

老顶岩块端角摩擦系数和挤压系数实验研究^{*}

黄庆享, 石平五

(西安科技学院 采矿系, 陕西 西安 710054)

钱鸣高

(中国矿业大学 采矿系, 江苏 徐州 221008)

摘要: 通过岩块实验、相似模拟和计算模拟, 研究了采场老顶岩块端角摩擦和端角挤压特性。得出老顶岩块端角摩擦角为岩石残余摩擦角, 摩擦系数确定为 0.5; 端角挤压强度受弱面的影响明显且具有规律性, 端角挤压系数确定为 0.4。

关键词: 老顶岩块, 端角摩擦, 端角挤压

中图分类号: TV 223.1 文献标识码: A

作者简介: 黄庆享, 男, 32岁, 博士, 副教授, 现从事岩层控制方面的研究工作。

Experiment study on the coefficients of friction and inserting of main roof block corner

Huang Qingxiang, Shi Pingwu

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Qian Minggao

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract Through tests on rock block simulation of similarity of rock material and finite element calculation, the characteristics of friction and squeezing at main roof block corner are studied. It is found that the friction angle of main roof block corner is the residual friction angle, and the coefficient of friction is determined as 0.5. Weak planes have an obvious and regular effect on the squeezing strength of main roof block corner, and the coefficient of roof block corner is determined as 0.4.

Key Words main roof block, friction of block corner, inserting of block corner

1 引言

采场老顶结构稳定性判据中有两项重要参数, 即老顶关键块与前方岩体之间的端角摩擦系数 $\tan \varphi$ 和岩块间的端角挤压系数 η ^[1]。这两项参数的大小直接关系到顶板结构的稳定性及失稳形式的判定, 对采场顶板岩层控制的定量化分析至关重要。关于老顶岩块摩擦系数的确定, 目前还没有进行过专门的实验研究。文献[2]对老顶岩块端角挤压系数进行了初步研究, 发现了端角挤压强度小于标准试件单向抗压强度的重要现象, 研究只进行了连续介质试块的实验, 符合老顶岩块(岩体)特性的端角挤压机理及其参数还需要进一步实验确定。随着顶板控制由定性分析向定量分析的进展^[3], 有必要对这两项岩层控制中的关键参数进行系统的研究。

2 $\tan \varphi$ 的实验分析确定

采场老顶关键层破断后形成的岩块将在自重及载荷层作用下回转, 初次来压和周期来压都会存在这种状况。工作面上部岩块与前方岩体为端角接触状态,

实质上形成塑性三角接触区(图1)。端角挤压接触面高度 a 随老顶岩块回转挤压运动而增大, 其大小与老顶岩块厚度 h 、长度 l 和回转角 θ_1 有关, 见文献[1]。

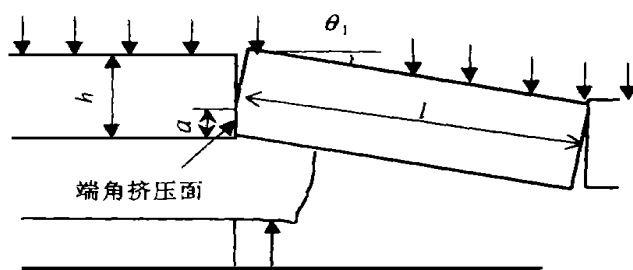


图1 老顶岩块的端角挤压
Fig. 1 Inserting of main roof block corner

老顶是自然破断的, 故岩块端角塑性挤压面是粗糙的, 岩块间的摩擦符合无充填粗糙面摩擦规律。由于岩块端角挤压接触面为极限挤压状态, 因此属于高应力限制法向位移的摩擦状态。Goodman(1980)的研究发现, 限制法向位移后剪应力没有应变软化现象, 残余强度与初始强度基本相同^[4]。挪威学者 Barton 的研究认为, 岩体粗糙摩擦面的摩擦角一般由摩擦面间的

收稿日期: 1999-03-21。

^{*} 陕西省自然科学基金(98D02)和煤炭高校青年科学基金(97-031)资助项目。

峰值剪胀角 d_n 、残余摩擦角 φ_b 和粗糙面突台强度 S_n 三部分组成^[5]。摩擦面上的剪应力 τ 与法向应力 σ_n 有如下关系:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + d_n + S_n) \tag{1}$$

