各种处理技术在钛合金表面形成不同成分和结构的膜层<sup>[8-10]</sup>来提高其表面性能。本文利用湿式喷丸工艺与干式喷丸两种工艺对 TC4 钛合金进行表面处理比较,研究湿式喷丸处理 TC4 钛合金的表面性能,探讨使用该工艺用于改善钛合金使用性能的可行性。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用 TC4 钛合金板厚为 1.8mm,其化学成分见表 1,力学性能指标见表 2

表1 TC4钛合金的化学成分

	%						
Ti	V	Al	Fe	C	N	H	O
其余	3.5~4.5	5.5~6.8	≤ 0.3	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.2

表2 TC4钛合金的力学性能参数

弹性模量 $E/\text{GPa}$	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	屈服强度 $\sigma_s/\text{MPa}$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$	延伸率 $\delta/\%$
109	925~1150	870	4.44	10

### 1.2 加工参数

分别采用 PW-1 干式喷丸机和 TTW-5 湿喷丸机对 TC4 钛合金试件进行处理,铸钢丸规格为 S110,陶瓷丸规格为 Z300,加工参数分别如表 3、4 所示。

表3 TC4钛合金干式干式喷丸强化参数

喷射气压 /MPa	弹丸规格	喷丸时间 /s	喷丸强度 /mm
0.5	铸钢丸 S230	20	0.50

表4 TC4钛合金湿式喷丸强化参数

喷射气压 /MPa	弹丸规格	喷丸时间 /s	喷丸强度 /mm
0.55	陶瓷丸 Z300	25	0.51

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 试件处理表面宏观形貌照片及粗糙度测定

图 1、2 分别为 TC4 钛合金经过干式喷丸和湿式喷丸处理后的表面形貌照片。采用 2201 型表面粗糙度检查记录仪对试件进行表面粗糙度测定(见图 3)。该记录仪采用接触式测量法,也称针触法。用一圆弧半径为 1~2 μm 的触针直接接触被测表面。由于被测表面轮廓峰谷起伏,触针在被测表面滑行时将产生上下移动,从而引起传感器内电量的变化,经电子装置进行相敏检波、功率放大、滤波和积分计算后,由电表直接读出  $R_a$  参数值。

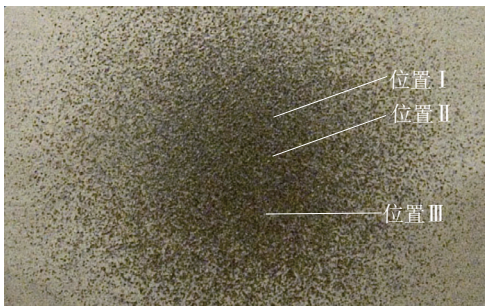


图1 干式喷丸处理钛合金表面形貌

Fig.1 Surface profile of titanium alloy specimen by traditional shot peening

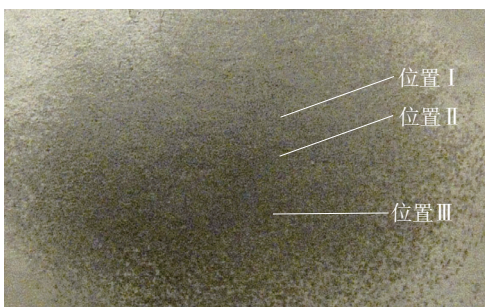


图2 湿式喷丸处理钛合金表面形貌

Fig.2 Surface profile of titanium alloy specimen by wet shot peening

每个试样选择 3 个不同位置进行检测,结果列于表 5。

测量结果表明:对于 TC4 钛合金,两种喷丸处理对材料表面质量的不利影响并不十分明显。湿式喷丸表面处理质量与原始状态相比只是略微变差,与干式喷丸试件的表面粗糙度相比,湿式喷丸降低了 29.1%。

分析其原因可能为:一是液体介质的存在,使干摩



图3 表面粗糙度测定

Fig.3 Picture of surface roughness testing

表5 表面粗糙度测定结果

材料	处理方式	原始件 / μm				处理后 / μm			
		I 位置	II 位置	III 位置	平均值	I 位置	II 位置	III 位置	平均值
钛合金	干式喷丸	0.82	0.81	0.80	0.81	2.20	1.42	1.64	1.75
	湿式喷丸					1.34	1.12	1.26	1.24

