



# 无煤柱自成巷力学原理及其工法

何满潮 高玉兵 盖秋凯 杨军

## 引用本文：

何满潮, 高玉兵, 盖秋凯, 等. 无煤柱自成巷力学原理及其工法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 19–30.

HE Manchao, GAO Yubing, GAI Qiukai. Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 19–30.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1850>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 无煤柱自成巷工法留巷全周期矿压显现规律研究

Study on law of full-period mine pressure behavior of entry retaining method of self-contained entry without coal pillar  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 123–129 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/901a5498-d3b7-4380-bd95-68bb9fe93022>

#### 中厚煤层切顶卸压无煤柱自成巷技术关键参数研究

Study on key parameters of self-formed roadway without coal pillar by roof cutting and pressure relief in medium and thick coal seam  
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 117–123 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/741f9847-1745-4338-aa7a-fe7d9e8ab757>

#### 深井高应力切顶卸压沿空掘巷围岩控制技术

Surrounding rock control technology of gob-side entry driving in deep shaft with high stress roof cutting and pressure relief  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 173–179 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7f1e5bc1-b5b6-4d42-a6c1-9d46a6ab1aa>

#### 特厚煤层综放开采邻空动压巷道围岩变形机理及卸压控制

Mechanism of deformation and pressure relief control of dynamic gob-side entry surroundings in fully-mechanized caving mining for extra-thick coal seam  
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 83–94 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1810>

#### 塔山煤矿综采工作面切顶留巷技术

Technology of roof cutting and entry retaining in fully-mechanized working face of Tashan Coal Mine  
煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/85fa679a-ba9f-4600-8436-0e3d930e1aee>

#### 深井中等稳定顶板沿空留巷锚注切顶支护技术研究

Research on bolting and cutting support technology for moderately stable roof of gob side entry retained in deep mine  
煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/544be707-f449-45e0-86da-41127788096d>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

何满潮,高玉兵,盖秋凯,等.无煤柱自成巷力学原理及其工法[J].煤炭科学技术,2023,51(1): 19-30.  
HE Manchao, GAO Yubing, GAI Qiukai, et al. Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 19-30.

## 无煤柱自成巷力学原理及其工法

何满潮<sup>1,2</sup>,高玉兵<sup>1,2</sup>,盖秋凯<sup>1,2</sup>,杨军<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院,北京 100083)

**摘要:**煤炭是我国的支柱能源,煤炭工业是关系我国能源安全的重要基础产业。长期以来,我国地下煤炭资源开采一直以井工长壁121工法为主,这种开采体系存在煤炭资源浪费、巷道掘进率高、煤柱应力集中等问题。为解决现行开采体系存在的安全、开采成本和煤炭采出率三大瓶颈和突出问题,建立了基于采矿损伤不变量方程的采矿工程模型,分析了无煤柱自成巷力学原理。在此基础上,研发了顶板定向预裂卸压、NPR锚杆/索支护等成巷控制关键技术,实现了“拉得住、切得开、下得来、护得好”的技术目标,形成了无煤柱自成巷110/N00工法开采体系。110工法把采煤与掘进2套工序初步统一起来,使每个采煤工作面减少1条巷道的掘进,实现了无煤柱开采。N00工法则把采煤与掘进2套工序有机统一起来,利用矿压自动成巷,从而取消了回采巷道的掘进,彻底消除了采掘接续紧张的“老大难”问题。现场实践表明,110工法通过超前工作面预裂切顶卸压,利用矿山压力做功和垮落矸石的碎胀性实现留巷围岩自平衡。N00工法革新了原有采煤工艺,改变了传统采煤系统布局,实现了全采区无巷道掘进和无煤柱开采。

**关键词:**无煤柱开采;切顶卸压;110工法;N00工法;沿空留巷;平衡开采

**中图分类号:**TD322    **文献标志码:**A    **文章编号:**0253-2336(2023)01-0019-12

## Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars

HE Manchao<sup>1</sup>, GAO Yubing<sup>1,2</sup>, GAI Qiukai<sup>1,2</sup>, YANG Jun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Coal is the principal energy of China, and the coal industry is an important basic industry related to the energy security. For a long time, the underground coal resources mining in China has always been based on the longwall 121 mining method. This mining system has many problems such as waste of coal resources, high rate of entry excavation and concentrated stress of coal pillars. In order to solve the three bottlenecks and prominent problems of “safety, mining cost and coal recovery rate” existing in the current mining system, we established a mining engineering model based on the mining damage invariant equation, analyzed the mechanical principle of automagical entry formation without coal pillars. On this basis, the key technologies of 110 and N00 mining method, such as directional presplitting and pressure relief of roof, NPR bolt/cable support are developed. The technical objective of “being able to control the roof, cut off the roof, make the roof easy to collapse and protect the entry rib” has been achieved. The 110 mining method of automagical entry formation without coal pillars and the N00 mining method at different development stages have been formed. The 110 mining method unifies the two sets of processes of coal mining and excavation initially, so that each coal mining face can dig one less mining entry, and no pillar mining is realized. The N00 mining method is based on the 110 mining method, which completely unifies the two processes of coal mining and excavation. The mining pressure is used to automatically form the roadway, thus eliminating the excavation of roadways and thoroughly

收稿日期:2022-11-07    责任编辑:朱恩光    DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1850

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204164, 52074298);中国科协青年人才托举工程资助项目(2021QNRC001)

作者简介:何满潮(1956—),男,河南灵宝人,中国科学院院士。E-mail: hemanchao@263.net

通讯作者:高玉兵(1989—),男,山东烟台人,讲师,硕士生导师。E-mail: yubing\_gao@163.com

eliminating the long-standing problem of strained relations of mining and excavation. The field practice shows that the 110 mining method cuts off the stress transmission between the roof of the goaf and the roof of the entry. The mine pressure and self balance of the surrounding rock of the retained entry is realized by using the crushing and swelling property of the collapsed gangue. The N00 mining method innovates the original mining technology, changes the layout of the traditional mining system, and realizes no entry digging and automatic entry formation in the whole mining area.

**Key words:** no pillar mining; roof cutting and pressure relief; 110 mining method; N00 mining method; gob-side entry retaining; balanced mining

## 0 前 言

煤炭是我国的支柱能源,在一次能源生产和消费结构中长期占 50% 以上<sup>[1]</sup>。从传统时代到现代,采煤工艺经历了手工采煤、爆破采煤、普通机械化采煤和综合机械化采煤等四大发展阶段。采煤工艺和采掘设备的不断升级改进,推动了整个煤炭工业向前发展。现阶段,煤炭井工开采主要分为柱式和壁式两大开采体系,我国形成了以井工长壁开采为主的开采体系<sup>[2]</sup>。121 工法是目前应用最广泛的壁式开采体系,针对 121 工法国内外学者在开采理论、装备体系、技术方法等方面取得了诸多创新性成果。

在开采理论方面,形成了以钱鸣高院士“砌体梁”理论<sup>[3]</sup>和宋振骐院士“传递岩梁”理论<sup>[4]</sup>等为代表的创新开采理论。在装备体系方面,研制了世界首台 8.8 m 超大采高智能化采煤机和配套支架<sup>[5]</sup>,掘支运一体化“煤海蛟龙”快速掘进系统<sup>[6]</sup>,特厚煤层大采高综放自动化开采装备<sup>[7-8]</sup>等一系列创新装备,为我国煤炭工业高质量、快速发展提供了关键支撑。在技术方法方面,针对煤矿冲击地压、煤与瓦斯突出、矿井水害等形成了区域应力协调与局部应力控制综合防冲技术<sup>[9]</sup>,矿井煤与瓦斯共采及治理技术<sup>[10]</sup>,井下水害超前预报及探测技术<sup>[11]</sup>等一系列灾害防治技术<sup>[12-15]</sup>,有力保障了煤矿井下的安全开采。此外,近年来煤矿智能开采得到了快速发展,形成了数字孪生智采工作面技术<sup>[16]</sup>、透明化智能综采工作面自适应割煤技术<sup>[17]</sup>、煤矿井下机器人技术<sup>[18]</sup>等一系列智能化采运关键技术,极大地推动了我国煤炭产业发展升级。

