

含球形孔洞脆性材料拉伸破坏的扩展有限元法分析

Numerical Simulation for Failure Process of Brittle Material Containing Spherical Cavities Using XFEM

中国农业大学水利与土木工程学院 邱流潮
中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 张冲
北京优力思科技有限公司 邱国俐

[摘要] 应用扩展有限元法模拟了含球形孔洞脆性材料拉伸破坏机理及破坏过程。分析了含球形孔洞的脆性材料单向拉伸情况下孔洞体积百分数对结构承载力的影响。数值计算结果显示,基于扩展有限元模型的数值方法可以准确的和可视化的直观方式分析含球形孔洞脆性材料拉伸破坏过程。结果表明,含球形孔洞脆性材料结构拉伸破坏的承载力与孔洞体积百分数密切相关。

关键词: 孔洞材料 扩展有限元法 脆性断裂 数值模拟 拉伸破坏

[ABSTRACT] An extended finite element method (XFEM) simulation for failure mechanism and failure process of brittle materials containing spherical cavities due to tension load is presented. Numerical analysis is conducted to study the effects of void fraction on bearing load of brittle materials containing spherical holes under uniaxial tension loading. Numerical results show that the proposed XFEM can accurately and visually analyze the tension failure process of brittle materials with spherical cavities. It indicates that void fraction has significant effects on the tension failure bearing load of brittle materials containing spherical holes.

Keywords: Material with cavities XFEM Brittle fracture Numerical simulation Tension failure

多孔材料因具有优异的阻尼、渗透、隔音、隔热等性能而日益被广泛应用^[1]。多孔材料的特性不仅能揭示了孔洞对材料宏观性能的影响规律,同时还能揭示了孔材料破坏的力学机制。显然,这种材料的结构和性能与所含孔洞的体积百分数密切相关。抗拉性能是工程材料和结构的一项重要指标,因此,研究多孔材料和结

构的变形与破坏以及孔隙率对抗拉性能的影响具有较大的实际意义。对于包含孔洞、裂纹等不连续问题的数值模拟,常规有限元法进行裂纹扩展模拟时要求单元内部形状函数连续,这就需要将裂纹面设置为单元的边,裂纹尖端设置为单元的结点,在裂纹尖端附近的高应力区需要网格加密,在模拟裂纹扩展时需要将网格进行重新剖分,使模拟研究变得复杂且难以收敛^[2]。为了解决网格重新剖分带来的困难,基于 Melenk^[3] 等人的单位分解有限元理论, Belytschko^[4] 等人提出了扩展有限元方法 (XFEM) 来解决不连续问题。它继承了常规有限元法的所有优点,基于单位分解法来改进单元的形函数使之能适应单元内部的不连续现象。方修君等^[5] 采用基于扩展有限元法的粘聚裂纹模型分析脆性材料的开裂过程获得了成功。本文采用扩展有限元方法模拟含球形孔洞脆性材料拉伸破坏过程,并分析了孔洞体积百分数对含球形孔洞脆性材料结构拉伸破坏承载力的影响。

1 扩展有限元法

扩展有限元法是 Belytschko 等^[4-6] 基于单元分解的思想对于传统有限元方法进行的改进。此方法采用 Heaviside 函数将裂纹两侧非连续位移场联系在一起。扩展有限元法克服了传统的内聚力模型只能按照事先设计的路径发生断裂的限制。其可以模拟材料以任意路径方式的裂纹扩展,同时扩展有限元法可以使裂纹穿越网格单元,这大大的减少了一般裂纹计算中需要的重新划分网格单元的过程。

扩展有限元法位移插值公式如下:

$$u = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[u_i + H(x)\alpha_i + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_{i\alpha} \right], \quad (1)$$

式中, $N_i(x)$ 是通常的有限元形函数; u_i 是通常的节点位移; α_i 表示被裂纹尖端贯穿的单元节点附加自由度; $H(x)$ 为 Heaviside 函数; $b_{i\alpha}$ 为裂纹尖端嵌入单元的节点附加自由度; $F_{\alpha}(x)$ 为裂纹尖端位移场函数的近似

