DOI：10.11779/CJGE201806015

层状围岩管片衬砌配合陶粒与锚杆的联合支护技术研究

胡雄玉，何 川*，吴 迪，杨清浩
（西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室，四川 成都 610031）

摘 要：深部层状围岩中修建盾构隧道，管片衬砌易受偏压作用，对结构安全构成挑战。提出一种管片衬砌配合陶粒可压缩层与锚杆的联合支护技术，采用大比例尺相似模型试验针对联合支护技术的支护效果进行研究，进行了可压缩层配合不同长度和间距的锚杆支护效果对比研究，从管片衬砌内力、变形角度分析了联合支护效果，从可压缩层的压缩变形路径和移动特征角度分析了联合支护机理。研究结构表明：联合支护技术一定程度上改变了管片的内力分布形式，降低了围岩偏压作用，削减管片衬砌内力和形变量；锚杆的施作可以有效减小层状围岩变形，陶粒压缩层可以有效吸收围岩变形；联合支护中锚杆的长度和间距存在一个最优值，超过该最优值，锚杆的加固效果不再明显增加；联合支护的作用机理由两部分构成：陶粒压缩层的让压作用与锚杆加固作用。研究结果对层状围岩中修建盾构隧道的支护结构型式设计具有一定参考价值。

关键词：层状围岩；盾构隧道；模型试验；管片衬砌；锚杆；陶粒可压缩层
中图分类号：TU451 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2018)06－1093－10

作者简介：胡雄玉(1989－)，男，博士，博士研究生，主要从事盾构隧道技术方面的研究工作。E-mail: 564291084@qq.com。

Combined support technology of segment linings with compressible crushed stone and anchor bolts in layed rock

HU Xiong-yu, HE Chuan, WU Di, YANG Qing-hao
(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The segment lining is susceptible to unsymmetrical pressure when a shield tunnel is constructed in deep layered rock. A new support technology of segment linings combined with compressible ceramic and anchor bolts is proposed. In order to study the effect of the support technology, similar model tests are carried out to study the support effect of segment linings with compressible ceramic and anchor bolts with different lengths and spacings. The internal force and deformation of the segment linings are analyzed, and the mechanism of the combined support is revealed from the deformation path of compressible ceramic. The results show that the combined support technology can change the internal force distribution of the segment linings to some extent and can also reduce the biased pressure of the surrounding rock. The application of the bolts can effectively reduce the deformation of the layered rock, and the compressible ceramic can effectively absorb the deformation. There are optimum values of the length and the spacing of the bolts in the combined support, and beyond the values, the reinforcement effect of the bolts will not increase obviously. The mechanism of the combined support consists of two parts: the yielding effect of the compressible ceramic and the reinforcement effect of the bolts. The results of this study have certain reference value for the support design of the shield tunnels in layered rock.

Key words: layered rock; shield tunnel; model test; segment lining; anchor bolt; compressible ceramic

0 引 言

近年来，随着中国装备制造业升级和施工技术水平的提升，盾构隧道趋向大埋深发展。以越江跨海隧道和深部煤矿巷道为代表，是今后大埋深盾构隧道的发展方向。隧道进入大埋深后围岩地质条件更加复杂，围岩不只是单一的各向同性特征，时常会遇到各向异性特征明显的层状围岩。层状岩体由于沉积形成过程中的沉积作用和矿物颗粒的择优取向，具有显著的层理结构特点[1]。在平行于层理方向上力学性质比较相近，而在垂直于层理方向上的物理力学性质则差异较大[2]。在此类地层中修建隧道易引起地质偏压，喷层

基金项目：国家科技支撑计划项目（2013BAB10B04）；国家自然科学基金项目（U1361210）；2016 年度西南交通大学博士研究生创新基金项目（2015）
收稿日期：2017－02－22
*通讯作者（E-mail:chuanhe12@163.com）

开裂、型钢拱架或格栅扭曲、支护侵限等大变形破坏现象[3]。

对于深部层状围岩变形特征和支护技术国内外学者积累了大量经验。沙鹏等[4]针对高地应力下层状地层隧道的挤压变形与支护受力特征进行了研究，结果显示受围岩结构强度的各向异性控制，隧道开挖后支护受力极不均匀，且由于开挖方式的影响不易稳定。初期支护钢拱架局部荷载过大而发生侧向扭曲失稳；李树忱等[5]采用大尺度三维模型相似试验系统，分析具有一定倾角的多组裂隙的岩体在高地应力下开挖变形破坏规律。试验结果表明：隧道上下侧围岩主要呈现大变形现象，左右侧围岩呈现分层破裂现象，裂隙倾角与破坏区分布形态有一定相关性；Bossart 等[6]在隧道中向围岩内部钻孔，通过内窥式摄像机，得到隧道开挖方向与层理面走向平行时岩石的破坏形态，即岩石的破坏主要发生在与岩石层理面垂直的方向；Blumling 等[7]提出了层状岩体中隧道开挖破坏的概念模型，即破坏由层理面的分层弯曲破坏与非层理面的伸展断裂构成；Myung 等[8]采用模型试验和数值模拟手段研究了双轴压力作用下节理岩体的节理倾角和侧压力系数对隧洞的变形和破坏特征的影响；Bonini 等[9]针对里昂–都林辅助坑道受高地应力、岩石各向异性影响出现非对称挤压大变形问题，提出以喷锚加可压缩性钢拱架为支护手段，取得了良好支护效果；黄万朋[10]针对深部巷道非对称变形问题，认为对于深部巷道，阻止其破裂区的形成是不现实的，应该改善其应力状态，提高围岩自身的残余强度和承载能力，同时允许围岩产生一定的变形量；孙晓明等[11]基于深部岩体的力学特征和变形机制提出了预留刚柔层支护技术；Anagnostour 等[12]、Ramoni 等[13]认为高地应力挤压地层的隧道支护必须具有可压缩性并辅以扩挖才能解决支护难得问题，并且提出了两种让压支护的结构型式。Yu 等[14]针对深部矿井围岩大变形问题，提出了高阻让压的支护原则，并以高强预应力让压锚杆为主要支护手段，取得了良好支护效果；韩昌瑞等[15]针对深埋层状岩体隧道，进行了锚杆支护优化设计，通过考虑地应力、岩性的影响，从围岩的变形、破坏形式、塑性区及锚杆拉力的大小等方面改进、优化支护设计方案；熊亮[16]针对葡萄山隧道工程，开展了层状围岩隧道施工监测成果分析和隧道锚杆支护参数优化的研究，从锚杆长度、锚杆布置两个方面提出了层状围岩隧道锚杆支护参数优化的建议方案。

