第 24 卷 第 1 期
2003 年 2 月
焊 接 学 报
TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION
Vol.24 No.1
February 2003

振动时效效果评定的几种方法比较

楚建营， 陈立功， 倪纯珍
（上海交通大学 材料科学与工程学院，上海 200030）

摘 要：对 JB/T 5926－91 标准中规定的几种振动时效（VSR）效果评估方法进行比较分析，通过对它们评定原理的研究分析得出它们的应用特点和范围，然后介绍了几种目前尚处于研究完善阶段的评定方法，并根据其原理和特点分析了它们的应用前景，以期对工业生产起一定的指导作用。另外，结合实际工程应用着重介绍了动应力判据，并将其与盲孔残余应力测量法相比较。结果表明，它们具有相仿的评定精度和可靠性。但动应力判据从动态的观点回避了现场残余应力测量困难这一问题，并将效果评定和振动过程结合起来同时进行，因而容易实现整个过程的自动控制。因此，作为一种全新的评定技术，动应力判据具有良好的发展前景和应用价值。

关键词：振动时效；动应力；残余应力；测量；评定
中图分类号：TG156.92 文献标识码：A 文章编号：0253－360X（2003）01－57－04

楚建营

0 序 言

振动时效（VSR）又称振动消除应力法，是一种耗能少、时间短、效果显著的时效技术。近年来在国内外都得到迅速发展和广泛应用，特别在超大型、超重型工件、异种金属焊件以及有抗氧化要求的工件的消应力过程中，被广泛用来替代以尺寸稳定性为目标的热时效。

但是振动时效作为一种新技术，理论并不完善，表现之一就是工艺效果难以评定。目前广泛使用的是 JB/T 5926－91 中规定的几种方法：参数曲线观测法、残余应力测量法和精度稳定性检测法[1]。这些虽然在实际生产中起到了一定的指导性作用，但都有很大的局限性，不是缺乏定量的科学证明就是技术复杂，难以普及。综观振动时效的发展状况，目前尚无统一的、定量的科学评定方法。作者先简要地比较分析了这几种评定方法的优劣，并结合其特点介绍了它们的应用范围，以期对实际生产起一定的指导作用。然后，结合实际工程应用着重比较分析了盲孔法和动应力判据。结果表明，动应力判据与盲孔法的评定结果相近，但动应力判据应用简单，容易实现整个工艺过程的自动控制，因而具有很强的应用推广价值。同时，也分析了目前几种新型的技术和它们的发展前景。

1 参数曲线观测

收稿日期：2002－05－27

利用工件在振动过程中动态参数（振幅、固有频率和带宽等）的改变可以用来判定振动工艺效果。工件在振动过程中，振动应力与残余应力发生叠加将导致个别取向的位错塞积开通，位错沿晶滑移。但由于晶粒方向不一，滑移带互成角度，从而导致新的小晶粒的形成和亚晶界产生，其结果表现为晶粒细化和位错增殖。位错密度的增加必然导致位错再滑移阻力的增大，位错移动将减少，从而减小工件阻尼。工件阻尼系数的减小，又将使共振频率降低、峰值减小，从而使共振峰左移，带宽减少[2]。图 1 为典型的工件振动工艺曲线变化示意图。

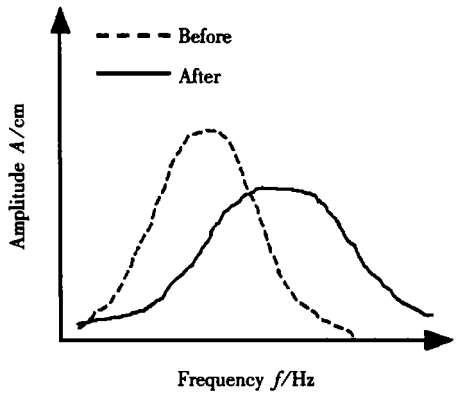

图 1 工件振动前后工艺曲线

Fig. 1 Response curves of components before and after vibration

参数曲线观测法是一种直观、定性、快速的评定方法。从工件参数曲线的改变可以获得由于工件阻尼的降低而造成自身松弛刚性和抗变形能力的提高

的信息,而这正是残余应力测量法所不能反映的振动效果。但是,参数曲线的改变本身不能给出有关工艺效果的定量描述,因此只适合作为一种辅助性评定手段,进行定性的现场初步判定。