擦变成湿摩擦,减轻了弹丸对工件的磨损;二是陶瓷丸的表面粗糙度比铸钢丸高 1~2 级,使得试件获得良好的表面质量。

### 2.2 硬度沿厚度分布测定

使用 MHV2000 显微硬度测量仪测定试件维氏硬度沿厚度的分布曲线(施加载荷 50g,保持时间 10s),测试结果绘制于图 4 中。

经过湿式喷丸与干式喷丸两种工艺处理的 TC4 钛合金试件的硬度沿厚度方向的分布如图 4 所示。对比可知,两种处理方法对材料均有不同程度的表层硬化作

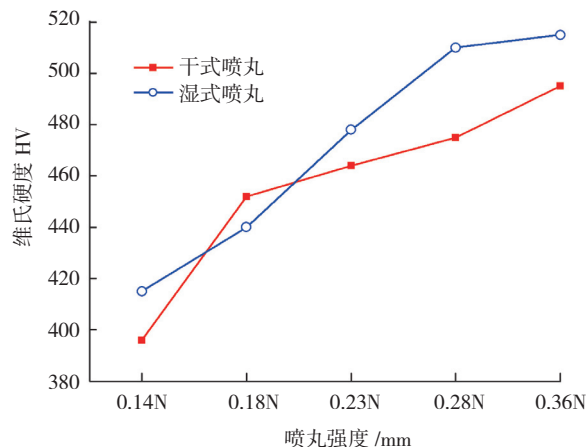


图4 两种不同处理方式下钛合金试件硬度沿厚度分布图

Fig.4 Microhardness of titanium alloy by two processes along depth

用,这对增强材料表面耐磨性能是非常有利的。湿式喷丸与干式喷丸相比,表面硬化程度提高了 8.9%。

由此可见:与干式喷丸相比,湿式喷丸处理后试件表面硬化程度略高。分析其原因可能为:由于液体黏度大,液体与弹丸间的摩擦力,远大于气体与弹丸间的摩擦力,因而气液两相流体与弹丸的速度滑差率比气体与弹丸间的低,弹丸加速快。在其他条件相同的情况下,用气液两相流体比直接用气体能带给弹丸更大的速度,使弹丸具有更高的动能,达到更高的喷丸强度<sup>[11]</sup>。

### 2.3 残余应力测试

#### 2.3.1 测试原理

本工作的原理基于 X 射线衍射理论。当材料中有应力  $\sigma$  存在时,其晶面间距  $d$  必然随晶面与应力相对取向的不同而有所变化,按照布拉格定律,衍射角  $2\theta$  也会相应改变<sup>[12]</sup>。因此我们有可能通过测量衍射角  $2\theta$  随晶面取向不同而发生的变化来求得应力  $\sigma$ 。对于各向同性的多晶材料,在平面应力状况下,依据布拉格定律和弹性理论可以导出,应力值  $\sigma$  正比于  $2\theta$  随  $\sin^2\psi$  变化的斜率  $M$  (例如如图 5 所示),即

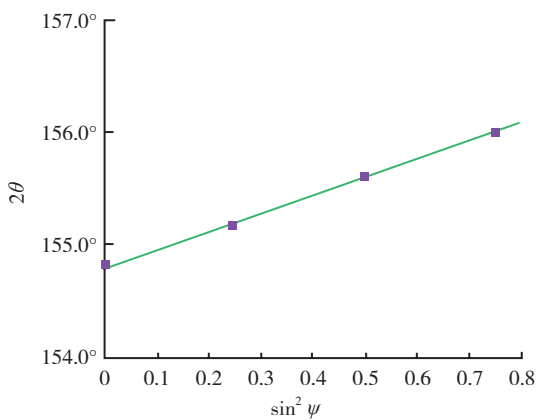


图5  $2\theta$ 对 $\sin^2\psi$ 的斜率  
Fig.5 Slope of  $2\theta$  v.s.  $\sin^2\psi$

$$\sigma = K \cdot M \quad (1)$$

其中,  $M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2\psi}$ ,  $K$  为应力常数,

$$K = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \text{ctg}\theta_0 \cdot \frac{\pi}{180} \quad (2)$$

