

DOI: 10.11779/CJGE201607020

# 深井大型硐室厚坚硬底板破坏机理及控制技术

王树立<sup>1</sup>, 张开智<sup>2</sup>, 蒋金泉<sup>3</sup>, 夏均民<sup>3</sup>, 朱光丽<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 贵州理工学院矿业工程学院, 贵州 贵阳 550003;

3. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 泰安 271002)

**摘要:** 针对深井大型硐室厚坚硬底板底鼓难题, 以千米深井唐口煤矿绞车房硐室为工程实例, 研究底板破坏机理: 深井大型硐室厚坚硬底板开挖初期表现出明显的分层屈曲损伤破坏特征, 随后在高应力作用下沿损伤破坏面滑移错动鼓起; 以薄板屈服理论推导了底板屈曲破坏临界载荷。以控制厚坚硬底板的屈曲损伤破坏为出发点, 基于硐室底板整体加固控制原则, 提出了底板组合桩基群加固治理技术: 以反底拱技术为基础, 借助底板横向组合钢梁及双层链接钢筋网, 辅以混凝土整体浇筑组合形成底板强基础梁结构, 均衡底板受力, 防止局部地点高应力集中; 以高预应力锚索束和高压封闭注浆技术胶结加固围岩形成底板组合桩结构, 阻断围岩应力向底板传递和转移; 最终形成多排锚索束张拉强基础梁的组合桩基群结构, 现场应用效果良好。研究成果对于当下日益加深的深部大型硐室及大型地下空间支护具有一定的指导和借鉴意义。

**关键词:** 深井大型硐室; 厚坚硬底板; 屈曲破坏; 滑移错动; 强基础梁; 锚索束

**中图分类号:** TD354      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2016)07-1316-08

**作者简介:** 王树立(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事深部地下空间支护、冲击地压等方面的研究工作。E-mail: skdwangshuli@163.com。

## Damage and control mechanism of thick and hard floor of large chamber in deep mines

WANG Shu-li<sup>1</sup>, ZHANG Kai-zhi<sup>2</sup>, JIANG Jin-quan<sup>3</sup>, XIA Jun-min<sup>3</sup>, ZHU Guang-li<sup>1</sup>

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Institute of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-Founded by Shandong Province and Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271002, China)

**Abstract:** Aiming at the floor heave problem of thick and hard floor of large chamber in deep mines the winch room in Tangkou Mine about a kilometer in depth is taken as an engineering case, and the damage mechanism of thick and hard floor is studied. In early excavation, the floor sustains obvious layered damage by buckling and then slides and moves along damage fracture surface under the action of high ground stress. The critical load for damage by buckling is derived based on buckling theory of thin plate. For controlling the damage by buckling of floor, based on the principle of strength and control of the whole floor, the technology of composite piles and foundation of thick and hard floor in large chamber is proposed as follows: based on inverted arch and combined transverse steel beams and chained double reinforcing meshes, concrete is poured to form strong foundation beam so as to balance the force and prevent stress concentration of floor. The combined anchor wires and high-pressure grouting are used to form composite piles to block the floor stress to transfer from the surrounding rock and to balance the stress. Finally composite piles and foundation are formed, and the efficiency of engineering application is satisfactory. The research may be helpful to controlling large chambers in deep mines and large underground spaces.

**Key word:** large chamber in deep mine; thick and hard floor; damage by buckling; slippage and moving; strong foundation beam; anchor wire

## 0 引言

当前浅部煤炭资源日益减少, 矿井开采深度逐年增加, 尤其是老牌煤炭生产基地, 如山东矿区, 预计

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374139, 51564004, 51574155); 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM018); 山东科技大学研究生创新基金项目(YC150313); 山东科技大学校友创业创新扶持项目

收稿日期: 2015-10-19

2020年绝大部分矿井将步入千米开采行列。矿井进入深部后,受高地应力和岩体表现出的弱软岩性质影响,巷道支护困难重重;尤其是绞车房、井底车场、变电所等大型硐室的底鼓难题更是日渐突出<sup>[1-2]</sup>。工程实际中为增加深井大型硐室的稳定性,往往将硐室布置在厚坚硬岩层中,虽取得了一定的效果,但硐室一旦破坏,返修更加困难、工程量更大。当下深部大型硐室的安全稳定已成为制约深部煤炭安全高效开采的重要因素之一。