盾构工法以预制的管片衬砌为支护结构，管片衬砌同样会受到层状围岩各向异性特征的影响，其结构安全面临挑战。因此，开发适应用于管片衬砌的联合支护技术意义重大。借鉴传统工法的高阻让压、刚柔相济支护原则，提出以管片衬砌为主体，同时配合锚杆和陶粒可压缩层的联合支护技术，其具体做法是在管片衬砌壁后沿洞周径向布置锚杆以加固围岩，同时通过注浆孔在管片衬砌壁后超挖空隙充填陶粒可压缩层实施让压。本文采用大比例尺相似模型试验开展层状围岩中联合支护技术的支护效果研究，研究结果对层状围岩中修建盾构隧道的支护结构型式设计具有一定参考价值。

1 工程概况

本次试验依托新街台格庙矿区 1 号斜井工程。新街台格庙矿区位于鄂尔多斯市境内，矿区规划总面积为 734.5 km^2，煤炭资源量 13884.46 Mt，目前已规划采用 TBM 法修建 6 条长距离斜井，这是中国首次采用 TBM 法修建煤矿斜井。其中，1 号斜井总长 6519 m，倾角 6°，最大埋深 600 m。斜井衬砌内径 6.6 m，外径 7.3 m，厚度 35 cm，幅宽 1.8 m。管片衬砌采用 C40 钢筋混凝土管片。衬砌采用 1 个底拱块，3 个标准块，2 个邻接块，每环内设置纵向螺栓 23 颗，采用错缝拼装，管片衬砌壁后超挖空隙 15 cm。斜井穿越的地层示意如图 1 所示。

斜井主要穿越地层为砂质泥岩和砂岩，其中 500～600 m 深处段穿越煤岩层。该段煤岩层节理裂隙发育，岩体完整性差。节理走向与洞轴向呈 7°交角，倾角 45°。片状层理的集中分布使围岩整体呈现结构的各向异性。

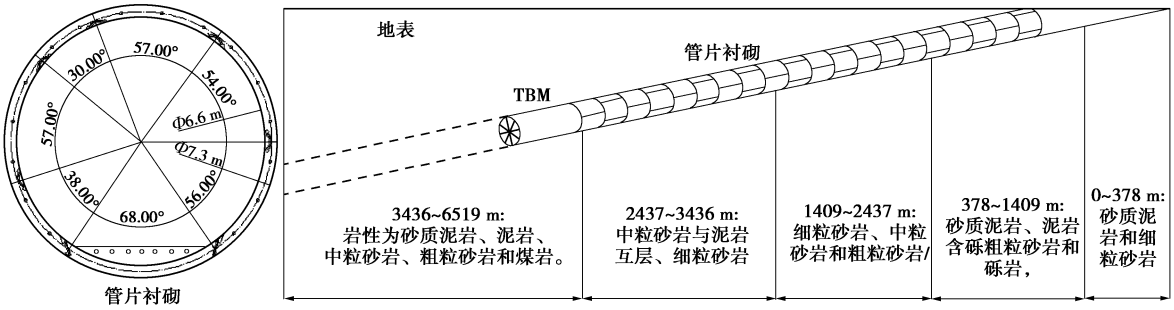


图 1 斜井穿越地层示意图

Fig. 1 The sketch of inclined shaft passing through soil strata

目前，该工程尚未动工，由于斜井埋深大，围岩节理裂隙发育，管片衬砌面临偏压威胁。本文开展针对层状围岩的联合支护技术研究，目的是为该工程支护结构设计提供理论依据。

2　试验方案

2.1　试验材料

（1）围岩

试验以几何相似比 C_L=12 和重度相似比 C_γ=1 作为基础相似比，根据相似理论原理推导出各物理力学参数原型值与模型值的相似比：泊松比、应变、摩擦角相似比 $C\mu=C\varepsilon=C\varphi=1$，强度应力、凝聚力、弹性模量相似比 $C_R=C_\sigma=C_c=C_E=12$。选取煤岩层为原型土体，以重度、弹性模量、抗压强度为试验模型土的主要控制参数。围岩模型以石膏、河砂和重晶石粉为基材，同时添加一定比例的环氧树脂对模型土弹性模量、抗压强度等进行调节，模型土体材料物理力学参数取值如表 1 所示，各组成成分配比为石膏：河砂：重晶石粉：环氧树脂=1：1.2：0.2：0.01

表 1　原型及模型围岩物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rocks

名称	弹性模量/GPa	密度/(kg·m^{-3})	抗压强度/MPa	泊松比
原型值	25.0	2530.2	45.2	0.30
模型值	1.96	2380.3	3.5	0.32

