

文章编号:1673-9981(2010)03-0174-06

喷丸处理 7075 铝合金循环载荷下 表面残余应力的松弛规律*

胡永会, 吴运新, 陈 磊

(中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要:采用喷丸工艺引入表层残余应力,分析了循环载荷下 7075 铝合金试样的应力松弛规律,研究了喷丸工艺引入的初始残余应力状态、表层显微硬度及表面粗糙度对试样抗疲劳性能和残余应力松弛的影响。结果表明,喷丸引入的表层残余应力是提高试样抗疲劳性能的主要因素,但表层冷作程度及表面缺口效应对喷丸试样的低周、高周抗疲劳极限和残余应力松弛有很大影响。循环应力水平接近高周疲劳极限时,残余应力无明显松弛;应力水平接近低周疲劳极限时,残余应力发生早期大幅松弛,且残余应力峰外移。

关键词:喷丸; 7075 铝合金; 残余应力; 应力松弛; 显微硬度; 缺口效应

中图分类号: TG115.5; TG146

文献标识码: A

7xxx 系铝合金的抗拉强度高,但抗疲劳性能差^[1],工程上一般对其表面进行喷丸,从而引入表面残余压应力以抑制构件表面裂纹的萌生^[2-3],但也有文献指出喷丸会引起材料发生脆化而加速疲劳裂纹的扩展^[4]。大量文献^[5-7]认为,喷丸构件的表层残余应力场是影响材料疲劳特性的主要因素,进而人们对构件表面喷丸的局部残余应力的松弛特性进行了研究,如表面喷丸钢在循环载荷下残余应力的松弛、7075-T6 铝合金喷丸件的应力松弛及 7075-T651 喷丸试样的疲劳裂纹特性等。相比普通钢、不锈钢及钛合金,7xxx 系高强铝合金表面喷丸的残余应力松弛研究较少^[8-11]。本文通过喷丸对 7075 铝合金试样引入不同的初始残余应力状态、表层冷作程度及表面粗糙度,探求循环载荷下 7075 铝合金的抗疲劳性能及残余应力松弛的一般规律。

$=1.6\%$, $w(\text{Mg})=2.5\%$, $w(\text{Cr})=0.23\%$ 及 $w(\text{Zn})=5.6\%$,其余为 Al。首先用线切割法沿轧向取料,然后对取料表面进行铣削,试样尺寸如图 1 所示。

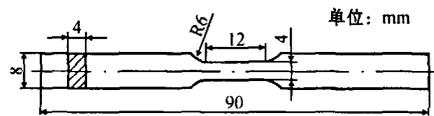


图 1 7075 铝合金试样

Fig. 1 7075 aluminum alloy specimen

首先对试样进行热处理,从室温开始,以 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率升温且保温 10 min,当达到固溶温度 480°C 后保温 1 h,然后采用水浴淬火,当预拉伸 2.5% 后于 120°C 下保温 5 h。用加拿大 Proto 公司生产的 iXRD 衍射仪测量试样表面残余应力为 $\pm 20\text{MPa}$,可认为试样无初始应力。用上海华龙 WPL-250 型万能疲劳试验机标定试件的力学性能及引入动应力幅,沿试样纵向进行单向拉伸实验,在初始应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,得到试样的弹性模量 E 、屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 、

1 实验部分

1.1 试样的制备

实验材料为 7075 铝合金,其主要成分为 $w(\text{Cu})$

收稿日期:2010-06-18

* 基金项目:国家重点基础研究发展规划项目 973 项目(2005CB623708;2010CB731703)

作者简介:胡永会(1985-),男,江苏徐州人,硕士研究生。

抗拉强度 σ_b 、断裂应力 σ_r 、断后伸长率 T. E. 及断面收缩率 R. A., 铝合金的力学性能列于表 1.