上式是基于非风化、无充填节理条件推导出的,对采场老顶破断面间的摩擦分析比较适用。老顶岩块端角摩擦处于约束法向位移的极限应力状态,可以认为无应变软化现象,峰值剪胀角 d_n 不存在。在老顶回转和滑落运动中的端角摩擦为动摩擦状态,常规支护条件时端角挤压面的突台将被剪断, S_n 应取 0。由式(1),老顶岩块间的摩擦角为残余摩擦角,即

$$\tan \varphi = \tan \varphi_b = \frac{\sigma_n}{\tau} \tag{2}$$

我们对神府某矿顶板砂岩进行了摩擦系数专项实验,摩擦面面积为 5 cm×5 cm,得出的砂岩残余摩擦角如表 1 所示。实验发现,在法向应力比较小时,岩石干摩擦角小于湿摩擦角,随法向应力增大两种摩擦角接近相等。当法向应力接近岩石抗压强度(0.8 σ_c)时,干摩擦角略有增大,湿摩擦角减小。压应力最大的实验接近老顶岩块摩擦状态,则干、湿摩擦角分别为 32.6°和 28.4°,相差 4.2°。

表 1 平整砂岩粗糙面的残余摩擦角

摩擦角类别	法向应力 σ_n / kg				岩块摩擦角
	0.2 σ_c	0.4 σ_c	0.6 σ_c	0.8 σ_c	
干摩擦角/(°)	30.6	31.1	30.5	32.6	32.6
湿摩擦角/(°)	31.0	31.0	30.5	28.4	28.4

为了研究老顶岩体的摩擦角,采用相似模拟技术,按石英砂:石膏:云母粉为 9:1:0.1 的重量比,加 10% 的水配制岩体模拟试块,进行模拟岩体摩擦实验。摩擦面的尺寸分别为 5 cm×10 cm, 5 cm×5 cm, 5 cm×2.5 cm,结果表明,干、湿残余摩擦角分别为 35°和 31.7°。

国内学者通过大量研究给出的沉积岩平均干、湿

残余摩擦角分别为 32.7°和 30.7°,相差 2°^[5]。Barton 根据大量实验得出沉积岩的残余摩擦角一般为 25°~35°,并建议取 30°^[6]。

综合上述实验与分析,国内外对岩石残余摩擦角的实验研究数据比较一致,基本上在 25°~35°之间,多数情况下在 30°左右。湿环境条件下一般降低 2°~4°,可按 3°计。考虑到煤矿井下湿环境因素,老顶岩块间的摩擦角可取 22°~32°,平均 27°。因此,摩擦系数范围 0.4~0.6,一般可取 0.5。

3 η 的实验分析确定

老顶岩块回转过程中,将在接触端角挤压形成近似三角形塑性区,引起回转变形失稳。老顶岩块端角挤压系数是基于挤压端角在复杂应力状态下的强度小于岩石单向抗压强度的认识而提出的,即

$$\eta = \frac{\sigma_{nj}}{\sigma_c} \tag{3}$$

式中 η 为端角挤压系数; σ_{nj} 为端角挤压强度; σ_c 为岩石单向抗压强度。

由于老顶岩体在不同程度上存在天然节理裂隙等弱面,这些弱面对端角强度必然存在影响。鉴于过去没有进行考虑弱面影响的对比实验,研究是必要的。由于老顶端角挤压难以实测,因此实验测定为主要研究手段。为了提高研究的准确性和可靠性,采用了数值计算、岩块实验和相似模拟实验相结合的方法。

3.1 端角挤压的数值模拟

根据砌体梁结构模型,老顶岩块端角挤压面主要存在法向挤压力(老顶岩块的水平力)和摩擦力(剪切力),相应平面力学模型如图 2(a)所示。为了对比,还列出了仅设法向压应力的端角抗压和单向受压平面应变模型。

数值模拟采用美国 ALGOR 计算软件,以神府大柳塔矿 1 203 工作面老顶砂岩为原形,砂岩弹性模量 12 000 MPa,泊松比 0.21,内聚力 7.4 MPa,模拟老顶岩块厚度 8 m,取回转角 10°,端角挤压接触面高度 $a =$

