

Ce—TZP 结构陶瓷相变塑性区实验研究

卿新林 秦玉文

(天津大学力学系, 天津 300072)

孙庆平

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 用云纹干涉法对 ZrO_2 相变多晶体三点弯曲梁切口周围应力诱导的相变塑性区进行了实验研究, 得到了三点弯曲梁切口周围相变塑性区的形状及相变塑性分布. 实验结果表明: Ce-TZP 结构陶瓷切口周围存在一个较长的扩展相变塑性区, 相变塑性区内拉伸应力方向的塑性应变远大于垂直于拉伸应力方向的塑性应变. 所得实验结果为进一步深入研究相变本构关系和相变增韧机理提供了重要的实验依据.

关键词 云纹干涉法, 相变塑性区, ZrO_2 相变多晶体, 实验力学

引 言

自 Garvie 等人发现 ZrO_2 中应力诱发的四方相 (tetragonal) 到单斜相 (monoclinic) 的马氏体相变具有明显的增韧效果以来, 国际上对 ZrO_2 马氏体相变及相变增韧进行了大量研究^[1-3]. ZrO_2 相变增韧的本质在于裂纹尖端附近高应力作用导致的四方相 ZrO_2 晶粒到单斜相 (t→m) 的马氏体相变可对宏观裂纹尖端应力场形成屏蔽. 增韧屏蔽微区的测量与表征是结构陶瓷增韧研究中的一个重要问题. 近十几年来, 国际上不少学者对裂纹尖端附近的相变区进行了研究^[4-6], Heuer 和 Garvie 等人分别利用扫描电镜和 X 射线衍射法对 MgO-PSZ 和 Y_2O_3 -TZP 等结构陶瓷相变区的形状进行过测量和研究, 由于受这些结构陶瓷相变塑性的限制, 相变区范围很小, 并且相变区边界弥散, 因而他们无法提供相变区的精确形状和尺寸. 以 CeO_2 作稳定剂的四方相 ZrO_2 多晶体 (Ce-TZP) 是一种性能优良的新型结构陶瓷材料, 它具有较高的断裂韧性以及达到 10^{-2} 量级的相变塑性, 这使人们有可能对其相变区进行直接的精确测量. Rose 和 Yu 等人分别对 Ce-TZP 裂纹尖端相变区的形状与尺寸进行过实验观测^[7,8], 发现在裂纹尖端前缘存在着一个扩展的相变塑性区, 但由于实验技术的局限性, 他们无法获得相变区内相变塑性的全场分布情况. 云纹干涉法是一种高精度、高灵敏度、高空间分辨率的全场变形测量方法, 它在细观力学测量中有着广阔的发展和前景^[9,10].

在本文中, 作者利用高灵敏度云纹干涉法对 Ce-TZP 结构陶瓷三点弯曲梁切口周围相变区形状及相变区内的相变塑性分布进行了研究.

1994-05-20 收到第一稿, 1994-09-02 收到修改稿.

1 实验技术

1.1 试件

试验所用材料为 10 mol % Ce-TZP, 经制粉、球磨、造粒、干压成型、等静压后得到具有一定形状和致密度的胚体, 然后在 1400°C 下烧结 4 小时, 最后进行机加工再抛光做成所需试件. 为了消除因机加工使表面产生的单斜相, 将加工好的试件在 1200°C 下退火 20 分钟. 陶瓷材料晶粒的平均尺度在 0.1μm 左右, 图 1 是该材料断口的显微照片.

带切口的三点弯曲梁试件如图 2 所示, 切口宽度为 60μm. 在试件的侧表面复制有 1200 线/mm 的正交位相型衍射光栅.



