

巴西劈裂试验对岩石抗拉强度影响因素研究

刘天宇, 万文*, 王亚, 罗世林, 唐劲舟

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 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:在巴西劈裂试验中选用最基本的垫条加载的加载方式条件下,对不同厚径比的茅口灰岩岩石试件采用不同的加载速率进行巴西圆盘劈裂试验.通过试验数据分析发现,在相同的厚径比下,随加载速率的提高,岩石的抗拉强度小幅增加;当采用相同的加载速率时,茅口灰岩抗拉强度均随厚径比的增加而减小,存在一定的尺寸效应.运用FLAC^{3D}数值分析软件,针对垫条加载进行了不同厚径比及加载速率的巴西劈裂数值模拟试验,结果表明水平拉应力最大值位于圆盘轴线上端面中心点,即圆盘开始起裂的位置位于端面中心点附近.随着加载速率增加,圆盘端面中心点等效应力增大;随着厚径比增加,圆盘端面中心点等效应力减小.最后提出了在垫条加载下抗拉强度的修正公式,消除厚径比及加载速率对岩石抗拉强度的影响,并验证了修正公式的有效性.

关键词:巴西劈裂;垫条加载;厚径比;加载速率;抗拉强度

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2016)04-0001-07

Experimental study on the influence of rock tensile strength based on Brazilian test

LIU Tianyu, WAN Wen, WANG Ya, LUO Shilin, TANG Jingzhou

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

Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The research of spacer loading Brazilian splitting test uses different thickness-to-diameter ratios of Maokou limestone under different loading rate. Results show that several characteristics: at the same thickness-to-diameter ratios, with the increase of loading rate, stress-line drop phenomenon disappears. At the same loading rate, with the increase of loading rate, tensile strength decreases and presents the linear relation with the increase of thickness size. Having discussed the influence of different factors through FLAC^{3D}, this paper finds that the first fracture starting point is at the center of the disc ends, which proves that the disc is broken from the center. The more close to the ends, the higher of the horizontal stress. The larger of the thickness-to-diameter ratios, the lower of the horizontal stress of the central point of the specimens. Tensile strength increases with the increase of loading rate. Finally, tensile strength correction formula are presented, It eliminates the influence of the thick diameter ratio and loading rate on rock tensile strength, and the validity of the modified formula is verified.

Key words: Brazilian test; spacer loading; thickness-to-diameter ratios; loading rate; tensile strength

抗拉强度是表征岩石强度特性的重要参数之一,同时也是矿山设计中安全与稳定性分析的控制参数.茅口灰岩^[1,2]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,是南方煤矿开采中广泛遇到

收稿日期:2016-05-27

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);湖南省教育厅资助项目(13A020)

*通信作者, E-mail: wanwen68@163.com

的工程介质,故研究茅口灰岩抗拉强度具有重要意义.在试验过程中由于直接拉伸法试件制备不易、试验操作复杂和试验成功率低等原因,采用间接拉伸法中巴西劈裂法^[3,4]进行试验较为常见.本文采用巴西劈裂法中最为常见的垫条加载方式^[5,6]进行加载.厚径比是岩石抗拉强度的一个重要影响因素^[7],国内学者做了大量研究取得了相当多的有价值的成果.喻勇^[8,9]对二维弹性力学公式计算岩石抗拉强度提出了质疑,利用三维有限元对圆盘试件内部应力分布进行了分析.张盛等^[10]利用三维有限元软件分析了不同厚度平台巴西圆盘中心轴线上等效应力的分布规律,为了控制相对误差建议采用厚径比为0.3以下的圆盘试样.尹乾等^[11]通过对不同高径比圆盘试样进行巴西劈裂试验发现,随着高径比的增加,抗拉强度逐渐减小,呈近似三次函数关系.

然而,国内学者研究加载速率对岩石抗拉强度的影响相对较少,早在20世纪80年代吴绵拔^[12]认为随着加载速率的增大会导致岩石抗拉强度略有提高.席道英^[13]认为随着加载速率的量级变化,岩石的强度和弹性模量会随之产生影响.吕志强^[14]通过室内实验对煤岩体的研究,发现加载速率的变化影响煤岩的抗拉强度及破坏模式,煤岩抗拉强度较低,具有低强度高脆性的特征,且受加载速率影响很大.周辉^[15]通过电镜扫描破坏后的巴西圆盘试件,通过宏、细观两方面的分析并引入端口形貌学的分析方法,揭示了脆性岩石劈裂过程中的加载速率效应.但是,这些研究成果并未明确指出岩石抗拉强度与加载速率的关系.本文着重针对厚径比、加载速率这两大关键的影响因素分析茅口灰岩的抗拉强度特性,并运用有限差分软件进行数值计算,得出不同条件下的端面等效应力值,验证试验的有效性,最后提出了修正公式加以验证.