* 国家自然科学基金(11172321)和中央高校基本科研业务费专项资金(2011JS047)资助。

表达式。

为了模拟裂纹的产生与扩展,设置材料的极限最大主应力为材料开始破坏的阈值,当材料最大主应力达到阈值时,裂纹开始产生,但当最大主应力为压应力时材料不发生损伤。在材料的软化阶段,采用一个标量损伤变量来描述材料损伤的演化,并使用内聚力裂纹模型来表述裂纹演化阶段裂纹界面的力学行为。本文采用双线性软化模型模拟损伤的演化,并引入断裂能作为裂纹界面完全分离的准则。

2 计算模型及边界条件

当孔洞按一定的体积百分数随机地分布在基体中时,从统计观点看,它们呈现周期性分布。现考虑单轴拉伸情况下的试件,当球形孔洞均匀分布其中时,分析模型可以简化为圆柱形基体中含有一个球形孔洞,如图 1 (a) 所示。这样就可以把一个实际是三维的问题转化为轴对称问题,它能大大简化计算。考虑到模型的对称性,计算时只取整体的二分之一。有限元网格划分如图 1 (b) 所示。

为使计算简化,假设圆柱体半径 R 和母线半长相等,孔洞半径 r 与其体积百分含量 p 之间的关系可以表示为:

$$r = R \left(\frac{3}{2} p \right)^{1/3} \quad (2)$$

在计算过程中,当模型承受轴向拉伸载荷时,考虑到球形孔洞间的相互作用,同时保证各胞元之间不发生相互侵入现象,模型中 BD 边应保持直边。因此,计算时在图所示的计算模型上采用了位移加载方式,即分别在 AB 和 CD 边上施加一反向位移。至于对称轴边界条件,由对称性它们相应的法向位移应为零。

3 数值计算结果与分析

数值计算中,首先分析球形孔洞体积率为 1% 的情况,假设所取圆柱基体半径为 0.1m,根据公式(2)可知球形孔洞半径应为 0.0246m。由于对称性,只需取结构的一半进行分析,采用四节点四边形平面应变单元划分网格(如图 1 (b) 所示),一共 1328 个单元。为了进行网格收敛性分析,分别在此基础上加密 2 倍和 4 倍进行计算,分析结果显示 1328 个单元的结果是可以接受的。计算

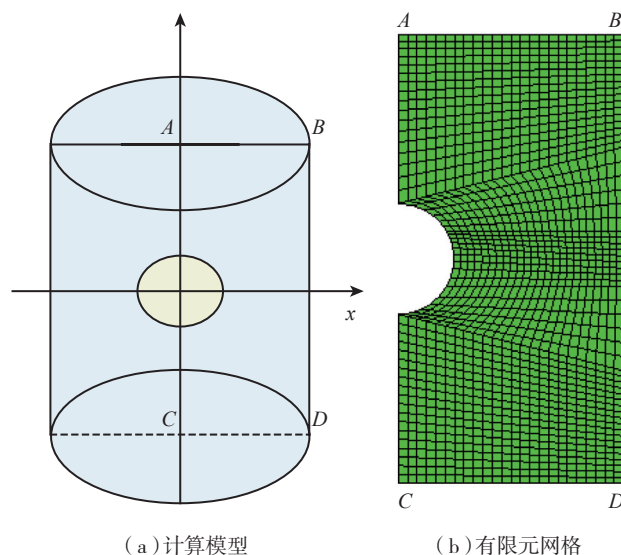


图1 计算模型及有限元网格
Fig.1 Computational model and FEM mesh

表1 材料常数

| 杨氏模量 /MPa | 泊松比 | 抗拉强度 /MPa | 断裂能 / (J/m ²) |
|-----------|-----|-----------|---------------------------|
| 3250 | 0.3 | 22 | 2800 |

