

# 超声喷丸强化 7075-T651 铝合金表面性能研究

Surface Hardening Effectiveness on Aluminium Alloy 7075-T651 by Ultrasonic Shot Peening

北京航空制造工程研究所 张新华 曾元松  
天津大学材料科学与工程学院 王东坡 王 婷

**[摘要]** 采用普通喷丸与超声喷丸两种加工方法对 7075-T651 铝合金进行处理, 分别观察其表面形貌并对其力学性能进行测试。结果表明: 超声喷丸处理后材料表面粗糙度值仅为普通喷丸试件的 35.5%; 两种处理方法对材料均有不同程度的表层硬化作用, 超声喷丸处理后试件表面硬化程度略高, 其引入的最大压缩残余应力较普通喷丸增大了 31.9%。

**关键词:** 超声喷丸 7075-T651 铝合金 力学性能

**[ABSTRACT]** Traditional and ultrasonic shot peening are applied on aluminum alloy 7075-T651 respectively. Surface profiles are observed and the mechanical properties are tested. The result indicates that surface roughness of ultrasonic shot peening specimen is 35.5% of the traditional shot peening one, and both these two processes could make the surface hardened to some degree, while the hardening effectiveness of ultrasonic shot peening is a little higher, and the maximum compressive residual stress of ultrasonic shot peening specimen is increased by 31.9% compared to the traditional shot peening one.

**Keywords:** Ultrasonic shot peening Aluminium alloy 7075-T651 Mechanical property

喷丸强化是用高速运动的弹丸流喷射材料表面并使其表层发生塑性变形的过程。合理地利用引入表面塑性变形层内的残余压应力场和变形的显微组织, 可以改善金属材料抗疲劳断裂性能及应力腐蚀(氢脆)断裂抗力。近年来人们对该技术给予了极大的关注, 开发了微粒冲击、微粒镶嵌镀膜、高能和超声喷丸等多种新技术<sup>[1-2]</sup>。

超声喷丸(USSP)是一种较新的材料表面改性方法。它与普通喷丸的主要区别为弹丸从各方向

以超声频撞击已被固定的材料表面。由于其引入材料内部的能变较大, 常用于实现材料表面的纳米化, 降低氮化温度等方面。该方法具有实施方便、效果显著、适应面广、消耗低等优势, 在飞机、坦克、汽车和各种机械设备的齿轮、轴承、涡轮盘、叶片及模具、切削工具等的表面清理用途和提高使用寿命与防腐能力方面发挥了重要的作用, 取得了令人满意的效果<sup>[3-7]</sup>。

7075-T651 是 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝, 具有较高的比强度和比刚度、较好的耐腐蚀性和较高的韧性等优点, 是航空、航天、兵器、交通运输等行业最重要的结构材料之一。该材料常用于制作飞机结构件及其他强度要求高的高应力结构件<sup>[8-10]</sup>。

由于 7075-T651 合金的屈服强度接近抗拉强度, 属于超高强变形铝合金, 但塑性较差。近年来, 围绕提高材料的强度、塑性、韧性、耐蚀性以及疲劳性能等综合性能开展了大量研究, 其中通过研究材料在使用过程中的断裂、疲劳、腐蚀、老化等问题, 找出提高材料性能的途径以延长其使用寿命已成为当今研究的热点。本课题将超声喷丸与普通喷丸对比, 着重研究了超声喷丸对于 7075-T651 铝合金力学性能的强化作用, 提供了一种有效改善其力学性能的手段。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用 7075-T651 铝合金板厚 2.67 mm, 其化学成分及力学性能指标见表 1、2。

表 1 7075-T651 铝合金的化学成分 w/%

Mn	Mg	Cr	Fe	Si	Ti	Cu	Zn	Al
1.8~2.3	4.5~5.6	0.1~0.28	0.5	0.4	0.2	1.2~2.0	5.1~6.1	余量

表 2 7075-T651 铝合金的力学性能参数

弹性模量 E/GPa	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	密度 $\rho$ /(g·mm <sup>-3</sup> )	延伸率 /%
71	538	462	2.8	9

