

方钢约束混凝土拱架补强机制研究及应用

王琦^{1,2)}✉, 于恒昌¹⁾, 江贝^{1,3)}, 章冲¹⁾, 李术才¹⁾, 何满潮²⁾, 孙会彬¹⁾, 秦乾¹⁾

1) 山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061 2) 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083

3) 济南大学土木建筑学院, 济南 250022

✉ 通信作者, E-mail: chinawangqi@163.com

摘要 方钢约束混凝土(SQCC)拱架作为复杂条件地下工程中的一种新型支护方式,具备很高的支护强度和后期承载能力,而拱架留设的灌浆孔因局部削弱和应力集中效应而成为拱架的关键破坏部位,对拱架整体承载能力具有很大的影响,需对灌浆孔进行补强处理以提高拱架开孔后的整体强度.针对SQCC开孔短柱进行室内试验及数值试验,对比分析短柱变形破坏形态、荷载位移曲线及极限承载力等力学性能,研究方钢约束混凝土拱架补强机制;建立约束混凝土强度及经济指标,综合对比短柱补强效果.以SQCC150×8短柱为例,留设灌浆孔后短柱极限承载力相比SQCC短柱降低29.9%;侧弯钢板补强(ASS)后短柱的强度指标达148.7%,经济指标为90.8%,补强效果最好,且补强钢板长度在180~240mm范围内,厚度为8mm时,侧弯钢板对灌浆孔补强效果最明显,经济指标增长率最大.侧弯钢板补强试验结果在全比尺拱架室内试验中得到充分验证,在现场巷道支护应用中效果良好,研究成果为约束混凝土支护设计提供了依据.

关键词 方钢约束混凝土;灌浆孔;补强机制;全比尺力学试验;现场应用

分类号 TD353+.2

Study and application of strengthening mechanism of square confined concrete arch with grouting holes

WANG Qi^{1,2)}✉, YU Heng-chang¹⁾, JIANG Bei^{1,3)}, ZHANG Chong¹⁾, LI Shu-cai¹⁾, HE Man-chao²⁾, SUN Hui-bin¹⁾, QIN Qian¹⁾

1) Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China

2) StateKey Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

3) School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China

✉ Corresponding author, E-mail: chinawangqi@163.com

ABSTRACT The new support way-square confined concrete (SQCC) arch in complex-condition underground engineering applications has higher supporting strength and post-bearing capacity. The grouting holes become key parts of the arch with local weakening and stress concentration effects and greatly influence the bearing capacity of the whole arch. As such, it is necessary to reinforce this area. In laboratory tests and numerical experiments on SQCC test specimens with grouting holes, the strengthening mechanism was investigated by comparative analysis of the mechanical properties, including the deformation and failure patterns, load displacement curve, and ultimate bearing capacity. To compare the different reinforcing effects, strength and economic indexes were established. The results show the ultimate bearing capacity of a short column with grouting holes to be reduced by 29.9% compared to the SQCC short column. In a case study of the SQCC150×8 short column, the reinforcement method using two-angle steel exhibited better reinforcing effect, improving both the strength and economic indexes of short columns up to 148.7% and 90.8%, respectively. When the

收稿日期: 2016-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674154,51474095); 中国博士后科学基金特别资助项目(2017T100116,2017T100491); 中国博士后科学基金面上资助项目(2016M602144,2016M590150); 国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC0600901); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLG201601519)

length of the reinforcement plate ranges from 180–240 mm and the plate thickness is 8 mm, the reinforcement effect is best, and the economic index also reaches its peak value. Moreover, the angle steel strengthening (ASS) experiments was conducted in a full-scale laboratory test. The application of SQCC arches in roadway supports has a good effect, and these research results provide a basis for the design of confined concrete support.

KEY WORDS square confined concrete; grouting holes; strengthening mechanism; full-scale mechanical test; field application

随着煤矿开采埋深的不断增加,极软岩、高应力、断层破碎带等因素造成深部巷道面临前所未有的支护难度^[1-9]. 针对复杂条件下的巷道围岩控制难题,国内外学者通过研究提出了多种支护形式,其中 U 型钢联合支护技术的推广应用最为广泛^[10-12]. 但随着巷道围岩条件的复杂化,常规的 U 型钢拱架支护常表现出支护强度不足、工作阻力低、不能定量让压等问题,其承载能力及经济性还需进一步提高^[13-14].

方钢约束混凝土(以下简称 SQCC)拱架因钢管壁的约束作用使核心混凝土处于三向受压状态,提高混凝土的抗压强度;核心混凝土的存在可有效地防止钢管局部屈曲,改善钢管的刚度. 钢管和核心混凝土产生“力的共生”作用,使拱架整体承载力远高于相应的钢管柱承载力和混凝土柱承载力之和,具有较高的支护强度和后期承载能力. 目前约束混凝土技术因其良好的力学性能和经济性已广泛应用于地上工程中,并逐渐开始被应用于地下工程支护中. 笔者研发的方钢约束混凝土支护体系在龙口矿区极软岩巷道、巨野矿区千米深井巷道等处进行了大量应用,能有效控制复杂条件巷道变形破坏^[15-20].

约束混凝土支护体系为进行井下混凝土灌注需要在拱架上留设灌浆孔,而开孔的钢管壁因局部削弱和应力集中效应使灌浆孔成为关键破坏部位,降低了拱架的整体承载能力,必须进行灌浆孔补强以保证拱架的整体强度^[21-23].

目前,国内外还没有方钢约束混凝土拱架灌浆孔补强机制相关方面的研究,本文为研究不同灌浆孔补强措施下拱架的力学性能,设计了三种灌浆孔补强方式进行短柱轴压试验,并通过 ABAQUS 数值软件进行模拟验证,研究不同补强措施下短柱的关键破坏部位、变形破坏形态、荷载位移曲线以及极限承载力等力学特性,结合补强后短柱的强度及经济指标,综合对比得到 SQCC 短柱灌浆孔的最优补强措施,最终通过拱架全比尺室内试验和现场支护应用进行验证.

1 短柱轴压试验

SQCC 拱架是一种新型的高强支护方式,为了明确 SQCC 短柱以及留设灌浆孔短柱的力学性能及承载力变化规律,进行留设与不留设灌浆孔短柱室内轴压试验,并通过 ABAQUS 软件进行数值试验,明确短柱破坏形态与力学性能,同时对比室内试验及数值试验

结果,验证数值试验的正确性.

1.1 试验概况

1.1.1 室内试验概况

室内短柱轴压试验在山东大学结构实验室 1000 t 压力机上进行,如图 1 所示. 试验过程中短柱试件与压力加载装置几何对中,并采用分级加载的方式对试件进行加载. 试件沿纵向设置两个位移计,通过位移监测系统测定试件的纵向变形.