表 1 7075 铝合金试样单向拉伸的力学性能

Table 1 Monotonic tensile properties of the Al-7075 alloy

E/GPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	σ_r /MPa	T. E. /%	R. A. /%
69	495	554	742	14	19

1.2 喷丸处理

喷丸是一种表面冲击形式的冷处理方法,即无数个圆形颗粒状介质连续击打零件表面,导致无数凹陷重叠,从而形成均匀的残余压应力层^[12-13]. 7075 铝合金强度、硬度均高,但其很脆,表面缺口的

敏感性及脆性疲劳对强度影响较大.

将试样分为 4 组,其中 1 组不作喷丸处理,其余 3 组进行喷丸处理,喷丸处理设备为压送式干喷砂机,喷料选用玻璃珠,喷料的力学性能及喷丸工艺参数分别列于表 2 和表 3.

表 2 喷料的成分及物理性质

Table 2 Compositions and properties of the bead's material

喷料	成分	含量 w /%	莫氏硬度	密度/(g·cm ⁻³)
	SiO ₂	71		
玻璃珠	Al ₂ O ₃	2	7	2.5
	CaO	8		
	MgO	4		
	Na ₂ O	15		

表 3 三种喷丸强化工艺参数

Table 3 Parameters of the three shot peening treatments

喷丸处理工艺	喷料颗粒尺寸/ μm	压力/MPa	喷料速度/(m·s ⁻¹)	覆盖率/%
SP1	120	0.1	46	100
SP2	200	0.2	56	100
SP3	500	0.25	27	100

1.3 实验方法

1.3.1 喷丸试样表层特性测定

在载荷增量速率为 0.1 N/s、驻留时间为 10 s 和最大载荷为 1 N 的条件下,对试样逐层剥除,用维氏硬度测量仪测量试样表层显微硬度;用轮廓仪测量喷丸处理后试样表面的粗糙度,获得试样中心线的平均值及峰值的分布状况.

选取试样中心位置为 X 射线应力测量点,疲劳失效后选取远离断口处(大于 2 mm)测量. 测量靶

材为 CoK α , 测量参数为管电压 20 kV、管电流 4 mA、衍射晶面(331)、高斯拟合(Gaussian)定峰、准直管尺寸 2 mm×5 mm、弹性常数 $S_2/2$ 为 18.5606×10⁻⁶ 及在每个 Ψ_n 位置的摆动角度为 3°.

1.3.2 应力加载

对各试样进行循环加载,其中应力比 $R=-1$ 、加载频率为 30 Hz,各试样对应于 5×10^4 和 4×10^5 次周期时的疲劳极限分别为 $\sigma(5\times 10^4)$ 和 $\sigma(4\times 10^5)$,对称载荷为 σ_d ,循环加载实验的各项参数列于表 4.

表 4 循环加载实验的参数及指标

Table 4 Detail parameters of cyclic loading tests of specimens

序号	处理工艺	载荷周期/次	σ_d /MPa	$\sigma(4\times 10^5)$ /MPa	$\sigma(5\times 10^4)$ /MPa
0	SP0	—	—	161	238
1	SP1	4×10^5	± 226	226	270
2	SP1	4×10^4	± 250	226	270
3	SP1	5×10^4	± 270	226	270
4	SP1	5×10^4	± 300	226	270
5	SP2	4×10^5	± 217	211	298

(续上表)

序号	处理工艺	载荷周期/次	σ_a /MPa	$\sigma(4 \times 10^5)$ /MPa	$\sigma(5 \times 10^4)$ /MPa
6	SP2	4×10^5	± 250	211	298
7	SP2	5×10^4	± 298	211	298
8	SP2	5×10^4	± 320	211	298
9	SP3	4×10^5	± 177	177	257
10	SP3	4×10^5	± 220	177	257
11	SP3	5×10^4	± 257	177	257
12	SP3	5×10^4	± 300	177	257