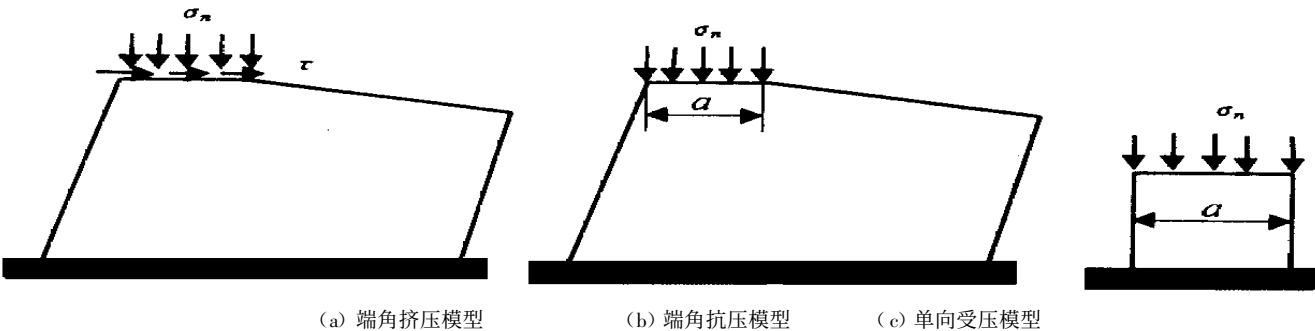


图 2 端角挤压对比模型

Fig. 2 The contrast model for squeezing at block corner

0.71 m。考虑到 $\tan \varphi = 0.5$, 模型(a)中按 $\tau = 0.5 \sigma_n$ 同步加载, 所有模型都采用分级加载, 梯度系数为 0.01 ~ 0.1。

采用工程中常用的 Drucker-Prager 准则判断岩石的破坏性, 由于 Tresca 应力分布与 Drucker-Prager 准则得出的岩体破坏程度分布形态类似, 分别给出了三种模型的 Tresca 应力分布(图 3)和破坏区分布(图 4)。由图 3 可

见, 端角挤压模型的端部应力最高; 端角抗压模型高应力区也集中于端部呈滑移线状, 但应力大小较前者小; 单向受压模型大范围内应力较小, 仅在边角有很小的高应力区。端角挤压在端角部有集中应力且处于压剪状态, 而单向受压则基本处于均匀受力状态, 端角抗压虽有应力集中却只受法向压力作用, 所以端角挤压模型必然最易破坏。

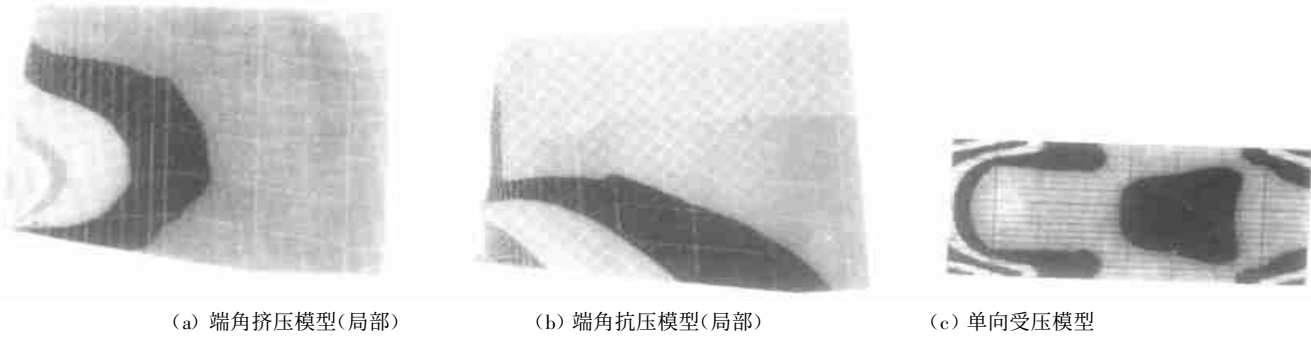


图 3 模型的 Tresca 应力分布

Fig. 3 The distribution of tresca stress in models



图 4 端角挤压破坏对比

Fig. 4 Contrast of squeezing failure at model corner

模型破坏推测在加载中得到证实(图 4), 单向受压模型破坏时的强度 $\sigma_c = 30$ MPa, 模型全部进入塑性状态; 端角抗压模型加载到 18.6 MPa 时出现破坏; 端角挤压模型中法向应力达 13.5 MPa 便出现破坏, 强度最小。模拟得出端角抗压强度为单向抗压强度的 0.62 倍, 端角挤压则为 0.45 倍。

3.2 端角抗压和端角挤压实验

将砂岩加工成厚 5 cm, 两直角边长为 10 cm 和 5 cm 的三角形岩样, 其角度分别为 30°, 60°, 90°。将端角加工

出 5 mm 宽的小平面, 共进行 3 组端角抗压实验, 每组每类岩样 3 ~ 5 个。实验发现, 90° 端角抗压破坏形态(图 5)与数值模拟结果极为相似(图 2(b)), 体现了模拟和实验的可靠性。结果表明, 30° 端角的抗压强度最小, 为单向抗压强度的 0.35 倍; 60° 端角的抗压强度为单向抗压强度的 0.42 倍; 90° 端角的抗压强度为单向抗压强度的 0.94 倍, 端角强度小于单向抗压强度。