中的材料常数见表 1。加载方式按位移控制方式加载,即分别在上下边施加等值反向的拉伸位移,最大加载位移值为 0.4mm,按线性比例加载。

图 2 给出了球形孔洞体积率为 1% 时几个特殊时刻裂纹扩展以及竖向应力分布情况:(a)为刚开始开裂时刻;(b)表示达到极限承载力的时刻;(c)为完全丧失承载力(拉断)的时刻。从图 2 (a)中可以看出,当加载

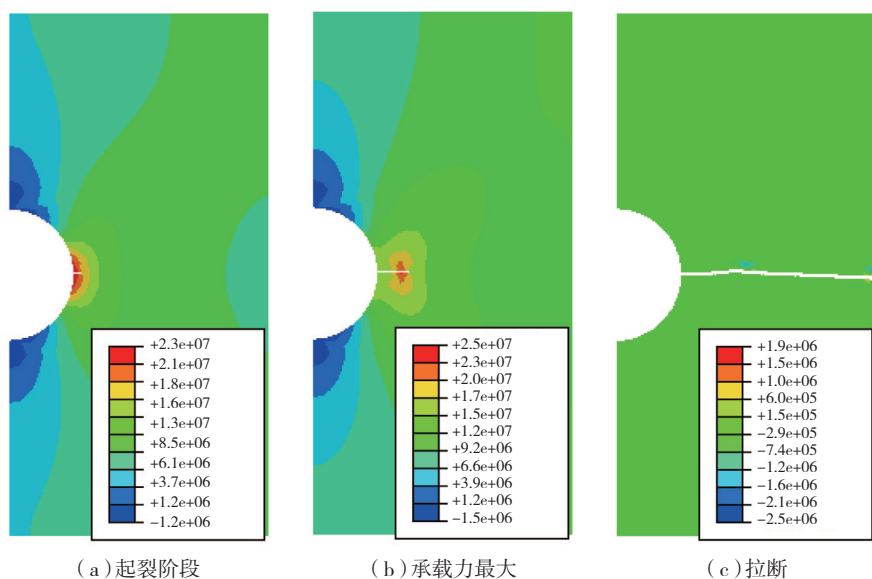


图2 裂纹扩展以及竖向应力分布
Fig.2 Crack propagation and vertical stress distribution

应力达到 8.29MPa 时,球形孔洞边沿中间位置应力达到极限抗拉强度,即应力集中因子约为 2.65,这和解析解得到的结果是非常接近的。图 2 (b) 显示随着载荷的增加,裂纹扩展,应力进行重新分配,最大应力向右边缘移动,当裂纹扩展到一定程度时承载力达到峰值。图 2 (c) 所示为完全拉断时,拉应力被释放。

图 3 表示球形孔洞体积率为 1% 时,加载与变形之间的关系,并分别在图中给出了承载力达到最大值以及承载力为零(即完全断裂)时刻的开裂情况。从图中可以看出,当纵向加载值达到 97.8kN 后承载力急剧下降,直至承载力为零(完全断裂)。

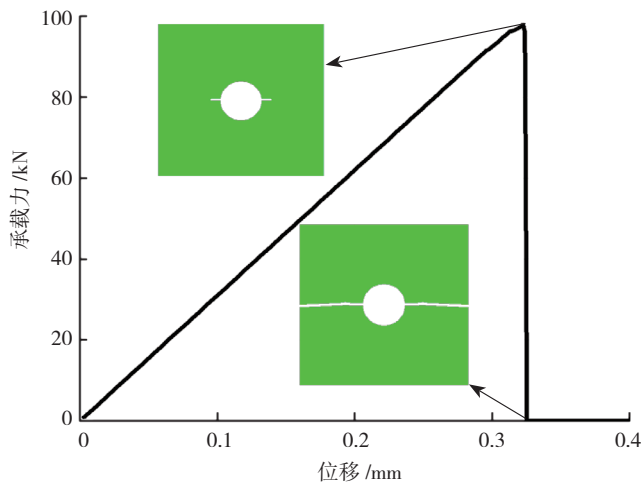


图3 载荷与位移关系图

Fig.3 Loading vs. displacement

为了分析孔洞体积率对结构承载力的影响,分别计算了孔洞体积率 $p=5%$, $p=10%$, $p=20%$ 以及 $p=30%$ 时对应的承载力情况,计算中除孔洞体积率不同外,其它计算参数均与前述体积率 $p=1%$ 时的取值相同。图 4 给出了不同球形孔洞体积率下加载与变形之间的关系。

