doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.260

基于瓦斯治理-抽采-利用一体化的深部突出矿井安全绿色开发模式与示范工程

张建国[1,2],王 满[1,2],袁 淼[3a,3b],刘庆军[2],李 登[3a,3b],王晓川[3a,3b]

(1.中国平煤神马集团 炼焦煤资源开发及综合利用国家重点实验室,河南 平顶山 467000;
2.中国平煤神马能源化工集团有限责任公司,河南 平顶山 467000;
3. 武汉大学 a.水射流理论与新技术湖北省重点实验室;b.动力与机械学院,武汉 430072)

摘要:分析了深部突出矿井在瓦斯治理与循环利用中存在的主要问题,总结了瓦斯治理、瓦斯抽采、瓦斯利用及热害治理方面的发展现状。以首山一矿为例,提出了瓦斯治理-瓦斯抽采-瓦斯发电-集中制冷-热害治理的闭环系统构架,以实现深部突出矿井的安全、高效、绿色开发。研究了首山模式下大采高单一低透突出煤层"一面多巷"瓦斯综合治理技术,研发了分源网络化瓦斯立体抽采技术与动态调控技术,实现了瓦斯治理与抽采的高效协作;分析了瓦斯发电设备与制冷设备联合运行过程,实现了深井热害的有效治理。建立了首山一矿发电并网示范工程与矿井降温示范工程,实现了瓦斯资源综合治理与循环利用的统一,形成了深部突出矿井的安全、高效、绿色开发模式,可为国内类似矿井开发提供借鉴意义。

关键词:深部突出矿井;瓦斯治理与利用;绿色开发模式;示范矿井

中图分类号:TP028.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2022)02-029-12

Safe and green exploitation model and demonstration projects of deep outburst mine based on the integration of gas control, extraction and utilization

ZHANG Jianguo[1,2], *WANG Man*[1,2], *YUAN Miao*[3a,3b], *LIU Qingjun*[2], *LI Deng*[3a,3b], *WANG Xiaochuan*[3a,3b]

(1. State Key Laboratory of Coking Coal Exploitation and Comprehensive Utilization, China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan, Henan 467000, P. R. China; 2. China Pingmei Shenma Energy and Chemical Group Corporation Limited, Pingdingshan, Henan 476000, P. R. China; 3a. Hubei Key Laboratory of Waterjet Theory and New Technology; 3b. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: This paper analyzed the main problems in gas control and recycling in deep outburst mines in China and summarized the state of gas control, gas extraction, gas utilization and heat damage

收稿日期:2020-10-30 **网络出版日期:**2021-05-07

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808401)。

Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFC0808401).

作者简介:张建国(1965—),教授级高级工程师,致力于深部矿井瓦斯防治体系研究,(E-mail)zhangjg_z@126.com。

通讯作者:王晓川(1963—),副教授,硕士生导师,(E-mail) xcw001@whu.edu.cn。

control. Taking Shoushan No. 1 Mine as an example, a closed loop system architecture of gas treatment-gas extraction-gas power generation-centralized refrigeration-heat damage control was proposed to realize safe, efficient and green development of deep outburst mines. The comprehensive gas control technology of "One side, Many lanes" in coal seam with single mining height and low permeability outburst in Shoushan mode was studied. An integrated pipeline system for gas extraction and gas dynamic control technology were developed to realize efficient collaboration of gas management and drainage. The combined operation process of gas power generation equipment and refrigeration equipment was analyzed to realize effective treatment of heat damage in deep wells. The demonstration project of power grid connection and mine cooling in Shoushan No.1 Mine was established to realize the unification of comprehensive management and recycling of gas resources, forming a safe, efficient and green development mode of deep outburst mines and providing reference for similar mine development in China.

Keywords: deep mine; gas control and utilization; green development model; demonstration of mine

在中国过去几十年的经济发展当中,煤炭作为主要能源起到了显著的作用,但是随着国际能源形势及环境保护的需求,煤炭资源的开采及利用面临着更高的要求[1-4]。随着煤矿开采深度的不断增加,高瓦斯、低透气性、高地温等问题日益凸显,瓦斯治理与循环利用难度持续加大,瓦斯突出与热害灾害频发;大采高工作面采空区大,瓦斯聚集增加,上隅角易发生瓦斯超限,严重制约了煤矿安全生产。另一方面,正在开采当中的矿井生产工作面煤层瓦斯由于煤层开采深度和开采强度的不断增加而增大,再加上煤层赋存条件的逐步恶化,矿井回采工作面各种动力灾害事故频频出现。此外,由于地温随矿井深度增加而升高,加上其他热源的放热作用(空气压缩、氧化过程、机械设备做功),使得受到高温威胁的矿井日益增多。因此,对深部突出矿井进行瓦斯综合治理与高效清洁利用以及有效的热害治理,能增强煤与瓦斯突出矿井及高地温矿井开采的安全基础,可显著降低煤矿瓦斯安全事故的发生次数,并可有力提升矿井的生产力水平,有利于矿区社会环境的稳定,保障人员的生命财产安全,具有显著的经济效益及社会效益。

河南平宝煤业有限公司(简称平宝公司)设计年产量 2.4×10^6 t,井田内煤层平均埋深为 750 m,地层倾角 8°～12°。主采煤层戊$_8$、戊$_{9-10}$煤层和己$_{15}$、己$_{16-17}$煤层均为突出煤层,现只对己组煤层进行开采。己$_{16-17}$煤层瓦斯含量最大为 19.5 m^3/t,瓦斯压力最大为 3.6 MPa;己$_{15}$煤层瓦斯含量最大为 10.5 m^3/t,瓦斯压力最大为 1.5 MPa。地温梯度 3.42 ℃/100 m,钻孔实测岩温 39.70～50.57 ℃,热害程度非常严重。矿井目前的采掘活动集中在－850 m,底抽巷内温度达 33～35.6 ℃,高瓦斯、高地压及高地温问题严重制约矿井安全高效生产。

