

孟加拉国 Barapukuria 矿厚煤层分层协调减灾开采模式

余学义¹, 穆 驰¹, 王 皓², 窦林名³, 文 虎¹

(1.西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2.中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3.中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:针对孟加拉国 Barapukuria 矿井开采中的顶板水害、冲击地压、煤层自然发火等危害矿井安全的灾害问题,在分析矿井“三厚二硬一强”地质特征及 UDT 强含水砂层水害、厚硬顶板断裂强冲击灾害和厚煤层多分层开采采空区遗煤的易自然发火灾害的致灾条件, LDT 隔水层隔水性能和覆岩结构关键层稳定性的控灾条件的基础上,提出了厚煤层分层协调减灾开采理论。应用协调减灾开采理论、原理,构建了孟巴矿厚煤层分层协调减灾开采模式和顶板水害上保下疏,冲击地压动静转移和自燃火灾时空适配的多灾源防控技术体系,实现了孟巴矿厚煤层多分层安全开采。通过在孟巴矿的应用与实践表明,厚煤层分层限厚开采能够充分利用覆岩结构控灾机制,避免厚硬顶板整体断裂冲击灾害发生;厚煤层分层协调错距布置方法开采,能够分散转移厚煤层边界高应力、避免覆岩拉伸区叠加破坏,有效保护隔水层的完整与隔水性;厚煤层分层整体错距协调开采方式,能够有效释放上分层采空区煤柱应力,实现覆岩整体快速沉降,密实覆岩垮裂带空隙,降低采空区自然发火危险性。在多灾害叠加的矿井开采条件下,应用协调减灾开采方法能够从源头控制开采致灾强度,与常规灾害防治方法相结合,能够起到更明显的灾害防治效果。

关键词:协调减灾开采理论;厚煤层分层开采;上保下疏开采模式;导水裂隙带;孟加拉国 Barapukuria 矿
中图分类号:TD823.8 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)06-2352-08

Mining mode of layered and coordinated disaster reduction in thick coal seam of Barapukuria Coal Mine in Bangladesh

YU Xueyi¹, MU Chi¹, WANG Hao², DOU Linming³, WEN Hu¹

(1.School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an 710054, China; 3.School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: According to the problems of roof water disaster, rock burst, and spontaneous combustion of a coal seam in the Barapukuria coal mine of Bangladesh, this paper analyzes the geological characteristics of “three thick, two hard and one strong” and the disaster conditions of the water disaster in the UDT strong water-bearing sand layer, the strong impact disaster of thick and hard roof fracture and the spontaneous combustion of residual coal in thick seam multi-layered mining goaf. On the basis of the disaster control conditions of the water-resisting performance of the LDT aquifuge and the stability of key strata of overburden structure, the theory of layered coordinated disaster reduction mining in a thick coal seam is put forward. Based on the theory and principle of coordinated disaster

收稿日期:2021-07-02 修回日期:2021-08-31 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1058

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874230);国家自然科学基金资助项目(52074208)

作者简介:余学义(1955—),男,陕西定边人,教授,博士生导师,博士。E-mail:yuxy@xust.edu.cn

通讯作者:穆 驰(1990—),男,陕西渭南人,博士研究生。E-mail:muc@stu.xust.edu.cn

引用格式:余学义,穆驰,王皓,等. 孟加拉国 Barapukuria 矿厚煤层分层协调减灾开采模式[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6):2352-2359.

YU Xueyi, MU Chi, WANG Hao, et al. Mining mode of layered and coordinated disaster reduction in thick coal seam of Barapukuria Coal Mine in Bangladesh[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6):2352-2359.



移动阅读

reduction mining, the mining mode of layered coordinated disaster reduction in the thick coal seam of Barapukuria coal mine is proposed. Also, the multi-disaster source prevention and control technology system of roof water disaster upper protection and lower drainage, dynamic and static transfer of rock burst and space-time adaptation of spontaneous combustion fire is constructed. The multi-layered safe mining of the thick coal seam in Barapukuria coal mine is realized. Through the application and practice in the Barapukuria coal mine, it shows that the thick seam slicing and thickness limiting mining can make a full use of the disaster control mechanism of overburden structure, and avoid the whole fracture and impact disaster of the thick and hard roof. The thick coal seam layered coordination staggered layout mining method can disperse and transfer the high stress at the boundary of the thick coal seam, avoid the superimposed damage of overlying rock stretching area, and effectively protect the integrity and water resistance of aquiclude. The thick coal seam slice overall staggered distance coordinated mining method can effectively release the coal pillar stress in the upper slice goaf, realize the rapid settlement of the whole overburden, compact the gap in the overburden fracture zone, and reduce the risk of spontaneous combustion in the goaf. Under the condition of multi-disaster superimposed mining, the application of coordinated disaster reduction mining method can control the disaster intensity from the source, combined with conventional disaster prevention methods, it can play a more obvious role on disaster prevention.

