可缩式钢管混凝土支架相似模型试验研究及工程应用*

张振国[1]，王军[2]，崔海峰[3]，魏杰[2]，王绪奎[3]，吕顺章[2]，吴学岩[2]，刘杰[3]

（1.济宁市煤矿安全生产监测监控中心， 山东 济宁市 272000；
2.山东建筑大学 土木工程学院， 山东 济南 250101；
3.山东济矿鲁能煤电股份有限公司阳城煤矿， 山东 济宁市 272000）

摘要：针对深部高地应力巷道围岩大变形的支护难题，提出了一种可缩式钢管混凝土支架支护结构（简称“可缩支架”）。首先开展了可缩相似材料的比选试验，确定了PVC泡沫可用作模拟试验的可缩相似材料。然后开展了可缩支架相似模拟试验，获得了静载全过程的应力-时间、载荷-位移曲线，监测到支架可缩、混凝土裂缝产生与扩展的变化状态，揭示了可缩支架的3个力学响应阶段：弹性变形阶段、稳定让压阶段和让压后刚性阶段。试验结果表明：顶底板围岩应力峰值约为0.7 MPa，左右帮围岩应力峰值约为1.4 MPa，围岩应力向深处传递，支护模型整体未发生失稳变形，支架出现弯折，但仍保持结构完整；PVC泡沫可缩率约为77%，支架让压效果良好。现场应用结果表明：围岩顶底板最大移近量为216 mm，可缩支架可缩率约为72%，可缩支架的支护效果良好，该支护结构能有效协调围岩-支护协同变形。研究结果可为可缩式支架的支护设计及工程应用提供参考。

关键词：巷道支护；可缩式钢管混凝土支架；可缩材料；相似模型试验；工程应用

中图分类号：TD353 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)08-0159-10

Similar Model Test Research and Engineering Application of Compressible Concrete-Filled Steel Tube Support

Zhang Zhenguo[1], *Wang Jun*[2], *Cui Haifeng*[3], *Wei Jie*[2], *Wang Xukui*[3], *Lyu Shunzhang*[2], *Wu Xueyan*[2], *Liu Jie*[3]

(1.Jining Coal Mine Safety Production Monitoring Center, Jining, Shandong 272000, China;
2.School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;
3.Yangcheng Coal Mine, Shandong Jikuang Luneng Coal Power Co., Ltd., Jining, Shandong 272000, China)

Abstract: Aiming at the support problem of large deformation of surrounding rock in deep high ground stress roadway, a kind of compressible concrete-filled steel tube support structure (referred to as “compressible support”) was proposed. Firstly, a comparison test of compressible similar materials was carried out, and PVC foam was determined to be applicable as the compressible similar material for simulation tests. Secondly, the similar simulation test of the compressible support was carried out, and the stress-time and load-displacement curves of the whole process of static load were obtained. The evolution of compressible support, initiation and propagation of concrete cracks was monitored. Three mechanical response stages of the compressible support were revealed: the elastic deformation stage, stable yielding stage and rigid stage after yielding. The test results show that the peak stress of the surrounding rock of the roof and floor is approximately 0.7 MPa, and the peak stress of the surrounding rock of the left and right sides is approximately 1.4 MPa. The stress of the surrounding rock is transferred to the depth, the supporting model does not experience overall instability and deformation, and the support is bent, but the structure is still intact. The compressibility of PVC foam measured is approximately 77%, indicating that the support achieves a favorable yielding effect. The field application results show that the maximum displacement of the roof and floor of the surrounding rock is 216 mm, and the compressibility of the compressible support is about 72%. The compressible support achieves favorable supporting performance, and the support structure can effectively coordinate the collaborative deformation of the surrounding rock and support. The research results can provide reference for the support design and engineering application

* **收稿日期**：2025-09-04
基金项目：山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME162)；济南市“新高校20条”资助项目(202228106)
作者简介：张振国(1983—)，男，山东济宁人，硕士，高级工程师，主要从事煤矿多种灾害耦合发生机理及综合防治方面的研究工作。E-mail：zhenguo007@163.com
通信作者：魏杰(2001—)，男，山东日照人，硕士，主要从事地下工程支护理论与技术研究。E-mail：2307810440@qq.com

of the compressible support.

Key words: Roadway support, Compressible concrete-filled steel tube support, Compressible material, Similar model test, Engineering application

0 引言

随着浅部资源日益枯竭,深部开采已成为我国矿产资源开采的常态[1]。深部岩体的高地应力、高渗透压使得巷道岩体的变形破坏加剧,进而产生冲击地压等动力灾害,已成为制约深部巷道支护的两大核心因素[2-3]。常规支护措施无法适用于深部巷道的维护,若不进行有效让压,会使支护体在高地应力下产生变形破坏[4]。因此,深部岩体工程的支护体需具有一定的可压缩性能,以缓解围岩不可控的变形[5]。

相关学者在可缩支护结构及地下工程相似模型试验等方面开展了大量研究,并取得诸多可以借鉴的成果。马明杰等[6]揭示了U型钢可缩性支架工作阻力变化规律,分析了载荷分布情况及卡缆种类对支架的影响。吴丽丽等[7]研发了2大类波形钢腹板支架可缩性节点构造。康红普等[8]认为可缩性支架设有可缩结构,当支架载荷达到一定值后,利用可缩性能适应围岩较大变形,并能提供足够的支护反力。钢管混凝土支架以高承载力的优势在深部支护中普遍应用,但常规钢管混凝土支架并不具备让压性能[9],在实际工程中需搭配柔性让压层、喷射混凝土碹体或设置可缩型节点。王琦等[10]设计了钢管混凝土支架增阻可缩节点并进行试验研究,发现可缩支架可达到先柔性再刚性的支护效果,实现定量增阻及让压的功能。Wang等[11]开展了不同可缩材料支柱压缩试验,发现松木支柱在屈服后仍能保持较高承载性能,实现增阻可缩,并于鲁西矿业成功应用。模型试验可推断原型中可能发生的力学现象,从而解决岩体工程中的实际问题[12-13],现已成为矿业领域的一种重要研究手段[14]。战新宇等[15]选择河砂、重晶石、石膏及不同强度等级的水泥作为模型试验的相似材料原料。Liu等[16]利用碳酸钙、煤尘、石膏、沙子及水制作相似模型,并模拟了采矿过程。吴迪等[17]通过相似模拟试验,监测了矿块开挖和采场充填过程中采场及其围岩的位移场演化规律。樊祥喜等[18]采用铝管内灌注水泥砂浆模拟钢管混凝土支架,极大限度地还原钢管与核心混凝土之间的相互作用关系。周俊等[19]采用巷道围岩动力扰动相似模拟试验装置,开展巷道开挖瞬态卸载破坏的相似模拟试验,并取得了良好效果。郑赟等[20]分别采用常规支护和强帮强角支护建立巷道模型,并将相似模拟试验结果应用于工程实践。曹丁园等[21]采用三维相似模拟试验研究跨煤柱开采时覆岩的运移规律和载荷传递特征。赵万勇等[22]采用大比例相似模型试验探究深部巷道围岩的碎胀变形演化特征。李伟涛等[23]通过物理模型试验,探究了常规支护和补偿支护下围岩应力响应特征及失稳机理。

