

考虑加载速率与厚径比影响的 巴西圆盘劈裂强度分析

罗世林¹, 万文^{1,2}, 赵延林^{1,2}, 唐劲舟¹, 王亚¹

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;
2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:为综合研究加载速率和厚径比 2 个因素对测定茅口灰岩抗拉强度的影响关系,开展了一系列采用对称小圆弧加载方式下的巴西试验;通过 ANSYS 有限差分软件模拟巴西劈裂试验,结合 Griffith 强度理论分析不同厚径比圆盘试样在不同加载速率下的等效应力分布规律.试验研究结果表明:岩石抗拉强度会随试验加载速率的增加而增大,同时随厚径比的增大呈三次函数衰减关系.数值计算结果表明:越靠近圆盘试样端面中心点,等效应力值越大;除个别点处应力集中外,端面中心点的等效应力值也会随着加载速率的增加而增加;圆盘的起裂位置亦发生在端面中心点处.在此基础上对岩石抗拉强度公式进行修正,建立了更加真实的考虑加载速率与厚径比影响的巴西圆盘劈裂强度修正公式.

关键词:巴西试验;厚径比;加载速率;数值模拟

中图分类号:TD315⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)02-0006-09

Analysis of brazilian splitting strength considering effects of loading rate and thickness-to-diameter ratios

Luo Shilin¹, Wan Wen^{1,2}, Zhao Yanlin^{1,2}, Tang Jinzhou¹, Wang Ya¹

(1.School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2.Hunan University of Science and Technology, Hunan Province Key Laboratory of Safety Mining and Technology of Coal Mine, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To study the relationship of thickness-to-diameter ratios and loading ratios two factors on Maokou limestone tensile strength, had a series of Brazil tests under small arc symmetrical loading. Using finite difference software ANSYS to simulate Brazilian Splitting test, and analysis equivalent stress distribution rules in different thickness to diameter ratio disc specimens under different loading rate, tests show that: rock tensile strength is linear increasing with the increase of loading rate, Brazilian Splitting Strength reduce in cubic function with the increase of thickness-to-diameter ratios. 3D numerical results show that: the closer the center of the disc of the sample ends, the greater the value of the equivalent stress; in addition to individual points of stress concentration, equivalent stress value increased with the increase of loading rate at the center of the ends, the first fracture starting point is at the center of the ends. Based on which test results of Brazil split was revised to get a more real tensile strength considering effects of loading rate and thickness-to-diameter ratios.

Keywords: Brazilian test; thickness-to-diameter ratios; loading rate; numerical simulation

抗拉强度作为岩石类脆性材料的一个重要力学参数,其大小往往影响到岩石结构的强度设计和稳定性

收稿日期:2015-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274097,51174088);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2067);湖南省教育厅资助科研项目(13A020)

通信作者:万文(1968-),男,湖南衡阳人,博士,教授,主要从事岩石力学等方面的研究.E-mail: wanwen68@163.com

分析.巴西试验法是通过间接拉伸后测量岩石抗拉强度的方法,该方法操作方便且试验仪器简单,是目前国内外岩土工程界中测定岩石抗拉强度最基本、最广泛的试验方法^[1].而岩石材料的几何尺寸、试验的加载速率是制约岩石抗拉强度大小的重要因素.王启智、喻勇等^[2-5]等发现利用劈裂试验测量岩石抗拉强度有效性的前提条件是岩石试件从端面中心点最先开始起裂.当巴西试验采用平台加载和对称小圆弧加载的加载方式时能够减少加载点处的应力集中,保证圆盘端面中心点最先起裂,一定程度上提高了抗拉强度的测定精度.因此在现有的试验条件下本文选用对称小圆弧加载下的巴西试验,同时根据国际岩石力学学会建议方法^[6]取加载角 $2\alpha = 10^\circ$.几何尺寸是岩石抗拉强度测定的一个重要影响因素,喻勇等^[7]利用数值软件进行模拟试验发现圆盘厚度和泊松比对圆盘横截面上的应力分布规律具有较大影响;张盛等^[8]通过数值试验建议如果使用常用公式确定岩石抗拉强度,圆盘厚径比取小于 0.3 为宜;汪亦显等^[9]对硬岩进行巴西劈裂室内试验建议测定岩石抗拉强度的厚径比严格选定为 1.0;尹乾等^[10]通过对室内试验发现岩石抗拉强度随厚径比的增大而呈三次函数衰减关系.岩石抗拉强度的大小随厚径比的不同而表现出较大差异.