1 试验设计

1.1 试样的制取

从长沙宁乡煤炭坝采集茅口灰岩岩样,根据《水利水电工程岩石试验规程 SL 264-2001》试验要求,将岩样切割打磨,制备岩石抗拉强度圆盘试件的直径均为50 mm,厚度分别取20, 25, 30, 35, 40 mm,共计5组,厚径比依次为0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8.部分试件如图1所示.

1.2 试验设备

本文依托湖南科技大学能源学院三轴剪切流变试验室进行圆盘劈裂试验,试验设备为RYL-600剪切流变仪(如图1所示).该伺服流变仪为长春市朝阳仪器有限公司生产,具有刚度大、测量精确、控制精度高、稳定性好的特点.

1.3 试件的加载

垫条加载是巴西劈裂试验较为常见的一种加载方式,其试验方法是在上下承压板与试件之间各加入1根直径约1.5 mm的钢丝垫条,轴向加压时,在试件的上下端面形成线性集中载荷,圆盘试件端面在拉应力作用下,沿加载方向破裂.试验各分为3组,每组均包含不同高径比从0.4~0.8,第一组轴向载荷的加载速率0.1 MPa/s,第二组的轴向载荷加载速率0.2 MPa/s,第三组的轴向载荷加载速率0.3 MPa/s.



图1 RYL-600剪切流变仪

2 试验结果分析

2.1 圆盘受力分析

根据二维平面应力弹性力学的理论,巴西劈裂试件根据弹性力学的平面应力问题求解,在距离圆盘中心最远处即两端处受压应力为最大,其中,以压应力为正,拉应力为负,正应力 σ_x 、 σ_y 和剪应力 τ_{xy} 可表示为

$$\sigma_x = -\frac{2p}{\pi Dt}; \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{2p}{\pi L} \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{2p}{\pi DL}; \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{2p}{\pi L} \left(\frac{\sin\theta_1 \cos^2\theta_1}{r_1} + \frac{\sin\theta_2 \cos^2\theta_2}{r_2} \right). \quad (3)$$

式中, p :最大载荷; D :试件的直径; L :试件的厚度.

根据应力表达式式(1)~式(3),假定试件两端处受到集中荷载 P ,依据圣维南原理,距两端较远处应力集中的影响忽略不计;且在圆盘中心 O 处,即 $\theta_1 = \theta_2 = 0, r_1 = r_2 = 0.5$,根据式(1)和式(2),可得圆盘试件直径平面内垂直加载方向的水平拉应力为

$$\sigma_x = -\frac{2p}{\pi Dt}. \quad (4)$$

直径平面内径向压应力为

$$\sigma_y = \frac{6p}{\pi Dt}. \quad (5)$$

由式(4)~式(5)可得,压应力为拉应力的3倍.对于大部分岩石材料来讲,抗压强度为抗拉强度的10倍以上,由此可知,圆盘试件在端面中心点受到水平拉应力而破坏,将式(4)中的 p 替换成 p_1 ,即为抗拉强度计算公式.

2.2 试验结果分析

在不同加载条件下,剔除试验失败试件后,选取典型圆盘试件,不同加载速率与厚径比下茅口灰岩抗拉强度值如表1所示.

表1 加载试验结果

试件编号	试件厚度/mm	加载速率/(MPa/s)	抗拉强度/MPa
D01	20	0.1	4.00
D04	25	0.1	3.56
D07	30	0.1	3.00
D10	35	0.1	2.93
D13	40	0.1	2.58
D02	20	0.2	4.48
D05	25	0.2	4.11
D08	30	0.2	3.14
D11	35	0.2	2.92
D14	40	0.2	2.65
D03	20	0.3	4.87
D06	25	0.3	4.39
D09	30	0.3	3.80
D12	35	0.3	3.76
D15	40	0.3	2.95

试验结果表明,茅口灰岩抗拉强度值大多介于2~4 MPa之间,离散性较小.其中,最大值为4.87 MPa,最小值为2.58 MPa,算术平均值为3.54 MPa.加载速率为0.1 MPa/s时,算术平均值为3.2 MPa;加载速率为0.2 MPa/s时,算术平均值为3.46 MPa;加载速率为0.3 MPa/s时,算术平均值为3.95 MPa.

