

金属材料的超声冲击残余应力研究*

汪 勇¹, 魏 敏¹, 宋占永¹, 张 伟¹, 吕克茂²

(1. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072; 2. 爱斯特应力技术有限公司, 河北 邯郸 056000)

摘 要: 采用 X 射线衍射法测定经过超声冲击的金属材料残余应力, 通过对衍射峰半高宽沿层深的分布进行分析, 得到在一定的超声冲击工艺下, 残余压应力层的深度可以达到近 2 mm, 而冲击引起的晶粒碎化层深度亦可达到 1 mm。分析认为, 适度的残余压应力和半高宽增大有利于提高金属材料的疲劳强度。

关键词: 超声冲击; X 射线衍射; 残余应力; 半高宽

中图分类号: TG115.222

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)02-0080-03

Research on the Residual Stress of Metallic Material Treated by Ultrasonic Impacting

WANG Yong¹, WEI Min¹, SONG Zhan-yong, ZHANG Wei¹, LV Ke-mao²

(1. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 2. Handan Stress Technologies Co., Ltd, Handan Hebei 056000)

Abstract: X-ray diffraction method was adopted to measure and analyze the residual stress of metal material treated by ultrasonic impacting, and analyze the distributing of half-width of diffraction peak along the layer thickness. The results indicated the depth of residual stress can reach about 2 mm under stated ultrasonic impacting treatment, and the depth of crystal grain's broken layer can reach 1 mm. Increasing proper residual stress and half-width can improve fatigue resistance of metal material.

Key words: ultrasonic impacting; X-ray diffraction; residual stress; half-width

0 引 言

采用超声冲击技术对金属焊缝进行处理, 能够调整焊接残余应力状态, 改善焊缝金属组织, 提高疲劳强度。早在上世纪 70 年代初期前苏联便开始把这项技术应用于海军核潜艇结构上。目前已受到国际焊接学会的高度重视, 美国、俄罗斯、德国、日本等国家已对该技术进行了深入研究并对其实际应用进行了探讨。近年来国内一些高等院校、科研单位和企业也开始关注这项技术, 展开了相关的实验研究, 并着手实际应用。但是到目前为止针对超声冲击的作用深度问题并没有明确的研究成果。而作用深度对调整残余应力、改善组织、提高疲劳强度均有显著影响, 同时也在再制造领域得到了应用, 引起了人们的普遍关注。

收稿日期: 2010-12-20; 修回日期: 2011-03-29

基金项目: *再制造技术重点实验室基金项目(9140C850304 090C8501)

作者简介: 汪勇(1980—), 男(汉), 安徽合肥人, 讲师, 硕士生。

1 试验部分

1.1 研究作用深度的方法

残余应力的测定原理基于 X 射线衍射理论。当一束波长为 λ 的 X 射线照射到多晶体上, 会发生衍射现象 (如图 1)。X 射线的波长 λ 、衍射晶面间距 d 和衍射角 2θ 之间遵从布拉格定律:

$$2d \cdot \sin\theta = n\lambda \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

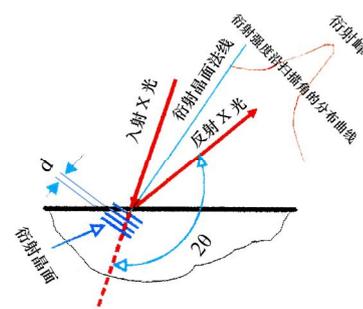


图 1 X 射线衍射现象

Fig.1 Phenomenon of X-ray diffraction

当材料中有应力 σ 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,衍射角 2θ 也会相应改变。因此通过测量衍射角 2θ 随晶面取向不同而发生的变化可求得应力 σ 。

对于各向同性的多晶材料,在平面应力状况下,由布拉格定律和弹性理论可以导出,应力值 σ 正比于 2θ 随 $\text{Sin}^2\psi$ 变化的斜率 M (如图2所示),即:

$$\sigma = K \cdot M$$

$$M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \text{Sin}^2\psi}$$

式中 K 为应力常数, ψ 为试样表面法线与晶面法线夹角,

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

式中 E 为杨氏模量, μ 为泊松比, θ_0 为无应力状态的布拉格角。对于指定材料, K 值可以从资料中查出或通过试验求出。这样,测定应力实质上就变成选定若干 ψ 角测定对应的衍射角 2θ 的过程^[1]。

