

DOI: 10.11779/CJGE201512003

含充填物的厚壁圆筒砂岩的力学性质研究

李夕兵, 吴秋红*, 董陇军, 陈璐, 谢晓锋, 张楚旋

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 基于单轴和常规三轴压缩试验, 采用完整试样、空心及铝棒充填的厚壁圆筒试样, 模拟研究支护对圆形巷道的强度、变形和破坏特征的影响。结果表明: 充填试样和完整试样的单轴压缩强度和弹性模量大致相同, 而厚壁圆筒试样的强度和弹性模量则偏低 31.8%和 22.4%; 厚壁圆筒试样三轴压缩时出现沿圆周层状破坏, 其剪切面积随着围压的增大而减少, 围压 40 MPa 时出现明显塌孔; 充填试样进入塑性屈服阶段后, 充填物才会对试样的力学性质产生明显影响; 充填物改变了孔道内部应力状态, 使孔道内壁由原来的二维应力状态恢复到三维应力状态, 抑制了孔道内壁的侧向变形, 防止自由面岩石的脱落; 岩石破坏并不代表承载能力消失, 充填试样岩石破坏后失去黏结力, 载荷主要通过充填物与岩石、岩石裂隙之间摩擦力共同承载。

关键词: 岩石力学; 厚壁圆筒; 非均匀应力; 开挖; 衬砌

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2015)12 - 2149 - 08

作者简介: 李夕兵(1962 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事采矿与岩土工程方面的教学与研究。E-mail: xbli@mail.csu.edu.cn.

Mechanical property of thick-walled hollow cylinders of sandstone with filling

LI Xi-bing, WU Qiu-hong, DONG Long-jun, CHEN Lu, XIE Xiao-feng, ZHANG Chu-xuan

(School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on uniaxial and pseudo-triaxial compression tests, the effect of support on the strength, deformation and failure characteristics of circular roadway is simulated by using solid specimens, thick-walled hollow cylinder specimens and thick wall cylinder specimens with aluminum rod. The tests indicate that: (1) The uniaxial compressive strength and elastic modulus of solid specimens and filled specimens are roughly the same, and those of the cylinder specimens are decreased by 31.8% and 22.4%; (2) When the thick-wall cylinder specimens have layered destruction along the circumference under triaxial compression, the shear area decreases with the increase of confining pressure, and collapse hole appears when the confining pressure is 40 MPa; (3) Filling have significant influence on mechanical properties of specimens when the filled specimens enter the plastic deformation, and it can change the rock stress state and make the two-dimensional stress state of inner wall back to the three-dimensional stress state; (4) Filling can cause inhibition of larger lateral displacement of inner wall and prevent the rock of free surface fall off; (5) Rock failure doesn't mean that the bearing capacity disappears, rock of filled specimens loses cohesive force, and the bearing capacity of filled specimens mainly depends on friction forces of filling and rock and rock fractures.

Key words: rock mechanics; thick-walled hollow cylinder; nonuniform stress; excavation; lining

0 引言

随着矿井进入深部开采, 井筒和巷道的受力变得十分复杂, 同时也带来了许多复杂的灾害现象: 分区破裂、岩块猛烈弹射、围岩大量片帮。因此, 采用合理的支护显得十分重要。

研究支护的手段有数值模拟、室内模型试验和施工现场动态监测原位试验等, 其中室内模型试验较为直观, 便于理解岩体失稳的力学机理。Wang^[1]采用一个相似材料模型用水压模拟不同支护强度对软岩巷道

围岩变形的影响, 不过该试验仅考虑围压的影响。目前室内研究围岩和支护的关系仅采用应力边界或者位移边界边界条件, 很少从混合边界条件角度来研究, 围岩与支护系统只有一根定向的支护曲线。

实际工程岩体中, 巷道常常受到轴向压力和围压

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272304, 11472311); 湖南省研究生科研创新基金项目(71380100005)

收稿日期: 2014 - 10 - 13

*通讯作者

的相互作用影响,围岩与支护的关系十分复杂。如果能在实验室采用工程岩石试样,既能模拟巷道开挖,又能考虑轴向压力的影响,在支护前确定合理的支护强度,并据此指导实际工程选择合适的支护形式及支护参数,这将是一项十分具有理论和应用价值的工作。