## 1.2 加工参数

分别采用PW-1普通喷丸机和SONATS超声喷丸机对7075-T651铝合金试件进行处理。加工参数如表3所示。

## 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

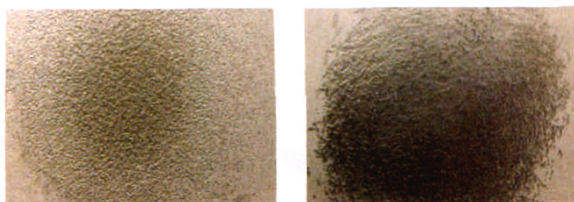
图1分别为7075-T651铝合金经过普通喷丸和超声喷丸处理后的表面形貌照片。采用2201型表面粗糙度检查记录仪对试件进行表面粗糙度测定,该记录仪采用接触式测量法,由电表直接读出

$R_a$ 参数值。每个试样选择3个不同位置进行检测,结果列于表4。

对于7075-T651铝合金,两种喷丸处理均会对材料表面质量造成不利影响。与普通喷丸相比,超声喷丸处理后的材料表面更光滑,其平均粗糙度值是普通喷丸试件的35.5%。由此可见,在处理7075-T651铝合金时,超声喷丸处理工艺在表面质量方面比普通喷丸有大幅度的改善,更适合于材料的表面改性。

### 2.2 硬度测定

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0.49N,保持时间10s),测试结果见图2。由图2可见,两种处理方法对材料都有不同程度的表层硬化作用,对于增强材料的表面耐磨性能非常有利。超声喷丸与普通喷丸相比,材料的表面硬化程度提高了12.7%。分析其原因为:在相同处理时间内和相同处理面积上,超声喷丸由于单针每秒高达2万次的撞击次数而具有比普通喷丸更高的覆盖率,因而使得金属材料表面的晶粒更充分



(a) 普通喷丸处理

(b) 超声喷丸处理

图1 普通喷丸和超声喷丸处理的铝合金表面形貌  
Fig.1 Surface profiles of aluminium alloy specimen by traditional and ultrasonic shot peening

表3 7075-T651 铝合金喷丸强化参数

普通喷丸强化	喷射气压/MPa	弹丸规格	喷丸时间/s	喷丸强度/mm
	0.35	S230	25	0.57A
超声喷丸强化	超声波频率/Hz	超声波振幅/ $\mu\text{m}$	冲击时间/s	喷丸强度/mm
	20000	70	20	0.57A

表4 粗糙度值测定结果

处理方式	原始件/ $\mu\text{m}$				处理后/ $\mu\text{m}$			
	位置	位置	位置	平均值	位置	位置	位置	平均值
普通喷丸	1.16	1.00	1.12	1.09	7.0	7.5	7.8	7.4
超声喷丸	1.16	1.00	1.12	1.09	2.80	2.42	2.66	2.63

地发生塑性变形而破碎更严重,可获得更小尺寸的晶粒,如图3所示。而更小尺寸的晶粒意味着其表面硬度更高,这种现象与传统的Hall-Petch关系一致<sup>[11]</sup>。

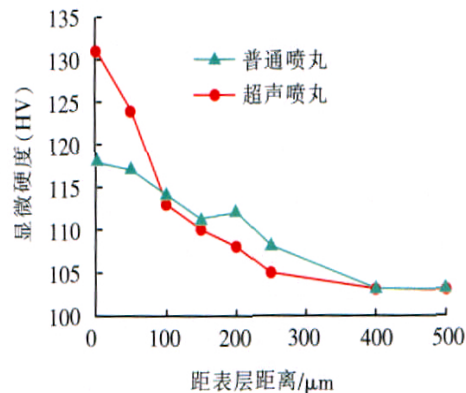


图2 两种不同处理方式的铝合金试件硬度沿厚度分布

Fig.2 Microhardness of aluminium alloy specimen by two processes along depth

### 2.3 残余应力测试

#### 2.3.1 测试原理和方法

本测试的原理基于X射线衍射理论。当材料中有应力存在时,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。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