为解决矿井当前面临"三高六难"的问题(即高瓦斯、高地压、高地温;通风难、运输难、提升难、供风难、供水难、行人难),实现深部突出矿井瓦斯综合治理与循环利用的统一,提出了瓦斯治理-抽采-发电-制冷-热害治理一体化的全新理念,形成了针对大采高工作面的"一面多巷"瓦斯综合治理模式,建立了井下、地面及备用抽采系统为一体的分源网络化瓦斯立体抽采系统,研发了瓦斯抽采动态调控技术与装备,优化了发电制冷技术方案,建设了矿井降温示范工程,有利于推动瓦斯抽采、发电及热害治理领域的技术创新与产业化以及建立循环经济的全新模式,将对矿井降温行业产生较大的影响,也符合中国节能减排的基本国策。

1 深部突出矿井安全高效绿色开发模式研究现状

1.1 国内深部突出矿井安全高效绿色开发现状

1.1.1 瓦斯治理与抽采现状

随着对深部煤层的开采,越来越多的煤层呈现出煤层瓦斯压力大、赋存含量高和涌出时间久的特点。当前深部高瓦斯煤层逐步开始向突出煤层转化,复合动力灾害凸显,并且深部煤层透气性低,煤与瓦斯共采矛盾突出。中国瓦斯治理与抽采主要是采取煤与瓦斯共采的方法,现阶段广泛应用的共采方法主要为地面钻

井法、巷道法及留巷钻孔法 3 种方法。

1)地面钻井法煤与瓦斯共采。地面钻井法煤与瓦斯共采技术主要包括采前预抽和采中卸压瓦斯抽采，以便实现深部突出矿井煤与瓦斯安全高效共采。该方法既可以抽采采空区瓦斯，又可以抽采采动区临近层卸压瓦斯，适用于低透气性煤层群开采[5]。平顶山、淮南和晋城等地都对地面钻井抽采采动区瓦斯技术进行了较为成熟的应用，对中国深部低透气性矿井煤与瓦斯共采技术的发展起到了显著的促进作用。

2)巷道法煤与瓦斯共采。巷道法煤与瓦斯共采是指在根据煤层自身禀赋特点及地质条件，将专用瓦斯抽采巷道布置在煤层中的合理位置，在巷道内对煤层瓦斯采用钻孔的方法进行统一抽采[6]。该方法具备瓦斯抽采流量大、浓度范围大及抽采负压小等特点且可用于采空区瓦斯的封闭抽采，做到“一巷三用”。

3)留巷钻孔法无煤柱煤与瓦斯共采。由于深部突出矿井高瓦斯、高地温、高地压及低透气性等特点，采用沿本煤层采空区边缘保留回采巷道结合无煤柱沿空留巷的方式消除采空区上隅角瓦斯积聚并改善回采系统热害状况，将煤与煤层卸压瓦斯同步开采，分源治理不同浓度瓦斯[7]。当前深部突出矿井所面临的煤炭开采、瓦斯治理及巷道支护等多项生产实际问题都能够通过该方法有效解决。

1.1.2　瓦斯利用/发电现状

虽然，煤炭开采过程中由于煤矿瓦斯的存在出现了很多的问题，但是从清洁能源的高效利用来看，瓦斯又是一种具有较大开发潜力的清洁能源。对瓦斯进行合理的利用能相对缓解中国面临的能源短缺问题，具有较大的经济及战略意义。瓦斯发电技术在中国处于起步阶段，但是由于瓦斯浓度和压力很容易受到外界因素的影响而发生变化，从而对瓦斯发电效率产生影响。综合国内外瓦斯利用技术来看，浓度为 5%～30% 的瓦斯利用率较低并存在一定的安全问题。经过近几年来的发展，对较低浓度瓦斯的利用技术取得了一定的进步，但是在实际生产当中仍存在一定的问题，无法进行一定规模化的应用[8-10]。

1.1.3　深部突出矿井热害治理现状

随着地表矿物开采的日趋枯竭，矿井采掘深度逐年增加，由于地温随矿井深度增加而升高，受到高温威胁的矿井日益增多[11]。现阶段中国深井开采时间不长，矿井热害近期呈现出严重趋势。在矿井热害治理中主要通过避开局部热源、加强通风及预冷进风等方法，但这些方法最多可以使工作面温度降低 2～3 ℃，在深井中不足以消除热害。因此，中国在该领域的研究还处于起步阶段，尚未形成一支专业而系统的研究开发队伍，也未形成一整套成熟的矿井降温技术和完备的降温设备。无论是设备市场占有率、研究水平或设备研制和开发力度，国内都处于比较落后的水平[12]。

1.2　深部突出矿井瓦斯治理及利用中存在的问题

随着煤炭开采逐渐向深部进发，破坏性更大的复合型动力灾害逐渐显现，深部煤层瓦斯浓度高、煤层透气性低，瓦斯灾害越来越严重；同时随着地温的上升，深部矿井出现越来越严重的煤自燃灾害，煤与瓦斯共采矛盾越发凸显[13]。另外，针对深部矿井复合动力灾害的防治技术及装备发展缓慢。防治投入大，成本高，中国多数深部矿井仍采用国外技术，大多数主机、配件均需国外进口，价格昂贵且运行费用高[14]。很多矿山面临着严峻的安全形势，经济效益与防治成本之间的矛盾显著。深部煤层瓦斯赋存条件复杂，这使得瓦斯灾害发生的诱因也越来越多样化，并出现与其他灾害复合发生的可能，煤层突出的可能性越来越大[15]。这不但给煤矿工人的生命及矿井财产安全造成巨大威胁，还严重制约着煤炭工业的发展。

瓦斯的抽采是瓦斯治理过程中的必要措施，一方面抽采瓦斯能够显著降低煤层瓦斯浓度，防止煤与瓦斯突出以及瓦斯的爆炸。另一方面，瓦斯作为一种具有优越性能的清洁资源有着多种多样的应用方式。然而，现阶段中国瓦斯抽采系统存在着诸如抽放系统位置不合理、监测设备不健全等问题。另外，大部分矿区煤层赋存条件较为复杂，瓦斯抽采存在抽采浓度、抽采效率、抽采能耗等方面效果不理想等问题。