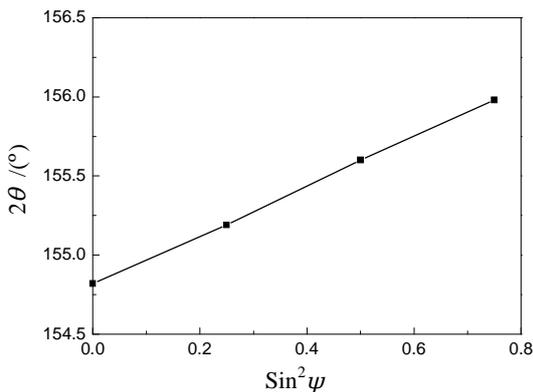


图2 2θ 随 $\text{Sin}^2\psi$ 变化的斜率
Fig.2 Slope of 2θ along with $\text{Sin}^2\psi$

为了描述只有在严格的2倍布拉格角上才会出现衍射的角度范围这一现象便引入一个叫做半高宽 B 的物理量,其是衍射峰最大强度 $1/2$ 处所占的角度范围。半高宽的大小既有几何因素,又有物理因素。几何因素主要是接收狭缝的大小,这在衍射装置中是可以固定的。而物理因素则包括材料的晶粒大小(嵌镶块的大小,或说晶粒碎化的程度),微观应力的大小,晶体中位错密度的高低等。晶粒碎化或产生嵌镶块,微观残余应力增大,位错密度增高,都会导致衍射峰宽化,即半高宽增加^[2]。

1.2 试样制备

选用45钢,加工成 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的

试块,表面磨削。在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下 1 h 退火处理后,用细砂纸除去表面氧化层,再采用电解抛光的办法去除砂磨层及磨削痕迹,以至显露材料细砂状的宏观组织。在此情况下,使用 X 射线应力测定仪测定试块的残余应力,结果表明垂直和平行原磨削方向(分别记为 X 和 Y)的应力值,在测量误差范围内,均接近于零。

接下来,使用 HT2009-2 型超声冲击设备对试块单面进行冲击,冲击功率为 300 W ,冲击频率为 20 kHz ,冲击速率为 3 min/cm^2 ,冲击面积为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 。

1.3 测试方法和条件

测试仪器为 X-350A 型 X 射线应力测定仪,测量方法采用侧倾固定 ψ 法,通过交相关法进行定峰,衍射晶面为 $\alpha\text{-Fe}(211)$,X 射线管高压为 25 kV ,管电流为 7 mA ,测试点位置为试块中心点,X 射线照射面直径为 6 mm ,剥层方法采用 XF-1 型电解抛光机,笔式抛光头,对测试点进行局部剥层,剥层面积 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。抛光电压 18 V ,电流 5 A 。

2 试验结果与分析

X 射线应力测定的结果如图3和图4所示。

图3表明原来退火状态的试块,经过超声冲击,表面产生了很大的压应力。就当前选用的材料和冲击工艺而言,残余压应力区的深度达 1.8 mm 。进一步分析,压应力沿层深分布可以分为3个阶段:① 表面至 0.15 mm ,为高应力和较快下降区。极表层压应力达到 $-450\text{ MPa} \sim -520\text{ MPa}$,接着沿着层深应力很快下降至 -300 MPa 以下。② $0.15 \sim 1.0\text{ mm}$,为压应力维持区,应力值相对稳定,维持在 $-190\text{ MPa} \sim -250\text{ MPa}$ 范围。③ $1.0 \sim 1.8\text{ mm}$ 压应力缓慢下降区,应力值从 -200 MPa 逐步降至零。

图4表明经过超声冲击材料表面衍射峰半高宽显著增大。可以看到,半高宽与残余应力有着相对应的变化规律,也可分为3段:① 超声冲击表面半高宽达到 4° ,这对于45钢来说也是半高宽最大值。在由表面至 0.15 mm 深度范围里较快下降,但是在此区间最低仍为 2.5° ,明显大于未冲击的数值。② 在 0.15 mm 至 1 mm 的区间,半高宽缓慢减小。③ 深度超过 1 mm ,半高宽基本不变,而且与未作冲击处理的半高宽数值持平。

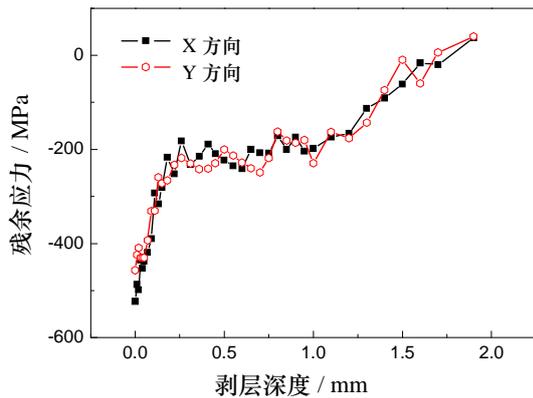


图3 超声冲击引起的残余应力沿层深分布

Fig.3 The distributing of residual stress along the layer thickness by ultrasonic impacting treatment