（2）管片衬砌和注浆材料

管片衬砌材料采用特种石膏材料通过改变水膏比试制，水膏比为 1.0：1.1；混凝土管片主钢筋通过原型与模型抗弯刚度等效原理采用直径为 1.5 mm 的铁质材料模拟；管片混凝土物理力学参数如表 2 所示。管片衬砌环通过模具预制加工而成，脱模后在一定温湿度条件下养护管片衬砌环向接头，通过开凿一定深度的凹槽模拟该部位抗弯刚度的弱化，凹槽深度根据与原型接头抗弯能力等效原理通过计算予以确定[17]，管片环向接头对应槽缝深度如表 3 所示。纵向接头采用一定直径的钢棒模拟，钢棒长度根据纵向接头的影响范围进行确定。目前，管片环向接头的模拟主要有两种方式，管片外侧割槽法和基于正、负弯矩分区的管片内外侧分区割槽法，前者由于操作性高被广泛使用[18]，后者考虑了正、负弯矩分区不同而实施内、外侧分区割槽。但实际操作时要预先判断正弯区和负弯区，试验过程中管片衬砌的受力特征复杂多变，尤其在层状围岩中，管片内外侧分区割槽法操作性难度较大。故本次试验采用在管片外侧割槽的方式进行模拟，其割槽深度依据与原型环向接头正负抗弯刚度等效原理通过计算予以确定。管片衬砌通过模具预制加工而成，脱模后在一定温湿度条件下养护，为考虑管片衬砌结构纵向拼装效应的影响，模型试验采用 1 个管片整环+2 个管片半环形式进行研究，以中间整环管片为研究目标环，其力学行为是本次试验关注的重点所在，如图 2 所示。采用 1.5：1.0 水膏比的石膏来模拟单轴抗压强度为 15 MPa 的管片衬砌壁后注浆材料。

图 2　管片衬砌相似模型

Fig. 2 Lining segment similarity model

表 2　管片混凝土物理力学参数对照表

Table 2 Physical and mechanical parameters of segment concrete

名称	原型值	模型值	对应原型值
单轴抗压强度标准值/MPa	26.8	2.15	25.8
弹性模量/GPa	32.5	2.63	31.56

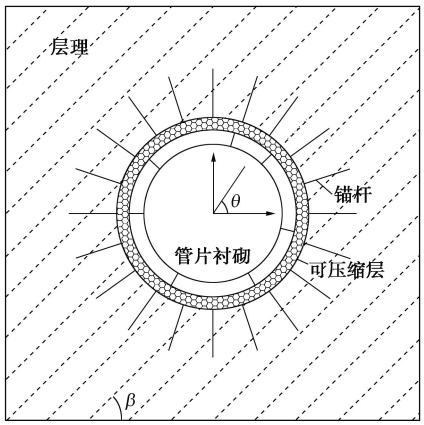
表 3　管片环向接头对应槽缝深度一览表

Table 3 Gap depths corresponding to segment joints

弯曲刚度/(N·m·rad^{-1})		槽缝深度/m	备注
正弯曲	3.23×10^8	0.01	正弯矩区域
负弯曲	2.12×10^8	0.013	负弯矩区域

2.2　层状围岩模型

试验中通过将模型围岩沿不同的层理方向锯出 2.0 mm 的间隙来模拟层状围岩的层理面。如图 3 所示。其中，β 为层理面倾角。



（a）模型试验示意图

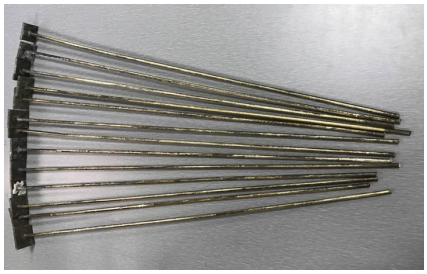
（b）试验模型

图 3 层状围岩模型

Fig. 3 Model of layered rock

（1）锚杆模拟

由于锚杆涉及到的参数较多，目前，实现其真实模拟难度较大，本文考虑了其几何和力学相似。通过对不同型号的铜丝铁丝铝丝锡丝及熔断丝等材料进行力学性能试验对比研究。试验中锚杆杆体采用 ϕ 4.0 mm 的铜丝，用环氧树脂作锚固剂（见图 4）。



(a) 锚杆制作

(b) 锚杆安装

图 4 锚杆

Fig. 4 Anchor bolts

（2）让压材料

图 5（a）、（b）分别为陶粒及其内部构造图，由于内部蜂窝状构造使其具有高孔隙率的特点，因而具备高压缩性，故选取黏土陶粒作为管片衬砌壁后让压材料。陶粒的相似材料选择主要是考虑压缩率和压缩强度的相似。如图 6 所示，通过多次侧向压缩试验最终确定以粒径 3 mm 的半硬质泡沫颗粒作为陶粒的相似材料。其侧向压缩曲线如图 7 所示。由图 7 可见，陶粒具备高压缩性，其压缩率可达 50%。

（a）陶粒

（b）陶粒的内部构造

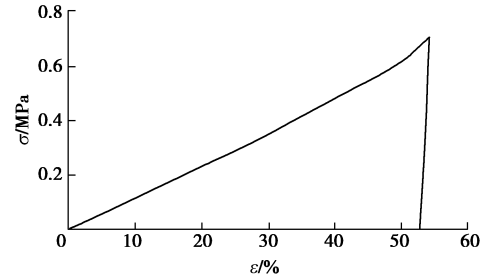
（c）半硬质泡沫颗粒

图 5 让压材料

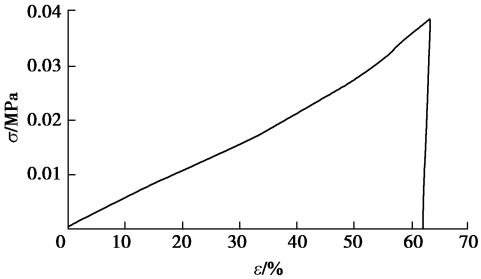
Fig. 5 Yield materials

图 6 侧向压缩试验

Fig. 6 Lateral compression tests



（a）陶粒



（b）半硬质泡沫颗粒

图 7 让压材料的侧向压缩曲线

Fig. 7 Lateral compression curves of yield materials

2.3　试验装置及量测方法

试验采用盾构隧道–土层复合体模拟试验装置进行加载，如图 8 所示。该试验装置采用卧式加载方式，可以方便地实现对自重应力场及构造应力场的模拟。在试验加载过程中，采用Ⅰ方向布置的 4 台千斤顶模拟竖向土压分级加载；采用Ⅱ方向布置的 4 台千斤顶模拟侧向土压力；垂直管片横断面方向（Ⅲ方向）通过竖向千斤顶及加载面板保证管片在加载状态下处于平面应变状态。

