

基于 DIC 方法的烧结钕铁硼弯曲试验研究

雷国华, 王焕然*, 万 印, 任春影

(宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用 MTS 万能材料试验机对烧结钕铁硼永磁材料进行了不同加载速度下的弯曲性能试验. 结合数字图像相关方法测得三点弯曲下烧结钕铁硼的抗弯强度和弹性模量, 得到了试样表面的应变分布云图和不同位置处的应变分布. 结合扫描电子显微镜对回收试样进行了断裂机理分析.

关键词: 烧结钕铁硼; 高速摄影; 数字图像相关方法; 扫描电子显微镜

中图分类号: TM273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 03-0045-05

烧结钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁材料自问世以来, 因其具有优异的磁性能, 且原料资源丰富、成本低廉, 被广泛应用于计算机、航空航天、信息电子、汽车工业等众多领域^[1]. 在传统的计算机及电子技术领域, 烧结 Nd-Fe-B 永磁材料制作的器件基本上不承受外载荷作用, 人们关注的重点主要集中在其较好的电磁学性能以及为改变磁性能而进行的微结构分析等^[2-4], 对其力学性能关注很少. 在现代汽车工业和军事通讯、导弹制导、雷达等尖端国防技术装备中, 烧结钕铁硼永磁材料作为许多重要部件的关键功能材料, 这些部件在服役期内经常受到外载荷的作用, 需要其具有高的抗震性能.

Rabinovich 等^[5]对烧结 Nd-Fe-B 磁体的弹性模量、强度、硬度等进行了测定, 在三点弯曲实验中发现 Nd-Fe-B 磁体表现出与陶瓷相似的脆性断裂特性, 抗裂纹扩展能力低. 刘薇等^[6]用 Zwick 万能试验机对烧结 Nd-Fe-B 永磁材料进行了 0.01、0.05、0.10 mm·min⁻¹ 不同加载速度下的三点弯曲试验, 最大消耗功和断裂功几乎相等, 塑性功为 0. 烧结 Nd-Fe-B 永磁材料是一种比较复杂的各向异性材料, 其微观结构的不均匀性可能使实验数据较为分散, 为了更好地对烧结 Nd-Fe-B 磁体的受载变形状态进行测量, 运用一种非接触式光学测量技术是非常必要的, 但在前人的研究工作中, 目前还没有涉及到这项技术. 数字图像相关(Digital Image

Correlation, DIC)方法作为非接触式光学测量技术中的一种, 具有试样表面处理简单、数据采集简便、测量精度高等优点, 已经被广泛应用于材料性能测试领域.

本文利用 MTS 万能材料试验机对烧结钕铁硼永磁材料进行了不同加载速度下的弯曲性能试验. 结合 DIC 方法测得了三点弯曲下烧结钕铁硼的抗弯强度和弹性模量, 并得到了试样表面的应变分布云图和不同位置处的应变分布. 结合扫描电子显微镜(SEM)对回收试样进行了断裂机理分析.

1 实验过程

1.1 实验样品

实验采用粉末冶金方法制备的烧结钕铁硼块状磁体, 大小为 57.5 mm × 38.5 mm × 48.0 mm, 三点弯曲试样是利用电火花线切割方法从磁体上切取的 3 mm × 6 mm × 30 mm 的长方体试样, 磁化方向沿高度方向取向, 图 1 是三点弯曲试样尺寸图.

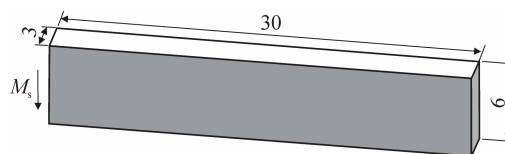


图 1 试样尺寸图(mm)

1.2 抗弯强度和弹性模量的测定

利用 MTS 810 万能材料试验机对试样进行三

收稿日期: 2017-11-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11572164).

