doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2014.02.013

铝合金超声喷丸残余应力场 *

郭超亚,鲁世红

(南京航空航天大学 机电学院,南京 210016)

摘 要:为定量探索喷丸工艺参数对超声喷丸后材料表层残余应力场分布和硬化程度的影响规律,采用 X 射线衍射法研究了撞针式超声喷丸后 7055-T7751 铝合金表层残余应力和半高宽的分布情况。结果表明:超 声喷丸残余应力场分布深度(*Z*_o)、最大残余压应力值(σ_{mrs})及其深度(*Z*_m)在一定范围内随冲击振幅(*f*)和撞 针直径(*d*)的增加而增大。最佳工艺参数有两组,分别为 2 mm 直径撞针和 80%冲击振幅、3 mm 直径撞针和 70%冲击振幅,两者使最大残余压应力分布深度提高 1.31 倍以上,且使材料冷作硬化层深度提高 0.7 mm 以 上,并分别将最大残余压应力值提高到喷丸前的 6.8 倍和 8.14 倍。分析认为,超声喷丸对优化材料表面残 余压应力场方面效果显著,适当强度的超声喷丸能够有效提高材料疲劳极限、表面冷作硬化程度。

Residual Stress of Ultrasonic Shot Peened Aluminum Alloy

GUO Chao-ya, LU Shi-hong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: To quantitatively explore the effects of peening parameters on surface residual stress distribution and hardening degree of shot peened materials, X-ray diffraction method was adopted to analyze the distribution of surface residual stress field and half-width of diffraction peak of ultrasonic needle peening (UNP) 7055-T7751 aluminum alloy, which provided a reference for UNP application and research. The results shows that the depth of the residual compressive stress filed (Z_0), the maximum residual compressive stress (σ_{mrs}) and its depth (Z_m) increase with the increase of amplitude of vibration (f) and diameter of needle (d); Two sets of optimum parameters are obtained, i. e. 2 mm in diameter of the needle with the 80% amplitude of vibration and 3 mm in diameter of the needle with 70% amplitude of vibration, which increase the depth of σ_{mrs} by more than 1.31 times and depth of the hardened layer by more than 0.7 mm, and σ_{mrs} increases by 6.8 and 8.14 times, respectively. UNP has great performance in optimizing material residual stress field, and can improve fatigue resistance and cold hardening degree of metal material with proper peening intensity.

Key words: ultrasonic shot peening; 7055-T7751; aluminum alloy; residual stress; full width at half maximum(FWHM)

0 引 言

超声喷丸技术是利用超声波使变幅杆产生 高频振动,从而驱使弹丸对工件表面进行撞击, 使材料力学性能、疲劳性能等得到改善,并向受 喷一侧发生弯曲的先进喷丸工艺,该工艺可获得 比传统喷丸更深的残余压应力层,残余压应力场

收稿日期: 2013-11-06; 修回日期: 2014-02-15; 基金项目: *国家自然科学基金(51175257); 江苏省第九批六大人才高峰资助(ZBZZ -032)

作者简介:郭超亚(1989-),男(汉),安徽阜阳人,硕士生;研究方向:先进钣金成形技术

网络出版日期: 2014-03-18 16:38; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140318.1638.001.html 引文格式: 郭超亚, 鲁世红. 铝合金超声喷丸残余应力场 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 75-80.

的特征数值更大,表面质量也更佳^[1-4]。1996年, SONATS公司提出采用端头具有不同曲率半径 的撞针替代弹丸,并已研发出一套撞针式超声喷 丸设备,该设备和方法较传统喷丸具有无污染、喷 针可循环利用等优点,在航空航天领域的机翼下壁 板等结构件的校形和强化方面得到了广泛应用,并 已在数控超声波喷丸成形方向有所发展^[5]。