Key words: coordinated disaster reduction mining theory; layered mining of thick coal seams; upper protection and lower dredging mining mode; water-conducting fracture zone; Barapukuria coal mine in Bangladesh

孟加拉国 Barapukuria 煤矿(以下简称“孟巴矿”)是我国在孟加拉国承建的第1个煤矿,也是目前唯一的井工开采煤矿,矿井生产能力 1.0 Mt/a,为立井单水平下山开拓^[1-2]。矿井地质采矿条件复杂特殊,矿井属于水害、冲击矿压、采空区遗煤自然发火等多种灾害并存的井工开采类型。在近地表赋存新近系 Upper Dupi Tila 组(简称 UDT)承压含水砂层,被誉为孟加拉国的地下水库,孟巴矿煤层开采一旦破坏主要隔水层古近系 Lower Dupi Tila 组(简称 LDT),导通 UDT 含水层,其形成的水害对于矿井是致命的,因此保护 LDT 隔水层的完整性,提高 UDT 强含水层下的安全开采可靠性,降低冲击矿压威胁程度和减少采空区遗煤自然发火次数已经成为孟巴矿安全生产亟待解决的工程技术问题。

孟巴矿水文地质条件复杂、多种灾害交织、开采难度极大,严重制约了孟巴矿安全开采,因此寻求一种能够有效减轻灾害强度的开采模式,对于孟巴矿安全经济开采具有重要意义。笔者在分析孟巴矿特殊的地质开采条件的基础上,研究厚煤层分层协调减灾开采模式,即通过分层开采布局、开采顺序,应用限高开采、分层错距布置、覆岩整体沉降和避免邻面互扰减灾原理,从源头上降低或减轻灾害强度。同时针对性地制定灾害防治措施,实现矿井安全开采,形成孟巴矿强含水层下厚煤层多分层协调减灾开采模式。

1 矿井开采条件特殊性分析

1.1 水文地质特殊性

孟巴井田构造位置位于印度板块的东北部,为冈

瓦纳古陆的一部分,地层特征与欧亚大陆明显不同。石炭二叠纪煤系地层下部无奥灰,直接沉积在古老的岩浆岩和变质岩基底上,煤系地层上部直接覆盖巨厚的新近系、第四系地层。矿井主要水害来自顶板新近系含水层。孟巴井田主要含水层为新近纪松散含水层(UDT)和煤系含水层(图1)。

其中 UDT 松散含水层渗透系数可达 40 m/d 且补给充沛,可通过 LDT“天窗区”直接补给煤系含水层,是威胁矿井水害安全的最主要含水层;UDT 含水层下部的 LDT 隔水层对松散含水层具有一定的阻隔作用,但其在矿井北部存在大范围“天窗”,该隔水层的稳定性对矿井安全开采具有重要的作用。

孟巴矿地质条件特殊性表现为近地表覆盖 90.70~110.00 m 的松散砂岩强含水层(UDT),分布边界广,补给充沛,具有不可疏排性,开采煤层属于石炭二叠纪冈瓦纳含煤地段,含煤地层为富—弱含水砂岩层组类型,基本没有泥质岩层,开采煤层埋深 280~450 m,煤层厚度 29.00~41.52 m,煤层倾角 8°~12°,开采煤层顶板为平均厚度 105.8 m 的坚硬砂岩、砂砾岩组成。LDT 隔水层厚度 0~65 m,呈现南厚北薄分布特征,在井田北部部分缺失形成透水“天窗”。冈瓦纳砂岩地层受 UDT 补给,严重影响矿井安全开采。

1.2 覆岩结构特殊性

孟巴矿覆岩结构特殊性主要表现为 3 个方面:
① 矿井覆岩整体呈现为上软下硬的结构特征,软是指厚度较大的新近纪松散层,是矿井的主要含水层,其力学表现为对覆岩的加载作用,也使覆岩受到较大