针对不同地质条件下的底鼓问题,众多学者以不同的方法分析其破坏机理,提出了多种治理技术和方法。柏建彪等提出了采动巷道底鼓的“两点三区”特征,从降低围岩应力出发采用全长锚固水力膨胀锚杆加固底板<sup>[3]</sup>;阚甲广等<sup>[4]</sup>、安智海等<sup>[5]</sup>对破碎岩层及泥岩条件下的巷道底板破坏机理和控制技术进行了研究;何满潮分析了软岩条件下的巷道底鼓机理并提出了相应的控制措施<sup>[6]</sup>;姜耀东等对深井软岩巷道的底鼓类型和控制进行了分析和探讨<sup>[7]</sup>、张开智等<sup>[8]</sup>、樊克恭等<sup>[9]</sup>从控制巷道全断面围岩出发提出了壳体及非均称支护理论。其他相关学者也从不同的角度提出了大量底板控制技术,如加固两帮,沿底板帮角钻孔卸压等等<sup>[10-11]</sup>。综上可见,当下对底鼓机理的研究主要针对小断面巷道,且多数从软弱岩层的角度出发,以岩梁及朗肯理论分析底板破坏机理和过程;未对深井厚坚硬岩层条件下的大型硐室底鼓破坏机理进行研究和探讨。对于底板加固控制,也以单一技术为主,不能有效保证硐室安全稳定。深井大型硐室服务年限长,一旦破坏对生产制约影响程度大,而底板是整个硐室稳定的基础,为此必须对深井大型硐室厚坚硬底板破坏机理和控制技术进行深入研究。

本文以千米深井唐口煤矿绞车房为工程实例,针对硐室厚坚硬底板以薄板屈服理论分析其屈曲滑移错动破坏机理和过程;以反底拱技术为基础,结合注浆加固、横向组合钢梁、超长高预应力锚索束等技术在底板组合形成桩基群结构控制底板。研究成果对于实现硐室的安全稳定,保证深部煤炭的安全高效开采具有一定的指导和借鉴意义。

## 1 工程概况

唐口煤矿2 m绞车房硐室位于西轨并联巷上部车场附近,标高-950 m,深度达千米,如图1所示。邻近的西轨并联巷地应力:最大主应力27.91 MPa,水平应力19.9 MPa,高地应力明显。绞车房为直墙半圆拱形断面,最大设计开挖断面宽9800 mm,高7300 mm。

绞车房布置在厚坚硬细砂岩中,岩层近似成水平,倾角在5°左右;层理面发育、分层明显,各分层厚度0.1~1.2 m不等,平均0.5 m;岩层厚度22.24 m,抗压强度28.38 MPa,泊松比0.13,弹性模量23.04 GPa;硐室底板距下层粗砂岩7 m左右。硐室开挖后全断面围岩破碎,尤其是底板破坏严重、鼓起量大,最大可达2 m,破坏情况如图2所示。



图1 绞车房硐室平面位置图

Fig. 1 Layout of winch room



图2 硐室底板破坏鼓起情况

Fig. 2 Damage situation of floor

## 2 厚坚硬底板屈曲滑移错动破坏机理

底板破坏鼓起一般是由于围岩力学状态改变而导致岩石体卸压变形、扩容,以及围岩长期在高应力作用下发生流变等引起<sup>[12]</sup>。就大型硐室厚坚硬底板而言,受制于岩层硬度强、厚度大,及在岩层沉积形成过程中的分层影响,开挖初期底板在水平应力作用下受竖向应力影响逐层发生屈曲损伤破坏,产生纵横交错的损伤破坏面;随后在高应力作用下沿损伤破坏面发生滑移错动破坏鼓起。

### 2.1 厚坚硬底板屈曲破坏机理

大断面硐室底板岩层长宽比小,忽略硐室轴向影响,取硐室剖面以岩梁及朗肯理论分析研究底板破坏机理,存在一定的弊端和误差。尤其针对厚坚硬底板,岩层完整性好,应将整个硐室底板看作是一个整体,以薄板的相关理论研究其破坏机理。根据材料力学的相关理论,梁杆两端受较大水平挤压力时,会发生屈曲破坏;同样对于硐室厚坚硬底板岩层,当作用于岩板的水平载荷较大时,岩板内将产生中面内力。中面内力大小及底板外部载荷状态将决定底板稳定性<sup>[13]</sup>。

当底板岩层受到的水平挤压力较小, 即中面内力较小时, 底板岩层处于稳定的平衡状态, 要打破这种平衡状态, 必须受到较大的外部载荷作用(如高竖向应力或动载荷); 如果外部载荷达不到底板岩层的破坏临界载荷(抗拉、抗压、抗剪强度极限等), 底板岩层虽然存在一定的微小弯曲, 但仍将保持稳定状态。当水平挤压力较大, 即中面内力达到岩层的屈服临界载荷, 岩层的平衡状态被打破; 同时受外部干扰载荷作用, 岩层将发生屈曲破坏并产生损伤破坏面; 即使没有外部干扰载荷, 随着底板岩层弯曲程度不断加大, 最终也将导致底板岩层失稳破坏。因此确定硐室厚坚硬底板岩层的屈曲破坏临界载荷, 对分析底板岩层破坏机理及其控制至关重要。