第一作者: 雷国华(1992-), 男, 湖北荆门人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: 1029207901@qq.com

*通信作者: 王焕然(1976-), 男, 河南周口人, 博士/副教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: wanghuanran@nbu.edu.cn

点弯曲试验, 试验跨距为 24 mm, 加载压头和支撑滚柱的半径均为 2 mm, 试验机采用位移加载控制, 设置加载速度分别为 0.1, 0.5 和 1.0 mm·min⁻¹, 每种加载速度测试 3 个试样, 高度方向为力加载方向. 图 2 和图 3 分别为高速摄影装置图和三点弯曲示意图. 实验过程中, 在试验机和摄像机之间连接了一个数据同步仪(NI), 保证摄像机照片和试验机数据一一对应. 此外, 利用 MTS 万能材料试验机对烧结 Nd-Fe-B 磁体进行了加载应变率为 10⁻³ s⁻¹ 的准静态压缩试验, 试样为圆柱体, 尺寸为 Φ5 mm×10 mm, 高度方向为其磁化方向. 试验前, 需先对试样表面进行人工喷斑处理, 这样是为了后续利用 VIC-2D 软件对高速摄影拍摄的图像进行处理分析.



图 2 高速摄影装置图

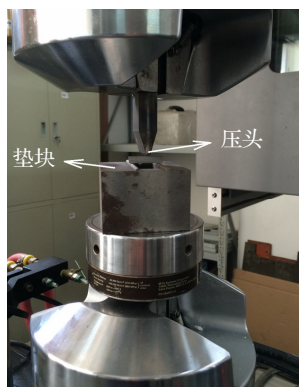


图 3 三点弯曲示意图

1.3 显微组织分析

利用日立 SU-70 型场发射扫描电子显微镜对回收的试样进行微观观测.

2 实验结果与分析

2.1 抗弯强度和弹性模量测量

弯曲试验过程中, 通过高速摄影可以直观地观察到试样表面从加载到破坏的全过程, 然后利用 VIC-2D 软件对拍摄到的图像进行分析处理, 进

而得到其弯曲挠度数据, 并结合数据同步仪同步得到的试验机上的弯曲载荷数据, 通过 Origin 图像处理软件可以绘制出如图 4 所示的载荷—挠度曲线. 抗弯强度 σ 由公式(1)计算得到, 其计算结果如表 1 所列. 从图 4 中可以看出, 当加载速度为 0.1 mm·min⁻¹ 时, 载荷—挠度曲线表现出近似线性关系, 当加载速度为 0.5 和 1.0 mm·min⁻¹ 时, 其曲线呈逐渐上扬趋势, 且加载速度越大, 上扬趋势愈明显. 表明在不同的加载速度下, 载荷—挠度曲线呈现出一定的率相关性, 随着加载速度的增加, 试样的挠度逐渐减小, 而断裂时的峰值载荷逐渐增大, 抗弯强度也逐渐增大.

$$\sigma = 3Fl / (2bh^2), \quad (1)$$

式中, F 为加载力; l 为试验跨距; b 为试样宽度; h 为试样高度.

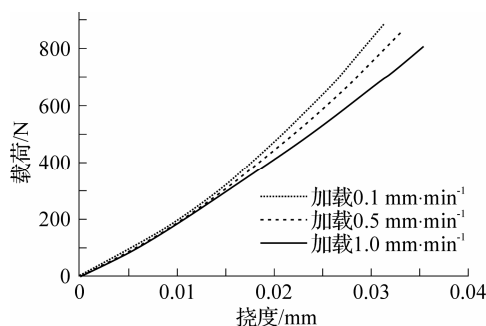


图 4 载荷—挠度曲线

利用 VIC-2D 软件对高速摄影拍摄的图像进行分析处理, 经过相关设置操作后, 可以输出得到试样表面的 v - c 场变化云图, 进而导出其 v - c 场数据, 此时 v - c 场数据的平均值近似等于试样的弯曲挠度 f , f 取 3 次平均值, 由公式(2)可计算得到试样的弹性模量 E , 其计算结果如表 1 所列.

$$E = Fl^3 / (4bh^3 f), \quad (2)$$

式中, F 为加载力; l 为试验跨距; b 为试样宽度; h 为试样高度; f 为试样弯曲挠度.

