

轧辊表面残余应力测试方法的对比试验研究

虞付进¹, 华云松², 张克华^{1,3}, 丁金福¹

(1. 浙江师范大学机械装备与测控技术研究所, 浙江 金华 321004; 2. 上海理工大学, 上海 200093;

3. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310032)

[摘要] 轧辊体积大且辊面状态又不好, 尤其是热轧辊的表面常有氧化膜和微裂纹, 在测量时又不能损伤轧辊表面, 因此, 轧辊残余应力的测量较困难。为验证临界折射纵波法测轧辊表面残余应力的准确性, 用超声波法、X 射线法和盲孔法对同一试件进行了应力测量。对这 3 种测量方法所测得的结果进行比较后, 评价超声波法的可靠性和有效性。试验结果显示: 临界折射纵波法测试的应力值与 X 射线衍射法和盲孔法测试的结果具有较好的一致性。

[关键词] 残余应力; 轧辊; 检测方法; 临界纵波

[中图分类号] TG157

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2008)06-0044-03

Contrast Experimental Study on Residual Stress Measurement of Roller

YU Fu-jin¹, HUA Yun-song², ZHANG Ke-hua^{1,3}, DING Jin-fu¹

(1. Institute of Machinery Equipment and Measurement & Control Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

[Abstract] The residual stress measurement of roller is very difficult because that the roller has gigantic volume, the surface is out of order and especially there are oxide film and microcrack. In order to test the veracity of the method of the critical refracted longitudinal wave measurement (CRLWM), the CRLWM method, the X radial method and the dead hole method were employed to test the residual stress, and the test result of this three methods was compared to evaluate reliability and validity of CRLWM. The result shows that the result of all of the test method is consentaneous.

[Key words] Residual stress; Roller; Test method; Critical refracted longitudinal wave

0 引言

各工业国都十分重视对残余应力的研究, 欧洲最重要的残余应力会议 (ECRS) 已举行了 6 届, 各国相关研究工作者都踊跃参加。对于残余应力的检测研究虽已开展多年, 其检测方法手段不少, 但由于临界折射纵波 (即 LCR 波) 是纵波以第一临界角入射时产生的特殊模式, 能在试件表层下一定深度内传播, 不仅具有表面波和体波的特性, 而且还具有对应力变化非常敏感这一特性, 所以在一些特殊应用方面具有比传统的表面波和体波更优越的性能, 是无损检测方法中最具发展前景的^[1]。Bray D E 等学者对在各种材料中用 LCR 波技术测应力进行了试验^[2-4]。早期波兰研究者利用该技术测量钢轨中的应力, 并取得了一定的成效^[5-6]。同时 Bray D E 等还探讨了织构对 LCR 波的影响, 研究表明, LCR 波对织构不敏感^[7]。本文用自制的基于 LCR 波法测应力系统在轧辊上进行试验, 为了综合评价该系统测试结果的准确性和可靠性, 将 LCR 波法与目前相对较成熟

的 X 射线衍射法和盲孔法进行了对比测试, 为进一步研究超声波在金属内部的传播机理以及在轧辊等金属构件上的应用打下基础。

1 残余应力测试方法与原理

1.1 基于 LCR 波测试法

如图 1 所示, 探头产生的 LCR 波沿着试件表面并在表层下一定深度以体波的特性 (接近纵波波速) 传播, 与横波相比, 对应力有更高的灵敏度, 受材质的影响更小, 还具有对表面不规则形状 (如表面轻微的腐蚀等) 不敏感的优点, 因此可用 2 个距离固定的 LCR 波接收探头 (本文 2 个接收探头距离 d 为 38mm) 来消除电路上的延时和接触区对测量精度的影响, 可根据 2 个接

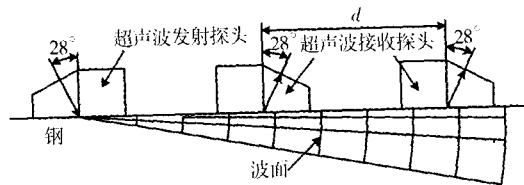


图 1 临界折射纵波的传播模式

Figure 1 Propagation mode of the critically refracted longitudinal wave

[收稿日期] 2008-08-18

[基金项目] 浙江省自然科学基金 (Y106187)