在加载速率对岩石抗拉强度影响方面,姜耀东等^[11]运用 FLAC^{3D} 软件结合岩石 CT 扫描研究加载速率对岩石内能量积聚与耗散的影响规律,认为加载速率增加将会使能量耗散和积聚更早发生;周辉等^[12]通过试验研究和理论分析,揭示了硬脆性大理岩抗拉强度特性的加载速率效应.但是上述研究并未综合考虑厚径比和加载速率同时对岩石抗拉强度的影响规律,因此本文在弧形加载方式下考虑加载速率和厚径比对巴西圆盘劈裂试验的三维效应分析,通过数值计算和试验研究,分析了不同加载速率和不同厚度比对岩石抗拉强度的影响,并根据加载速率和厚度比的取值范围,分析了岩石的抗拉强度,给出了能获得较精确的岩石抗拉强度的三维修正公式.

1 岩石劈裂试验设计

1.1 试件制取

茅口灰岩是我国南方煤矿开采中广泛遇到的一种工程地质体,呈灰白色、白色相互胶结,表面无明显裂纹,孔隙率较低,主要矿物成分为方解石、石英等,因此研究其抗拉强度意义尤为重大.以湖南宁乡煤炭坝茅口灰岩为研究对象,根据国际岩石力学学会建议方法^[6],采用圆柱体试样进行劈裂试验时,其厚径比宜为 0.3~1,故将试件加工制成直径为 50 mm,厚度分别为 20,25,30,35 和 40 mm 的 3 组试样,每组 10 个且每组中相同厚径比的试件为 2 个.进行多次平行试验,取其平均值为代表可以减小试验结果的离散性.用砂纸试件表面进行光滑处理,并对试件端面进行仔细研磨,使试件中轴线与端面垂直.图 1(a)为试件实物图.

1.2 试验方法

本实验使用的设备是长春朝阳设备仪器厂生产的 RYL—600 剪切流变仪,该仪器其测控精度为 $\pm 2\%$,围压分辨率为 0.1 kPa,传感器的量程范围为 0~5 mm,径向为 0~3 mm,分辨精度为 0.000 1 mm.将经过加工符合规范要求的圆盘状试件横卧于弧形加载装置中央,其加载角度为 $2\alpha = 10^\circ$,如图 1(b)所示,然后将试件与装置整体置于 RYL—600 剪切流变仪下部承压版板上,用位移控制方式缓慢下降上部承压板,待其与上部弧形压盘快接触时改用力控的方式,接触后使用同一加载速率直至试件沿直径方向产生拉伸破坏为止,并用轴力传感器实时记录整个试验过程中的压力.根据《水利水电工程岩石实验规程 SL264—2001》规定巴西劈裂实验常规加载速率应控制在 0.1~0.3 MPa/s.综合考虑 RYL—600 剪切流变仪的性质和规范,本文加载速率分别设定为第一组 10 N/s,第二组 20 N/s,第三组 40 N/s,单位换算后各试件加载速率见表 1.下文中加载速率均以 N/s 为单位,不在重复说明.图 1(c)为局部加载实物图.

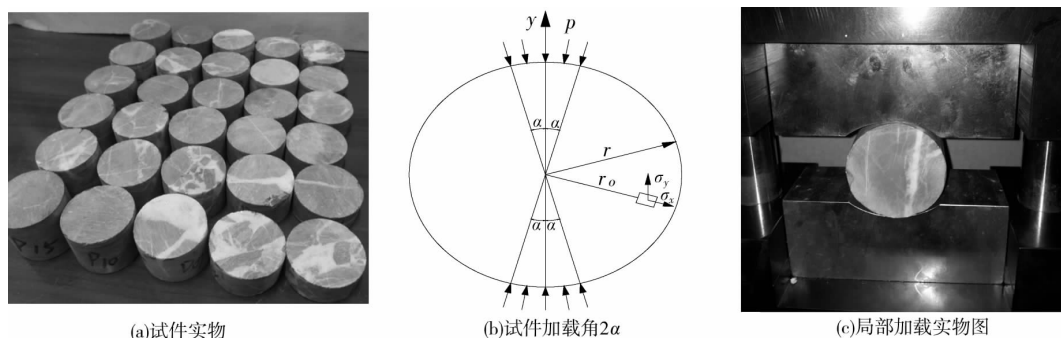


图 1 试件及试验实物图

2 试验结果分析

将加工制成的3组圆柱形岩石试件分别在10,20和40 N/s加载速率进行试验,试验结果见表1,通过测得岩石的破坏荷载后再根据《水利水电工程岩石试验过程》(SL264—2001)的规定,岩石在巴西圆盘劈裂试验中的抗拉强度为

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi dt} \quad (1)$$

式中: σ_t 为岩石抗拉强度; p 为试件劈裂破坏发生时的最大压力值; d 为圆柱形岩石试件的直径; t 为圆柱形岩石试件的厚度.