表 1 测试结果

加载速度 v / (mm·min ⁻¹)	加载力 F /N	挠度 f /mm	抗弯强度 σ /MPa	弹性模量 E /GPa
0.1	809.50	0.035	269.83	123.35
0.5	865.76	0.033	288.59	139.92
1.0	889.35	0.031	296.45	153.01

为了验证在三点弯曲试验中通过 DIC 方法所测得的弹性模量的有效性, 利用 MTS 万能材料试

验机对烧结 Nd-Fe-B 圆柱试样进行准静态压缩试验。图 5 是从准静态压缩实验中获得的试样的应力

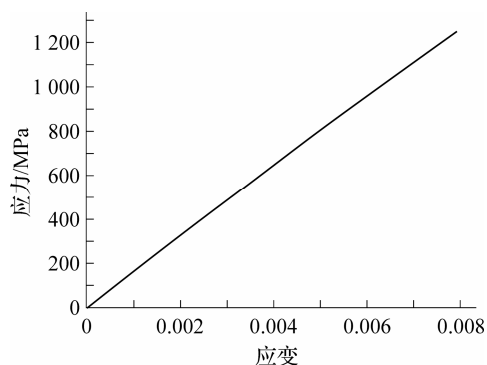


图 5 准静态压缩应力与应变关系

与应变关系曲线, 通过应力—应变曲线可以算出试样的弹性模量为 151.68 GPa, 这与三点弯曲试验所测得的弹性模量相近, 并与文献[7]记载的弹性模量一致, 说明 DIC 方法的有效性。

2.2 应变云图分析

利用 DIC 方法处理得到试样在不同加载阶段的表面应变云图如图 6 所示, 其中 e_{xx} 表示水平方向应变, 其正负值分别表示水平方向受拉伸和压缩; e_{yy} 表示竖直方向应变, 其正负值分别表示竖直方向受拉伸和压缩。随着载荷逐渐增加, 试样表面呈现出不同的变形特性, 其上表面深色区域表明受压变形, 下表面深色区域表明受拉变形。