虽然在技术、装备等方面取得了突出成就,但在矿井开拓和开采体系方面发展较慢。目前矿井常用的 121 工法开采体系中,回采 1 个工作面,需提前掘进 2 条回采巷道,工作面间留设 1 个区段煤柱<sup>[19-20]</sup>。煤柱具有隔离采空区的作用,但煤柱的留设也造成了资源浪费,采区采出率一般为 75%~90%,矿井采出率不到 50%。同时,煤柱的存在会导致覆岩不均衡沉降,煤柱应力集中易造成临空巷道围岩大变形。

此外,现行开采体系中工作面回采前需提前掘进 2 条回采巷道,造成我国每年煤巷掘进量高达 13 000 km,易引发采掘接续紧张问题。因此,严峻的安全、开采成本和资源浪费问题成为制约我国煤炭工业发展的突出问题,亟需在开采体系方面转型突破。

为解决我国煤炭开采过程中存在的安全、开采成本和煤炭采出率三大瓶颈和突出问题,笔者团队于 2008 年提出无煤柱自成巷力学理论,继而在现场进行了应用实践,形成了无煤柱自成巷 110/N00 工法开采体系<sup>[21-23]</sup>。在分析煤层开采覆岩破坏损伤的基础上,提出了无煤柱自成巷平衡开采理论模型,阐述了无煤柱自成巷力学原理;在此基础上,构建了 121 工法、110 工法、N00 工法开采体系,研发了定向预裂切顶卸压、NPR 锚杆/索支护等自成巷关键技术。现场工程实践表明,无煤柱自成巷 110/N00 工法不仅在安全方面能减弱围岩应力集中,而且在经济方面能够降低回采巷道掘进量、提高煤炭资源采出率,具有广阔的应用前景和较高的研究价值。

## 1 无煤柱自成巷平衡开采力学模型

### 1.1 采矿损伤不变量方程的采矿工程模型

采矿活动导致顶板岩层中出现垮落带、断裂带和弯曲下沉带(部分地区无弯曲下沉带),地表一般会产生沉降,121 工法的采矿工程模型如图 1 所示。

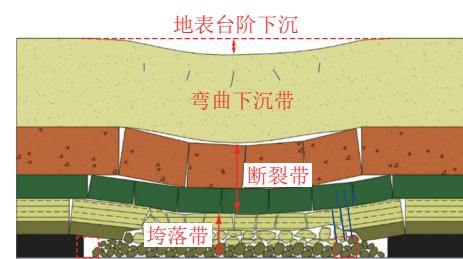


图 1 121 工法采矿损伤不变量方程的采矿工程模型

Fig.1 Mining engineering model of damage invariant equation of 121 mining method

采矿活动在“三带”中产生的损伤以  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$  表示<sup>[21]</sup>。其中,  $k_1$  为采矿引起的地表沉降损伤;  $k_2$  为断裂带中产生的裂隙损伤;  $k_3$  为垮落带的顶板矸石

碎胀程度。

采矿引起的地表沉降损伤  $k_1$  可以用地表沉降量和采矿量表示:

$$k_1 = \Delta V_S / \Delta V_m \quad (1)$$

式中:  $\Delta V_S$  为地表沉降体积;  $\Delta V_m$  为采矿体积。

断裂带中产生的裂隙损伤  $k_2$  可表示为

$$k_2 = \Delta V_C / \Delta V_m \quad (2)$$

式中:  $\Delta V_C$  为断裂带中的裂隙体积。

根据岩体碎胀特性, 垮落带中的顶板岩体垮落破碎后体积产生膨胀, 其碎胀程度  $k_3$  可表示为

$$k_3 = \Delta V_B / \Delta V_m \quad (3)$$

式中:  $\Delta V_B$  为顶板垮落岩体的碎胀体积。

对于 121 工法的采矿工程来说, 采矿活动在“三带”中产生的损伤始终满足采矿损伤不变量方程:

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1 \quad (4)$$

对于 121 工法而言, 地表沉降体积  $\Delta V_S$  是可以通过测量和计算得到的。但是, 工作面开采后采空区顶板垮落, 顶板岩层中的裂隙体积  $\Delta V_C$  和顶板垮落岩体碎胀体积  $\Delta V_B$  是未知的。

## 1.2 平衡开采采矿不变量方程的解

110/N00 工法的重要贡献之一是为采矿损伤不变量方程找到了特解。110/N00 工法实施过程中采空区矸石垮落可见, 通过成巷内现场测量, 可得到采空区顶板垮落岩体的碎胀函数:

$$K = K_0 e^{-\alpha t} \quad (5)$$

式中:  $K$  为顶板垮落岩体碎胀系数;  $K_0$  为顶板垮落岩体初始碎胀系数;  $\alpha$  为待定系数;  $t$  为时间。

进而得到顶板垮落岩体的碎胀控制方程:

$$\Delta V_B = (K - 1)H_C S \quad (6)$$

式中:  $H_C$  为切顶高度;  $S$  为开采面积。

通过选择合理的切顶高度  $H_C$ , 可以控制顶板垮落岩体碎胀体积, 使其满足切顶影响近域范围内采矿量和碎胀量之间的平衡:

$$\Delta V_B = \Delta V_m \quad (7)$$

如此一来, 理论上切顶碎胀影响范围内顶板岩层中的裂隙体积  $\Delta V_C = 0$ , 无煤柱自成巷平衡开采理想化的采矿工程模型如图 2 所示。

## 1.3 切顶成巷力学原理及稳定性分析

无煤柱自成巷开采体系的核心是通过一系列技术手段实现切顶成巷, 并继续服务相邻工作面。未对巷道顶板处理之前, 顶板是长臂悬梁结构, 采空区顶板垮落会不可避免地对巷道顶板造成剧烈扰动。

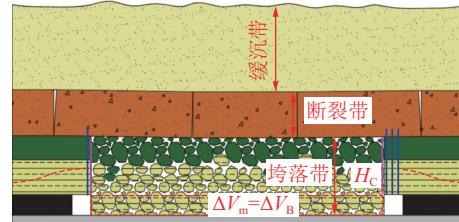


图 2 无煤柱自成巷平衡开采覆岩结构模型

Fig.2 Overburden structure model for balanced mining of no pillar mining with automagical entry formation

切顶成巷的重点是通过人为处理顶板, 将长臂梁结构转换为短臂梁结构, 使其具有独立的受力变形特征。切顶使巷道顶板与采空区顶板在预裂缝和矿压作用下自动分离, 从而切断中低位岩梁间的应力传递。无煤柱自成巷技术的核心在于采用切顶卸压技术切断采空区顶板与巷道顶板间的应力传递, 达到改善巷道应力环境的目的。