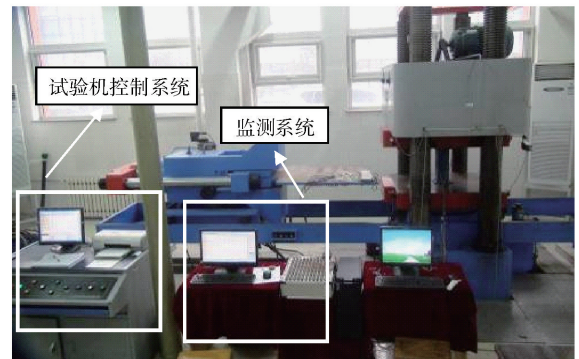


图 1 加载及监测系统

Fig. 1 Load and monitoring systems

1.1.2 数值试验概况

室内试验成本高、周期长,且采集数据有限. 本文在室内试验研究的基础上,利用 ABAQUS 数值模拟软件进行短柱轴压数值模拟,通过数值与室内试验的结果对比分析,验证数值模型及材料参数的合理性,并对室内试验不能有效分析的试验情况进行补充研究.

(1) 钢材本构关系.

约束混凝土构件中方钢管常采用薄钢板冷弯制成,期间弯角处钢板因塑性变形常导致钢材出现强化和硬化现象. 通过对常规钢材拉伸试验所得数据进行加权计算,得出了方钢管钢材应力-应变($\sigma-\varepsilon$)关系曲线如图 2 所示. 其中:屈服强度 f_y 为 409 MPa,极限强度 f_u 为 594 MPa,弹模 E_s 为 2.04 GPa.

(2) 混凝土本构关系^[24].

考虑钢管约束效应系数对核心混凝土的影响,本文混凝土采用适用于 ABAQUS 的核心混凝土塑性损伤模型,其应力-应变关系为:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & (x \leq 1); \\ \frac{x}{\beta_0 (x-1)^\eta + x}, & (x > 1). \end{cases} \quad (1)$$

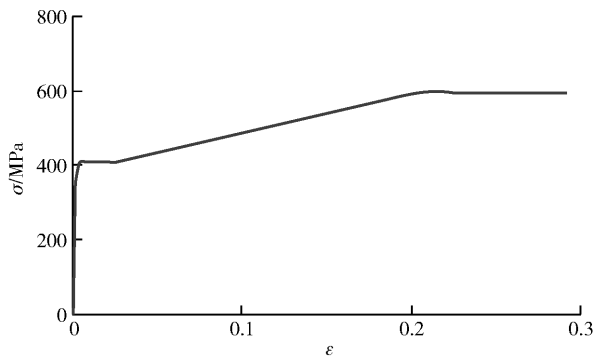
图2 加权后 σ - ε 关系曲线

Fig.2 Curves of weighted stress-strain

式中, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$, $\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$, $\eta = 1.6 +$

$$1.5/x, \varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6}, \beta_0 = \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.2 \sqrt{1+\xi}}$$

其中, f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, ξ 为约束效应系数, 以上各式中混凝土的抗压强度单位为 MPa.

1.2 试验方案设计

短柱轴压试验设计了两类试件, 第一类为普通 SQCC 短柱, 第二类为留设灌浆孔 (GH-grouting holes) SQCC 短柱. “SQCC150 × 8”、“SQCC150 × 8-GH” 分别表示方钢约束混凝土试件与留设灌浆孔约束混凝土试件边长为 150 mm, 厚度为 8 mm. 设计试件高度为 3 倍的方钢管边长, 即取 450 mm; 灌浆孔直径 80 mm, 孔心距离短柱底端 225 mm, 短柱试件参数如图 3 所示.

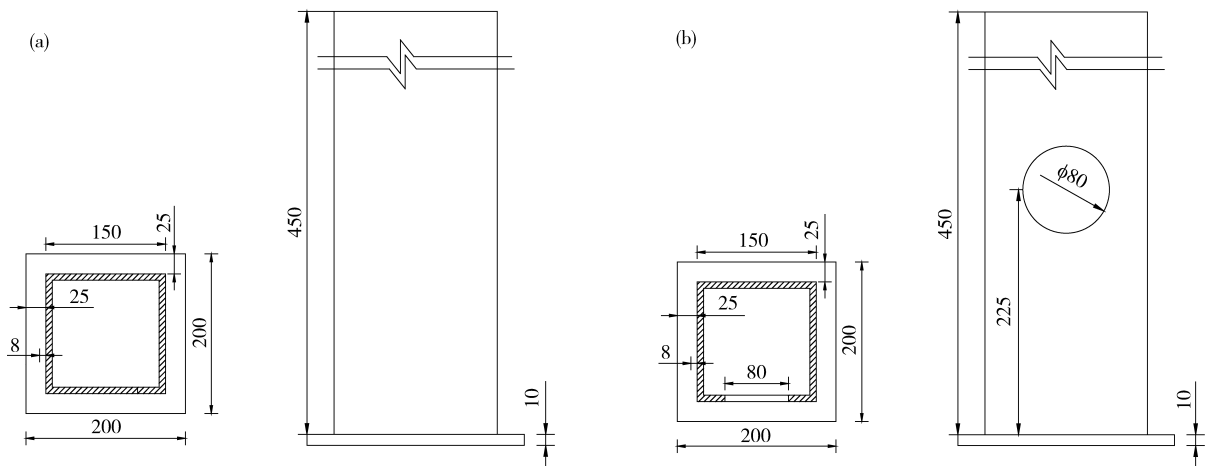


图3 短柱尺寸图(单位:mm). (a) SQCC150 × 8; (b) SQCC150 × 8-GH

Fig.3 Short column sizes (unit: mm): (a) SQCC150 × 8; (b) SQCC150 × 8-GH

1.3 试验结果分析

通过研究短柱轴压试验全过程, 对比分析两类短柱变形破坏形态及力学性能, 明确灌浆孔对试件的削弱作用, 同时验证数值试验模型及参数的合理性, 为进一步开展短柱试件关键部位补强数值试验奠定基础.

1.3.1 破坏形态分析

部分试件典型破坏形态如图 4 所示, 对比分析两种短柱受压失稳后的变形破坏形态.

(1) 普通 SQCC 短柱呈现出腰鼓型的破坏形态. 短柱试件在初期加载时无明显的变形特征, 随着荷载的增加, 局部钢管壁开始出现剪切滑移线; 持续加载至极限荷载的 70% 左右时, 试件表面出现了较为明显的屈曲波波峰; 继续加载, 短柱变形破坏.

(2) 留设灌浆孔后, 短柱呈现出明显的多折腰鼓型破坏形态. 试验过程中, 随着荷载的增加灌浆孔及附近位置开始出现应力集中现象, 短柱开孔处率先压扁破坏; 继续加载, 短柱产生了明显的屈曲波波峰, 继而失稳破坏.

1.3.2 荷载-位移曲线分析

图 5 为试件室内试验与数值试验的荷载-位移对比曲线, 其中图 5(a) 为 SQCC 常规短柱荷载-位移对比曲线, 图 5(b) 为 SQCC 开孔短柱的荷载-位移对比曲线.