完整试样单轴压缩和常规三轴压缩试验不能满足地下工程中岩体处于复杂受力状态的影响。

厚壁圆筒用于模拟地下巷道的变形与破坏特征的试验研究已经有近 100 a 历史^[2-3],试验除了可控制轴压、围压和内压的大小,还可以加载扭转作用力^[4]。主要的研究方向如下。

(1) 研究空心厚壁圆筒试样的尺寸效应^[5-9],分析不同尺寸试样的强度和破坏形式。如 Elkadi 等^[6]研究了混凝土孔道试样,发现尺寸效应主要取决于试样结构形式和材料尺寸效应的组合。

(2) 模拟巷道开挖^[10-15],预测地下开挖对岩石特性的影响。Labouse 等^[11]采用厚壁圆筒试样研究核废料场开挖产生的影响,证实开挖需要适当考虑黏土层理面力学各向异性。

(3) 控制厚壁圆筒试样的轴压、围压和内压的大小,研究中间主应力、不同加卸载应力路径对试样影响^[16-20]。张后全等^[20]通过对大尺寸厚壁圆筒试样进行加卸载试验,研究了厚壁圆筒环状劈裂机理及相关力学行为。

(4) 研究厚壁圆筒试样的端部摩擦效应^[21-22]。郭保华^[22]使用 FLAC^{3D} 进行岩样尺度、孔道及端部摩擦效应的数值分析。

(5) 研究钻孔孔壁的稳定性,岩石的水压致裂,确定岩石的抗拉强度、地应力测量等问题^[23-25]。

尽管上述文献研究方法和目的不相同,但都只分析孔道的存在对岩石力学性质影响,没有采用厚壁圆筒试验模拟巷道围岩的变形、强度特征与支护材料之间的关系。

本文把完整岩石视为岩体,厚壁圆筒试样则相当于巷道开挖;采用直径 15 mm 的实心铝棒作为充填材料,与内径 16 mm 的厚壁圆筒砂岩试样组成的充填试样,通过在伺服试验机对 3 种试样进行单轴和不同围压下常规三轴压缩,模拟研究充填材料对圆形巷道的强度、变形和破坏特征的影响,为理解支护与围岩相互影响提供了一种途径。

1 试验准备

1.1 试样制备

试验用砂岩采自湖南省衡阳市,灰白色,主要矿物成分为石英、长石和白云母,无肉眼可见缺陷。首

先制备完整圆柱岩样($\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$),再以 $\phi 16\text{ mm}$ 的钻头在普通车床上钻取同心圆孔得到厚壁圆筒试样,最后采用实心铝棒($\phi 15\text{ mm}\times 95\text{ mm}$)充填孔道制备充填试样(图 1)。铝棒与试样接触面选用云石胶等拌合料进行粘结,其端部距试样端部约 2.5 mm。铝棒弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2.7 g/cm³。黏结剂的弹性模量为 2~5 GPa。



图 1 充填试样

Fig. 1 A filled specimen

用编号 A、B、C 分别代表完整试样、空心厚壁圆筒试样和充填试样。所有试样的端面不平度小于 0.05 mm。试样制备后在室内自然干燥 7 d。

1.2 试验设备和方法

采用 SAW-2000 微机控制电液伺服岩石试验机位移控制加载,单轴压缩时加载速率为 0.002 mm/s;常规三轴压缩时,轴向加载速率为 0.005 mm/s;围压分别选用 10, 20, 30, 40 MPa,加载速率为 0.5 MPa/s,先加围压至预定值,然后再加载轴压至岩样破坏。为了防止油液侵入岩块,采用橡胶套包裹。

2 试验结果

2.1 单轴压缩试验

图 2 为试样单轴压缩应力-应变曲线,表 1 给出相关参数。本文中杨氏模量 E 为峰值前应力-应变曲线中近似直线部分的斜率,厚壁圆筒试样和充填试样的强度是试样承受的最大载荷与有效承载横截面面积的比值,纵波波速是试样钻孔前测量的数据。

本次试验试样密度范围为 2125.5~2513.9 kg/m³,变异系数为 3.5%;波速范围为 3940.0~4761.9 m/s,变异系数为 5.2%。两者的变异系数较小,说明岩石的均质性较好。

从图 2 中可以看出,单轴压缩试样经历了压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段,完整试样压密阶段变形很大,表明试样内部本身存在裂隙,峰值后应力跌落很快,表现出明显的脆性特征。其中 A-3 试样弹性模

量变化较大, 这是因为砂岩属于典型的沉积岩, 其沉积环境和胶结物质的择优取向, 使内部弱面等微裂隙结构存在较大差异, 即使峰值强度相同, 变形破坏特征可能存在较大差异。