表1 试验结果

| 组号 | 厚径比 | 加载速率/(MPa/s) | 平均荷载/kN | 平均抗拉强度/MPa | 加载方式 |
|-------------|-----|--------------|---------|------------|---------|
| 第一组(10 N/s) | 0.4 | 0.114 7 | 17.77 | 11.32 | 对称小圆弧加载 |
| | 0.5 | 0.0917 | 16.64 | 8.48 | |
| | 0.6 | 0.076 3 | 17.66 | 7.50 | |
| | 0.7 | 0.065 5 | 16.57 | 6.03 | |
| | 0.8 | 0.057 3 | 15.54 | 4.95 | |
| 第二组(20 N/s) | 0.4 | 0.229 3 | 19.70 | 12.55 | |
| | 0.5 | 0.183 4 | 21.69 | 11.05 | |
| | 0.6 | 0.152 9 | 18.02 | 7.65 | |
| | 0.7 | 0.131 0 | 17.58 | 6.40 | |
| | 0.8 | 0.124 7 | 19.97 | 6.36 | |
| 第三组(40 N/s) | 0.4 | 0.458 6 | 20.16 | 12.84 | |
| | 0.5 | 0.366 9 | 20.67 | 10.53 | |
| | 0.6 | 0.305 7 | 27.18 | 11.54 | |
| | 0.7 | 0.262 1 | 25.94 | 9.44 | |
| | 0.8 | 0.229 3 | 24.24 | 7.72 | |

2.1 拉伸破坏过程分析

试验过程中采用数码相机拍摄各试件起裂、贯通、失效破坏过程的动态视频,将部分典型试件端面破坏图制成表2.根据表2可知在试件厚度较小的情况下(M02),裂纹主要沿着主应力方向扩展,形成一条主裂纹,次生裂纹较少,在低速率加载过程中,端面中心起裂后,端面中心裂隙有足够时间来贯通自身或产生与主应力方向平行的微裂隙,最终这些裂隙扩展,搭接形成1条与主应力平行的主裂纹;随着试件厚度的增加(M06),裂纹由1条主裂纹演化成以1条主裂纹为主,1~2条次生裂纹发育的破坏产状,由于试件厚度的增加,试件内部的裂隙及孔隙贯通路径更加多样,在试件进入塑性变形后,试件原有的裂隙发生塑性屈服,试件微裂隙扩展迅速,在主应力方向形成一条宏观断裂面,在主裂纹两侧伴生有次生裂纹,次生裂纹扩展方向大致与主应力方向一致,但并未贯通整个断裂面,部分次生裂纹与主裂纹之间有微小断裂面贯通;随着试件厚度进一步增加(M13),试件主裂纹不再出现,裂纹发展相对复杂,在主应力方向产生众多次生裂纹,试件粉碎成多块,随着载荷的逐渐增加,试件内部裂隙发生聚合,贯通,沿主应力方向扩展迅速,达到峰值进入破坏阶段后,岩石的承载能力进一步降低,次生裂纹迅速扩展并相互搭接,加速岩石次生裂纹的产生.试验前虽然用砂纸对各个试件做了光滑处理,但是摩擦力并不能完全消除,因此在加载点附近出现了应力集中并导致该区域出现三角破坏(M04),同时在试件内部的裂隙和节理无法观测,因此在人为剔除不合格试件的时候存在一定误差(M10),该试件(M10)的破裂模式明显受到了夹层或节理的影响.因此为减少试验离散性影响,保证实验结果的准确性,此类不合理实验数据应当剔除.










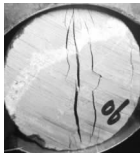


2.2 厚径比对岩石抗拉强度的影响分析

选取各组中不同厚径比(0.4~0.8)下的典型试验数据,利用Origin专业绘图软件对各组中的典型试验数据绘制成应力-应变曲线,如图2所示.

结合图2(a)~图2(c)各组不同厚径比典型试件应力-应变曲线可知在各曲线的变形特征基本可以

分为以下 4 个阶段:(1)原始裂纹闭合阶段;(2)弹性阶段;(3)累进性破裂阶段;(4)破裂后阶段.试验过程中还发现岩石破裂时产生较大的声响,并在电脑上可以实时看到此时应力-应变曲线出现快速跌落,因此该类岩石的脆性很明显.

表 2 部分典型试件端面破坏样图

| 试件厚径比 | 试样破坏前 | 试样破坏后 | 试件厚径比 | 试样破坏前 | 试样破坏后 |
|-------|---|---|-------|--|---|
| 0.4 |  |  | 0.6 |  |  |
| 0.5 |  |  | 0.7 |  |  |
| 0.5 |  |  | 0.8 |  |  |