2 结果与讨论

2.1 表层残余应力分布

采用逐层剥除法测量各试样的初始表层残余应力,修正后的结果见图 2。从图 2 可见,三种喷丸工艺引入的残余应力影响深度约为 100~300 μm ,且喷丸强度越高试样表层最大残余压应力越大,但整体应力分布有所不同。对于喷丸强度低的 SP1,表层残余应力峰值处于试样的最表面;喷丸强度较高的 SP2,残余应力峰值位于试样表面下约 50 μm 处;喷丸强度高的 SP3,残余应力峰值位于试样表面以下约 100 μm 处。这主要是因为 X 射线衍射法是测量晶格间距变化的一种方法,随喷丸强度增大,表层塑性加工影响的深度也增加,层内晶格间距发生较大地改变;X 射线衍射法测量得到的铝合金表面残余应力为垂直于测量方向、厚度为 20 μm 内的平均应力,喷丸强度较低时,试样浅表层的应力分布难以真实测量。

2.2 表层显微硬度分布

三种喷丸工艺与未经喷丸处理的试样表层显微硬度分布见图 3,考虑到材料的非均匀性与测量误差,结果为三次测量值的平均值。

显微硬度可直接反映试样表面加工硬化的历程,进而表征表层冷作程度及塑性变形影响深度。图 2 与图 3 比较可知,喷丸后试样表层的显微硬度分布与残余应力分布类似,即表面冷作程度越高,表层显微硬度峰值越大,且有向深层移动的趋势,三种喷丸工艺引入的显微硬度分布在约距表层 350 μm 处。材料表面喷丸引入残余应力是由于冷作造成的材料塑性加工硬化,但表层残余应力峰值与硬度峰值并不处于相同的位置,硬度峰值位于更深处。这主

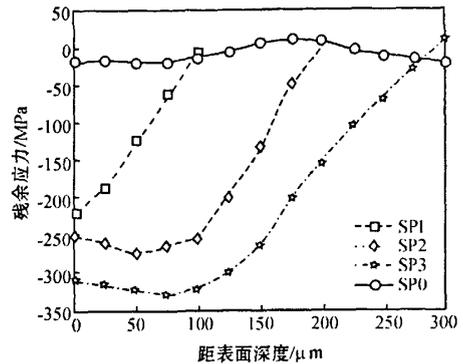


图 2 喷丸与未喷丸试样表层初始残余应力分布

Fig. 2 Initial residual stress distribution of the unpeened and peened specimens measured

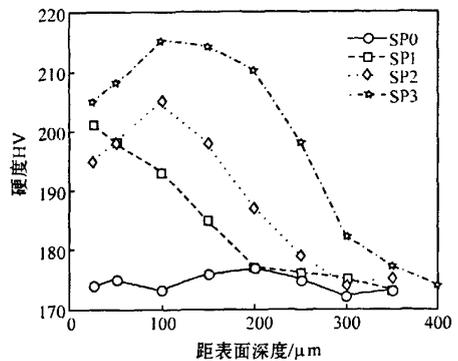


图 3 未喷丸与喷丸处理后的试样表层显微硬度分布

Fig. 3 Micro-hardness distribution of specimens of unpeened and shot-peened treatments

要是喷丸处理后,硬度峰值层的位错密度交互缠结,造成晶界逐步消失且晶粒破碎、细化,从而使材料更致密,应力峰值层位于可继续发生变形的较外层,并不是塑性变形量的最大层。另外,喷丸强度低时,表

面硬化影响层较浅,剥层测量时忽略了这一区域的显微硬度变化。

2.3 表面粗糙度分布

各试样表面粗糙度测量结果列于表 5,其中 R_a 为平均粗糙度、 R_t 为 2 mm 长度范围内的峰-谷间距均值、 R_q 为粗糙度的均方根、 D_p 为相邻粗糙峰的平均间距、应力集中系数 $K_t = 1 + 4(R_t/D_p)^{1.3}$ 。