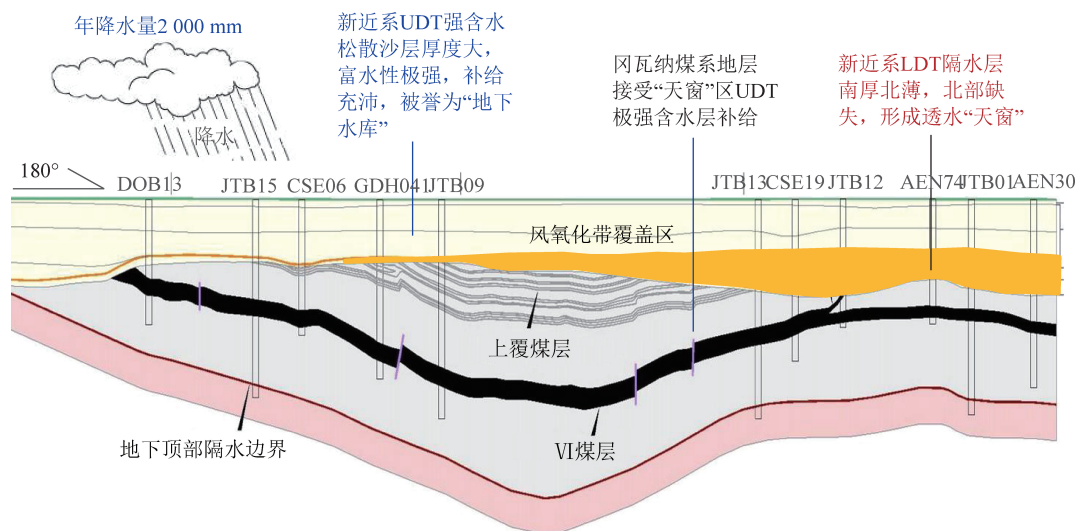


图 1 井田地质剖面示意

Fig.1 Schematic diagram of the geological section of the mine field

的静载荷,受到高应力作用下,煤层开采时会增加覆岩破坏范围,有利于水体的流动,增大了矿井受水害的威胁程度。② 矿井岩体的完整性较好,是覆岩内工程地质条件稳定性较好的岩组,主采煤层 VI 煤砂岩顶板厚度大,尽管其抗压强度不是很大,但是分层厚度大,整体性强,在覆岩变形破坏中表现出较高的强度特征,煤层初次开采顶板破坏为大块形状垮落,是典型的冈瓦纳地层硬岩破坏特征。③ 煤层坚硬顶板容易聚积大量的势能,会以应力波的形式对煤岩体施加动力载荷,从而导致处于应力极限状态的煤岩体产生强烈震动,VI 煤厚硬顶板中结构关键层结构断裂失稳的强冲击性和分层开采特厚遗煤多次氧化的强自燃性,形成多灾源叠加致灾的复杂矿井开采条件。

综上分析,孟巴矿地质条件特殊、多种灾害并存,针对矿井灾害类型的特点,在分析矿井特殊地质采矿条件基础上,需要对矿井致灾条件和灾害形成机理进行分析,探究控灾条件和灾害防治技术,分析厚煤层分层协调减灾开采科学含义和原理,研究厚煤层分层开采覆岩导水裂缝带发育规律,结合主采煤层上覆岩层特点,分析覆岩结构断裂失稳演化过程,确定孟巴矿协调减灾开采模式,避免矿井灾害发生,保证孟巴矿含水体系下厚煤层分层安全开采。

2 矿井致灾和控灾条件分析

2.1 致灾条件及灾害形成机理

(1)UDT 不可疏排性。UDT 岩性以中砂为主,夹细砂、含砾中粗砂及薄层黏性土,黏土含量由浅而深渐增。统计钻孔 UDT 岩性松散砂层占 94%;黏土仅占 4%,是地下水良好的存储和渗流场所。UDT 厚度

大、范围广、补给充分,矿井开采对其进行疏排几乎不可能,开采引起 UDT 水体疏漏,对于矿井是毁灭性的灾害。

(2)厚硬顶板整体断裂强冲击性。孟巴矿属于具有强冲击地压倾向的矿井,VI 煤顶板主要由砂岩、长石和石英组成,具有单层厚度大、岩体强度高、大块体垮落的特点,天然状态下抗压强度 6.79 ~ 55.32 MPa,平均抗压强度 29.1 MPa,其中距 VI 煤顶板 65 m 位置赋存有结构关键层,其抗压强度高达 55.32 MPa,而 V 煤以上冈瓦纳含煤地层尽管也是砂岩,但岩性较软,平均抗压强度一般在 5.40 ~ 16.64 MPa(图 2),即,除了 VI 煤顶板砂岩较硬外,从 V 煤顶板直至 UDT 底板均为软弱岩层,再往上是 UDT 松散层。在这种条件下,如果开采使得 VI 煤顶板结构关键层断裂失稳,在上覆松散层加载作用下,将产生巨大的动能,导致冲击地压灾害发生。

(3)厚煤层分层开采遗煤多次氧化的强自燃性。VI 煤层属于特厚煤层,煤层自然发火期仅为 18 d,受上覆的 UDT 强富水松散砂层制约,采用分层综采(综放)方法开采,多分层开采特厚遗煤要经历多次氧化,受中小断层和张裂带影响,采空区遗煤极易发生自燃火灾。

2.2 控灾条件分析

(1)顶板水害控灾条件。由于 UDT 富水性极强,具有不可疏排性,UDT 强富含水层下安全开采的要点是减轻开采对 LDT 隔水层的损伤程度,保护 LDT 隔水层的完整性和隔水性能,开采过程中 UDT 水只能渗漏,不允许疏漏。UDT 水体下开采的关键技术:一是开采覆岩导水裂缝带不波及 LDT,二是避免厚煤