目前,国内外对超声喷丸技术做了大量的研 究。Amir Abdullah、Shohei Kawano 等人^[6-7]对 传统喷丸和超声喷丸后不同材料的残余应力场 和表面粗糙度进行了研究,结果表明超声喷丸完 全可作为一种较传统喷丸更优异的喷丸技术用 于多种材料的强化处理;Rodopoulos C A 等人^[8] 则定量研究了超声喷丸后焊接件的残余应力场 分布:Sandá A、史学刚等人[9-10]采用 XRD 技术研 究了超声波喷丸工艺参数对 Inconel 718 合金和 2024 航空铝合金的残余应力、显微硬度等表面完 整性特征的影响。当采用 XRD 技术进行上述研 究时,同时得到半高宽(Full width at half maximum,FWHM)等数据,例如,Bagherifard等人研究 表明半高宽是与材料表面状态、晶粒尺寸及内部晶 格应变相关的强化指标,它随着由细化层到粗晶粒 层材料的结构梯度发生变化,且高能喷丸能够在试 样表面形成较传统喷丸更深的晶粒细化层[11]。

7055-T7751 铝合金具有 600 MPa 级的超高 强度和优异的抗应力腐蚀性能,主要应用于机翼 壁板等关键承力构件,在较大应力腐蚀状态下承 受较大的交变载荷^[12]。文中采用 XRD 技术对不 同撞针直径、冲击振幅下超声喷丸 7055-T7751 铝合金的残余应力场进行研究,为建立超声波撞 针喷丸(Ultrasonic needle peening, UNP)工艺 数据库提供借鉴。

1 原理与步骤

1.1 X射线应力测量理论分析

当强度为 I 的 X 射线束照射到材料表面,在 指定的晶面指数下,晶面法向 $N_0 \sim N_4$ 在照射区是 呈均匀分布的,由于 X 射线相对于晶面间距 $d_0 \sim d_4$ 足够大,会在晶面与晶面之间发生衍射,衍射 角为 2θ ,如图 1 所示。

根据布拉格方程定律(见公式(1),式中 λ 为 波长,n为衍射级数, d_s 为晶面间距),如果晶面 间距 $d_0 \sim d_4$ 在误差范围内相等,则无应力,如果



图 1 X射线应力测定原理与半高宽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the XRD measurement principle and FWHM

由 d_0 到 d_4 逐渐增大,则存在拉应力,反之则为压 应力。

$$n\lambda = d_s \sin\theta \ (n=1, 2, 3 \cdots)$$
 (1)

超声喷丸技术在材料表面引入的残余应力 是由于其内部晶粒或亚晶粒之间的变形不均匀 性产生的,其作用范围与晶粒尺寸相当,属于微 观应力,该微观应力的变化使不同区域、不同衍 射角度下的衍射效应发生变化,其中半高宽为衍 射线最大强度一半处的宽度β,它反映了超声喷 丸后材料冷作硬化程度和晶体内部位错密度等 微观组织行为^[13]。

1.2 材料与方法

试验材料是 7055 – T7751 铝合金,室温下屈服强度 σ_s 为 617 MPa,抗拉强度 σ_b 为 630 MPa, 显微硬度为(210 ± 10) HV,弹性模量 E 为 72 GPa。

喷丸设备为 SONATS 撞针式超声喷丸设备,由超声波发生单元和手持喷丸工具头组成, 撞针直径有 1.2、2.0、3.0 和 4.0 mm 4 种,对应 的冲击振幅为 0~40%、0~80%、0~100%和 0~ 100%;对应喷丸工件厚度为 2~5 mm、4~ 8 mm、7~13 mm 和≥12 mm;试验采用多点冲 击的方式进行。

残余应力测试设备为 Proto 腐蚀设备和 Proto 残余应力测试仪,腐蚀液成分为氯化铵和甘 油,每次腐蚀时间 30~50 s,腐蚀电压 80~95 V, 电极直径 12 mm,流速 4 L/h,并在电极管道口加 封网状物(如医用纱布)防止腐蚀液流速分布不 均而造成腐蚀面不平滑,如图 2 所示,试验证明 该方法是极其有效的。



77



1-Electrode; 2-Pipeline; 3-Electrolytic end; 4-Flowing electrolyte without gauze; 5-Flowing electrolyte with gauze; 6-Specimen

图 2 改进后的电解抛光腐蚀方法 Fig. 2 Optimized method of electrical polishing

残余应力测试仪配备1个X射线管、2个 PSSD 光纤基固态 X 射线探测器,采用同倾固定 ϕ 加摆动法测量,管电压为 20 kV,管电流为 4 mA, Cr 靶材 Kα 辐射,测试晶面为(311),曝光时间 2 s,曝光次数 10 次,光缝直径 4 mm。试验前对 材料表面进行 5~10 s 的腐蚀,去除表面氧化皮, 以确保试验测量的准确性。根据设备工艺要求和 试验研究目的,制定试验计划如表1所示。

