

紧凑拉伸 Be 试样应力和断裂行为研究

李瑞文¹, 董平², 白彬², 汪小琳²

(1. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

(2. 表面物理与化学国家重点实验室, 四川 绵阳 621907)

摘要: 利用 X 射线应力分析仪和在线加载装置测试了紧凑拉伸(compact tension, CT)Be 试样缺口前端的应力分布, 利用万能拉伸试验机、引伸计和扫描电镜研究了紧凑拉伸 Be 试样的断裂行为。研究表明: 样品加工缺陷如缺口在载荷作用下形成应力集中, 样品首先在此开裂, 获得了紧凑拉伸铍试样的载荷-裂纹张开曲线和平面应变断裂韧性为 $15.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。扫描电镜观察表明 Be 断口呈现解理特征, 紧凑拉伸试样断口呈现出 3 个特征区。裂纹尖端扩展观察表明沿基滑移面形成解理微裂纹, 这些微裂纹长大后受主应力控制。利用断裂韧性评估了 Be 材存在微裂纹时的断裂强度。

关键词: 铍; 紧凑拉伸试样; 应力; 断裂行为

中图分类号: TG 115.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)01-0095-04

金属 Be 由于中子截面积小、强度高而在核工程领域得到应用, 但铍的延展性差, 弹性模量高, 使得材料在加工制造和使用过程中容易产生应力, 并导致开裂或提前断裂。因而研究 Be 材的应力和应力作用下的断裂行为显得很重要, 这有助于评估铍材在制造和使用过程中的力学性能变化、应力腐蚀和断裂等问题, 直接关系到 Be 材的使用可靠性和服役寿命。国外早在 20 世纪 70 年代就开展了三点弯曲和紧凑拉伸铍试样的断裂韧性测试^[1~3]。最近几年由于国际热核项目(ITER)的启动和新研究测试方法的发展, 铍的应变和断裂行为研究又得到重视, Varma 等^[4]对不同压制方向的热压铍材拉伸加载时的应力分布进行了中子衍射测试, 表明铍材热压存在各向异性, 导致加载时发生不规则裂纹扩展。作为 ITER 项目中的面对等离子体材料, Be 在辐射条件下的断裂行为又得到关注^[5]。国内研究 Be 材的单位主要有宁夏稀有金属研究院和中国工程物理研究院, 主要工作集中在一些物理和力学性能测试和焊接方面的研究。本研究采用含有机加缺口的紧凑拉伸 Be 试样, 利用 X 射线应力分析仪、万能力学试验机、在线加载装置和有限元技术来开展 Be 的应力表征和断裂行为的研究, 为评估铍材在制造和使用过程中的可靠性提供理论依据。

1 实验材料和方法

用于断裂力学研究的试样一般分为紧凑拉伸试样和单边切口试样, 国内外研究铍的断裂行为都采用了

这 2 种试样。紧凑拉伸试样由于尺寸符合标准, 易于取得准确的试验数据, 并且利于进行其他分析, 因而本试验选用了紧凑拉伸试样。根据铍的力学参数特点和国家标准(GB4161-84)进行尺寸设计。样品尺寸如图 1 所示, 尺寸满足材料的平面应变状态要求。V 形缺口由机械加工产生, 缺口深度约为 1 mm, 疲劳预制裂纹可在此基础上进行, 铍试样加工后的样品形状和取样方向如图 2 所示。采用热等静压 Be 材, 密度为 1.852 g/cm^3 。

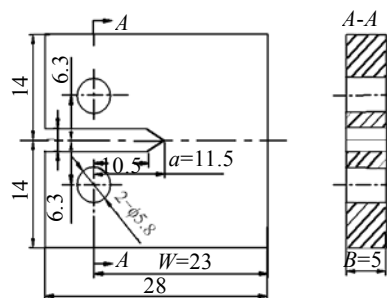


图 1 紧凑拉伸试样尺寸(含机加缺口)

Fig.1 Dimensions of beryllium compact tension specimen

采用 X3000 应力分析仪和卧式拉伸机实现在线加载测试铍的应力, 测试装置如图 3 所示。利用万能试验机和引伸计测试紧凑拉伸试样的载荷-裂纹张开位移曲线。拉断后铍断口形貌和裂纹尖端形貌用扫描电镜进行了观察。

收到初稿日期: 2008-01-20; 收到修改稿日期: 2008-09-01

作者简介: 李瑞文, 男, 1976 年生, 博士生, 工程师, 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900, 电话: 0816-3626968