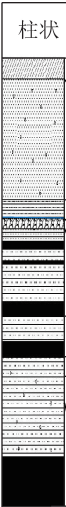
柱状	厚度/m	岩性描述	抗压强度/ MPa	单位涌水量/ (L·(s·m) ⁻¹)
	3~17	松散砂层		
	89~126	UDT 含水层		0.25~10.80
	0~112	LDT 隔水层	1.80	
	10~20	风氧化带	5.49	
	23~38	IV 煤及顶板砂岩	19.10	0.19~0.37
	13~21	V 煤及顶板砂岩	16.64	
	17.4	中砂岩	29.10	0.002~0.315
	15.2	细砂岩		
	21~42	VI 煤		0.021~0.057

图 2 地层岩性划分示意

Fig.2 Schematic diagram of stratigraphic lithology division

层分层开采边界的叠加效应导致 LDT 拉伸破坏。通过分层厚度的限制和分层整体错距协调布置开采,既可以控制覆岩导水裂缝带发育高度,又可以转移分层边界应力,避免应力叠加形成的冲击地压灾害发生,也能够避免覆岩拉应力区叠加对 LDT 隔水层的损伤破坏,达到保护 LDT 隔水层的目的,实现 VI 煤开采顶板水害“上保下疏”,冲击地压动静转移的防治方法。

(2)结构关键层的控灾条件。如图 2 所示,在 VI 煤顶板以上 65 m 位置赋存结构关键层,该关键层结构稳定性直接影响覆岩破坏发育高度。由此,可根据结构关键层的结构稳定性确定一分层开采厚度,在保证结构关键层结构稳定的条件下,既能将煤层厚硬砂岩顶板分次破坏,达到顶板断裂能量分次释放,又可实现基岩水递进疏放,满足矿井排水能力小的条件。

(3)采空区遗煤自然发火控灾条件。矿井下工作面热害严重,煤层涌水量很大,且二分层工作面采空区内有大量一分层遗煤,在这种高温高湿的复杂环境下采空区遗煤自燃规律不明。根据煤自燃程序升温实验,测试高温高湿环境对煤自燃耗氧速率、气体产生率及放热强度的影响,确定高温高湿环境对孟巴矿采空区遗煤自燃影响;结合实验结果,实时分析煤自燃预警等级,对下巷注氮惰化,上巷灌注粉煤灰复合胶体覆盖煤体进行分段封堵,降低向上层与本层邻近采空区漏风,防止采空区遗煤自燃。

2.3 孟巴矿井灾害防治的关键技术

(1)厚煤层分层开采水害防治关键技术。矿井 VI 煤开采主要的直接充水水源为 VI 煤及上覆冈瓦纳煤系地层含水层,间接充水水源为 UDT 含水层,主要充水通道为煤层回采形成的导水裂缝带,间接充水通道为井田北部 LDT“天窗区”。根据孟巴矿水文地质

特殊条件,结合矿井生产过程中水害防治实践,形成以“上保下疏”为核心的防治技术体系,关键技术包括:基于分层开采覆岩导水裂缝带发育高度与规律研究,通过控制分层开采高度,实现基岩裂隙水分段疏放,通过分层厚度控制和分层整体错距布置开采,保护 LDT 隔水层性能的有效性,满足“上保下疏”的要求^[3-4],实现巨厚强富含水沙层下厚煤层的安全开采。

(2)矿井冲击地压灾害防治关键技术。针对孟巴矿动静载叠加复合型冲击地压,从降低动、静载荷强度上进行冲击地压防治。在区域先行方面,需在分层开采体系下,进一步优化下分层采掘工作面布置,建立分层开采错距布置的区域防冲体系,确保下分层采掘区域充分利用上分层解放层形成的卸压区,避免形成高静载区域;采用区段小煤柱留设方案后,煤柱为屈服煤柱,其内部无法形成弹性核,也一定程度上消除了高静载应力集中现象^[5-7]。在局部跟进方面,由于开切眼外错、张裂带和厚层坚硬顶板的影响,局部区域冲击地压风险升高,因此制定专项防冲措施,建立冲击地压风险的监测预警技术,进一步确保局部区域的采掘安全。从而最终形成分层协调减灾开采下的孟巴矿防冲减灾体系。

(3)高温高湿煤层氧化自燃防治关键技术。结合孟巴矿高湿环境煤自然发火机理及特征,通过程序升温实验^[8-9],对高温高湿条件下的孟巴煤样分别进行加热升温,在不同温度情况下,测试煤样的耗氧特性、CO、CO₂等气体产生量等自燃特性,以此确定高温高湿环境对孟巴矿采空区遗煤自燃影响;同时,对重点防灭火地点采用人工监测及采样色谱分析进行预测预报,采用地面移动式注胶防灭火系统,注氮防灭火系统以及煤层火灾束管监测系统对分层开采期间煤层氧化自燃进行防治,并定期对防灭火系统进行检查,降低采空区发火危险程度。