除了通过切顶卸压手段控制应力传递外, 保证成巷稳定性的另一重要途径是通过合理设计切顶参数调控采空区顶板垮落, 利用垮落矸石的碎胀承载性及支护结构的控制作用实现成巷围岩自平衡, 即实现上文所述的巷道围岩近域平衡开采。如图 3 所示, 切顶成巷稳定的关键是保证切顶短臂结构的力学平衡。切顶短臂结构主要通过巷内加强支护将其稳固于上位稳定岩层, 在采空区矸石协同承载作用下达到平衡稳定状态。假设巷道宽度为  $b$ , 忽略基本顶关键块对切顶短臂结构的施载作用, 煤帮对切顶短臂结构的反力按三角形分布, 由  $\sum F_y = 0$  和  $\sum M = 0$  可得:

$$\begin{cases} F_b \sin \beta + \sum F_i + \frac{1}{2} \sigma_p x_p = G_d \\ \frac{1}{6} \sigma_p x_p^2 + \sum F_i x_i + M_d + F_b \sin \beta (x_p + b) = G_d x_c \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $F_b$  为矸石侧向承载力, kN;  $\beta$  为切顶角度,  $(^\circ)$ ;  $F_i$  为不同支护结构的支护力, kN;  $\sigma_p$  为煤帮对切顶短臂结构的作用反力, kN/m;  $x_p$  为煤帮对切顶短臂结构的作用距离, m;  $x_c$  为切顶短臂结构几何形心横坐标, m;  $x_i$  为不同支护结构距煤壁的距离, m;  $G_d$  为切顶短臂结构的自重荷载, kN;  $M_d$  为切顶短臂结构的残余抗弯能力, kN·m。

式(8)整理可得:

$$\sum F_i (3x_i - x_p) + 3M_d + F_b \sin \beta (2x_p + 3b) = G_d (3x_c - x_p) \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 等式左边为承载部分, 数值越大说明支护强度越高; 等式右边为施载部分, 数值越大说明载荷越大。切顶成巷过程中, 一方面通过

支护作用提高切顶短臂结构的稳定性,另一方面充分发挥采空区矸石的自承载作用,实现综合承载值大于施载值,从而使巷道围岩处于稳定状态。

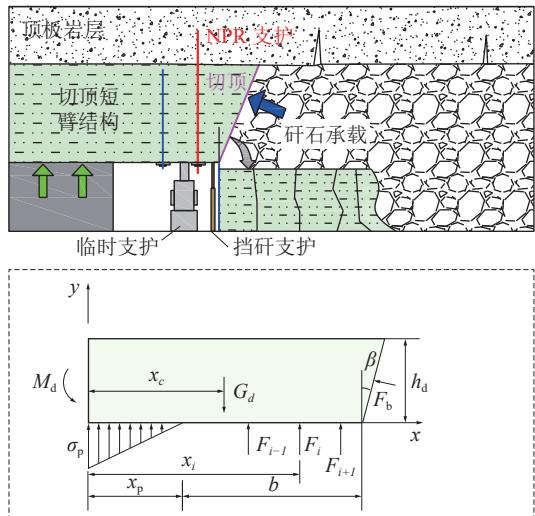


图3 切顶成巷结构和力学模型

Fig.3 Structural and mechanical model for entry formation by roof cutting

## 2 长壁开采 110/N00 工法

### 2.1 采矿工法的历史演化

在19世纪以前,采煤亦称攻煤、伐煤、凿煤等,当时的井下巷道布置非常简单,凿井见煤后,再开2

条上山或下山,即完成了巷道布置的准备工作。17世纪末,英国的工业革命使人类开始步入工业文明,该时期应用最为广泛的是房柱式采煤法、高落式采煤法。18世纪初期,来自英国什罗普郡的学者开始为矿工们教授长壁式开采,长壁采煤法也是在该时期内被首次应用。20世纪30年代,长壁开采在我国山东省中兴(今枣庄)煤矿首次进行了试采。

根据回采工作面与区段煤柱、巷道掘进的数量关系,将长壁开采体系分为121工法、111工法、110工法和N00工法。长壁开采121工法,即每回采“1”个工作面,需提前掘进“2”条工作面回采巷道,并留设“1”个区段煤柱,如图4d所示。121工法的典型特征是采用煤柱隔离采空区,煤柱的留设一方面造成资源浪费,另一方面致使覆岩不均衡沉降,造成沿空巷道围岩应力集中。为解决资源浪费问题,1937年前苏联提出采用充填材料沿采空区边缘维护原回采巷道,即回采“1”个工作面,只需掘进“1”条工作面回采巷道,留设“1”个充填体岩柱<sup>[24-25]</sup>,因此可称之为111工法,如图4c所示。111工法即充填沿空留巷开采方法,有效解决了资源浪费问题,减少了巷道掘进率,但未彻底改变顶板间的传力结构,属于“无煤有柱”的开采方式,充填体易成为应力集中区,充填作业与工作面开采间的协调是制约高效开采的重要因素。

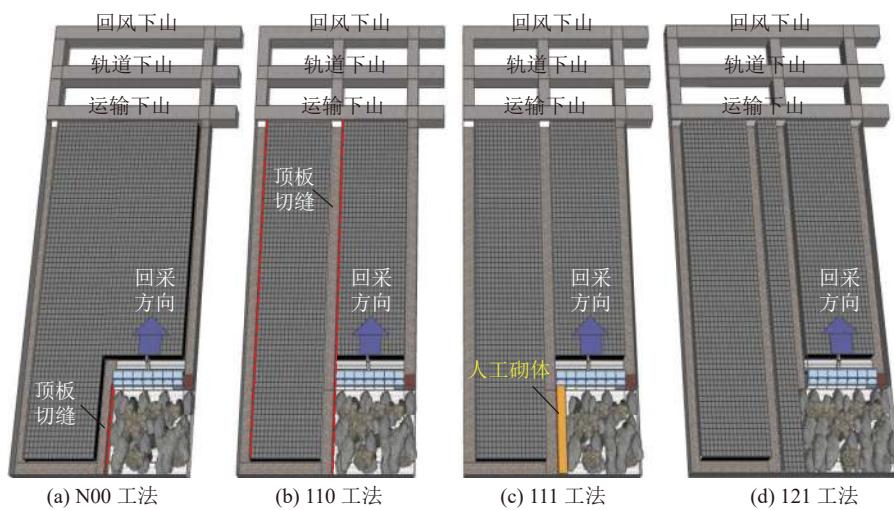


图4 采矿工法的发展演化

Fig.4 Developing evolution of longwall mining method

基于无煤柱自成巷关键技术,2009年笔者研究团队提出了110工法,即回采“1”个工作面只需掘进“1”条工作面回采巷道(另一个巷道自动形成),留设“0”个煤柱。在110工法的基础上,2016年又提出了N00工法,即开采全新盘区的“N”个工作面,需掘

进“0”条巷道、留设“0”个区段煤柱,实现了无需掘进巷道和无需留设煤柱的重大升级和突破。110工法把采煤与掘进2套工序初步统一起来,使每个采煤工作面少掘进1条回采巷道,实现了无煤柱开采。N00工法在110工法的基础上,把采煤与掘进2套

工序彻底统一起来,由掘进1条回采巷道变为不需要掘进回采巷道。

## 2.2 长壁开采 110 工法

基于切顶短臂梁理论和自成巷关键技术,无煤柱自成巷 110 工法将传统“一面两巷”的采掘布置革新为“一面一巷”。无煤柱自成巷实施过程中,进行工作面超前和滞后分工作业。超前工作面,首先采用 NPR 锚杆/锚索对预留巷道顶板进行补强支护,之后在采空区侧顶板安装聚能成缝装置进行定向切顶。工作面回采后,在矿山压力及岩体自重作用下,采空区矸石沿切缝线垮落碎胀,在挡矸支护作用下形成矸石巷帮。架后采动影响区内安设临时支护设备控制矿压,并最终成巷<sup>[26-28]</sup>。