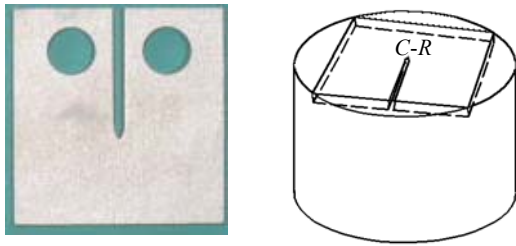


图 2 铍试样及样品裂纹面取向和裂纹扩展方向

Fig.2 Beryllium compact tension specimen (a) and the orientation of crack extension(b): (R) radial direction; (C)tangent direction



图 3 在线加载应力测试系统

Fig.3 System of measurement for stress and loading

2 结果与分析

2.1 载荷作用下铍试样缺口应力集中效应

利用加载装置对样品进行加载，同时利用应力仪测量样品应力，实现了试样在不同载荷作用下的应力测量。应力测试前样品表面经蚀刻处理，以保证测量的是体相应力。3 种载荷作用下铍试样缺口尖端的应力分布示于图 4。由于应力仪使用的 X 射线准直器直径为 1 mm，因此，每点应力测试值实际为直径 1 mm 范围内的应力平均值，在缺口附近由于应力梯度大，采用密集取点方式。可见，作用拉伸载荷后，缺口附近区域拉应力出现集中效应，在 200 N 时，缺口前端的最大拉应力为 200 MPa，而在 500 N 时，拉应力增加至 300 MPa；在离裂纹较远的试样端部(>5 mm)，呈现为压应力状态，而且随着载荷的增大，压应力值逐渐增大。拉应力和压应力转折点位于 5 mm 左右，且位置保持不变。

2.2 紧凑拉伸试样铍的断裂

紧凑拉伸试样在拉力作用下，在缺口处形成应力集中，在载荷作用下缺口处将首先发生裂纹扩展，直

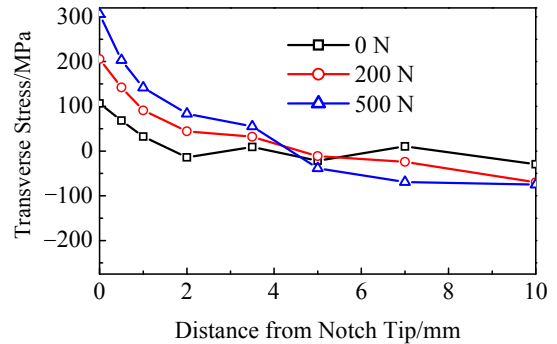


图 4 紧凑拉伸铍试样缺口尖端的实测应力分布

Fig.4 Stress distribution near the notch tip of Be CT specimen

至断裂。这种缺口状样品的断裂行为不仅是研究断裂韧性的要求，而且也能反映材料在有缺陷存在时出现的应力集中和断裂行为，这可以为 Be 材力学性能和使用可靠性提供依据。对于脆性材料，由于很难得到预制裂纹，因而利用机加缺口代替预制裂纹不失为一种有效的方法。根据标准，预制裂纹长度比材料尺寸小很多，在计算裂纹长度时可以忽略，因而采用含机加缺口与含预制裂纹试样得到的断裂韧性差别不大。利用含机加缺口的紧凑拉伸试样，获得铍材的载荷-张开位移曲线。采用自动控制的电子拉伸试验机拉伸样品，利用标距为 10 mm 的双悬臂梁引伸计来测量其拉伸变形量。测试速率为 0.5 mm/min。拉伸曲线见图 5。断口形貌见图 6。按照文献[6]规定，求得的有效载荷 P_q 为 1230 N，将有关参数代入下式计算强度因子^[6]：

$$K_q = P_q / (BW^{1/2}) f(a/W)$$

式中 B 为样品宽度，5 mm； a 为裂纹长度，11.5 mm； W 为 23 mm； $f(a/W)$ 经查表得^[6]9.66。按此方法算出 K_q 为 15.4 MPa \sqrt{m} 。按照文献[6]中要求和文献[7]中数据验证 K_q 是有效的断裂强度因子。

