激光增材制造应力测量

张劭铭
（苏州大学 机电工程学院 机械电子工程系，江苏 苏州 215137）

摘　要：首先对残余应力概念进行阐述，然后简要介绍了几种残余应力测量方法，并就各自优点和缺点进行介绍，之后重点进行了通孔法和盲孔法的理论论证，并通过实验进行研究。

关键词：残余应力测量；小孔法；适用范围
中图分类号：TG 115.222.2　　文献标志码：A　　文章编号：1002-2333(2020)01-0083-03

Stress Measurement of Laser Additive Manufacturing

ZHANG Shaoming
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215137, China)

Abstract: This paper first describes the concept of residual stress, and then briefly introduces several residual stress measurement methods, and their advantages and disadvantages are introduced. Theoretical demonstration and research of the through-hole method and blind hole method are carried out using experiment.

Keywords: residual stress measurement; hole method; applicable scope

0　引　言

激光增材是目前一种比较成熟的产品制造技术，常由挤压、喷射等方式按层来堆叠出已经在CAD上设计好的工件。随着我国经济和制造业的蓬勃发展，不管是在民用还是军用方面，作为未来的主流发展方向，激光增材制造技术发挥的作用越来越大。但是对于民用产品，经常面临加工初始应力太大的问题。加工复杂零件时，容易出现应力过大甚至造成断裂使工件报废，即使没有断裂也会由于存在较大应力使工件寿命缩短，不利于生产加工。残余应力作为来自于温度场下制作成型后存在于产品内部的内应力，是必定存在的，那么对其进行应力的测量就显得十分重要。这是目前乃至今后重要的研究方向之一。本文将介绍激光增材制造应力的具体测量方法，并通过实验过程对测量方法提出分析建议。

1　应力测量方法介绍

1.1　环芯法

环芯法是于1951年被提出的，其原理与钻孔法比较相似，是用圆环来代替钻孔法中使用的小孔，圆环尺寸是内径为15~150 mm，深度为内径尺寸的25%~150%[1]。该方法虽然比钻孔法的破坏更大，但拥有更大的应变释放率，更精确和敏锐，对于近距离的表面，环芯法同样可以测出残余应力。该方法的可允许测量范围比较广泛，观测也很方便。由于实验中造成的破坏极大而导致该方法实用性不强的问题，随着技术的进步而有所改进，目前已有关于此方法的专用标准，比如测试汽轮机、汽轮发电机转子锻件残余应力的试验方法。该方法的误差与灵敏度、零点漂移程度[1]及应力释放系数A、B的误差关系较大，对于可能产生的附加应变，可以在测量后排除。环芯法在激光增材残余应力测量上并不常用，因为破坏太大，尤其是对于民用复杂零件就显得更不方便，但对于较大工件是一种比较好的方法，比小孔法好。

1.2　剥层法

一般对于结构简单的几何构件，比如经过淬火、喷丸、研磨等表面处理后的材料，可以使用该种方法。该方法快捷、简单，计算公式[2]为

$$\sigma=-\frac{4}{3}E\frac{e^2\mathrm{d}f}{I^2\mathrm{d}e}-\frac{8E}{I^2}\int_h^e \mathrm{d}f+\frac{8}{3}\frac{E}{I^2}\int_h^e e\mathrm{d}f。$$

式中：f为试件挠度；e为剥层厚度；I为试件的长度。

但这个公式需要提前做些假设和简化：首先，保证均匀和各向同性；然后，纵向和横向应力忽略不计。剥层法虽然可以比较准确测出表面处理所带来的残余应力，但是不可以测表面应力及接近表层的应力。其原理是，依靠电化学的方法从所制造的材料上剥去表面时，由于内层应力处于非平衡状态，而材料重新平衡时会产生变形现象，且一般为弯曲现象，弯曲曲率与被剥除材料的残余应力分布及所剩材料的弹性程度直接相关，由剩下部分的曲率可反求出原始应力。剥层法对于激光增材残余应力测量比较实用，激光层打印出的厚度很薄，整体也比较致密，剥去表面不会出现明显变形或凹凸，相比之下小孔法打孔过程比较费力。