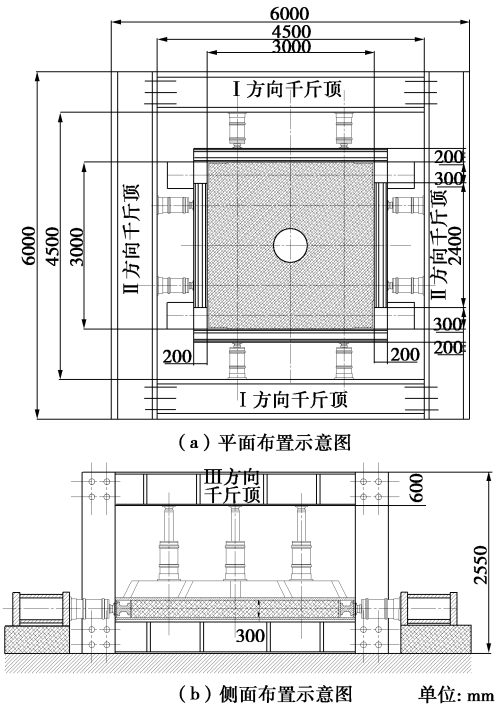


图 8　模型试验加载装置

Fig. 8 Loading equipments of model tests

（1）管片衬砌关键点的位移

试验中主要量测管片衬砌内力和关键点的位移。布设了 8 个高精度差动式数显位移计（精度为 0.01 mm）测量管片衬砌关键点的位移，分别布置于拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和拱底，具体布置位置和布置方式见图 9。

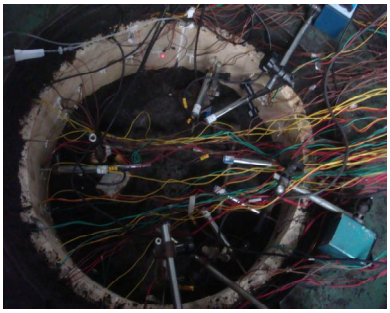


图 9　位移计布设图

Fig. 9 Arrangement of convergence gauges

（2）管片衬砌内力

在管片衬砌模型内外 19 个点对称布设了 38 个电阻应变片（图 10），通过静态应变采集仪获得试体在加载过程中的应变值，并最终换算成内力值。

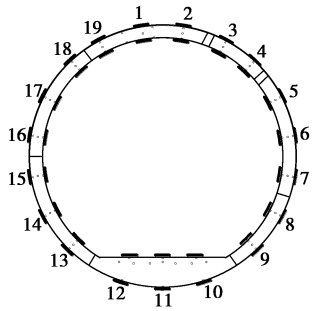


图 10　应变片布置图

Fig. 10 Arrangement of strain gauges

2.4　试验分组和加载方案

联合支护中可压缩层厚度和锚杆长度、间距均会对支护效果产生影响。其中可压缩层的厚度主要影响让压效果，一般而言，其厚度越大让压效果越明显。而锚杆对围岩的作用机理较为复杂，故针对联合支护中的锚杆参数作详细分析，设定层理倾角为 45°，压缩层填充厚度设为 1.5 cm（现场管片衬砌壁后空隙为 16 cm）。不同支护结构型式工况如下：A 为管片衬砌，B 为管片衬砌+可压缩层，C 为管片衬砌+可压缩层+锚杆。

不同锚杆间距为 3.6，4.2，8.0，12.5 cm，其中 3.6 cm 对应原型值约为 0.3 m。对应工况为 C1，C2，C3，C4。不同锚杆长度为 18 cm（对应原型值约为 1.5 m），36，42 cm。对应工况为 C5，C6，C7。

试验加载过程中，维持围岩侧压力系数为 1.0，均匀施加各个方向千斤顶压力至 2.0 MPa（换算至原型 24 MPa）。

3　试验结果分析

3.1　管片衬砌内力分布特征

（1）弯矩

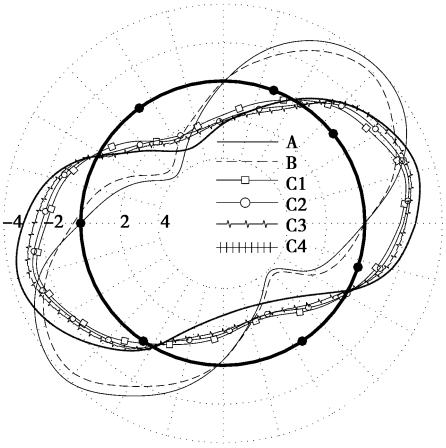
由于本次试验中管片衬砌相似模型是基于弹性阶段与原型结构相似，因此，管片衬砌结构弯矩和轴力在弹性阶段的试验结果与原型结构是呈比例关系[19]。以下管片衬砌内力分析均为模型值换算成原型后的结果。

如图 11 所示为不同工况下管片衬砌弯矩图，图 12 为各工况下管片衬砌最大正弯矩变化曲线。由图可见，壁后注浆（工况 A）和填充可压缩层（工况 B）下管片衬砌弯矩分布特征受层理面控制明显，最大正弯矩出现在层理面法线方向。其中，壁后填充可压缩层下管片衬砌弯矩要小于壁后注浆下弯矩，说明可压缩层的存在一定程度上吸收了围岩变形，削减了管片衬砌弯矩。