110 工法开采系统中,工作面通风方式由传统的“U”型转变为“Y”型,有效解决了工作面上隅角瓦斯积聚问题,有利于高瓦斯矿井的安全生产,其平面布置如图 5 所示。

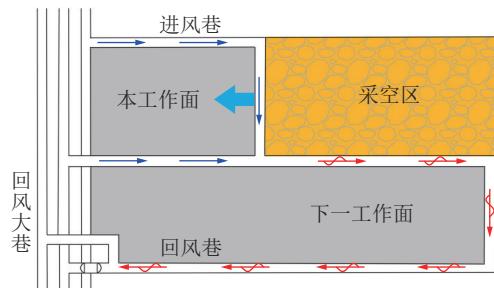


图 5 长壁开采 110 工法平面示意

Fig.5 Layout plan of 110 mining method

## 2.3 长壁开采 N00 工法

长壁开采 N00 工法从巷道布置、工艺体系及配套装备等方面进一步革新了传统的长壁开采方法,实现了无煤柱留设、以采代掘的全新开采模式。N00 工法的典型特征是工作面巷道无需提前掘进,而是通过采煤机在采煤过程中割出巷道空间。根据 N00 工法的开采特征和目前的发展现状,可将其分为 1G N00 工法、2G N00 工法、3G N00 矿井。

1) 1G N00 工法。1G N00 工法的典型特征是针对整个采区,实现整个采区内部无巷道掘进和无煤柱开采,但开采前需提前开拓出采区边界巷道,开采过程中有一条巷道通过采煤机制割出<sup>[29]</sup>,如图 6 所示。

工作面回采时,通过 N00 工法采煤“三机”配套系统协同工作,有序完成采煤、装煤、运煤、移架、推移刮板输送机等工序,其中 N00 工法采煤机负责割煤和额外挖出预留巷道空间,并在实体煤侧形成弧

形巷帮。通过 N00 “四机”联动装备相互配合实现自动成巷,其中 N00 锚索钻机负责补强巷道顶板,N00 切缝钻机负责对顶板实施切缝,N00 钻机支架具有搭载锚索钻机、切缝钻机协同作业等功能,N00 工法切顶护帮支架负责采空区顶板垮落碎胀后的挡矸护帮和动载支护。

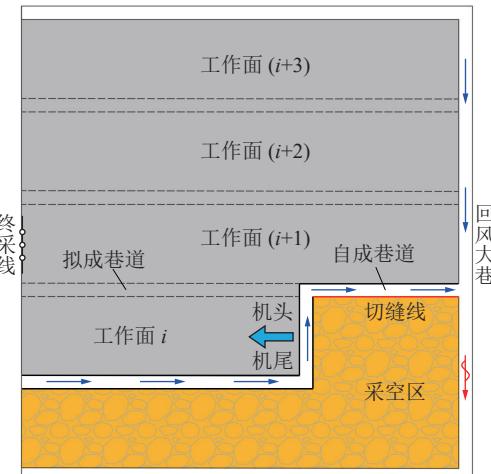


图 6 1G N00 工法平面示意

Fig.6 Schematic plan of 1G N00 mining method

2) 2G N00 工法。相较于 1G N00 工法的工作面开采单侧成巷,2G N00 工法的典型特征是实现整个采区的无巷道掘进和无煤柱开采,无需提前进行采区边界巷道的掘进,如图 7 所示。

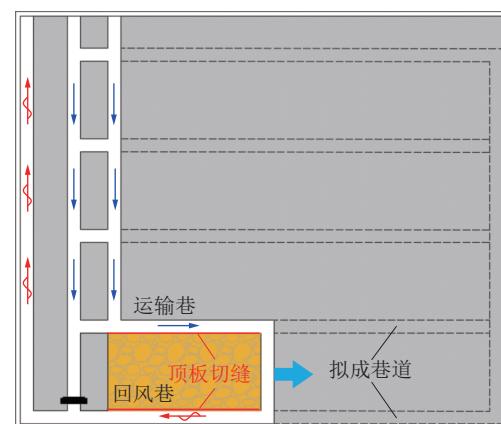


图 7 2G N00 工法平面示意

Fig.7 Schematic plan of 2G N00 mining method

2G N00 工法在装备系统方面进一步升级,在机头和机尾均需进行切顶成巷,进一步解决了采区边界巷道需提前掘进的问题。切顶钻机与支架实现一体化设计,采面运输系统与巷道输送带系统转弯搭接,锚杆/索钻机的钻杆装卸实现自动化,如图 8 所示。2G N00 工法进一步提高了智能化和集中作业的水平,为 N00 矿井建设奠定了基础。

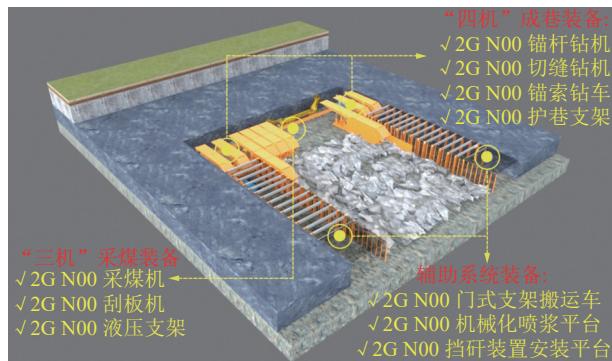


图 8 2G N00 工法装备布置示意

Fig.8 Equipment layout diagram of 2G N00 mining method

3)3G N00 矿井。3G N00 矿井将无煤柱自成巷“采-留-用”一体化思路应用到矿井设计,提出的一个全新的建井模式<sup>[30]</sup>。3G N00 矿井的典型特征是无需提前掘进矿井开拓大巷,进一步减小矿井大巷保护煤柱,如图 9 所示。

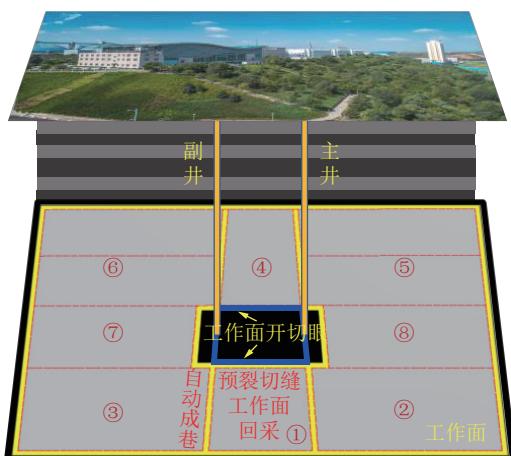


图 9 3G N00 矿井原理示意

Fig.9 Schematic diagram of 3G N00 mine

3G N00 矿井建设时,开拓大巷是通过自成巷形成的。井筒开拓至开采煤层后通过简单的井巷工程布置,直接进行采煤,从而简化井底车场工程、井下水泵房与变电所工程,缩短建井周期,实现了全矿井开拓布局新模式。3G N00 矿井使井田范围内煤炭资源的采出率从不足 50% 提高至理论意义的全部采出,经济性、集约化得到进一步提升。

### 3 无煤柱自成巷关键技术

110/N00 工法开采体系实现的技术支撑是无煤柱自成巷技术。110 工法中无煤柱自成巷的形成主要依靠定向预裂切顶卸压技术,NPR 锚杆/锚索支护核心技术。N00 工法在 110 工法的基础上,通过改变长壁开采工艺体系及其配套装备而成,巷道空间

