

泡沫金属直流电位法检测技术

张 静,解社娟,陈振茂

(西安交通大学 强度与振动教育部重点实验室,西安 710049)

摘要:为验证直流电位法检测泡沫金属缺陷孔洞及大小的有效性,对实物泡沫金属进行了直流电位法无损检测试验。设计制作了具有不同大小缺陷的五个试件,对各试件进行了恒流加载和表面电位分布测量,并对所测结果进行了相应的差分及滤波处理,以提高信噪比。同时,为确定有效的试验条件,运用有限元分析程序对电位检测信号进行了数值模拟。试验和数值结果表明,对泡沫金属可以利用直流电位方法检出缺陷,且缺陷大小和检测电位信号的大小有一定对应关系。这为泡沫金属缺陷的定量无损检测打下了基础。

关键词:泡沫金属;直流电位法;有限元法

中图分类号: TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2010)08-0612-04

Direct Current Potential Drop Inspection Technique for Metallic Foam

ZHANG Jing, XIE She-Juan, CHEN Zhen-Mao

(MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to verify the validity of direct current potential drop (DCPD) inspection technique for inspecting the defects and its size in metallic foam, the real metallic foam inspection experiment by DCPD was conducted. Five specimens with defects of different sizes were fabricated. Direct current was loaded to the specimens respectively and the potentials on the middle line of the top surface of the specimens were measured. By making difference and filtering operation, the S/N ratio of the measured signals was improved. In addition, a numerical model was built to simulate the DCPD signals by using an FEM numerical code. Based on the experimental and the numerical results, it showed that the defect in the actual metallic foam could be detected by using DCPD technique, and the size of the defects depended on the amplitude of the potential signal, which laid a foundation for the quantitative NDT of the metallic foam.

Keywords: Metallic foam; Direct current potential drop; Finite element method

泡沫金属(图1)具有轻质、比强度高、比表面积大、隔音、隔热和电磁屏蔽等优点,在航空航天、汽



图 1 泡沫金属示例

车、军事等众多领域具有广泛的应用前景^[1]。在泡沫金属的制备过程中,由于条件控制不良等因素,可能造成多个孔泡相互融合形成大孔缺陷,若实际使用可能造成严重后果。因此,泡沫金属使用前须对材料进行定量无损检测。

直流电位检测方法(DCPD)由于没有集肤效应,电流可进入材料内部,在缺陷部分形成扰动^[2-5],并引起检测面电位分布的变化。通过检测这一变化可以推断材料内部缺陷的存在和大小,因此直流电位法有望成为泡沫金属内大孔缺陷检测的有效方法。图2为直流电位法的示意图。

为确定直流电位法检测实际泡沫金属缺陷孔洞

基金项目:国家973资助项目(2006CB601206)

作者简介:张 静(1986—),女,硕士研究生,研究方向为电磁无损检测。

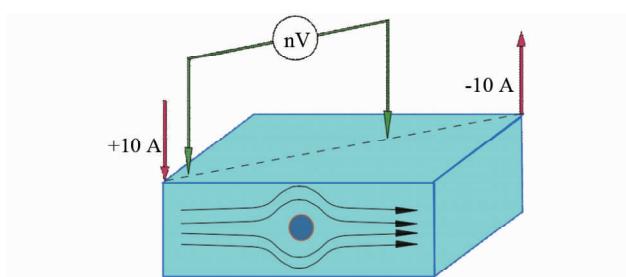


图 2 直流电位法示意图

及大小的有效性,对实物泡沫金属进行了直流电位法无损检测试验。同时为确定有效的试验条件,还运用有限元程序对检测信号进行了数值模拟。

1 数值计算

1.1 有限元程序简介^[6]

恒流场中基本方程^[7]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

$$\text{物质方程: } \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

式中: \mathbf{E} —电场强度矢量;

\mathbf{J} —电流密度矢量;

σ —导体的电导率分布函数。

由上式可得如下恒流场控制方程:

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (4)$$

选用立方体八节点等参元和伽辽金有限元法对式(4)进行离散求解。利用单元刚度阵:

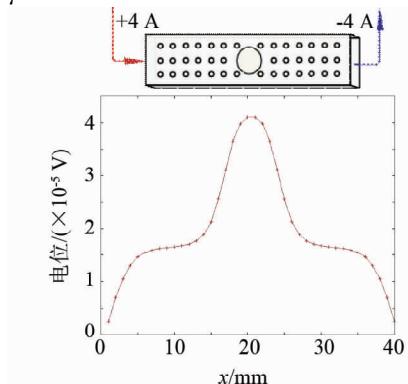
$$[K_e] = \sigma \int_{V_e} \nabla N^T \cdot \nabla N dV$$