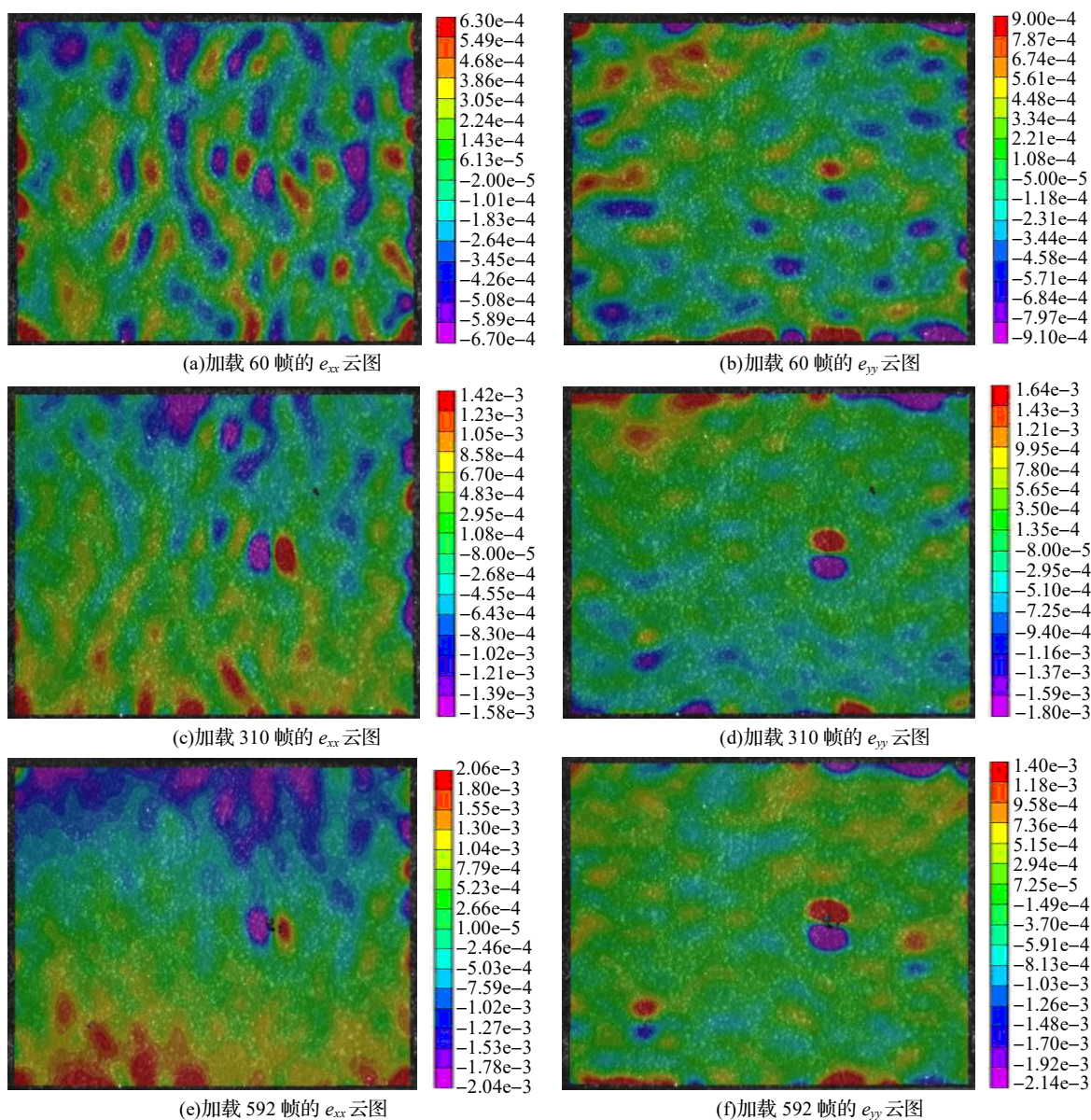


图 6 应变云图

为了进一步分析试样在弯曲加载阶段的应变分布情况,在试样应变云图上沿和下沿以压头为中心向两端分别选取一条线段分析其应变变化规律,选取如图7所示的线段1-1和2-2.

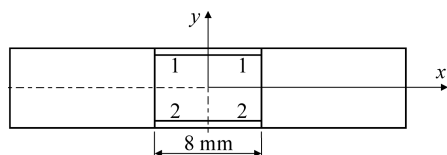


图7 选取线段示意

图8分别给出了不同时刻试样上线段1-1和线段2-2的 e_{xx} 应变分布,从图中可以看出,试样线段1-1在加载到60帧之前,水平方向应变基本接近于0,但之后试样逐渐开始变形,应变逐渐增大,应变为负值,呈现出明显的压应力状态;同样地,试样线段2-2在加载到60帧之前,水平方向应变也基本接近于0,但之后试样也逐渐开始变形,应变逐渐增大,应变为正值,呈现出明显的拉应力状态.而应变云图也呈现出明显的上压下拉的状态,正好与其对应起来,很好地再现了试样承受弯曲载荷时的应变分布状态.