是采煤机切割而成,因此还包括“三机”配套采煤技术和“四机”联动成巷技术。以上技术的实施是保证成巷稳定的关键。

#### 3.1 定向预裂切顶卸压技术

切顶卸压是无煤柱自成巷区别于沿空留巷的最典型特征,由于切顶卸压实施区域是超前工作面,因此在保证切顶效果的同时不能破坏原巷道顶板的完整性。利用岩体抗压不抗拉的特性,研发了定向张拉聚能成缝技术<sup>[31]</sup>。通过安装聚能装置,在 2 个设定方向上形成聚能流,并产生集中张拉应力,实现定向张拉成型。

火工品于聚能装置内爆破时,冲击波首先作用于双向抗拉伸聚能装置开口对应的孔壁上,产生初始裂隙。在聚能孔的进一步导向作用下,爆生气体形成强力气楔。由此在垂直初始裂隙方向(控制方向)产生拉张作用力,并出现应力集中。正是由于这部分集中拉张应力( $X-O-Y$ 平面拉张应力)以及对岩石耐压不抗拉特性的利用,促进裂隙(面)进一步扩展、延伸。其基本原理和成缝效果如图 10 和 11 所示。

#### 3.2 NPR 锚杆/索支护技术

自成巷过程中,采空区顶板在矿压作用下垮落,垮落过程会对“切顶短臂结构”产生动载摩擦作用。为了有效控制自成巷顶板围岩变形,抵抗摩擦动载,研发了 NPR 恒阻吸能支护技术,配套有宏观 NPR 锚杆/锚索和微观 NPR 锚杆/锚索 2 种类型。

1)宏观 NPR 恒阻吸能锚杆/索。2008 年研发了宏观 NPR 锚杆/索系列支护产品,核心部件是一种 NPR 恒阻结构,通过恒阻结构实现让压和拉而不断<sup>[32]</sup>。对宏观 NPR 锚杆/索与传统锚杆/索进行静力拉伸测试发现,宏观 NPR 锚杆/索具有显著的恒阻特性,NPR 恒阻结构最大伸缩量可达 1 000~2 000 mm,实现拉而不断,在支护力和最大变形量方面远高于传统锚杆/索(图 12),有效保证成巷的稳定性。

2)微观 NPR 锚杆/索支护技术。2014 年,在宏观 NPR 锚杆/索研究的基础上,从杆体及钢绞线材料创新角度,提出了微观 NPR 支护材料概念<sup>[33]</sup>,该材料为准理想塑性材料,具有以下特点:①具有负泊松比效应,即泊松比显著减小,泊松比实现  $10^{-3}$  量级;②屈服平台消失;③应变大于 0.2。2018 年,成功研制出了具有微观负泊松比效应拉伸时无明显颈缩的微观 NPR 钢材料。

对微观 NPR 钢材进行霍普金森冲击可以发现,微观 NPR 钢材料破断时无明显变细。此外,微观

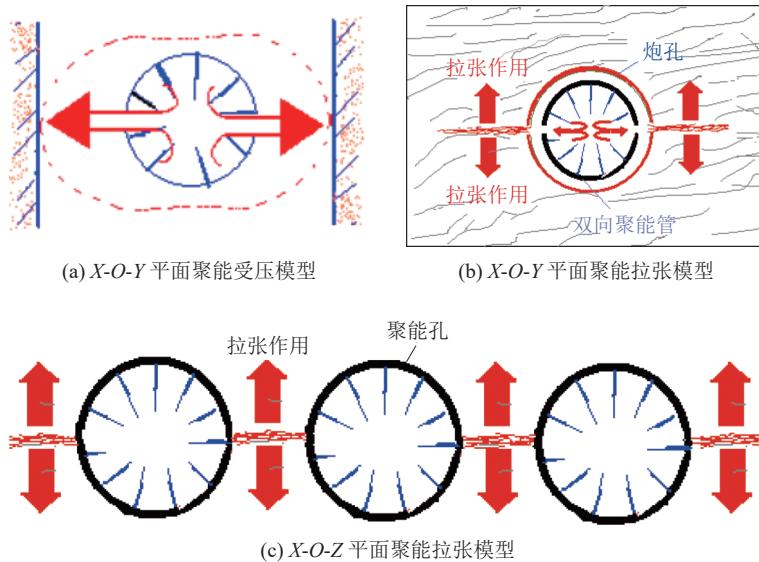


图 10 顶板定向预裂切缝原理  
Fig.10 Principle of roof directional presplit cutting

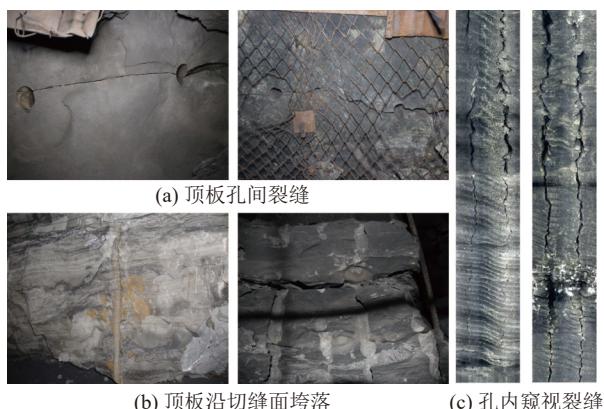


图 11 顶板定向预裂成缝效果  
Fig.11 Effects of directional roof presplit cracking

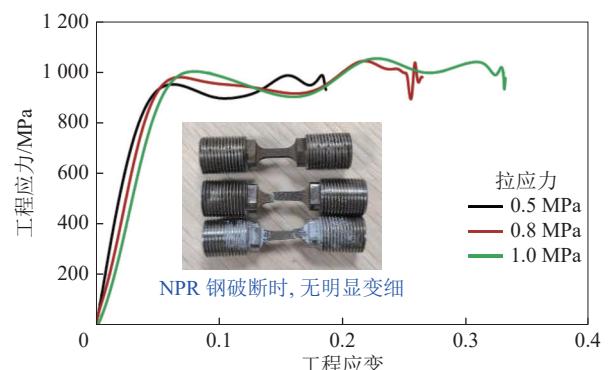


图 13 微观 NRP 钢材料动力学特性测试曲线  
Fig.13 Mechanical property of microscopic NRP materials

### 3.3 N00 工法成巷关键技术

N00 工法中的巷道空间需采煤机滚筒割出, 因此 N00 采煤机、N00 刮板输送机和 N00 支架系统之间的配套至关重要。N00 采煤机具有摇臂加长、可超越刮板输送机切割弧形巷道空间等特点; N00 刮板输送机配备有超低位可调机尾、可伸缩式挡煤/铲煤装置; N00 支架系统包括 N00 端头支架、N00 钻机支架以及 N00 过渡支架, 使得 NRP 锚索钻机、切缝装备、移动泵站等系列装备, 实现协同作业。当 N00 采煤机割煤并运行至工作面端头(预留巷道位置)时, 利用采煤机的加长摇臂将前滚筒伸至 N00 刮板输送机尾部并上下摆动, 割成弧形巷帮, 如图 14 所示。

巷道空间形成后, N00 工法还需要“四机”联动技术最终成巷。N00 采煤机割出预留空间后, 在 N00 钻机支架搭载作用下, N00 锚索钻机对顶板进行 NRP 锚索支护, N00 切缝钻机对顶板实施定向切缝。随着工作面推进, 采空区顶板垮落碎胀并填充

