

# 圆环试样内径对抗拉强度的影响

刘文彬<sup>1,2</sup> 唐春安<sup>1,2</sup> 张后全<sup>2</sup>

(1. 大连大学材料破坏力学数值试验研究中心, 辽宁大连 116622;

2. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁沈阳 110004)

**【摘要】** 运用 RFPA<sup>2D</sup> 软件对岩石的单轴拉伸强度试验、不同内径的圆环试样的劈裂试验进行了模拟。比较模拟结果, 重点研究了圆环试样内径对试件抗拉强度的影响, 确定了最接近单轴拉伸试验结果内径的范围, 利用回归分析确定了内径与试样抗拉强度之间的关系。

**【关键词】** 岩石; 抗拉强度; 圆环内径; 数值模拟

**【中图分类号】** TD 315; TU 458

## Influence of Internal Radius of Ring Specimen on Tensile Strength of Rock

Liu Wenbin<sup>1,2</sup> Tang Chunan<sup>1,2</sup> Zhang Houquan<sup>2</sup>

(1. Research Center for Numerical Tests on Material Failure, Dalian University, Liaoning Dalian 116622 China;

2. Center for Rock Instability and Seismicity Research Northeastern University, Liaoning Shenyang 110004 China)

**【Abstract】** The uniaxial test and Brazilian test have been successfully simulated by using a numerical code named RFPA<sup>2D</sup> (abbreviated from Rock Failure Process Analysis). Splitting tensile strengths of ring specimens with different internal radius are calculated and compared with others. The influence of internal radius of ring specimen on tensile strength is studied, the best ring specimen for testing tensile strength is determined and the relation between internal radius and tensile strength is drawn out by statistical method.

**【Key Words】** rock; tensile strength; internal radius; numerical simulation

## 0 引言

拉伸破坏是岩石破坏的基本形式之一, 抗拉强度是岩石力学性质的重要指标, 对地下工程设计、分析、计算有着重要意义。为了尽可能准确地测到岩石的抗拉强度, 为工程设计提供可靠的依据, 研究者们提出了许多方法, 如直接单向拉伸法、圆盘劈裂法、正方形对轴压裂法、对轴压模拉伸法、圆盘弯曲拉伸法、条状岩梁弯曲拉伸法等<sup>[1]</sup>。其中圆盘劈裂法因试件加工简单、试验操作容易, 被普遍用来测定岩石抗拉强度<sup>[2]</sup>。然而圆盘劈裂法测试岩石抗拉强度也存在很多问题: 载荷使试件沿径向破坏, 并不是全试样即时劈拉断裂; 距加载点深度不同处处于不同的应力状态, 结果不太准确, 变异也较大; 试件表面粗糙, 线性加载也不能保证均匀; 变形特征与抗压变形特征差别也较大等<sup>[3]</sup>。另外, 传统的劈裂法试验, 对硬岩的测试结果偏低, 对软岩的测试结果偏高, 而且误差大<sup>[4]</sup>。为了解决这些问题, 张志强等

提出用圆环试样来代替圆盘试样<sup>[5]</sup>。因此, 圆环内外径尺寸就成为劈裂试验测岩石抗拉强度的一个关键因素, 确定内外径比的大小及试样内外径比和抗拉强度的关系无疑具有重要的理论和实际意义。

## 1 试验模型介绍

### 1) 岩石破裂分析系统 RFPA<sup>2D</sup> 概述

本文所用 RFPA<sup>2D</sup> 系统, 是一个能模拟岩石介质逐渐破坏过程的数值模拟工具<sup>[6,7]</sup>。和其他已有的逐渐破坏模型 (Progressive Failure Fracture Damage Model) 一样<sup>[8]</sup>, RFPA<sup>2D</sup> 包括两个方面的功能: 应力分析和破坏分析。RFPA<sup>2D</sup> 采用有限元法进行应力分析。破坏分析则是根据一定的破坏准则来检查材料中是否有单元破坏。对破坏单元采用刚度特性退化 (处理分离) 和刚度重建 (处理接触) 的办法进行处理。为了模拟试验机加载情况, 采用位移加载方式。对于每一步给定的位移增量, 首先进行应力