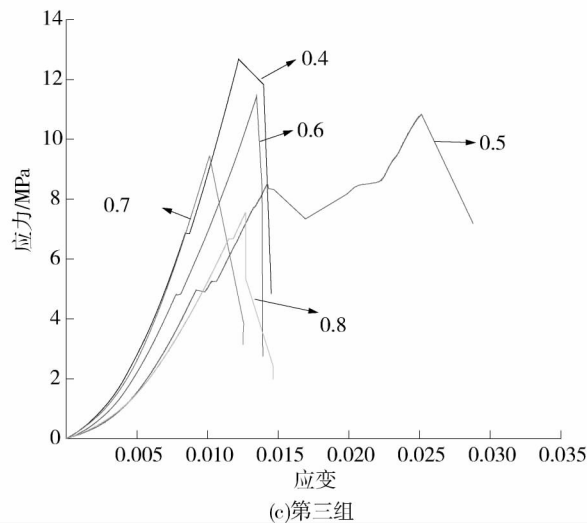
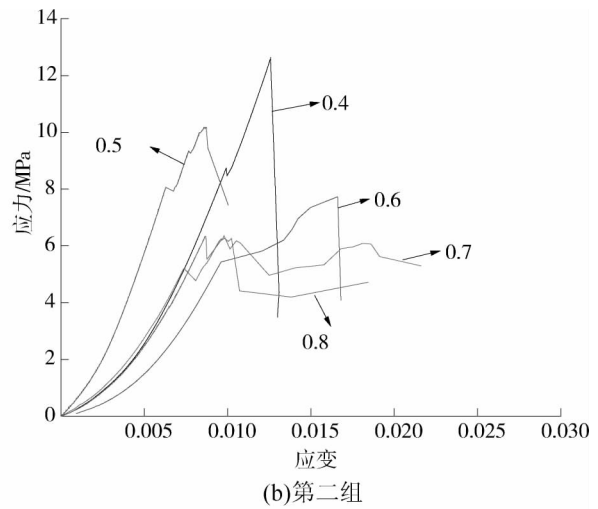
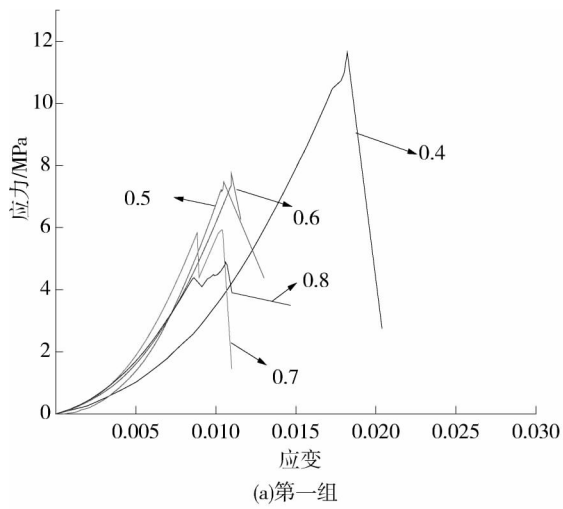


图 2 各组不同厚径比的典型应力-应变曲线

结合表1和图2可知在同一加载速率下岩石抗拉强度随厚径比的增大而减少.对于第一组试验数据:厚径比从0.4~0.8的过程中,抗拉强度依次减少25.1%,11.6%,19.6%和10.8%,试样的平均抗拉强度为7.66 MPa;对于第二组试验数据:厚径比从0.4~0.8的过程中,抗拉强度依次减少11.9%,30.8%,16.3%和0.6%,试样平均抗拉强度为8.80 MPa;对于第三组试验数据:厚径比从0.4~0.8的过程中除去25 mm岩样有小幅增加外,依次减少7.9%,18.3%和18.2%,试样平均抗拉强度为10.41 MPa;试验数据表现出一定的离散性是因为岩石作为一种不连续介质体,尺寸不同试样中孔隙、裂隙以及弱面等的赋存情况亦会不尽相同,随着试件尺寸增大,其缺陷也会增大,试样抗拉强度便会相应降低.

为进一步反映厚径比对岩石试样抗拉强度的影响,且基于最小二乘法拟合原理,使用Origin专业软件对岩样厚径比、抗拉强度进行拟合,拟合度都在0.90以上,能较好地反应岩样的厚径比与抗拉强度呈三次多项式关系.其拟合方程见表其拟合结果见表3.

表3 各组试件抗拉强度与厚径比的拟合方程

| 组号 | 加载速率/(N/s) | 拟合方程 | 拟合度 |
|-----|------------|---|----------|
| 第一组 | 10 | $\sigma_t = -122.5(r/h)^3 + 242.142(r/h)^2 - 169.29(r/h) + 48.09$ | 0.975 26 |
| 第二组 | 20 | $\sigma_t = 259.17(r/h)^3 - 430.29(r/h)^2 + 210.60(r/h) - 19.36$ | 0.955 76 |
| 第三组 | 40 | $\sigma_t = 168.33(r/h)^3 - 334.50(r/h)^2 - 200.07(r/h) - 24.44$ | 0.962 54 |

2.3 加载速率对抗拉强度的影响分析

根据《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)要求规定,巴西劈裂试验常规加载速率应控制在0.1~0.3 MPa/s,经过设计与换算本实验采用的加载速率分别为10,20和40 N/s.图3为不同加载速率下抗拉强度拟合.