可得恒流加载时的有限元方程:

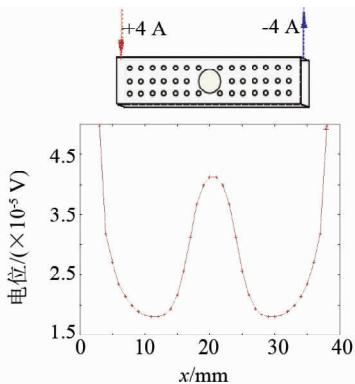
$$[K] \{ \varphi \} = \{ 0, \dots, I, 0, \dots, -I, 0, \dots 0 \}^T \quad (5)$$

式中 I 和 $-I$ 分别为加载点的流入和流出电流。

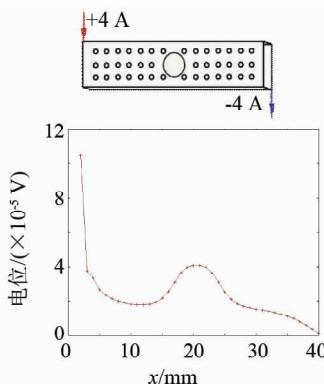
当恒压加载时,只需把加载点相应方程换为 $\varphi_i = \varphi_0$,再把其他方程中的未知数 φ_i 换成加载电位 φ_0 ,并乘以系数后移到右端即可。



(a) 加载方式 1



(b) 加载方式 2



(c) 加载方式 3

图 4 3 种加载方式下电位差计算结果

1.2 有效试验条件的确定

为确定有效的试验条件,对不同条件的检测问题,建立了数值计算模型,利用上述有限元程序对检测信号进行了计算。

所建立数值计算模型如图 3 所示,主要参数为板长 200 mm,宽 50 mm,厚 10 mm,缺陷孔洞在板的中央,缺陷直径分别为 30,24,18,12,6 mm。