分析可知:

① SQCC 及其开孔短柱的室内试验与数值试验曲线具有很好的一致性, 且不同短柱的荷载-位移曲线趋势相似, 均经历了弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和稳定阶段.

② 与普通 SQCC 短柱相比, 短柱留设灌浆孔后, 其屈服强度和极限承载力等都有较大程度的下降.

1.3.3 承载力对比分析

表 1 为两种短柱的室内和数值试验极限承载力结果对比, 分析可知:

① 对比两种短柱的数值试验与室内试验结果, 极限承载力的差异率最大仅为 2.1%, 试验结果基本保持一致, 证明了数值试验所建模型、材料参数以及荷载

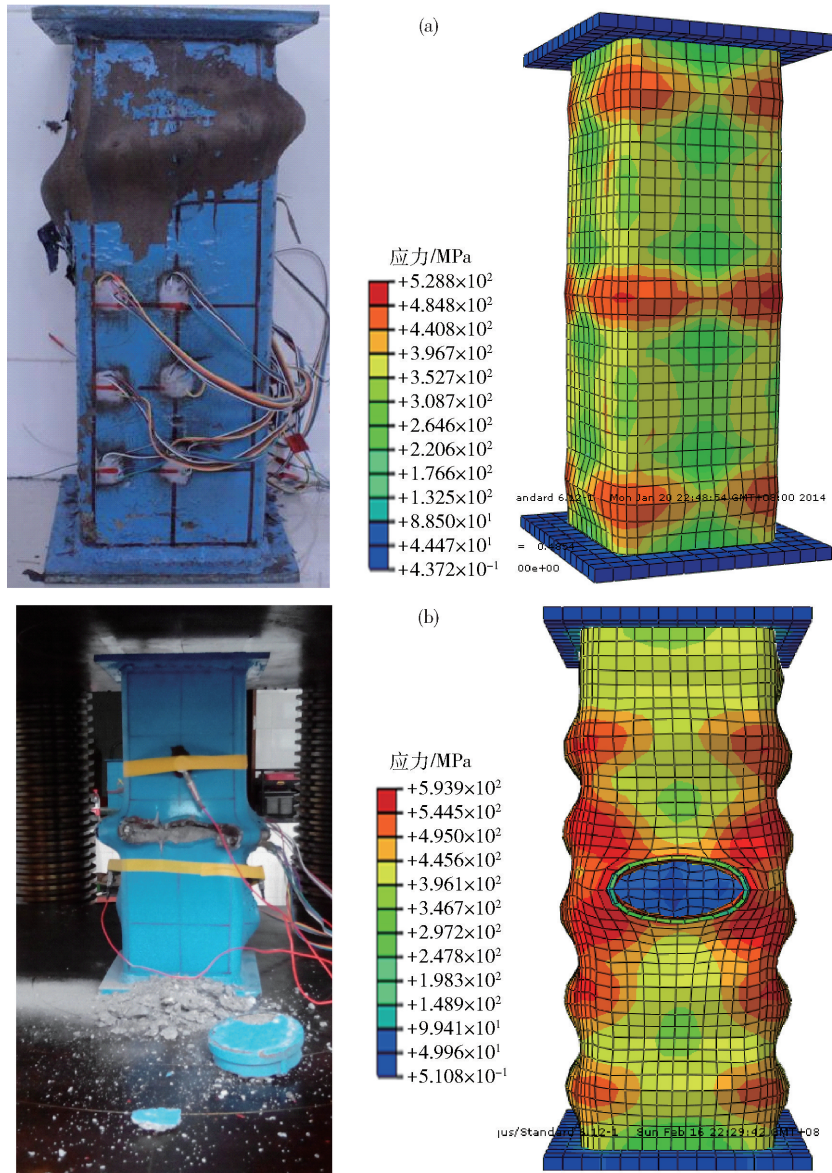


图 4 试件典型破坏形态. (a) SQCC150 × 8; (b) SQCC150 × 8-GH
 Fig. 4 Typical failure modes of components: (a) SQCC150 × 8; (b) SQCC150 × 8-GH

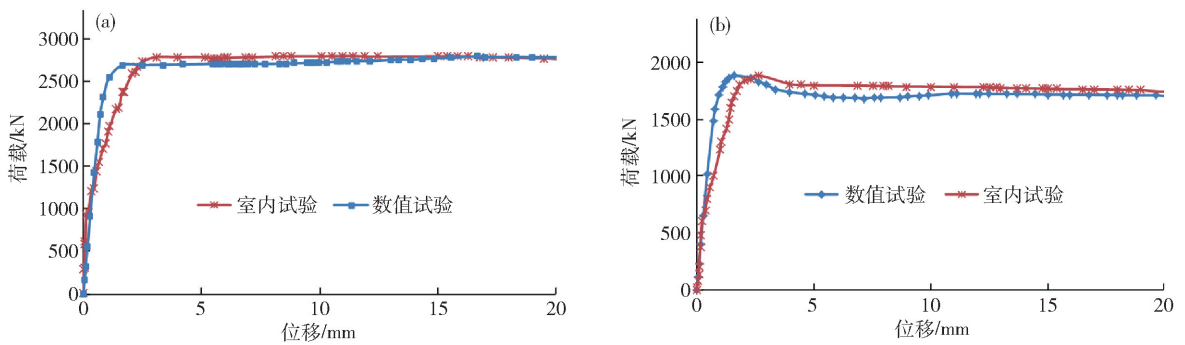


图 5 室内和数值试验荷载-位移对比曲线. (a) SQCC150 × 8; (b) SQCC150 × 8-GH
 Fig. 5 Load-strain curves of laboratory tests and numerical experiments: (a) SQCC150 × 8; (b) SQCC150 × 8-GH

条件的合理性.

② 与普通 SQCC 短柱相比,留设灌浆孔后短柱的轴压承载力降低了 29.9% (以室内试验结果为准),表

明 SQCC 短柱在开孔后轴压强度明显降低,需进行灌浆孔处的有效补强. 针对性研究 SQCC 短柱补强特性对提高短柱及拱架的承载性能具有重要的价值.