结合图3中的抗拉强度散点和表1不难看出厚径比一定时,试件的抗拉强度随加载速率的增加而增加,对各组试件进行纵向比较可知:20 N/s下的抗拉强度分别比10 N/s下的抗拉强度提高了9.8%,23.5%,2.5%,6.3%和22.5%;除去M06号岩样数据有幅度减少之外,40 N/s下的抗拉强度分别比20 N/s下的抗拉强度提高了2.5%,33.7%,32.2%和17.6%;当加载速率为10 N/s时,试件的平均抗拉强度为7.66 MPa,加载速率为20 N/s时,试件的平均抗拉强度为8.80 MPa,加载速率为40 N/s时,试件的平均抗拉强度为10.41 MPa,抗拉强度总体趋势随加载速率增加而增大.为进一步分析岩石抗拉强度与加载速率的关系,即拟合抗拉强度散点得出的曲线可知当厚径比不变时,随着加载速率的增加,岩石抗拉强度呈现近似线性增加.

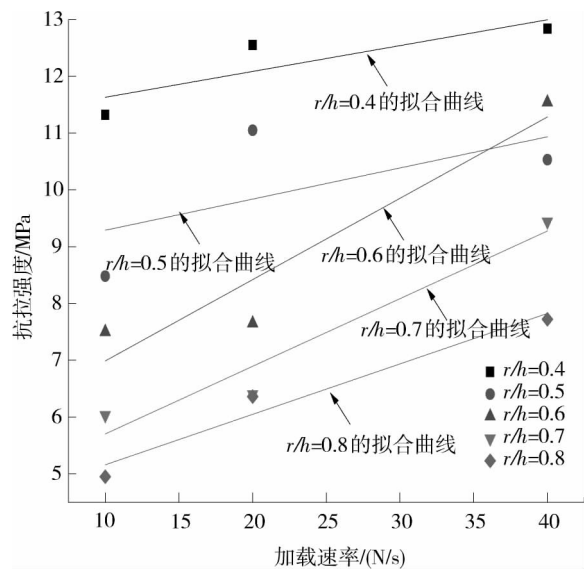


图3 不同加载速率下抗拉强度拟合曲线

3 巴西劈裂的应力场分析

利用巴西试验方法测岩石抗拉强度大小的理论基础是二维弹性理论.根据弹性力学理论,巴西圆盘的径向荷载分量为 σ_x ,轴向为 σ_y .如果假定P与圆盘接触面对应的圆心角为 2α ,如图4所示,则巴西圆盘内某点的应力与分布角 α 有下列关系:

$$\sigma_x = -\frac{P}{\pi r_0 t a} \left[\frac{(1 - (\frac{r}{r_0})^2) \sin 2\alpha}{1 - 2(\frac{r}{r_0})^2 \cos 2\alpha + (\frac{r}{r_0})^4} - \tan^{-1} \left(\frac{1 + (\frac{r}{r_0})^2}{1 - (\frac{r}{r_0})^2} \right) \tan \alpha \right]. \quad (2)$$

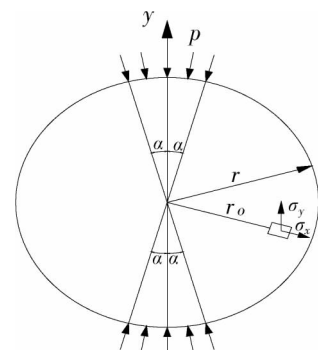


图4 试件受力示意图

$$\sigma_r = \frac{P}{\pi r_0 t a} \left[\frac{(1 - (\frac{r}{r_0})^2) \sin 2\alpha}{1 - 2(\frac{r}{r_0})^2 \cos 2\alpha + (\frac{r}{r_0})^4} + \tan^{-1} \left(\frac{1 + (\frac{r}{r_0})^2}{1 - (\frac{r}{r_0})^2} \tan \alpha \right) \right]. \quad (3)$$

式中: r_0 为巴西圆盘直径; r 为计算点的位置; t 为圆盘厚度; α 为荷载作用扇形的一半.

当 $r=0$, 也就是在端面圆心处, 式(2)和式(3)可以改写为

$$\sigma_x = -\frac{P}{\pi r_0 t} \left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right] = -\frac{2P}{\pi D t} \left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right]. \quad (4)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{\pi r_0 t} \left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right] = \frac{2P}{\pi D t} \left[\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right]. \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)不难看出在巴西圆盘端面中心点处拉、压应力的大小与加载角 α 有关. 对于式(4), 当加载角 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 即 $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right) = 1$, 可知式(1)是式(4)的极限值, 因此利用式(1)计算出的岩石试件抗拉强度偏低.

综上所述劈裂法测岩石抗拉强度大小不仅会受加载速度和厚径比的影响, 同时荷载分布域(加载角)亦会对其产生影响, 因此以下数值试验在保持加载角不变的情况下研究厚径比和加载速率对巴西圆盘劈裂试验应力分布的影响规律, 并基于加载速率和厚径比的不同取值范围, 给出了能获得较精确的岩石抗拉强度的三维修正公式.