表 5 表面粗糙度测量结果

处理工艺	R_a/mm	R_t/mm	R_q/mm	$D_p/\mu m$	K_t
SP0	0.21	0.63	0.24	—	—
SP1	1.32	5.9	1.62	132	1.070
SP2	2.06	9.2	2.83	148	1.108
SP3	3.52	16.7	4.46	187	1.173

表 6 三种喷丸工艺对试样各参数的影响结果

Table 6 Impacts of three shot-peened treatments on specimen properties

工艺	σ_{sur} /MPa	σ_{peak} /MPa	D_{eff} / μm	H_{sur} (HV)	H_{peak} (HV)	K_t	$\sigma(5 \times 10^4)$ /MPa	G_{low} /%	$\sigma(4 \times 10^5)$ /MPa	G_{high} /%
SP1	-220	-220	100	201	201	1.070	270	13.4	226	40.4
SP2	-251	-275	200	195	207	1.108	298	25.2	211	30.1
SP3	-309	-329	300	205	217	1.173	257	8.0	177	10.0

SP1 喷丸强度低且喷料颗粒尺寸小,冲击试样时所造成的表面粗糙度小、缺口效应低,对低周、高周疲劳极限提高幅度分别达到 13.4% 和 40.4%,但表面残余应力小且影响深度浅,残余应力峰位于最表面。

SP2 喷丸强度较高且喷料颗粒尺寸较大,冲击试样时所造成的残余应力影响的深度明显较 SP1 的增大,且残余应力峰值内移。较大的残余应力使低周疲劳极限提高至 25.2%,但同时表面粗糙度也增大,应力集中系数的增大降低了试样高周疲劳极限,使它仅达 30.1%。此时残余应力的影响仍大于表面缺口效应的影响。

SP3 喷丸强度高且喷料颗粒尺寸大,引入的表面缺口效应的不利影响因素甚至中和了残余应力的有利因素,此种喷丸处理对试样低周和高周的抗疲劳性能提高程度都很小,仅接近 10%。

2.4 循环载荷下残余应力松弛

对各试样进行循环加载实验,认为试样发生疲

试样表面粗糙度直接表征表面缺口效应的应力集中,对循环载荷下抗疲劳性能有很大影响。由表 5 可知,随着喷丸冷作程度越高、喷料颗粒越大,试样表面的粗糙度越大,缺口效应的应力集中系数也越大。

三种喷丸工艺对低周疲劳极限 G_{low} 、高周疲劳极限 G_{high} 、表面残余应力 σ_{sur} 、应力影响深度 D_{eff} 、应力峰值 σ_{peak} 、表面粗糙度 K_t 、表面显微硬度 H_{sur} 及硬度峰值 H_{peak} 等参数的影响结果列于表 6。由表 6 可知:经三种喷丸工艺处理后,试样表层的残余应力峰值范围为材料单向拉伸屈服强度的 0.44~0.67;喷丸工艺能提高试样的抗疲劳性能,这主要是由于引入了表层残余应力;循环载荷下的应力松弛、表层冷作程度及表面粗糙度所造成的缺口效应对试样的抗疲劳性能有不利的影

劳失效后表面残余应力处于最终稳定状态,此时采用剥层法测量试样的残余应力值,图 4 为各试样实验前后残余应力沿表层厚度方向的分布图。

从图 4 可知,喷丸引入的残余应力越大,表面粗糙度引起的缺口效应将越明显,表面集中应力系数的增大加剧了循环载荷下残余应力的松弛程度。这是由于当复合应力远小于材料屈服极限时,残余应力松弛不明显,且应力峰位置保持不变,预示疲劳裂纹源位置也不移动;当逐渐增加载荷,使其达到材料的局部塑性流动应力时,残余应力明显松弛;当载荷接近低周疲劳极限时,残余应力首先在表层以下的应力集中处发生大幅松弛,且由于表层喷丸冷作的原因,残余应力峰及残余拉压应力区皆向外层移动,预示着疲劳裂纹源位置也将发生移动;当载荷接近高周疲劳极限附近时,残余应力无明显松弛,这是由于高度冷作造成材料表层显微结构的塑性加工硬化,位错的萌生导致晶格畸变过强,这对材料内部造成扩散损伤,从而产生微裂纹^[14]。