计算。然后根据破坏准则来检查模型中是否有单元发生破坏。如果没有,继续增加一个位移增量,进行下一步应力计算;如果有破坏单元,则根据单元的拉伸或剪切破坏状态进行刚度退化处理,然后重新进行当前步的应力计算。重复上述过程,直到整个材料产生宏观破坏。由于单元的破坏为脆性,因此认为单元破坏释放的弹性能以声发射的形式释放<sup>[6,7]</sup>,根据声发射特性来观察岩石破裂过程。考虑到岩石类脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度,因此采用了修正后的库仑准则、包含拉伸截断<sup>[9]</sup>作为单元破坏的强度判据。根据这一准则,单元的破坏可能是拉伸破坏也可能是剪切破坏。(见表1、表2)

2) 试样介绍

数值模拟试验用到矩形和圆环两种共7个模

型,每一个模型拿10个试样来进行数值模拟以消除偶然因素的影响。矩形模型尺寸为200 mm×100 mm,划分为20 000个等面积的单元,主要用来模拟单轴拉伸试验确定岩石在直接拉伸试验下的抗拉强度值,验证圆环试样的劈裂试验结果;6个圆环模型,外部直径均为180 mm,内部圆孔直径分别为9、18、27、36、45、54 mm,主要用来对比分析内径变化对试样抗拉强度的影响,确定最佳内径尺寸。在RFPA<sup>2D</sup>系统中,模型的厚度均默认为1 mm。模拟试验采用平面应力分析,利用位移控制的磨平端面的平台加载方式,每步加载量为0.002 mm,共加载100步。在劈裂试验中,考虑到承压板的材料性质和宽度对破坏方式和抗拉强度都会有影响,所以承压板的宽度统一取值为28 mm,承压板的主要材料性质参数取的相同且足够大。

表1 试样力学参数及加载控制参数表

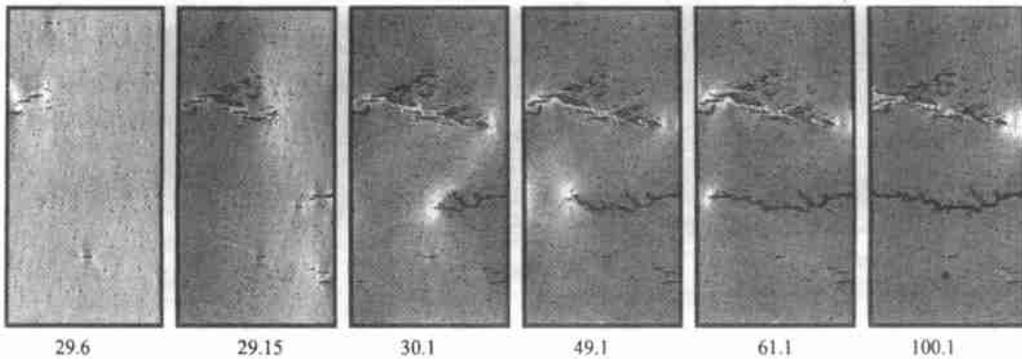
| 均质度<br><i>M</i> | 单元弹性模量<br><i>E</i> /MPa | 单元抗拉强度<br>$\sigma$ /MPa | 泊松比<br>$\mu$ | 拉压比<br>$\lambda$ | 样本数量<br>/个 | 加载方式   |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|------------------|------------|--------|
| 5.0             | 60 000                  | 200                     | 0.25         | 1/10             | 10         | 位移控制加载 |

表2 试样破坏准则控制参数表

| 摩擦角/(°) | 残余强度系数 | 最大拉应变系数 | 最大压应变系数 | 破坏准则         |
|---------|--------|---------|---------|--------------|
| 30      | 0.1    | 1.5     | 200     | Mohr-Coulomb |

2 试验结果

1) 单轴拉伸试验结果(见图1)



注:图片下的数字表示当前破坏程度所在的加载步,例29.6指加载步第29步第6分布

图1 岩石试样在单轴拉伸试验下的破坏过程(应力图)