图 1 10 mol % Ce-TZP 断口 SEM 照片
Fig.1 Scanning electron micrograph of section for 10 mol % Ce-TZP

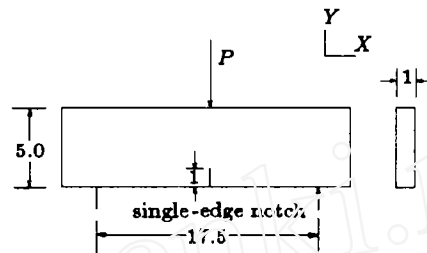


图 2 带切口三点弯曲试件 (单位: mm)
Fig.2 A single-edge notch beam specimen (unit: mm)

1.2 面内位移场和应变场的测量

采用如图 3 所示的四光束云纹干涉法光路系统对试件表面的面内位移进行测量, 根据云纹条纹图, 由下式可得到位移场

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{N_x}{f} \\ v &= \frac{N_y}{f} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

相应的应变场为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{f} \frac{\Delta N_x}{\Delta x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{f} \frac{\Delta N_y}{\Delta y} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{f} \left(\frac{\Delta N_x}{\Delta y} + \frac{\Delta N_y}{\Delta x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这里 $f = 2400$ 线/mm, 代表虚参考栅的频率, N_x 是 u 场云纹条纹级次, N_y 是 v 场云纹条纹级次.

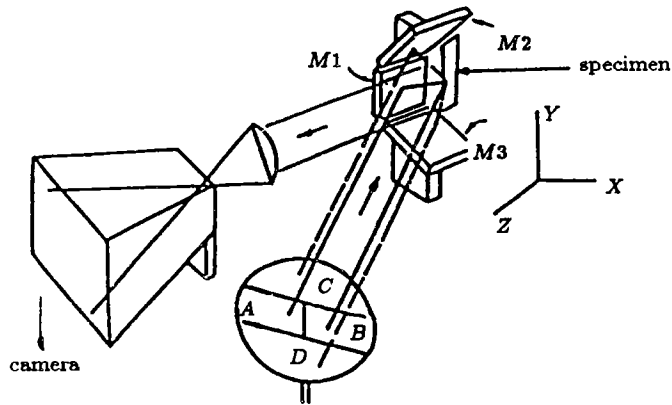


图3 四光束云纹干涉法系统
Fig.3 Setup for moiré interferometry

2 实验结果与分析

2.1 相变屈服应力

试验所用 Ce-TZP 结构陶瓷材料相变屈服应力低并有很大的相变塑性, 图 4 是该材料在单轴拉伸下的应力-应变关系曲线^[10]. 由此可知, 该 Ce-TZP 结构陶瓷材料的相变屈服力 $\sigma_s = 85.1\text{MPa}$, 相变塑性应变可达到 1% 以上.

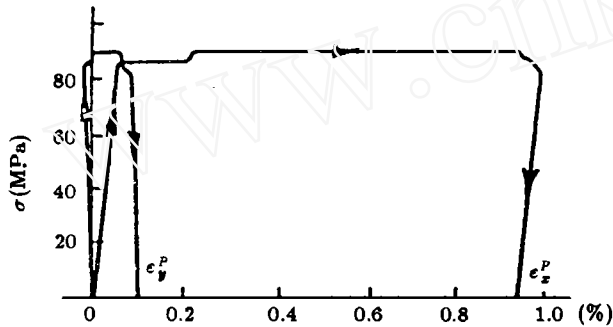


图4 Ce-TZP 在单轴拉伸下的应力-应变关系曲线
Fig.4 Stress-strain curve in uniaxial tension for Ce-TZP

2.2 面内应变分布

在加载过程中记录到的带切口梁侧表面的面内位移条纹如图 5 所示. 图 6 是根据图 5(d) 计算出来的切口梁侧面的残余应变 ϵ_x^R 的分布.

2.3 分析与讨论

1) 由实验观察得知, 当载荷到达约 22N 时, 切口前缘突然出现一个有较大变形的窄小区域, 随着载荷 P 的缓慢增加, 这个大变形区域不断扩大, 区域内的变形量也在增大. 当载荷 P 加至 24N 后再卸载, 切口前缘有一个塑性变形很大的窄长区存在. 在此之后继续加载, 载荷 P 接近 24N 时, 试件沿切口断裂.