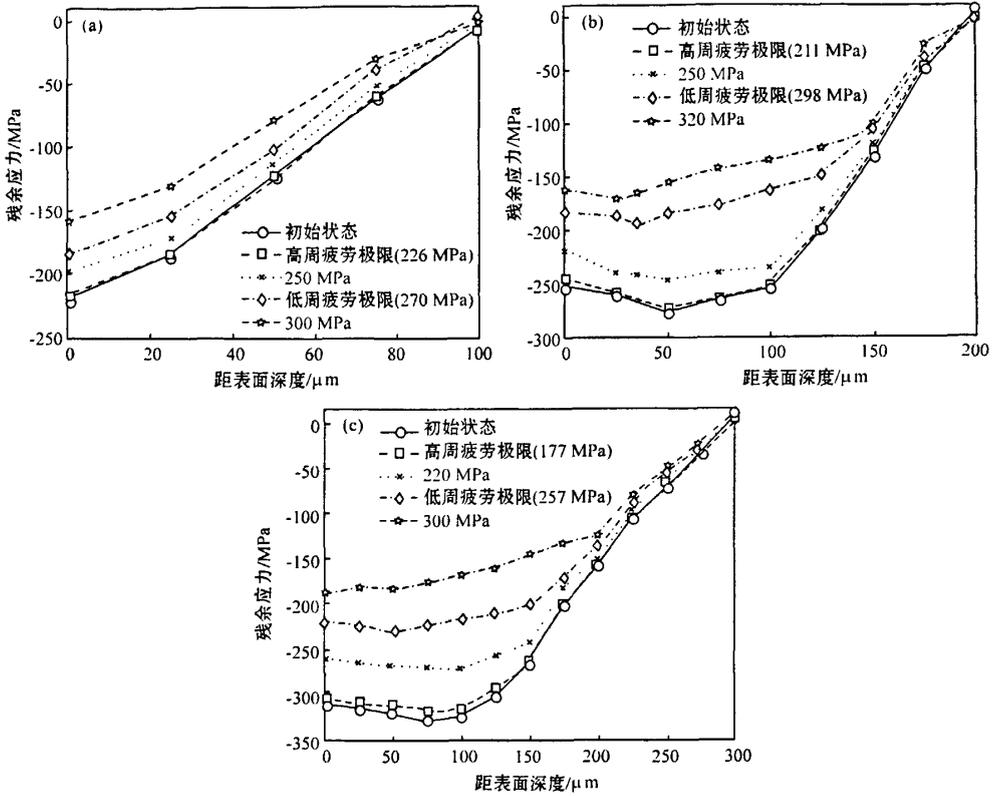


图 4 试样表面初始与稳定状态的残余应力分布

Fig. 4 Initial and stabilized residual stress distributions of 7075 aluminum alloy specimens

(a) SP1 treatment; (b) SP2 treatment; (c) SP3 treatment

一般认为,复合应力超过材料局部屈服极限时才会发生应力松弛现象.但图4也表明,在复合应力低于材料的屈服极限时残余应力也有所松弛,这是因为喷丸引入的表面冷作对材料屈服强度有显著影响.不同喷丸处理后试样的表层显微硬度和表面粗糙度引起的缺口效应也表明,试样内部存在局部屈服强度梯度.在加工过程中材料表面承受了复杂的应变历程,表现出多向应力状态屈服面^[15-16],从而造成表面微观屈服强度低于整体材料的屈服极限,所以在复合应力低于材料屈服强度时也有应力松弛的现象.

3 结论

(1)喷丸提高铝合金试样疲劳极限的主要因素是引入了表层压应力场.喷丸强度低时,残余应力

峰位于试样最表面,随着喷丸处理强度加大,残余应力峰值增大且向表层内移动.