### (1) 厚坚硬底板岩层初次屈曲破坏临界载荷

深井大型硐室开挖后, 受高地应力作用, 硐室底板四周一定范围内的岩层被压塑破坏, 产生一定范围的塑性区, 阻断硐室底板岩层与外部原岩应力区(弹性区域)的联系, 同时高垂直应力将向两侧围岩深部转移。由此可将硐室底板岩层视为四边简支的整体薄板, 四周受水平挤压力及竖向载荷作用<sup>[14]</sup>。假设硐室底板的长度 $b$ , 宽度 $a$ , 受到水平挤压力 $P_x$ ,  $P_y$ 及竖向载荷 $q$ 作用, 如图3所示。

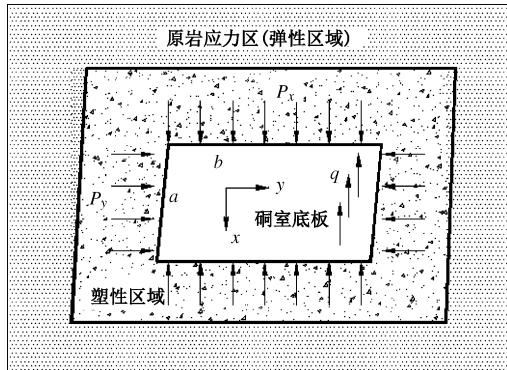


图 3 硐室底板四边简支受水平挤压力模型

Fig. 3 Simply supported four-sides plate under horizontal load

根据薄板屈曲理论<sup>[15]</sup>:

$$D\nabla^4 w = q + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial xy} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad (1)$$

中面内力:  $N_x = -P_x$ ,  $N_y = -P_y$ ,  $N_{xy} = 0$ ,

挠曲方程:

$$D\nabla^4 w + P_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + P_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

取挠度的表达式  $w = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$  则

$$w = \sum_m \sum_n A_{mn} \left\{ \left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{P_x}{D\pi^2} \left( \frac{m}{a} \right)^2 - \frac{P_y}{D\pi^2} \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right\}.$$

$$\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = 0, \quad (3)$$

$$\text{必有} \left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{P_x}{D\pi^2} \left( \frac{m}{a} \right)^2 - \frac{P_y}{D\pi^2} \left( \frac{n}{b} \right)^2 = 0,$$

或

$$\frac{P_x}{D\pi^2 \left( m \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{mb} \right)^2} + \frac{P_y}{D\pi^2 \left( n \frac{a}{b} + m^2 \frac{b}{na} \right)^2} = 1. \quad (4)$$

式中  $m, n$  为薄板弯曲时的半波数,  $D$  为板的抗弯刚度,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 。

近似认为  $P_x = P_y$ , 则当  $m = n = 1$  时得最小屈服临界载荷:

$$(P_x)_{cr} = (P_y)_{cr} = \frac{\pi^2 D}{a^2} \left( 1 + \frac{a^2}{b^2} \right). \quad (5)$$

根据绞车房硐室的具体情况及底板岩层断裂角, 可近似认为宽度  $a = 12$  m, 硐室长度  $b = 50$  m, 底板岩层分层厚度  $0.1 \sim 1.2$  m; 则底板破坏临界载荷  $(P_x)_{cr} = (P_y)_{cr} = 141.6h^3 = 0.14 \sim 244.68$  MPa, 平均破坏临界载荷  $P_{cr} = 17.7$  MPa。

屈曲破坏临界载荷与岩层的抗弯刚度、厚度等有关; 尤其是岩层厚度, 岩层的完整性越好, 层理面越少, 厚度越大, 屈服破坏载荷越大。图4为不同岩层厚度下的屈曲破坏临界载荷, 当分层厚度小于  $0.6$  m 时, 屈曲破坏临界载荷较小, 其后随分层厚度增加临界载荷迅速增大, 由此可见厚坚硬底板岩层的分层情况是影响临界屈服载荷的主要因素。

绞车房底板岩层受到的水平挤压力  $19.9$  MPa, 大于屈曲临界载荷, 底板岩层发生屈曲破坏, 将首先沿硐室轴向产生损伤破坏面, 形成相互铰接的岩板。

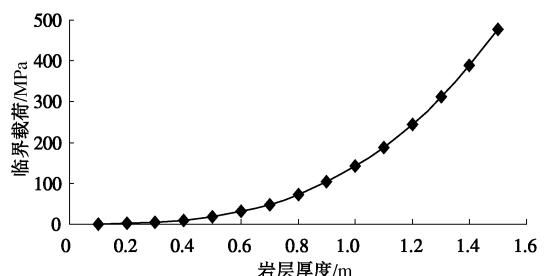


图 4 厚坚硬底板岩层初次屈曲破坏临界载荷

Fig. 4 First buckling damage stress of thick and hard floor

### (2) 厚坚硬底板岩层连续屈曲破坏临界载荷

底板岩层初次屈曲破断后, 底板产生挠度较小, 形成相互铰接的岩板; 同时底板岩层轴向水平挤压力向底板深部转移, 可近似认为作用于底板岩层的  $P_y = 0$ 。此时底板为受竖向载荷  $q$  及对边水平挤压力  $P_x$  作用的四边简支薄板, 如图5所示。