随着开采深度的增加，矿井地温逐渐升高，高温热害逐渐显现，并成为深部矿井煤炭开采过程中最为常见的自然灾害，降低了煤炭开采的效率，威胁煤炭工人身体健康。现阶段，矿井常规的缓解热害的方法主要是局部制冷措施，这显然无法解决深部矿井日益严重的热害问题，且该方法降温范围小、运行成本高，很难进行大范围的推广及应用。

总的来说，现阶段中国深部突出矿井面临的问题是多方面的，虽然经过多年的发展已经取得了初步的成效，很多矿井在瓦斯治理、瓦斯抽采、瓦斯利用及深井热害治理等方面具备了一定的技术与经验，但主要是针对这些问题进行单个或局部的解决，从而导致了深部突出矿井的瓦斯综合治理与循环利用无法一体化，且矿山的开发与建设缺乏统筹性与整体性规划。为此开发了深部突出矿井瓦斯治理-抽采-发电-制冷闭环系统架构。

2 深部突出矿井瓦斯治理-抽采-发电-制冷闭环系统架构

基于瓦斯治理-抽采-发电-制冷闭环系统的深部突出矿井安全高效绿色开发模式是一个复杂的综合性闭环系统，涉及多学科的融合、多专业的交叉和多种技术的集成，遵守闭环循环逐级规划，闭环系统逐步分解的总体思路。整个闭环绿色开发模式架构如图 1 所示。

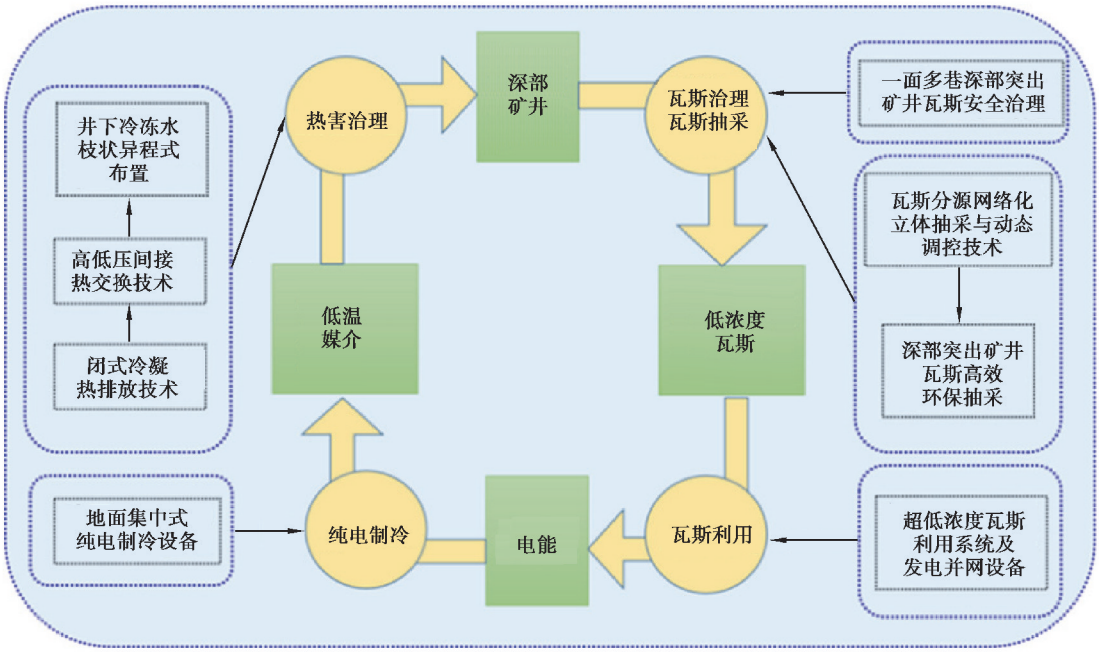

图 1 深部突出矿井安全、绿色、高效开发模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the safe, green and efficient development model of deep outburst mines

该研究根据首山一矿地质条件与现有巷道布置情况，并结合平顶山矿区深部突出矿井地质特征，进行了瓦斯治理巷道层位优选研究，建立了集底抽巷穿层钻孔、本煤层顺层钻孔、高抽巷抽采采空区于一体的立体瓦斯综合治理技术。其次，基于瓦斯抽采智能动态调控技术的分布式多源网络化高效立体抽采系统，采用“一面多巷”立体抽采系统布置，构建了地面抽采系统、井下采区抽采系统、移动抽采系统三者互为备用和相互转换的联网抽采方法，保证瓦斯抽采参数与负压在线监控并结合瓦斯抽采动态数据进行瓦斯抽采浓度的智能控制与主动控制，进而实现了瓦斯精细化与高效抽采的统一优化以及瓦斯的高效循环利用。最后，研究了瓦斯发电高效并网输配方式，建设了首山一矿瓦斯发电站并网示范工程；分析了瓦斯抽采利用设备与瓦斯资源利用制冷系统的高效联合工作机制，优选矿井集中制冷技术方案，对矿井集中制冷降温系统关键技术参数进行优化；并对整套制冷系统进行矿井制冷降温效果测试及系统运行综合分析，进而完成瓦斯综合治理与循环利用的有机结合与高效协同。首山一矿基于上述规划进行了系统工程设计，具体现场布置如图 2 所示。