厚壁圆筒试样压密阶段变形大于完整试样, 而小于充填试样。因为充填物属于金属材料, 均质性好, 能够约束孔道内壁的侧向变形, 抑制自由面岩石的脱落。

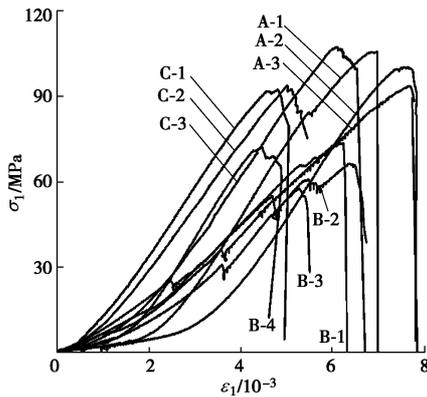


图 2 3 种试样的单轴压缩应力 - 应变曲线

Fig. 2 Uniaxial compression stress-strain curves of sandstone specimens

表 1 3 种试样单轴压缩试验结果

Table 1 Mechanical parameters of sandstone specimens

试样编号	ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	v_p /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	σ_1 /MPa	E /GPa
A-1	2398.0	4141.7	105.9	25.7
A-2	2416.6	4096.4	100.5	24.5
A-3	2488.6	4375.6	93.9	14.7
B-1	2461.8	4024.0	73.8	13.5
B-2	2457.3	4288.5	66.5	16.0
B-3	2422.6	4216.7	57.7	13.9
B-4	2385.5	4187.5	72.5	26.4
C-1	2392.0	4150.4	92.6	24.4
C-2	2374.5	3996.0	94.0	22.4
C-3	2370.9	4560.4	107.5	23.8

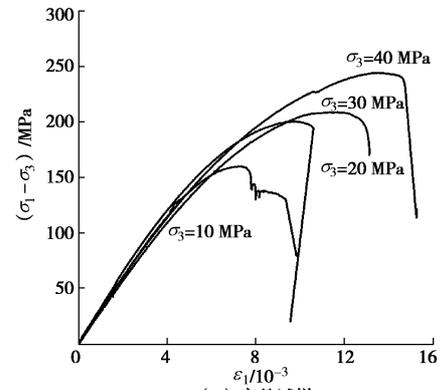
完整试样、厚壁圆筒试样、充填试样的平均强度分别为 100.1, 67.6, 98.0 MPa。完整试样和充填试样强度基本相同, 高于厚壁圆筒试样, 这是由于厚壁圆筒试样存在较大的自由面, 有助于岩石的局部变形和屈服而使强度降低, 厚壁圆筒试样单轴抗压强度偏低 31.8%。

文献[8]中采用 4 种不同内径的大理岩进行研究, 中晶大理岩孔道试样的单轴抗压强度与完整试样大致相同, 而本文结果圆筒试样与完整试样差别较大, 可能是砂岩弹性模量低于中晶大理岩, 孔道的存在使得砂岩更容易屈服。

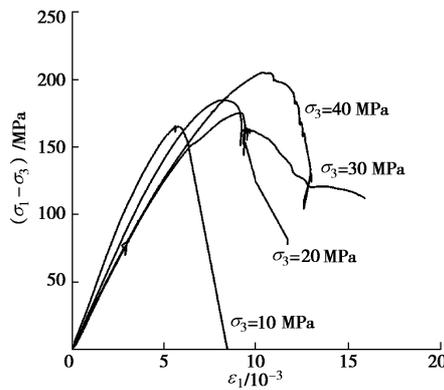
2.2 三轴压缩试验

图 3 为 3 种试样的轴向压缩主应力差 - 应变曲线。表 2 为 3 种试样常规三轴压缩试验结果。从图 3 (a)

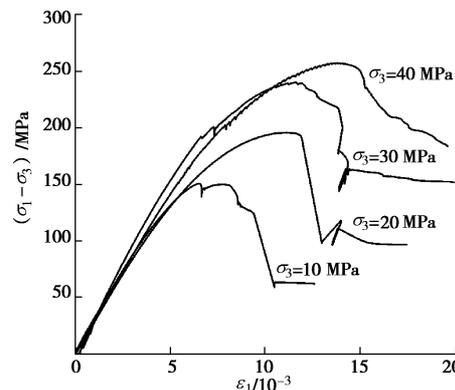
中可以看出, 完整试样的强度随着围压的增大而增大, 当围压大于 20 MPa 时, 主应力差 - 应变曲线出现屈服平台, 即试样塑性变形持续增加而承载力基本保持不变, 屈服变形过程中通过裂隙间摩擦力继续承载, 岩样的承载能力和屈服塑性变形随围压的增加而逐渐增大。