针对U型钢支架可缩结构及节点、巷道支护的模型试验研究已趋于成熟,但对于可缩式钢管混凝土支架的可缩性能及让压力学响应的研究尚不完善。基于此,本文提出了可缩式钢管混凝土支架支护结构,研究了可缩材料让压性能,开展了相似模型试验,分析了巷道围岩应力场分布规律、支架可缩性能与变形破坏特征,并开展了工程应用。

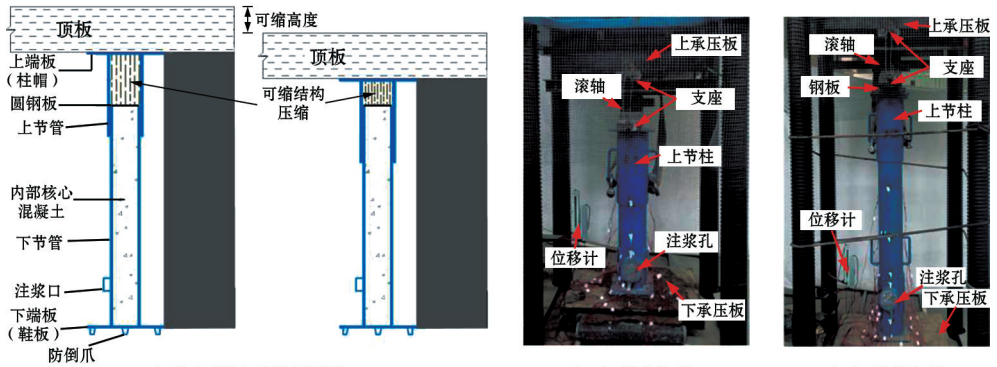
1 可缩式钢管混凝土支架结构

1.1 工程需求及可缩支柱试验

巷道顶板下沉是深部巷道围岩失稳的典型表现形式,其成因机制具有多因素影响特征,巷道顶板下沉的主要致因是高地应力的作用,随着开采深度增加,顶板岩层承受的构造应力与自重应力显著增加;围岩岩石属性对顶板下沉过程也具有显著影响,软弱破碎岩体受层理面、节理裂隙等不连续面影响,使岩层更易发生下沉;其次,采矿活动的扰动作用也是引起顶板下沉变形的因素之一,采矿扰动作用会改变原岩应力场的平衡状态,引起围岩应力重分布,导致岩层发生变形。此外,支护设计不合理也会降低支护加固效果。

针对顶板失稳变形,若不采取有效的让压措施,刚性支护体可能会被压溃破坏。因此,在确保顶板稳定性前提下,应允许顶板发生适度的下沉,以减轻作用在支护体上的荷载。

为此,采用YAW-5000型压力试验机开展可缩式钢管混凝土支柱静力试验,探究可缩材料应用于钢管混凝土中的可行性。可缩支柱加载试验装置如图1所示。



（a）可缩支柱让压示意　（b）短柱加载　（c）长柱加载

图 1　可缩式钢管混凝土支柱加载试验

Fig.1　Loading test of compressible concrete-filled steel tube support

试验结果表明[12]：可缩支柱让压效果明显，让压结构可减缓支柱的屈曲变形发展，可缩支柱极限让压量为 175～227 mm，让压结构可缩率达到（初始高度 260 mm）62%～87%，极限让压量约为可缩支柱总长的 10%；内部让压结构压密后仍与下节钢管混凝土结构协同受压，可缩支柱极限承载力为 2 859～4 500 kN，与相同尺寸的非可缩支柱相比，其承载力提升了 13%～24%，具有高强的承载特性。试验验证了可缩结构应用到钢管混凝土支柱中的合理性和可行性。

1.2　可缩式钢管混凝土支架结构设计

针对深部巷道顶板下沉引起支护体变形破坏问题，设计了可缩式钢管混凝土支架，形状为直墙半圆拱形，其整体结构如图 2 所示。该支架主要由顶弧段、左右侧帮段、左右直梁段、左右可缩段组成，侧帮段与直梁段连接，侧帮段端部位于直梁段内，可缩材料设置在侧帮段端部位置。当顶板围岩下沉变形导致支架压力过大时，直梁段内部可缩材料被压缩，为支架提供变形空间，实现支架定量让压支护，缓冲围岩变形所产生的荷载。

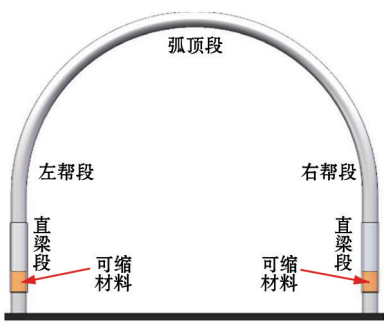


图 2　可缩式钢管混凝土支架的结构

Fig.2　Structure of compressible concrete-filled steel tube support

2　可缩支架相似模型试验

2.1　相似可缩支架模型设计

考虑到模型试验的适用性及加载方式等因素，以直墙半圆拱形巷道作为原型巷道，其断面宽 5 m、高 4.2 m，钢管混凝土支架的尺寸为 Φ194 mm×10 mm、直梁段的尺寸为 Φ219 mm×10 mm，支架间距为 800 mm，并取实际工程的 15 m×10 m×15 m（长×宽×高）的岩体范围进行相似模型试验研究。