2.3 厚径比对岩石抗拉强度的影响

根据不同加载速率及厚径比下的试验结果,绘制应力应变曲线如图2所示.从图2应力应变曲线分析可知:各加载速率下的应力应变曲线特征表现大多表现为全应力应变5阶段:(1)微裂隙压密阶段;(2)弹性变形;(3)裂隙产生和扩展阶段;(4)裂隙发展到破裂阶段;(5)破裂后阶段.从微裂隙压密阶段加载到峰值阶段,应力应变曲线为一条近似光滑上凹的曲线,不存在应力跌落的情况,当试件到达峰值后,试件直接沿加载方向破裂,失去承载能力,各级加载条件下均未出现台阶式下跌的情况.峰后曲线表现为直线式下滑,这是线性集中载荷作用的结果.同时,同一加载速率下,抗拉强度均随厚径比增加而减小;同一厚径比下,加载速率的增加会增大岩石抗拉强度.在0.1 MPa/s时,各组试件的应变值差异较小,大多介于0.004~0.006之间;在0.2 MPa/s时,各组试件的应变值差异开始增大,由0.004~0.008;在0.3 MPa/s时,各组试件

的应变值差异进一步增大,由 0.002~0.007.因此,加载速率变化对试件应变值产生明显影响.

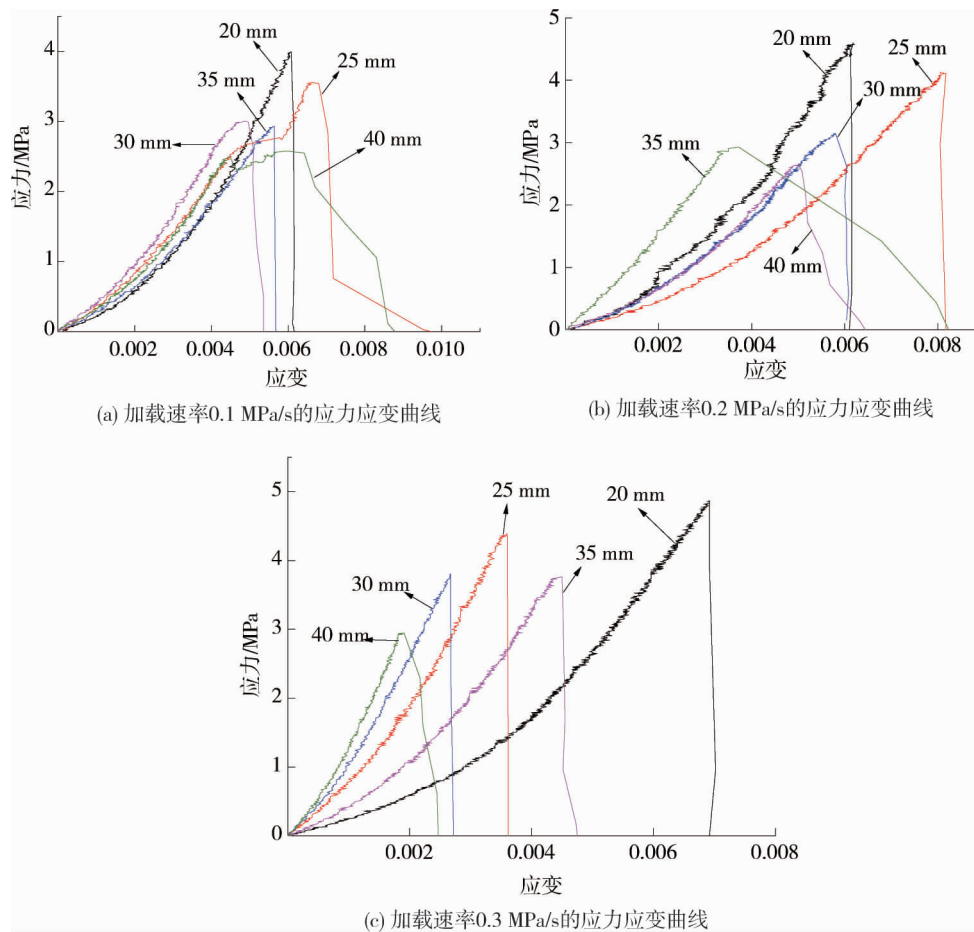


图2 应力应变曲线

为了进一步更加明显地研究厚径比对抗拉强度的影响,将加载速率分别为 0.1, 0.2, 0.3 MPa/s 的 3 组试件分别进行一次线性拟合.拟合曲线图如图 3,较好地反映试样随着厚度的增加抗拉强度总体呈衰减的趋势.