如图1所示应力图中光线亮度的高低表示试样所受应力的大小,亮度越高表示对应点处的应力越高,反之,表示该处应力较低,图1中试样受到的都是拉应力。裂纹的尖端区域亮度很大,这与试样受载破坏时所产生的应力集中相对应。随着裂纹扩展,应力集中不断地释放、应力不断的重新分布,但是裂纹尖端的应力集中一直存在,直到试样完全破坏。破坏后的区域光线较暗,说明该区域已经失去

了承载的能力。

由单轴拉伸试验结果得到的最大载荷值(见图2)以及模型的几何尺寸,我们可以计算出试样的单轴抗拉强度,计算公式为:

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{1}$$

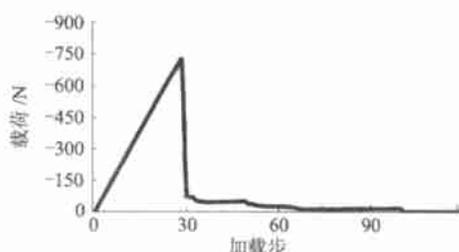
式中:  $\sigma$ ——试样的抗拉强度,MPa;  
 $F$ ——试样承受的最大拉力,N;

$S$ ——试样垂直于受力方向的横截面积,  
mm<sup>2</sup>。

把  $F = 726.453 \text{ N}$ ;  $S = 100 \text{ mm}^2$  代入式(1)得  
 $\sigma = 7.26 \text{ MPa}$