表 1 室内试验与数值试验结果对比

Table 1 Contrast between laboratory tests and numerical experiment results

短柱类别	室内试验极限	数值试验极限	差异率/%
	承载力/kN	承载力/kN	
SQCC	2726.0	2685.5	1.5
SQCC-GH	1911.2	1871.1	2.1

2 短柱灌浆孔补强机制影响规律

2.1 SQCC 短柱灌浆孔补强方式研究

2.1.1 补强方案设计

为研究不同补强措施对 SQCC 开孔短柱轴压承载力等力学性能的影响,通过改变补强钢板的形状和厚度,设计了侧弯钢板补强(angle steel strengthen, ASS)、开孔钢板补强(perforated plate strengthen, PPS)和周边钢板补强(surrounding plate strengthen, SPS)三类数值方案。

为方便进行短柱补强试验对比研究,短柱构造参数不变,补强钢板设计含钢量相同。侧弯钢板、开孔钢板和周边钢板三种补强钢板的体积分别为 306.5、309.3 和 308.2 cm³,三者最大差异率为 0.9%,具体参

数见图 6。

2.1.2 试验结果分析

(1) 破坏形态分析。

图 7 为三种补强方式下 SQCC 开孔短柱的数值试验破坏形态,对比不同短柱变形过程及破坏形态,分析结果如下:

① 侧弯钢板补强方式下短柱在试验初期未观测到明显的变形破坏特征;随着荷载的增加,短柱逐渐进入弹塑性变形阶段,以补强钢板的上下边缘为界,短柱在补强钢板上下两侧位置出现剪切线,短柱变形较小;当荷载继续增加至短柱极限荷载的 80% 左右时,钢板上下两侧开始出现屈曲波波峰,且随着荷载增加,呈现出更为明显的屈曲波现象。在整个试验过程中,灌浆孔及附近位置未产生明显的变形现象,补强钢板上下两侧成为关键破坏部位,短柱补强效果尤为明显;同时室内试验与数值试验的破坏形态具有很好的一致性。

② 开孔钢板补强方式下短柱在试验初期无明显变形破坏特征;随着荷载增加,灌浆孔及附近位置开始出现应力集中现象,变形较小;当荷载逐渐增加至短柱极限荷载的 70% 左右时,灌浆孔率先产生压扁破坏,成为短柱的关键破坏部位;随着荷载的继续增加,短柱

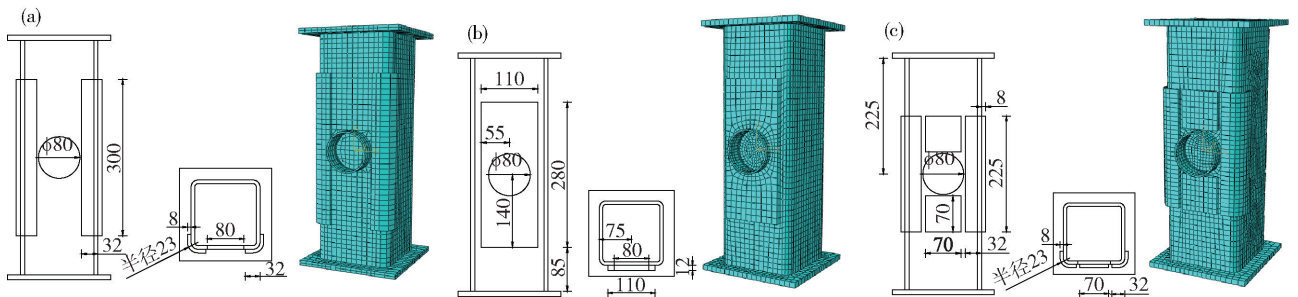


图 6 不同补强方案的尺寸与模型图(单位:mm)。(a) 侧弯钢板补强; (b) 开孔钢板补强; (c) 周边钢板补强

Fig. 6 Size and model diagrams of various strengthening schemes (unit: mm): (a) ASS; (b) PPS; (c) SPS

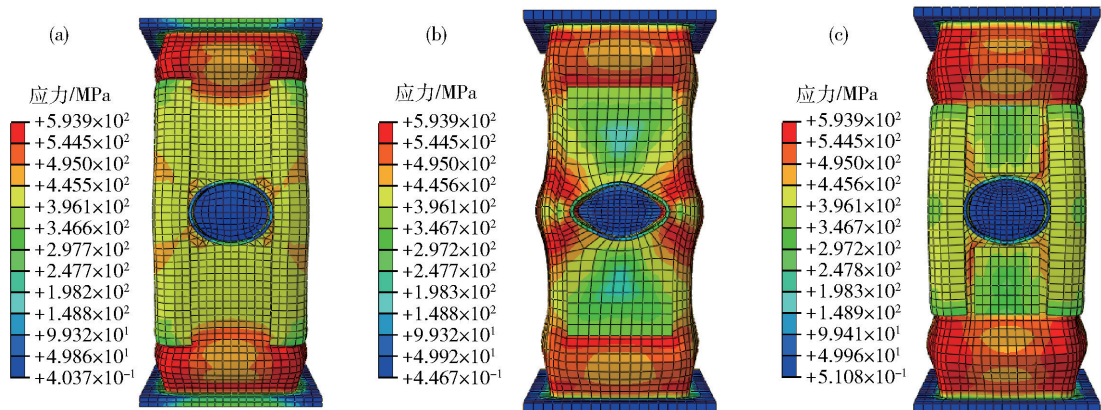


图 7 不同补强方式下短柱典型破坏形态。(a) 侧弯钢板补强; (b) 开孔钢板补强; (c) 周边钢板补强

Fig. 7 Short column typical failure modes of different strengthening methods; (a) ASS; (b) PPS; (c) SPS

逐渐失稳破坏. 在整个试验过程中, 灌浆孔仍旧是关键破坏部位, 补强效果较差.

③ 周边钢板补强与侧弯钢板补强方式下短柱在试验初期的变形特征相似, 均为变形较小的弹塑性变形阶段; 当加载至短柱极限荷载的 75% 左右时, 钢板上下两侧逐渐出现屈曲波波峰. 整个试验过程中, 灌浆孔及附近位置无明显的变形现象, 关键破坏部位转

移至钢板上下两侧, 补强效果明显.

(2) 荷载-位移曲线分析.

图 8 为 SQCC 灌浆孔补强短柱的荷载-位移曲线, 其中图 8(a) 为侧弯钢板补强方式下短柱室内试验与数值试验的荷载-位移对比曲线, 图 8(b) 为侧弯钢板补强、开孔钢板补强、周边钢板补强三种补强措施下开孔短柱的荷载-位移对比曲线.