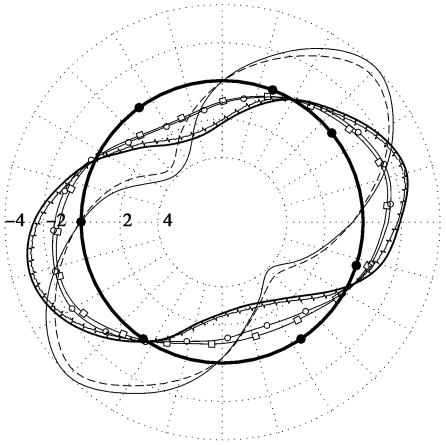
由图还可见，锚杆的存在一定程度上改变了弯矩分布规律，加锚杆后最大正弯矩出现在 110° 位置，而不是在层理面法线方向（135°）。对比还可见，锚杆的存在一定程度上削减了管片衬砌弯矩，同时锚杆的长度和间距对管片衬砌弯矩的削减程度影响较大。从图 11（a）可以看出，锚杆长度为 1.5 m 时，间距为 0.3 m 下，锚杆对管片衬砌弯矩削减程度为 7.3%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 下，削减程度依次为 6.1%，5.6%，3.3%。可见，锚杆长度为 1.5 m 时，弯矩量值并没有随锚杆间距的减小而得到明显削减。

从图 11（b）可以看出，锚杆长度为 3.0 m 时，锚杆间距为 0.3 m 下，锚杆对管片衬砌弯矩削减程度为 36%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 下，削减程度依次为 33%，15.0%，14.2%。可见，锚杆长度为 3.0 m 时，管片衬砌弯矩量值随锚杆间距的减小得到了明显的削减，其中间距为 0.3 m 和 0.5 m 时，削减程度明显。

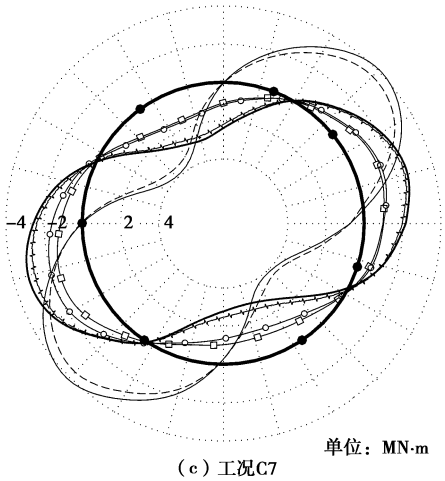
从图 11（c）可以看出，锚杆长度为 5.0 m 时，锚杆间距为 0.3 m 下，锚杆对管片衬砌弯矩削减程度为 38.5%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 下，削减程度依次为 34.8%，17.3%，15.8%。可见，相比 3.0 m 长锚杆，长度增加到 5.0 m 时，其对弯矩量值的削减并没有明显增加。



（a）工况C5



（b）工况C6



（c）工况C7

图 11 管片衬砌弯矩图

Fig. 11 Bending moments of segment linings

从图 12 可以看出，锚杆间距越小，长度越长对管片衬砌弯矩削减程度越大，同时，锚杆的长度和间距存在一个最优值，超过该最优值，锚杆的加固效果不再明显增加。如图 12 所示，锚杆长度为 3.0 m，间距为 0.5 m 时对于管片衬砌弯矩削减程度较高。

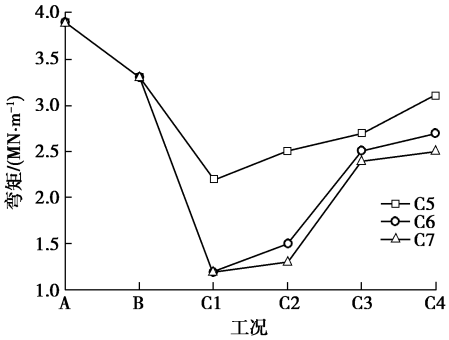


图 12 各工况下管片衬砌最大正弯矩变化曲线

Fig. 12 Variation curves of maximum positive bending moment of segment linings under various working conditions

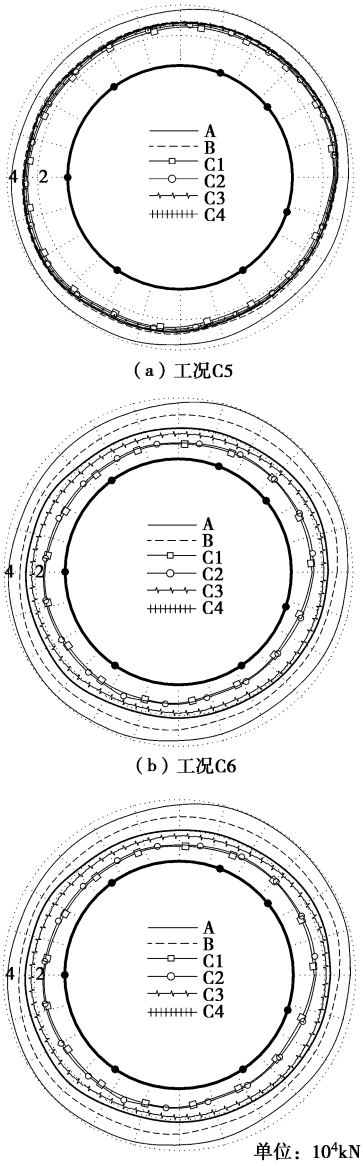
（2）轴力

如图 13 示为不同工况下管片衬砌轴力分布曲线，图 14 为各工况下管片衬砌最大轴力变化曲线。由图可见，壁后填充可压缩层（工况 B）下管片衬砌轴力要小于壁后注浆下轴力。可见，可压缩层的存在一定程度上削减了管片衬砌轴力，图还可见，锚杆的存在同样可以一定程度上削减管片衬砌轴力。锚杆长度为 1.5 m 时，不同锚杆间距下管片衬砌轴力分布规律类似。锚杆间距为 0.3 m 下，其对管片衬砌轴力削减程度为 6.2%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 下，削减程度依次为 5.8%，4.3%，2.2%。可见，锚杆长度为 1.5 m 时，管片衬砌轴力值并没有随锚杆间距的减小而得到明显削减。