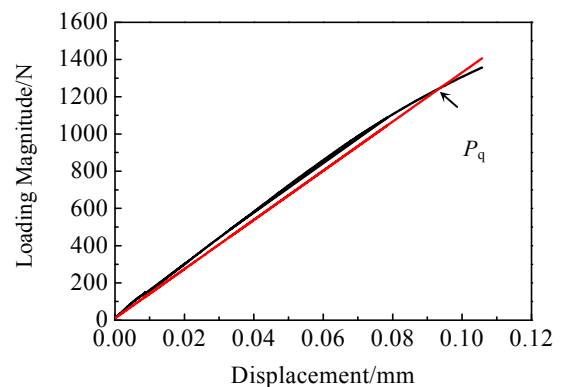


图 5 紧凑拉伸试样载荷-裂纹张开位移曲线

Fig.5 Loading-cracking displacement curves of Be CT specimen

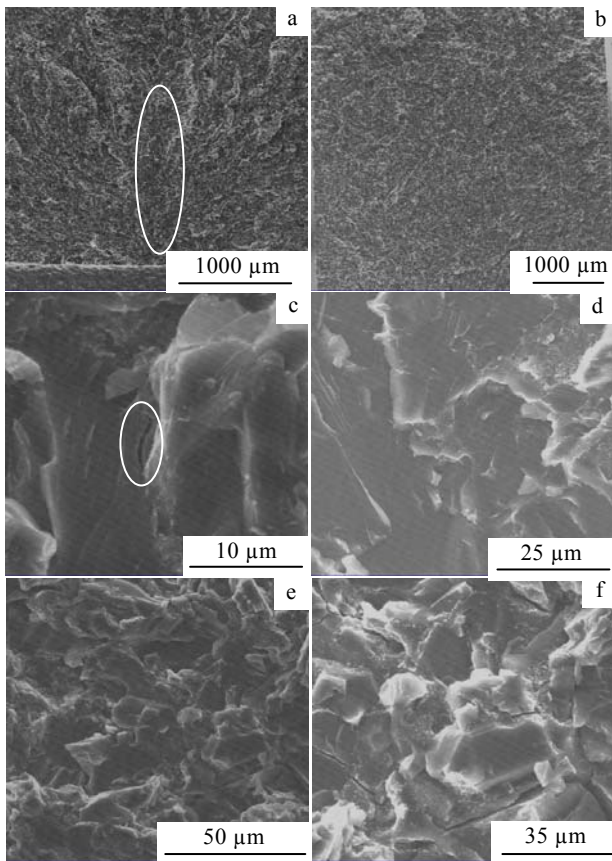


图 6 铍的断口形貌

Fig.6 SEM images of fracture surface: (a) initiation area, (b) stable propagation area, (c) micro-crack in bulk, (d) cleavage fracture morphology, (e) rapid rupture area, and (f) the sub-cracks

2.3 Be 的断口形貌分析

由于采用的是热等静压的制造工艺，因此没有出现异常断裂方向，都是沿着裂纹面上的方向断裂，说明宏观上铍没有产生明显的织构。铍的断口表现为解理特征，断口形貌明显分为 3 个区，对应于裂纹扩展的 3 个区，即(1)近门槛扩展阶段，裂纹快速增长；(2)稳态扩展阶段；(3)失稳快速扩展阶段。在裂纹萌生阶段，断口形貌呈放射状形貌，形成人字纹花样形貌(如图 6a 所示)。这是由于在拉应力作用下产生了微裂纹，试样以该裂纹为断裂的最初点，逐步向外扩展。进入稳态扩展阶段，形成大量的解理台阶和解理小平(如图 6c, 6d 所示)。到了失稳扩展区则出现了大量不规则二次裂纹和沿晶形貌(如图 6e, 6f 所示)。这是由于此区受力集中，晶粒在薄弱处与基体分离而出现大量二次裂纹。

2.4 Be 材的裂纹扩展行为

利用扫描电镜观察了紧凑拉伸试样在载荷作用下的裂纹形成及扩展方式(如图 7 所示)。在载荷作用下，铍机加缺口处由于应力集中，首先在此形成裂纹，在裂纹前端形成了许多微裂纹，这些微裂纹最后连接成主裂纹。对于铍，裂纹前端塑性区大约为 0.1 mm，在这个塑性区内，密排六方结构中基滑移面容易发生脆性解理，微裂纹的扩展方向最初为沿着基滑移面方向，当裂纹扩展到临界尺寸时方向与主应力方向相同。由于与基体变形不协调，因此裂纹前端塑性区出现分离撕裂，其周围还形成了更小的裂纹。