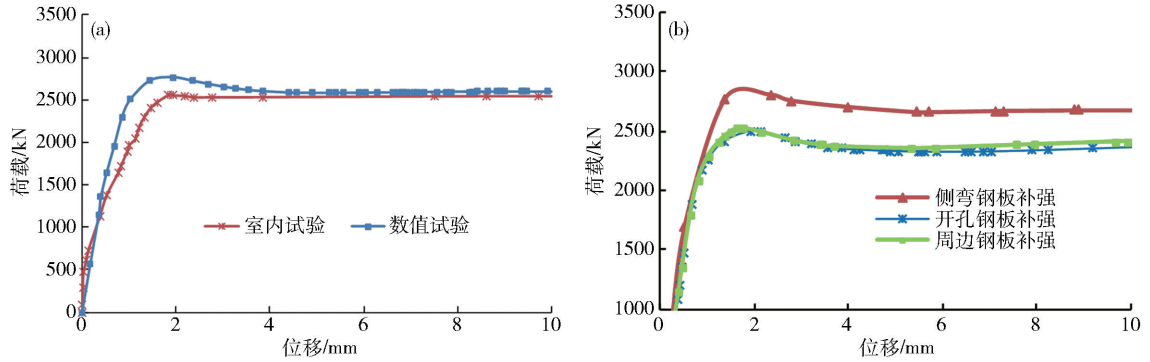


图 8 不同补强方式下荷载-位移曲线. (a) 侧弯钢板补强短柱数值与室内试验对比; (b) 各补强方案对比

Fig. 8 Load-strain curves for different strengthening methods: (a) comparison of ASS numerical and laboratory tests; (b) comparison of strengthening schemes

分析可知:

① 侧弯钢板补强方式下 SQCC 开孔短柱室内试验和数值试验的变形特点及荷载-位移对比曲线表明, 其破坏形态和承载力结果均表现出很好的一致性, 验证了数值试验的合理性.

② 不同灌浆孔补强短柱的荷载-位移曲线基本形态相似, 可分为 4 个阶段: 弹性变形阶段; 弹塑性变形阶段; 塑性变形阶段; 稳定变形阶段.

③ 不同灌浆孔补强短柱的荷载-位移曲线处于弹性变形阶段时, 其直线斜率基本保持一致, 表明在设计含钢量相同时, 三种灌浆孔补强方式对弹性模量的影响忽略不计.

(3) 强度及经济指标分析.

表 2 为不同补强措施下短柱极限承载力结果对比分析. 本文定义强度指标 α 为灌浆孔补强后与补强之前短柱极限承载力之比; 定义经济指标 γ 为灌浆孔补强短柱的极限承载力与补强钢板体积之比.

表 2 短柱极限承载力结果

Table 2 Short column ultimate bearing capacity results

补强方式	极限承载力/kN	强度指标, α /%	经济指标, γ /%
侧弯钢板补强 (ASS)	2782.48	148.7	90.8
开孔钢板补强 (PPS)	2435.91	130.2	78.8
周边钢板补强 (SPS)	2512.40	134.3	81.5

由表 2 可知: 侧弯钢板、开孔钢板和周边钢板三种

补强方式下短柱的强度指标分别为 148.7%、130.2%、134.3%, 经济指标分别为 90.8%、78.8%、81.5%, 可见含钢量相同时, 侧弯钢板的补强效果最好, 短柱承载力最大, 经济性最好, 且应力集中程度降低最明显, 因此针对 SQCC150 × 8 短柱灌浆孔进行侧弯钢板补强较为合适.

2.2 侧弯钢板长度影响规律

2.2.1 方案设计

为了研究侧弯钢板的长度变化对 SQCC 开孔短柱补强效果的影响规律, 设计了 12 组不同侧弯钢板长度参数的短柱数值试验, 对比分析选出合理侧弯钢板长度方案. 试验短柱只改变补强钢板的长度参数, 其余参数不变.

补强钢板长度参数及数值试验结果见表 3.

2.2.2 结果分析

图 9 为不同侧弯钢板长度的短柱荷载-位移曲线, 图 10 为 SQCC 开孔短柱极限承载力随侧弯钢板长度的变化曲线.

分析可知:

① 随钢板长度增加, SQCC150 × 8-ASS 短柱的极限承载力变化趋势分为两个阶段. 第一阶段是快速增加段, 此阶段短柱的极限承载力增速提高显著, 灌浆孔补强效果提升明显; 第二阶段是增速减缓段, 此阶段短柱的极限承载力依旧保持增长趋势, 但增长速率逐渐减小, 补强效果提升不明显.

拟合得到短柱极限承载力 F_u 与补强钢板长度 l 的

关系公式：

$$F_n = \begin{cases} 0.0049l^2 - 0.1708l + 2468.8, & (100 \leq l \leq 240); \\ -0.0038l^2 + 3.2897l + 2133.1, & (240 < l \leq 350). \end{cases} \quad (2)$$

当 $100 \leq l \leq 240$ 时,拟合度 $R^2 = 0.9986$; 当 $240 < l \leq 350$ 时,拟合度 $R^2 = 0.997$.

表 3 不同钢板长度短柱试验结果

Table 3 Test results of short column schemes with different plate lengths

类别	序号	补强钢板长度/mm	极限承载力/kN	强度指标, $\gamma/\%$
侧弯钢板补强 (ASS-8)	1	100	2500.52	133.6
	2	160	2566.06	137.1
	3	180	2596.09	138.7
	4	200	2625.62	140.3
	5	220	2664.12	142.4
	6	240	2709.12	144.8
	7	260	2735.75	146.2
	8	280	2755.51	147.3
	9	300	2782.48	148.7
	10	320	2800.97	149.7
	11	340	2814.15	150.4
	12	360	2829.26	151.2

注:ASS-8 表示侧弯钢板厚度为 8 mm.

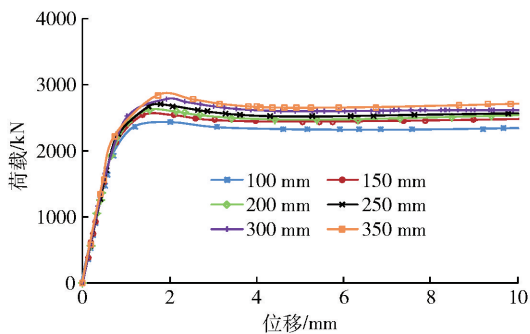


图 9 不同钢板长度的短柱荷载-位移曲线

Fig. 9 Short column load-strain curve with different plate lengths

② SQCC 开孔短柱极限承载力受侧弯钢板长度影响较大,当钢板长度小于 180 mm 时,补强后的短柱关键破坏部位依旧在灌浆孔附近,灌浆孔位置首先出现变形破坏现象,补强效果不明显,随钢板长度减小短柱极限承载力变化逐渐趋于平缓;钢板长度大于 180 mm 时,开孔补强后的 SQCC 短柱应力集中区和关键破坏部位逐渐由灌浆孔及其附近位置向补强钢板上、下两侧转移,极限承载力持续增大。

③ 当补强钢板长度小于 180 mm 时,短柱强度指

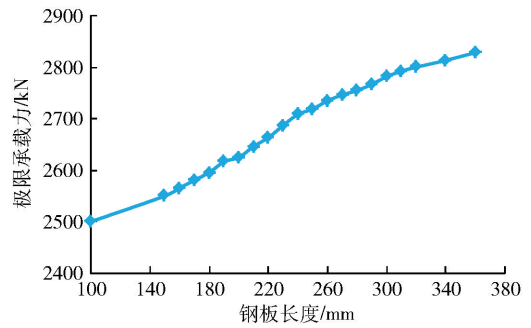


图 10 短柱极限荷载随钢板长度变化曲线

Fig. 10 Curve of short column ultimate load-plate length

标较小;长度超过 240 mm 时,短柱强度增速逐渐减小并最终趋于平稳;综合对比分析,侧弯补强钢板厚度 8 mm 时,长度在 180 ~ 240 mm 范围内,灌浆孔周围应力集中程度低,短柱强度指标增长幅度最大,能达到 138% ~ 145%,补强效果较好。

2.3 侧弯钢板厚度影响规律

2.3.1 方案设计

为了研究侧弯钢板厚度变化对 SQCC 短柱补强效果的影响规律,设计了 10 组不同侧弯钢板厚度参数的短柱数值试验,对比分析选出合理侧弯钢板厚度. 试验短柱只改变补强钢板厚度,其余参数不变。

补强钢板厚度参数及数值试验结果见表 4.