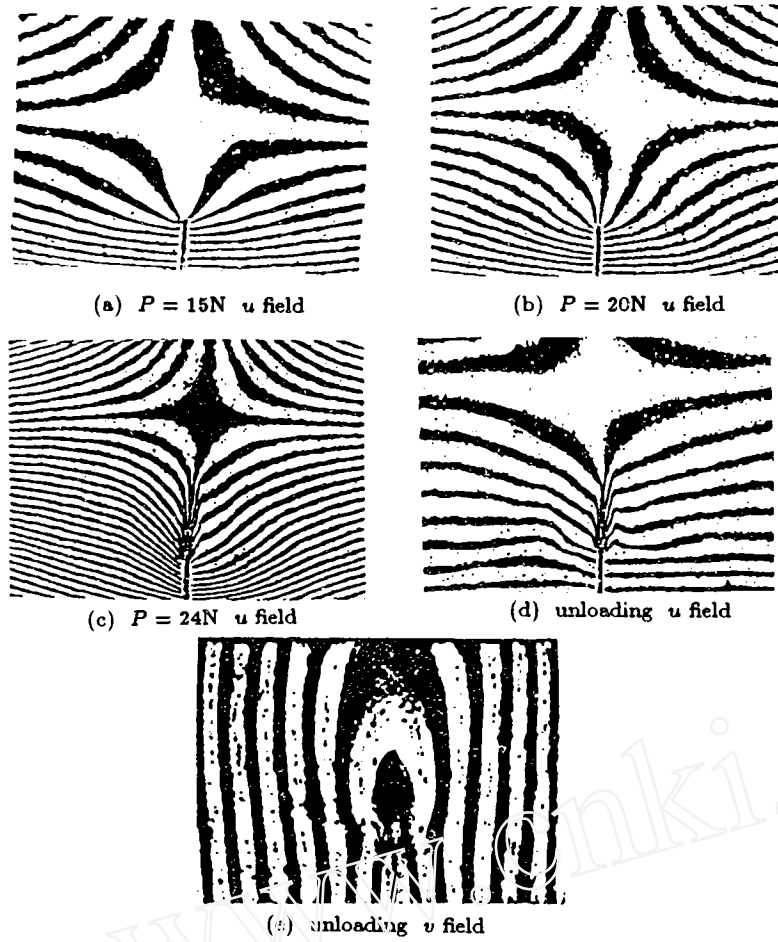


图 5 位移场条纹图
Fig.5 Moiré fringe patterns of displacement field

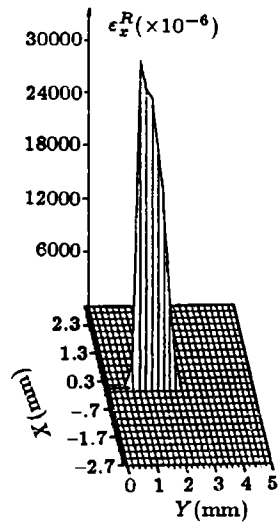


图 6 梁侧面残余应变 ϵ_x^R 分布
Fig.6 The distribution of the residual strain ϵ_x^R in the side surface of the beam with a single-edge notch

2) 由卸载后记录的反映残余变形的云纹条纹图可以确定三点弯曲梁切口前缘相变塑性区的形状及尺寸, 如图 7 所示. 比较图 5(d) 与不带切口的三点弯曲梁侧面残余变形云纹条纹图^[10], 可以看出, 它们的相变塑性区都是以带状形式分布, 类似于 Dugdale 塑性带状区^[11].

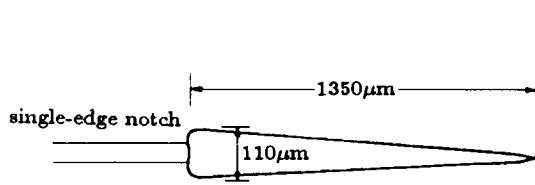


图 7 切口前缘相变区示意图
Fig.7 Schematic of the transformation zone in the beam specimen with a single-edge notch



图 8 三点弯曲梁残余变形云纹图 (u 场)
Fig.8 Moire fringe pattern of residual deformation for three-point bending beam (u field)

3) 由实验观测到的拉长的相变塑性区形状明显不同于根据各种相变准则计算出来的相变区, 图 9 是它们之间的比较示意图.

