

# 双向压缩下含孔洞和加固圈类岩石材料强度特性实验

李阳, 赵延林\*, 程建超, 常乐, 谭涛

(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 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**利用 RYL-600 微机控制岩石剪切流变仪进行不同侧压下双向压缩试验,对含孔洞类岩石结构进行力学分析.试验结果表明:(1)试件在双向压缩条件下全应力-应变曲线分 4 个阶段:试件内部孔隙的闭合阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段、应力迅速下跌阶段;(2)在双向压缩下,试件的全应力-应变曲线表现出塑性-弹性-塑性体的性质,曲线大致呈 S 型;(3)在双向压缩下,同侧压下加固圈对试件的峰值强度有着较为明显的积极影响,同加固圈厚度不同侧压下试件的峰值强度会随着侧压的升高而升高;(4)同加固圈厚度下试件的峰值应变随侧压的增大而增大.同侧压下试件的峰值应变也随加固圈厚度的增大而增大.

**关键词:**双向压缩;含孔洞类岩石;应力应变曲线;峰值强度;峰值应变

**中图分类号:**TD315      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2020)02-0001-07

## Experimental Study on Strength Characteristics of Rock-like Materials with Holes and Reinforcement Rings Under Bidirectional Compression

Li Yang, Zhao Yanlin, Cheng Jianchao, Chang Le, Tan Tao

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
Work Safety Key Laboratory on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** RYL-600 microcomputer controlled rock shear rheometer is used to conduct the bidirectional compression tests under different lateral pressures, and mechanical analysis is carried out on rock structures with holes. The test results show that firstly, under the condition of bidirectional compression, the total stress-strain curve of the specimen can be divided into four stages, i.e. the closing stage of the pores inside the specimen, the elastic deformation stage, the plastic deformation stage, and the rapid stress decline stage. Secondly, under the bidirectional compression, the full stress-strain curve of the test piece shows the properties of plastic-elastic-plastic body, and the curve is roughly S-shaped. Thirdly, under the bidirectional compression, the same side pressure of the reinforcement ring has a more obvious positive effect on the peak strength of the specimen. The peak strength of the specimen with the same reinforcement ring thickness and different side pressure will increase with the increase of the side pressure. And lastly, the peak strain of the specimen under the same thickness of the reinforcement ring increases with the increase of lateral pressure. With the increase of the thickness of the reinforcement ring under the same pressure, the peak strain of the specimen also increases.

**Keywords:** bidirectional compression; rock-like materials with a hole; stress-strain curve; peak intensity; peak strain

收稿日期:2020-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774131);中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLCRSM16KF12);长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2017508/KY)

\*通信作者, E-mail: yanlin\_8@163.com

岩石是稳定的天然矿物集合体,经过长时间的地质构造作用后会以某种方式组合<sup>[1]</sup>.在岩石力学领域,从微观上讲,孔洞是不规则的天然孔,与流变耦合密切相关;从宏观上讲,是与人们生活有密切联系的规则孔,如隧道、地下硐室与防空洞等<sup>[2]</sup>.受外部载荷作用,内部缺陷(如孔洞和裂隙)很容易引起裂纹的发生、发展和渗透,从而对岩体造成局部破坏,进而影响整个工程的稳定性<sup>[3]</sup>.

国内外学者对含有孔洞类岩石的力学特性进行了试验研究.Lajtai等<sup>[4]</sup>通过多轴压缩试验,对岩石孔洞周围裂纹演化规律进行了研究,同时分析了围压对岩石破坏机制的影响.Fakhim<sup>[5]</sup>通过双轴压缩试验研究了预制圆形孔洞砂岩试样破坏过程的声发射特性.Janeiro和Einstein<sup>[6]</sup>对含有充填物的石膏试件进行了单轴压缩试验,研究了充填物与孔洞形状对类岩石材料力学特性的影响.