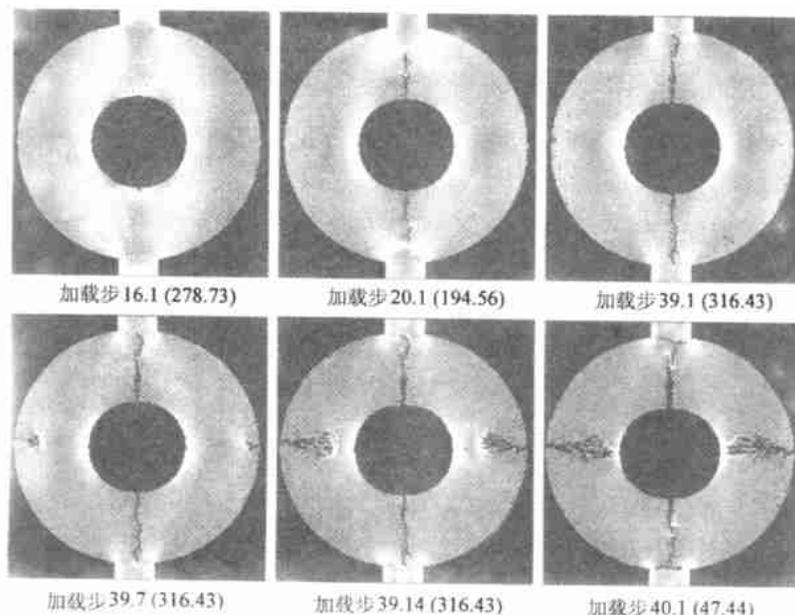
## 2) 圆环试样的劈裂试验结果

由于篇幅所限, 仅以内径  $d = 36 \text{ mm}$  的试样来展示试样的破坏过程(见图3)和抗拉强度的计算方法。



注: 图中“—”表示岩石试样受到的是拉应力

图2 岩石试样在单轴拉伸试验下的载荷曲线



注: 例加载步 39.7(316.43) 指加载步第 39 步第 7 分布, 当前加载步的载荷值为 316.43 N

图3 内径为 36 mm 的圆环试样的劈裂破坏过程

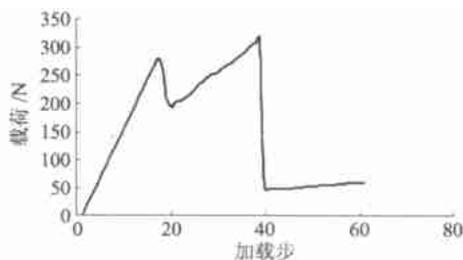


图4 圆环试样( $d = 36 \text{ mm}$ )的载荷曲线

从图3可以清楚地看到圆环试样的破坏过程: 随着载荷的增加, 沿加载方向在圆环试样的中心孔内表面出现了应力集中, 并最先在该处出现裂纹; 随后, 两条裂纹沿相反的方向由内向外扩展, 试样分成几乎对称的两部分, 这是第一个裂纹; 随着载荷的继续增大, 在试样外边缘垂直于加载方向的中心线附近, 出现两条新的对称的裂纹, 由外向内扩展; 最后试样破坏为几乎相同的四部分, 这是第二个裂纹, 在破坏的过程中还可以看到“止裂”现象。在试样的载荷曲线上, 可以看到两个对应于裂纹的应力降, 这与理论分析和张志强所做的物理试验结果具有较好的一致性。

根据文献[10, 11]知劈裂试验中圆环试样的抗拉强度计算公式为:

$$\sigma = k \frac{2P}{Dt} \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{\pi} [6 + 38(d/D)^2] \quad (3)$$

式中:  $\sigma$ ——试样的抗拉强度, MPa;

$P$ ——试样破坏所需的载荷, N;

$D$ ——圆环试样的外部直径, mm;

$d$ ——圆环试样的内部直径, mm;

$t$ ——圆环试样的厚度, mm。

从理论上讲, 一般认为当载荷达到最大值时裂纹开始萌生。因此, 根据最大载荷值可以计算出圆环岩石试样中心孔表面的最大抗拉强度并把这个强度值看成是岩石的抗拉强度。但是这个结论是建立在裂纹在中心孔表面萌生的时候岩石已经达到了最大承载能力并失去承载能力的假设之上的。事实上, 当裂纹在中心孔附近萌生的时候, 应力集中将会释放, 应力将会在试样中重新分布以达到新的平衡条件, 而且

裂纹扩展时施加在试样上的力可以继续增加。因此,当中心孔表面区域的应力达到抗拉强度而萌生裂纹时并不意味着试样的承载能力已经达到极限。这也是把劈裂试验得到的最大载荷  $P$  带入式(2)、式(3)得到的岩石抗拉强度比用直接拉伸试验得到的岩石抗拉强度大的原因。所以,根据理论上得到最大载荷与岩石中心孔表面最大抗拉强度的关系,用外部施加的最大载荷和式(2)、式(3)来计算中心孔表面的最大抗拉强度是不合理的。

从另一方面来说,圆环试样中心孔表面裂纹开始萌生时的载荷值(称之为起裂载荷,用  $P_c$  表示)跟岩石的抗拉强度有一定的关系。如果能从试验中测得这个载荷值,就可以得到岩石的抗拉强度。在数值试验中,可以很容易地得到每一个试样的起裂载荷  $P_c$ ,然后用起裂载荷  $P_c$  代替最大载荷  $P$  带入式(2)、式(3)来计算岩石的抗拉强度。下面以  $d/D=0.4$  为例求圆环试样的抗拉强度。

参照试样破坏过程和试样在劈裂试验下的载荷曲线,得到试样的起裂载荷,把  $P_c=245.18\text{ N}$ ;  $d/D=0.4$ ;

$t=1\text{ mm}$ ;  $D=180\text{ mm}$  带入式(2)、式(3)得:

$$k = \frac{1}{\pi} [6 + 38(d/D)^2] = \frac{1}{\pi} [6 + 38(0.4)^2] = 3.847$$

$$\sigma = k \frac{2P_c}{Dt} = 3.847 \times \frac{2 \times 245.18}{180 \times 1} = 10.48\text{ MPa}$$

3) 6种不同内径圆环试样劈裂试验结果比较(见图5、图6)