(a) 完整试样



(b) 厚壁圆筒试样



(c) 充填试样

图 3 3 种试样常规三轴压缩主应力差 - 应变曲线

Fig. 3 Triaxial compression stress-strain curves of sandstone specimens

图 3 (b) 为厚壁圆筒试样的轴向压缩主应力差 - 应变曲线。与完整试样相比, 围压 10 MPa 时, 厚壁圆筒试样达到峰值强度后应力急速跌落, 表现出明显脆性的破坏特征。最主要的差别是厚壁圆筒试样没有屈服平台, 承载能力随着变形的增大而降低, 这是由于孔道的存在造成试样的应力分布不均匀, 孔道内壁

的最小主应力较低,不能进入延性阶段,随着岩样变形的增大,内壁失去承载能力而破坏,且破坏断面逐渐扩大。

表 2 3 种试样常规三轴压缩试验结果

Table 2 Mechanical parameters of sandstone specimens

试样 编号	ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	v_p /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	E /GPa
A-4	2216.2	3940.0	10	170.6	27.5
A-5	2418.4	4141.7	20	220.9	27.9
A-6	2474.2	4114.1	30	239.3	28.3
A-7	2125.5	4761.9	40	284.8	29.0
B-5	2394.4	4635.0	10	175.9	22.7
B-6	2408.0	4150.0	20	205.2	22.1
B-7	2419.1	3980.0	30	205.6	21.4
B-8	2419.3	4214.1	40	245.7	21.9
C-5	2395.9	4170.8	10	160.9	28.1
C-6	2452.4	4048.0	20	216.2	28.2
C-7	2513.9	4451.9	30	270.7	29.5
C-8	2447.6	4072.0	40	297.8	29.0

充填试样的强度随着围压的增大而增大,跟前两种试样相比,试样达到峰值强度时没有出现屈服平台,但应力并没有急剧跌落,而是先进入弱化阶段,最后进入残余变形阶段,残余强度随着围压的增大而增大,如图 3 (c)。这可理解为试样从峰值后进行残余变形后,岩石产生了破坏,失去黏结力,但整个试样并没有失去承载能力,而充填物与岩石仍紧密黏结,试样载荷由充填物与岩石、岩石内部之间摩擦力共同承载。

3 试验结果分析

3.1 充填物对试样强度的影响

图 4 为试样围压与强度的关系。从图 4 中可以看出,单轴压缩时,厚壁圆筒试样的强度较小,说明大孔道的存在对试样的单轴抗压强度影响较大。

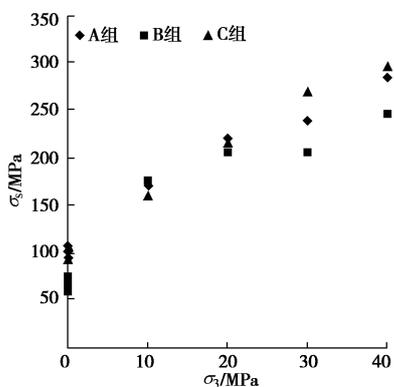


图 4 3 种试样强度与围压的关系

Fig. 4 Relation between strength and confining pressure of sandstone

围压为 20, 30, 40 MPa 时, 厚壁圆筒试样强度

低于完整试样,这是由于孔道的存在,先进行围压加载时,造成试样内部应力分布不均匀,然而试样总的轴向变形相同,相同围压加载时靠近孔道内壁的材料将先发生破坏,因而厚壁圆筒试样的强度低于完整试样。

岩石试样的承载能力由黏结和摩擦共同构成,试样整体发生剪切滑移破坏时,黏聚力逐渐消失,而摩擦力增大,孔道只是造成应力分布的不均匀。围压和轴向载荷引起的正压力和剪切力由整体力平衡确定,与岩样是否有孔道无关。而围压 10 MPa 时, B-5 的强度与完整试样差别不大,说明孔道对试样的强度影响不大。

充填试样与厚壁圆筒试样的有效承载面积相同,但强度却明显高于厚壁圆筒试样。

文献[8]中依据 Coulomb 强度准则得到圆筒试样的强度是一个偏低值,不满足线性关系,从图 4 中也可以看出,试样强度在围压 30, 40 MPa 时增长缓慢。