90° 端角抗压实验情况与采场老顶岩块端角受力状况最接近, 其强度变化规律主要分两种情况, 岩性致密

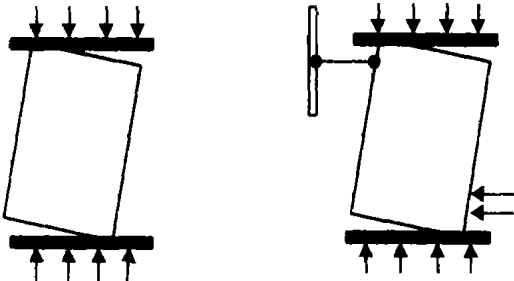


图 5 砂岩 90° 端角抗压破坏形态

Fig. 5 Compression failure configuration in the case of 90° corner angle of sandstone

连续性好的岩样端角强度较大, 有大于单向抗压强度的现象; 岩性连续性比较差, 单向抗压强度较低的岩样端角强度比较小, 说明岩体内的弱面对岩块端角强度的影响比较显著。

采用行之有效的模拟实验方法研究普遍含有弱面的岩体特性, 相似材料块的端角挤压实验分两个大类进行, 一类采用石英砂和石膏粉配制模拟试块, 模拟致密连续的块体; 另一类则再加云母粉模拟含弱面的岩体。为了减小误差, 端角实验模拟试块和单向抗压模拟试块取自同一个大模拟试块中。单向抗压实验为方柱体, 截面 5 cm×5 cm, 高 10 cm。端角挤压试块为长方体, 厚 5 cm, 边长为 10 cm 和 15 cm。实验分为端角抗压和端角挤压两种, 模拟老顶岩块回转角 10°, 端角挤压与数值模拟对应, 也按 0.5 倍正压力加水平力, 如图 6 所示。



(a) 端角抗压 (b) 端角挤压
图 6 模拟岩块端角挤压实验加载方式

Fig. 6 Simulation of loading form in squeezing tests at rockblock corner

表 2 模拟岩块端角抗压实验

Table 2 Simulation of compression tests for rock block corner					
模拟类型	重 量 比	实验组数	单向抗压强度 MPa	系 数	
	石英砂:石膏:云母粉			端角抗压	端角挤压
致密坚硬	7:1:0	3	0.70	0.87	0.69
低强度	9:1:0	3	0.42	0.67	0.41
含弱面	7:1:0.1	3	0.66	0.86	0.42
	7:1:0.3	3	0.57	0.79	0.36
平 均				0.77	0.40

实验结果如表 2 所示, 与砂岩实验一致的规律是连

续性好强度大的试块端角挤压和端角抗压系数都比较高。胶结物含量少(模拟内部空隙)或含云母粉(模拟弱面)的试块的端角抗压系数减小不大, 但其端角挤压系数却明显减小且数据离散性小, 为 0.36~0.42, 平均 0.4, 与数值模拟系数 0.45 比较接近。

4 结束语

- (1) 老顶结构中岩块间的摩擦处于限制法向位移的高应力状态, 没有应变软化, 岩块间的摩擦角为残余摩擦角。根据实验, 湿环境条件下, 老顶岩块间的摩擦角一般为 22°~32°, 平均 27°。摩擦系数一般可取 0.5。
- (2) 老顶岩块端角挤压为压剪复合受力状态, 端角应力分布和岩体的弱面是端角挤压强度小于岩石单向抗压强度的根本原因。根据实验, 老顶岩块端角挤压强度有比较明显的规律性, 端角挤压系数一般可取 0.4。
- (3) 将这两项重要参数修正为 0.5 和 0.4(以往按经验均取 0.3), 客观地反映了砌体梁结构存在的普遍性, 增大了利用围岩自承能力的范围。
- (4) 老顶岩块端角挤压系数和岩块间摩擦系数的实验分析确定, 为实现采场顶板控制的定量化分析奠定了基础。

参 考 文 献

1 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析 [J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557~563.
2 缪协兴. 采场老顶初次来压时的稳定性分析 [J]. 中国矿业大学学报, 1989, 18(3): 88~92.
3 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板控制研究: [博士学位论文] [D]. 徐州: 中国矿业大学, 1998.
4 布雷迪 B H G 等著, 冯树仁等译, 葛修润校. 地下采矿岩石力学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990. 88~103.
5 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒等. 地下工程围岩稳定分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
6 周维恒. 高等岩石力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. 29~33.