加载速率为 0.1 MPa/s 时,试件抗拉强度的算术平均值为 3.2 MPa;加载速率为 0.2, 0.3 MPa/s 时,算术平均值为 3.46, 3.95 MPa.加载速率为 0.1 MPa/s 时,20 mm 下试样的抗拉强度为 4, 25, 30, 35, 40 mm 下的抗拉强度依次为 3.56, 3.00, 2.93, 2.58 MPa, 比 20 mm 下分别减小 11%, 25%, 26.7%, 35.5%.加载速率为 0.2 MPa/s 时,当厚径比从 0.4 变为 0.8 时,抗拉强度由 4.48 MPa 减至 2.65 MPa,变化量为 1.83 MPa,减幅为 40.8%;0.3 MPa/s 时,当厚径比 0.4 从变为 0.8 时,抗拉强度由 4.87 MPa 减至 2.95 MPa,变化量为 1.92 MPa,减幅为 39.4%,随着试样厚度的增加,抗拉强度总体呈衰减趋势.另一方面,由于试样厚度的增加,试样内部存在的孔隙和弱面也随之加大,试样受载时抗拉强度也会相应降低,说明了岩石的尺寸效应对不同厚径比茅口灰岩的抗拉强度有一定影响.表 2 为平板加载下抗拉强度与厚径比的拟合方程,拟合度分别为 0.93, 0.91, 0.93,拟合度较高.

表2 抗拉强度 σ_t 与厚径比 k 的拟合方程

加载速率/(MPa/s)	抗拉强度-厚径比拟合方程	拟合度
0.1	$\sigma_t = 5.3 - 3.47k$	0.93
0.2	$\sigma_t = 6.4 - 4.85k$	0.91
0.3	$\sigma_t = 6.64 - 4.47k$	0.93