↓ 私戸波浬钉喷丸试掘上之梦9

Table 1 Parameters of the UNP experiment			
Specimen thickness/ mm	Needle diameter/ mm	Vibration degree/	
4	1.2	25, 35, 40	
4	2.0	40,60,80	
12	3.0	40,70,100	
12	4.0	40,70,100	

结果与分析 2

为更好地描述喷丸后残余压应力场的特征, 将其归纳为3个特征参量,即最大残余压应力 σmrs、最大残余压应力深度 Zm 和残余压应力场深 度 Z₀,研究涉及的工艺参数包括撞针直径 d 和冲 击振幅*f*。

未喷丸试样的残余应力分布如图 3 所示。 可知,未喷丸试样表层残余应力为压应力,随层 深的增加趋于一个稳定区间,最大残余压应力值 及其深度为-167.1 MPa 和 0.07 mm。分析判

断该现象主要是由数控铣削造成的,在低速铣削 时,切削力较大,产生明显的"挤光"效应,同时, 由于工件表面温度较低,"挤光"效应引起的残余 压应力大于热载荷引起的残余拉应力[14]。



图 3 原始状态下 7055-T7751 的表面残余应力场 Fig. 3 Surface residual stress field of the initial 7055-T7751

2.1 冲击振幅对残余应力分布的影响

图 4 为超声喷丸冲击振幅对材料残余应力场 的影响。由图可见,撞针直径为1.2 mm 和 2.0 mm时, 随冲击振幅增加材料残余应力场的特 征参量增大,前者 σ_{mrs} 和 Z_m 的最大增幅达 1.18 倍 和 2.85 倍,后者在 f 为 80% 时达到 1.31 倍和 8.14 倍,即残余压应力最大值随 d 增大的增幅远 小于 Z_m 的增幅。撞针直径为 3 mm 时, 随冲击 振幅由 40%提高到 70%,残余应力特征量随之变 大,但最大残余压应力增幅仅为-5 MPa, Zm 增 幅为 0.11 mm; f 为 100%时, omrs、Zm 和 Zo 明显 减小,且 σ_{mrs}和 Z_m 的降幅达 33.8 MPa 和 0.3 mm。 撞针直径为4 mm 时,随冲击振幅的增加残余应 力场的分布曲线出现交叉,残余应力场特征参量 变化不大,且远小于 d=3 mm、f=70%时的残余 应力特征参量。

上述现象表明:①超声喷丸后 7055-T7751 铝合金的 σ_{mrs} 、 Z_m 和 Z_0 较原始状态都有所增加, 且增幅较大,说明超声喷丸对改善 7055-T7751 铝合金内部残余应力分布的作用是明显的。② 随冲击振幅增加,喷丸影响层逐渐向内推进,造 成应变硬化程度和深度逐渐增大。③当采用 3 mm撞针和 70%冲击振幅时,材料超声喷丸强 化达到饱和,继续增加冲击强度,则可能导致材 料表面的累积塑性变形过大,甚至引入微裂纹, 削弱超声喷丸的强化效果。④工程应用中,根据 设备参数要求,在处理 4 mm 左右厚度的 7055-T7751 铝合金件时,其最佳喷丸参数为 2 mm 直 径撞针、80%冲击振幅;在处理 12 mm 左右厚度 的 7055-T7751 铝合金件时,其最佳超声喷丸参 数为 3 mm 直径撞针、70%冲击振幅。此外,试验 发现当冲击能足够大时,应力曲线出现较为稳定 的应力平台(图中圆圈标记所示),平台深度范围 为(Z_m±0.2) mm 左右,远大于传统喷丸或弹丸 式超声喷丸的饱和平台深度。该区域与材料表 面距离远,残余压应力数值大,累积塑性应变最 大,是可能出现微裂纹的敏感区域,因此值得对 其形成机理展开进一步研究。