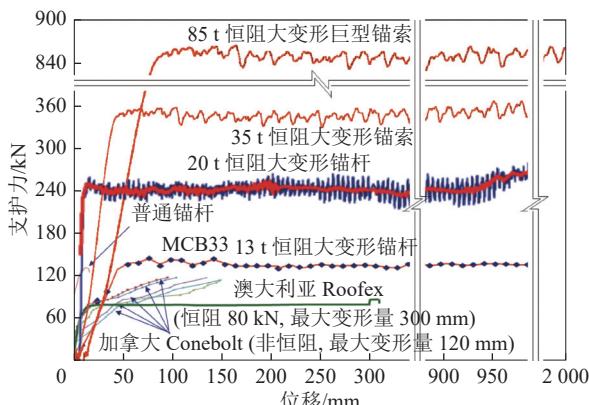


图 12 宏观 NRP 锚杆/索拉伸力学性能曲线  
Fig.12 Mechanical property curves of macroscopic NRP support bolt/cable

NRP 支护材料的延伸率可达 35%~70%, 抗拉强度为 900~1100 MPa, 具有更好的延伸和强度特性, 拉断后断口处基本无颈缩现象, 如图 13 所示。

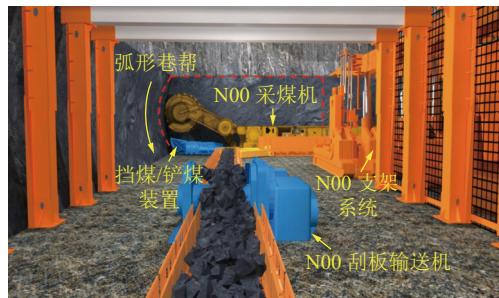


图 14 N00 工法“三机”配套示意

Fig.14 Schematic of “three equipment” matching of N00 mining method

采空区。N00 切顶护帮支架则起到临时支护和挡矸支护的作用,“四机”联动配套如图 15 所示。

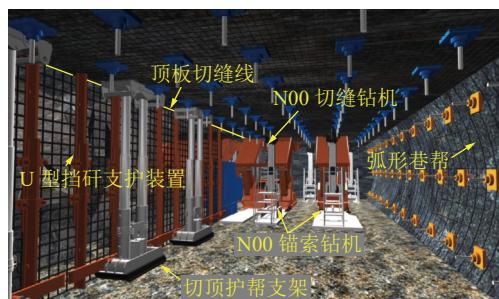


图 15 N00 工法“四机”联动成巷装备示意

Fig.15 Schematic of “four machine” linkage entry forming equipment for N00 mining method

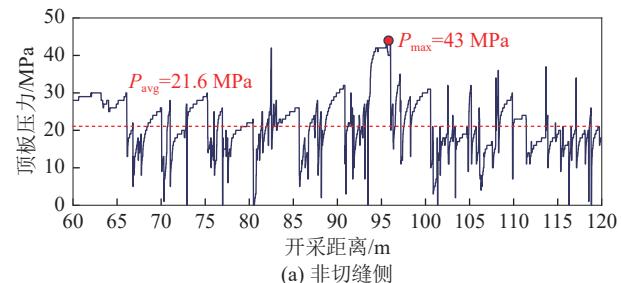
## 4 现场工程应用

### 4.1 110 工法现场应用

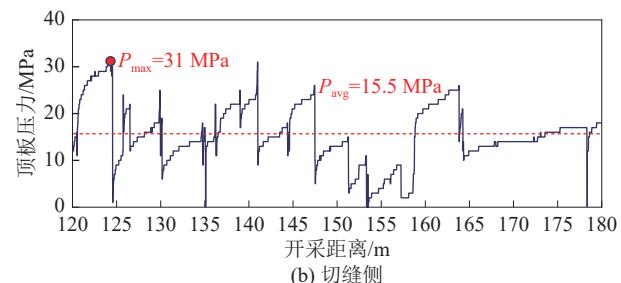
2009 年,无煤柱自成巷 110 工法首次在川煤集团芙蓉矿区白皎煤矿现场试验,有效解决了该矿保护层留煤柱开采引发的采空区瓦斯积聚、瓦斯突出及应力集中对近距离煤层开采引起的灾害问题,为 110 工法技术体系的进一步完善和推广应用奠定了基础。

在 110 工法应用范围不断扩大的同时,其开采赋存条件也在不断扩展。初期 110 工法只限应用于薄及中厚煤层,如白皎煤矿 2422 工作面煤厚 2.1 m、小河嘴煤矿 2018 工作面煤厚 0.65 m、嘉阳煤矿 31182 工作面煤厚 0.92 m、哈拉沟煤矿 12202 工作面煤厚 1.9 m、禾草沟煤矿 1105 工作面煤厚 0.78 m。2015 年,110 工法首次在城郊煤矿 21304 工作面应用煤层厚度突破 3 m,并成功应用于柠条塔煤矿 S1201 工作面 4.1 m 厚煤层大采高工作面。与此同时,其应用煤层的埋藏深度也由浅埋至中深部( $<600$  m)逐渐推广至大埋深条件,如城郊煤矿留巷

面埋深 915 m、郭屯煤矿留巷面埋深 890 m,2020 年,于千米深井安居煤矿 5307 工作面进行了试验,最大应用埋深达到 1 235 m。顶板条件对成巷亦有重要影响,复合顶板条件下 110 工法应用较为成熟,随着切顶技术的进步和完善,坚硬顶板也实现了安全留巷,如唐山沟煤矿 8820 工作面厚层砂岩顶板、荣康煤矿 11004 工作面灰岩坚硬顶板等。此外,金凤煤矿大倾角煤层、沙曲煤矿高突矿井、下山峁煤矿断层条件等也均实现了 110 工法的成功应用。由薄煤层到厚煤层,由浅埋深到大埋深,由复合顶板到坚硬顶板,由近水平到急倾斜,110 工法在不断的技术进步与理论创新中应用范围越来越广。图 16 为某典型矿井应用过程中工作面支架荷载变化<sup>[34]</sup>,通过切顶卸压,巷道围岩处于低应力环境,顶板压力最大荷载和平均荷载均明显降低,验证了切顶卸压的有效性。图 17 为不同条件典型矿井 110 工法的应用效果,采空区顶板垮落碎胀形成新的巷帮,实现了稳定安全留巷。



(a) 非切缝侧



(b) 切缝侧

$P_{\max}$ —最大顶板压力;  $P_{\text{avg}}$ —平均顶板压力

图 16 典型矿井切顶前后支架荷载变化

Fig.16 Variation of hydraulic support loads before and after roof cutting

### 4.2 N00 工法现场应用

1) N00 工法应用实践。2016 年,N00 工法首次于陕煤集团柠条塔煤矿 S1201-II 工作面进行现场工业性试验。试验工作面倾向长度 280 m,走向长度 2 344 m,煤层厚度 3.81~4.35 m,煤层平均厚度 4.11 m,埋深 90~165 m,煤层赋存稳定,属近水平煤层。