从图 13（b）可以看出，锚杆长度为 3.0 m 时，

锚杆间距为 0.3 m 下，锚杆对管片衬砌轴力削减程度为 48%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 下，削减程度依次为 46%，31.0%，17.2%。可见，锚杆长度为 3.0 m 时，轴力量值随锚杆间距的减小得到了明显的削减，其中间距为 0.3，0.5 m 时，削减程度明显。

从图 13（c）可以看出，锚杆长度为 5.0 m 时，锚杆间距为 0.3 m 下，锚杆对管片衬砌轴力削减程度为 49.4%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 下，削减程度依次为 47.8%，32.6%，18.4%，可见，相比 3.0 m 长锚杆，长度增加到 5.0 m 时，其对轴力量值的削减并没有明显增加。



（a）工况C5

（b）工况C6

（c）工况C7

图 13 管片衬砌轴力图

Fig. 13 Axial forces of segment linings

从图 14 可以看出，锚杆长度为 3.0 m，间距为 0.5 m 时对于管片衬砌轴力削减程度较高，说明锚杆的长度和间距存在一个最优值，超过该最优值，锚杆的加固效果不再明显增加。

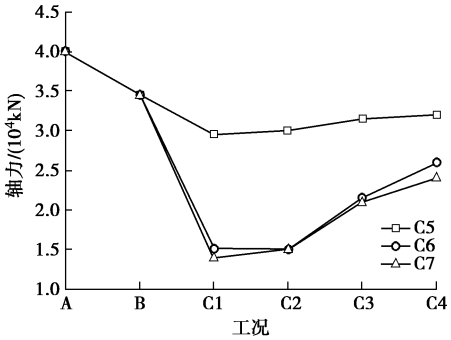


图 14 各工况下管片衬砌最大轴力变化曲线

Fig. 14 Variation curves of maximum axial force of segment linings under various working conditions

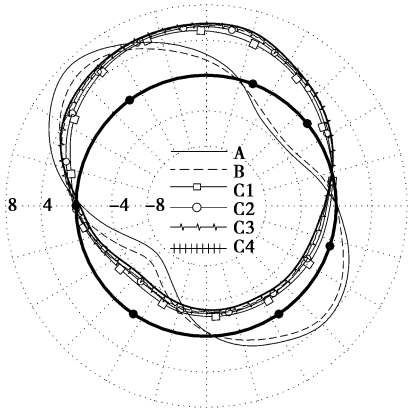
3.2　管片衬砌形变分布特征

如图 15 所示为不同工况下管片衬砌形变分布曲线，图 16 为各工况下管片衬砌最大形变量变化曲线。由图可见，壁后注浆（工况 A）和填充可压缩层（工况 B）下管片衬砌形变分布特征受层理面影响明显，管片衬砌发生不同程度的椭变，且最大椭变量位于层理面法线方向。其中，壁后填充可压缩层下管片衬砌形变量要小于壁后注浆下形变量，说明可压缩层的存在一定程度上吸收了围岩变形。

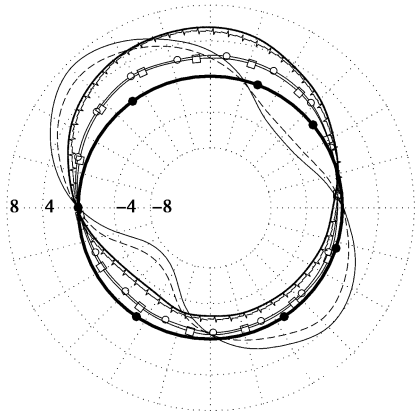
由图 15 还可见，锚杆的存在一定程度上改变了管片衬砌形变分布规律，加锚杆后最大形变量出现在 110° 位置，而不是在层理面法线方向（135°），这与弯矩分布规律相似。对比还可见，锚杆的存在一定程度上削减管片衬砌形变量，同时锚杆的长度和间距对形变量的削减程度影响较大。从图 15（a）可以看出，锚杆长度为 1.5 m 时，间距为 0.3 m 下，锚杆对管片衬砌形变量削减程度为 13.2%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 下，削减程度依次为 9.4%，4.3%，2.1%。可见，锚杆长度为 1.5 m 时，形变量并没有随锚杆间距的减小而得到明显削减。

从图 15（b）可以看出，锚杆长度为 3.0 m 时，间距为 0.3 m 时，锚杆对管片衬砌形变量削减程度为 62.0%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 时，削减程度依次为 58.0%，17.0%，16.5%。可见，锚杆长度为 3.0 m 时，管片衬砌形变量随锚杆间距的减小得到了明显的削减，其中间距为 0.3 m 和 0.5 m 时，削减程度明显。

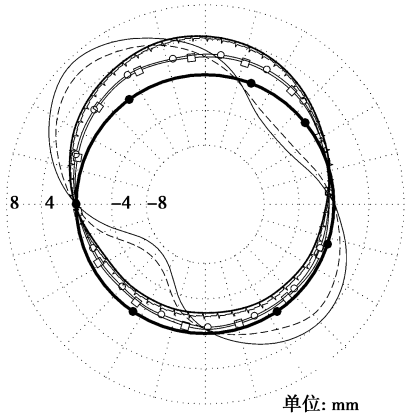
从图 15（c）可以看出，锚杆长度为 5.0 m 时，间距为 0.3m 时，锚杆对管片衬砌形变量削减程度为 60.5%，间距为 0.5，1.0，1.5 m 时，削减程度依次为 59.5%，18.8%，17.4%。可见，相比 3.0 m 长锚杆，长度增加到 5.0 m 时，其对管片衬砌形变量的削减并没有明显增加。