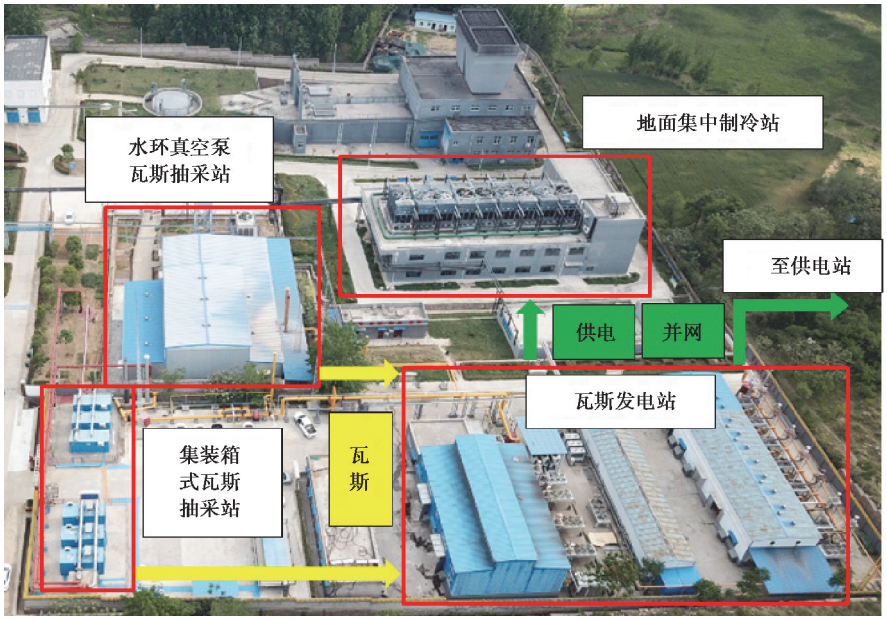

图 2　首山一矿安全绿色高效开发现场布局

Fig. 2　The layout field of Shoushan No.1 Mine for safe, green, and efficient exploitation

3　深部突出矿井安全高效绿色开发模式工程示范

3.1　首山模式下大采高单一低透突出煤层瓦斯综合治理技术

首山模式下大采高单一低透突出煤层瓦斯综合治理技术是在低位巷穿层钻孔（水力冲孔）治理瓦斯掩护煤巷安全掘进、顺层钻孔预抽回采区域煤层瓦斯掩护采面安全回采的基础上，对“一面四巷”“一面五巷”“一面六巷”以及“一面七巷”的瓦斯治理布置方式进行探索[16]，如图 3 所示。在$己_{15}$－12050 工作面和$己_{15}$－12090 工作面采用“一面多巷”的区域治理模式，即在回采面分别布置抽放巷、煤巷、一条瓦斯高抽巷以及一条沿空掘巷。在实际生产中，采用穿层钻孔（水力冲孔、水力造穴）的方法预抽煤巷条带煤体瓦斯掩护采煤掘进，使用封闭高抽巷的方法抽采采空区瓦斯并利用煤巷预抽回采区域煤层中的瓦斯。

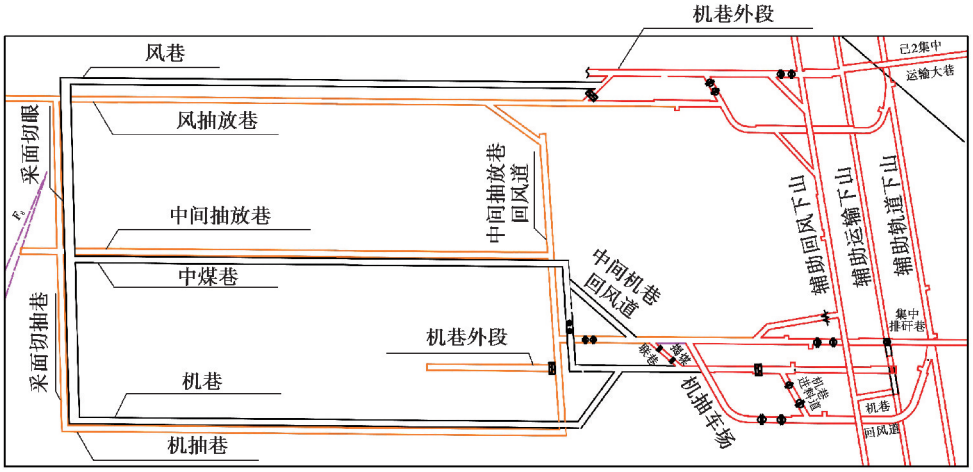

图 3　“一面多巷”立体抽采系统布置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of “One side, Many lanes” three-dimensional extraction system

深部矿井工作面的“一面多巷”布置形式，针对单一突出煤层能够做到“一面一策”，能够有效改善矿井所面临的瓦斯困境，进一步提高工作面煤炭储量，有利于工作面集中机械化生产，并显著降低吨煤瓦斯治理成本以及万吨掘进率。首山一矿所有回采工作面现已实现顺序开采，采掘接替正常。采面设计储量由 238.6 万 t 增至 347.7 万 t，瓦斯治理吨煤成本由原 100.2～129.68 元/t 降低至 85.11 元/t，万吨掘进率由 48.8 m/万 t 降至 36.6 m/万 t。

3.2 瓦斯分源网络化立体抽采系统

通过底抽巷进行瓦斯预抽、本煤层进行顺层钻孔与水力造穴卸压增透抽采、高抽巷解决采空区瓦斯大量涌入上隅角三位一体的分源网络化立体抽采技术是提高工作面生产效率降低生产安全威胁的重要保障。

图 4 为首山一矿瓦斯立体抽采综合管路系统图。瓦斯抽采综合管网主要由地面抽采系统和各采区瓦斯管网组成且高低压分离，实际运行中互为备用，从而实现预抽钻孔高负压低流量以及采空区低负压大流量。以井下采面抽采管网为基础、地面抽采系统为备用且二者可相互转换的网络化瓦斯抽采系统能够有效保证回采工作面采面瓦斯抽采（高位巷抽采）需求，从而实现对不同性能抽放泵的充分利用，直接抽采并利用高浓度瓦斯并在井下抽采低浓度瓦斯并排空[17]。图 5 为地面瓦斯抽放站。