式中,  $E$  为杨氏模量,  $\mu$  为泊松比,  $\theta_0$  为无应力状态的布拉格角。

采用电解抛光逐层剥除法测定残余应力沿板厚方向的分布曲线。由于被剥除部分残余应力的释放,将导致剩余材料体积内残余应力的重新分布,应根据校正公式对试验测定值进行修正<sup>[13]</sup>。

#### 2.3.2 测试方法和条件

测试仪器: RIGAKU D/MAX 2500V/PCX 射线衍射

仪;

测量方法: 侧倾固定  $\Psi$  法;

定峰方法: 半高法;

辐射: Cu ;

X 射线管高压: 40kV;

管电流: 250mA;

测试点位置: 试块中心点;

X 射线照射面直径:  $\phi$  6mm 。

剥层方法: 采用 VT2006 型电解抛光仪,对试样进行剥层,剥层面积 10mm × 10mm,抛光电压、电流及电解液配方由具体材料而定。

#### 2.3.3 试验结果

将湿式喷丸和干式喷丸两种不同处理方式下 TC4 钛合金,经过剥层校正后的残余应力试验结果绘制于图 6 中。对比可知,两种处理方法均会在材料内部不同程度地引入压缩残余应力,湿式喷丸处理所形成的压缩残余应力最大值为 -511.7MPa,而干式喷丸形成的压缩残余应力最大值为 -460.3MPa,与干式喷丸相比,湿式喷丸引入的最大压缩残余应力增大了 11.2%。由此可见:湿式喷丸与干式喷丸相比,能够在试件内部产生更大的压缩残余应力。分析其原因可能是:喷丸强化过程是高速飞行的弹丸对零件表面刚性撞击的过程,这种撞击会引起较高的局部温度,从而削弱喷丸强化的效果。湿喷丸中的液体介质,能迅速带走喷丸所产生的热量,使局部过热大大降低,从而产生更大的压缩残余应力。

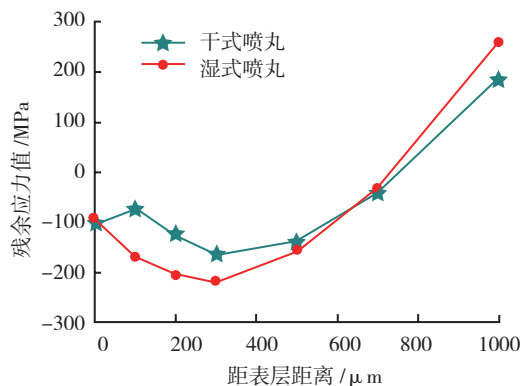


图6 两种不同处理方式的钛合金试件残余应力沿厚度分布图  
Fig.6 Residual stress of titanium alloy by two processes along depth

## 3 结论

(1) 两种喷丸处理对 TC4 钛合金表面质量的不利影响并不十分明显,与干式喷丸相比湿式喷丸试件表面粗糙度降低了 29.1%。

(2) 两种处理方法对 TC4 钛合金均有不同程度的

(下转第 159 页)

种。喷丸强化钛合金零构件壁部静力学性能是否明显降低是区分薄壁与厚壁的依据,薄壁与厚壁是相对的,对于某些零构件在不同喷丸条件下薄壁与厚壁是可以相互转化的。下面分别探讨厚壁和薄壁钛合金零构件的喷丸强化问题。

### 3.1 厚壁钛合金件喷丸强化

厚壁钛合金零构件包括直径尺寸较大的轴类和厚板类钛合金零构件,壁厚等尺寸因素对此类钛合金零构件喷丸强化的影响明显弱化不再是主要影响因素,钛合金材料本身成为此类钛合金零构件喷丸强化的最重要影响因素。因此,厚壁钛合金零构件喷丸强化等同于钛合金零构件喷丸强化。

钛合金材料缺口敏感性高,钛合金零构件喷丸强化效果因此受到较大影响。研究表明,合理规划喷丸强化前、后处理工序及其顺序与组合,在喷丸强化前降低与消除内部残余拉应力、显著降低表面粗糙度、改善表面质量,在喷丸强化之后改善喷丸强化表面状况等,明显有利于降低和消除钛合金材料缺口敏感性的消极影响,有利于改善钛合金零构件喷丸强化效果。