依据弹性力学平面问题理论<sup>[14]</sup>:  $\sigma_x = -\frac{P_x}{h}$ ,

$\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ 。中面力:  $N_x = -P_x$ ,  $N_y = N_{xy} = 0$ 。

挠曲微分方程:

$$D\nabla^4 w + p_x \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad . \quad (6)$$

取挠度方程  $w = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a_0} \sin \frac{n\pi y}{b_0}$ , 则

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left[ D \left( \frac{m^2}{a_0^2} + \frac{n^2}{b_0^2} \right)^2 - p_x \frac{m^2}{\pi a_0^2} \right] \sin \frac{m\pi x}{a_0} \sin \frac{n\pi y}{b_0} \quad . \quad (7)$$

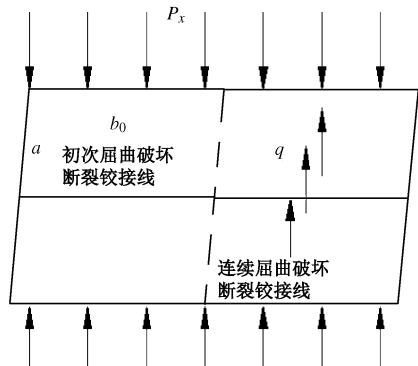


图5 硐室底板四边简支对边受水平挤压力模型

Fig. 5 Simply supported plate under horizontal load at opposite side  
必有

$$A_{mn} \left[ D \left( \frac{m^2}{a_0^2} + \frac{n^2}{b_0^2} \right)^2 - p_x \frac{m^2}{\pi a_0^2} \right] = 0 \quad , \quad (8)$$

则临界载荷

$$(P_x)_{cr} = \frac{D\pi^2 a_0^2}{m^2} \left( \frac{m^2}{a_0^2} + \frac{n^2}{b_0^2} \right)^2 \quad , \quad (9)$$

当  $n=1$ ,  $m=\frac{a_0}{b_0}=1$  时, 即  $a_0=b_0$  得最小临界破坏载

荷:  $(P_x)_{cr} = 3.87 \times 10^4 h^3 = 38.7 \sim 66900 \text{ MPa}$ 。

随着底板岩层的逐次屈曲破坏断裂, 底板岩层单块面积减小, 屈曲临界载荷逐渐增大; 水平载荷将不能导致底板岩层发生屈曲破坏, 最终形成多块连续铰接的岩板, 并形成大量的损伤破坏面。底板岩层屈曲破坏过程中, 坚向载荷的作用将导致岩层的损伤破坏更迅速、更剧烈, 但在整个屈曲破坏过程中底板产生的挠度较小、破坏鼓起量小。

## 2.2 厚坚硬底板滑移错动破坏鼓起机理

厚坚硬底板岩层在屈曲破断后, 完整性遭到破坏, 岩层内部形成大量贯通损伤破坏面, 导致底板岩层抵抗力减弱; 在高地应力及水平应力作用下, 底板岩层将沿着损伤破坏面及岩体不连续面产生滑移错动破坏鼓起, 如图6所示。

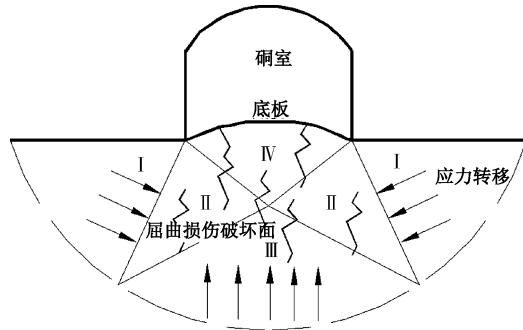


图6 硐室底板滑移错动破坏鼓起过程

Fig. 6 Process of slippage and moving of chamber floor

硐室底板范围内 I 区围岩在两帮垂直应力作用下挤压 II 区围岩; III 区围岩受 II 区围岩挤压和下部岩层的共同作用向上产生挤压变形; I, II, III 区域内围岩体共同作用于硐室浅部底板 IV 内的围岩体, 导致底板沿损伤破坏面的滑移错动破坏鼓起<sup>[16]</sup>。