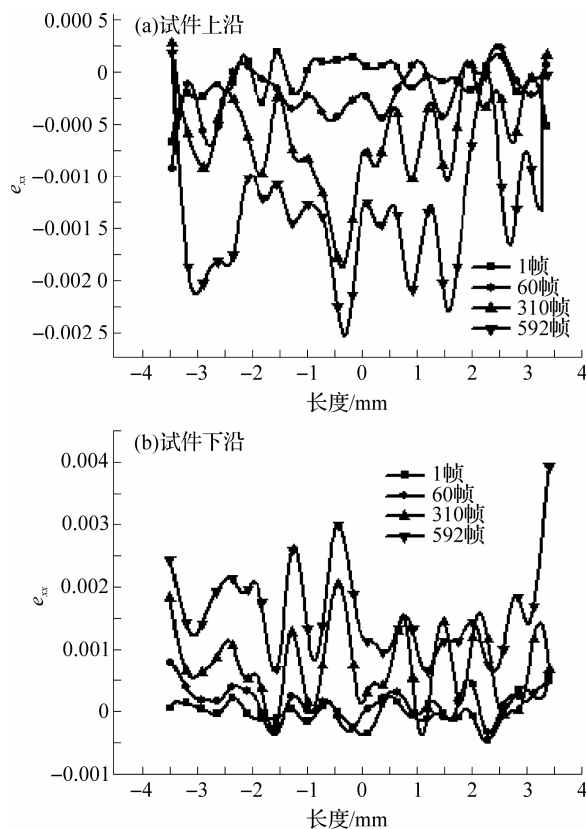
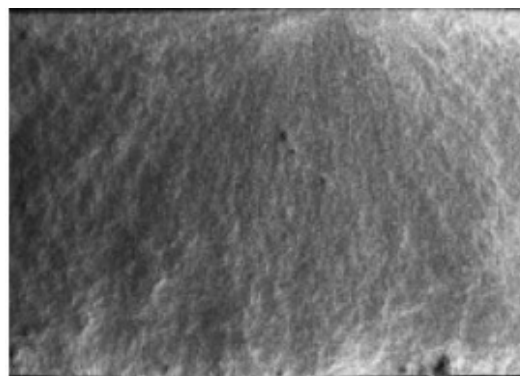


图8 不同时刻试样 e_{xx} 应变分布曲线

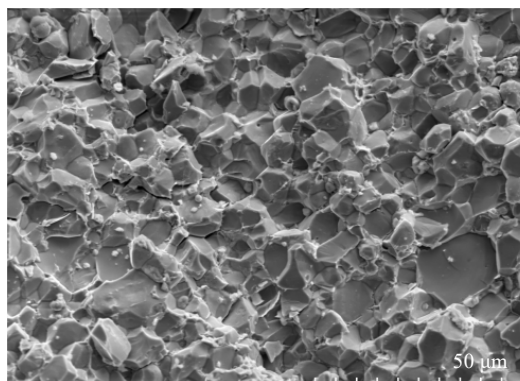
烧结 Nd-Fe-B 永磁材料是以金属间化合物为基体的合金材料,主要由 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相、富Nd相和少量富B相组成,具有复杂的晶体结构,滑移系少^[8].试样在加载过程中,由于磁晶的相互耦合作用,导致材料力学性能的各向异性,受力后不能协调变形,应变呈现出复杂的状态,并不是均匀的应变场.随着加载时间的逐渐增加,试样表面应变云图逐渐呈现出三点弯曲的变形规律,当加载到310帧时,试样的变形规律逐渐表现出来,试样上沿应变为正,下沿应变为负,应变呈现出明显的上压下拉的状态,压头正下方竖向变形最大,左右两边变形几乎对称,试样进入稳定变形阶段;当加载到592帧后,试样瞬间发生脆断,高速摄影根本来不及拍摄到图像,这与载荷—挠度曲线所呈现出来的状态非常契合,即达到峰值载荷后,试样瞬间发生断裂.

2.3 微观结构分析

采用日立 SU-70 型扫描电子显微镜对回收的试样进行微观观测.图9所示为烧结 Nd-Fe-B 磁体的断口形貌.