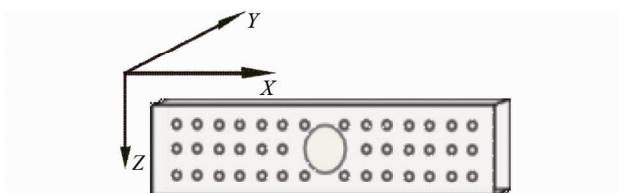


图 3 模型示意图

考虑到泡沫金属材料的特点,计算模型中用比致密金属材料电导率小的均匀材料来模拟泡沫金属^[8]。

1.2.1 加载方式的影响

针对三种典型加载方式(侧面中心加载、上表面对边中点加载和体对顶点加载),用有限元程序计算所得上表面电位差分布如图 4 所示。其中所加恒定电流大小均为 4 A。

可见,三种加载方式的结果在缺陷处电位差有一个峰值,可由此检测泡沫金属的内部缺陷。这些结果初步证明 DCPD 法对泡沫金属缺陷检测的有效性。

加载方式 2 和 3 的电极位置在上表面(检测面),电极的影响使其附近电位差值较大,不宜识别。因此采用方式 1 加载。

1.2.2 加载电流的影响

图 5 为采用加载方式 1(侧面中心加载),分别施加 4 和 10 A 激励电流时,计算所得上表面上相邻点电位差。

计算结果表明,电流较大时缺陷信号增大,更易

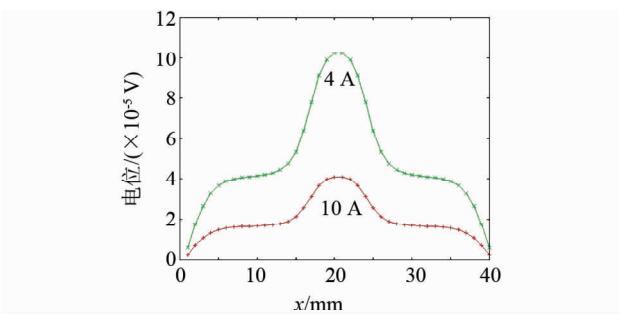


图 5 电流为 4 和 10 A 时上表面电位

检出缺陷。结合试验中恒流源及纳伏表仪器检测范围,决定采用 10 A 的激励电流进行直流电位法检测试验。

1.2.3 不同缺陷大小模型的电位差分布

对图 3 所示模型,不同直径缺陷产生的电位差信号如图 6 所示。计算中采用了侧面中心加载方式,加载电流为 10 A。

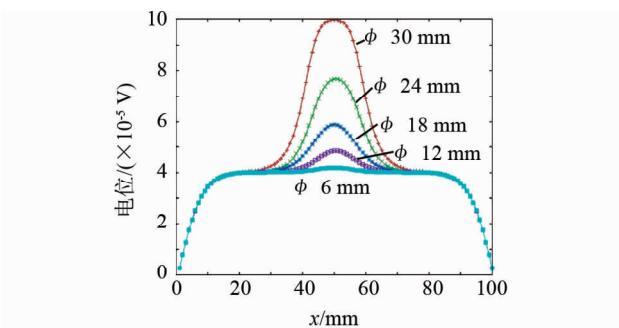


图 6 不同缺陷大小的电位差

可见,当缺陷孔洞位置都在中心、孔洞大小不同时,检测信号的峰值位置相同,但峰值大小随缺陷孔洞的增大而有规律地增大。因此可通过信号的峰值来推定缺陷的大小。

2 试验

2.1 直流电位法试验平台的搭建

试验系统由直流电源(Agilent N6700B)、纳伏表(Agilent 71/2 Nano Volt /Micro Ohm Meter HP34401A)、限流电阻(3 个 1Ω , 50 W 电阻并联)、三维扫查台(日本中央精机 CHUO SEIKI 2 轴控制器驱动 QT-CM2)、试件、电位测量探针、电极及相应的夹具构成,系统结构如图 7 所示。直流电源、试件和限流电阻通过导线形成回路。

直流电源用来给试件加载恒流电流,从电源接出的两个电极夹在试件上;扫描台由步进电机精确控制,可由 PC1 上的 Q-Edit 软件进行编程控制;纳伏表测量试件检测表面的电位分布,探针在扫描台

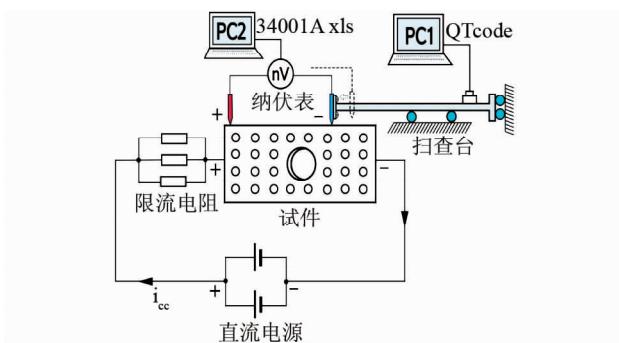


图 7 试验系统结构图

的控制下以一定的步长移动,每移动到下一点停止运动,将此刻测得的两探针间的电位差信号送入纳伏表;PC2 与纳伏表连接,采集记录纳伏表测得的电位差。搭建的试验平台如图 8 所示。