表 4 不同钢板厚度的短柱试验结果

Table 4 Test results of short column schemes with different plate thicknesses

类型	序号	补强钢板厚度/mm	极限承载力/kN	强度指标, $\gamma/\%$
侧弯钢板补强 (ASS300)	1	4	2673.03	142.9
	2	5	2709.72	144.8
	3	6	2741.54	146.5
	4	7	2767.60	147.9
	5	8	2782.48	148.7
	6	9	2784.72	148.8
	7	10	2786.69	148.9
	8	11	2788.35	149.0
	9	12	2790.21	149.1
	10	13	2792.13	149.2

注:ASS300 表示侧弯钢板长度 300 mm.

2.3.2 结果分析

图 11 为不同侧弯钢板厚度的短柱荷载-位移曲线,图 12 为开孔短柱极限承载力随钢板厚度的变化曲线。

由上述分析可知:

① 随侧弯钢板厚度增加,灌浆孔补强短柱的极限承载力呈现先增大后趋于平缓的变化趋势,表明短柱

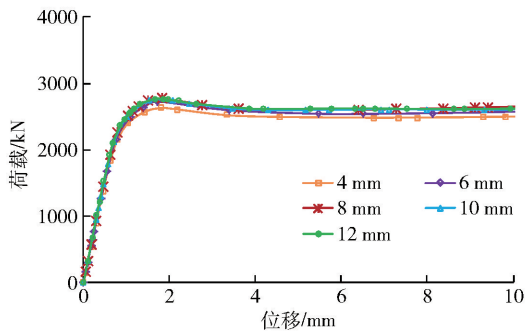


图 11 不同钢板厚度的短柱荷载-位移曲线

Fig. 11 Short column load-strain curves with different plate thicknesses

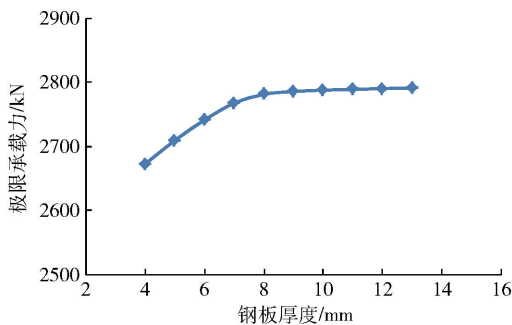


图 12 短柱极限荷载随钢板厚度变化曲线

Fig. 12 Curve of short column ultimate load-plate thickness

极限承载力在侧弯钢板厚度小于 8 mm 时受其影响比较明显;厚度超过 8 mm 后,随钢板厚度的增加短柱极限承载力变化不明显。

拟合得到短柱极限承载力 F_n 与补强钢板厚度 h 的关系公式:

$$F_n = \begin{cases} -3.527h^2 + 70.004h + 2448.9, & (4 \leq h \leq 8); \\ 1.834h + 2768.2, & (8 < h \leq 13). \end{cases} \quad (3)$$

当 $4 \leq h \leq 8$ 时,拟合度 $R^2 = 0.9995$; 当 $8 < h \leq 13$ 时,拟合度 $R^2 = 0.9994$ 。

② SQCC 短柱极限承载力受侧弯钢板厚度影响较小,当钢板厚度小于 8 mm 时,随钢板厚度的不断减小,短柱应力集中区和关键破坏部位逐渐由补强钢板上下两侧向灌浆孔及附近位置转移,短柱极限承载力不断减小;钢板厚度大于 8 mm 时,短柱薄弱部位逐渐偏离灌浆孔位置,短柱极限承载力增长趋于平缓。

③ 当补强钢板厚度小于 8 mm 时,短柱极限承载力提升明显;当厚度超过 8 mm 时,短柱极限承载力提升不明显。

2.4 小结及工程建议

(1) 短柱开孔后,灌浆孔及附近位置产生了明显的应力集中现象,作为关键破坏部位,首先出现压扁现象进而导致短柱整体失稳破坏。不同灌浆孔补强措施

下的 SQCC 开孔短柱极限承载力均有一定程度提高,可达到较好的补强效果。

(2) 综合对比三种补强方式下短柱的强度及经济指标,其中侧弯钢板补强 (ASS) 补强方式下短柱的强度指标 α 及经济指标 γ 均最大,分别达到 148.7%、90.8%,补强效果及经济性最明显。

(3) 侧弯钢板补强 (ASS) 补强方式短柱补强效果受侧弯钢板长度影响较大,补强钢板长度在 180 ~ 240 mm 范围时,灌浆孔周围应力集中程度低,短柱极限承载力增幅较大;受侧弯钢板厚度影响较小,补强钢板厚度达到 8 mm 后,短柱极限承载力提升不明显。

(4) 鉴于侧弯钢板对 SQCC150 × 8 短柱的补强最为经济有效,且侧弯钢板厚度为 8 mm,长度在 180 ~ 240 mm 之间时开孔短柱承载力的提高较大,强度及经济优势最明显,建议工程中采用侧弯钢板对方钢约束混凝土拱架灌浆孔进行补强。

3 室内试验及现场应用

为了进一步掌握约束混凝土拱架灌浆孔的实际补强效果,基于千米深井赵楼煤矿现场拱架尺寸,利用自主研发的大型力学试验系统开展了约束混凝土灌浆孔补强拱架全比尺力学性能试验,研究分析拱架的整体受力规律、变形破坏形态以及关键破坏部位等特征,并进行了拱架的现场应用,验证约束混凝土拱架灌浆孔补强效果。

3.1 试验系统及加载方案

为进行地下工程支护拱架的全比尺室内试验,笔者团队针对以往试验系统的不足设计研发了大型力学试验系统,该系统由加载及控制系统、反力结构以及监测系统等组成,可有效模拟现场拱架的实际受力状态,实现拱架相关试验数据的精确量测与采集,为进行室内全比尺拱架力学性能试验提供了有效手段。

试验拱架基于赵楼煤矿现场拱架尺寸进行设计,为充分模拟现场拱架的实际受力状态,试验过程中通过加载及控制系统采用分级单调加载的方式对拱架进行均布加载,直至拱架产生明显破坏现象或整体进入屈服破坏时停止加载。