2.1.1　相似参数设计

以相似三定律为理论基础，取几何相似常数 $C_l=L_h/L_m=15$，容重相似常数 $C_\gamma=\gamma_h/\gamma_m=1.4$。根据强度相似准则，压力相似常数 $C_P=P_h/P_m=C_l^3C_\gamma=4\ 725$，其中，$L$ 为特征长度，γ 为容重，P 为压力，下标 h、m 分别代表“原型”和“模型”。根据量纲分析，强度 R、应力 σ、弹性模量 E 等有相同的量纲，所以相似比也相同，即：$C_R=C_\sigma=C_E=21$，内摩擦角 φ 与泊松比 μ 为无量纲，相似比为 1。

2.1.2　相似支架模型制作

实际工程应用中通常采用便于加工的松木作为可压缩材料。直径 210 mm 的松木其压缩率可达到 77.7%，可缩承载力为 365.7 kN，极值承载力约为 737.5 kN[4]，因此，相似模型试验的压缩材料其极值承载力需达到 0.15 kN。对此开展可缩相似材料静载试验，试验采用分级加载的方式，每级 10 N，待可缩材料达到极限荷载时，结束试验。试验的可压缩材料是直径和厚度均为 13 mm 的聚氯乙烯发泡板（PVC 泡沫）、可发性聚乙烯泡沫（EPE 泡沫）和聚苯乙烯泡沫（EPS 泡沫）。试验结果见表 1。

表 1 可压缩相似材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of compressible similar materials

可压缩材料	极值承载力/kN	可缩承载力/kN	压缩量/mm	可压缩率/%
PVC 泡沫	0.13	0.05	10.85	83.5
EPE 泡沫	0.02	0.01	10.10	77.7
EPS 泡沫	0.22	0.08	11.50	88.5

由表 1 可知,EPE 泡沫虽具备可缩能力,但不具备承载性能,在压缩 10.10 mm 时承载力近似不存在且不稳定,静载施加结束后,又回弹至原形态,不符合松木的力学特征及变形特征。EPS 泡沫、PVC 泡沫均具备可缩能力及承载性能,但 PVC 泡沫的极值承载力为 0.13 kN,与松木相似材料的极值承载力 0.15 kN 接近,且其可缩性能与松木更为相近,因此,初步选择 PVC 泡沫作为试验的可缩相似材料。

以深部巷道钢管混凝土支架为研究对象,拟采用铝管内灌注石膏与水泥混合浆液模拟钢管混凝土支架[18],模型的尺寸与力学参数见表 2。

表 2 直墙半圆拱支架相似参数

Table 2 Similar parameters of straight wall semi-circular arch support

支护件类型	曲率半径/mm	圆弧段尺寸/mm	直梁段长度/mm	直梁段尺寸/mm	管壁厚/mm	极值承载力/kN
原型	2 400	194	1 200	219	10.0	2 250
模型	160	12	80	14	0.5	0.48

为验证 PVC 泡沫在模拟支架中的承载性能及可缩性能,将其放置在模拟支架模型中开展可缩支架轴压试验,如图 3 所示。因受静载试验机的局限性,在支架底部及侧帮部未设置位移约束,采用荷载控制加载,当支架荷载不变,底部位移增大较为明显时,结束试验。可缩支架力学性能见表 3。

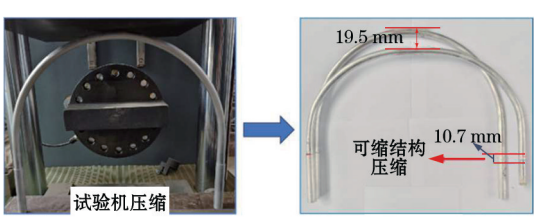


图 3 可缩支架轴压试验

Fig.3 Axial compression test of compressible support

表 3 可缩支架力学性能

Table 3 Mechanical properties of compressible support

支架类型	可缩材料	承载力极值/kN	竖向位移/mm	压缩量/mm
直墙半圆拱形支架	EPE 泡沫	0.61	30.02	0.5
	EPS 泡沫	0.56	29.84	9.6
	PVC 泡沫	0.56	30.20	10.7

3 种可缩支架轴压试验测得的荷载-位移曲线如图 4 所示(颜色标识见电子版)。由图 4 可知,可缩支架在开始加压后,EPS 与 EPE 可缩支架初期荷载增量速率缓慢,且压缩量迅速增加,其压缩位移达到约 5 mm 后进入承载阶段,随后荷载迅速增加,其压密位移分别达到 15 mm 和 12 mm 后进入稳定承载阶段,试验结束后,EPS 压缩情况良好,EPE 泡沫在未承载状态下又恢复至原样。PVC 可缩支架展现双阶段力学行为:开始加压后荷载迅速增加,可缩支架处于弹性变形阶段,荷载上升到一定值后,铝管内部可缩材料开始被压缩,此时支架处于恒阻让压阶段,能有效模拟木结构的渐进破坏模式,让压效果明显。

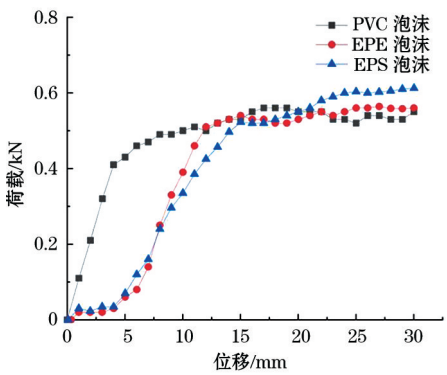


图 4 模拟支架的轴压荷载-位移曲线

Fig.4 Axial compression load-displacement curves of simulated support

综上,EPE 支架不能模拟松木的让压效果,EPS 支架能模拟松木的让压效果,但需达到一定压缩位移才可发挥承载性能,即不具备与松木相似的承载性能。PVC 支架在可缩阶段的受力特点及其可缩性能方面均能较好地模拟松木,且能满足力学相似比的要求,由此选择 PVC 可缩支架开展相似模拟试验。