[作者简介] 虞付进 (1965-), 男, 浙江义乌人, 副教授, 硕士, 从事机械设计制造及自动化、超声波检测领域的科研和教学工作。

收探头接收到声波的时间差来衡量超声波在材料中的传播速度变化,利用 LCR 波的声弹常数与应力之间的特定关系来进行残余应力测量^[8]。

相对零应力试样的应力改变量计算公式为:

$$\Delta\sigma = K\Delta t \quad (1)$$

式中, $\Delta\sigma$ 为应力的改变量; K 为超声波应力常数; Δt 为实际工件中测得的声时差减去零应力试样中的声时差,即 $\Delta t = t - t_0$ 。因此,只要得出应力常数 K 和 Δt 即可计算出材料中的应力值。

1.2 X 射线衍射法

X 射线衍射法测材料的残余应力是目前工程上应用较广且认为是最准确的无损检测法。金属材料中的原子通常是有规则地排列,从而形成点阵并构成一系列晶面。当材料中存在拉应力时,平行于应力方向的晶面间距缩小,同时其它方向的晶面间距增大(如图 2 所示)。当材料中存在压应力时情况则相反。因此,通过测量不同方位角 ψ 所对应的晶面间距即可确定材料中的应力值^[9]。

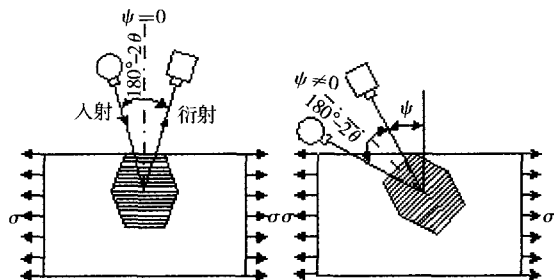


图 2 不同方位的晶面间距示意图

Figure 2 Schematic diagram of interplanar distance of different azimuth

残余应力 σ 的计算公式为:

$$\sigma = -\frac{E}{2(1+\mu)} \times \cot\theta_0 \times \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)} \quad (2)$$

式中, E 为材料的弹性常数, μ 为材料的泊松比, θ 为衍射面法线与材料表面法线之间的夹角, θ_0 为无应力时的衍射角。

1.3 盲孔法

盲孔法的基本原理是在应力场内的待测点上钻一个适当直径和深度的盲孔,孔的邻域内由于部分应力释放,使原有的残余应力场失去平衡,这时盲孔周围材料将会产生一定量的释放应变,该应变大小与被释放的应力具有一定的比例关系,测出该释放应变大小,即可利用相应的计算公式确定被测处的原始残余应力大小^[10],如图 3 所示。

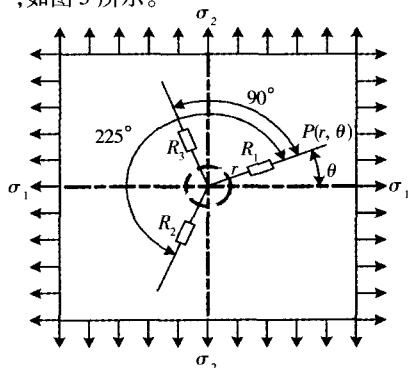


图 3 钻孔时应变片的布置图

Figure 3 Arrangement diagram of strain gauge

纵向和横向残余应力的计算采用(3)式。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_1 \cos^2\theta + \sigma_2 \sin^2\theta \\ \sigma_y &= \sigma_1 \sin^2\theta + \sigma_2 \cos^2\theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

负值表示压缩应力,正值表示拉伸应力。式中, σ_1 和 σ_2 分别为测点的最大和最小主应力, θ 为最大主应力与 R_1 片参考轴的夹角。

2 试验及测试

2.1 试验样本

对比试验选用常用的轧辊材料钢板(含 5% Cr),从实际轧辊上切下轧段制成圆盘作为试样(如图 4a 所示),各测试点分布如图 4b 所示。

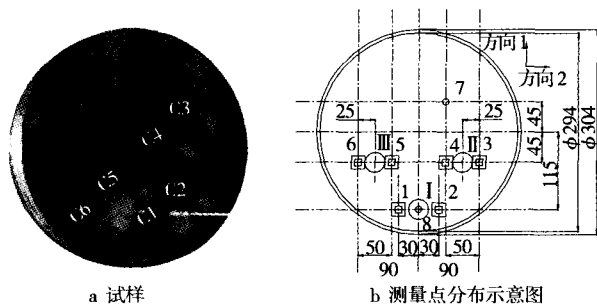


图 4 钢板试样(含 5% Cr)照片及残余应力测量点位置分布

Figure 4 Picture of test specimen and location distribution of points in which measuring residual stress of circular flat-plate 5% Cr