三轴压缩时,在不考虑端部摩擦的影响下,厚壁圆筒试样的内部力学状态可以用厚壁圆筒平面应力计算公式表示:

$$\sigma_r = \frac{P}{1-\eta^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{1-\eta^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

式中, P 为围压, $\eta = r_0/R$, r_0 为孔道半径, 8 mm, R 为试样半径, 取 25 mm, 以压应力为正。

比较式 (1)、(2), 发现径向应力明显小于切向应力。孔道试样的内壁处径向应力为 0, 切向应力为 $2.228P$, 处于二维应力状态, σ_r 随着 r 的增大而逐渐增大, 加入铝棒后, 改变了岩石的应力状态。充填物与岩石发生作用时, 会给岩石提供一个径向作用力, 使孔道内壁由原来的二维应力状态恢复到三维应力状态。同时, 两种材料分界面之间会产生摩擦, 形成抗剪阻力。

低围压时, 3 种试样的强度大致相同, 是由于孔道试样最小主应力差异较小, 强度不随最小主应力的降低而降低, 孔道对试样强度的影响不大, 铝棒提高充填试样强度的优势不明显。围压 30, 40 MPa 时, 孔道试样最小主应力差异较大, 强度明显偏低, 孔道对试样的影响较大。铝棒的加固作用显著, 充填试样的强度高于另外两种试样。

3.2 试样变形特征

图 5 为 3 种试样的平均模量与围压的关系, 0 MPa 时取单轴压缩的弹性模量的平均值。从图中可以看出, 单轴压缩时, 完整试样、厚壁圆筒试样、充填物试样弹性模量分别为 21.6, 17.5, 23.5 GPa, 完整试样和充

填试样弹性模量大致相同, 而厚壁圆筒试样的弹性模量偏低 22.4%。3 种试样的弹性模量随围压的影响变化不大, 但都高于其单轴压缩弹性模量。由于孔道的存在, 增加了岩石滑移的自由面, 圆筒试样的弹性模量明显低于其他两种试样。充填试样的弹性模量略高于完整试样, 这是因为铝棒的弹性模量比岩石高。

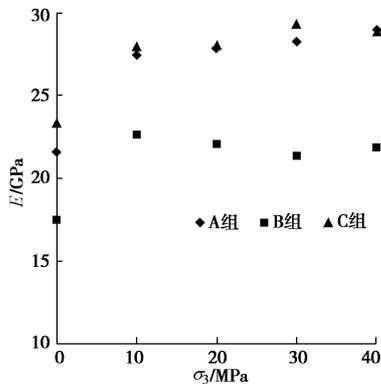


图 5 3 种试样平均模量与围压的关系

Fig. 5 Relation between average moduli of specimens and confining pressure

3.3 破坏形式

单轴压缩时, 3 种试样的破坏形式以剪切破坏为主, 但存在局部张拉破坏。图 6 为单轴压缩试样典型破坏形式, 厚壁圆筒试样 B-1 从内壁开始出现阶梯段剥离现象, 这也是由于孔道造成试样内部应力分布不均匀, 试样的主体仍为剪切-张拉的复合破坏。



图 6 单轴压缩典型破坏形式

Fig. 6 Failure modes of specimens in uniaxial compression

图 7 为 3 种试样三轴压缩时的破坏形式, 完整试样三轴压缩时均为单一剪切破坏, 破坏形式比较简单。

从图 7 (a) 中可以看出, 厚壁圆筒试样三轴压缩时为单一主控破坏面, 剪切面积随着围压的增大而减少。试样出现了不同程度阶梯段的剥离现象, 当围压为 10, 20 MPa 时, 出现剥离的痕迹, 但是孔道内壁岩石没有脱落, 当围压增至 30 MPa 时, 出现沿圆周层状破坏, 如图 7 (b)。围压为 40 MPa 时范围向轴压和径向扩大发展, 出现了明显的塌孔, 如图 7 (c)。说明厚壁圆筒试样在围压下, 试样的破坏从内部逐渐向外发展。

