

文章编号:1000-582X(2003)06-0063-03

铍焊件残余应力 X 射线断层扫描测定法

陈玉安, 周上祺

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:铍是广泛应用于核能、航空和航天工业的稀有轻金属, 作为结构材料, 因加工过程而引入的残余应力对其制品的使用将带来不良影响, 测定残余应力的大小具有重要的意义。针对传统 X 射线残余应力检测技术, 提出了 X 射线断层扫描测定法。该方法利用现有仪器, 通过改变测定技术和计算方法, 可以无损测定铍等轻金属制品表面残余应力及沿层深的分布。采用这一新方法计算了弧形铍焊件焊缝附近表面、距表面 0.5 mm 和 1.0 mm 处的残余应力, 同时还计算出铍无应力(103)晶面的面间距 d_0 , 结果与根据晶面间距公式计算出的铍(103)晶面的面间距吻合较好。

关键词:X 射线应力分析; 残余应力; X 射线衍射; 断层扫描

中图分类号: TG115

文献标识码: A

铍因具有比重轻, 比强度和比热容高, 优良的导热性和对热中子吸收截面小等优点, 在核能和航空、航天工业中得到广泛应用^[1]。但铍作为结构材料, 其延性差、脆性大, 在加工制造过程中产生的残余应力, 常常使工件寿命缩短甚至失效^[2]。因此, 研究其残余应力的测定原理和方法具有重要的意义。

在残余应力的测定方法中, X 射线法是最成熟而被广泛应用的技术。由于 X 射线在铍中有较大的穿透深度(可达到毫米量级), 因而, 用常规 X 射线残余应力测定方法测试时只能获得有效穿透深度内的平均应力, 而无法测定残余应力随深度的分布。本文提出适合于铍等轻金属材料残余应力无损测定的 X 射线断层扫描测定法, 并用该方法测试了弧形铍焊件焊缝附近表面及一定深度处的应力和铍无应力(103)晶面的面间距, 获得了较为满意的结果。

1 试验材料及断层扫描测定装置

试验用 X 射线应力仪为 ASTX2001 型 X 射线应力分析仪, 实验条件为: Fe 靶, Be(103) 晶面, X 光斑直径为 3 mm。试件为用电子束焊接的弧形铍焊件(图 1), 将其安装在断层扫描测量台^[3]上, 同时在 ASTX2001 型 X 射线应力分析仪上加装一对锥度限位狭缝^[4]。测试时, 首先测焊缝附近表面某一点的应力, 然后降低

应力仪的探测器至一定距离, 即测定试件内部指定点的应力, 由于锥度限位狭缝的限制, 只有指定点的衍射信息被探测器接受(图 2)。



图1 弧形铍焊件

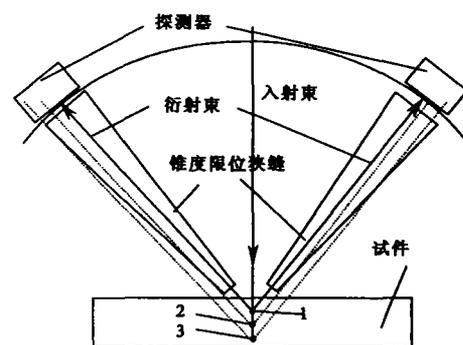


图2 锥度限位狭缝接受指定点的衍射信息

2 X 射线残余应力断层扫描测定原理和方法

2.1 断层扫描法的基本思路

断层扫描法利用 X 射线在轻金属材料中的强穿

• 收稿日期: 2003-01-25

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(200085)

作者简介: 陈玉安(1962-), 男, 江苏高邮人, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事材料学研究。

透能力,在应力仪上加装锥度限位狭缝后,使得只有在被测点周围约 0.4 mm 区域内的衍射信息被探测器接受,在此区域以外的被测试件的其他部位虽然也参与衍射,但由于锥度限位狭缝的限制而不能进入探测器。测试时,试件由断层扫描测量台控制其运动,从而能够将待测点依次带到测量位置,实现残余应力的逐点、逐面和逐层的断层扫描测定。

2.2 应力/应变的分析计算方法

应力/应变计算依据 RIM 原理^[5-6],建立在布拉格定律之上。当工件存在不均匀应变时,其应变将随深度而变化,这种变化在很小的范围内可以认为是线性的,即:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_z \cdot z \quad (1)$$