2 精度稳定性检测

检验工件在振动前后尺寸精度稳定化的程度是评定振动效果的又一手段。一方面,振动可以降低和均化材料内部的残余应力,从而减小工件使用过程中因为应力释放而造成的局部变形。另一方面,材料的振动过程也是位错滑移、增殖和晶粒细化的过程,由于材料中不可避免地存在第二相或杂质原子和颗粒,位错运动的结果是在这些颗粒和原子周围塞积,形成气团,随着气团数量的增加和晶粒的细化,它们对位错运动的定扎作用将显著增强,从而导致位错再移动能力降低,弹性蠕变减小[3]。宏观上表现为材料松弛刚性增加和尺寸精度稳定性的提高。图 2 为铸铁振动前后的应力—应变曲线,从中可以看到在经过一定次数的振动后,铸铁的应力应变曲线由开口型(曲线 1)变为闭口型(曲线 2),这说明铸铁弹性性能加强,抗形变能力提高。

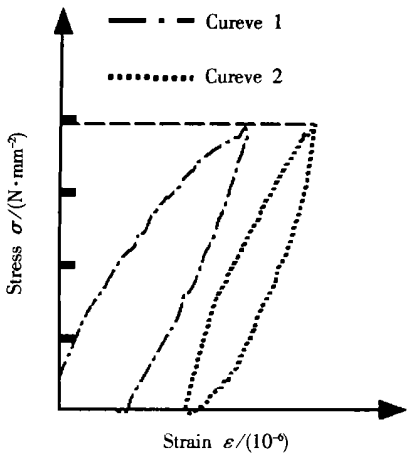

图 2 铸铁振动前后应力—应变曲线

Fig. 2 Stress *vs* strain of cast iron before and after vibration

精度稳定性检测能检验出振动时效前后工件尺寸精度稳定化的程度,而这是其它评定方法无法检测到的。因此对于以要求精度稳定性为主的工件,需要进行精度稳定性检验。根据操作特点,精度稳定性检测法又可分为加工检测法、动载法和静置法。但静置法由于时间长,且容易受地基蠕变和支撑刚度变化的影响,因而有很大的局限性。加工检测法和动载法虽然快速,但对测量设备精度要求高且操作困难,也很难在现场应用和广泛普及。

3 残余应力测量

振动时效效果主要表现在消除和均化材料内部的残余应力。因此,振动前后残余应力的测量被作为评定时效工艺效果的主要手段。残余应力测量方法又可分为两类,即无损伤的物理测量法和有一定损伤性的机械释放测量法。物理测量法主要有 X 射线衍射法和磁测法;机械测量法则以盲孔法为代表。近年来物理测量法发展迅速,但由于自身测量手段的局限性,应用并不广泛。其中 X 射线法发展最为成熟,但测深仅为微米级,易受表面加工层的影响,很难得到更有代表性的体残余应力,如焊接件、铸件等[4]。磁测法是利用铁磁材料中残余应力的存在将引起材料磁导率发生变化的效应进行的。与 X 射线法相比,测深有所增加,可达 1.5 mm 左右,一定程度上可以避免材料表面层的影响。但由于磁导率物理关系复杂,因而应用中问题明显:(1)只适用铁磁材料,无法测量不锈钢等材料的残余应力;(2)传感器的尺寸,与工件结合力的大小都显著影响测量结果;(3)易受材料成分、组织结构等因素的影响,不同的材料需预先标定;(4)磁导率和残余应力关系复杂,标定困难且误差大。因此,工程应用中仍以机械释放法为主,特别是盲孔法。

盲孔法是工程中最通用的一种残余应力测量方法。经过大量理论研究和实践验证,对其测量原理、实际工艺因素的影响和误差来源已经形成了比较完善的理论。概括来讲影响盲孔法测量精度的因素主要有基本力学模型、孔边塑性变形、钻削附加应变、操作工艺及设备误差。关于这方面已经有比较完善的理论解释和相应的修正方法,文中不做详细讨论,请参阅有关文献。但是,盲孔法并不是万能的方法,一方面它不适用薄壁压力容器、重要军工产品和缺口敏感的高强钢制品[5]等工件的残余应力测量;另一方面,它操作工序复杂、技术难度高、数值计算难,而且费用昂贵,耗时费力,因而不能在生产中普及。

4 盲孔法和动应力判据比较

振动过程实质上是工件在附加交变附加应力下循环振动的过程,当附加应力与自身残余应力叠加后达到或超过材料的屈服极限时,工件将发生微观或宏观塑性变形,从而降低和均化内部残余应力,稳定尺寸精度。因此,动应力作为振动过程中最重要