常规三轴压缩下, 厚壁圆筒试样相对完整试样内部多出一个自由面, 造成试样内部应力分布不均匀, 根据式 (1)、(2), 孔道内壁处径向应力为 0, 只有轴向应力和切向应力。加载轴压后, 最大主应力由径向逐步转为轴向, 孔道内壁只受轴向应力和切向应力作用, 然而试样总的轴向变形相同, 相同围压加载时靠近孔道内壁的材料将先发生破坏, 剩余部分继续承载, 直至整个试样屈服, 产生沿圆周层状破坏。

图 7 (d) 为充填试样的三轴破坏形式, 充填试样在围压 10, 20, 30 MPa 时, 破坏形式比较简单, 出现单一的剪切面, 但是岩石并没有脱落, 仍和充填物紧密黏结, 用破坏后的试样进行单轴压缩, 试样还能承受一定的载荷。



(a) 厚壁圆筒试样破坏形式



(b) B-7



(c) B-8



(d) 充填试样破坏形式

图 7 三轴压缩试样破坏形式

Fig. 7 Failure modes of specimens in triaxial compression

围压 40 MPa 时, 试样出现了 3 条“Y”型滑移线, 破坏后的试样可用手剥开, 呈圆锥体体形状, 如图 8 所示 (试样 C-8 破坏形式)。试样能明显看到有剪切滑移线, 但由于充填物和围压抑制作用, 试样破坏形式

发生改变,另外试样端部与试验机压头之间可能存在摩擦力,抑制试样的环向变形,而端部摩擦效应随着深度的增加而逐步减少。充填试样岩石破坏块度较大,而厚壁圆筒试样出现明显塌孔。



图8 C-8 破坏形式

Fig. 8 Failure mode of a filled specimen in triaxial compression

3.4 充填物对厚壁圆筒试样的支护机理

文献[25]研究不同内径厚壁圆筒砂岩试样不同轴压下的内压致裂试验,试验结果表明当试样的轴向应力低于单轴压缩强度的80%时,孔道试样在内压下拉伸破裂,轴压应力对孔道试样的内压破裂没有显著影响;轴向应力更高时,孔道内壁承载的拉应力明显降低。

这可理解为:充填试样轴向压缩过程中,在弹性变形阶段试样孔道直径是增加的,孔道内壁切向拉应变很小,且在试样内均匀分布,而岩石破坏需要有较大的局部变形,此时轴向应力对孔道内壁破裂影响较小,试样的强度和变形也不会随着充填物发生变化;试样进入塑性屈服阶段后,充填物才会对试样的力学性质产生明显影响。

充填物主要抑制孔道内壁的侧向变形,防止自由面岩石的脱落。厚壁圆筒试样由于没有充填物,孔道内部存在较大的自由面,有助于局部破坏的产生。

岩石破坏并不代表承载能力消失,从充填试样单轴和三轴压缩试样破坏形式来看,尽管充填试样出现明显的剪切滑移线,但是整个试样并没有失去承载能力,岩石仍能紧密附着在充填物上,用破坏后的试样进行单轴压缩,试样还能承受一定的载荷。充填试样破坏后承载能力主要依靠充填物与岩石、岩石裂隙之间摩擦力。

巷道开挖后,周边岩石应力重新分布,会产生应力集中,而自身能起支护作用的是围岩,从厚壁圆筒试样的强度来看,其强度随围压增大明显低于完整试样,巷道破坏形式越来越严重,高围压时会产生塌孔趋势,采取适当的支护方式是行之有效的办法,能最大限度地保持围岩固有强度,充分发挥其自承载能力。

随着矿井进入深部开采,井筒和巷道的受力相当复杂,其变形破坏变相当严重,维护也变得更加困难,地下岩体工程中应引起足够的重视,这些都需要大量的基础试验来证明。本文仅仅研究单一尺寸充填试样的力学性质,而岩石具有明显的非均质性和尺度效应^[26-28],地下岩体工程常常受到动静组合载荷的影响^[29-30],充填物对不同内径比和高径比岩石试样的影响仍需深入研究。

4 结 论

通过研究充填物对厚壁圆筒试样的强度、变形和破坏特征的影响,得出如下4点结论。

(1) 充填试样和完整试样的单轴压缩强度和弹性模量大致相同,而厚壁圆筒试样的强度和弹性模量则偏低31.8%和22.4%。

(2) 3种试样的单轴压缩破坏主要以剪切-张拉破坏为主,厚壁圆筒试样三轴压缩时出现沿圆周层状破坏,其剪切面积随着围压的增大而减少,围压为40 MPa时出现了明显的塌孔。充填试样三轴时岩石发生破坏,有明显滑移线,但并没有脱落,仍能具有一定的承载能力。