1.3　切条法

19世纪末，切条法就被用于圆柱体的残余应力测量，这种方法通过顺着零件长度方向来切割材料使其应力得以释放，然后通过测量切割位置的应变来计算残余应力。但该方法也有使用前提条件：首先，沿Z轴（即厚度）方向的应力及变化不予考虑；然后，塑性应变及热应变等不应被引入实验过程[3]。由于这两个假设在实际中不可能做到，因此，越接近这两个条件就越能得到接近准确的结

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

果。现在一般在结构碳素钢和不锈钢等合金的残余应力测量方面使用这种方法。该方法对于激光增材应力测量应用也较广，对大型工件，使用线切割来实现切条，是一种比较简便的方法，在实际激光增材生产中，也是比较常用的方法。

1.4 X射线法及超声波法

X射线法是无损测试方法的一种，从弹性力学与晶体学中总结得出的衍射法有很好的应用前景，其原理是：晶距随残余应力的变化而变化。计算公式为

$$\sigma=-\frac{E}{2(1+\mu)}\ \frac{\pi}{180}\ \cos A\ \frac{\partial 2\theta_B}{\partial \sin^2 B}。$$

式中：E为弹性模量；A为不受力情况下的衍射角；B为晶面法线和表面法线的夹角；$2\theta_B$为样品表面法线与衍射晶面法线夹角为B时的衍射角。

这一理论最初在1925年由Lester和Aborn提出时还不具有实用性，随着不断改进，人们对于宏观应力和晶体的点阵变形有了更深入的认识，随后由德国人E. Machearauch[3]提出了sin2θ方法，进一步推动了该技术的发展，尤其是在飞机起落架检测方面的应用。该方法对浅层表面的二维应力平均值可精确得出，同时也可在原测点多次重复测试。存在的最大问题是X射线的穿透力十分微弱，且试件的尺寸不可太大，形状受到严格限制，表面需要尽量光滑。许多结构上无法安装光路，对内部结构复杂、制造困难的工件也不太容易测量。由于对仪器要求较高，而且经济成本高，故而这种方法并不常用，而激光增材是广泛应用的加工生产过程，需要考虑成本。但单纯对于激光增材应力测量来讲，这是比较精确的方法，如果成本允许，同时也的确需要精确数据时推荐使用，而对于一般工厂生产则不推荐使用。

超声波法则是根据双折射现象的原理来进行测试的，在2008年虞付进等[4]采取临界纵波法经由轧辊测试，进一步验证了该方法与钻孔法及X射线法有较好的一致性。该方法虽操作简便，但也存在需要精密仪器才能测量、只能测一定距离内应力、应力双折射效应干扰严重、无法针对某一点位测量等诸多问题，而且该方法与射线法一样都存在经济成本较高问题，故在激光增材应力测量上应用较少，目前仍无法做到大规模广泛使用。

1.5 小孔法（通孔法和盲孔法）

小孔法作为目前应用极为广泛的方法，最初由德国人在1934年提出，经过完善后有较强实用性，现在一般采用美国的测量标准。根据孔是否钻通，可以分为通孔法和盲孔法两种。这种方法是通过在结构表面钻孔的方式使应力释放出来，利用早已粘贴好的三向应变片确定应变。小孔法对构件的结构性破坏比较小，设备操作简单，价格便宜，误差也可以接受。

而根据钻孔方式的不同，小孔法又可分为钻孔开孔法、喷砂开孔法和高速透平铣孔法3种。钻孔开孔法测量过程简单、成本低廉，缺点是孔壁会受到挤压而产生塑性变形及附加应力，影响最终结果精度；喷砂开孔法加工应变小，精度也能得到保证，不受材料种类制约，但操作冗杂繁琐，且不能用于软材质和具有应力梯度的工件上；高速透平铣孔法可以在高硬度的材料上加工，应变不大，使用倒锥型铣刀，装置使用也十分便利，在处理附加应变时结合光学方法进行测量，可以提升精度，钻孔偏心时会采用修正系数的修正公式来进行修补。

将钻孔法与环芯法结合成一种深孔法，这是一个改进型测试方法。首先钻出一个孔，测出孔径后再钻一个与之同心的环，由于直径因应力释放而产生变化，可算出原有应力。最大优点是可以测量深处残余应力，试样厚度基本不受限制，随着技术研究的不断发展，目前已经可以用来实验测量各向异性材料的应力。该方法对于激光增材应力测量极为实用，虽然精度欠佳，但考虑到其经济性，可满足一般生产。只是打孔不好控制，我们实验中所采用的就是这种方法，后文会具体阐述。