国内不少学者对含孔洞岩石进行了单轴压缩试验研究<sup>[7-9]</sup>,还有一些研究人员对含孔洞及裂隙岩石进行了动静荷载的研究<sup>[10-14]</sup>,与此同时,还有单轴抗拉试验<sup>[15]</sup>、局部荷载作用下的压缩试验<sup>[16]</sup>、循环荷载作用下压缩试验<sup>[17]</sup>.戎虎仁等<sup>[18]</sup>对不同孔洞半径大小的岩石试样进行了单轴压缩试验,从孔洞尺寸效应方面对岩石单轴压缩强度及破坏特征影响进行了研究.崔嘉慧等<sup>[19]</sup>对不同孔径类岩石材料进行单轴压缩试验,分析了不同孔径对岩石破坏模式和变形的影响.崔柔杰等<sup>[20]</sup>对双圆孔试样进行了抗压强度试验,分析了不同倾角裂隙、不同孔心距的双圆孔裂隙和围压对试件强度的影响.

综上所述,虽然国内外在含孔洞类岩石的力学特性研究方面取得了一些研究成果,但对双向压缩下孔洞类岩石的力学特性研究还缺乏完整的试验.本文针对含孔洞类岩石材料进行了双轴压缩试验,分析了侧压和支护对含孔洞类岩石试件的抗压性能和变形规律.

## 1 力学试验

### 1.1 试件制备

试件为中心预制规则圆形孔洞的立方体,孔洞直径为30 mm;试件中心孔洞由不同厚度铝管加固,可抑制孔周裂纹扩展.铝管加固圈各成分比例为Al:Si:Fe:Cu:Mn:Cr:Zn=98.36:0.47:0.30:0.08:0.07:0.62:0.01:0.09,其硬度和抗拉强度分别为13 HW,266 MPa.试件与定制模具如图1.为制作类岩石材料,准备河沙、水泥、水,并按质量比例 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{沙}}:m_{\text{水}}=26:25:10$ 配合,搅拌均匀制作水泥砂浆,将水泥砂浆浇入模具,然后振捣密实,24 h后脱模,放入标准养护室中养护28 d.