3.2 试验结果分析

图 13 为试验前后的约束混凝土拱架变形破坏形态对比。

在试验初期阶段,各处油缸均匀缓慢的推进,方钢约束混凝土试验拱架处于弹性变形阶段,未发生明显的变形现象;随着荷载的持续升高,拱架进入屈服状态并出现明显变形,逐渐呈现出“两侧内挤、拱顶外凸、整体变瘦”的现象;荷载继续增大,拱腿处的弯曲变形更为明显;至试验结束时,拱架的整体变形破坏已经较为严重,两侧拱腿向内弯曲显著,但荷载未有明显

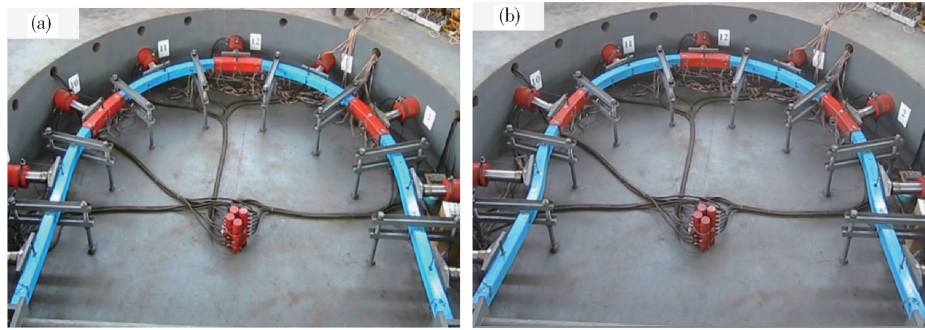


图 13 试验拱架破坏形态。(a) 试验前;(b) 试验后

Fig. 13 Deformation of the arch: (a) before test; (b) after test

下降。

试验结束时,拱架变形严重,最大变形出现在两侧拱腿位置,如图 14 所示。因采用侧弯钢板补强措施进行拱架局部补强,拱腿处灌浆孔位置未产生明显变形破坏现象,补强效果较好。

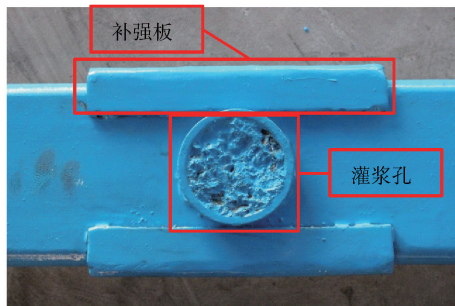


图 14 拱架灌浆孔补强效果

Fig. 14 Effect of enhancing the arch

3.3 现场应用

兖矿集团赵楼煤矿为典型千米深井,最大水平应力大小为 34.63 MPa。约束混凝土拱架支护现场试验段布置在第二集中下山的边坡点以下 500 ~ 600 m 之间,该区域断层破碎带发育,试验段穿过 DF7 断层,支护难度大,现场返修频繁。

基于前期室内试验与数值试验的研究成果,在该试验段设计进行约束混凝土拱架现场试验,并对拱腿灌浆孔位置采用焊接侧弯钢板的措施进行拱架局部补强,图 15 为现场支护效果。

针对约束混凝土拱架与传统 U 型钢拱架不同支护方案,监测分析巷道围岩收敛变形及拱架径向受力情况。图 16 为巷道掘进 157 d 后的试验段不同类型拱架各部位最终变形及径向受力监测结果对比。

监测结果表明,在掘进巷道稳定后,SQCC 拱架支

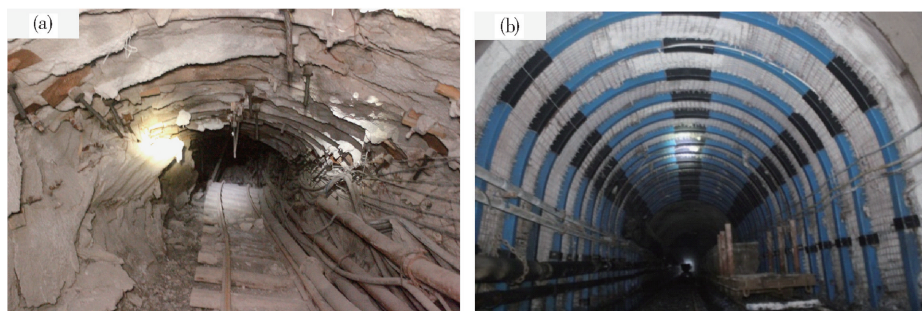


图 15 SQCC 拱架支护效果对比。(a) 支护前;(b) 支护后

Fig. 15 Comparison of supporting effect of SQCC arch: (a) before support; (b) after support

护下巷道围岩平均变形量仅为 U 型钢拱架支护巷道的 28%,拱架的变形形态与室内全比尺试验基本一致,且由于侧弯钢板的补强作用,拱脚处灌浆孔位置变形不明显,达到了较好的补强效果,方钢约束混凝土拱架支护效果明显优于传统 U 型钢支护。

4 结论

(1) SQCC 短柱留设灌浆孔后,轴压作用下率先在开孔处压扁破坏,继而导致整体失稳破坏,其承载能力

明显降低,相比普通 SQCC 短柱降低了 29.9%,为了提高开孔后短柱轴压承载能力,保证拱架整体强度,需对灌浆孔进行补强处理。

(2) 侧弯钢板、开孔钢板和周边钢板三种补强方式对短柱强度均有不同程度的提升,补强后短柱强度指标分别达到 148.7%、130.2%、134.3%,经济指标分别为 90.8%、78.8%、81.5%,综合对比三种补强方式的强度及经济指标,侧弯钢板补强短柱强度大、经济性好,且短柱应力集中程度降低最明显,补强效果最好。

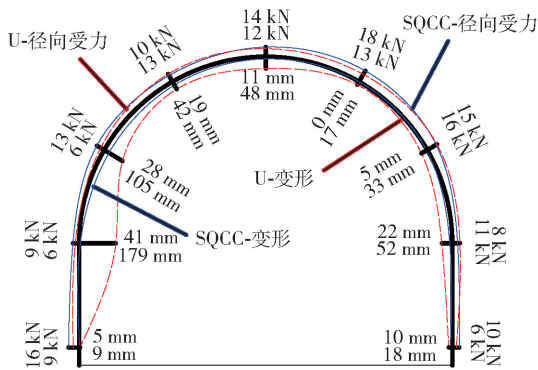


图 16 巷道收敛及径向受力监测结果

Fig. 16 Roadway convergence and radial pressure

(3) 侧弯钢板对 SQCC150 × 8 短柱的补强效果受钢板的长度和厚度因素影响, 当侧弯钢板厚度为 8 mm, 长度在 180 ~ 240 mm 范围时侧弯钢板对短柱承载力的提高较大, 补强优势最明显。