3 协调减灾开采理论

3.1 协调减灾开采科学含义

特厚煤层分层错距协调减灾开采是基于协调理论的矿井开采部署、开采顺序和开采参数在空间和时间方面的科学有效衔接和管理^[10-11],应用分层错距布置、限高开采、覆岩整体下沉和降低邻面采掘互扰减灾原理,避免覆岩应力的叠加,降低灾害强度,实现安全开采^[12-14]。

3.2 协调减灾开采原理

应用限高开采、分层错距布置、覆岩整体沉降和降低邻面采掘互扰原理实现协调减灾开采的目的。

(1)分层错距布置。根据分层开采覆岩变形破坏的可叠加性,将上下分层边界错距布置,避免边界拉伸变形区叠加破坏,保护隔水层的完整隔水性能。

(2)限高开采。根据开采高度和覆岩破坏高度发育规律,结合防灾的要求,制定分层开采高度,达到减灾的目的。

(3)覆岩整体沉降。分层间整体错距布置,有效释放采空区煤柱区应力,实现覆岩整体均匀沉降,密实垮落带和断裂带空隙,降低采空区遗煤氧化发火程度,避免大范围煤柱失稳的冲击灾害发生。

(4)降低邻面采掘互扰。相邻开采工作面开采容易引起覆岩移动破坏应力叠加破坏,通过相邻采掘工作面错时开采,有效避免采掘相互扰动。

4 孟巴矿厚煤层分层协调减灾开采模式

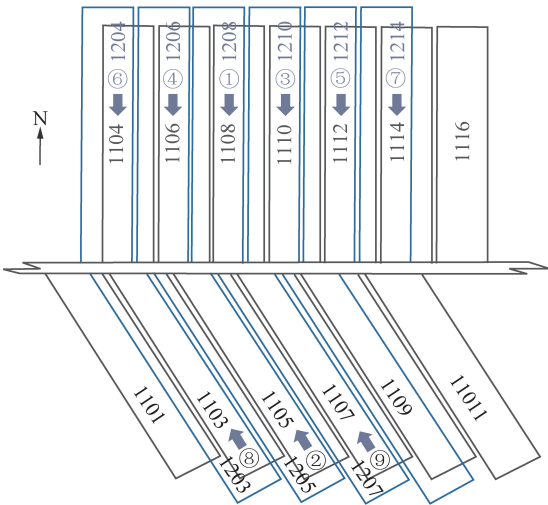
针对矿井“三厚二硬一强”地质特征,和矿井顶板水害、冲击地压、自燃火灾多灾源致灾机理及规律,基于分层协调减灾开采理论,构建协调减灾开采模式,制定顶板水害上保下疏,冲击地压动静转移和自燃火灾时空适配的多灾源防控技术。

4.1 协调减灾开采模式

(1)分层错距布置,避免覆岩应力集中,实现覆岩整体下沉。根据开采边界引起覆岩拉伸区的范围,由式(1)^[4]确定分层错距为 50~80 m,布置模式如图 3 所示。

$$L = 0.4r_1 + 0.4r_2 \tag{1}$$

式中, L 为合理错距,m; r_1,r_2 为相邻分层开采在 LDT 的主要影响半径,m。



1101,1102,为工作面编号;①,②,...,⑨为开采顺序

图3 分层错距布置模式

Fig.3 Stratified staggered layout mode

(2)一分层限高开采,控制覆岩破坏高度,实现基岩水递进疏放,顶板断裂能量分次释放。关键技术是一分层开采必须保证结构关键层的稳定性,以避免厚硬顶板一次断裂导致冲击地压灾害发生。根据文献[15],结构关键层稳定的充分必要条件由式(2)计算。根据式(2)计算,在一分层工作面开采高度小于 3.5 m,工作面宽度小于 150 m 的条件下,就能满足一分层开采后结构关键层的稳定,实现Ⅵ煤顶板砂岩分段破坏。

$$\begin{cases} 4 \left[\frac{8l^2(4D\pi^2 - ql^2 \sin \alpha)}{4D\pi^4 - 3D\pi^2 l^2} \right]^3 + 27 \left(\frac{32ql^6 \cos \alpha}{4D\pi^7 - 3D\pi^5 l^2} \right)^2 = 0 \\ \frac{8l^2(4D\pi^2 - ql^2 \sin \alpha)}{4D\pi^4 - 3D\pi^2 l^2} \leq 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中, l 为关键层结构稳定的跨度,m; q 为上覆岩层施加的载荷,N/m; α 为结构关键层岩层的倾角,(°); D 为结构关键层抗弯刚度,N/m。

(3)二分层开采覆岩导水裂缝带不波及 LDT 隔水层。通过实验室相似材料模拟、数值计算模拟研究,结合各分层开采对覆岩导水裂隙带的 9 个钻孔观测成果,给出了分层开采覆岩导水裂隙带高度发育规律(图 4),构建了孟巴矿覆岩导水裂隙带发育高度计算模式^[16-18]:

$$H_1 = \begin{cases} 21 \sum_{i=1}^n x_i + 2 \pm c, & 3 \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq 6 \\ 22.5 \sum_{i=1}^n x_i - 1.2 \pm c, & 6 \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq 10 \\ 127.14 \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^{0.25} \pm c, & \sum_{i=1}^n x_i > 10 \end{cases} \tag{3}$$