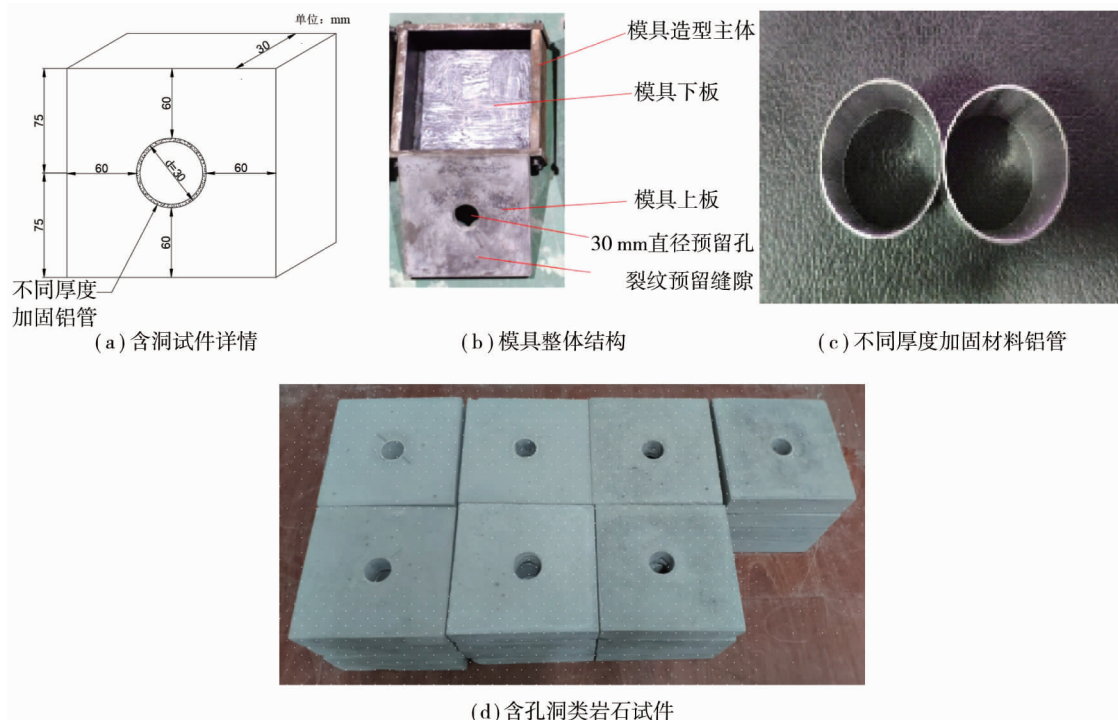


图1 含孔洞和加固圈类岩石材料试件与模具

## 1.2 试验装置

试验装置采用 RYL-600 岩石剪切流变仪(如图 2).该试验设备具有操作简单、稳定性好、实验精度高、控制能力强等特点,可以进行不同轴压、围压、孔隙压的岩石力学试验,能完成岩石流变试验、应力-渗流耦合试验和岩石弱结构面剪切试验,最大法向(垂直)施加荷载 600 kN,最大横向(剪切)施加荷载 400 kN,最大围压施加荷载 60 MPa,最大孔隙水压 50 MPa,试验施加荷载测量误差不大于 $\pm 0.001 0$ ,剪切变形测量误差不大于 $\pm 0.000 5$ .由于灰岩的单轴抗压强度不是特别高,该试验设备完全能满足试验要求,在试验过程中可以测试出基本力学和变形指标,可以粗略地绘制出应力-应变曲线.

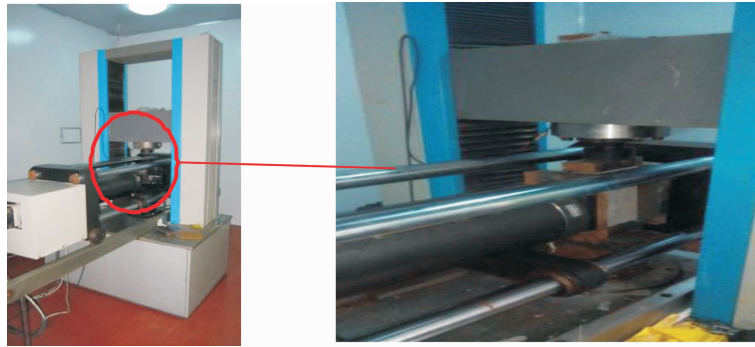


图2 RYL-600 岩石力学剪切流变仪

## 1.3 双轴压缩试验

利用 RYL-600 剪切流变仪进行双向压缩试验.实验前将试件按加固圈厚度分别为 0.0, 1.0, 1.5 mm 分为 3 组,每组再按侧压分别为 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 MPa 设置 4 个试件的编码,依次为 SN0-1~SN0-4, SN10-1~SN10-4, SN15-1~SN15-4. 试验时将试件放置于加载平台上,首先将轴向加载系统用位移控制至试件与加载压头几近接触,然后将轴向加载系统用负荷控制(负荷荷载为 1~3 kN)至试件与压头完全接触,再加载不同侧压.加载侧压时先将侧向加载系统用位移控制至试件与加载压头几近接触,然后将侧向加载系统用负荷控制至试件与压头完全接触,再以 0.01 MPa/s 的速率施加侧向应力.当侧压加载稳定后,轴向加载系统用位移控制并以 0.10 mm/min 的恒定加载速率加载,直至试件失稳破坏.

## 2 试验结果分析

### 2.1 应力-应变曲线分析

为了比较详细地描述含孔洞类岩石试件裂破坏情况,以 SN15-2 试件(即加固圈厚度为 1.5 mm,侧压 0.5 MPa)的全应力-应变曲线(见图 3)为例进行分析.