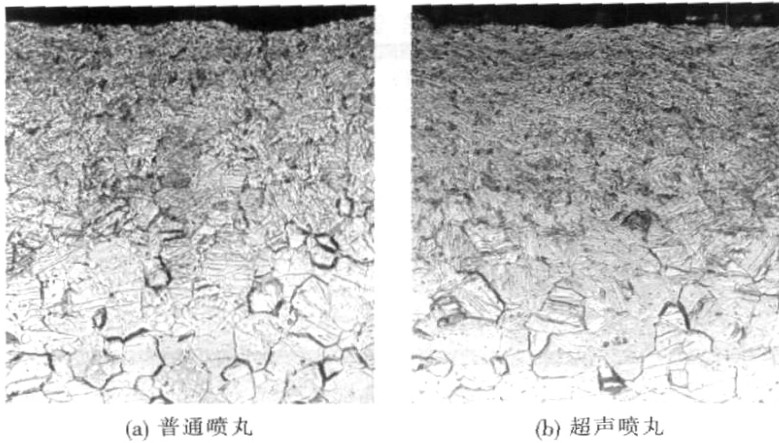


图3 两种不同处理方式的铝合金试件表层晶粒变化图  
Fig.3 Change of grains at surface layer of aluminium alloy by two processes

$\sin^2$  变化的斜率  $M$ (如图4所示), 即  $=K \cdot M$ 。

式中,  $M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi}$ ;  $K$  为应力常数,  $K = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \text{ctg} \theta_0 \cdot$

$\frac{\pi}{180}$ 。在上式中,  $\psi$  为材料断面收缩率,  $E$  为杨氏模量;  $\mu$  为泊松比;  $\theta_0$  为无应力状态下的布拉格角。

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>。

采用 RIGAKU D/MAX 2500V/PCX 射线衍射仪测量残余应力。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。

### 2.3.2 试验结果

用超声喷丸和普通喷丸处理的 7075-T651 铝合

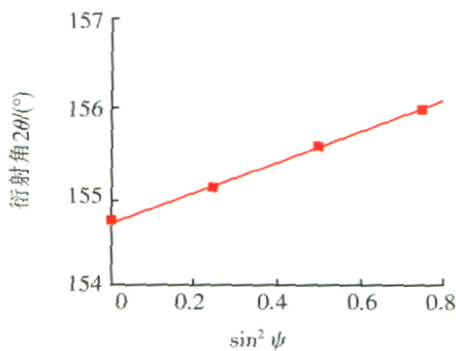


图4  $2\theta$  对  $\sin^2 \psi$  的斜率  
Fig.4 Slope of  $2\theta$  vs  $\sin^2 \psi$

金经剥层校正后的残余应力试验结果见图5。由图5可见, 两种处理方法均会在材料表层不同程度地引入压缩残余应力, 超声喷丸处理所形成的压缩残余应力最大值为-217.3MPa, 而普通喷丸形成的压缩残余应力最大值为-164.7MPa, 与普通喷丸相比, 超声喷丸形成的最大压缩残余应力增大了31.9%。由此可见, 超声喷丸与普通喷丸相比, 能够在试件表层产生更大的压缩残余应力。分析其原因为: 在相同处理时间内和相同处理面积上, 超声喷丸由于单针每秒高达2万次的撞击次数而具有比普通喷丸更高的覆盖率和冲击能量, 故能获得更大的压缩塑性变形。

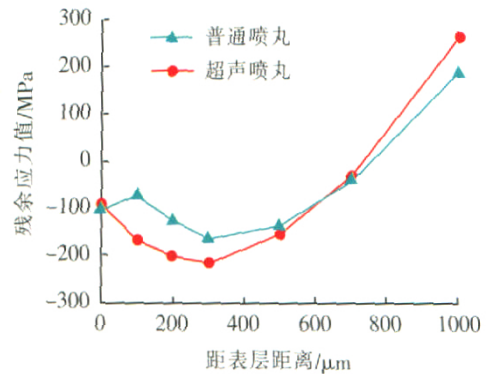


图5 两种不同处理方式的铝合金试件残余应力沿厚度分布  
Fig.5 Residual stress of aluminium alloy by two processes along depth