2 小孔法中残余应力A,B系数讨论论证

应力计算公式为：

$$\begin{cases}\sigma_{1.2}=E\cdot\left[\dfrac{\varepsilon_1+\varepsilon_2}{4A}\pm\dfrac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_3)^2+[2\varepsilon_2-(\varepsilon_1+\varepsilon_3)]^2}\right];\\ \tan 2\theta=\dfrac{2\varepsilon_2-(\varepsilon_1+\varepsilon_3)}{\varepsilon_3-\varepsilon_1}。\end{cases}$$

式中：E为弹性模量；ε_1、ε_2、ε_3分别为3个方向的应变。

接下来讨论A、B系数与孔径及深度的关系。

2.1 通孔法的A、B系数

首先，3个应变片分别按0°、90°、225°的逆时针顺序摆放。根据Kirsh理论[5]可知，我们所布置的应变片是测量钻孔后的释放应变，一共有4种求解方法，在这里，我们采用对应变片栅上所释放出来的应变进行积分计算。基于上述思路，可得表达式：

$$A=-\frac{(1+\mu)}{2}\ \frac{a^2}{nr_2};$$

$$B=-\frac{1}{2lb}\left[(1+\mu)(a^2S_2-\frac{3}{2}a^4S_3)+(1-\mu)a^2S_1\right]。$$

式中：a为打完的孔的半径；l为应变片上的丝栅长度；b为应变片的丝栅上的宽度的一半；r_1、r_2分别为应变片距孔径中心最短距离和最长距离。准备进行测量的材料的泊松比也要提前查询出来，具体情况如图1所示。S_1、S_2、S_3计算公式如下：

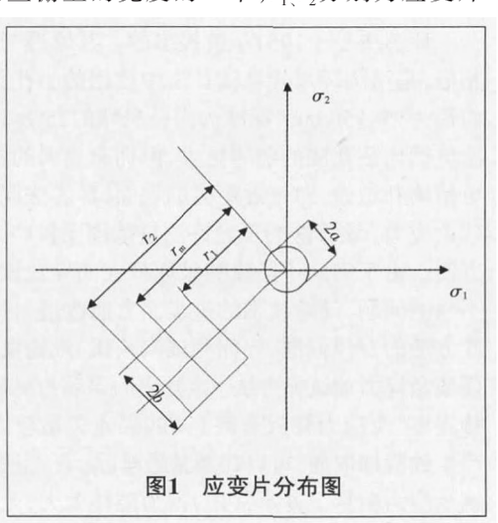


图1 应变片分布图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$S_1=\int_{r_1}^{r_2}\int_{-b}^{b}\frac{\cos a}{r^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=2\left(\tan^{-1}\frac{x}{b}\right)\Bigg|_{x=r_1}^{x=r_2};$$

$$S_2=\int_{r_1}^{r_2}\int_{-b}^{b}\frac{\cos 4d}{r^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=-2b\left(\frac{x}{x^2+b^2}\right)\Bigg|_{x=r_1}^{x=r_2};$$

$$S_3=\int_{r_1}^{r_2}\int_{-b}^{b}\frac{\cos 4d}{r^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=-\frac{2}{3}b\left(\frac{x}{(x^2+b^2)^2}\right)\Bigg|_{x=r_1}^{x=r_2}。$$

考虑到由于在应变片所覆盖的面积上应力释放不均匀，测量结果会有一定误差。

2.2 盲孔法的系数讨论

盲孔法所标定的A值应大于通孔法所确定的A值，盲孔法的B值应接近通孔的B值，这两点可以由Schajer[5]的有限元计算方法进行证实，现在对两个系数修正如下：

$$A=-\frac{(1+\mu)}{2}\cdot\frac{a^2}{r_1r_2};$$

$$B=-\frac{1}{2lb}\left[(1+\mu)(a^2s_2-\frac{3}{2}a^4s_3)+(1-\mu)a^2s_1\right]。$$

式中，r为孔径中点到应变片中点距离（见图1）。

通过大量实际数据的测算比对，以麻花钻打孔后测定数据为例，打盲孔条件下，A值与待测物品的标定值有-6.5%左右的偏差；B值与待测物品的标定值有-3.5%左右的偏差。此时我们可以对盲孔法的公式引入修正系数k=1.065。