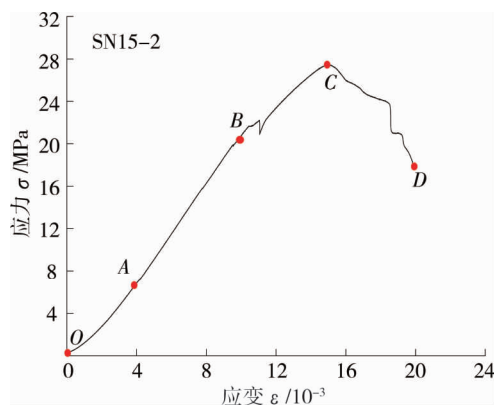


图3 SN15-2 试件的全应力-应变曲线

由图 3 可以看出该试件大致经历了 4 个阶段:内部孔隙的闭合阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段、应力迅速下跌阶段.

OA段为孔隙裂隙闭合阶段.该阶段是一个非线性变形阶段,未出现宏观裂纹.此时试件中原有的张开结构面或微小孔隙逐渐被压密,该阶段试件表现出轴向较强的塑性变形,横向变形较少.

AB段为弹性变形阶段.该阶段应力-应变曲线呈线性,出现微小宏观裂纹.这是试件在经过裂隙压密后,继续增加轴向应力,裂隙进一步被压密的同时体积也被压缩,试件出现弹性变形.

BC段为塑性变形阶段.该阶段应力-应变曲线从B点开始偏离直线,曲线表现为上凸形,试件出现非线性变形,并开始产生较多宏观裂纹且逐步扩展.该阶段试件体积由压缩转为扩容,轴向应变速率开始增大.随着轴向应力的增加,逐渐达到峰值强度点C.

CD段为应力迅速下跌阶段.轴向应力一旦达到试件的峰值强度,轴向应力立即大幅跌落,此时试件出现大量宏观裂纹,大致贯通整个试件,短一段时间后试件失稳破坏.

## 2.2 强度特性和变形特征分析

### 2.2.1 同加固圈不同侧压下全应力-应变曲线分析

根据收集的试验数据,绘制在相同加固圈不同侧压条件下试件的全应力-应变曲线如图4所示.