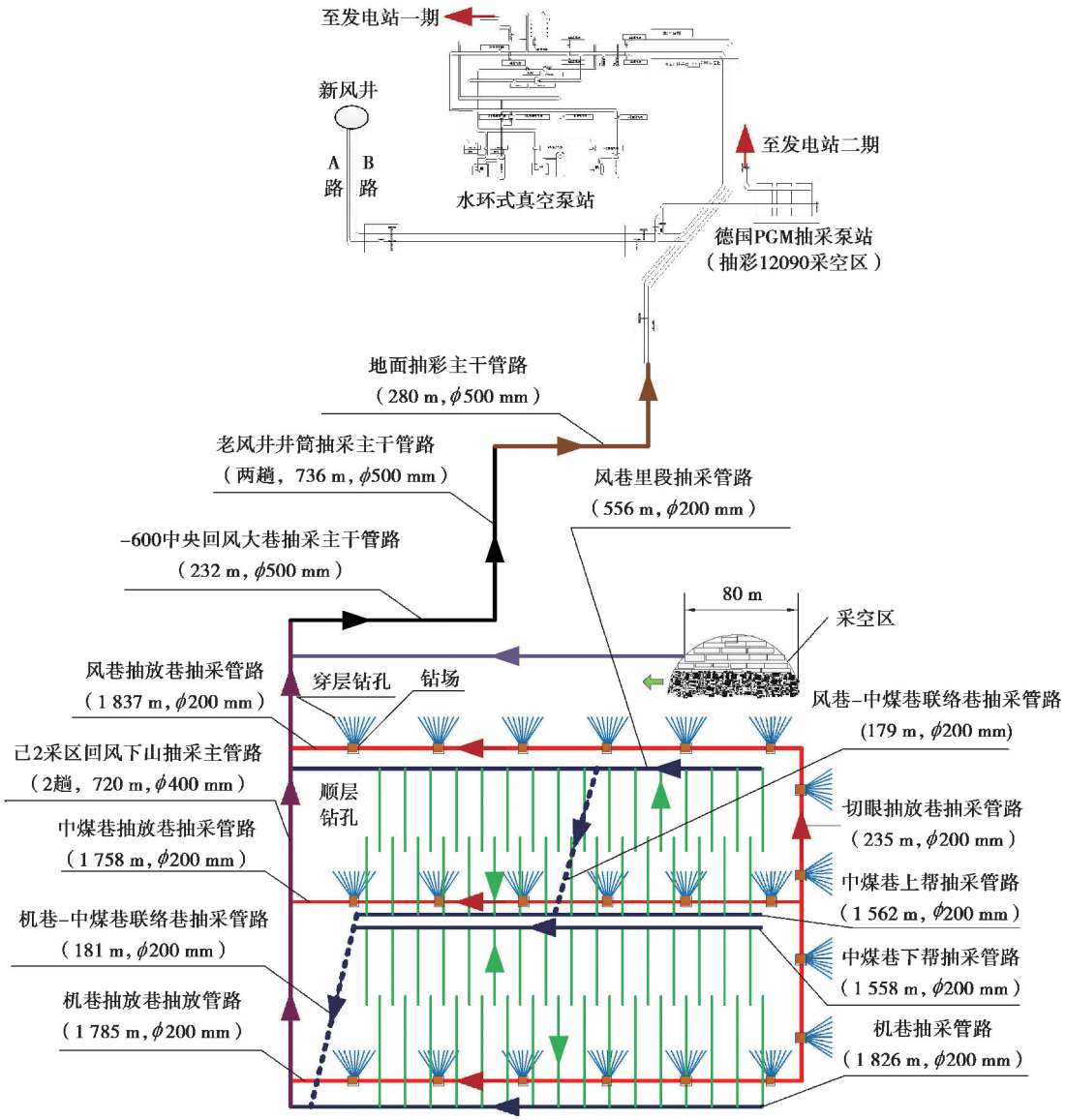

图 4 瓦斯立体抽采综合管路系统

Fig. 4 Integrated pipeline system of gas extraction

图 5　地面瓦斯抽放站

Fig. 5　Ground gas pumping station

3.3　瓦斯抽采参数动态匹配技术

瓦斯抽采参数动态匹配技术是指瓦斯抽采系统具有自我诊断、自我调节、自我控制等能力，使系统能够合理、节能、高效、安全地运行。通过对瓦斯浓度的预设值与实际监测数值的比较，自动调节运行参数，保持抽采瓦斯浓度稳定，实现目标浓度智能控制。

在实际的瓦斯抽采过程中，决定瓦斯抽采浓度的就是 2 个基本量，一是钻孔内的瓦斯涌出量，二是钻孔漏气圈漏入的空气的量。在集装箱式瓦斯抽采系统中，采用瓦斯管路浓度监测装置对整个系统进行监测，最终选择合适的泵参数[18]。监控系统主要由远程主机、井下控制设备、井下感知机构、动作执行机构等 4 部分组成，并根据其实现功能对其硬件进行选型，通过编程实现其总体功效，设计出便于操作的控制界面，整个系统可实现远程控制，对管路的浓度、负压、流量等在线监测。瓦斯抽采参数动态匹配技术原理如图 6 所示。

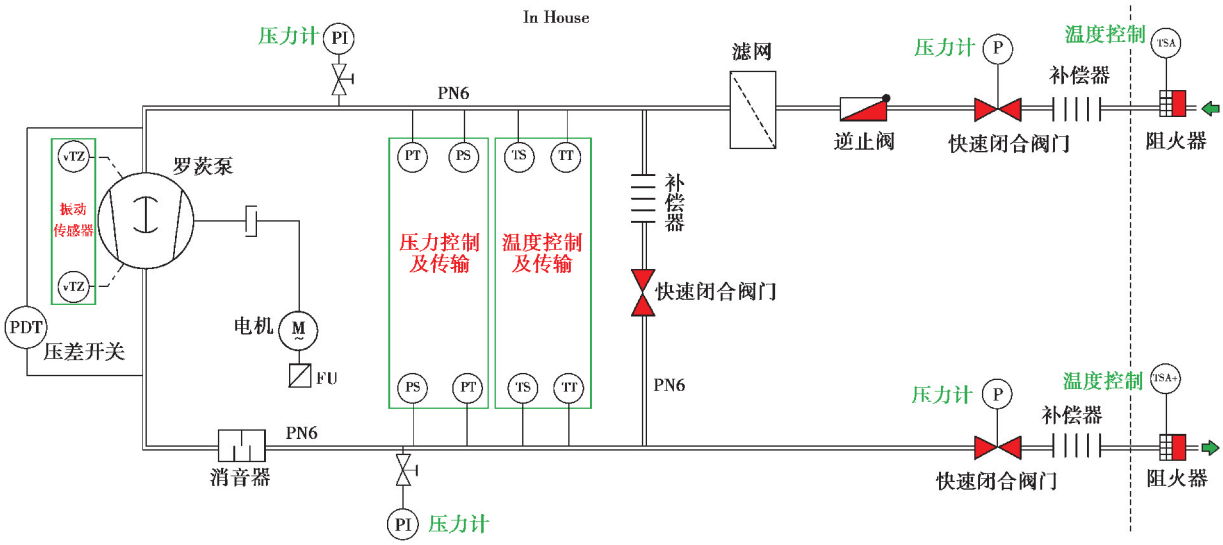

图 6　集装箱式智能瓦斯抽采设备系统

Fig. 6　Container type intelligent gas extraction equipment system

在实际应用过程中，如图 7 所示，泵站具备足够的调节裕量使得工况达到最佳。目前共安装 6 台 PGM-3-150 型集装箱式抽采泵，单台额定流量 150 m^3/min，功率 250 kW，电机最大转速 1 490 r/min。抽采泵可单