的参数, 必然和振动效果存在某种相关性。文献[6]发现了动应力与消应力效果之间存在定量的非线性相关性, 并画出了这类曲线图, 文献[7]通过数学回归分析和曲线拟合得到它们近似的函数关系 DP－CH 方程, 即

$$\varepsilon_v = \exp\left(1.729 - \frac{1.34}{n}\right) \cdot \sigma_d^{0.5855} \cdot n^{0.1864} k^{16.52} (10^{-6}),$$

式中: ε_v 为构件应变松弛量; σ_d 为动应力峰值(MPa); n 为加载次数; k 为原始应力水平, 一般 $k \leqslant 1$。

应用该方程并结合现场试验以探讨振动时效效果动应力判据的可靠性。采用两种振型(弯曲振动和扭曲振动)对 12 机头电脑绣花机架进行标准振动时效工艺。机架材质为 Q235 钢, 焊接连接, 工艺采用 T442 焊条, 平行焊接, 余高不大于最薄板厚的 60%; 振动设备采用 RSR2000 V2.1 型振机; 共振条件, 两次振动, 每次 12 min。以盲孔法和 DP－CH 动应力经验判据方程检测振动效果, 数据见表 1、表 2, 测点布局见图 3。

表 1　刺绣机机架 VSR 工艺残余应力测量数据表

Table 1　Datasheet of residual stress of frame of embroidery machine

Variable	Status	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Average value	Effectiveness(%)
σ_{max}/α	Before vibration	108 1.73°	122 －2.19°	131 0.91°	114 －5.49°	109 －9.71°	117	31
σ/(N·mm^{-2})/(°)	After vibration	123 4.73°	46 41.65°	97 37.52°	80 27.63°	54 －6.26°	80	
D_σ	Before vibration	114	120	124	117	69	109	15
σ/(N·mm^{-2})	After vibration	132	93	111	60	65	92	

Note: The α is the angle from the X positive axis to the vector of max main stress with a positive value in the anticlockwise direction.

表 2　刺绣机机架 VSR 工艺动应力测量数据表

Table 2　Datasheet of dynamic stress of frame of embroidery machine

Testing point	Dynamic stress σ/(N·mm^{-2})		Drop of max main stress σ_d/(N·mm^{-2})		Effectiveness(%)		Total effectiveness (%)
	Twisting vibration	Curving vibration	Twisting vibration	Curving vibration	Twisting vibration	Curving vibration	
1	62.7	37.7	81	39	34	26	51
2	31.7	27.7	54	39	23	21	39
Average value	47.0	33.0	67	38	29	23	45

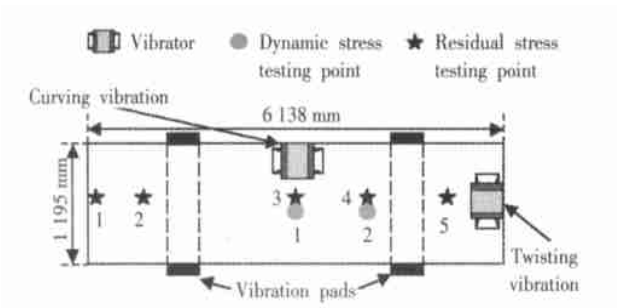

图 3　12 机头电脑绣花机机架振动示意图

Fig. 3　Sketch map for vibration stress relief process of frame of computer-controlled 12－needled embroidery machine

Notes: The height and weight of the frame of embroidery machine is respectively 850 mm and 1 121 kg.

利用动应力判据计算两次振后机架的残余应力下降量分别为 67 MPa 及 38 MPa, 总效果为 105 MPa。按 Q235 钢焊接残余应力峰值为 235 MPa 考虑, 两次振动时效总体效果为 45%, 比残余应力测量法的结果偏大。这可能由于: (1)盲孔法测点不在焊缝上, 而机架钢板较薄, 焊缝区应力梯度很大, 因而没有捕获到焊接残余应力的峰值; (2)保证测量精度, 而进行的测点初始处理(打磨、抛光等)已造成一定的初始应力释放; (3)焊接中进行位置变换及后来的搬运过程中, 薄板机架更容易释放初始残余应力。因此, 测得的初始残余应力要低于一般的 150～180 MPa, 这将造成评定结果偏低。同时, 注意到残余应力测点 1 的数值在振后反而升高, 这可能由于该点处在机架端部, 此处刚性较大, 动应力相对较小, 因而消应力效果不明显, 而且机架端部焊缝集