此外,钛合金零构件表面在加工过程中因易氧化而损害使用性能,因此在喷丸强化及其前、后处理中应尽力避免钛合金零构件表面产生加工氧化,最好在打磨、抛光、光饰、喷丸等全过程采取防止钛合金零构件表面产生加工氧化的有效措施。

### 3.2 薄壁钛合金件喷丸强化

实际上薄壁钛合金零构件类似普通钛合金钣金零构件,其壁厚可以小到1mm左右甚至更小,按照常规喷丸强化工艺及参数处理这类零构件之后,其使用性能不总是提高。

研究表明,导致上述结果的主要原因是此类零构件壁厚与弹丸规格、强化方式及工艺参数等不匹配,如喷丸强度相对偏大。因此,为了获得理想喷丸强化效果,务必使零构件壁厚与喷丸强化条件相互协调,如前所述较小的壁厚选择较小的喷丸强度等。

## 4 小结

缺口敏感性高、加工表面易氧化、壁厚与喷丸参数不匹配等是钛合金零构件尤其是薄壁钛合金零构件喷丸强化中的突出问题,其中最后一个问题也是其他金属材料薄壁零构件喷丸强化中的共性问题,通过上述分析研究明确了这些喷丸强化问题的基本解决途径。

(1)合理制定钛合金零构件喷丸强化目标,使之更加符合喷丸强化实际而利于实现。

(2)通过喷丸强化之前和之后的合理处理,降低和消除钛合金因缺口敏感性高对零构件喷丸强化效果的

不利影响。

(3)在喷丸及其前、后处理全过程采取防氧化措施,防止钛合金零构件表面产生加工氧化。

(4)合理匹配喷丸强化工艺与零构件壁厚,实现钛合金零构件尤其是薄壁钛合金零构件喷丸强化。

(责编 小城)

(上接第156页)

表层硬化作用,与干式喷丸相比,湿式喷丸处理后试件表面硬化程度略高。

(3)两种处理方法均会在TC4钛合金材料内部不同程度地引入压缩残余应力,与干式喷丸相比,湿式喷丸引入的最大压缩残余应力增大了11.2%。

(4)与干式喷丸相比,采用陶瓷丸的湿式喷丸工艺使得钛合金材料的表面质量更好。

## 参考文献

- [1] 曾元松,黄遐,李志强.先进喷丸成形技术及其应用与发展.塑性工程学报,2006,13(3):23-29.
- [2] 栾伟玲,涂善东.喷丸表面改性技术的研究进展.中国机械工程,2005,16(15):1405-1409.
- [3] Guo F A, Trannoy N, Lu J. Characterization of the thermal properties by scanning thermal microscopy in ultrafine-grained iron surface layer produced by ultrasonic shot peening. Materials Chemistry and Physics, 2006, 96: 59-65.
- [4] Xing Y M, Lu J. An experimental study of residual stress induced by ultrasonic shot peening. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152, 56-61.
- [5] Wang X, Wang J, Wu P, et al. The investigation of internal friction and elastic modulus in surface nanostructured materials. Materials Science and Engineering A, 2004, 370:158-162.
- [6] Liu G, Lu J, Lu K. Lu. Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening. Materials Science and Engineering A, 2000, 286: 91-95.
- [7] 李雪莉,李瑛,王福会,等. USSP表面纳米化Fe-20Cr合金的腐蚀性能及机制研究.中国腐蚀与防护学报,2002,22(6):326-334.
- [8] Yang Y L, Zhao G J, Zhang D, et al. Improving the surface property of TC4 alloy by laser nitriding and its mechanism. Acta metallurgica sinica (English letters), 2006, 19(2): 151-156.
- [9] Li G A, Zhen L, Lin C, et al. Deformation localization and recrystallization in TC4 alloy under impact condition. Materials Science and Engineering A, 2005, 395: 98-101.
- [10] 张聪惠,赵西成,兰新哲,等.高能喷丸后TC4合金表面组织性能研究.铸造技术,2006(27):1082-1084.
- [11] Jang J S, CKoch C C. Hall-petch relationship in nanocrystallization iron produced by ball milling. Scr Metall Mater, 1990, 24:1599-1604.
- [12] 马世良.金属X射线衍射学.西安:西北工业大学出版社,1997.
- [13] 张定铨,何家文.材料中残余应力的X射线衍射分析和作用.西安:西安交通大学出版社,1999.

(责编 亦菲)