### 3 结论

(1) 两种喷丸处理均会对 7075-T651 铝合金材料的表面质量造成一定的不利影响。超声喷丸处理后材料表面粗糙度值是普通喷丸试件的 35.5%。

(2) 两种处理方法对 7075-T651 铝合金材料都有不同程度的表层硬化作用。与普通喷丸相比, 经超声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 7075-T651 铝合金材料表层不同程度地引入压缩残余应力。与普通喷丸相比, 超声喷丸形成的最大压缩残余应力增大了 31.9%。

(下转第 90 页)

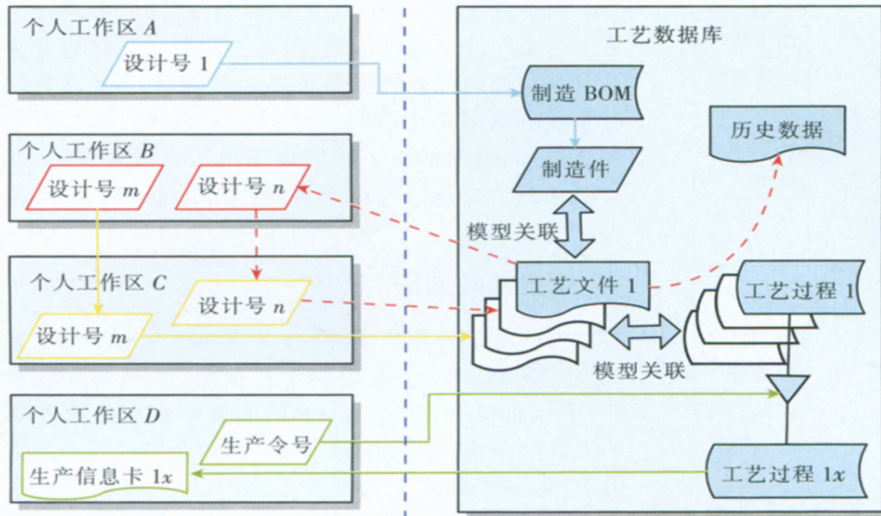


图3 系统数据流程  
Fig.3 Date flow of system

实线表示制造 BOM 数据的建立，黄实线表示不同工艺数据的形成过程，红虚线表示工艺数据变更过程，绿实线表示生产信息的获取过程，工艺数据库中制造件、工艺文件、工艺过程通过模型关联技术成为一体。

系统的主要技术特点概述如下：

采用 J2EE 分布式可伸缩架构和业务模型驱动技术，以 XML 为底层交换协议；在同一工艺信息模型基础上，对机械加工、电子装联、产品总装等不同工艺文件格式进行了整合；通过模型关联技术提高了数据查找和复用效率，通过丰富的工作区定义实现了对数据操作过程的有效控制与管理；系统在体系框架、信息建模、过程建模和工艺知识库等方面预置了大量信息，系统实施后实现了工艺信息集成和工作过程集成。

### 参 考 文 献

[1] 莱特. 21 世纪制造. 冯常学, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
 [2] 陈宗舜. 机械制造业工艺设计与 CAPP 技术. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
 [3] 汪方宝, 左防震. 面向制造企业集成的 CAPP 系统. CAD/CAM 与制造业信息化, 2006(9): 36- 37.  
 [4] 陈禹六. IDEF 建模分析和设计方法. 北京: 清华大学出版社, 1999.

(责编 晓霏)

(上接第 80 页)

### 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, Tranny 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 Xiaowei, Wang Jingyang, Wu Ping, 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. 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] 贺幼生. 7075 铝合金的搅拌摩擦焊组织性能研究. 株洲工学院学报, 2006, 20(2): 56- 58.  
 [9] Xue Y, McDowell D L, Horstemeyer M F, et al. Microstructure-based multistage fatigue modeling of aluminum alloy 7075- T651. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74: 2810- 2823.  
 [10] Campbell C E, Bendersky L A, Boettinger W J, et al. Microstructural characterization of Al- 7075- T651 chips and work pieces produced by high-speed machining. Materials Science and Engineering A, 2006, 430: 15- 26.  
 [11] Jang J S C, Koch C C. Hall -etch 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 侧卫)