(3) 充填试样进入塑性屈服阶段后,充填物才会对试样的力学性质产生明显影响;充填物改变了孔道内部应力状态,使孔道内壁由原来的二维应力状态恢复到三维应力状态;抑制了孔道内壁岩石的较大侧向变形,防止自由面岩石的脱落。

(4) 岩石破坏并不代表承载能力消失,充填试样岩石破坏后失去黏结力,载荷主要通过充填物与岩石、岩石裂隙之间摩擦力共同来承载。

参考文献:

- [1] WANG C. The optimal support intensity for coal mine roadway tunnels in soft rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1155 - 1160.
- [2] ADAMS F D. An experimental contribution to the question of the depth of the zone of flow in the earth's crust[J]. *The Journal of Geology*, 1912, 20(2): 97 - 118.
- [3] KING L V. On the limiting strength of rocks under conditions of stress existing in the earth's interior[J]. *The Journal of Geology*, 1912, 20(2): 119 - 138.
- [4] TALESNICK M L, RINGEL M. Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(5): 627 - 639.

- [5] ENEVER J, WU B. Scale effects in hollow cylinder tests[C]// *Frontiers of Rock Mechanics and Sustainable Development in the 21st Century (2001 ISRM and 2nd ARMS)*. Netherlands: Balkema, 2001: 209 - 212.
- [6] ELKADI A S, VANMIER J G M. Experimental investigation of size effect in concrete fracture under multiaxial compression[J]. *International Journal of Fracture*, 2006, **140**(1/2/3/4): 55 - 71.
- [7] ELKADI A S, VANMIER J G M, SLUYS L J. Multiaxial failure of low-cohesive frictional materials: Fracture behaviour and size dependency[J]. *Philosophical Magazine*, 2006, **86**(21/22): 3137 - 3159.
- [8] 尤明庆, 苏承东, 缙 勇. 大理岩孔道试样的强度及变形特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(12): 2420 - 2429. (YOU Ming-qing, SU Cheng-dong, GOU Yong. Experimental study on strength and deformation properties of hollow cylindrical specimens of marbles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(12): 2420 - 2429. (in Chinese))
- [9] 缙 勇, 苏承东, 秦莞臻. 含孔道大理岩圆柱试样的尺寸效应[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, **24**(3): 302 - 305. (GOU Yong, SU Cheng-dong, QIN Guan-zhen. Scale effects of marble hollow cylinder specimen[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2007, **24**(3): 302 - 305. (in Chinese))
- [10] SANTARELLI F J, BROWN E T. Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989, **26**(5): 401 - 413.
- [11] LABIOUSE V, VIETOR T. Laboratory and in situ simulation tests of the excavation damaged zone around galleries in Opalinus clay[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, **47**(1): 57 - 70.
- [12] FRANCOIS B, LABIOUSE V, DIZIER A, et al. Hollow cylinder tests on boom clay: modelling of strain localization in the anisotropic excavation damaged zone[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, **47**(1): 71 - 86.
- [13] LABIOUSE V, SAUTHIER C, YOU S. Hollow cylinder simulation experiments of galleries in boom clay formation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, **47**(1): 43 - 55.
- [14] EWY R T, COOK N G W. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock I. Observations and analysis of deformations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1990, **27**(5): 387 - 407.
- [15] EWY R T, COOK N G W. Deformation and fracture around cylindrical openings in rock II. Initiation, growth and interaction of fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1990, **27**(5): 409 - 427.
- [16] HOSKINS E R. The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1969, **6**(1): 99 - 125.
- [17] ADDIS M A, WU B. The Role of the intermediate principal stress in wellbore stability studies: evidence from hollow cylinder tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, **30**(7): 1027 - 1030.
- [18] LEE D H, JUANG C H, LIN H M, et al. Mechanical behavior of Tien-liao mudstone in hollow cylinder tests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(3): 744 - 756.
- [19] LEE D H, JUANG C H, LIN H M. Yield surface of Mu-san sandstone by hollow cylinder tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, **35**(3): 205 - 216.
- [20] 张后全, 刘红岗, 贺永年, 等. 岩石厚壁圆筒三向压缩下的卸荷试验与岩石强度破坏[J]. *北京科技大学学报*, 2011, **33**(7): 800 - 805. (ZHANG Hou-quan, LIU Hong-gang, HE Yong-nian, et al. Unloading experiment and rock strength failure of rock thick-walled cylinders under triaxial compression[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, **33**(7): 800 - 805. (in Chinese))
- [21] BROWN E T, HUDSON J A, HARDY M P, et al. Controlled failure of hollow rock cylinders in uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics*, 1972, **4**(1): 1 - 24.
- [22] 郭保华. 岩样尺度、孔道及端部摩擦效应的数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(增刊 2): 59 - 64. (GUO Bao-hua. Numerical analysis of size scale, inner hole and end restraint effects of rock samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(S2): 59 - 64. (in Chinese))
- [23] MEIER T, RYBACKI E, REINICKE A, et al. Influence of borehole diameter on the formation of borehole breakouts in black shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, **62**: 74 - 85.
- [24] CHEN X, TAN C P, HABERFIELD C M. Numerical evaluation of the deformation behavior of thick-walled