2.2 试验仪器

采用自行研制的基于 LCR 波的超声波应力测量系统。X 射线衍射法测试设备采用日本理学生产的 MSF-3M 型 X 射线衍射应力仪,其工作参数如表 1 所示。

表 1 X 射线衍射应力测量仪的工作参数

Table 1 Working parameters of X ray stress measurement device

序号	项目	参数
1	靶材	Cr
2	滤波片	V
3	X 管电压	30kV
4	X 管电流	8mA
5	时间常数	16s
6	应力常数	-318.00MPa/deg.
7	衍射晶面	(211)
8	测量方法	固定 ψ_0 角法
9	计算方法	$\sin^2\psi_0$
10	定峰方法	半高宽中点法

盲孔法的测试仪器选用 TJ-120- $\phi 1.5$ 应变花,钻孔设备为 PSJ-II 型回转式喷砂打孔装置,应变测试设备选用 YC-III 型应力测量仪。

3 试验结果及分析

为了验证本临界折射纵波测应力系统的准确度和可靠性,在试样上用超声波法和 X 射线衍射法进行测试,结果如表 2 和

表3所示。由于受试样尺寸大小限制,利用超声波法仅测试了方向1上(即X方向)的应力值,而利用X射线衍射法和盲孔法则测试了方向1与方向2(即Y方向)二个方向上的应力值。对比方向1上的应力值,并用相关公式进行计算后可得出,利用基于临界折射纵波法测试的应力值与利用X射线衍射法和盲孔法测试的结果具有较好的一致性。

3.1 超声波法测试的结果

进行超声波法应力测量时整个圆板表面为磨削状态,测量点I、II、III的位置分布见图4,计算结果见表2,其中 σ_1 和 σ_2 分别为测点的最大和最小主应力(文后类同)。定义盲孔法测量退火后的钢板试件(含5%Cr)结果中I点的残余应力值为0MPa,即该点测得的超声波声时差对应的残余应力为0MPa,利用钢(含5%Cr)标定板应力常数标定结果,计算得出表2中I、II、III三点的应力值。由于超声波探头的测量最小长度为38mm,因此,超声波法测量的实际上是被测钢板(含5%Cr)表面深度为6.9mm(用1M探头时)或2.0mm(用3M探头时)且距离为38mm时的平均应力。

表3 1~6点第1次腐蚀后X射线衍射法测钢板(含5%Cr)残余应力的结果

Table 3 Results 1 on measuring the residual stress of circular flat-plate 5%Cr with X-ray diffraction approach

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
方向1	实测值/MPa	-182.8	-259.18	-252.95	-167.86	-263.29	-361.72	-432.88
	偏差值/MPa	±20.88	±39.98	±37.61	±62.51	±51.00	±79.96	±16.01
方向2	实测值/MPa	-40.56	-152.03	-312.3	-232.01	-306.58	-289.84	-467.76
	偏差值/MPa	±71.86	±69.44	±66.12	±71.45	±40.43	±59.76	±16.83
最大应力值/MPa		-202.07	-326.46	-378.13	-259.08	-387.01	-486.47	-624.40
最大应力方向/(°)		-116.19	-127.42	-137.99	-139.59	-137.11	-131.81	-136.09

表4 1~6点第2次腐蚀后X射线衍射法测钢板(含5%Cr)残余应力的结果

Table 4 Results 2 on measuring the residual stress of circular flat-plate 5%Cr with X-ray diffraction approach

位置	1	2	3	4	5	6
方向1	实测值/MPa	243.48	4.44	169.87	343.11	196.71
	偏差值/MPa	±80.73	±22.66	±117.00	±120.39	±38.41
方向2	实测值/MPa	101.95	206.58	106.44	218.77	0.53
	偏差值/MPa	±34.94	±216.28	±159.00	±230.06	±162.72
最大应力值/MPa		263.96	206.63	199.93	406.92	196.71
最大应力方向/(°)		67.31	1.23	58.20	57.51	89.89