## 3 组合桩基群底板加固控制技术

### 3.1 厚坚硬底板组合桩基群加固技术

深井大断面硐室厚坚硬底板破坏归根结底是底板岩层屈曲破坏后, 在高应力作用下沿破坏面滑移错动鼓起, 即底板不能承受高强度荷载、弯拉强度不够所致。因此必须将底板加固形成封闭性的整体结构, 在能够抵抗破坏应力的同时, 阻断两帮和深部围岩向底板传递和转移应力。考虑到建筑、岩土工程中的基础梁结构能够承受较大弯矩, 桩结构能够承受较大竖向荷载, 可在底板成形类似于桩张拉基础梁的组合结构, 能够有效抵御底板破坏载荷, 降低应力集中, 均衡底板受力<sup>[17-18]</sup>。在此基础上提出了深井大型硐室厚坚硬底板组合桩基群加固控制技术, 如图7所示。

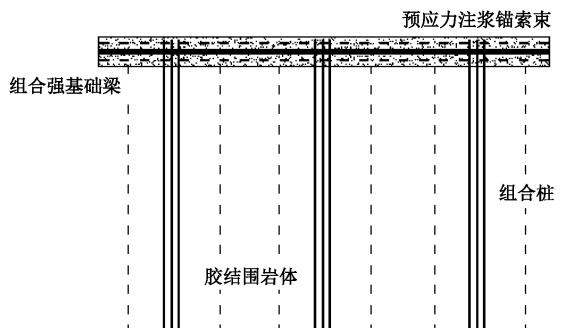


图7 大型硐室厚坚硬底板组合桩基群加固控制技术

Fig. 7 Technology of composite piles and foundation

首先, 对硐室底板一定范围内的破坏围岩体进行注浆加固, 使围岩体重新胶结形成整体; 其次, 以反底拱 U 型钢梁为基础, 应用高强度横向组合钢梁及双层链接钢筋网, 并辅以整体混凝土浇筑, 组合形成强基础梁结构; 最后应用高预应力注浆锚索束胶结围岩体形成桩结构, 并张拉强基础梁。在三重措施下, 形



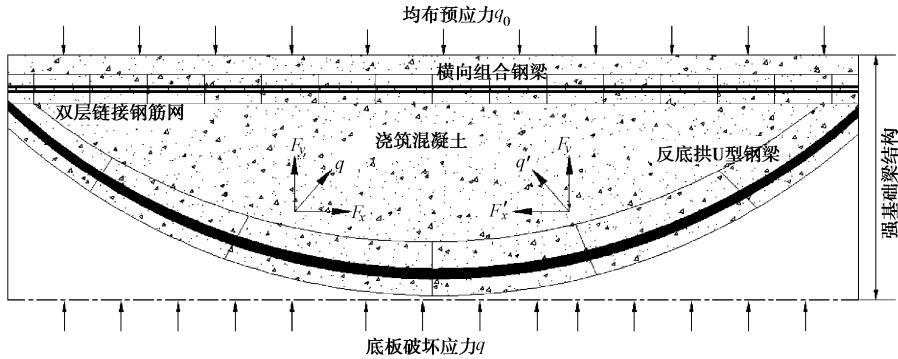


图 8 强基础梁底板加固控制机理

Fig. 8 Mechanism of strong beams

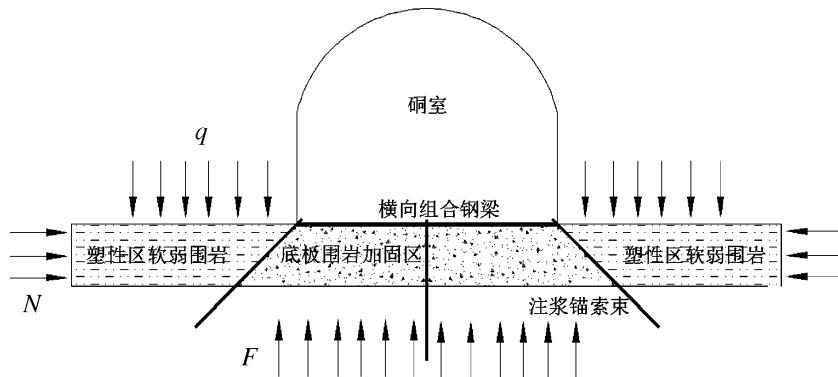


图 9 高预应力注浆锚索束应力阻断机理

Fig. 9 Mechanism of composite piles to block floor stress

成了类似于桩张拉强基础梁的组合桩基群结构。

### 3.2 强基础梁底板加固控制机理

深井大型硐室厚坚硬底板强基础梁加固结构以反底拱U型钢、横向组合钢梁及双层链接钢筋网为骨架，整体浇筑混凝土形成，具有极强的抗弯拉、承重能力，具体结构及加固控制机理如图8所示。