4 巴西劈裂试验的数值模型与计算分析

4.1 数值计算模型介绍

为进一步研究巴西试验方法的适用性, 本文采用有限差分软件——FLAC^{3D}来进行数值模拟试验. 同时考虑到 FLAC^{3D}建模的复杂性^[13], 因此先在 AutoCAD 中将试件平面图画出来, 然后导入 ANSYS 有限元软件进行数值模型的建立和网格划分, 最后再将所建立好模型导入 FLAC^{3D}进行数值计算. 图 5 为数值计算模型, 图 5(b)中标明了加载的位置. 3 组试件的加载速率分别为 10 N/s, 20 N/s 和 40 N/s, 所施加的总荷载为其抗拉强度, 加载角 $2\alpha = 10^\circ$, 模拟试验材料为各项同性的弹性材料.

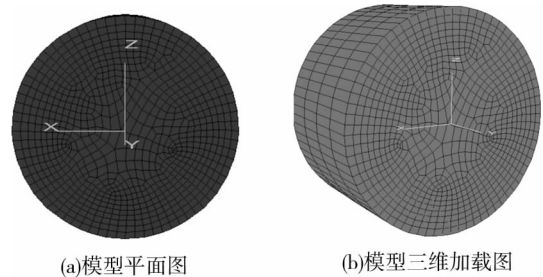


图 5 数值计算模型

4.2 计算与分析

茅口灰岩作为一种脆性类岩石材料, 在三维条件下对其进行劈裂试验时, 其内部应力分布状况非常复杂, 决定其起裂点的位置可以由 Griffith 强度理论推知. Griffith 强度准则中的等效应力 σ_c 可以很好的判断劈裂试验的起裂点, Griffith 强度准则的具体表现形式^[14]为

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = -8\sigma_c, (\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0). \quad (6)$$

$$\sigma_3 = \sigma_c, (\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0). \quad (7)$$

式中: σ_c 为等效应力; σ_1 为第一主应力; σ_3 为第三主应力.

通过有限差分软件 FLAC^{3D}中的内嵌 Fish 语言编译程序, 记录圆柱体试件端面中心轴上各个点在 Ox 和 Oz 的应力, 再由式(6)和式(7)计算出各点的等效应力并利用 Origin 专业绘图软件将模拟计算的数据绘制成图(见图 6). 因为试件是严格对称, 故选取一半进行记录并分析.

从图 6 中可以看出, 当厚径比 r/h 为定值时, 随着加载速率取值的增加, 距端面中心处相同间隔下的记录点的等效应力大小均表现出不同程度的增加, 但是各曲线总的趋势变化不大. 以厚径比 $r/h=0.4$ 为例, 随着加载速率的增加, 等效应力没有出现明显凸起点且其最高点位置从 17 mm 变化到 14 mm, 逐渐靠近, 故可知随着加载速率的增加应力集中的影响逐渐减少. 当加载速率为 20 N/S, 厚径比 $r/h=0.4$ 和 0.8

时;以及加载速率为 40 N/s,厚径比 $r/h=0.4$ 和 0.7 时,可以明显看到应力凸起点,同时考虑到试件从有效应力最大点最先开始破裂,因此在这种情况下不能保证试件在端面中心点破裂,试验失效.当加载速率为 10 N/s,厚径比为 0.4~0.8 时,试件端面加载点轴线上没有出现明显凸起点,且端面中心点出等效应力取得最大,又考虑到试件的破坏是从等效应力最大点出最先破裂,故在此种条件下可以保证试件从端面中心点最先起裂,劈裂试验的有效性得到保证.