表4中测量结果的偏差值比表3中的大,尤其表3中7、8两点在磨削状态下的测量偏差值很小。随着腐蚀深度的增加,其测量结果中的测量偏差值随之增加,这主要是由于试样钢板太重,电解抛光设备无法对其进行电解抛光,而采用30%硝酸酒精腐蚀后,其表面状态很难控制,从而影响了测量结果。

从表3可以看出,7、8两点之间的应力(拉应力)大小和应力方向基本一致。而1~6点与7、8两点比较,其应力方向大致相同,但应力(拉应力)值比7、8点的测量结果明显要小得多。这是由于测量1~6点时腐蚀了100 μ m,测量7、8两点时未腐蚀。从表3可看出,7、8两点测量的应力是磨削加工后的表层磨削附加应力与原有残余应力合成后综合作用到被测件表层的应力。

比较表3和表4的测量结果,可更进一步发现,表4中1点到6点测量的应力由拉应力变成了压应力,且各点应力的方向

表2 超声波法测钢板(含5%Cr)残余应力的结果

Table 2 Results on measuring the residual stress of circular flat-plate 5%Cr with ultrasonic stress measurement method

位置	1M探头测量值		3M探头测量值	
	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa
I	175	157	152	121
II	203	82	167	131
III	147	97	159	78

3.2 X射线法测试结果

X射线衍射法测1~8点残余应力的位置分布见图4b,图4a为测第8点时的照片。测量条件:整个圆板表面为磨削后表面,1至6点先用30%硝酸酒精腐蚀出深度为100 μ m的20mm×20mm方框,再进行测量;7点和8点是未进行腐蚀处理,直接测量的点,测量结果见表3。

此后,1~6点再在上次化学腐蚀的基础上,采用电解抛光的方式腐蚀出深度为300 μ m的10mm×10mm方框,再次进行X射线衍射法残余应力测量,测量结果见表4。

也不再具有一致性。这是因为表4中的测量结果是在上次腐蚀出100 μ m的基础上又向下腐蚀了300 μ m后得到的。从2个表的测量结果也可发现,磨削时产生的附加应力层深度应该在100 μ m以上。表3和表4中出现的较大测量偏差值,是由腐蚀后的被测工件表面状况不是很平整所带来的测量误差。

通过比较X射线衍射法测残余应力结果可以看出,采用X射线衍射法进行残余应力分析时,由于X射线的穿透深度极浅,测定的表面层深度仅为10~35 μ m,因此,若不对被测件表面的加工应力影响层进行去除,很难得到真实的残余应力分布;同时,在进行测量时对于被测物体的表面状况有严格的要求,否则也会带来较大的测量误差。

3.3 盲孔法测试结果

盲孔法测残余应力的测点位置分布I、II、III与超声波法相

(下转第56页)

小,镀层的腐蚀速度也相对较慢。由于对试样进行大气暴露的时间正值雨季,因而 RH 就成为影响镀层腐蚀速率的主要因素。Zn-Ti 复合镀层和锌镀层在湿度较大的环境下都可以起到牺牲阳极的保护作用,但 Zn-Ti 复合镀层的腐蚀电极电位比 Zn 镀层还要低,所以 Zn-Ti 复合镀层在大气暴露中的保护效果更好。

2.4.2 在 5%NaCl 溶液中浸泡的腐蚀性能

将纯 Zn 镀层试样与 Zn-Ti 复合镀层试样同时进行盐水浸泡试验,比较二者在 5%NaCl 溶液中的耐蚀性能,结果见表 2。

表 2 在 5%NaCl 溶液中全浸试验的腐蚀结果

Table 2 The results of corrosion in experimental that immersion in 5% NaCl

样品	镀层厚度/ μm	浸泡面积/ cm^2	浸泡前质量/g	浸泡后质量/g	浸泡时间/h	年腐蚀速率/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
Zn	36.92	21.397	19.210	19.158	214	0.138
Zn-Ti	35.67	21.450	18.120	18.099	214	0.058

从表 2 的数值上可以看出,在机械镀锌工艺过程中添加钛能显著改善镀层的耐蚀性能,镀层年腐蚀速率明显下降,加入钛盐在提高镀层耐蚀性能方面取得了很好的效果。究其原因是由于:从形层角度来看,钛盐的加入在形层过程中起到了致密剂的作用,使形成的镀层更加致密,于是腐蚀介质难以进入^[5];从镀层成分来看,锌钛复合镀层主要由单质 Zn、Sn 以及极少量的 ZnO、TiO、TiO₂ 组成,镀层中的 TiO、TiO₂ 对镀层具有很有有效的保护作用,而且 Ti 有很强的自愈能力,一旦遭受腐蚀破坏马上