反底拱U型钢能够将底板破坏载荷以硐室轴线为中心汇聚成垂直于拱面的 $q$ 和 $q'$ ，平衡破坏水平分力 $F_x$ 和 $F'_x$ ，降低破坏载荷。横向组合钢梁强度高、抗弯拉能力强，能够承受较高的载荷，平衡底板水平破坏载荷的同时保持自身稳定；而且为锚索束施加高预应力提供受力支撑点，将锚索束点载荷转化线载荷，增加预应力在底板的作用面积，有效抵抗底板竖向破坏载荷 $F_y$ 和 $F'_y$ 。双层链接钢筋网辅以混凝土浇筑将底板各支护构件链接形成整体结构，防止底板存在明显弱点；使各结构一体化，均衡受力，防止支护结构被逐个击破，保证各个支护构件间的强度(strength)、刚度(stiffness)和结构(structure)耦合，即3S耦合。

### 3.3 锚索束(组合桩)底板加固控制机理

现有的单根端部锚固锚杆索支护技术，虽然施工简单方便，但存在支护阻力小，在高应力作用下容易拉断和剪断；尤其在厚坚硬底板条件下，围岩的相互

错动剪切作用强，锚杆索极易被剪切破坏。高预应力注浆锚索束，能够提供较高预应力的同时，多根锚索组合形成的锚索束抗破断能力强；注浆使锚索束与围岩胶结形成统一的整体，形成类似桩结构抗剪切能力强<sup>[19-20]</sup>。组合桩对底板的加固控制机理具体表现在强化围岩、阻断围岩应力传递、削弱底板受力及组合加固底板分层岩层4个方面。

#### (1) 强化围岩

向底板破碎围岩体高压注入加固浆液，浆液扩散半径大，很大程度上能够胶结破碎围岩及底板各分层岩层，将破碎底板重新形成“硬”结构，提高底板岩层力学性质增强围岩自承载能力。

#### (2) 阻断应力传递和转移

在硐室底板帮角岩层断裂的情况下，沿破断弱面实施高预应力注浆锚索束，将底板破断围岩与外层围岩有效隔断，形成“软+硬+软”的结构。一方面防止外层围岩直接作用于底板岩体，阻止岩层的“应力传递转移破坏”现象；另一方面，注浆形成的隔断“硬”结构强度高，泊松比值小，能够承受较大的载荷，如图9所示。

#### (3) 削弱底板应力

硐室底板围岩受到外层围岩的水平应力N和竖向

应力  $F$  作用, 组合桩结构将明显削弱和改善硐室底板围岩受力状态, 如图 10 所示。

水平应力分解为沿组合桩结构的轴向和法向力:

$$\begin{cases} N_1 = F \cos \theta, \\ N_2 = F \sin \theta. \end{cases} \quad (10)$$

对于垂直应力:

$$\begin{cases} F_1 = F \sin \theta, \\ F_2 = F \cos \theta. \end{cases} \quad (11)$$

则沿组合桩结构的轴向力  $Q_1$  和法向力  $Q_2$ :

$$\begin{cases} Q_1 = F_1 + N_1 = F \sin \theta + N \cos \theta, \\ Q_2 = F_2 + N_2 = |F \cos \theta - N \sin \theta|. \end{cases} \quad (12)$$

组合桩能够将作用于结构的法向力平衡, 同时将岩层的水平压应力转变为结构的轴向拉应力, 与锚索施加于底板的均匀预应力平衡; 明显削弱底板破坏应力, 降低底板受拉弯曲程度。

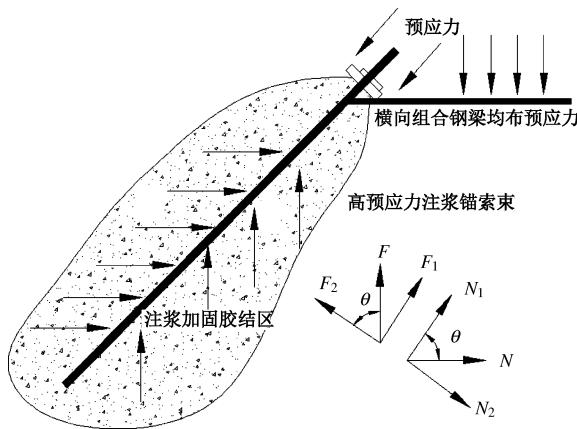


图 10 高预应力注浆锚索束削弱底板应力机理

Fig. 10 Mechanism of composite piles to weaken stress

#### (4) 组合加固

通过高预应力注浆锚索束将厚坚硬底板各岩层分层“串联”形成整体的厚组合梁, 锚固于深部稳定围岩, 防止各岩层分层被逐一屈曲滑移错动破坏<sup>[21]</sup>。厚组合梁相比于单一岩层分层, 其弯曲应变、应力及挠度大大减小, 层间摩擦阻力增大, 整体强度提高。