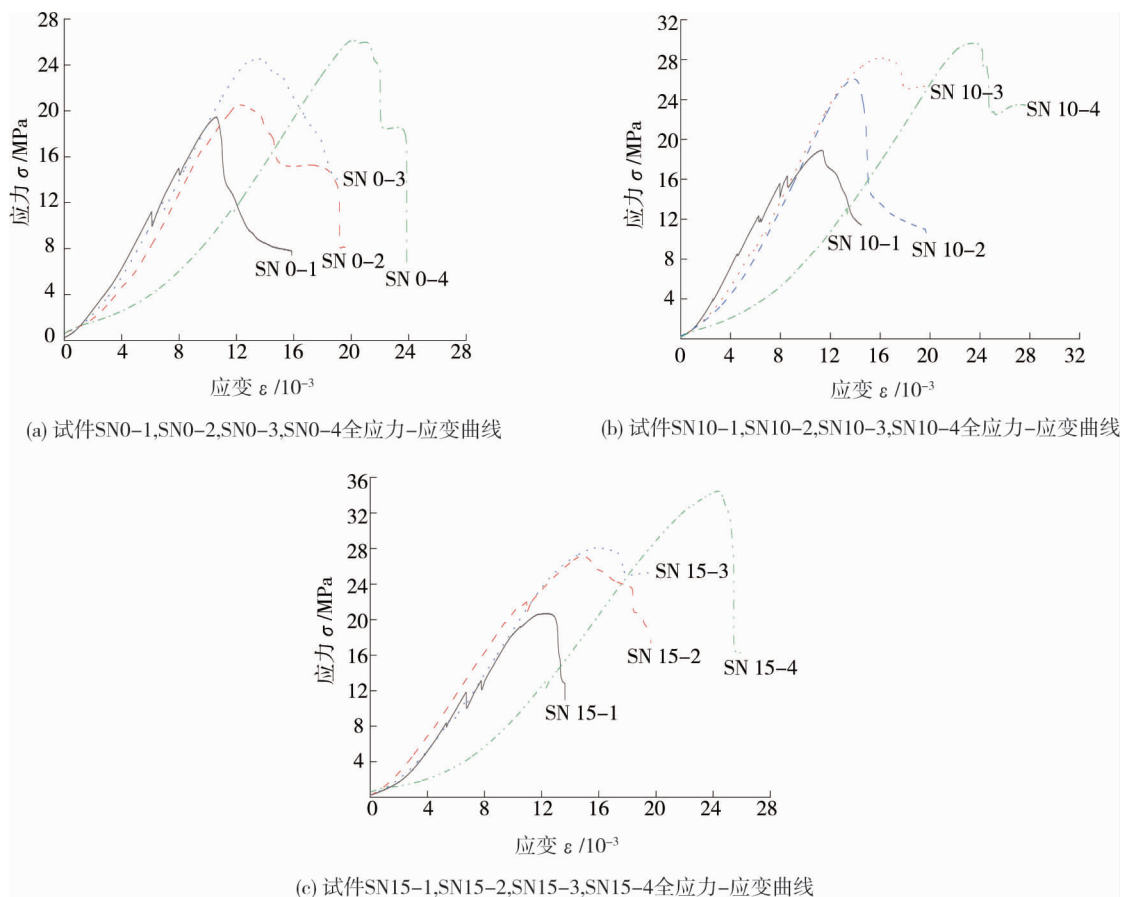


图4 同加固圈不同侧压下试件的全应力-应变曲线

由图4分析得知,在相同加固圈厚度的情况下,侧压为0.0,0.5和1.0 MPa时的应力-应变曲线形态在加载前中期比较接近,而侧压为1.5 MPa时试件应力-应变曲线形态上有相对较大的偏差.侧压为0.0 MPa时,明显发现各个试件应力-应变曲线在形态上极大的相似,其线弹性阶段较为陡峭,随着侧压的逐渐增大,试件应力-应变曲线在线弹性阶段逐渐变得相对平缓,这是由于侧压的增加,轴向应力加载使试件内部孔隙压密阶段时间稍微增加.特别地,侧压为1.5 MPa时的试件的应力-应变曲线表现出相对不太相似的孔隙压密阶段,不仅仅是时间长短的不一致,还表现在斜率的不一致.另外,试件的峰值强度与侧压联系密切,在双轴压缩下试件的轴向应力-应变曲线呈现塑性-弹性-塑性体的性质,曲线大致呈S型.

### 2.2.2 同加固圈厚度不同侧压对峰值强度和峰值应变的影响分析

根据收集的试验数据,整理同加固圈厚度不同侧压下试件峰值强度和峰值应变的数据见表1.并绘制

出同加固状态下峰值强度和峰值应变随侧压的变化曲线,分别见图 5 和图 6.

表 1 相同加固状态下侧压对试件峰值强度和峰值应变的影响

加固圈厚度 /mm	试件 编号	侧压 $\sigma_1$ /MPa	峰值强度 $\sigma_2$ /MPa	峰值强度 增幅/%	峰值应变 $\epsilon_1/10^{-3}$	峰值应变 增幅/%
0.0	SN0-1	0.0	19.78	-	10.80	-
	SN0-2	0.5	20.88	5.56	12.57	16.39
	SN0-3	1.0	24.95	26.14	13.80	27.78
	SN0-4	1.5	26.62	34.58	20.62	90.93
1.0	SN10-1	0.0	19.18	-	11.45	-
	SN10-2	0.5	23.32	21.58	13.75	20.09
	SN10-3	1.0	26.46	37.96	14.07	22.88
	SN10-4	1.5	30.11	56.99	23.89	108.65
1.5	SN15-1	0.0	21.06	-	12.57	-
	SN15-2	0.5	27.69	31.48	15.11	20.21
	SN15-3	1.0	28.62	35.90	16.27	29.44
	SN15-4	1.5	35.07	66.52	24.81	97.37