(4) 约束混凝土灌浆孔补强拱架的全比尺力学性能试验, 充分验证了侧弯钢板对于约束混凝土拱架的补强效果, 基于试验结果在千米深井赵楼煤矿中进行应用, 试验拱架在屈服破坏前灌浆孔及其附近位置无明显变形破坏现象, 表明对灌浆孔进行侧弯钢板补强能够充分发挥方钢约束混凝土拱架承载能力。

参 考 文 献

- [1] He M C, Xie H P, Peng S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(16): 2803
(何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803)
- [2] Li G F, He M C, Zhang G F, et al. Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway. *Min Sci Technol (China)*, 2010, 20(1): 28
- [3] Ren F H, Lai X P, Cai M F, et al. Quantitative prediction and evaluation on the regularity of asymmetric damage and distortion upon broken rock mass roadways. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2008, 30(3): 221
(任奋华, 来兴平, 蔡美峰, 等. 破碎岩体巷道非对称破坏与变形规律定量预计与评价. 北京科技大学学报, 2008, 30(3): 221)
- [4] Kang H P, Wang J H, Lin J. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways. *J China Coal Soc*, 2007, 32(12): 1233
(康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233)
- [5] Wang Q, Pan R, Li S C, et al. Gob side entry failure mechanism and control of bolt-grouting in three soft coal seam. *J China Coal Soc*, 2016, 41(5): 1111
(王琦, 潘锐, 李术才, 等. 三软煤层沿空巷道破坏机制及锚注控制. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1111)
- [6] Jiang B, Li S C, Wang Q, et al. Failure mechanism of three soft coal seam roadway and comparison study on bolt and grouting. *J China Coal Soc*, 2015, 40(10): 2336
(江贝, 李术才, 王琦, 等. 三软煤层巷道破坏机制及锚注对比试验. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2336)
- [7] Zhang C, Zhang N, Xu X L, et al. Support technique intensifying soft broken roadway with high ground stress. *J Min Saf Eng*, 2010, 27(1): 13
(张琛, 张农, 许兴亮, 等. 高地应力破碎软岩巷道强化控制技术研究. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 13)
- [8] Yuan L, Xue J H, Liu Q S, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine. *J China Coal Soc*, 2011, 36(4): 535
(袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术. 煤炭学报, 2011, 36(4): 535)
- [9] Vogel M, Rast H P. Alp transit-safety in construction as a challenge: health and safety aspects in very deep tunnel construction. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2000, 15(4): 481
- [10] Wang Q Z, Xie W B, Jing S G, et al. Research on U-shape steel frame and anchor cable collaborative support mechanism and loading law of roadway under dynamical pressure impact. *J China Coal Soc*, 2015, 40(2): 301
(王其洲, 谢文兵, 荆升国, 等. 动压影响巷道 U 型钢支架-锚索协同支护机理及其承载规律. 煤炭学报, 2015, 40(2): 301)
- [11] Guo J W, Liu Q S, Yang Z B, et al. Support technology to deep large-scale soft surrounding rock of roadway in Pingdingshan coal mine. *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31(Suppl 2): 3904
(郭建伟, 刘泉声, 杨战标, 等. 平顶山矿区深部大规模松软围岩巷道支护技术. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3904)
- [12] Wang Q, Li W T, Li S C, et al. Field test study on mechanical properties of U-type confined concrete arch centering and support system in deep roadway. *J Central S Univ (Sci Technol)*, 2015, 46(6): 2250
(王琦, 李为腾, 李术才, 等. 深部巷道 U 型约束混凝土拱架力学性能及支护体系现场试验研究. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2250)
- [13] Lu S L, Wang Y H. Study on relationship between support with backfilling and surrounding rocks of roadway in soft strata. *Chin J Rock Mech Eng*, 1999, 18(2): 180
(陆士良, 王悦汉. 软岩巷道支架壁后充填与围岩关系的研究. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 180)
- [14] Wang Q, Jiang B, Li S C, et al. Experimental studies on the mechanical properties and deformation & failure mechanism of U-type confined concrete arch centering. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2016, 51: 20
- [15] Wang Q, Jiang B, Li Y, et al. Mechanical behaviors analysis on a square-steel-confined-concrete arch centering and its engineering application in a mining project. *European J Environ Civ Eng*, 2017, 21(4): 389
- [16] Wang Q, Shao X, Li S C, et al. Mechanical properties and failure mechanism of square type confined concrete arch centering. *J China Coal Soc*, 2015, 40(4): 922

- (王琦, 邵行, 李术才, 等. 方钢约束混凝土拱架力学性能及破坏机制. 煤炭学报, 2015, 40(4): 922)
- [17] Li S C, Shao X, Jiang B, et al. Study of the mechanical characteristics and influencing factors of concrete arch confined by square steel set in deep roadways. *J China Univ Min Technol*, 2015, 44(3): 400
(李术才, 邵行, 江贝, 等. 深部巷道方钢约束混凝土拱架力学性能及影响因素研究. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 400)
- [18] Li S C, Wang X, Wang Q, et al. Mechanical property research and failure characteristics of U-type confined concrete arch in deep roadway. *Eng Mech*, 2016, 33(1): 178
(李术才, 王新, 王琦, 等. 深部巷道 U 型约束混凝土拱架力学性能研究及破坏特征. 工程力学, 2016, 33(1): 178)
- [19] Wang Q, Wang D C, Li W T, et al. Study on mechanical properties and deformation mechanism of U-type confined concrete arch centering. *J China Coal Soc*, 2015, 40(5): 1021
(王琦, 王德超, 李为腾, 等. U 型约束混凝土拱架力学性能及变形破坏机制试验. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1021)
- [20] Han L H, Yang Y F. Study on axial bearing capacity of concrete-filled-steel-tube columns with rectangular section. *China Civ Eng J*, 2001, 34(4): 22
(韩林海, 杨有福. 矩形钢管混凝土轴心受压构件强度承载力的试验研究. 土木工程学报, 2001, 34(4): 22)
- [21] Zhu C Q, Wang Q, Jia Y G, et al. Numerical analysis on the ultimate bearing capacity and parameter selection of U-shaped confined concrete short column. *Electron J Geotech Eng*, 2015, 20(26): 13051
- [22] Jiang B. *Control Mechanism and Application of Confined Concrete for Super Large Section Tunnel on Weak Surrounding Rock* [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2016
(江贝. 超大断面隧道软弱围岩约束混凝土控制机理及应用研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2016)
- [23] Gao Y F, Wang B, Wang J, et al. Test on structural property and application of concrete-filled steel tube support of deep mine and soft rock roadway. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(Suppl 1): 2604
(高延法, 王波, 王军, 等. 深井软岩巷道钢管混凝土支护结构性能试验及应用. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2604)
- [24] Han L H, Yang Y F. *Modern Steel Tubular Confined Concrete Structure Technology*. 2nd Ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007
(韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007)