式中, H_1 为导水裂隙带发育高度,m; x_i 为分层开采高度,m; n 为分层数目, $n=1,2,3$; c 为南北翼岩性差异松弛

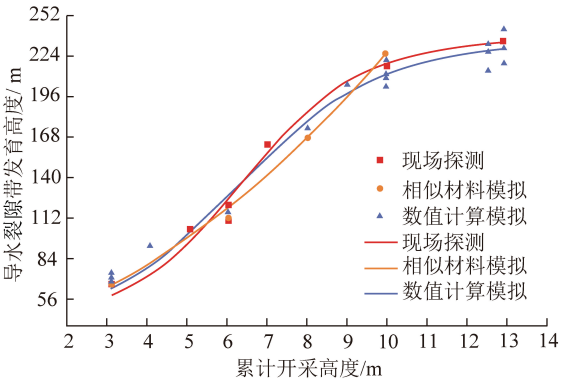


图4 导水裂隙带发育规律

Fig.4 Development law of water-conducting fracture zone

量,取 10(在南翼计算中取正值,北翼计算中取负值)。
(4) 三分层限高开采,限制导水裂隙带进入隔水层。二分层开采后顶板结构破坏,开采煤层覆岩综合

岩性由中硬转变为软弱岩性特征,三分层开采时在覆岩巨厚松散层加载作用下,整体快速下沉,覆岩导水裂隙带发育高度大幅降低,如图 5,6 所示。

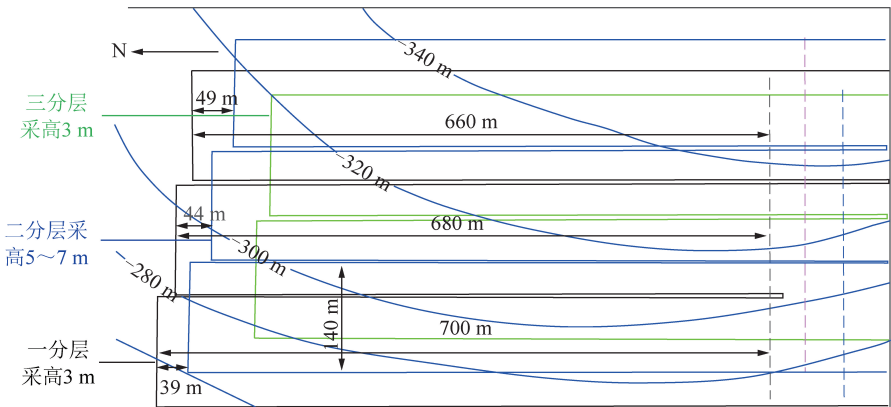


图 5 孟巴矿分层开采错距布置

Fig.5 Staggered layout of layered mining in Barapukuria coal mine

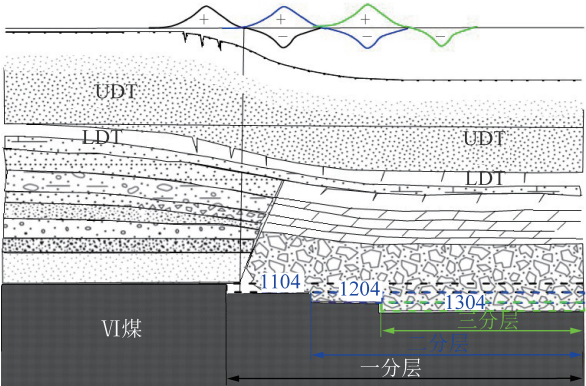


图 6 孟巴矿分层协调减灾开采布置方式

Fig.6 Layout of layered coordinated disaster reduction mining in Barapukuria coal mine

(5) 避免相邻工作面采掘互扰。采用两翼采掘接替布置方式,采掘工作面通过采区一翼顺序跳采、两翼交替跳采接替顺序,实现时空适配,降低邻面采掘互扰,减少形成高静载和高动载区域。

4.2 协调开采效果分析

针对孟巴矿特厚煤层多分层开采顶板水害、冲击地压和自燃火灾的灾害特征,除了采用常规的灾害防治措施外,采用分层协调减灾开采技术,从源头控制开采损害程度,有效地降低了灾害的危险程度,实现了在多灾害条件下,3 个分层的安全开采。

(1) 应用分层边界错距协调减灾开采模式,一分层均采用 3.0~3.2 m 限厚开采,二分层采用综放开采,采放厚度 4.0~7.0 m,三分层只采不放,开采厚度 2.8~3.2 m。避免了分层边界拉应力区叠加效应,控制了覆岩导水裂隙带发育高度,有效保护了 LDT 隔水层的完整隔水性能;通过控制分层开采厚度,使得一分层开采主要疏放 VI 煤顶板至 V 底板基岩段裂隙