2.2 相似巷道模型设计

模型试验主要研究可缩式钢管混凝土支架的可缩性能及支护效果,只需考虑弹性状态下单一

岩层模拟问题，因此，模拟围岩的相似材料选用细河沙。直墙半圆拱形可缩式钢管混凝土支架的模拟试验主要研究顶板下沉问题所带来的让压需求，无需考虑底板变形问题，即支架反底拱段无需制作，采用木板代替巷道底板，可将模型巷道底板视为刚性材料，不考虑其变形特征。同时，用镀锌电焊网模拟金属网，用石膏模拟支架壁后混凝土喷层。

支架模型的圆弧段采用 Φ12 mm×0.5 mm 的拱形铝管，直梁段采用 Φ14 mm×0.5 mm 的铝管，核心混凝土用水泥与石膏配比为 1∶1 的浆液模拟，通过注射器将浆液注入铝管内。注浆时，先灌注上部拱架浆液，待拱架端部持续漏浆后，将拱架两端封闭，并将拱架倒置放置一段时间，待浆液凝固后，将拱架两端与直梁段铝管连接，直梁段铝管内部设置可缩材料，实现模型支架让压设置。将制作好的可缩支架模型放置 7 d，待水泥石膏混合浆液完全凝固；然后，用木板模拟巷道底板素混凝土并进行支架连接，间距为 54 mm；支架安装完成后，在外侧铺设镀锌电焊网，并在金属网外侧用 10 mm 厚的石膏模拟壁后混凝土喷层，至此完成模型的制作。

2.3　相似模型试验方案设计

2.3.1　试验加载设计

模拟试验的边界条件为顶部施加均布荷载，其余面为刚性约束。根据 2.1 节计算，应力相似常数 $C_\sigma=21$，压力相似常数 $C_F=4\ 725$。

考虑目前对可缩式钢管混凝土支架的研究较少，且未应用于现场实际工程，因此对支架施加垂向荷载，直至支架变形。试验采用分级加载方式加载，每级加载 200 kN，共 10 级，每级加载后等待 10 min，待各通道平衡后采集数据，记录模型变形情况。

2.3.2　试验监测设计

试验监测主要包括模型可缩监测和数据采集，主要监测巷道的围岩压力、钢管混凝土支架可缩变形及支护结构破坏特征。通过土压力盒、巷道模型内部高清摄像头及试验台内置的荷载-位移传感器对试验全过程进行实时监测。监测点布置如图 5 所示，土压力盒布置在巷道模型的顶底板与侧帮，从巷道表面向围岩内部布置 3 个监测点，监测点之间的间距为 100 mm，用于监测围岩的压力变化。