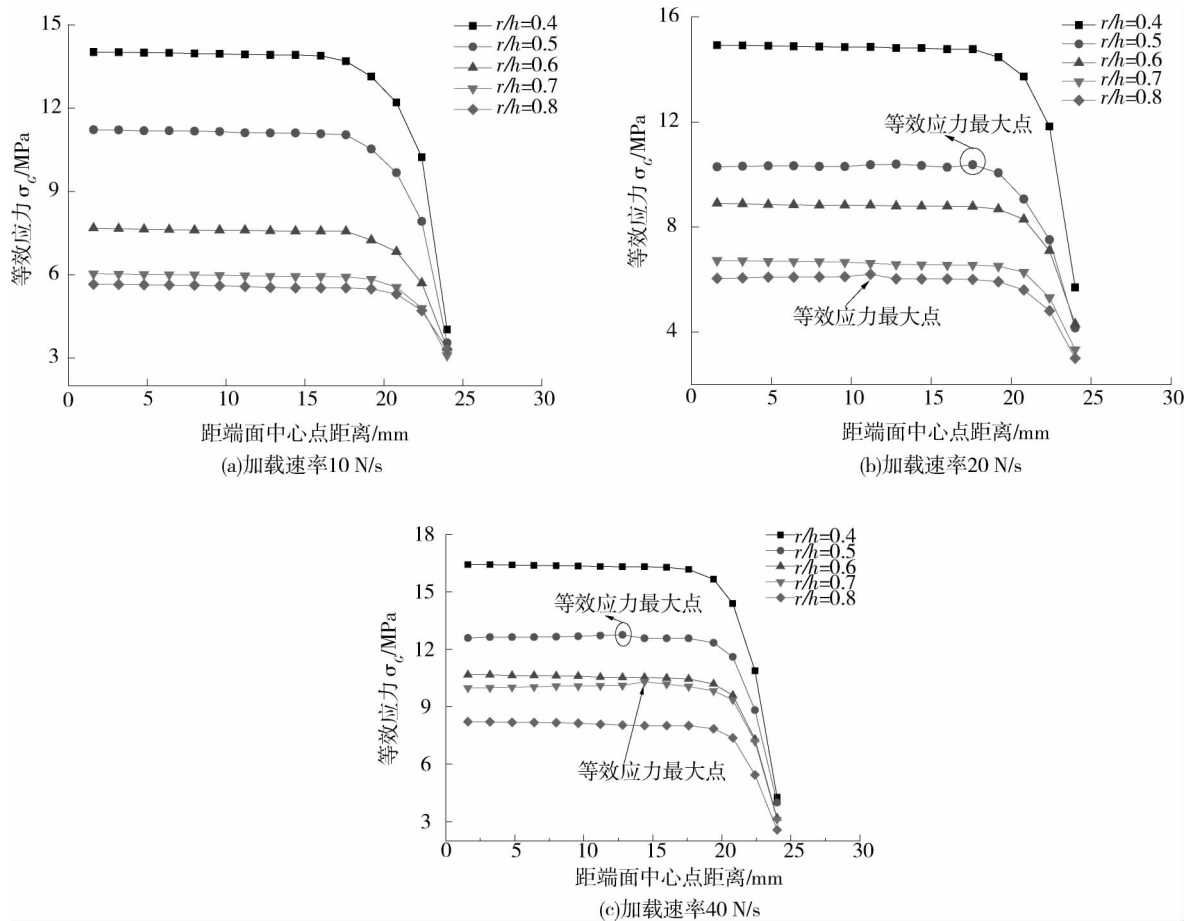


图6 不同厚径比和加载速率下等效应力分布图

5 考虑厚径比和加载速率的抗拉强度公式修正

5.1 三维抗拉强度修正系数的建立

根据 Griffith 强度准则可知,进行巴西试验时圆盘试样最先破裂点发生在试件端面中心点^[8],而巴西劈裂抗拉强度公式是基于平面弹性力学分析而得,没有考虑到试验过程中试件三维应力的影响.因此本文对巴西劈裂试验公式进行修正,引入巴西劈裂试验三维修正系数 K^* ,由上文可知 K^* 与加载速率和厚径比相关,故巴西圆盘劈裂强度修正公式可表示为

$$\sigma_t = K^* \frac{2P}{\pi dt}. \quad (8)$$

当加载速率和厚径比为上述试验范围,且在试件端面中心点处等效应力 σ_c 最大,试验有效性得以保证.再结合格里菲思强度准则,可以知道,当圆盘试样被破坏时, $\sigma_c = \sigma_t$. 再结合式(6)~式(8)可得三维修正系数的计算公式如下:

$$K^* = \frac{\sigma_c}{2P/\pi dt}. \quad (9)$$

根据端面中心点等效应力 σ_c 最大这一条件,通过数值模拟计算出相应的端面中心点处等效应力值,再结合式(9),绘制出三维修正系数 K^* 与不同加载速率 v 与厚径比 r/h 的关系.可知三维修正系数 K^* 与

加载速率 v 成正比,与厚径比 r/h 成反比;当厚径比 r/h 一定时,三维修正系数 K^* 随加载速率 v 的增加而近似线性增加,当加载速率 v 一定时,三维修正系数 K^* 随厚径比 r/h 的增加而非线性增加。

为了得到三维修正系数 K^* 关于厚径比 r/h 和加载速率 v 的一个定量关系,对图6进行拟合,考虑到修正系数 K^* 均与 r/h 和 v 的变化有关,故可以先对再对加载速率 v 影响部分进行线性拟合,再对厚径比 r/h 影响部分进行非线性拟合,其拟合公式如下:

$$K^* = 3.108\ 19 - 9.722\ 22\left(\frac{r}{h}\right)^3 + 16.880\ 95\left(\frac{r}{h}\right)^2 - 9.959\ 92\left(\frac{r}{h}\right) + 0.001v. \quad (10)$$

拟合曲面如图7所示,图中红色原点表示实际修正系数,拟合相关系数达到0.89639,式(10)能够较好的反映厚径比和加载速率对巴西圆盘三维修正系数的影响。

联立式(8)~式(10),得到修正后的抗拉强度为

$$\sigma_t = \left[3.108\ 19 - 9.722\ 22\left(\frac{r}{h}\right)^3 + 16.880\ 95\left(\frac{r}{h}\right)^2 - 9.959\ 92\left(\frac{r}{h}\right) + 0.001v \right] \frac{2p}{\pi dt}. \quad (11)$$