水,二分层开采主要疏放 V 煤顶板至 III 煤底板基岩裂隙水,三分层开采主要疏放 LDT 底板基岩风氧化带水,基岩裂隙水随分层开采分段疏放,矿井涌水量平稳缓慢增长(图 7),实现了顶板水害上保下疏的水害防治目标。

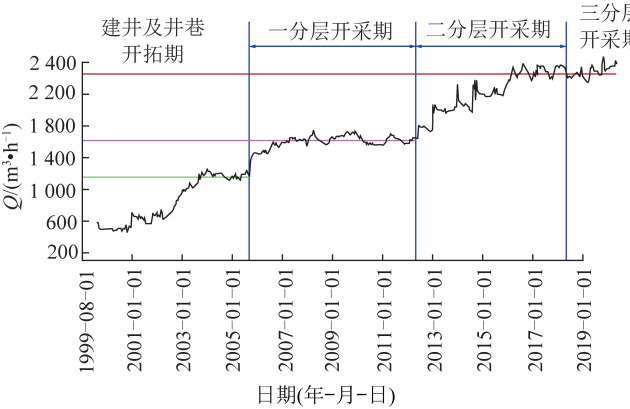


图 7 矿井涌水量随工作面开采变化情况

Fig.7 Variation of mine water inflow with mining face

(2) 基于构建的结构关键层稳定性计算模型,确定了一分层开采厚度,实现了煤层厚硬顶板分次破坏,避免了厚硬顶板一次破断的强矿压冲击灾害发生;分层整体错距布置开采,避免了分层边界应力集中,释放了上分层采空区煤柱应力,实现了分层开采冲击地压动静转移。

(3) 分层错距协调开采,下分层开采破坏了上分层采空区煤柱,二分层开采后结构关键层失稳,在上覆巨厚松散岩层加载作用下,实现了覆岩整体快速沉降,密实了断裂带空隙,同时针对分层开采采空区遗煤自然发火特征,实施了立体封堵,时空适配防火方案,开采工作面回风隅角 CO, O₂ 体积比呈明显减小

趋势(图 8),有效降低了采空区自然发火危险性。

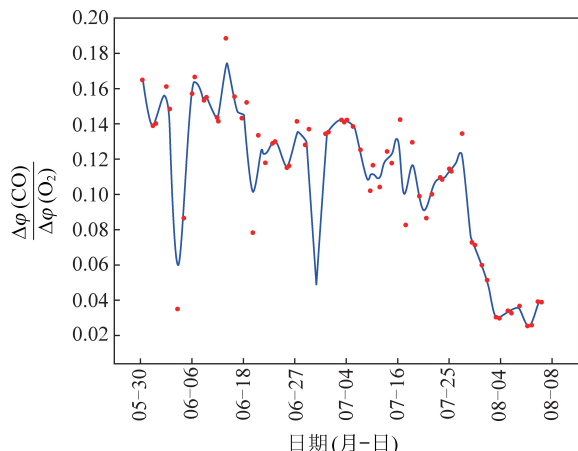


图 8 工作面回风隅角 CO、O₂ 体积比变化趋势

Fig.8 Variation trend of CO、O₂ volume ratio in the return air corner of working face

5 结 论

(1)通过矿井地质、水文地质和采矿条件分析,得到了矿井地质采矿条件具有开采煤层厚硬、开采煤层顶板砂岩层厚硬和上覆松散含强水层 UDT 厚的“三厚二硬一强”特征,覆岩为上软下硬的结构类型,基岩中缺少有效的隔水层,特殊的地质条件是诱导矿井灾害的关键因素。

(2)针对矿井顶板水害、冲击地压、自燃火灾多灾源致灾机理及规律,提出了厚煤层分层开采水害防治、矿井冲击地压灾害防治、高温高湿煤层氧化自燃防治的关键技术,形成了顶板水害上保下疏,冲击地压动静转移和自燃火灾时空适配的多灾源防控技术,应用限高开采、分层错距布置、覆岩整体沉降和降低邻面采掘互扰可以达到协调减灾开采的目的。

(3)限制分层开采厚度可以达到煤层厚硬顶板分段破坏、顶板破断能量分次释放和基岩水分次疏放的减灾目的,根据协调减灾开采原理,避免分层开采边界拉伸应力叠加破坏 LDT 隔水层,下分层开采有效释放上分层采空区煤柱应力,使得覆岩整体平缓下沉,达到降低覆岩导水裂缝带发育高度,减小顶板破坏冲击能量,密实分采空区冒落岩块,降低采空区发火危险程度,形成了孟巴矿特厚煤层分层协调减灾开采模式。

参考文献(References):

[1] 许文强. Barapukuria 煤矿强含水厚松散层下协调减损开采技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
XU Wenqiang. Research on coordination and damage-reduction mining technology under thick loose strong aquifer of Barapukuria-

coal mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.