图 8 试验平台

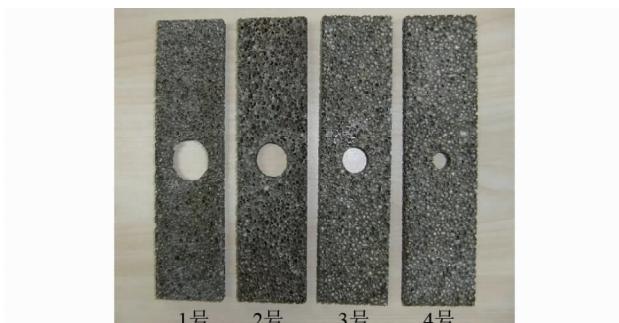


图 9 试验试件



图 10 加载及测量方式

设计制作的具有不同大小缺陷的试件如图 9 所示。试件尺寸和数值计算模型相同。

2.2 泡沫金属直流电位法检测试验

在搭建的试验平台对上述试件进行直流电位法

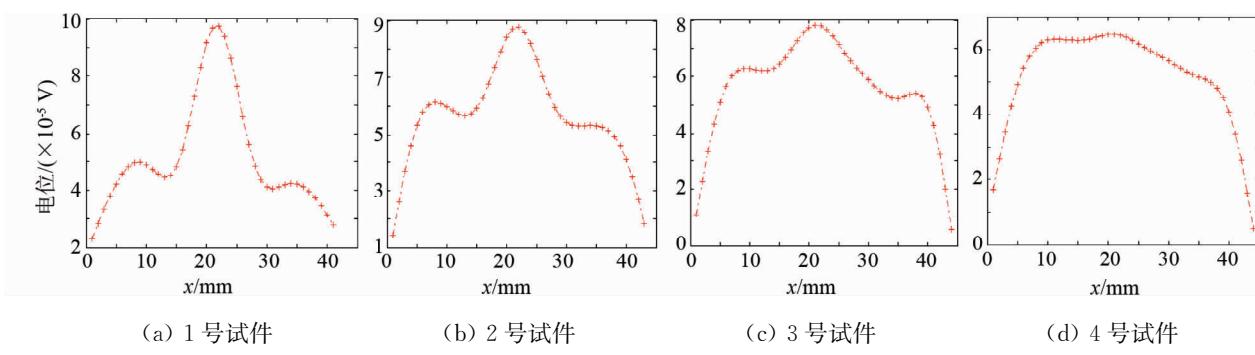


图 11 电位差分信号滤波结果

检测试验(图 10)。具体试验条件为:恒定电流 10 A;加载方式为侧面中心加载;纳伏表探针一端固定,另一端在扫描台控制下扫描。

为了观察检测面电位差的分布,对试验测得电位信号相邻两点进行差分,并且对差分信号进行滤波处理以提高信噪比。所得上表面的电位差分布结果如图 11 所示。

可以看到,在缺陷位置有明显电位差峰值。1,2,3 号试件中的缺陷从测量结果中可以分辨出,但 4 号试件信号很小,较难分辨。3 号试件缺陷直径为 18 mm,即宽度方向大孔缺陷检测能力在 36% 以上。

由于泡沫金属的电导率很大,电位差信号很小,这就对测量仪器的精度提出了很高的要求。泡沫金属材料本身不规则的小孔以及检测面的不平也给结果造成了明显的噪声。纳伏表的理论精度为 1 nV,但实际测量时存在漂移,这对试验测量结果的精度有一定的影响。如果增大恒流源的电流值,检测出的电位值也会增大,这对减小噪声的影响有一定的作用。采用稳定性更好的纳伏表和更大的激励电流,会进一步有效增加本方法的检测能力。

3 结论

对实物泡沫金属进行了直流电位法无损检测试验,运用有限元分析程序对试验条件进行了选择。试验和数值结果显示,即使对于实物泡沫金属,也可

(上接第 611 页)

时掌握设备的运行情况,而且可以根据监测积累的数据对设备的未来运行状况做出预判,提高设备安全保障水平的同时不影响生产效率。

参考文献:

- [1] 杨秉玉,刘启周.颤振状态下叶片振动的相应的试验研究[J].燃气涡轮试验与研究,2002,15(2):31—35.

以利用直流电位方法检出缺陷,且缺陷大小和检测电位信号的大小有一定对应关系。所得结果为泡沫金属的定量无损检测打下了基础。

参考文献:

- [1] 卢天健,何德坪,陈常青,等.超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J].力学进展,2006,36(4):517—518.
- [2] 李家伟,陈积懋.无损检测手册[M].北京:机械工业出版社,2002:2—4;426.
- [3] Tada N, Naoya. Application of direct-current potential difference method to evaluation of various damages in conductive materials[C]. ASME 2008 Pressure Vessel and Piping Conference. USA: Chicago, 2008.
- [4] Tada N, Hayashi Y. Analysis on the applicability of direct current electrical potential method to the detection of damage by multiple small internal cracks[J]. International Journal of Fracture, 1997, 85(1):1—9.
- [5] Ghajar R. An alternative method for crack interaction in NDE of multiple cracks by means of potential drop technique[J]. NDT&E International, 2004, 37(7):539—544.
- [6] 解社娟.泡沫金属无损检测方法研究[D].西安:西安交通大学,2009.
- [7] 盛剑霓.工程电磁场数值分析[M].西安:西安交通大学出版社,1999.
- [8] 刘培生,李铁藩.泡沫金属电阻率的计算方法[J].稀有金属材料与工程,1999,28(4):19.
- [2] 萨博洛斯基 H E,著.涡轮机叶片的非接触测量[M].吴士祥,郑叔琛,译.北京:国防工业出版社,1986.
- [3] 张玉贵,段发阶,叶声华.旋转叶片异步振动的频率识别技术[J].振动与冲击,2007,16(12):106—108.
- [4] 武俊平,韩中合,丁常富.汽轮机叶片动态测量技术的研究与发展[J].汽轮机技术,2003,20(3):54—58.
- [5] 张玉贵,段发阶,方志强,等.端矢速迹法分析叶片同步振动的方法研究[J].传感技术学报,2007,20(9):2044—2048.