## 4 工程应用

以深井大型硐室厚坚硬底板破坏机理及组合桩基群加固支护技术为指导, 根据唐口煤矿绞车房工程实际, 对绞车房实施加固治理。选用 HRB335  $\phi 20$  mm 的钢筋编织双层钢筋网, 网格尺寸 300 mm  $\times$  300 mm, 双层钢筋网敷设层间距 400 mm。反底拱选用 29U 型钢, 布置在双层钢筋网中间。采用矿用#12 工字钢加工横向组合钢梁, 焊接点均采用破口焊接, 具体如图 11 所示。

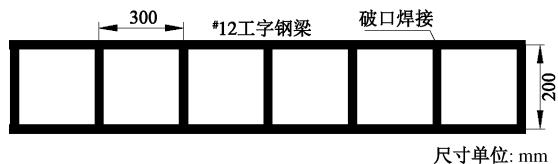


图 11 横向组合钢梁结构

Fig. 11 Structure of combined steel beams

高预应力注浆锚索束为 3 根  $\phi 17.8$  mm、长 12.5 m 的钢绞线组合而成。横向组合钢梁及锚索束均采用排式布置, 排距 2 m; 锚索束每排 3 组, 沿硐室中心轴线一组, 两侧锚索束距帮角 1.0~1.5 m (可根据现场情况适当调整); 中间锚索束垂直底板, 两侧锚索束外摆 15°; 预埋锚索束注浆管, 高压封闭注浆压力不小于 6 MPa, 单根锚索施加预应力不小于 120 kN, 底板加固布置方案如图 12 所示。为保证硐室的整体安全稳定, 硐室顶板及两帮以 U 钢棚+钢网为骨架, 混凝土浇筑形成整体支护结构。

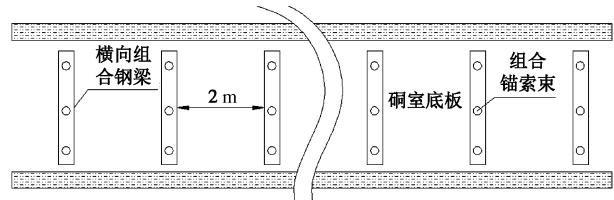


图 12 硐室底板加固方案

Fig. 12 Control plan of chamber floor

现场监测表明硐室底板控制效果良好, 未出现鼓起破坏, 顶底板最大移近量 64 mm, 两帮最大移近量 67 mm, 硐室现场施工及支护效果如图 13 所示。



(a) 现场施工图

(b) 治理效果图

图 13 底鼓治理施工现场及效果

Fig. 13 Construction site and effect of floor heave

## 5 研究结论

(1)研究分析了深井大型硐室厚坚硬底板屈曲滑移错动破坏鼓起机理: 初期在高水平应力作用下发生屈曲破坏, 产生损伤破坏面, 坚向载荷加大底板屈曲破坏程度, 底板整体挠度小、鼓起量小; 后期沿损伤破坏面滑移错动破坏鼓起, 破坏鼓起量大。

(2)推导了厚坚硬底板的初次屈曲及连续屈曲破坏临界载荷, 临界载荷与岩层的抗弯刚度、厚度等有关, 底板岩层的分层情况及厚度是影响临界载荷的主

要因素。

(3) 提出深井大断面硐室厚坚硬底板组合桩基群加固控制技术：以反底拱 U 型钢、横向组合钢梁及双层链接钢筋网作为骨架，整体浇筑混凝土形成底板强基础梁；以锚索束及高压封闭注浆加固胶结围岩形成组合桩，两者组合形成类似于桩张拉强基础梁的组合桩基群结构。

(4) 强基础梁抗弯拉、承重能力强，能够有效均衡和抵御底板破坏载荷，加大锚索束预应力在底板的作用面积；组合桩抗拉拔、剪切能力强，能够降低和抵御顶板破坏载荷，将底板分层串联加固形成整体。通过钢筋网将各构件链接在一起，实现各构件的强度(strength)、刚度(stiffness) 和结构(structure) 的耦合协同作用。