式中, ε 为深度 z 处的应变, ε_0 为表面的应变, ε_z 为应变梯度。由于测定残余应力的 X 射线束具有一定的宽度和一定的穿透深度,因此,探测器搜集到的是工件被照体积范围内的平均信息,探测到的应变是被照体积应变的加权平均 $\langle \varepsilon \rangle$,可用数学积分式表达为:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\int_V e^{-\frac{z}{\tau}} \varepsilon(x, y, z) dV}{\int_V e^{-\frac{z}{\tau}} dV} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon(x, y, z)$ 为单元体内任一点 (x, y, z) 处的应变, τ 为 X 射线穿透深度,积分限是 X 射线所照射的体积 V ," $\langle \rangle$ " 表示单元体内应变的平均值。由(2)式可知,只要解出 $\varepsilon(x, y, z)$,则问题得到解决。但是,这里求解 $\varepsilon(x, y, z)$ 是一反演问题,笔者采用了以下的数值方法。

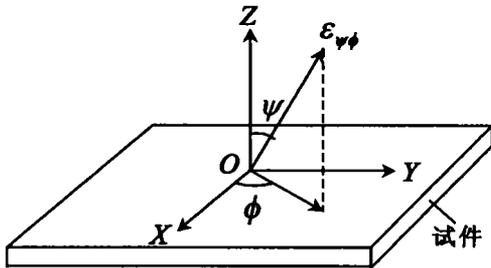


图3 任意方向的应变 $\varepsilon_{\psi\phi}$

根据图3所确定的坐标系,用 X 射线测定的 (ψ, ϕ) 方向的平均应变为:

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon \rangle = & \frac{d_{\psi\phi} - d_0}{d_0} = \varepsilon_{11} \sin^2 \psi \cos^2 \phi + \\ & \varepsilon_{12} \sin^2 \psi \sin 2\phi + \varepsilon_{13} \sin 2\psi \cos \phi + \\ & \varepsilon_{22} \sin^2 \psi \sin^2 \phi + \varepsilon_{23} \sin 2\psi \sin \phi + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi \end{aligned} \quad (3)$$

由连续介质弹性力学知识,被测点处某一微小体积元内任一点的三维应变 ε_{ij} 可以用如下应变矩阵表示,即:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据剪应力互等定律,式(4)中实际上只有 6 个独立的分量。将 ε_{ij} 按 Taylor 级数展开,即:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{011} & \varepsilon_{012} & \varepsilon_{013} \\ & \varepsilon_{022} & \varepsilon_{023} \\ & & \varepsilon_{033} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{z11} & \varepsilon_{z12} & \varepsilon_{z13} \\ & \varepsilon_{z22} & \varepsilon_{z23} \\ & & \varepsilon_{z33} \end{bmatrix} \cdot z \quad (5)$$

其中, ε_{0ij} 和 ε_{zij} 分别表示试件表面的应变和深度 z 处的应变梯度。根据式(1),式(4)中的各应变分量可以表示为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \varepsilon_{011} + \varepsilon_{z11} \cdot z & \varepsilon_{12} &= \varepsilon_{012} + \varepsilon_{z12} \cdot z \\ \varepsilon_{13} &= \varepsilon_{013} + \varepsilon_{z13} \cdot z & \varepsilon_{22} &= \varepsilon_{022} + \varepsilon_{z22} \cdot z \\ \varepsilon_{23} &= \varepsilon_{023} + \varepsilon_{z23} \cdot z & \varepsilon_{33} &= \varepsilon_{033} + \varepsilon_{z33} \cdot z \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3),由于式(5)中含有 12 个独立变量,这样,由应力仪测得 12 组 (ψ, ϕ) ,则可得到一个 12 元的线性方程组,因此,应变的计算也就随之转变为求解线性方程组的问题。最后根据应力 - 应变关系即可求出应力及其深度梯度。

3 无应力晶面间距

在上述求解线性方程组的过程中,有一个值得注意的参数,即无应力晶面间距 d_0 。以往的一般方法是,根据被测材料已知的衍射晶面(HKL)按晶面间距公式计算出 d_0 ,然后将 d_0 作为已知参数代入计算,这对于简单晶体结构材料来说尚无问题,但在测定较为复杂的晶体结构材料时,无疑将增加计算的工作量。事实上,在本文提出的应变计算方法中,无须先求出 d_0 ,这一计算完全可以归并到线性方程组的求解过程中,其基本原理如下:

对于 d_0 未知的材料,将式(3)中的 $\left(\frac{d_{\psi\phi} - d_0}{d_0}\right)$ 化为 $\left(\frac{d_{\psi\phi}}{d_0} - 1\right)$,这样,将 $(1/d_0)$ 作为一个未知数,则由式(6)和式(3)联立组成一个 13 元的方程组,求解该方程组,不仅可以计算出 6 个应变分量和 6 个应变梯度,还可以求出无应力晶面间距 d_0 ,显然,这对于 d_0 未知的材料的残余应力计算无疑具有实际的意义。另外,利用计算出的 d_0 ,通过查阅有关手册中被测材料的无应力晶面间距数据,还可以检验应力/应变计算结果的可靠性。

4 试验结果和讨论

表 1 是本文测试弧形钎焊件焊缝附近残余应力及

深度分布的原始数据, 应力和铍无应力(103) 晶面间距的计算结果如下:

1) 表面

应力(MPa) 矩阵:

$$\begin{bmatrix} .42\ 134E+03 & .56\ 136E+03 & .77\ 471E+03 \\ & .19\ 927E+04 & .78\ 309E+03 \\ & & .58\ 522E-13 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} .00000E+00 & .00000E+00 & .00000E+00 \\ & .00000E+00 & .00000E+00 \\ & & .00000E+00 \end{bmatrix} \cdot z$$

晶面间距: $d_0 = 1.032\ 17 \times 10^{-10}\text{ m}$

2) 距表面 0.5 mm

应力(MPa) 矩阵:

$$\begin{bmatrix} .44\ 756E+04 & .41\ 602E+03 & .16\ 110E+03 \\ & .28\ 688E+04 & .73\ 620E+03 \\ & & .0000E-00 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} .00000E+00 & .00000E+00 & .00000E+00 \\ & .00000E+00 & .00000E+00 \\ & & .00000E+00 \end{bmatrix} \cdot z$$

晶面间距: $d_0 = 1.036\ 04 \times 10^{-10}\text{ m}$

3) 距表面 1.0 mm

应力(MPa) 矩阵:

$$\begin{bmatrix} -.22\ 990E+04 & -.69\ 609E+03 & .49\ 152E+03 \\ & -.14\ 916E+04 & -.50\ 642E+03 \\ & & -.22\ 125E-12 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} .00000E+00 & .00000E+00 & .00000E+00 \\ & .0000E+00 & .00000E+00 \\ & & .00000E+00 \end{bmatrix} \cdot z$$

晶面间距: $d_0 = 1.026\ 40 \times 10^{-10}\text{ m}$

计算结果表明, 试验所用弧形铍焊件焊缝处自表面至 1.0 mm 处的残余应力分量 σ_{11} 、 σ_{12} 、 σ_{22} 由拉应力状态转变为压应力状态, σ_{13} 由正变负, σ_{23} 为正值, 而 σ_{33} 非常小, 几近于零; 计算出的铍无应力晶面(103) 的面间距 d_0 与根据晶体学中晶面间距公式计算出的铍(103) 晶面的面间距 ($1.022\ 93 \times 10^{-10}\text{ m}$) 吻合较好。

表 1 试验原始数据

| | ϕ° | ψ° | shiftA ^① | shiftB | $2\theta_0(^{\circ})$ | |
|------------|----------------|----------------|---------------------|--------|-----------------------|--------|
| 表面 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 138.78 | |
| | | 24.09 | -0.57 | 1.21 | | |
| | | 35.26 | -0.67 | 1.85 | | |
| | | 45.00 | -0.71 | -0.70 | | |
| | | -24.09 | 0.82 | 1.85 | | |
| | | -35.26 | -0.29 | 0.70 | | |
| | | -45.00 | 0.29 | -0.01 | | |
| | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | |
| | | 24.09 | -0.94 | 0.72 | | |
| | | 35.26 | -1.36 | -0.54 | | |
| 距表面 0.5 mm | 0.00 | 45.00 | -1.90 | -0.11 | 138.88 | |
| | | -24.09 | 0.01 | 0.76 | | |
| | | -35.26 | -1.23 | -0.43 | | |
| | | -45.00 | -0.51 | 0.24 | | |
| | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | |
| | | 24.09 | -0.83 | -0.60 | | |
| | | 35.26 | -1.08 | -1.27 | | |
| | | 45.00 | -3.06 | -0.25 | | 139.10 |
| | | -24.09 | -0.089 | 0.28 | | |
| | | -35.26 | -0.9 | -0.43 | | |
| -45.00 | -0.74 | 0.63 | | | | |