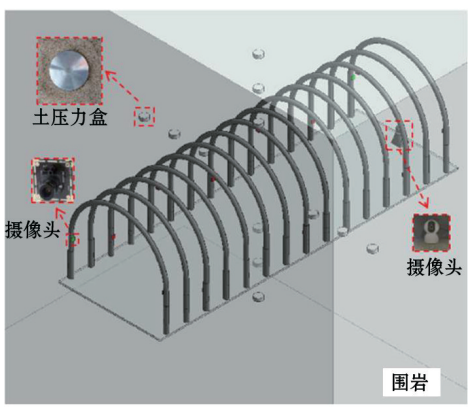


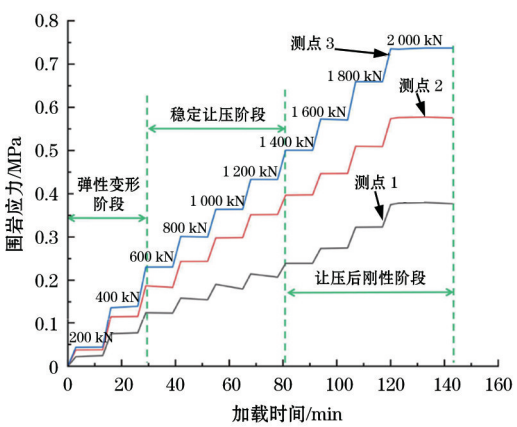
图 5　监测点布置方案

Fig.5　Layout scheme of monitoring points

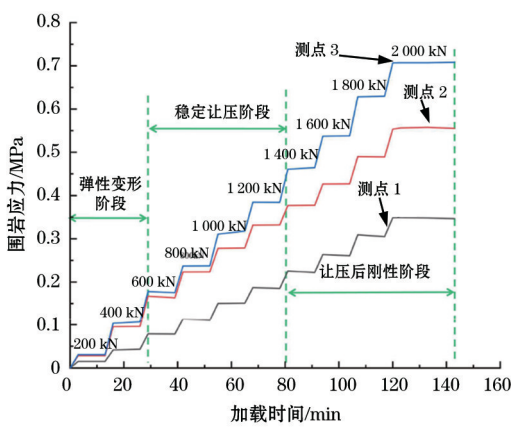
3　相似模型试验结果分析

3.1　围岩应力场变化规律

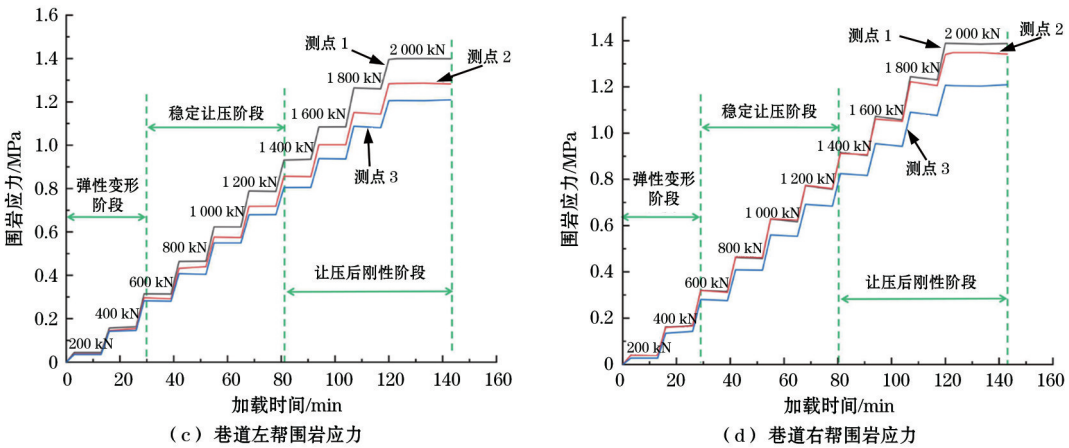
巷道顶底板及两帮围岩应力变化曲线如图 6 所示。



（a）巷道顶板围岩应力



（b）巷道底板围岩应力



（c）巷道左帮围岩应力　　（d）巷道右帮围岩应力

图 6　围岩应力随加载时间的变化曲线

Fig.6　The change curves of surrounding rock stress with loading time

由图 6 可以看出，在加载初期，围岩应力迅速增加，以巷道顶板测点 1 为例，加载至 30 min 时，围岩应力增大了 0.13 MPa，此时支架无明显变形，处于弹性阶段，在此阶段 10 min 的静载期间内，围岩应力呈现出缓慢增大趋势。在试验加载至 600 kN 后的静载 10 min 期间内，围岩应力呈现出降低趋势，此时可缩结构开始压缩变形，支架侧帮段开始向直梁段压缩，围岩应力上升速率减缓。加载至 80 min 时，顶板测点 1 处的围岩应力较 30 min 时增加了 0.11 MPa，此时支架处于稳定让压阶段，围岩应力得到部分释放。试验加载至 1 400 kN 时，围岩应力增长速率显著增加，加载至 120 min 时，顶板测点 1 处的围岩应力较 80 min 时增加了 0.13 MPa，此时支架处于让压完成后的刚性阶段。顶底板围岩应力峰值约为 0.7 MPa，距离巷道表面越远，围岩应力逐渐增大；左右帮围岩应力峰值约为 1.4 MPa，距离巷道表面越远，围岩应力越小，围岩应力向深处传递。

3.2　支架载荷-位移曲线

将顶板处测得围岩应力作为支架顶弧段支护反力，得到如图 7 所示的可缩支架顶弧段荷载-位移曲线。由图 7 可以看出，在试验加载初期，荷载迅速增加，可缩材料未被压缩，此时支架整体处于弹性变形阶段（位移＜12.5 mm）；随荷载继续增加，可缩结构被压缩，支架支护反力呈缓慢上升趋势，此时支架处于稳定让压阶段（位移 12.5～21 mm），荷载超过可缩材料的极限承载力后，可缩材料被完全压缩，支架位移迅速增加，随后围岩压力完全由可缩支架主体结构承受，支架仅能起到刚性支护的承载作用，支护反力迅速增加，直至支架荷载达到极限承载力，此时钢管混凝土支架处于让压后的刚性承压阶段（位移 21～30.2 mm）。图 7 中的曲线与文献[24]中给出的可缩工字钢拱架让压位移与荷载特征曲线相似，不同的是文献[24]中的稳定让压阶段特征曲线呈“锯齿状”上升，本试验研究未出现此承载状态。可缩支架最大支护反力为 0.37 MPa，试验后测得支架顶弧段移进量约为 30.2 mm，可缩材料让压量约为 10 mm，可缩支架让压效果理想。

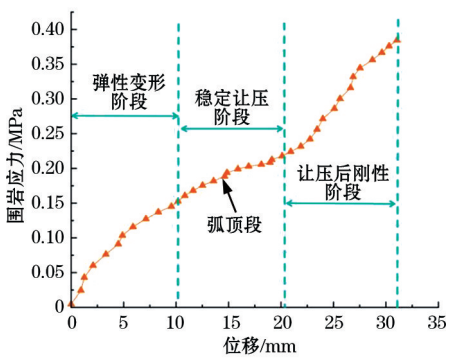


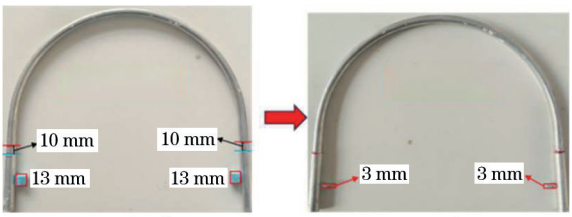
图 7　可缩支架顶弧段荷载-位移曲线

Fig.7　The load-displacement curve of top arc section of compressible support

3.3　支架可缩变形及破坏特征

试验结束后，选取巷道端部支架进行拆卸（套管未发生明显变形），如图 8 所示。试验开始前，在支架侧帮段与直梁段交接处作一蓝色标记，试验完成后，在交接处作一红色标记（颜色标识见电子版）。由图 8 可知，试验加载前后，可缩段支架上的蓝、红色标记之间的间距约 10 mm，即侧帮段支架压缩入直梁段管内约 10 mm，PVC 泡沫完全压缩，支架可缩率约为 77%，说明通过压缩可缩材料释放了部分

围岩应力，支架让压作用明显，取得了预期的让压效果。



（a）受压前　（b）受压后

图 8　受压前后的支架

Fig.8　Support before and after compression

选取支护结构变形情况较为明显的巷道前端两帮进行分析，巷道模型变形特征如图 9 所示。图中黄色表示支架变形位置，红色表示石膏变形位置，蓝色表示金属网变形（颜色标识见电子版）。