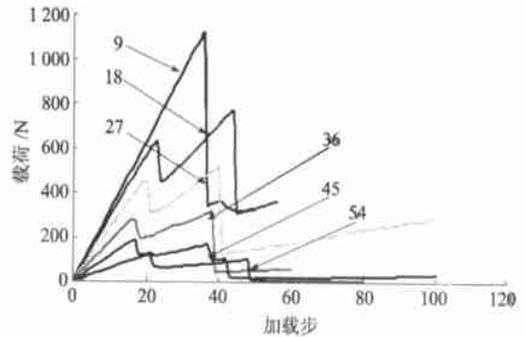


图5 不同内径试样的载荷曲线

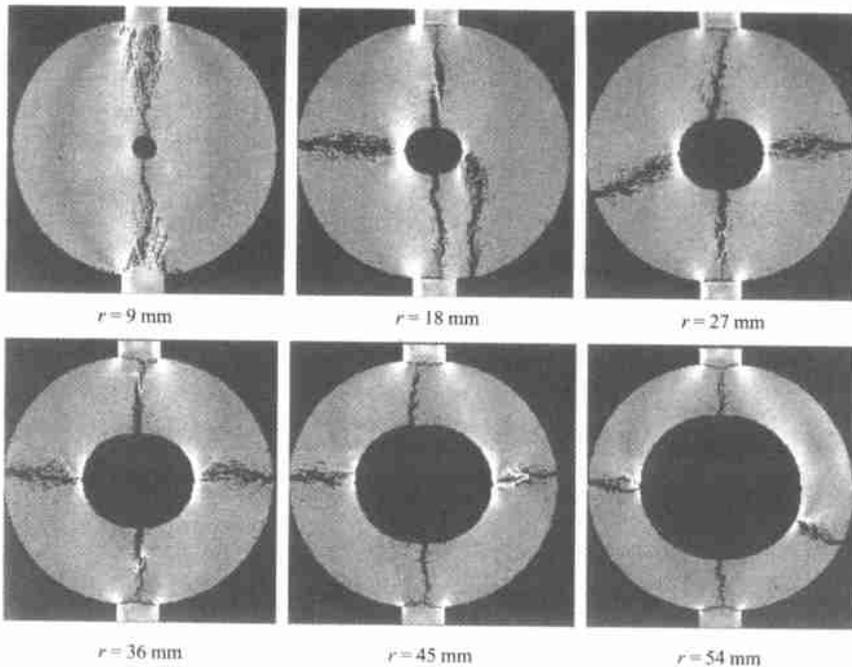


图6 不同内径圆环试样的最终破坏模式

当试样的内径很小时,载荷位移曲线及试样的破坏模式跟圆盘巴西试验的相似,试样突然失去大部分的承载能力,破坏后基本分为两半。对于内径大的试样,在它们的载荷位移曲线上有两个或更多的应力升降,这是与试样的第一、第二个裂纹相对应的。模拟结果可以解释如下:大内径的圆环试样,加载时受载荷作用影响大的单元相对来讲比较少,随

着载荷的增加,只有强度极限接近载荷值的一部分数量的单元开始破坏,因此裂纹在该处萌生并逐步扩展;当试样的破坏发展到一定程度时,另外一部分单元才因应力集中的释放、应力的重新分配而受到载荷的明显影响。然而,对于圆盘试样,相当多的单元承受最大载荷,在裂纹区没有急剧变化的应力,因此,在这种加载条件下,在同样的应力下大多数的单

元失稳导致试样的突然失稳破坏。

同理可以得到其他圆环试样的抗拉强度, 计算结果见表3。

表3 不同内径圆环试样的劈裂试验结果

| 内径<br>$r/\text{mm}$ | 最大载荷<br>$P/N$ | 起裂加载步 | 起裂载荷<br>$P_c/N$ | 抗拉强度<br>$\sigma/\text{MPa}$ |
|---------------------|---------------|-------|-----------------|-----------------------------|
| 9                   | 1 113.85      | 27    | 849.90          | 19.19                       |
| 18                  | 769.49        | 17    | 486.33          | 12.94                       |
| 27                  | 520.02        | 14    | 329.31          | 10.98                       |
| 36                  | 316.43        | 14    | 245.18          | 10.48                       |
| 45                  | 190.34        | 16    | 159.11          | 8.73                        |
| 54                  | 121.97        | 17    | 101.81          | 7.09                        |