(上接第 46 页)

同(参见图 4),测量结果见表 5。

表 5 盲孔法测钢板(含 5%Cr)残余应力的结果

Table 5 Results on measuring the residual stress of circular flat-plate 5%Cr with blind approach

位置	I	II	III
σ_1/MPa	130.0	136.8	162.9
σ_2/MPa	102.2	100.7	114.4
最大应力值/MPa	166.4	169.9	199.1
最大应力方向/ $^\circ$	45	49	50

比较表 4 和表 5 的测量结果可以看出,在去除了被测圆板加工表面的应力层后,采用 X 射线衍射法与采用盲孔法进行残余应力测量,其应力的大小与方向趋势基本一致,误差范围在 20% 以内。

4 结 论

对超声波法、X 射线衍射法和盲孔法进行了对比试验和相关计算。超声波法测量的是试样表面一个波长深度范围之内和一定距离(38mm)的声时差,因此,该方法是测量某一范围内的平均应力。材料性能的变化对超声波的传播速度有一定影响,尤其是对组织比较粗大的材料,这也是产生测量误差的一个重要因素。结果表明,采用基于 LCR 波的超声波法测试应力值与 X 射线衍射法和盲孔法测量的结果基本一致,是一种很有前途的无损测量应力方法。

就愈合,同时 TiO₂ 的存在能提高镀层的极化电阻,降低腐蚀电位,从而提高镀层的耐腐蚀性能。

3 结 论

机械镀 Zn-Ti 复合镀层是一种综合性能优良的防护性镀层,比机械镀纯 Zn 层外观更为均匀平整,颜色更加亮白;具有较好的致密性,无贯穿性孔隙;与基体金属的附着性良好,镀层与基体的结合能力和耐腐蚀性均优于机械镀纯 Zn 层。

[参 考 文 献]

[1] 何明奕,王胜民,刘丽,等. 无结晶金属微粉形成镀层——机械镀[J]. 金属热处理,2006,31(2):16-19

[2] 王胜民,何明奕. 机械镀锌层的孔隙率分析[J]. 腐蚀与防护,2005,26(10):418-421

[3] 密特 L,皮兹 A (法). 粘接表面处理技术[M]. 陈步宁,黎复华译. 北京:化学工业出版社,2003. 10

[4] Pat U S. Composition and process for mechanical plating of nickel-containing coatings on metal substrates [J]. Corrosion, 1998, 115(7): 455-459

[5] 钟福平,何明奕. 稀土元素对机械镀锌层性能的影响[J]. 电镀与涂饰,2007,26(10):18-20

[参 考 文 献]

[1] 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

[2] Bray D E, Junghans P. Application of the LCR ultrasonic technique for evaluation of post-weld heat treatment in steel plates [J]. NDT & E International, 1995,28(4): 235-242

[3] Bray D E, Pathak N, Strinivasan M N. Residual stress mapping in a stream turbine disk using the LCR ultrasonic technique [J]. Materials Evaluation, 1996,54(7):832-839

[4] Bray D E, Tang W, Grewal D S. Ultrasonic stress evaluation in a compressor rotor [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1997,25(5): 503-509

[5] Szelazek J. Ultrasonic measurement of thermal stresses in continuously welded rail [J]. NDT & E International, 1992,25(2): 77-85

[6] Bartosiewicz A. 超声波应力检测在铁路工业中的应用[J]. 阎锋译. 国外铁道车辆,1999,36(6): 33-38

[7] Bray D E, Tang W. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the LCR ultrasonic wave [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 207:231-240

[8] 虞付进,赵燕伟,虞先晓. 超声应力检测中应力常数的标定试验研究[J]. 机械设计与研究,2007,23(4):98-101

[9] 安正植,王文宇. X 射线应力测定方法[M]. 长春:吉林大学出版社,1990. 160-208

[10] 陈怀宁,陈亮山,董秀中. 盲孔法测量残余应力的钻削加工应变[J]. 焊接学报,1994,15(4):276-279