现场试验过程中,通过矿压远程实时在线系统

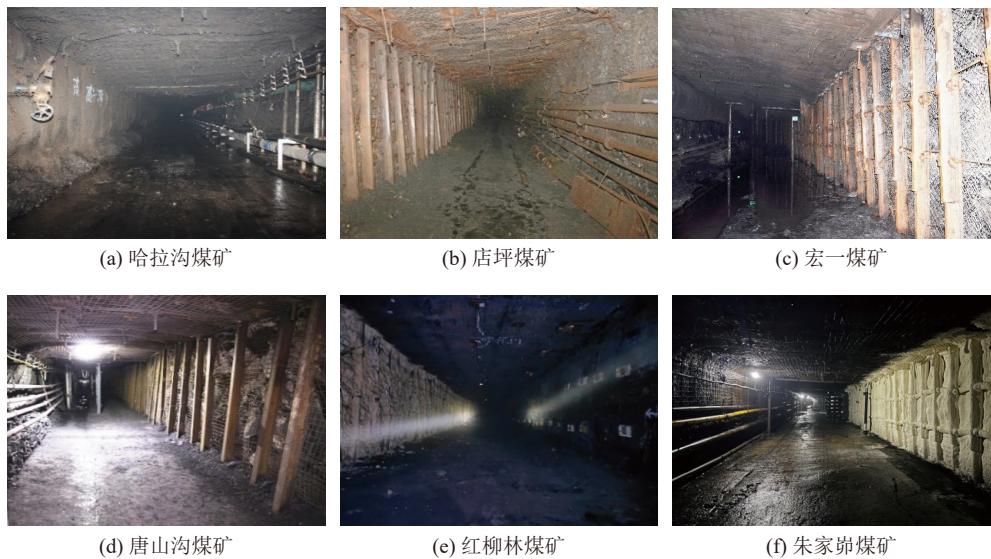


图 17 无煤柱自成巷 110 工法现场应用效果  
Fig.17 Field application effects of 110 mining method

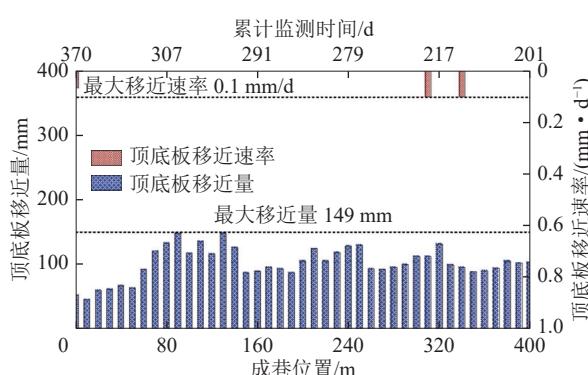


图 18 N00 工法巷道变形监测统计

Fig.18 Deformation monitoring of the roadway in N00 mining method

对巷道变形及矿压情况进行了监测,不同位置变形监测统计如图 18 所示,最终 N00 工法试验工作面成巷与复用效果如图 19 所示<sup>[35]</sup>。通过监测可知,顶底板移近量最大为 149 mm,平均为 102 mm。成巷期间工作面最大推进速度达到 11.9 m/d,成巷复用阶段工作面最大推进速度达到 15.8 m/d。现场观测表明,柠条塔煤矿试验工作面 N00 工法装备系统运转,成巷效果良好。

2) 3G N00 矿井应用实践。2020 年,首个 3G N00 矿井于延安市延川县新泰煤矿 N005101 工作面进行了现场工业性试验,开采煤层为 5 号煤,煤层平均厚度为 1.2 m,平均埋深为 40 m,近水平煤层,工作面长度为 240 m,开采长度为 1 000 m。

3G N00 矿井的核心思想是基于 N00 工法,进一步简化井底车场工程、大巷工程、井下水泵房与变电



图 19 典型矿井 N00 工法成巷效果  
Fig.19 Roadway forming effects of N00 mining method

所工程,首采工作面所留巷道为整个矿井的大巷,矿井设计如图 20 所示<sup>[30]</sup>。工作面所采煤炭由输送带运转至煤仓,并经斜井运输至地面;井下高压配电室集成于地面变电所内,实现电缆远距离输电,简化生产系统。

图 21 为工作面两侧巷道的成巷效果,成巷轮廓完整,完全满足安全开采要求。据统计,新泰煤矿采用 3G N00 工法后,提高矿井采出率 35%,大幅减小建井及掘巷投资,经济和安全效益明显。

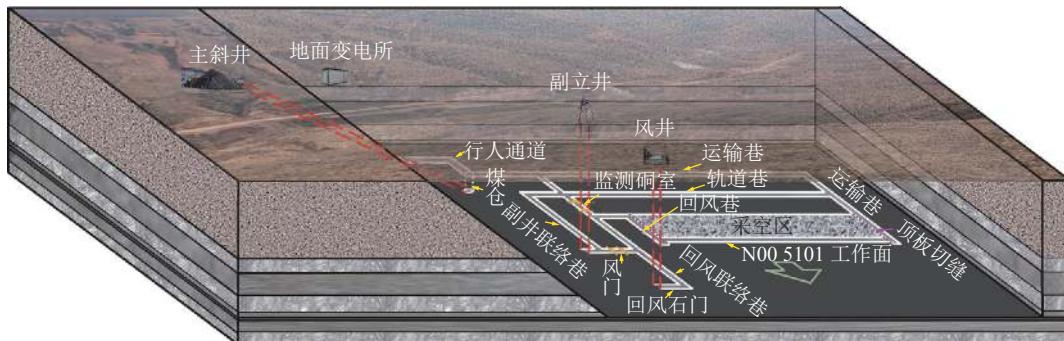


图 20 3G N00 矿井开采设计  
Fig.20 Mining design of 3G N00 mine

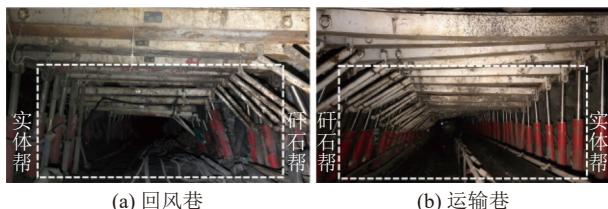


图 21 新泰煤矿 3G N00 矿井现场成巷效果  
Fig.21 Roadway formation effects of 3G N00 mine in Xintai Mine

## 5 结 论

1) 提出了基于损伤不变量方程的采矿工程模型, 分析了采动空间和采矿活动在覆岩“三带”中产生损伤的定量关系, 采矿体积与地表沉降损伤、顶板裂隙损伤和岩体碎胀程度密切相关。无煤柱自成巷 110/N00 工法通过切顶可一定程度上控制垮落岩体的碎胀体积, 在成巷近域范围内实现采矿量和碎胀量之间的平衡。

2) 无煤柱自成巷的力学原理是通过定向切顶卸压切断成巷顶板和采空区顶板间的应力传递路径, 利用矿山压力做功, 同时利用采空区垮落岩体的碎胀承载性实现成巷围岩自平衡。在此基础上, 通过 NPR 锚杆/索支护、N00 工法“三机”配套及“四机”成巷等关键技术进一步保证成巷的稳定性。

3) 在无煤柱自成巷技术的基础上, 根据工作面、巷道和煤柱间的数量关系, 形成了长壁开采 110 工法和 N00 工法。110/N00 工法均实现了无煤柱开采, 110 工法把采煤与掘进 2 套工序初步统一起来, 减少采区内 50% 的巷道掘进; N00 工法把采煤与掘进 2 套工序彻底统一起来, 实现了全采区无巷道掘进和无煤柱开采。

4) 110 工法已在不同煤层厚度、不同埋深和不同煤层倾角等地质条件下进行了大量应用, 应用赋存条件由简单地质条件向复杂条件扩展。N00 工法

已在现场进行了工业性试验, 验证了其有效性和可行性。未来, 在地质透明勘探、智能开采技术等不断发展成熟的过程中, 无煤柱自成巷采煤新工法将进一步革新煤炭开采体系, 助力煤炭产业转型升级和煤炭安全高效开采。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949–1960.  
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezh. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949–1960.
- [2] 何满潮, 宋振骐, 王安, 等. 长壁开采切顶短壁梁理论及其 110 工法: 第三次矿业科学技术变革[J]. 煤炭科技, 2017(1): 1–9.  
HE Manchao, SONG Zhenqi, WANG An, et al. Theory of long-wall mining by using roof cutting shortwall team and 110 method: the third mining science and technology reform[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2017(1): 1–9.
- [3] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557–563.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557–563.
- [4] 宋振骐, 郝建, 石永奎, 等. “实用矿山压力控制理论”的内涵及发展综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 1–15.  
SONG Zhenqi, HAO Jian, SHI Yongkui, et al. An overview of connotation and development of practical ground pressure control theory[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(1): 1–15.
- [5] 杨俊哲. 8.8 m 智能超大采高综采工作面关键技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 116–124.  
YANG Junzhe. Key technologies and equipments for 8.8 m intelligent super large mining height fully-mechanized mining face mining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 116–124.
- [6] 张忠国. 煤巷快速掘进系统的发展趋势与关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 55–60.  
ZHANG Zhongguo. Development tendency and key technology of mine seam gateway rapid driving system[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 55–60.