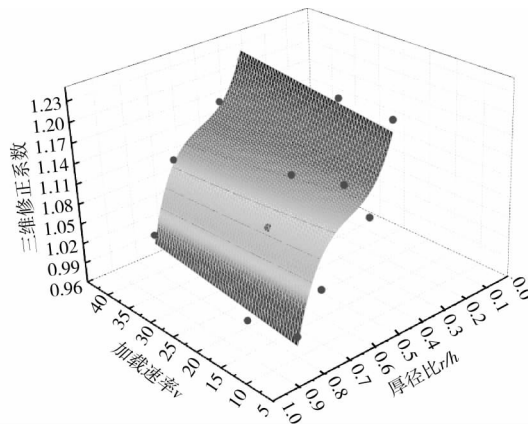


图7 三维修正系数 K^* 与厚径比 r/h 和加载速率 v 的关系曲面拟合

5.2 修正公式验证

为了进一步验证抗拉强度修正公式(式(11))的可靠性,将本文所得的劈裂抗拉强度修正公式与其他学者的结果进行对比.邓华锋等^[15]研究了厚径比对类岩石材料劈裂抗拉强度的影响,得出三维修正系数如下:

$$K^* = -0.332\ 5m^3 + 0.712\ 5m^2 - 0.028\ 3m + 1.003\ 2. \quad (12)$$

式中: m 为圆盘厚径比。

根据我国《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)要求规定,采用圆柱体进行劈裂试验时,厚径比宜为0.5~1.0,加载速率应控制在0.1~0.3 MPa/s,故取厚径比为0.7,代入式(12)得到三维修正系数 $K^* = 1.219\ 8$.同时对于本文抗拉强度修正式(10),取加载速率为70 N/s,厚径比为0.7,计算得三维修正系数为 $K^* = 1.143\ 2$,相比于式(12)有5%的相对误差,可忽略不计,验证了本文修正公式的正确性。

6 结论

1)通过对不同厚径比的巴西圆盘在不同加载速率下进行弧形加载巴西试验,试验发现抗拉强度随加载速率的增加而线性增加,同时抗拉强度和厚径比的关系可以近似用一个三次函数来拟合,且随着厚径比的增加圆盘试件抗拉强度会递减。

2)数值计算结果表明圆盘竖直方向等效应力除个别地方出现应力集中外,基本是在端面中心点达到最大值;且圆盘端面中心轴上等效应力会随着厚径比的增加而变化范围越大。

3)为了建立有效的巴西圆盘劈裂试验应力公式,在综合考虑国际和国内相关规定后,通过室内试验和数值计算发现三维修正系数关于厚径比和加载速率存在一个定量关系,故拟合得到三维修正系数表达式,修正后通过验算,不仅与其他研究结果基本相同,同时也减少了采用劈裂试验得到的抗拉强度值偏少

的影响.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组.SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [2] 王启智,贾学明.用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模型,拉升强度和断裂韧度——第一部分:解析和数值结果[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1285-1289.
- [3] 王启智,吴礼舟.用巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量,拉伸强度和断裂韧度——第二部分:实验结果[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):199-204.
- [4] 喻勇.质疑岩石巴西圆盘拉升强度试验[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1150-1157.
- [5] 喻勇,徐跃良.采用巴西圆盘试样测试岩石抗拉强度的方法[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1457-1462.
- [6] ISRM. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978,15(3):99-103.
- [7] 喻勇,陈平.岩石巴西圆盘试验中的空间拉应力分布[J].岩土力学,2005,26(12):1913-1916.
- [8] 张盛,梁亚磊,李大伟.圆盘厚度对岩石抗拉强度公式的影响性研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):450-454.
- [9] 汪亦显,曹平.硬岩巴西劈裂法试验误差影响率分析[J].岩土工程学报,2007,29(7):1085-1089.
- [10] 尹乾,赵洪辉,邓天慈,等.几何尺寸对岩石抗拉强度影响的试验研究[J].煤矿安全,2014,45(4):17-20.
- [11] 姜耀东,李海涛,赵毅鑫,等.加载速率对能量积聚与耗散的影响[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):369-373.
- [12] 周辉,杨艳霜,肖海斌,等.硬脆性大理岩单轴抗拉强度特性的加载速率效应研究——试验特征与机制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1868-1875.
- [13] Xu N, Tian H, Kulatilake P H S W. Building a three-dimensional sealed geological model to use in numerical stress analysis software: a case study for a dam site[J]. Computers and Geotechnics,2011,38(8):1022-1030.
- [14] 王文星. 岩体力学[M].长沙:中南大学出版社,2004:20-21.
- [15] 邓华锋,李建林,朱敏,等.圆盘厚径比对岩石劈裂抗拉强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):792-798.