从结果可以看到, 圆环试样的抗拉强度明显的受到试样内径大小的影响。圆盘试样与内径很小的圆环试样基本没什么区别, 也就是说在圆盘试样中存在孔洞或者缺陷时不会导致应力的增加。随着内径的逐渐增大, 试样的承载力逐步降低、抗拉强度值逐渐减小(见图7)。当内径为45~54 mm时, 试样的抗拉强度值(8.73~7.09 MPa)最接近于单轴拉伸试验的结果(7.26 MPa)。试样抗拉强度和内径的关系可以近似的表示为:

$$y = 6.4628x^{0.4655} \quad (4)$$

式中:  $y$ ——试样的抗拉强度, MPa;

$x$ ——圆环试样的内径, mm。

对比发现, 用这种方法得到的岩石抗拉强度比用最大载荷计算得到的抗拉强度更合理更接近于直接拉伸试验得到的抗拉强度, 特别是当圆环试样的内径在45~54 mm范围内时。起裂载荷与圆环试样中心孔的力学性质有很密切的关系, 因此得到的抗拉强度值是分散的。在物理试验中, 如果起裂载荷能够测到, 圆环试样劈裂试验将会是一种有效的手段来间接测试岩石的抗拉强度。

### 3 结论

1) 本文用 RFPA<sup>2D</sup> 数值模拟了岩石的单轴拉伸试验和劈裂试验, 试验中试样的破坏模式以及试样中应力的分布都与理论分析相符, 数值模拟结果与物理试验结果有较好的一致性。

2) 在试样外径不变的条件下, 抗拉强度值随着圆环试样内径的增大而减小, 二者有乘幂的关系; 当圆环试样的内外径比小于0.1时, 试样的抗拉强度不会发生明显的变化; 当内外径比在0.5~0.6范围内时, 试验结果最接近于单轴拉伸试验的结果。

3) 在岩石抗拉强度的测试中, 试验结果不可避免的要受到试样形状、试样尺寸和加载条件的影响, 在这个意义上来说, 试验的结果只能作为标准试验方法的一种参考。

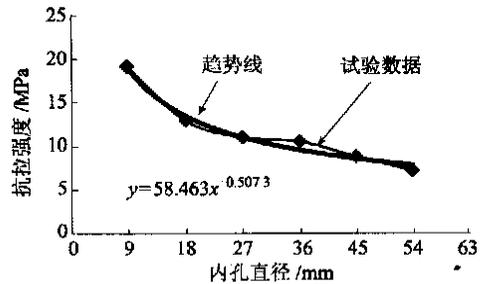


图7 圆环试样内径与抗拉强度的关系曲线

### 参考文献

- 1 叶明亮, 续建科, 牟宏, 等. 岩石抗拉强度试验方法的探讨. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2001, 30(6): 19~25
- 2 张少华, 缪协兴, 赵海云. 试验方法对岩石抗拉强度测定的影响. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3): 243~246
- 3 张少华, 赵海云. 岩石抗拉强度试验方法及其特征. 矿山压力与顶板管理, 1994(3): 68~71
- 4 陶纪南. 岩石轴向拉伸与劈裂法试验结果比较分析. 金属矿山, 1995(3): 28~31
- 5 张志强, 鲜学福. 用带中心孔巴西圆盘试样测定岩石断裂韧度的研究. 重庆大学学报, 1998, 21(2): 68~74
- 6 唐春安. 岩石声发射规律数值模拟初探. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 368~374
- 7 Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 1997, 34: 249~262
- 8 崔维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟. 复合材料学报, 1996, 13(4): 102~111
- 9 Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining [M]. Second Edition, London: Chapman & Hall, 1993. 106~108
- 10 Hannant D, Buckey K, Croft J. Effect of aggregate interlock size on the use of the cylinder splitting test as a measure of tensile strength. Materials and Structures 1973, 6: 15~21
- 11 Hobbs DW. An assessment of a technique for determining the tensile strength of rock. British Journal of Applied physics 1965, 16: 259~268

收稿日期: 2004-08-04