注 ① 计算中的 $2\theta = 2\theta_0 - \text{shiftA}$ 或 $\text{shiftB} \times 0.029^{\circ}$

5 结 论

1) X 射线残余应力断层扫描测定法是一种全新的方法, 它能够无损测定铍及其制品的三维残余应力及深度分布;

2) 弧形铍焊件的残余应力, 自焊缝附近表面至 1.0 mm 深度处的残余应力分量 σ_{11} 、 σ_{12} 、 σ_{22} 由拉应力状态转变为压应力状态, σ_{13} 由正变负, σ_{23} 为正值, 而 σ_{33} 非常小, 几近于零;

3) 用 X 射线残余应力断层扫描测定法计算出的铍无应力(103) 晶面的面间距 d_0 与根据晶体学中晶面间距公式计算出的铍(103) 晶面的间距 ($1.022\ 93 \times 10^{-10}\text{ m}$) 吻合较好, 证明了该方法的正确性。

参考文献:

- [1] 宁夏有色金属研究所. 铍的应用(第 1 版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1973, 19-20.
- [2] 稀有金属编写组. 稀有金属应用(上)(第 2 版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984, 41-44.
- [3] 陈玉安. 铍材 X 射线残余应力无损测定原理和方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [4] 周上祺. X 射线残余应力测定装置和方法[P]. 中国专利: ZL97101150, 2000-08.
- [5] WERN H. Influence of Measurement and Evaluation Parameters on Stress Distributions Investigated by X-rays[J]. Strain, 1991, 27(11): 127-136.
- [6] PEITER A. Simultaneous X-ray Measurements in-situ of Tri-axial Stresses, Poisson's Ratio and the Stress Free Lattice Spacing, Strain[J]. 1987, 23(8): 103-108. (下转第 69 页)

参考文献:

- [1] 余叔藩. SMA 路面在欧洲的实践[J]. 国外公路, 2002, 120(1): 14-18.
- [2] 美国沥青协会. Superpave 水准 1 沥青混合料设计[M]. 余叔藩译. 重庆: 交通部重庆公路研究所, 1997.
- [3] 赵可, 李海骢. 改性沥青感温性评价指标的讨论[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 10.
- [4] 乐云祥, 常英. 大跨钢箱梁斜拉桥施工控制要点分析[J]. 国外桥梁, 2000, (3): 72-74.
- [5] 方荣生. 太阳能应用技术[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1985.
- [6] 方福森. 路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.

Numerical Model of Temperature Field in SMA Asphalt Road Surface of Steel Box Girder Bridge

LAN Zhong-qiu¹, HE Chuan¹, DAN Yu¹, CHEN Li¹, WU Guangrong²

(1. Power Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Highway Research Institution of Traffic Ministry, Chongqing 400035, China)

Abstract: When paving SMA asphalt road surface, the temperature factor must be thought over which infects life-span of road surface. Winter and summer temperature distribution on a steel box girder bridge is simulated, compared with data measured on EGongYan Bridge in Chongqing and HaiCang Bridge in Xiamen. A change range of high road surface design temperature suit to China is given.

Key words: steel box girder bridge; SMA asphalt road; temperature distribution; numerical simulation

(编辑 陈移峰)

(上接第 65 页)

Research on X-Ray Computer Tomography for Measuring Residual Stresses of Beryllium Weldment

CHEN Yu-an, ZHOU Shang-qi

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Beryllium is a light rare metal, which is broadly used in nuclear energy, aviation and aerospace industry. As a structural material, the residual stresses in it during processing have a harmful influence upon its products in use. So it is very important to measure the residual stresses. Overcome the shortcoming of traditional X-ray residual stress measuring techniques, X-ray computer tomography is presented. This technique used in the present analyzer can non-destructively measure light metals' residual stresses with depth resolution, such as beryllium, by altering measuring and evaluating method. The residual stresses at the surface nearby welding of arc Beryllium weldment, the depth of 0.5 mm and 1.0 mm under the surface are evaluating by X-ray computer tomography, meanwhile the stress free lattice spacing, d_0 , of beryllium (103) plane is calculated with this technique. The result shows that d_0 is closed to the one calculated by the lattice spacing formula of crystallography.

Key words: X-ray stress analysis; residual stresses; X-ray diffraction; X-ray computer tomography

(编辑 陈移峰)