上述实验公式的条件是：1）盲孔法时的孔深与孔径之比为1.0~1.2左右；2）残余应力小于屈服应力的1/3；3）应变片中心与孔径中心之间距离r和孔的半径之比在2.5~3.4的范围内。

2.3 材料种类对B、A两个系数的影响

不同的材料泊松比不同，只有这个因素会对结果造成较大影响，经过大量数据查询、实验比对，若从0.28~0.40变化，可以使A值线性增大5%左右，使B值线性减小2.5%左右，一般而言，待测物品的泊松比对A有更大的影响，对B的影响相对小得多。

3 实 验

在采用小孔法对激光增材应力测量实验前，我们首先提出设想：随着打印层数的增加，应力应当从拉应力变为压应力，即由正到负，并通过有限元分析得到了理想的温度变化情况。

出于对照试验的目的，我们共准备了3个工件，分别进行3次实验，得出3组不同的数据。由于激光增材产品的硬度普遍很高，我们在这里使用钨钢钻头来打通孔。实验使用AFT-CM-10静态电阻应变仪，使用的材料为00Cr17Ni14Mo2，该材料的泊松比为0.3，弹性模量221 GPa（293.15 K条件下）。为了节省空间与材料，在实验中我们没有把工件打印成一个平面，而是采取了打印成一个圆筒的方法。实验过程中，共打印了200层材料，每层0.3 mm，合计6 cm，按照打印层数的增加，均匀分布5组应变片于其上。应变片的重要数值如下：a=1.25 mm，r_1=2 mm，r_2=5 mm，b=5 mm，l=3 mm。通过试验，求解得出A=-0.101 562 5，B=-0.250 610 351，以第一个工件为首次试验对象，按照打印层数的增加，得出数据如下：第一个点为161.9 MPa，第二个点为110.4 MPa，第三个点为45.8 MPa，第四个点为-50.1 MPa，第五个点为-100.6 MPa。随后又进行第二、三个工件的实验，得出的3组测量数据如表1所示。

由上述数据可以发现，虽然数据之间有所偏差，但数据分布趋势与实验前设想一致，而且应力分布考虑与温度变化有关，实验是成功的。公式自身所造成误差约在5%~6%之间，参考前人所测得不同条件下的数据，本次实验的误差大概在10%~15%之间，由此看出，本次实验采用的材料在20 ℃条件下，最大应力大概在200 MPa左右，这样的应力对工业生产有一定影响，但未达屈服强度，也不致于变形断裂。

表1 残余应力测量数据汇总表 MPa

工件号	点位				
	第1个点	第2个点	第3个点	第4个点	第5个点
工件一	161.9	110.4	45.8	-50.1	-100.6
工件二	190.5	130.7	82.5	18.9	-42.4
工件三	181.6	122.1	54.0	-20.3	-96.9

4 结 论

目前激光增材应力的测量方法有很多种，由于应用范围的不同，应用不同方法会有所差异。通过对几种常见测量方法的比较，并根据实验中测量出的具体应力数据，能够大致得出改进方法，应将工件的每层厚度变薄，并改善温度条件，以减少应力，尤其是对于精度、耐热性、抗弯性有较高要求的工件，200 MPa应力仍有些偏大，需把应力降下来。通过实验得出，残余应力随厚度的增加而变小，且由拉应力变为压应力。另外，由于钢制激光制造工件层数较多，每层厚度小，比较致密，比同样材料的切削件或铸造件硬度大得多，高速钢钻头很难打穿，故采用钨钢钻。

[参 考 文 献]

[1] 印兵胜,赵怀普,王晓洪.残余应力测定的基本知识——第七讲机械法测残余应力[J].理化检验(物理分册),2007(12):642-645,641.

[2] 曹旭,徐宗亚,彭云飞,等.残余应力的测量研究方法发展现状[J].低温建筑技术,2016,38(4):76-79.

[3] 李晨,楼瑞祥,王志刚, 等.残余应力测试方法的研究进展[J].材料导报,2014,28(增刊2):153-158.

[4] 虞付进,赵燕伟,张克华.超声检测表面残余应力的研究与发展[J].表面技术,2007,36(4):72-75.

[5] 王世中,欧阳宇平.钻孔法测量残余应力时释放系数的标定与计算[J].航空导报, 1990(5):300-304.

（责任编辑 马忠臣）

作者简介：张劭铭（1998—），男，本科生，机械电子工程专业方向。

收稿日期：2019-04-02

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net