台、2 台或 3 台并联运行，管路抽采甲烷浓度 30%以上。集装箱式智能瓦斯抽采设备现场布置如图 7 所示。瓦斯抽采的发展趋势必然是智能化抽采，通过对瓦斯抽采状态的监测，自动比较瓦斯浓度的预设值与实际监测数值，精确计算瓦斯残存量并寻找最适宜的抽采参数进行自动调节，从而保持抽采瓦斯浓度稳定，实现目标浓度智能控制。该装备具有远程故障诊断、系统维护、系统升级更新的功能，相比水环真空抽放泵站节能 30%，工作效率提高了 48.6%，并能够大范围线性调节。

图 7 集装箱式智能瓦斯抽采设备现场图

Fig. 7 Container type gas extraction equipment

如图 8，9 所示，集装箱式瓦斯抽采泵开始运行以来，抽采浓度基本持续稳定在 10%以上，最高浓度 57.2%，特别是已$_{15-17}$－12090 采面回采以来，抽采浓度持续稳定在 30%以上；平均流量 34.2 m^3/min，最高流量 94.03 m^3/min；日平均抽采量 5.23×10^4 m^3，最高日抽采量 1.627×10^5 m^3。已$_{15-17}$－12090 采面回采以来，日抽采量稳定在 8×10^4 m^3以上，2019 年 5 月份以来日平均抽采浓度 47.87%、日平均抽采量 1.368×10^5 m^3。截至 2019 年 12 月底，首山一矿集装箱式瓦斯抽采泵已经累计抽采瓦斯 7×10^7 m^3。