2.4 加载速率对岩石抗拉强度的影响

加载速率会改变试件内部应力状态,影响其峰值强度,试件抗拉强度总体随加载速率增大而增大.不

同加载速率下的峰值强度应力散点图如图4所示。

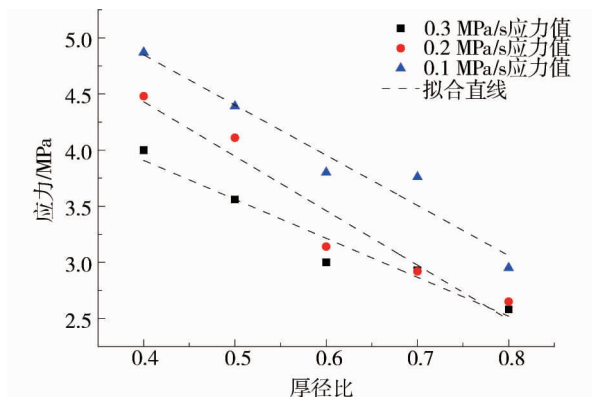


图3 加载拟合曲线

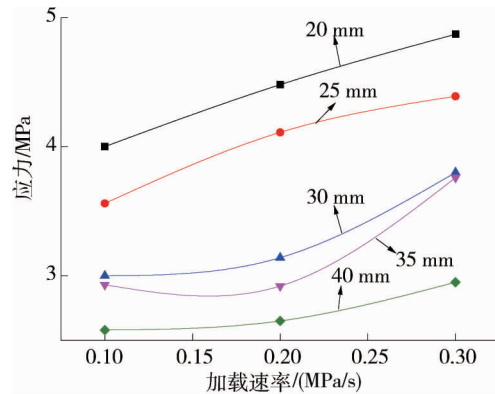


图4 不同加载速率下应力散点图

通过图4可分析得出:加载速率为0.1 MPa/s时,试件抗拉强度的算术平均值为3.2 MPa;加载速率为0.2 MPa/s时,试件抗拉强度的算术平均值为3.46 MPa;加载速率为0.3 MPa/s时,试件抗拉强度的算术平均值为3.95 MPa. 加载速率为0.1 MPa/s时,在厚径比为0.4,0.5,0.6,0.7,0.8时,抗拉强度分别为4.00,3.56,3.00,2.93,2.56 MPa;加载速率为0.2 MPa/s下的抗拉强度分别为0.1 MPa/s下抗拉强度的112%,115.4%,104.7%,99.6%,102.7%,较0.1 MPa/s下的抗拉强度略有提升;加载速率为0.3 MPa/s下的抗拉强度分别为0.2 MPa/s下抗拉强度的108.7%,106.8%,121%,128.8%,111.3%,比0.2 MPa/s下的抗拉强度进一步提升.但在0.2 MPa/s下厚径比为0.7时比0.1 MPa/s下试样的抗拉强度有所下降,结果存在一定的离散性.试件抗拉强度总体随加载速率增大而增大,0.2 MPa/s与0.3 MPa/s下的岩石平均抗拉强度分别比0.1 MPa/s下的岩石抗拉强度增大8.1%与23.4%.

根据理论与上述试验验证,加载速率对茅口灰岩抗拉强度值有一定影响,抗拉强度峰值随加载速率的提高而小幅增加.

3 数值模拟

3.1 模型建立与边界条件

为进一步验证圆盘劈裂试验的有效性,利用有限差分软件FLAC^{3D}对其进行数值模拟.首先在有限元软件ANSYS中将模型建好,再导入有限差分软件FLAC^{3D}中进行数值模拟.试样直径为50 mm,厚度分别为20,25,30,35,40 mm共5种,对应的厚径比分别为0.4,0.5,0.6,0.7,0.8这5种,体积模量为 2×10^8 Pa,剪切模量为 2×10^8 Pa,密度为 2.5 g/cm^3 .模型加载示意图如图5所示.

线荷载加载方向为Z轴负方向,上述所有试样的中心线均为X轴.所有模型的边界条件:模型底部与加载线对称的底边在Y,Z方向没有位移,该底边的重点在X方向也没有位移,线荷载所通过平面的所有节点在Y方向均无位移.

3.2 端面等效应力模拟结果

在三维条件下,试件内部的应力分布状况复杂,具体从哪一点起裂,由强度理论决定.对于茅口灰岩这类脆性材料,一般采用Griffith强度理论进行分析.基于Griffith强度理论的等效应力 σ_G ,其受参数的影响直接表征了该参数对圆柱体内应力分布的影响,如图6所示.Griffith准则的具体表现形式为

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

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

式中, σ_1 为第一主应力, σ_3 为第三主应力.