图 4 冲击振幅对残余应力分布的影响 Fig. 4 Effect of the impact amplitude on residual stress

2.2 撞针直径对残余应力分布的影响

图 5 为撞针直径对材料残余应力场的影响。 冲击振幅为 40%时,材料残余应力场的 σ_{mrs} 、 Z_m 和 Z_0 随直径的增大而增大,在 d 为 3 mm 时达到 饱和,随后喷丸残余应力场削弱,即冲击强度对 材料内部残余应力场的影响达到饱和;冲击振幅 f 为 70%时, σ_{mrs} 、 Z_m 随撞针直径增大而增大,但 Z_0 基本保持不变;冲击振幅为 100%时,应力曲 线出现交叉,但最大残余压应力值差别不大。上 述现象说明,在一定的冲击振幅下, σ_{mrs} 、 Z_m 和 Z_0 随撞针直径增大而增大直至饱和;但当冲击振幅 足够大时,撞针直径对残余应力场分布的影响主 要表现在应力场的分布深度和最大残余应力的 分布深度上,对最大残余压应力值的影响较小。 这是由于最大残余压应力值与材料屈服强度有 关,因此变化不显著,这与王明涛等人^[15]得到的 结果一致。

此外,根据文献[16]关于疲劳极限的描述, 疲劳源在材料表面或内部形成的极限条件不同:

表面萌生裂缝时: $\sigma_{wps} + \sigma_{rs} = \sigma_{ws}$ (2)

内部萌生裂缝时:
$$\sigma_{wpi} + \sigma_{ri} = \sigma_{wi}$$
 (3)

式中 σ_{wps}、σ_{wpi}分别为疲劳极限条件下表面载 荷应力和内部载荷应力;σ_{rs}、σ_{ri}分别为材料表面和 内部残余应力;σ_{ws}、σ_{wi}为表面和内部疲劳极限。 结合上述分析可知,超声喷丸后试样表面存在较 大的残余压应力,起到抵消部分外载荷作用,因 此在σ_{ws}不变的情况下,疲劳源产生所需的σ_{wps}升 高;而在喷丸应力影响层下面,σ_{ri}趋向于正值,因 此所需的σ_{wpi}降低,这两种现象说明喷丸影响层 提高了表象疲劳极限,将裂纹源"推"进材料内 部,因此起到抑制表面裂纹产生的作用。



图 5 撞针直径对残余应力分布的影响 Fig. 5 Effect of the needle diameter on residual stress

2.3 半高宽

X 射线衍射峰半高宽指的是衍射峰最大强 度 1/2 处所占的角度范围。在射线接收狭缝确 定的情况下,半高宽大小受材料晶粒大小(晶粒 碎化的程度)、微观应力大小、晶体位错密度高低 等的影响。晶粒碎化、微观残余应力增大或位错 密度增高,都会导致半高宽增加。因此半高宽反 映了材料冷作硬化程度、微观残余应力的大小以 及晶体内部位错密度的高低^[17]。

图 6 为两组最佳工艺参数下半高宽沿层深的 分布。可见,未经超声喷丸试样的半高宽在 0~ 0.3 mm深度范围内很快由 3.043°下降至2.5°,随 后缓慢下降至 2.3°左右。这是数控铣削对试样



图 6 最佳工艺参数下材料沿厚度方向 FWHM 分布 Fig. 6 In-depth FWHM under optimum conditions

表面的冷作硬化作用造成的。经2mm 撞针在 80%冲击振幅下超声喷丸后,试样表面的半高宽 提高至3.272°左右,在0~0.3mm 深度范围内的 下降速率较未喷丸试样低,在0.6~1.3mm 深度 范围内基本保持不变;经3mm 撞针在70%的冲 击振幅下超声喷丸后7055-T7751 铝合金沿层深 的半高宽分布与前者较为相似,但同一深度水平 的半高宽值较前者高。该现象说明了超声波喷 丸能够有效促进材料内部冷作硬化以及位错增 殖,并大幅度提高冷作硬化的深度,且随撞针直 径的增加,该冷作硬化程度加剧。