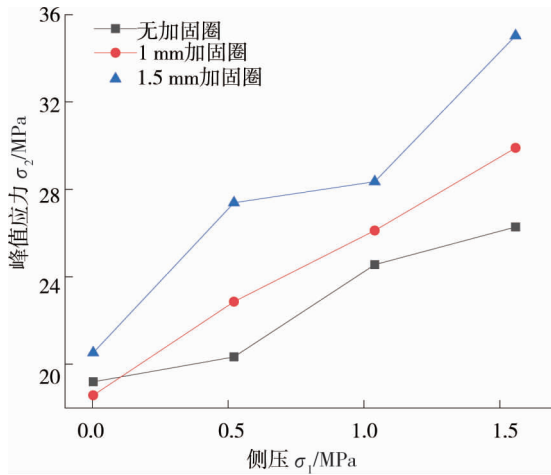


图 5 同加固圈厚度下峰值强度与侧压

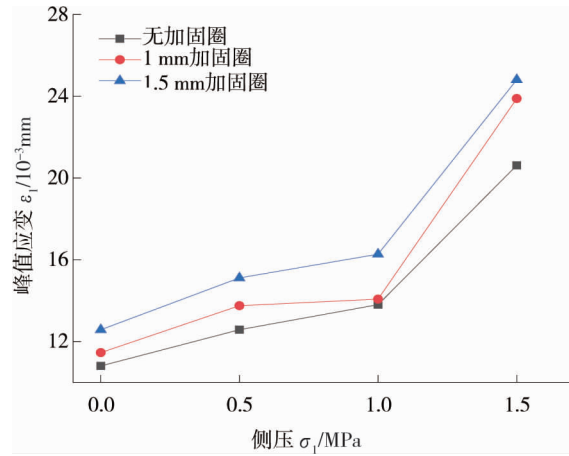


图 6 同加固圈下峰值应变与侧压

由表 1 和图 5 可以看出, 相较试件 SN0-1, 试件 SN0-2, SN0-3, SN0-4 的峰值强度增幅分别为 5.56%, 26.14% 和 34.58%; 试件 SN10-2, SN10-3 和 SN10-4 的峰值强度较 SN10-1 分别增大了 21.58%, 37.96% 和 56.99%; 试件 SN15-2, SN15-3, SN15-4 的峰值强度较 SN15-1 分别增大了 31.48%, 35.90% 和 66.52%. 由此得出同加固圈厚度下试件的峰值强度随着侧压的升高而升高.

峰值应变是指含孔洞和加固圈的类岩石试件达到峰值应力时所对应的应变, 是分析双向压缩状态下试件破坏变形特性的重要参数. 由表 1 和图 6 中看出, 相较试件 SN0-1, 试件 SN0-2, SN0-3, SN0-4 的峰值应变增幅分别为 16.39%, 27.78%, 90.93%; 试件 SN10-2, SN10-3 和 SN10-4 的峰值应变较 SN10-1 分别增大了 20.09%, 22.88% 和 108.65%; 试件 SN15-2, SN15-3, SN15-4 的峰值应变较 SN15-1 分别增大了 20.21%, 29.44% 和 97.37%. 试件的峰值应变范围为  $10.8 \times 10^{-3} \sim 24.81 \times 10^{-3}$ , 变化幅度较小, 同加固圈厚度下试件的峰值应变随侧压的增大而增大.

### 2.2.3 同侧压下不同加固圈厚度对峰值强度和峰值应变的影响分析

根据收集的试验数据, 整理在相同侧压不同加固圈厚度下试件的峰值强度和峰值应变的数据见表 2. 并绘制出同侧压状态下峰值强度和峰值应变随加固圈厚度的变化曲线, 分别见图 7 和图 8.