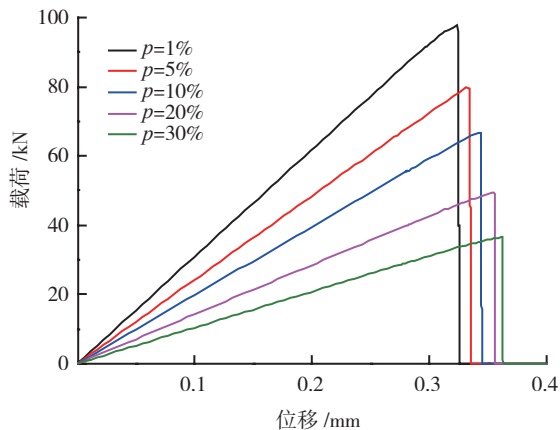


图4 不同孔洞体积率下载荷与位移关系图

Fig.4 Loading vs. displacement for different void ratio

从中可以看出:随着孔洞体积率的增加,结构承载力降低而变形增大(即柔性增强)。图 5 给出孔洞体积率与结构承载力之间的关系,结果显示结构承载力随孔洞体积率的增加而降低。

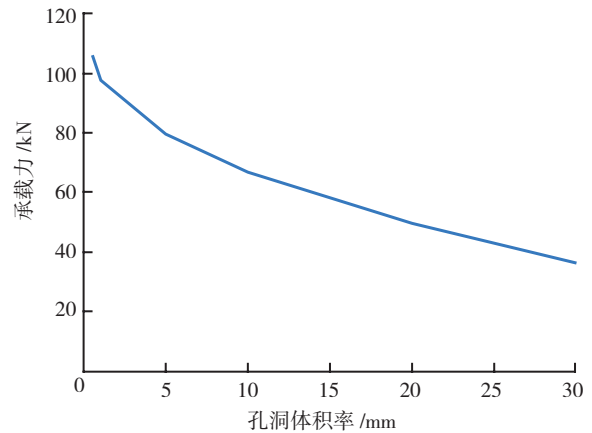


图5 孔洞体积率与承载力关系

Fig.5 Bearing load vs. void ratio

4 结论

本文采用扩展有限元法结合粘性缝开裂模型分析含球形孔洞结构拉伸破坏机理及过程。该方法克服了传统的内聚力模型只能按照事先设计的路径发生断裂的限制。其可以模拟材料以任意路径方式的裂纹扩展,同时扩展有限元法可以使裂纹穿越网格单元,大大的减少了一般裂纹计算中需要的网格重划分过程。本文结果显示含球形孔洞结构拉伸破坏主要是由于应力集中导致开裂。基于扩展有限元模型的数值分析方法可以直观和可视化的方式呈现结构破坏的整个过程。本文的算列结果表明随着球形孔洞体积百分数的增加,构件的极限承载力降低而柔性增加。

参考文献

- [1] 庄守兵,吴长春,冯森林,等. 基于均匀化方法的多孔材料细观力学特性数值研究. 材料科学与工程,2001,19(4): 9-13.
- [2] 李录贤,王铁军. 扩展有限元法 XFEM 及其应用. 力学进展, 2005,35 (1):5220.
- [3] Melenk J, Babuska I. The partition of unity finite element method: basic theory and applications. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 39: 289-314.
- [4] Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1999, 45: 601-620.
- [5] 方修君,金峰,王进廷. 基于扩展有限元法的粘聚裂纹模型. 清华大学学报: 自然科学版,2007,47(3):344-347.
- [6] Moes N, Dolbow J, Belytschko T. A finite element method for cracking growth without remeshing. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46: 131-150.

(责编 亿霖)