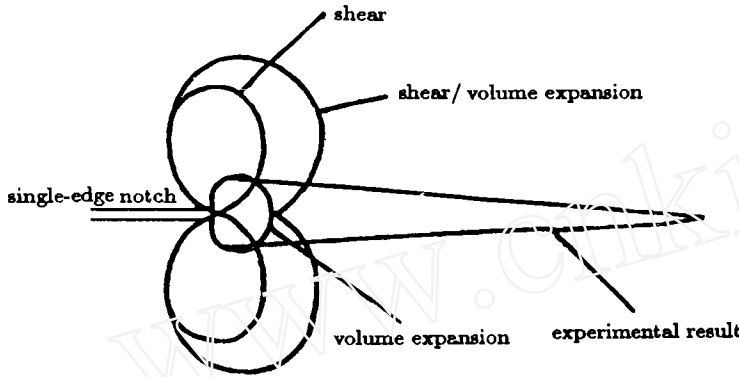


图 9 各种相变区形状比较
Fig.9 Comparison of the calculated and observed transformation zone

4) 根据相变区内的云纹干涉条纹可以看出: 拉伸应力方向的塑性应变远大于垂直拉伸应力方向的塑性应变. 相变区内当拉伸应力方向的相变塑性达到 3×10^{-2} 时, 垂直拉伸应力方向的相变塑性却在 10^{-4} 量级.

3 结 语

本文用云纹干涉法对 Ce-TZP 结构陶瓷三点弯曲梁切口周围的相变塑性区进行了测量, 结果表明: 在室温下 Ce-TZP 结构陶瓷材料切口前缘在垂直于拉伸应力方向有一个较大的扩展相变塑性区; 在相变区内, 离切口较近的地方相变塑性相对较大; 相变区内拉伸应力方向的相变塑性远大于垂直拉伸应力方向的相变塑性. 这些实验结果是深入研究相变增韧机理的重要依据.

致谢 作者在实验过程中得到了清华大学工程力学系戴福隆教授的热情帮助与支持, 特此致谢.

参 考 文 献

- 1 Garvie RC, Hannink RH, Pascoe RT. *Nature*, 1975, 258: 703-704
- 2 Swain MV, Hannink RH, Garvie RC. in Bradt RC, Evans AG et al. ed. *Fracture Mechanics of Ceramics*. New York, Plenum Press, 1983, 6: 339-354
- 3 Sun QP, Hwang KC, Yu SW. *J Mech Phys Solids*, 1991, 39: 507-524
- 4 Heuer AH. *J Am Ceram Soc*, 1987, 70(10): 689-698
- 5 Garvie RC, Hannink RH, Swain MV. *J Mater Soc Lett*, 1982, 1: 437-440
- 6 Kosmac T, Wagner R, Claussen N. *J Am Ceram Soc*, 1981, 64(4): c-72-c-73
- 7 Rose LRF, Swain MV. *Acta Metall*, 1988, 36(4): 955-962
- 8 Yu CS, Shetty DK. *J Am Ceram Soc*, 1989, 72(6): 921-928
- 9 Post D. Moire Interferometry, in *Handbook on Experimental Mechanics*, Kobayashi AS ed, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NY, 1987
- 10 Qing XL, Sun QP, Dai FL. *Acta Mech Sinica*, 1993, 9(4): 329-336
- 11 Dugdale DS. *J Mech Phys Solids*, 1960, 8: 100-104

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TRANSFORMATION ZONE IN CERIA-STABILIZED TETRAGONAL ZIRCONIA POLYCRYSTAL

Qing Xinlin Qin Yuwen

(*Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Sun Qingping

(*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract Transformation zone in a single-edge notch bending specimen of ceria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal was studied by moire interferometry. The transformation zone with a characteristic elongated shape ahead of the notch was observed and the distribution of plastic strain within the transformation zone was obtained from the moire fringe patterns. This work provides a significant experimental foundation for establishing the theoretical models of transformation toughening.

Key words moire interferometry, Ce-TZP, transformation zone, plasticity