由图 9 可知，从试验开始到荷载加至 800 kN 的时间段内，巷道模型内支护结构无明显变形；左帮壁后石膏开始产生裂缝，直梁段上方壁后石膏产生轴向裂隙，原因为侧帮段支架压缩可缩结构向下产生位移；右帮支架直梁段因受挤压出现微小变形。加载至 1 200 kN 时，支护结构发生了轻度破坏，左帮裂缝继续沿巷道轴向发展，金属网随可缩结构被进一步压缩而发生变形，巷道中段石膏破碎程度加剧；右帮壁后石膏被挤压破碎，石膏铺设交接处出现裂口，右帮偏上位置的石膏沿巷道轴向出现节理裂隙。加载至 1 800 kN 时，支护结构发生了中度破坏，支架的可缩结构被整体压扁，由主体支架承担全部荷载，此时处于让压完成后的刚性阶段，支架不再具备让压性能，左帮直梁段支架壁后石膏完全破碎，裂缝向巷道端部延伸，第 4 架支架侧帮段出现弯折，弯折位置与石膏开裂位置相近，此处承受的外侧围岩应力较大；右帮石膏裂缝不断扩大，且沿支架轴向向巷道端部不断延伸，石膏出现大面积破碎，右帮支架在围岩剪切应力作用下向内侧弯曲，侧帮段与直梁段交界处发生挤压变形，直梁段管口变为椭圆形。加载至 2 000 kN 时，支护结构发生了重度破坏，此时换算成实际埋深为1 000 m 以上，左帮第 4 架支架侧帮段弯折变形严重，除此之外未发现其他位置的支架发生变形，支架顶弧段石膏完好，未产生明显的裂缝；巷道右帮中段石膏完全破碎，侧帮裂隙发展至巷道端部；支架上部的石膏完好，未发生开裂与冒落等现象，可缩支架结构受力性能较好。

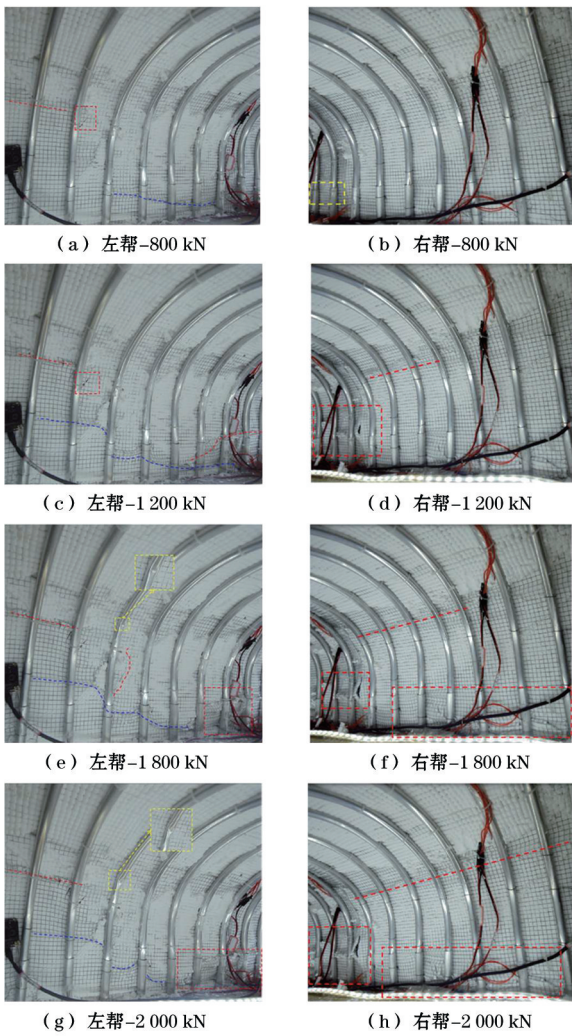


图 9　巷道支护结构的变形特征

Fig.9　Deformation characteristics of roadway support stucture

4　可缩式钢管混凝土支架的工程应用

某矿的辅助运输巷受相邻工作面采动和深部高地应力等因素的影响，巷道采用原支护结构支护完工 30 d 后，巷道顶板围岩下沉变形逐渐增大，支护结构变形严重，逐渐失去承载力，主要表现为：工字钢棚帮部出现屈曲变形，顶梁处沿巷道走向弯曲变形，顶板下沉量超过 600 mm，巷道失稳破坏。

针对该巷道的变形破坏，设计了直墙半圆拱形可缩式钢管混凝土支架，如图 10 所示。支架整体分为顶弧段、侧帮段、直梁段和可缩段。顶弧段和左右帮段支架选用 Φ194 mm×10 mm 钢管，支架顶弧段和左右两侧帮段之间采用 Φ219 mm×10 mm 的接头套管连接。左右直梁段支架和可缩段选用 Φ219 mm×10 mm 钢管。

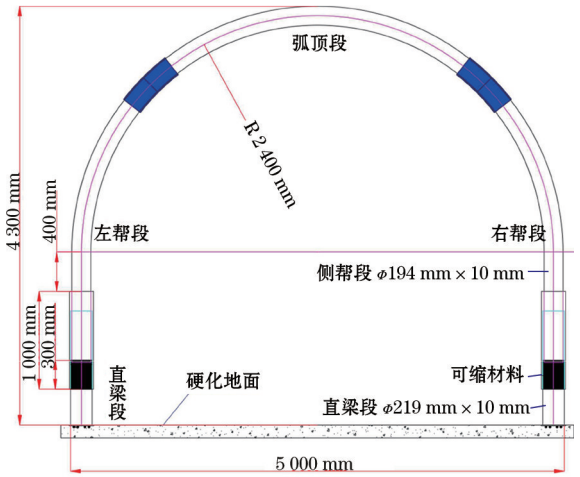


图 10 可缩式钢管混凝土支架

Fig.10 Compressible concrete-filled steel tube support

采用一种举升式支架安装机进行支架安装。确定好支架安装位置后,按要求先架设侧帮段,然后,将顶弧段运至安装机的托举架内,并通过驱动装置提升至合适高度,再将侧帮段钢管与顶弧段钢管通过接头套管连接,巷道支护效果如图 11 所示。支架在安装过程中可将支架上下、左右自由调节,实现顶弧段与两帮钢管的对接定位精度在±2 mm 以内,显著降低了工人的劳动强度,提升了支架安装效率。