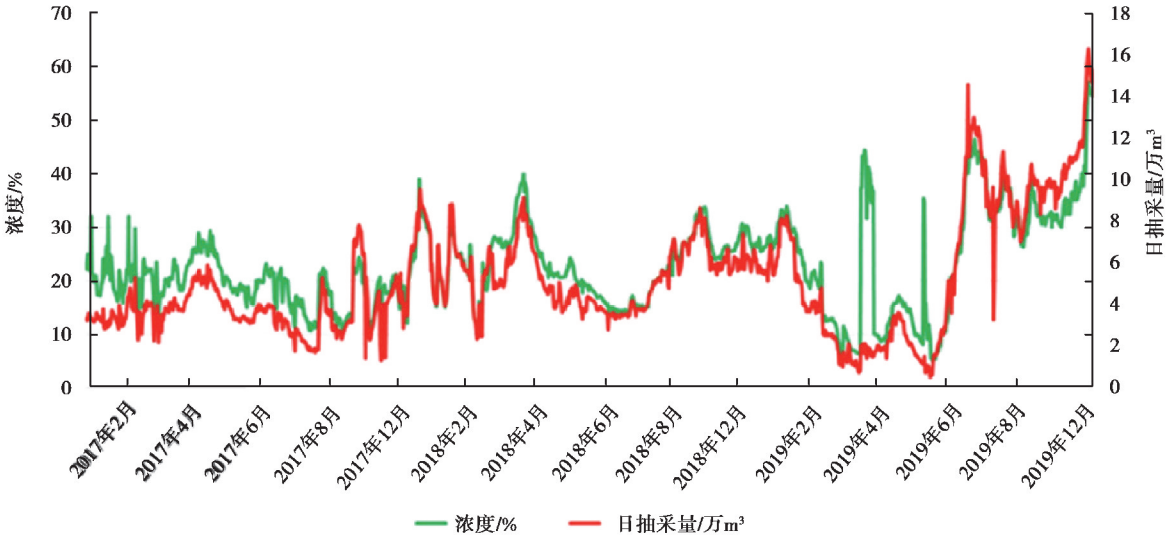

图 8 瓦斯抽采浓度与日抽采量

Fig. 8 Gas extraction concentration and daily volume

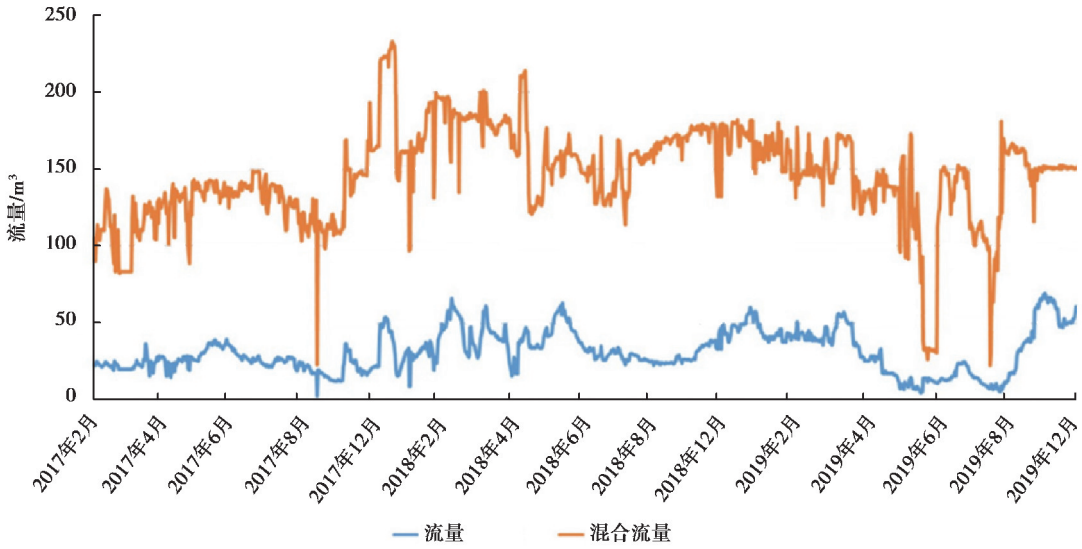

图 9　瓦斯抽采流量与混合流量

Fig. 9　Flow rate and mixed flow rate of gas extraction

3.4　瓦斯发电循环利用及并网输配示范工程

随着当今社会对节能减排及环境保护的重视日渐增加，可持续发展逐渐成为能源应用的主流观念，当下电力发展的主要发展方向已经向更高效地利用瓦斯等可再生能源转移。因此，瓦斯发电得到了越来越多的关注，各矿山瓦斯发电机组装机容量逐年上升。发电并网瓦斯资源利用技术有着十分重要的意义。

首山一矿瓦斯发电站 2014 年 5 月开工建设，同年 12 月开始试运转，2018 年度进行二期加装机组及改造。采用胜动集团生产制造的燃气发电机组。瓦斯发电站装机容量为 11 台 700 kW 机组，共 7 700 kW。瓦斯发电机组如图 10 所示。整套设备由瓦斯进气系统、柴油供给系统、空气过滤系统、点火系统、排气系统、润滑系统、冷却系统、发电机组控制系统组成。其电控混合技术、瓦斯与空气先混合后增压中冷技术、燃烧自动控制技术、柴油引燃发电技术，能保证机组有效适应瓦斯浓度和压力的变化。

图 10　瓦斯发电机组

Fig. 10　Gas generator set

如图 11 所示，自 2017 年发电机组调试运行以来，日平均利用瓦斯 8.77×10^4 m^3，日平均发电 1.32×10^5 kW·h。目前所发电量 5×10^4 kW·h 供地面制冷站使用，其余返回工业广场使用。

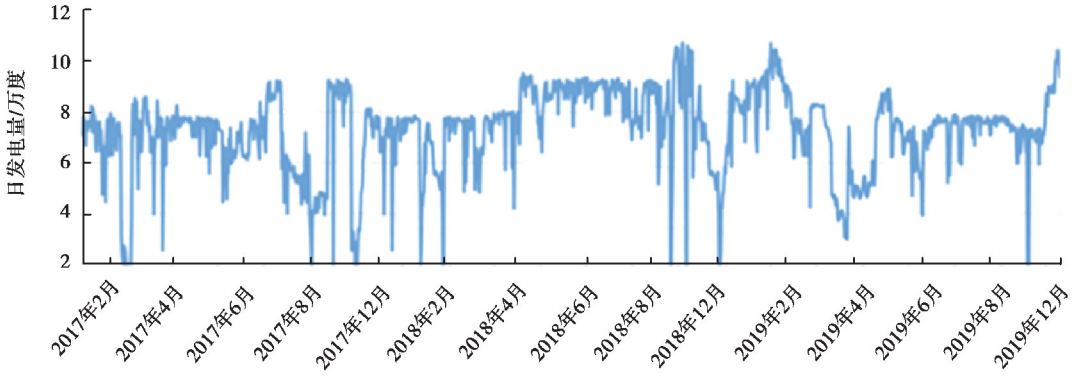

图 11 瓦斯发电站日发电量

Fig. 11 Daily electricity generated by the power station

瓦斯发电循环利用及并网输配沟通串联了上游瓦斯治理、瓦斯抽采及下游纯电制冷深井热害治理，将废弃的瓦斯“变废为宝”转变为电能，供给下游地面集中式降温系统构建了“以用促抽，以抽促安全”的良性循环，安全、经济、环保效益显著。

3.5 瓦斯资源利用制冷技术及深井热害治理

随着开采深度的不断延伸，矿井高温热害将越来越严重。矿井热害除受地面大气状态季节性变化影响外，还受矿井围岩散热、机电设备散热、氧化热及压缩热等各种热源的影响[17]。瓦斯资源利用制冷技术是指采用地面集中式纯电制冷模式对矿井热害进行治理，即地面集中式降温系统匹配瓦斯发电系统，采用纯电分级制冷的方式运行。

系统如图 12 所示。地面集中式降温系统基本实现全智能操控，通过制冷中心实现制冷机组互为调度切换、控制阀组自动连续切换、供给联动、动态采集井上下设备数据、自动清理等功能。图 13 为深井热害治理现场。设备运行以来，在每个工作面对各巷道分支进行温度、湿度的动态监控，表 1 为首山一矿己$_{15-17-12120}$工作面各巷道监控位置温度、湿度的全年均值，各巷道温降均超过 5 ℃、相对湿度下降约为 25%，降温系统运行后，煤层各巷道均保持在相对舒适的环境，杜绝了人员中暑现象。井下工作环境得到显著改善，杜绝了由于深井巷道温度、湿度高于《煤矿安全规程》而造成的停产，保障了工作面的高效安全生产。

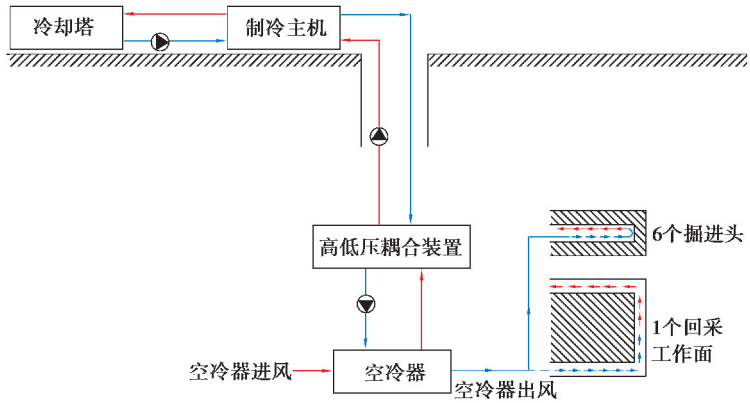

图 12 地面集中式降温系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of ground centralized cooling system