(2)试样表层的显微硬度可表征表面冷作程度及塑性变形影响深度,喷丸试样表层硬度峰值层位于残余应力峰值层之下.

(3)喷丸冷作引入的材料表层局部屈服强度梯度,造成表面微观屈服强度低于整体材料的屈服极限,残余应力更容易松弛.

(4)喷丸引入的试样表面粗糙度对提高试样疲劳极限有很大影响.粗糙度过大,表面缺口效应明显,残余压应力场的作用将被严重削弱.

(5)高周疲劳极限附近,残余应力松弛不明显,应力集中层保持不变;随着载荷加大,达到材料的局部塑性流动应力,尤其在低周疲劳载荷附近,早期即发生明显的应力松弛,且应力集中区向外层移动.

参考文献:

- [1] SMITH D J, FARRAHI G H, ZHU W X, et al. Experimental measurement and finite element simulation of the interaction between residual stresses and mechanical loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23: 293-302.
- [2] 王亚男, 陈树江, 董希淳. 位错理论及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [3] RAO D, WANG D, CHEN L, et al. The Effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29: 192-196.
- [4] WAGNER L, LÜTJERING G. Influence of shot peening parameters on the surface layer properties and the fatigue life of Ti-6Al-4V[C]. *Paramus(NJ)*: American Shot Peening Society, 1984: 194-200.
- [5] ZHUANG W Z, HALFORD G R. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23: S31-S37.
- [6] SHINDE S R, HOEPFNER D W. Fretting fatigue behavior in 7075-T6 aluminum alloy[J]. *Wear*, 2006, 261: 426-434.
- [7] 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]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 1125-1236.
- [8] MCLUNG R C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue[J]. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2007, 30: 173-205.
- [9] 吴运新, 廖凯. 铝合金厚板拉伸过程横向残余应力消减分析[J]. *材料工程*, 2008(10): 45-48.
- [10] 朱伟, 彭大暑, 张辉, 等. 7075 铝合金厚板淬火残余应力消除工艺的研究[J]. *铝加工*, 2002(2): 25.
- [11] M B PRIME, M R HILL. Residual stress relief and inhomogeneity in aluminum plate[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46: 77-82.
- [12] KOCKS U F. Laws for work-hardening and low-temperature creep[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1976, 98: 76-85.
- [13] KODAMA S. The behavior of residual stress during fatigue stress cycle[C]. *Kyoto: Society of Material Science*, 1972: 111-118.
- [14] 杨君宝. 基于位错理论的振动消应力的机理研究[J]. *机械研究与应用*, 2007, 20(2): 62-64.
- [15] 王宏伟, 马晋生, 南俊马, 等. 表面微观屈服强度与疲劳极限的关系[J]. *金属学报*, 1991, 27(5): A365-369.
- [16] ZHAO T, JIANG Y. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy[J]. *Int J Fatigue*, 2008, 30(8): 34-49.

Residual stress relaxation of shot peened 7075 aluminum alloy under cyclic load

HU Yong-hui, WU Yun-xin, CHEN Lei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Effects of different shot peening treatments on the cyclic loading fatigue of 7075 aluminum alloy were studied by X-ray diffraction measurements. Impacts of initial residual stress state, surface micro-hardness and surface roughness on residual stress relaxation were analyzed. The improvement of aluminum alloy specimens' fatigue resistance is attributed to the compressive residual stress field in the surface layers. No significant residual stress relaxation occurs under the load level corresponding to the fatigue endurance at $4 \cdot 10^5$ cycles. Large residual stress relaxation occurs at an early stage under the load level corresponding to the fatigue endurance at $5 \cdot 10^1$ cycles. Accordingly, the residual peak stress moves outside from the surface layers. Surface cold work and surface notch effect exerted by roughness dimples produce great effects on fatigue performance at low or high cycles as well as residual stress relaxation.

Key words: shot peening; 7075 aluminum alloy; residual stress; stress relaxation; micro-hardness; notch effect