

残余应力测试结果的定性分析与判断

张娟¹, 巴发海², 李凯²

(1. 东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511464;

2. 上海材料研究所 上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437)

摘要:机械构件及产品的制造过程中必然会引入残余应力,残余应力对构件性能和服役寿命有重要影响。残余应力的测试方法众多,X射线测试技术作为一种非破坏性测试方法,由于其理论成熟、方法简单,在工程上得到了广泛应用。讨论了对残余应力测试结果的定性分析与判断产生影响的重要因素,简要分析了残余应力测试过程中的误差与不确定度的表征问题,并结合单实验室采用简化的“两步法”计算不确定度的案例,为残余应力测试在失效分析中的应用提供了借鉴。

关键词:残余应力;X射线法;测试;影响因素;准确性;不确定度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)12-0001-03

Qualitative analysis and judgement of residual stress testing results

ZHANG Juan, BA Fahai, LI Kai

(Dongfang Electric (Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 511464, China; Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation, Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: Residual stress will inevitably be introduced during the manufacture of mechanical components and products. Residual stress has an important impact on component performance and service life. There are many methods for testing residual stress. As a non-destructive testing method, X-ray testing technology has been widely used in engineering due to its mature theory and simple method. The qualitative analysis and judgment of possible important influencing factors on the residual stress test results was discussed and the characterization of the error and uncertainty in the residual stress test process was briefly analyzed. The case study to calculate the uncertainty in a single laboratory by using the simplified “two-step method” was given. Finally suggestions on the application of residual stress measurement in failure analysis are also given.

Key words: residual stress; X-ray method; measuring; influencing factor; accuracy; uncertainty

1 影响定性分析与判断的因素

很多失效分析工作者往往感觉 X 射线残余应力的测试结果与直觉分析差距较大,难以接受,更不用说用来分析失效行为。这种预期差异,并非来源于原理本身,多数情况下是分析人员对测试的基本技术要求理解把控不到位或评价方法不合理导致的。

以下一些因素可能会影响测试结果准确性。

(1) 材料。残余应力要求所测材料应具有足够的结晶度,在特定波长的 X 射线下能得到连续的德拜环,且为晶粒细小、无织构的各向同性的多晶体材料。材料是否完全满足近随机位向分布、均匀、各向同性的要求,对测试结果有大的影响。如热处理之前的铸件、焊缝等并不完全满足要求,其测试结果有较大的离散性。

(2) 准确度和精度。仪器、材料状态、测量方法的选用和数据处理程序的选择都对测试结果有影响。鉴于目前仪器的校准与检定尚无国家标准,精度和准确度问题存在确认困难。

(3) 应力分布。从长期的测试结果来看,实际构件的应力分布多具有不均匀性,不同的测试位置

收稿日期: 2020-03-13

作者简介: 张娟(1981—),女,硕士,工程师,主要从事压力容器、核电设备制造原材料技术研究

通信作者: 巴发海, bafahai@163.com

可以完全不同,但差距不会超出 1 个数量级。应该指出,理论上 X 射线检测的应力是宏观应力,但这里的宏观和构件的表现大小没有任何关系。一次测试应力的覆盖范围仅在 $0.2 \text{ mm}^2 \sim 100 \text{ mm}^2$ 之间,称之为局部宏观应力可能更容易理解。此外,还应考虑射线的穿透深度造成的不均匀性,因为应力测试的 X 射线穿透深度一般仅为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 。

(4) 测试过程的困难性。包括材料状态、测试位置、表面处理状态等和标准的技术规定存在的差异。

(5) 不存在明确,统一,合理的残余应力技术规范。一般的产品标准或规范等技术文件中基本都没有对残余应力的合理范围具体要求和规定。因此,测试人员难以对测试结果的有效性、合理性进行判断。如表面压应力可提高零件的疲劳寿命,但压应力范围和深度并没有定量数据可以参考,更无法评价其与寿命之间的定量关系。作为一项量化判断依据,国际 PRI(质量评审协会)组织的 NADCAP 评审文件显示,对 INCONEL 718 合金疲劳试样,其表面应力应控制在 $-200 \sim -500 \text{ MPa}$ 之间。

(6) 残余应力的表征和理解。如正确区分正应力、切应力和主应力及其关系;如何区分失效分析中与失效相关的残余应力其本质应该是那个性质的应力;如何对平面应力、三维应力、主应力进行判断、分析和计算,这些都是要考虑的问题。

2 误差与不确定度表征

最终应力值的误差主要取决于 d (晶面间距)与

表 1 喷丸处理的弹簧钢板样品中残余应力测量值的可重复性结果(Pseudo-Voigt 方法)

项目	试验									
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10
步骤 1 残余应力/MPa	-536	-529	-529	-530	-539	-531	-533	-535	-533	-528
步骤 2 残余应力/MPa	-533	-535	-529	-525	-538	-550	-543	-550	-543	-546

表 2 样品残余应力不确定度分析结果

不确定度来源	结果	概率分布	$Dv/$ (扩展因子)	$U\sigma/$ MPa(±)
重复性	$\pm 8.6 \text{ MPa}$	正态	1	2.7
弹性模量(E)	$\pm 5\%$	矩形	$\sqrt{3}$	15.6
$\sin^2\psi$ 拟合	$\pm 27 \text{ MPa}$	矩形	$\sqrt{3}$	15.6