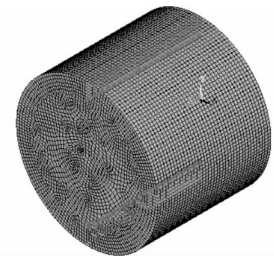


图5 模型加载示意图

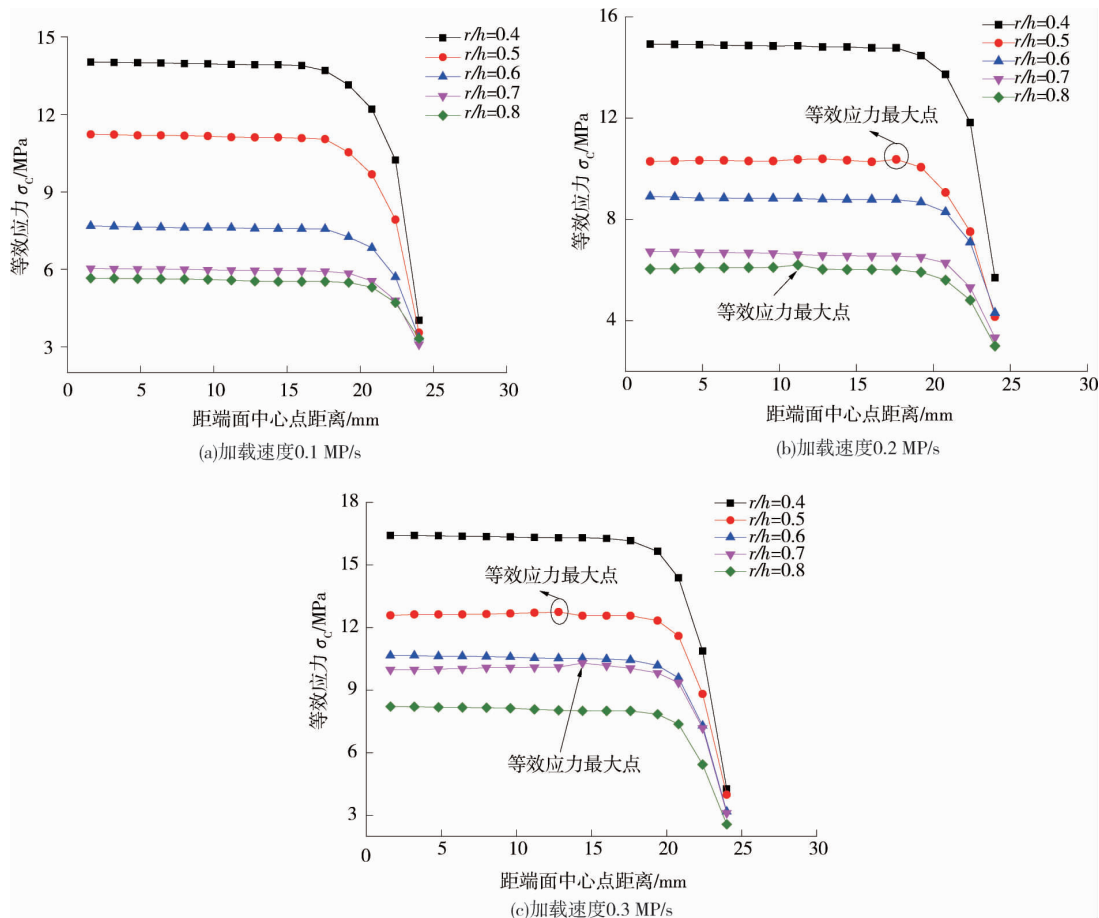


图6 等效应力分布图

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,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0.2 MP/s,厚径比 $r/h=0.5$ 和0.8时;以及加载速率0.3 MP/s,厚径比 $r/h=0.5$ 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0.1 MP/s时,0.4~0.8的厚径比时,试件端面加载点轴线上没有出现明显凸起点,且端面中心点处等效应力取得最大,又考虑到试件的破坏是从等效应力最大点处最先破裂,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.

3.3 抗拉强度修正公式

根据上述分析可知,试样的破坏最先起裂点是发生在圆盘试样的端面中心点,而不是圆盘内部中心点,如果采用基于平面应力假设的公式计算其抗拉强度得出结果会低于实际抗拉强度,故须对此进行修正.以试样端面中心点的等效应力 σ_c 与 σ_t (P 为临界荷载,即测试中的最大荷载)的比值 k^* 为修正系数,根据有限差分法结果计算得到 k^* 和厚径比 r/h 以及加载速率 v 的关系,进行曲面拟合.得到三维条件下巴西圆盘劈裂抗拉强度修正系数公式:

$$K^* = 0.40045 - 0.01714\left(\frac{r}{h}\right)^3 - 0.72064\left(\frac{r}{h}\right)^2 - 5.60611\left(\frac{r}{h}\right) + 1.23828v. \quad (8)$$

式中,加载速率的单位:MPa/s.

拟合曲面如图7所示,图中原点表示实际修正系数,拟合相关系数达到0.92304,式(9)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.得到修正后的抗拉强度为

$$\sigma_t = \left[0.40045 - 0.01714\left(\frac{r}{h}\right)^3 - 0.72064\left(\frac{r}{h}\right)^2 - 5.60611\left(\frac{r}{h}\right) + 1.23828v \right] \frac{2P}{\pi dt}. \quad (9)$$