图 11 巷道支护效果

Fig.11 Supporting effect of roadway

支架安装完成后,随后开展可缩式钢管混凝土支架支护的变形量监测。经过 150 d 的现场监测发现,支护完工 100 d 后,围岩变形趋于稳定,现场监测结果如图 12 所示。由图 12 可知,巷道两帮最大移近量为 34 mm,顶底板最大移近量为 216 mm,表明可缩支架的实际可缩率约为 72%,和模型试验结果较吻合,支架的可缩性良好。支护 120 d 后,支架变形趋于稳定,如图 13 所示。由图 13 可知,巷道两帮支架的最大收敛量分别为 19.25 mm,顶弧段收敛量为测得支架顶弧段收敛量与顶底板围岩移近量的差值,最大为 32 mm。支护 2 a 后,巷道顶板未产生明显下沉,有效控制了围岩变形,支护效果良好,完全可满足使用要求。基于可缩式钢管混凝土的支护技术有效解决了因顶板下沉引起支架破坏的支护难题,自支护完成后,巷道未进行返修工作,节省了巷道频繁返修成本。现场应用结果表明,可缩式钢管混凝土支护结构具有结构稳定性强的特性,可用来解决因围岩稳定性差、地应力高、采掘扰动等因素引起的巷道大变形问题。

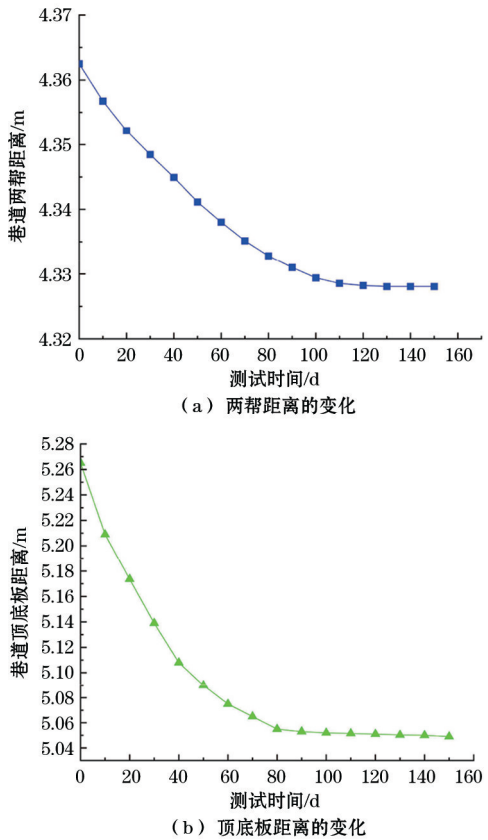
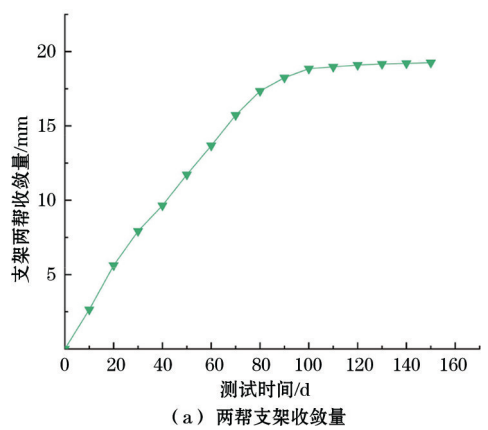
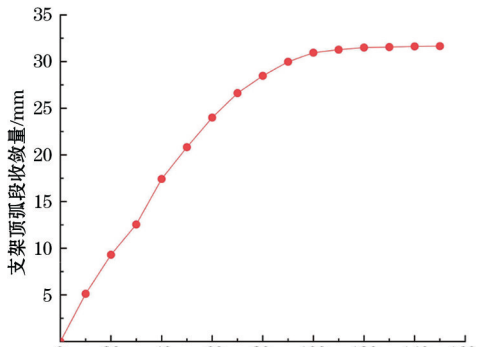


图 12 巷道围岩位移监测结果

Fig.12 Monitoring results of displacement of roadway surrounding rock





（b）顶弧段支架收敛量

图 13 支架收敛量监测结果

Fig.13 Monitoring results of support convergence

5 结论

（1）分析了深部巷道顶板下沉的影响因素，开展了可缩式钢管混凝土支柱试验，验证了在钢管支架内部设置可缩结构的让压效果及合理性，并设计了一种直墙半圆拱形的可缩式钢管混凝土支架。

（2）开展了相似材料及相似可缩支架比选试验，确定了 PVC 泡沫可用作相似模拟试验的可缩相似材料。相似模拟试验结果表明：可缩支架在受压过程中经历了弹性变形阶段、稳定让压阶段和让压后刚性阶段，巷道模型顶底板围岩应力峰值约为 0.7 MPa，左右帮围岩应力峰值约为 1.4 MPa，围岩应力向深处传递；可缩段 PVC 泡沫被完全压缩，可缩率约为 77%，让压效果良好。

（3）可缩式钢管混凝土支架的现场应用结果表明，受巷道顶板下沉的影响，支架的直梁段发生压缩，从而适应围岩的变形。在支护 100 d 后，围岩变形趋于稳定，巷道两帮的最大移近量为 34 mm，顶底板最大移近量 216 mm。在支护 120 d 后，支架变形趋于稳定，支架侧帮最大收敛量为 19.25 mm，顶弧段最大收敛量为 32 mm。支护 2 a 后的巷道围岩未出现明显的变形，支护效果良好。

参考文献(References)：

[1] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报，2021，46(3)：726-746.
He Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society，2021，46(3)：726-746.

[2] 王卫军，范磊，赵志强，等.基于塑性区控制的巷道围岩支护理论与技术研究进展[J].煤炭学报，2024，49(1)：320-336.
Wang Weijun，Fan Lei，Zhao Zhiqiang，et al. Research progress of support theory and technology of the roadway surrounding rock based on the plastic zone control[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(1)：320-336.

[3] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J].岩石力学与工程学报，2021，40(1)：1-30.
Kang Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(1)：1-30.

[4] 王军，杨光，黄万朋，等.顶升可缩式钢管混凝土支柱试验研究与工程应用[J].煤炭学报，2022，47(8)：3052-3068.
Wang Jun，Yang Guang，Huang Wanpeng，et al. Experimental study and engineering application of jacking retractable conerete-filled steel tubular column[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(8)：3052-3068.

[5] 李冲，台连海.基于能量释放特征的强动压巷道高强柔性支护机理研究[J].采矿与安全工程学报，2022，39(5)：930-939.
Li Chong，Tai Lianhai. Research on high intensity flexible support mechanism of roadway with strong dynamic pressure based on energy release characteristics[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2022，39(5)：930-939.