(5) 现场应用证明深井大型硐室厚坚硬底板组合桩基群加固治理技术是可行和有效的，能够为深部巷道、大型硐室、大型地下空间的支护控制提供指导和借鉴。

## 参考文献：

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803 – 2814. (HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803 – 2814. (in Chinese))
- [2] 贺永年, 韩立军, 邵鹏, 等. 深部巷道稳定的若干岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 288 – 295. (HE Yong-nian, HAN Li-jun, SHAO Peng, et al. Some problems of rock mechanics for roadways stability in depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 288 – 295. (in Chinese))
- [3] 柏建彪, 李文峰, 王襄禹, 等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 1 – 5. (BAI Jian-biao, LI Wen-feng, WANG Xiang-yu, et al. Mechanism of floor heave and control technology of roadway induced by mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 1 – 5. (in Chinese))
- [4] 阚甲广, 张农, 李桂臣, 等. 泥化巷道底板控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 356 – 360. (KAN Jia-guang, ZHANG Nong, LI Gui-chen, et al. Floor controlling technology of argillization roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 356 – 360. (in Chinese))
- [5] 安智海, 张农, 倪建明, 等. 朱仙庄煤矿松软破碎岩层巷道底鼓控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 263 – 267. (AN Zhi-hai, ZHANG Nong, NI Jian-ming, et al. Floor heave control technique for broken soft rock roadway in zhu xianzhuang mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 263 – 267. (in Chinese))
- [6] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409 – 1417. (HE Man-chao. Program and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409 – 1417. (in Chinese))
- [7] 姜耀东, 王宏伟, 赵毅鑫, 等. 极软岩回采巷道互补控制支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2383 – 2390. (JIANG Yao-dong, WANG Hong-wei, ZHAO Yi-xin, et al. Study of complementary supporting technology of extremely soft rock mining roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2383 – 2390. (in Chinese))
- [8] 张开智, 夏均民, 蒋金泉. 软岩锚杆强壳体支护结构及合理参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 668 – 672. (ZHANG Kai-zhi, XIA Jun-min, JIANG Jin-quan. Structure and application of strong shell-body support in soft rock roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 668 – 672. (in Chinese))
- [9] 樊克恭, 蒋金泉. 弱结构巷道围岩变形破坏与非均称控制机理[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 54 – 59. (FAN Ke-gong, JIANG Jin-quan. Deformation failure and non-harmonious control mechanism of surrounding rocks of roadways with weak structures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1): 54 – 59. (in Chinese))
- [10] 王卫军, 冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 808 – 811. (WANG Wei-jun, FENG Tao. Study on mechanism of reinforcing sides to control floor heave of extraction opening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 808 – 811. (in Chinese))
- [11] 李学华, 黄志增, 杨宏敏, 等. 高应力硐室底鼓控制的应力转移技术[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 296 – 300. (LI Xue-hua, HUANG Zhi-zeng, YANG Hong-min, et al. Stress transfer technique of controlling chambers floor heave under high mining stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3): 296 – 300. (in Chinese))
- [12] 柏建彪, 侯朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 145 – 148. (BAI Jian-biao, HOU Chao-jiong. Control principle of surrounding rocks in

- deep roadway and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, **35**(2): 145 - 148. (in Chinese))
- [13] 牛双建, 靖洪文, 张忠宇, 等. 深部软岩巷道围岩稳定控制技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(6): 914 - 919. (NIU Shuang-jian, JIGN Hong-wen, ZHANG Zhong-yu, et al. Study on control technology of surrounding rocks in deep soft roadway and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(6): 914 - 919. (in Chinese))
- [14] 陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Ming-xiang. Elastic-plastic mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 何福保, 沈亚鹏. 板壳理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993. (HE Fu-bao, SHEN Ya-peng. Theory of plate and shell[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1993. (in Chinese))
- [16] 刘泉声, 刘学伟, 黄兴, 等. 深井软岩破碎巷道底臌原因及处置技术研究[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(4): 566 - 571. (LIU Quan-sheng, LIU Xue-wei, HUANG Xing, et al. Research on the floor heave reasons and supporting measures of deep soft-fractured rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(4): 566 - 571. (in Chinese))
- [17] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000. (ZHAO Ming-hua. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [18] 杨本生, 高斌, 孙利辉, 等. 深井软岩巷道连续“双壳”治理底鼓机理与技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, **31**(4): 587 - 592. (YANG Ben-sheng, GAO Bin, SUN Li-hui, et al. Study on technology and mechanism of continuous “double shell” harnessing floor heave in deep soft-engineering rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, **31**(4): 587 - 592. (in Chinese))
- [19] 王连国, 李明远, 王学知. 深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2889 - 2893. (WANG Lian-guo, LI Ming-yuan, WANG Xue-zhi. Study on mechanisms and technology for bolting and grouting in special soft rock roadways under high stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2889 - 2893. (in Chinese))
- [20] 乔卫国, 孟庆彬, 林登阁, 等. 深部软岩巷道锚注联合支护技术研究[J]. 西安科技大学学报, 2011, **31**(1): 22 - 27. (QIAO Wei-guo, MENG Qing-bin, LIN Deng-ge, et al. Research and case analysis of bolting-grouting combined support technology in deep soft-rock roadway[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, **31**(1): 22 - 27. (in Chinese))
- [21] 郑朋强, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 软岩大变形巷道底臌破坏机制与支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 1): 3143 - 3150. (ZHENG Peng-qiang, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Study of failure mechanism of floor heave and supporting technology in soft rock of large deformation roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3143 - 3150. (in Chinese))