由表 2 和图 7 可以看出, 试件 SN10-1 和 SN15-1 的峰值强度较 SN0-1 分别增大了 -3.00%, 6.80%; 试件 SN10-2 和 SN15-2 的峰值强度较 SN0-2 分别增大了 11.69%, 32.61%; 试件 SN10-3 和 SN15-3 的峰值强度较 SN0-3 分别增大了 6.15%, 14.70%; 试件 SN10-4 和 SN15-4 的峰值强度较 SN0-4 分别增大了

13.11%, 31.74%. 由此得出同侧压下加固圈对试件峰值强度的增大有着较为明显的积极影响.

表2 相同侧压不同加固状态对试件峰值强度和峰值应变的影响

侧压 $\sigma_1$ /MPa	试件 编号	加固圈 厚度/mm	峰值强度 $\sigma_2$ /MPa	峰值强度 增幅/%	峰值应变 $\varepsilon_1/10^{-3}$	峰值应变 增幅/%
0.0	SN0-1	0.0	19.78	-	10.80	-
	SN10-1	1.0	19.18	-3.00	11.45	6.02
	SN15-1	1.5	21.06	6.80	12.57	16.64
0.5	SN0-2	0.0	20.88	-	12.59	-
	SN10-2	1.0	23.32	11.69	13.75	9.21
	SN15-2	1.5	27.69	32.61	15.11	20.02
1.0	SN0-3	0.0	24.95	-	13.80	-
	SN10-3	1.0	26.46	6.15	14.07	1.96
	SN15-3	1.5	28.62	14.70	16.27	17.90
1.5	SN0-4	0.0	26.62	-	20.62	-
	SN10-4	1.0	30.11	13.11	23.89	15.89
	SN15-4	1.5	35.07	31.74	24.81	20.32

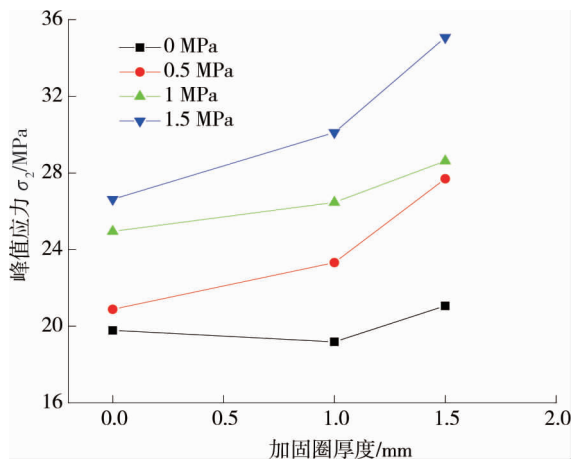


图7 同侧压下峰值强度与加固圈厚度

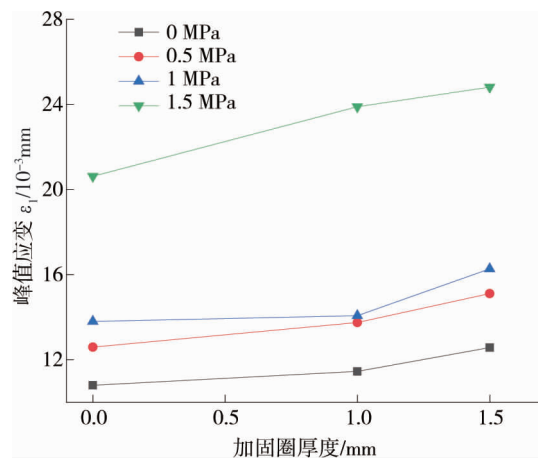


图8 同侧压下峰值应变与加固圈厚度

由表2和图8可以得出,试件SN10-1和SN15-1的峰值应变较SN0-1分别增大了6.02%,16.64%;试件SN10-2和SN15-2的峰值应变较SN0-2分别增大了9.21%,20.02%;试件SN10-3和SN15-3的峰值应变较SN0-3分别增大了1.96%,17.90%;试件SN10-4和SN15-4的峰值应变较SN0-4分别增大了15.89%,20.32%.由此发现不同的加固圈厚度可以通过支护来影响其应变特征,同侧压下试件的峰值应变随加固圈厚度的增大而增大.