如表 2 所示, σ 中的相应标准不确定度为 $u_\sigma = \pm s/\sqrt{n} = \pm 0.86/\sqrt{10} = 2.7 \text{ MPa}$,其中 n 是测量次数, s 为表 1 计算结果的标准偏差。假定 $E = 210 \text{ GPa} \pm 5\%$, σ 中的相应标准不确定度为 $u_e =$

$\sin^2\psi$ 曲线的拟合。各个峰位置的误差会降低最终结果的准确性。应该注意的是,目前商业测量软件产生的“不确定性”值仅反映 $\sin^2\psi$ 曲线中的估计统计误差(或拟合优度)。测量中的总不确定度除了受衍射峰位置的影响外,还受其他因素的影响。

残余应力的测试结果的不确定度在样品唯一的情况下,来源于设备、方法、参数、操作等,但众多来源的影响很难量化表征,因此任何评估不确定度的方法都必须通过多个合格实验室的试验来验证。假定在系统误差都已消除或纠正条件下,推荐一种可以在单个实验室中使用的方法来评估不确定度^[1],该方法分为两步。

步骤一:按照重复性要求进行测试,将设备设置为在相同条件下进行多次连续测试,并且多次测量之所有测试条件相同,在这种情况下,唯一的变量是那些与测量系统的性能以及软件有关的变量,该变量也称为“仪器可重复性”。

步骤二:按前步骤在两次测量之间取出样品重新设置并进行测试,这种情况下,会引入由于测试设置的可变性而产生的影响,包括重置设备和重新放置样品的精度,该变量也被称为“仪器操作者可重复性”。

喷丸处理的弹簧钢板样品中残余应力测量值的可重复性结果如表 1 所示,由此计算的样品残余应力不确定度如表 2 所示^[1]。残余应力测量结果可表示为: $\sigma = (-539 \pm 44) \text{ MPa}$ 。可见,其不确定度达测试值的 8%。

$$\pm 0.05 \times 539 / \sqrt{3} = 15.6 \text{ MPa}.$$

而合成标准不确定度呈正态分布, $u_c = (2.7^2 + 15.6^2 + 15.6^2)^{1/2} = 22.2 \text{ MPa}$ 。扩展不确定度呈正态分布, $U = k u_c = 44.4 \text{ MPa}$,其中 $k = 2$ (对应 95%置信度)。

3 残余应力测试在失效分析中的应用

在失效分析中,残余应力测试通常用在最可能出现裂纹的位置以及应重点关注的一些部位,主要包括以下部位。

(1) 在给定的施加载荷下,应力最大的区域(厚

度或横截面最小的区域)。

(2) 应力集中的几何形状,如咬边,颈,倒角,焊趾,圆弧等。

(3) 动态接触的位置,如疲劳接触。

(4) 裸露且容易腐蚀的地方。

(5) 垂直于裂纹的方向(如果在多个方向上都出现了裂纹)。

应该注意的是,工件发生失效后,在裂纹附近垂直于裂纹线的方向残余应力会部分或完全消除,因此,在裂纹萌生之前评估零件应力分布具有实际工程意义。在可行的情况下,最好使用三轴应力测试来确定应力场的方向和大小。如果受样品的几何形状,经济或时间限制,重点方向仅限于一个或两个方向,则优先考虑垂直于裂纹线方向的应力测量。由于制造过程和服役历史对产生的残余应力状态会产生巨大影响,在进行分析时必须考虑其引入的残余应力。

有限元方法对于预测载荷作用下组件中的应力分布具有重要参考价值。计算结果可以半定量地确定高应力区域和低应力区域以及应力梯度。残余应力测试中具有最高优先级的位置是拉应力最大的区域,即最容易发生屈服或破裂的区域。在应力梯度改变的边界处,可能存在剪切应力。因此,建议在这些位置进行三轴应力测试。对于复杂几何形状的零件,在有限元法在经济上不可行情况下,可选用经验观察法。

应力云图能够快速精确地表征整个组件表面应力状态,包括重点区域,例如陡峭的应力梯度区域(焊缝)及其相关的拉伸残余应力最大值的区域。如果部件的几何形状允许在重点的区域(靠近故障区

域)进行应力测试,则可以在有载和无载的条件下绘制应力云图。随后的测量应集中在应力云图确定为最大拉应力或深度的区域。

使用 XRD(X 射线衍射仪)进行的全面残余应力研究很少局限于表面,因此,通常需要进行亚表面测量。如果必须非破坏性地测量亚表面位置的残余应力,建议使用中子衍射。

当采用线性弹性断裂力学进行分析时,可以计算残余应力对应力强度因子的贡献,并用于预测裂纹是否发生扩展或停止扩展。应该注意的是,残余应力对裂纹扩展速率的影响倾向于随着断裂韧性的增加而减小。

4 结语

X 射线法残余应力测试原理成熟,测试过程简单,方法易于掌握。X 射线法残余应力测试是一种统计表征,要准确地理解测试相关术语及其概念与本质,能否获得准确可信的测试结果依赖于测试者对多个影响因素的把控。同时,要从定性和定量两个方面对测试结果进行分析和判断,必要时还需要对测试结果进行误差分析和不确定度评定,以为失效分析提供可靠的支持。

参考文献:

- [1] KANDIL F A. Manual of codes of practice for the determination of uncertainties in mechanical tests on metallic materials[M]. Netherlands: TNO Institute of Industrial Technology, 2000.

欢迎来稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告