[6] 马明杰，杨新安，谢文兵，等.可缩性 U 型钢支架承载性能足尺试验研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2023，54(1)：280-291.
Ma Mingjie，Yang Xin'an，Xie Wenbing，et al. Full-scale experimental study on bearing capacity of retractable U-steel support[J]. Journal of Central South University(Science and Technology)，2023，54(1)：280-291.

[7] 吴丽丽，王慧，徐翔，等.波形钢腹板支架支护技术的研究进展综述[J].矿业科学学报，2021，6(5)：524-535.
Wu Lili，Wang Hui，Xu Xiang，et al. Review of research on steel support with corrugated webs[J]. Journal of Mining Science and Technology，2021，6(5)：524-535.

[8] 康红普，高富强.煤矿采动应力演化与围岩控制[J].岩石力学与工程学报，2024，43(1)：1-40.
Kang Hongpu，Gao Fuqiang. Evolution of mining-induced stress and strata control in underground coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(1)：1-40.

[9] 许海亮，高晗钧，宋义敏，等.巷道防冲吸能钢管混凝土拱架支护性能研究[J].煤炭科学技术，2024，52(3)：53-62.
Xu Hailiang，Gao Hanjun，Song Yimin，et al. Study on the support performance of anti-impacting and energy-absorbing concrete-filled steel tube arches in roadways[J]. Coal Science and Technology，2024，52(3)：53-62.

[10] 王琦，李术才，王汉鹏，等.可缩式钢管混凝土支架力学性能及经济效益[J].山东大学学报(工学版)，2011，41(5)：103-107+113.
Wang Qi，Li Shucai，Wang Hanpeng，et al. Mechanical property and economic effect of contractible concrete filled steel tube support[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science)，2011，41(5)：103-107+113.

[11] Wang J，Wu Z L，Han J Y，et al. Experimental study on axial load-bearing capacity of grout-lifted compressible concrete-filled steel tube composite column[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2025，165：106864.

[12] 李晓红,卢义玉,康永,等.岩石力学试验模拟技术[M].北京:科学出版社,2007.
Li Xiaohong, Lu Yiyu, Kang Yong, et al. Rock mechanics experiment simulation technology [M]. Beijing: Science Press,2007.

[13] Kim N S, Lee J H, Chang S P. Equivalent multi-phase similitude law for pseudodynamic test on small scale reinforced concrete models [J]. Engineering Structures, 2009, 31(4):834-846.

[14] 袁亮,马衍坤,黄勤豪,等.煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J].中国矿业大学学报,2024,53(5):827-856.
Yuan Liang, Ma Yankun, Huang Qinhao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(5):827-856.

[15] 战新宇,高林,赵芳昊,等.大相似比模型试验用超高强相似材料配比试验研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(11):109-118.
Zhan Xinyu, Gao Lin, Zhao Fanghao, et al. Experimental study on proportioning of ultra-high strength similar materials for large similarity ratio model tests [J]. Coal Geology & Exploration,2023,51(11):109-118.

[16] Liu Feifei, Lin Baiquan, Zhai Cheng, et al. Research of real-time effects of horizontal protecting stratum mining based on similar simulation experiment [J]. Procedia Engineering, 2011, 26(4):431-440.

[17] 吴迪,邓腾飞,孙光华.阶段空场嗣后充填采场稳定性分析:模型及试验研究[J].矿业科学学报,2018,3(3):260-267.
Wu Di, Deng Tengfei, Sun Guanghua. Stability analysis of stage open stope with delayed backfill: modelling and experimental studies [J]. Journal of Mining Science and Technology,2018,3(3):260-267.

[18] 樊祥喜,魏海兵,肖禹航,等.钢管混凝土支架与围岩相互作用关系模型试验研究[J].煤炭工程,2019,51(4):68-73.
Fan Xiangxi, Wei Haibing, Xiao Yuhang, et al. Model test study on interaction between concrete-filled steel tube support and surrounding rock[J]. Coal Engineering,2019,51(4):68-73.

[19] 周俊,赵光明,孟祥瑞,等.岩体模型双向加载巷道开挖卸荷效应[J].煤炭学报,2023,48(9):3384-3392.
Zhou Jun, Zhao Guangming, Meng Xiangrui, et al. Unloading effect of roadway excavation based on sim-ulation method in similar material [J]. Journal of China Coal Society,2023,48(9):3384-3392.

[20] 郑赟,单仁亮,黄博,等.强帮强角应用于沿空留巷支护的相似模型试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(1):94-102.
Zheng Yun, Shan Renliang, Huang Bo, et al. Similar model tests on strong sidewall and corner support of gob side entry retaining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(1):94-102.

[21] 曹丁园,潘瑞凯,白锦文,等.跨煤柱开采覆岩运动与载荷传递特征三维相似模拟研究[J].矿业科学学报,2025,10(3):477-488.
Cao Dingyuan, Pan Ruikai, Bai Jinwen, et al. Three-dimensional similarity simulation research on the overburden movement and the characteristics of load transfer in crossing-pillar mining [J]. Journal of Mining Science and Technology,2025,10(3):477-488.

[22] 赵万勇,李元海,于恒,等.基于计算机视觉的深部软岩巷道变形破裂特征试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(9):3457-3468.
Zhao Wanyong, Li Yuanhai, Yu Heng, et al. Experimental study on deformation and fracture characteristics of deep softrock roadway based on computer vision[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2024, 55(9):3457-3468.

[23] 李伟涛,郭志飚,何满潮,等.深部高应力软岩巷道失稳机理及补偿支护技术研究[J].煤炭科学技术,2025,55(10):1-18.
Li Weitao, Guo Zhibiao, He Manchao, et al. Study on failure mechanisms and compensation support technology of deep high-stress soft rock roadways[J]. Coal Science and Technology,2025,55(10):1-18.

[24] 孟陆波,李攀,李天斌,等.隧道可缩工字钢拱架让压规律模型试验研究[J].铁道标准设计,2023,67(1):48-54+61.
Meng Lubo, Li Pan, Li Tianbin, et al. Model experimental study on the yielding law of the tunnel contractible i-beam arch[J].Railway Standard Design,2023,67(1):48-54+61.