- hollow cylinders of shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, **37**(6): 947 - 961.
- [25] 尤明庆, 苏承东. 砂岩孔道试样压拉应力下强度和破坏的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(6): 1096 - 1105. (YOU Ming-qing, SU Cheng-dong. Study on strength and failure of hollow cylinders and rings of sandstone under compression-tension stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(6): 1096 - 1105. (in Chinese))
- [26] 尤明庆, 邹友峰. 关于岩石非均质性与强度尺寸效应的讨论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, **19**(3): 391 - 395. (YOU Ming-qing, ZOU You-feng. Discussion on heterogeneity of rock material and size effect on specimen strength[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, **19**(3): 391 - 395. (in Chinese))
- [27] 董陇军, 李夕兵. 地下硐室节理岩体区间非概率可靠性分析方法及应用[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(7): 1007 - 1013. (DONG Long-jun, LI Xi-bing. Interval non-probabilistic reliability method for surrounding jointed rockmass stability of underground caverns[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(7): 1007 - 1013. (in Chinese))
- [28] 董陇军, 李夕兵. 岩石试验抗压、抗拉区间强度及代表值可信度研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(12): 1969 - 1974. (DONG Long-jun, LI Xi-bing. Study of interval parameters and credibility of representative value of rock tensile and compression strength tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(12): 1969 - 1974. (in Chinese))
- [29] LI X B, LOK T S, ZHAO J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, **37**(7): 1055 - 1060.
- [30] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, **45**(5): 739 - 748.

第 6 届亚太非饱和土学术会议在桂林召开

在国际土力学及岩土工程协会的非饱和土委员会(TC106)和中国土木工程学会土力学及岩土工程分会的指导下,由土力学及岩土工程分会非饱和土与特殊土专业委员会、桂林理工大学、中科院武汉岩土所、中国力学学会岩土力学专业委员会、国际土力学及岩土工程学会非饱和土专业委员会(TC106)和解放军后勤工程学院等6个单位承办的第6届亚太非饱和土学术会议(AP-UNSAT 2015)于2015年10月24日—26日在桂林召开,来自亚太地区和欧洲的14个国家的280多位学者出席了会议,国际土力学及岩土工程协会的非饱和土委员会(TC106)的两位前任主席—D.G. Fredlund(加拿大)和E.E. Alonso(西班牙)、现任主席D.G. Toll(英国)都全程参加了会议并向大会作主题报告,许多国际知名学者出席了会议,参加会议的研究生代表约占40%。

会议设主会场1个,分会场3个,历时2天半。大会报告包括7个主题报告(keynote lecture)和首个亚太地区杰出非饱

和土学术报告(the First Asia-Pacific distinguished lecture)。分会场报告共有10个特邀报告和96个学术报告,内容包括微观结构、应力-应变关系、本构模型、基本理论、持水特性、水力特性、蒸发和裂隙、黄土、膨胀土和膨润土、数值模拟和工程应用等11方面的内容。

会议出版了名为 *Unsaturated Soil Mechanics—from Theory to Practice* 的论文集,共收入141篇学术论文,由国际著名出版商CRC Press / Balkema (Taylor & Francis Group)正式出版。

本次会议为国内外学术交流提供了很好的平台,中国学者不仅向国际同行展示了自己的成果,而且掌握了非饱和土与特殊土领域当前的研究趋势,特别是让国内从事非饱和土力学研究的广大学子们开阔了眼界和思路,必将有力推动非饱和土力学在我国的发展。会议组织工作圆满,会议开得很成功,是一次名符其实的学术盛会,受到了出席会议的国内外专家和代表们的一致好评。

(陈正汉 供稿)