（a）工况C5



（b）工况C6



（c）工况C7

图 15 管片衬砌形变分布曲线

Fig. 15 Deformations of segment linings

从图 16 可以看出，锚杆长度为 3.0 m，间距为 0.5 m 时对于管片衬砌形变量削减程度较高，说明锚杆的长度和间距存在一个最优值，超过该最优值，锚杆的加固效果不再明显增加。

综上可见，壁后注浆（工况 A）和填充可压缩层（工况 B）下管片衬砌内力和形变分布特征受层理面控制明显，压缩层可以吸收围岩变形，削减管片衬砌内力和形变；锚杆的施做一定程度上改变了管片衬砌的内力分布形式，降低了围岩偏压，起到了加固围岩作用，进一步削减了管片衬砌内力和形变；锚杆长度为 3.0 m，间距为 0.5 m 时对于管片衬砌内力和形变削减程度较高，说明锚杆的长度和间距存在一个最优值，超过该最优值，锚杆的加固效果不再明显增加。

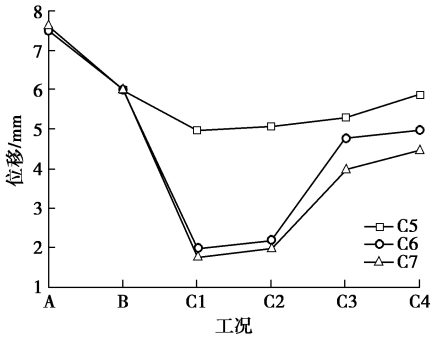


图 16 管片衬砌形变分布曲线

Fig. 16 Variation curves of maximum deformation of segment linings under various working conditions

3.3 联合支护作用机理

为探明联合支护作用机理，对管片衬砌壁后不同区域的泡沫颗粒进行染色以观测其变形路径和移动特征，如图 17 所示为染色后的效果图。

图 18 为工况 B 和工况 C5，C6，C7（锚杆间距 0.5 m）下泡沫颗粒的变形路径和移动特征。由图可见，不同工况下压缩层的颜色分区和厚度均发生了变化，颗粒不仅发生径向压缩还沿环向移动。其中，颗粒环向移动主要是由层理面法线侧向切线方向移动。

对比还可见，工况 B 下各颜色分区比例变化要明显大于 C5，C6，C7。工况 B 下层理面法线方向压缩层的环向长度明显大于工况 C5，C6，C7，而对应切线方向压缩层的环向长度明显小于工况 C5，C6，C7。说明工况 B 下围岩的形变量要大于况 C5，C6，C7，施作锚杆减小了围岩的形变量。对比工况 C5，C6，C7 可见，工况 C5 下各颜色分区比例变化要明显大于工况 C6，C7，而工况 C6，C7 下各颜色分区比例差异较小。说明工况 C5 下围岩变形量要大于工况 C6，C7，而工况 C6，C7 下的围岩变形量差异较小。

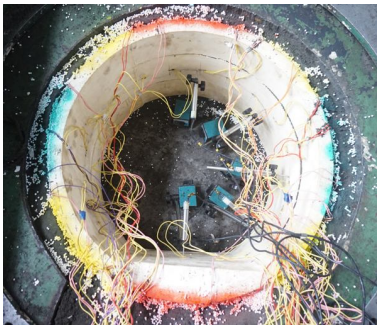


图 17 让压材料分区染色

Fig. 17 Partition dyeing of yield materials

综上可见，联合支护技术同时具备主动支护和适

度让压作用。联合支护机理由两部分构成：陶粒压缩层通过径向压缩和环向移动起到了让压作用；锚杆增加了围岩的抗剪能力，增强了围岩的稳定性。

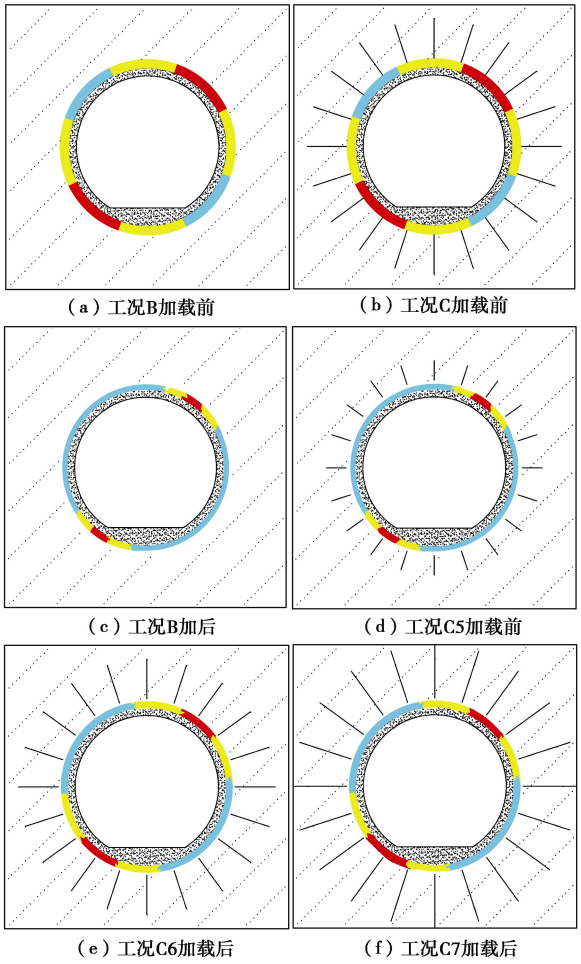


图 18 让压材料移动特征

Fig. 18 Motion characteristics of yield materials

4 结　　论

针对深部层状围岩管片衬砌易受偏压作用，开发了基于高阻让压、刚柔相济理念的管片衬砌配合陶粒可压缩层与锚杆的联合支护技术，采用大比例尺相似模型试验针对联合支护技术的支护效果进行研究，获得了如下结论：