3 结 论

(1) 超声喷丸对改善 7055-T7751 内部残余 应力分布效果显著, omrs、Zm 和 Zo 在一定范围内 随冲击振幅和撞针直径的增加而增大,但随撞针 直径的增大其增大幅度相对较小,并在 3 mm 撞 针和 70%冲击振幅时达到饱和,继续增大冲击强 度,则会使材料表层累积塑性变形量过大,削弱 强化效果。

(2) 对于 7055 - T7751 铝合金零件,当待喷 区域厚度在 4 mm 左右时,2 mm 直径撞针和 80%冲击振幅为最佳喷丸工艺参数, σ_{mrs} 和 Z_m 分 别为原始状态的 6.8 倍和 1.31 倍;当待喷区域厚 度在 12 mm 左右时,3 mm 直径撞针和 70%冲击 振幅为最佳喷丸工艺参数, σ_{mrs} 和 Z_m 分别为原始 状态的 8.14 倍和 1.33 倍。

(3)超声喷丸能提高 7055-T7751 铝合金材 料的表象疲劳极限,将裂纹源"推"进材料内部, 因此起到抑制表面裂纹产生的作用。

(4) 超声喷丸能够显著加深材料内部冷作硬 化程度及深度,在两组最佳喷丸工艺参数下,其 硬化深度较原始状态可提高 0.7 mm 以上。

参考文献

- [1] Yang X J, Zhou Q X, Ling X. Study on plastic damage of AISI 304 stainless steel induced by ultrasonic impact treatment [J]. Materials and Design, 2012, 36: 477-481.
- [2] Yu H, Dong J L, Yoo D H. Effect of ultrasonic and air blast shot peening on the microstructural evolution and mechanical properties of SUS304 [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2009, 54(3):1161-6.

- [3] 张新华,曾元松,王东坡,等.超声喷丸强化 7075-T651 铝 合金表面性能研究 [J]. 航空制造技术,2008,(13):78-90.
- [4] 鲁世红,朱一枫,刘朝训,等.高能超声波喷丸成形与校 形技术研究进展[J].航空制造技术,2013(11):45-47.
- [5] Sylvain F. Extending the fatigue life of bridges using stressonic® needle peening [J/OL]. The Shot Peener, 2007.
- [6] Amir A, Massoud M, Ahmad E. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening [J]. Materials and Design, 2012, 38: 7-18.
- [7] Shohei K, Ayaka K. Development of ultrasonic shot peening technique for reactor components to improve structural integrity against stress corrosion cracking [C]. Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, 2009: 1-5.
- [8] Rodopoulos C A, Pantelakis S G, Papadopoulos M P. The effect of ultrasonic impact treatment on the fatigue resistance of friction stir welded panels [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(9): 1248-57.
- [9] Sandá A, García Navas V, O Gonzalo. Surface state of inconel 718 ultrasonic shot peened.effect of processing time, material and quality of shot balls and distance from radiating surface to sample [J]. Materials and Design, 2011, 32 (4): 2213-20.
- [10] 史学刚,鲁世红,张炜. 铝合金超声波喷丸成形制件表面 完整性研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(22): 3100-4.
- [11] Bagherifard S, Fernandez Pariente I, Ghelichi R, et al. Fatigue properties of nanocrystallized surfaces obtained by high energy shot peening [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1683-90.
- [12] Chen J Z, Zhen L, Yang S J. Effects of precipitates on fatigue crack growth rate of AA 7055 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(12): 2209-14.
- [13] 王欣,蔡建明,王强,等.喷丸表面覆盖率对Ti60高温钛 合金疲劳性能的影响[J].中国表面工程,2011,24(5): 58-63.
- [14] 苗勇.大型整体结构件铣削加工的变形研究 [D]. 江苏: 南京理工大学, 2012.
- [15] 王明涛,曾元松,黄遐.大尺寸弹丸喷丸成形 2024-T351 铝 合金表面质量研究 [J]. 航空制造技术, 2012(5): 92-94.
- [16] 张志建,姚枚,李金魁,等. 喷丸强化表象疲劳极限优化 研究[J]. 机械工程材料,2003,27(10):7-11.
- [17] 张定铨,何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作 用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1999:185-187.

作者地址:江苏省南京市秦淮区御道街 29 号 210016 南京航空航天大学机电学院 Tel:(025)86896440 E-mail: gongwuguochaoya@126.com

(责任编辑:黄艳斐)