为了进一步说明修正公式的有效性,选取一组 0.2 MPa/s 下的垫条加载数据代入式(9),各厚径比下修正前后的抗拉强度值如图 8 所示。

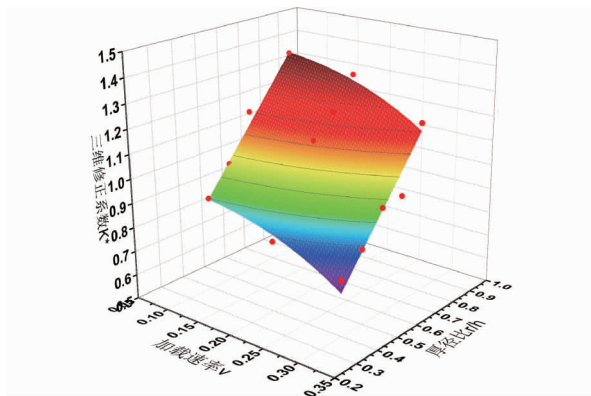


图7 三维修正系数 K^* 与厚径比 r/h 和加载速率的关系曲面拟合

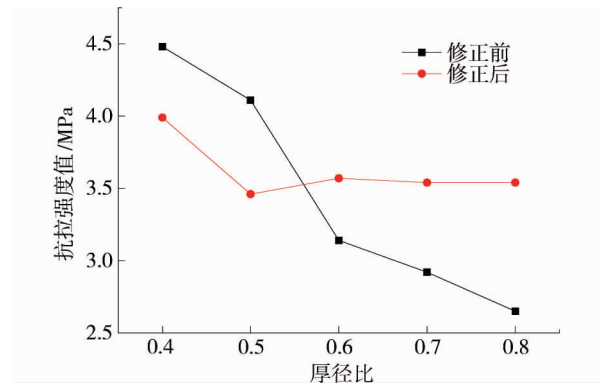


图8 垫条加载修正后抗拉强度值

从图 8 可知,修正前,厚径比为 0.4 下试样的抗拉强度为 4.48 MPa,0.5,0.6,0.7,0.8 下的抗拉强度依次为 4.11,3.14,2.92,2.65 MPa,比厚径比为 0.4 下分别减小 8.2%,29.9%,34.8%,40.8%。修正后,厚径比为 0.4 下试样的抗拉强度为 3.99 MPa,0.5,0.6,0.7,0.8 下的抗拉强度依次为 3.46,3.57,3.54,3.54 MPa,比厚径比为 0.4 下分别减小 13.3%,10.5%,11.3%,11.3%。修正后的岩石抗拉强度波动值约下降 30%,修正后的岩石抗拉强度值几乎不受厚径比的影响。

4 结论

- 1) 在相同的厚径比下,随加载速率的提高,岩石的抗拉强度小幅增加;当采用相同的加载速率时,茅口灰岩抗拉强度均随厚径比的增加而减小,存在一定的尺寸效应。
- 2) 圆盘轴线上端面中心点为水平应力最大值,即圆盘是由端面中心点开始起裂,随着加载速率增加,圆盘端面中心点水平拉应力增大,随着厚径比增加,圆盘端面中心点水平拉应力减小,与试验吻合较好。
- 3) 抗拉强度修正公式,可以消除厚径比及加载速率对岩石抗拉强度的影响。

参考文献:

- [1] 周述和.重庆松藻煤矿茅口灰岩岩溶水害与治理[J].中国煤田地质,2005,17(5):65-67.
- [2] He K Q, Yu Y J, Wang F. Overview of karst geo-environments and karst water resources in north and south China[J]. Environ Earth Sci, 2011,64:1865-1873.
- [3] 中华人民共和国水利部.水利水电工程岩石试验规程[M].北京:中国水利水电出版社,2001:32-33.
- [4] Guo H, Aziz N I, Schmidt L C. Rock fracture toughness determination by the Brazilian test[J]. Eng Geol, 1993,33(2):177-178.
- [5] 徐根,陈枫,肖建清.载荷接触条件对岩石抗拉强度的影响[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):168-173.
- [6] 杨同,王宝学,孙林,等.垫条方式对岩石劈裂试验的影响分析[J].勘察科学技术,2002(1):3-7.
- [7] 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.
- [8] 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,2005,25(12):1913-1916.
- [9] 喻勇.质疑岩石巴西圆盘拉伸强度试验[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1150-1157.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 吴绵拔.加载速率对岩石抗压和抗拉强度的影响[J].岩土工程学报,1982,4(2):97-106.
- [13] 席道英,谢瑞,张毅,等.加载速率对岩石力学性质及声发射率的影响[C]//中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会第四届全国岩石动力学学术会议,1994:19-23.
- [14] 吕志强.加载速率对煤岩抗拉强度参数影响程度研究[J].煤炭技术,2014,33(10):301-302.
- [15] 周辉,杨艳肖,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.