（1）壁后注浆（工况A）和填充可压缩层（工况B）下管片衬砌内力和形变分布特征受层理面控制明显。压缩层可以吸收围岩变形，削减管片衬砌内力和形变。

（2）锚杆的施做一定程度上改变了管片衬砌的内力分布形式，降低了围岩偏压，起到了加固围岩作用，进一步削减了管片衬砌内力和形变。

（3）锚杆长度为1.5 m时，管片衬砌内力和形变并没有随锚杆间距的减小而得到明显削减；锚杆长度为3.0 m时，间距为0.3，0.5 m下对管片衬砌内力和形变削减作用明显，锚杆长度增加到5.0 m时，对管片衬砌内力和形变的削减作用并没有明显增加。即联合支护中锚杆的长度和间距存在一个最优值，超过该最优值，锚杆的加固效果不再明显增加。

（4）联合支护技术同时具备主动支护和适度让压作用。联合支护机理由两部分构成：陶粒压缩层通过径向压缩和环向移动起到了让压作用；锚杆增加了围岩的抗剪能力，增强了围岩的稳定性。

参考文献：

[1] 彭焱森. 陡倾层状岩体隧道开挖稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012. (PENG Yan-sen. Study on the stabilization of excavating the steep-dipping rock mass Tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))

[2] 刘恺德, 刘泉声, 朱元广, 等. 考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 308－316. (LIU Kai-de, LIU Quan-sheng, ZHU Yuan-guang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under brazilian splitting and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(2): 308－316. (in Chinese))

[3] 朱永全, 李文江, 赵　勇. 软弱围岩隧道稳定性变形控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (ZHU Yong-quan, LI Wen-jiang, ZHAO Yong. Deformation control technology of weak surrounding rock tunnel stability[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))

[4] 沙　鹏, 伍法权, 李　响, 等. 高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征[J]. 岩土力学, 2015, **36**(5): 1407－1414. (SA Peng, WU Fa-quan, LI Xiang, et al. Squeezing deformation in layered surrounding rock and force characteristics of support system of a tunnel under high in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5): 1407－1414. (in Chinese))

[5] 李树忱, 马腾飞, 蒋宇静. 深部多裂隙岩体开挖变形破坏规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 1933－1938. (LI Shu-chen, MA Teng-fei, JIANG Yu-jing, et al. Model tests on deformation and failure laws in excavation of deep rock mass with multiple fracture sets[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **30**(7): 1933－1938. (in Chinese))

[6] BOSSART P. WERMEILLE S. The stress field in the Mont Terri region-data compilation[C]// Mont Terri Project-

Geology, Paleontology, Stress Field. Swiss Geological Survey, Bern. Reports of the Federal Office for Water and Geology (FOWG), Geology Series. Bern, 2003, **4**: 65－92.

[7] BLÜMLING P, BERNIER F, LEBON P, et al. The excavation damaged zonein clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment[J]. Phys Chem Earth Parts A/B/C, 2007, **32**: 588－599.

[8] MYUNG S G, DUHEE P, JAEHO Y, et al. Experimental and numerical analyses of an opening in a jointed rock mass under biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, **48**(7): 1055－1067.

[9] BONINI M, BARLA G. The saint martin la porte access adit (Lyon-Tutin Base Tunnel) revisited[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, **30**: 38－54.

[10] 黄万朋. 深部巷道非对称变形机理与围岩流变及扰动变形控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012. (HUAGN Wan-peng. Analysis on the laws of deep tunnel's asymmetric deformation and control technology of surrounding rock's rheological and disturbed deformation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012. (in Chinese))

[11] 孙晓明, 何满潮, 杨晓杰. 深部软岩巷道锚网索耦合支护非线性设计方法研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(7): 1061－1065. (SUN Xiao-ming, HE Man-chao, YANG Xiao-jie. Research on nonlinear mechanical design method of bolt-net-anchor coupling support for deep soft rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(7): 1061－1065. (in Chinese))

[12] ANAGNOSTOU G, CANTIENI L. Design and analysis of yielding support in squeezing ground[C]// 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. Lisbon, 2007: 829－832.

[13] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. Tunnel boring machines undersqueezing conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010b, **25**(2): 139－157.

[14] YU Yang, BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu, et al. High-resistance controlled yielding supporting technique in deep-well oil shale roadways[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, **24**(2): 229－236.

[15] 韩昌瑞, 白世伟, 王玉朋, 等. 层状岩体深埋长隧道锚杆支护优化设计[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 1): 409－414. (HAN Chang-rui, BAI Shi-wei, WANG Yu-peng, et al. Optimum design of rock bolts supporting long-deep tunnel in layered surrounding rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S1): 409－414. (in Chinese))

[16] 熊 亮. 层状围岩隧道稳定性及锚杆支护参数优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (XIONG Liang. Layered rock stability and bolt support parameter optimization of tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))

[17] 地盘工学会.シールドトンネルの新技術[M]. 东京: 鹿岛出版社, 1997. (Research Association on New Shield Tunnology. New technology in shield tunneling[M]. Tokyo: Kajima Institute Publishity Co. Ltd. 1998. (in Japanese))

[18] 同济大学. 可模拟盾构隧道管片接头的试验模型及其制作方法: 中国, 200810038954.6[P]. 2008-10-3. (Tongji University. Trial model capable of simulating shield tunnel pipe slice joint and manufacturing method thereo：China，200810038954.6[P]. 2008-10-3. (in Chinese))

[19] 王士民, 于清洋, 彭 博, 等. 封顶块位置对盾构隧道管片结构力学特征与破坏形态的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **49**(6): 123－132. (WANG Shi-min, YU Qing-yang, PENG Bo, et al. Analysis of mechanical characteristics and failure pattern of shield tunnel segment with different position of key block[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(6): 123－132. (in Chinese))