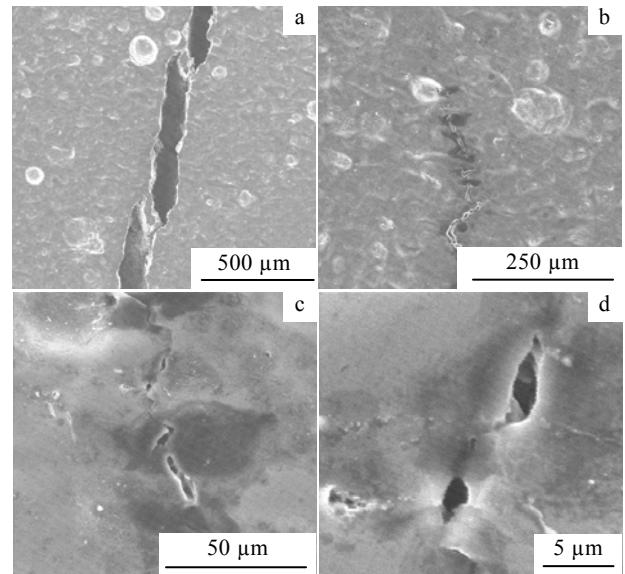


图 7 裂纹的形成和扩展

Fig.7 The process of crack extension: (a) crack growing from micro-cracks, (b) morphology on crack tip, (c) cleavage micro-crack on crack tip, and (d) micro-crack

2.5 利用断裂韧性来反推材料的剩余强度与最小裂纹

根据弹性断裂力学理论，紧凑拉伸试样应力强度因子与受力状态有如下关系 $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ 。根据样品尺寸和受力状况，应力强度因子直接与加载力大小有关，当力加载到 1350 N 时，应力强度因子达到 $15.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。对于图 6c 中的微裂纹试样，微裂纹长度为 $10 \mu\text{m}$ ，应力为 180 MPa 时的断裂强度因子为 $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，为安全的裂纹。在测试铍的应力过程中，有时发现应力达到 180 MPa。设铍的断裂强度因子为 $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，则此时的微裂纹最大尺寸为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，约为毫米级，因而只要样品不存在这么大的裂纹(毫米级)，材料的强度是能保证的。

3 结 论

1) 缺口在载荷作用下形成应力集中，样品首先在

此开裂; 获得了紧凑拉伸铍试样的载荷-裂纹张开曲线和平面应变断裂韧性为 $15.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

2) Be 断口呈现解理特征, 裂纹尖端扩展沿基滑移面形成解理微裂纹, 这些微裂纹长大后受主应力的控制, 可利用断裂韧性评估 Be 材存在微裂纹时的断裂强度。

参考文献 References

- [1] Priddy T G . *A Consistent Stress-Strain Ductile Fracture Model as Applied to Two Grades of Beryllium*, SAND79-2126[R]. Livermore: Sandia Laboratories, 1979
- [2] Ronald A M. *The Use of Notched Beams to Establish Fracture Criteria for Beryllium*, UCRL-52866[R]. Livermore: Lawrence Livermore Laboratory , 1980
- [3] Perra M, Finnie I. *Fracture-Toughness Tests on a High-Strength Beryllium from Room Temperature to 3000 °C*. UCRL-51774[R]. Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1975
- [4] Varma R. *5th International Conference on Nuclear Engineering*[C]. Nice , France: [s.n], 1997
- [5] Chaouadi R, Scibetta M, Leenaers A. *Micromechanical Modeling of Fracture Initiation of Beryllium*[R]. Belgian: The Belgian Nuclear Research Centre, 2005
- [6] GB4164-84[S]. *The Testing Method of K_{Ic} for Metals and Alloys*(金属材料平面应变断裂韧度试验方法). Beijing: National Standard Press, 1984
- [7] Zhang Pengcheng(张鹏程), Xu Pengshuan(许彭栓). *High-Temperature Tensile Properties of HIP-Beryllium*(热等静压铍的高温拉伸性能研究)[R]. Mianyang: CAEP Report, 1998

Stress Distribution and Fracture Behavior of Compact Tension Beryllium Specimen

Li Ruiwen¹, Dong Ping², Bai Bin², Wang Xiaolin²

(1. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(2. National Key Laboratory for Surface Physics and Chemistry, Mianyang 621907, China)

Abstract: The compact tension (CT) specimens of beryllium were employed to study the fracture behavior and mechanical properties. The local stress distribution near a notch in CT beryllium was measured by combination of an X-ray stress analysis and a custom-designed load device, and the fracture morphology was observed by SEM. The results show that the local stress near notch tip is much higher than that in other areas, and a cracking occurs firstly in this area. The loading-cracking displacement curve of the CT Be was obtained, and the fracture toughness value was calculated from the curve. The CT specimen fracture surfaces mainly exhibit a cleave morphology with three typical areas. Some open micro-cracks along the basal slip plane were formed in the crack tip, and its growth was controlled by primary stress after reaching a critical length. The tensile strength was evaluated by the fracture toughness theory when a crack existed in the Be material.

Key words: beryllium; compact tension specimen; fracture behavior; stress distribution

Biography: Li Ruiwen, Candidate for Ph. D., Engineer, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China, Tel: 0086-816-3625694, E-mail: ruiwenli@163.com