中,应力场复杂,鉴于残余应力测量法振动前后测点间存在一定距离(≥5 cm),故测得的数据没能完全反映实际状况。因此,结果可以说明两种方法的测量结果大致相仿,且应用动应力判据方法可以观察到盲孔法无法测量到的普遍效果,因而实际生产中可以用动应力判据取代盲孔法进行振动时效的效果评定。同时,动应力判据法回避了工件残余应力测量难这一问题,可以进行现场的快速、定量评定,且易于实现整个工艺的自动控制。

5 结 论

(1)当前,残余应力测量法仍然是时效效果评定的主要可行性手段,参数曲线法和精度稳定性检测法可以作为辅助性手段以完成对工艺效果的全面评定。

(2)当材料表面层影响不大时,X 射线衍射法和磁测法可取代盲孔法以完成快速、便捷、定量的时效效果评定。

(3)动应力判据是一种应用方便、结果可靠的评定手段,可以实现现场的快速、定量评定,并且易于实现整个振动时效工艺过程的自动控制。因而具有良好的发展前景和推广价值。

参考文献:

[1] Hauk V. Comparison of different methods to determine residual stresses nondestructively[J]. 无损检测, 1989, 11(4): 111~114.

[2] 芦亚萍. 振动时效判据分析[J]. 组合机床与自动化技术, 2001, (4): 22~24.

[3] JB/T 5926—1991, 振动时效工艺参数选择及技术要求[S].

[4] 《金属机械性能》编写组. 金属机械性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

[5] 周浩森, 陈立功. 磁测应力技术的探索[A]. 第四次全国焊接年会论文集[C]. 哈尔滨: 焊接研究所, 1984.

[6] 刘国揩. 特大重型构件振动消除应力的新工艺的研究[J]. 冶金设备, 1990, (6): 45~50.

[7] 陈立功, 倪纯珍, 姚 舜, 等. 振动时效效果动应力判据的数学建模方法[J]. 焊接学报, 1999, 20(增刊): 103~107.

作者简介: 楚建营, 男, 1979 年 3 月出生, 硕士研究生。主要从事焊接结构及测试、振动时效工艺研究和效果评定标准建立等工作。

Email: chujy23@sjtu.edu.cn

[上接第 56 页]

I=200 A, 则会出现等离子体过度膨胀现象, 如图 3d 所示, 此时熔深变得浅而宽。这是由于等离子体过度膨胀而使焊接时的能量密度急剧降低而造成的, 根据此特点, 可以用于高速涂覆。

3 结 论

(1)在激光—TIG 电弧焊接时, 取消激光的同轴保护气体而只采用 TIG 的保护气体, 将会出现一种新的特别现象: 焊接仍然能稳定进行, 等离子体却会长大。变得超出正常焊接时的情形, 从而使得到的焊缝异于普通焊接时的焊缝, 即焊缝变宽, 熔深变浅。

(2)在规范较小时, 激光对电弧有较强的压缩作用; 随着电流的增加, 等离子体开始长大, 熔深变浅, 熔宽增大; 电流存在一个临界范围。

(3)在取消激光的保护气体后, 可以得到熔深浅、熔宽大的涂覆型焊道。

参考文献:

[1] 苏彦东, 王 健. 激光焊接过程中的等离子体研究现状[J]. 航空制造技术, 1998, (4): 22~25.

[2] Okui N, Tsuchiya K, Hirata S, *et al*. Development of weld bead shape control system for aluminum alloy butt welded joints[J]. Welding International, 2001, 15(4): 257~265.

[3] Lankalapalli KN, Leong KH, Gartner M. Laser weld penetration estimation using temperature measurements[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(2): 179~188.

[4] Forsman T, Powell J, Magnusson C. Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(5): 193~198.

[5] Nakamura S, Sakurai M. Detection technique for transition between deep penetration mode and shallow penetration mode in CO_2 laser welding of metals[J]. Applied Physics, 2000, 33(22): 2941~2948.

[6] Connolly John O, Beirne Gareth J, O'Connor Gerard M. Optical monitoring of laser generated plasma during laser welding[C]. PTOC. SPZE: The Internatioal Society for Optid Engineering, 2000. 132~138.

[7] Sun A, Kannatey—Asibu E, Gartner M. Monitoring of laser weld penetration using sensor fusion[J]. Journal of Laser Applications, 2002, 14(2): 114~121.

作者简介: 陈彦宾, 男, 1962 年出生, 副教授, 现代焊接生产技术国家重点实验室副主任。主要从事激光加工技术、激光焊接过程在线检测及控制、激光焊接过程数值模拟研究。发表论文 30 余篇。

Email: chenyb@hit.edu.cn