(a)宏观断口



(b)微观断口

图9 Nd-Fe-B 磁体的断口形貌

从图 9(a)中可以看出, 磁体的断裂面上仅存在径向断裂模式, 断面平齐, 未见纤维状和剪切唇特征, 放射状形态占比很小, 断面成暗灰色, 没有金属光泽, 这是脆性材料断裂的典型特征. 从图 9(b)中可以看出, 磁体的断裂方式主要是沿晶断裂. 其中灰色相是基体 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相, 白色相是薄层状富 Nd 相, 断口主要由“冰糖块状”的晶粒组成, 晶粒表面光滑无特征.

3 结论

(1)烧结 Nd-Fe-B 材料的抗弯强度与加载速度有关, 加载速度越大, 抗弯强度越大, 而挠度则越小. 而且载荷—挠度曲线呈现出一定的率相关性, 随着加载速度的增大, 其曲线逐渐呈上扬趋势.

(2)不同加载速度下利用 DIC 方法测得的弹性模量与准静态下得到的弹性模量相近, 并与相关文献记载的弹性模量一致, 验证了 DIC 方法对该试验的有效性.

(3)DIC 方法较好地呈现了烧结 Nd-Fe-B 三点弯曲的应变变化规律, 试样呈现出明显的上压下拉的状态. 其应变分布曲线表明, 烧结 Nd-Fe-B 材料受弯曲载荷时, 其应变并非是均匀的变形, 这种不均匀性是由其晶体结构复杂, 滑移系少造成的.

(4)烧结 Nd-Fe-B 材料在室温下表现出明显的脆性断裂特征, 其断裂方式主要是沿晶断裂. 磁体的断裂面上仅存在径向断裂模式, 断口主要由“冰

糖块状”的晶粒组成, 晶粒表面光滑无特征.

参考文献:

- [1] 贾成厂, 孙爱芝. 烧结钕铁硼永磁材料[J]. 金属世界, 2013(3):9-14.
- [2] Woodcock T G, Zhang Y, Hrkac G, et al. Understanding the microstructure and coercivity of high performance NdFeB-based magnets[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(6): 536-541.
- [3] Mo W, Zhang L, Liu Q, et al. Dependence of the crystal structure of the Nd-rich phase on oxygen content in an Nd-Fe-B sintered magnet[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(2):179-182.
- [4] Li W F, Ohkubo T, Hono K, et al. The origin of coercivity decrease in fine grained Nd-Fe-B sintered magnets[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2009, 321(8):1100-1105.
- [5] Rabinovich Y M, Sergeev V V, Maystrenko A D, et al. Physical and mechanical properties of sintered Nd-Fe-B type permanent magnets[J]. Intermetallics, 1996, 4(8): 641-645.
- [6] 刘薇, 曹力军, 吴建生. 烧结 NdFeB 永磁合金的断裂韧性[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(8):1239-1242.
- [7] 李安华, 董生智, 李卫. 稀土永磁材料的力学性能[J]. 金属功能材料, 2002, 9(4):7-10.
- [8] 李安华, 董生智, 李卫. 烧结 NdFeB 永磁材料的力学性能及断裂行为的各向异性[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(8):631-634.

Sintered Nd-Fe-B bending test using DIC method

LEI Guo-hua, WANG Huan-ran*, WAN Yin, REN Chun-ying

(Key Laboratory of Impact and Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The flexural properties of sintered Nd-Fe-B permanent magnets under different loading speeds are tested by MTS general-purpose testing machine. The flexural strength and elastic modulus of sintered Nd-Fe-B under three-point bending are measured using the digital image correlation (DIC) technique. The strain distribution cloud-map of the specimen surface and the strain distribution at different positions are obtained. The fracture mechanism of the recycled specimen is investigated by utilizing the scanning electron microscopy method.

Key words: sintered Nd-Fe-B; high speed photography; digital image correlation method; scanning electron microscope

(责任编辑 韩超)