综上分析发现,相同加固圈下侧压对试件峰值强度的增幅为5.56%~66.52%.相同侧压下加固圈对试件峰值强度的增幅为-3.00%~32.61%.由此可以得出,侧压对试件峰值强度增加的影响程度较大,加固圈厚度对其影响程度次之.

### 3 结论

1) 试件在双向压缩条件下全应力-应变曲线分4个阶段:试件内部孔隙的闭合阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段、应力迅速下跌阶段,其轴向应力-应变曲线表现出塑性-弹性-塑性体的性质,曲线大致呈S型.

2) 在双向压缩下,同侧压下试件的峰值强度随加固圈厚度的增大而升高,同加固圈厚度不同侧压下的试件的峰值强度会随着侧压的升高而升高.侧压对试件峰值强度增加的影响程度比加固圈厚度对其影响程度大.

3)同加固圈厚度下试件的峰值应变随侧压的增大而增大.同侧压下试件的峰值应变也随加固圈厚度的增大而增大.

#### 参考文献:

- [1] 蔡美峰,何满朝,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 林鹏.含裂纹与孔洞缺陷介质的脆性破坏行为[J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):283-1283.
- [3] 崔嘉慧.含孔洞类岩石材料力学特性试验与数值模拟研究[D].绍兴:绍兴文理学院,2019.
- [4] Lajtai E Z, Lajtai V N. The collapse of cavities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1975,12(4):81-86.
- [5] Fakhimi A, Carvalho F, Ishida T, et al. Simulation of failure around a circular opening in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002,39(4):507-515.
- [6] Janeiro R P, Einstein H H. Experimental study of the cracking behavior of specimens containing inclusions (under uniaxial compression) [J]. International Journal of Fracture, 2010,164(1):83-102.
- [7] 刘招伟,李元海.含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J].工程力学,2010,27(8):133-139.
- [8] 李地元,李夕兵,李春林,等.单轴压缩下含预制孔洞板状花岗岩试样力学响应的试验和数值研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1198-1206.
- [9] 徐士良.单轴压缩下含孔洞混合片麻岩破裂试验研究[J].工业建筑,2014,44(11):108-111.
- [10] 李地元,刘濛,韩震宇,等.含孔洞层状砂岩动态压缩力学特性试验研究[J].煤炭学报,2019,44(5):1349-1358.
- [11] 徐俊,祝方才,谭园辉.扰动荷载下单孔大理岩蠕变特性试验研究[J].湖南工业大学学报,2018,32(1):36-43.
- [12] 李地元,成腾蛟,周韬,等.冲击荷载作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):249-260.
- [13] 沙润东.动载下含孔洞岩石破坏机制的数值模拟研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [14] 李夕兵,翁磊,谢晓锋,等.动静荷载作用下含孔洞硬岩损伤演化的核磁共振特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):1985-1993.
- [15] 王伟浩,智忠辉,顾静宇,等.双孔洞倾角对红砂岩抗拉强度及破坏特征影响的试验研究[J].青海交通科技,2018(5):97-101.
- [16] 赵洪宝,胡桂林,张勉,等.局部荷载下含孔洞多孔介质裂纹扩展量化分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(2):312-320.
- [17] 胡盛斌,邓建,马春德,等.循环荷载作用下含缺陷岩石破坏特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2490-2495.
- [18] 戎虎仁,王海龙,王占盛,等.孔洞尺寸效应对岩石单轴压缩力学强度及破坏特征影响试验研究[J].铁道标准设计,2017,61(8):96-100.
- [19] 崔嘉慧,梁奇锋.孔径对岩石力学特性影响的试验及模拟分析[J].绍兴文理学院学报(自然科学),2019,39(3):38-45.
- [20] 崔柔杰,赵宇松,王永平,等.压缩条件下不完整试样破坏机理分析研究[J].矿业研究与开发,2019,39(11):84-90.