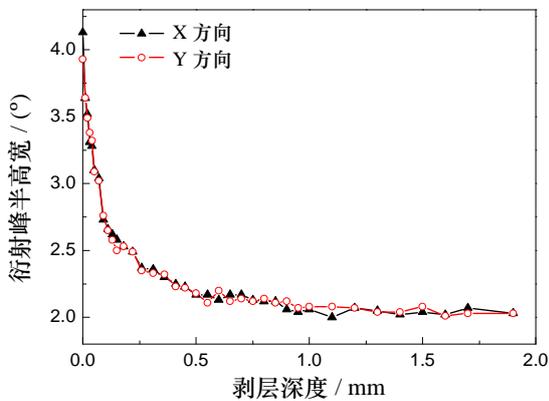


图4 超声冲击引起的衍射峰半高宽沿层深分布

Fig.4 The distributing of half-width of diffraction peak along the layer thickness by ultrasonic impacting treatment

以上结果表明表面的半高宽达到极大,产生了较大的塑性变形,晶粒严重碎化,位错密度极高,微观残余应力很大。强有力的冲击作用会由表面向里传导,但是发生的效应会越来越弱,特别是晶粒碎化的程度会较快降低,故而半高宽随之较快下降;至于半高宽缓慢减小的区间,我们可以暂且猜想在这里晶粒碎化的因素对于衍射峰宽化所起的作用越来越小,余下的是因冲击而增加的位错密度和微观应力导致宽化;随着层深的增加,后二者缓慢递减,所以半高宽也随之缓慢减小。

上述应力沿层深分布的3个阶段与半高宽的3个阶段是完全对应的。在冲击作用下表面发生较大的塑性变形,金属有向四周扩展的强烈趋势,但是受到下层金属的牵制,表面必然产生很大的残余压应力;与这种由表及里较快递减的塑性变形相对应,压应力也较快递减;最有趣的是压应力保持区与半高宽缓慢减小区相吻合(参见图3,图4),

这说明在冲击带来的组织变化结束之前压应力不会明显降低;只有到了组织不受影响的区域,即半高宽与未冲击时一样水平,压应力才会缓慢降低下来。对于退火试样压应力逐步降至零,再往里还会出现拉应力,与表层的压应力相平衡。

当金属结构承受交变载荷时,可能发生的失效主要应当是疲劳断裂,而疲劳源大多产生于表层或近表层。上述第一段的高应力和第二段压应力维持区恰好与裂纹萌生和慢速扩展区重合。在疲劳过程中残余应力起到平均应力的作用^[1],一定水平的压应力可以提高疲劳强度。再从组织变化的角度来说,晶粒碎化、位错密度增高、微观应力增大等都属于形变强化的范畴,这些效应都会阻止疲劳裂纹的萌生和扩展,所以也有利于提高疲劳强度。

3 结论

(1) 超声冲击引起的残余应力沿层深分布可分为三段:高的压应力和压应力值较快下降区,深度约0.15 mm;压应力维持区,深度约0.85 mm;压应力缓慢下降区,约0.8 mm。总的压应力深度达到1.8 mm。

(2) 射峰半高宽沿层深分布也分为3段,其范围与应力分布相吻合:半高宽极大和较快减小区,缓慢下降区,与未冲击持平区。

分析认为,适度的残余压应力和半高宽增大有利于提高金属材料的疲劳强度。

参考文献:

- [1] 汪勇,魏敏,王志民,等.再制造热喷涂层的残余应力与显微特征的对应关系[J].理化检验,2011,47(1):1-4.
- [2] 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].西安交通大学出版社,1999:185-187.
- [3] Frankel A L J, Abbate A, Scholz W. The effect of residual stresses on hardness measurements [J]. Experimental Mechanics, 1993: 164-168.
- [4] Simes T R, Mellors G, Hills D A. A note on the influence of residual stress on measured hardness [J]. Journal of Strain Analysis, 1984, 19(2): 135-137.

作者地址:北京市丰台区杜家坎21号 100072

装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室

Tel: (010) 6671 8580

E-mail: wyj8485@163.com