- Technology, 2016, 44(1): 55–60.
- [ 7 ] 王国法, 庞义辉, 马英. 特厚煤层大采高综放自动化开采技术与装备[J]. 煤炭工程, 2018, 50(1): 1–6.  
WANG Guofa, PANG Yihui, MA Ying. Automated mining technology and equipment for fully-mechanized caving mining with large mining height in extra-thick coal seam[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(1): 1–6.
- [ 8 ] 王家臣. 我国放顶煤开采的工程实践与理论进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 43–51.  
WANG Jiachen. Engineering practice and theoretical progress of top-coal caving mining technology in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 43–51.
- [ 9 ] 潘一山, 肖永惠, 李忠华, 等. 冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 222–228.  
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, *et al.* Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 222–228.
- [ 10 ] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1–6.  
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 1–6.
- [ 11 ] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795–805.  
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5): 795–805.
- [ 12 ] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 205–213.
- [ 13 ] 康红普. 高强度锚杆支护技术的发展与应用[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(2): 1–4.  
KANG Hongpu. Development and application of high strength roof bolt support technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2000, 28(2): 1–4.
- [ 14 ] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45–49.  
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 45–49.
- [ 15 ] 鲜学福, 王宏图, 姜德义, 等. 我国煤矿矿井防灭火技术研究综述[J]. 中国工程科学, 2001(12): 28–32.  
XIAN Xuefu, WANG Hongtu, JIANG Deyi. The summarization of the investigation on coal mine fire prevention and fire extinguishing techniques in China[J]. *Engineering Science*, 2001(12): 28–32.
- [ 16 ] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925–1936.  
GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, *et al.* Digital twin for smart coal mining workforce: Technological frame and construc-
- tion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1925–1936.
- [ 17 ] 毛善君, 鲁守明, 李存禄, 等. 基于精确大地坐标的煤矿透明化智能综采工作面自适应割煤关键技术研究及系统应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 515–526.  
MAO Shanjun, LU Shouming, LI Cunlu, *et al.* Key technologies and system of adaptive coal cutting in transparent intelligent fully mechanized coal mining face based on precisegeodetic coordinates[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 515–526.
- [ 18 ] 黄曾华, 王峰, 张守祥. 智能化采煤系统架构及关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1959–1972.  
HUANG Zenghua, WANG Feng, ZHANG Shouxiang. Research on the architecture and key technologies of intelligent coal mining system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1959–1972.
- [ 19 ] 何满潮, 高玉兵, 杨军, 等. 厚煤层快速回采切顶卸压无煤柱自成巷工程试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 254–264.  
HE Manchao, GAO Yubing, YANG Jun, *et al.* Engineering experimentation of gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure release in a thick-seam fast-extracted mining face[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 254–264.
- [ 20 ] HE M, ZHU G, GUO Z. Longwall mining “cutting cantilever beam theory” and 110 mining method in China—The third mining science innovation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(5): 483–492.
- [ 21 ] HE M, WANG Q, WU Q. Innovation and future of mining rock mechanics[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(1): 1–21.
- [ 22 ] 高玉兵, 杨军, 王琦, 等. 无煤柱自成巷预裂切顶机理及其对矿压显现的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3349–3359.  
GAO Yubin, YANG Jun, WANG Qi, *et al.* Mechanism of roof presplitting in a nonpillar mining method with entry automatically retained and its influence on the strata behaviors[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3349–3359.
- [ 23 ] 王亚军, 何满潮, 王琦, 等. 无煤柱自成巷N00工法采留一体化装备与围岩控制关键设计[J]. 煤炭学报: 1–10.  
WANG Yajun, HE Manchao, WANG Qi, *et al.* Design of equipment system and surrounding rock control for N00 mining method without coal pillar left and roadway excavation[J]. *Journal of China Coal Society*: 1–10.
- [ 24 ] 张农, 韩昌良, 阚甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1635–1641.  
ZHANG Nong, HAN Changliang, KAN Jianguang, *et al.* Theory and practice of surrounding rock control for pillarless gob-side entry retaining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1635–1641.
- [ 25 ] 华心祝. 我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 78–81.  
HUA Xinzhu. Development status and improved proposals on gob-side entry retaining support technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2006, 34(12): 78–81.
- [ 26 ] WANG Q, HE M, YANG J, *et al.* Study of a no-pillar mining technique with automatically formed gob-side entry retaining for longwall mining in coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 125: 104332.

- Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 1–8.
- [ 27 ] GAO Y, WANG Y, YANG J, *et al*. Meso- and macroeffects of roof split blasting on the stability of gateroad surroundings in an innovative nonpillar mining method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 99–118.
- [ 28 ] ZHANG X, HE M, YANG J, *et al*. An innovative non-pillar coal-mining technology with automatically formed entry: a case study[J]. *Engineering*, 2020, 6(11): 1315–1329.
- [ 29 ] 何满潮, 王琦, 吴群英, 等. 采矿未来: 智能化5G N00矿井建设思考[J]. *中国煤炭*, 2020, 46(11): 1–9.  
HE Manchao, WANG Qi, WU Qunying, *et al*. The future of mining: thinking on intelligent 5G N00 mine construction[J]. *China Coal*, 2020, 46(11): 1–9.
- [ 30 ] 何满潮, 刘简宁, 刘冬桥, 等. 延川县新泰煤矿3G N00矿井设计与实践[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 1–10.  
HE Manchao, LIU Jianning, LIU Dongqiao, *et al*. 3G N00 mine design and practice in Xintai mine, Yan'an[J]. *Journal of Yan'an University(Natural Science Edition)*, 2022, 41(2): 1–10.
- [ 31 ] 何满潮, 高玉兵, 杨军, 等. 无煤柱自成巷聚能切缝技术及其对围岩应力演化的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 1314–1325.  
HE Manchao, GAO Yubing, YANG Jun, *et al*. An energy-gathered roof cutting technique in no-pillar mining and its impact on stress variation in surrounding rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1314–1325.
- [ 32 ] HE M, GONG W, WANG J, *et al*. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 29–42.
- [ 33 ] 陶志刚, 任树林, 何满潮, 等. 地下工程微观NPR锚杆钢静力拉伸及锚固抗剪力学特性[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 683–694.  
TAO Zhigang, REN Shulin, HE Manchao, *et al*. Static tensile and bolting shear mechanical properties of micro-NPR bolt steel in underground engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 683–694.
- [ 34 ] 高玉兵, 王炯, 高海南, 等. 断层构造影响下切顶卸压自动成巷矿压规律及围岩控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2182–2193.  
GAO Yubing, WANG Jiong, GAO Hainan, *et al*. Mine pressure distribution and surrounding rock control of gob-side entry formed by roof cutting and pressure release under the influence of faults[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(11): 2182–2193.
- [ 35 ] WANG Y, GAO Y, WANG E, *et al*. Roof deformation characteristics and preventive techniques using a novel non-pillar mining method of gob-side entry retaining by roof cutting[J]. *Energies*, 2018, 11(3): 627.