- [2] 马立东. 孟巴矿厚煤层多分层开采覆岩导水裂缝带发育规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
MA Lidong. Research on the development law of water-transmitting fracture zone in overlying strata in multi-slice mining of thick coal seam in Barapukuria coal mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [3] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 7-14.
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionalization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7-14.
- [4] 余学义, 毛旭魏, 郭文彬. 孟巴矿厚松散含水层下协调保水开采模式[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 739-746.
YU Xueyi, MAO Xuwei, GUO Wenbin. Coordinated waterproof mining mode under thick loose sand stratum in Barapukuria coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 739-746.
- [5] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [6] 窦林名, 李振雷, 张敏. 煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 41-46.
DOU Linming, LI Zhenlei, ZHANG Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 41-46.
- [7] 尹光志, 李贺, 鲜学福, 等. 煤岩体失稳的突变理论模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1994(1): 23-28.
YIN Guangzhi, LI He, XIAN Xuefu, et al. Catastrophe theory model of coal and rock mass instability[J]. Journal of Chongqing University, 1994(1): 23-28.
- [8] 邓军, 赵婧昱, 张嫵妮, 等. 陕西侏罗纪煤二次氧化自燃特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(1): 34-40.
DENG Jun, ZHAO Jingyu, ZHANG Yanni, et al. Experimental study on spontaneous combustion characteristics of secondary oxidation of Jurassic coal[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(1): 34-40.
- [9] 文虎, 黄遥, 张玉涛, 等. 氧气体积分数与升温速率对弱黏煤燃烧特性的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2362-2368.
WEN Hu, HUANG Yao, ZHANG Yutao, et al. Effects of oxygen concentration and heating rate on the characteristics of bituminous coal combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2362-2368.
- [10] 余学义, 赵兵朝. 柏林煤矿滑坡区高层建筑物下煤层控制开采技术[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(S1): 65-67, 76.
YU Xueyi, ZHAO Bingchao. Controlled mining technology of coal seam under high-rise buildings in landslide area of bolin coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2003(S1): 65-67, 76.
- [11] 余学义, 毛旭魏. 近距离煤层重复采动对坡体稳定性的影响

[J].西安科技大学学报,2019,39(1):34-42.

YU Xueyi,MAO Xuwei. Influence of repeated mining of close distance coal seams on slope stability[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2019,39(1):34-42.

[12] 余学义,陈辉,赵兵朝,等.基于协调开采原理的裂隙带发育高度模拟[J].煤矿安全,2014,45(9):190-192,196.

YU Xueyi, CHEN Hui, ZHAO Bingchao, et al. Crack development height simulation based on coordinate mining principle [J]. Safety in Coal Mines,2014,45(9):190-192,196.

[13] 余学义,王飞龙,赵兵朝.河流下限高协调开采方案[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(09):1183-1187.

YU Xueyi, WANG Feilong, ZHAO Bingchao. Harmonic limited height under river mining project[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2014,33(9):1183-1187.

[14] 尹士献,余学义,康录安,等.西固村镇下变条带协调开采[J].煤炭工程,2003(10):4-8.

YIN Shixian,YU Xueyi,KANG Lu'an,et al. The variable and harmonious strip mining in Xigu village [J]. Coal Engineering, 2003(10):4-8.

[15] 郭文彬. 孟加拉国 Barapukuria 井田三厚条件下协调减损开采理论研究与应用[D].西安:西安科技大学,2018.

GUO Wenbin. Research and its application of coordination mining considering reduction prevention Bangladesh Barapukuria mine with all thick coal seam, loosen aquifer zone and sadstone roof [D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2018.

[16] 余学义,刘俊,赵兵朝,等.孟巴矿特厚煤层分层开采覆岩导水裂隙带高度测定[J].煤矿安全,2013,4(8):169-174.

YU Xueyi, LIU Jun, ZHAO Bingchao, et al. Determination on the height of slice mining overburden rock water flowing fractured zone of extremely thick coal seams in Barapukuria coal mine of Bangladesh[J].Safety in Coal Mines,2013,44(8):169-174.

[17] 余学义,郭文彬,赵兵朝.冈瓦纳地层特厚煤层顶水分层开采覆岩破坏规律综合研究[J].矿业安全与环保,2016,43(2):71-75.

YU Xueyi, GUO Wenbin, ZHAO Bingchao. Comprehensive research on overburden strata failure law during backwater slice mining of extra-thick coal seam in gondwana strata [J]. Mining Safety and Environmental Protection,2016,43(2):71-75.

[18] 郭文彬,余学义,赵兵朝,等.高构造应力区大采高覆岩灾变规律实验研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):1058-1064.

GUO Wenbin, YU Xueyi, ZHAO Bingchao, et al. Experimental research on catastrophic mechanism of overburden strata with high excavation height in high tectonic stress zone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(6):1058-1064.