图 13 深井热害治理现场

Fig. 13 Field of the heat treatment of deep mine

表 1　己$_{15-17}$－12120 工作面各巷道制冷情况

Table 1　Refrigerating conditions of each roadway

巷道	巷道外口温度/℃	巷道里段温度/℃	温降/℃	巷道末端湿度/%	进风湿度/%	湿度下降/%
中煤巷	21.2	28.0	6.8	73	98	25
机巷	20.6	26.8	5.2	72	98	26
己$_{15-17}$－12120 中抽巷	21.8	31.0	10.2	70	96	26
己$_{15-17}$－12120 机抽巷	22.8	31.0	9.2	68	96	28
己$_{15-17}$－12110 高抽巷	28.5	34.0	5.5	73	98	25
己$_{15-17}$－12110 中抽巷	24.2	29.4	5.2	73	98	25

4　深部突出矿井安全高效绿色开发模式的发展展望

基于瓦斯治理–抽采–发电–制冷闭环系统的深部突出矿井安全高效绿色开发模式的最终目标是逐步实现中国煤矿开采的安全、高效、清洁、智慧生产，形成瓦斯抽采、发电、热害治理协同的全新理念，推动瓦斯抽采、发电、热害治理领域的技术创新与产业化，建立循环经济的全新模式。顺应“人工智能”的时代要求，煤矿产业应面向矿山安全及采矿智能化，结合当前矿井开采进入深部这一现实问题，今后应主要从以下方面进行研究。

1)深部突出矿井安全高效绿色开发基础性支撑技术与装备。煤矿的安全高效绿色开发必须以大量的高性能、高可靠性、更清洁的技术与装备为支撑，主要包括：矿井开发各部分之间的协同合作，建立矿井循环经济；继续开发更可靠的深部突出矿井可视化及数值模拟软件，提升采矿仿真模拟系统的性能，进而为瓦斯治理、瓦斯抽采、瓦斯发电及高温矿井制冷提供科学依据与方法支持，从根本上杜绝矿山生产中存在的安全问题。

2)研究统一的自动化控制方法。深部突出矿井安全高效绿色开发模式的基础是矿井开采过程中多功能的协同统一，在对矿山各数据统筹分析的基础上，将从关键采矿设备或单一系统的自动化向以采矿过程智能决策、瓦斯治理、瓦斯抽采、瓦斯发电及高温矿井制冷各子系统协同工作为特点的安全高效绿色智能开发模式发展，进而逐渐实现矿山的智能化。

5　结　语

作为煤矿“瓦斯”的煤层气，长期以来是煤矿重特大事故的主要灾害源，主要包括瓦斯爆炸事故、煤与瓦斯突出事故。中国国有煤矿的 46%为高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井，瓦斯事故发生时会诱发冒顶、火灾或透水等次生事故，煤矿重特大事故中瓦斯事故比例极高。随着近些年对瓦斯治理、抽采技术的不断探索，煤层气正变废为宝作为一种新型能源而被广泛利用，但仍然存在统筹规划整体性缺乏、瓦斯高效利用自动化控制程度不高等关键技术薄弱问题。平煤神马集团以瓦斯治理、瓦斯抽采、瓦斯发电、矿井制冷为架构，以“一面多巷”瓦斯治理方略、瓦斯分源网络化立体抽采与动态调控技术、瓦斯抽采利用设备与制冷系统的高效协同技术为基础的深部突出矿井安全绿色高效开发新模式，增强了煤与瓦斯突出矿井及高瓦斯矿井的安全基础，降低煤矿瓦斯安全事故的发生次数，有力地促进矿井在防治煤与瓦斯事故方面的生产力水平，利于矿区社会环境的稳定和保障人员的生命财产安全。为矿区的可持续发展奠定了坚实的基础，为集团其他存在类似工程问题矿井提供技术支持，为国内同类矿山提供有益的借鉴，具有显著的经济效益和社会效益，对推动中国矿业安全发展具有积极意义。

参考文献：

[1] 王金华，汪有刚，傅俊皓. 数字矿山关键技术研究与示范[J]. 煤炭学报，2016，41(6)：1323-1331.
Wang J H，Wang Y G，Fu J H. Crucial technology research and demonstration of digital mines[J]. Journal of China Coal Society，2016，41(6)：1323-1331.（in Chinese）

[2] Ivers-Tiffée E，Härdtl K H，Menesklou W，et al. Principles of solid state oxygen sensors for lean combustion gas control[J]. Electrochimica Acta，2001，47(5)：807-814.

[3] He X Q，Chen W X，Nie B S，et al. Classification technique for danger classes of coal and gas outburst in deep coal

mines[J]. Safety Science，2010，48(2)：173-178.

[4] Díaz Aguado M B，González Nicieza C. Control and prevention of gas outbursts in coal mines，Riosa-Olloniego coalfield，Spain[J]. International Journal of Coal Geology，2007，69(4)：253-266.

[5] 秦汝祥. 高瓦斯高产工作面立体“W”型空气动力学系统研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2008.
Qin R X. Study on the tridimensional “W” air dynamic system of productive coalface with high gas emission[D]. Huainan：Anhui University of Science & Technology，2008. (in Chinese)

[6] 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 L. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society，2016，41(1)：1-6. (in Chinese)

[7] 任晓龙，王金垒. 浅谈煤矿深部矿井灾害种类及技术措施[J]. 工程技术(文摘版)，2016(1)：263.
Ren X L，Wang J L. Discussion on the types and technical measures of deep mine disasters in coal mines[J]. Engineering Technology (Abstract Edition)，2016(1)：263. (in Chinese)

[8] 翟成，林柏泉，王力. 我国煤矿井下煤层气抽采利用现状及问题[J]. 天然气工业，2008，28(7)：29-32.
Zhai C，Lin B Q，Wang L. Status and problems of drainage and utilization of downhole coalbed methane in coal mines in China[J]. Natural Gas Industry，2008，28(7)：29-32. (in Chinese)

[9] 申宝宏，刘见中，赵路正. 煤矿区煤层气产业化发展现状与前景[J]. 煤炭科学技术，2011，39(1)：6-10，56.
Shen B H，Liu J Z，Zhao L Z. Present status and outlook of coal bed methane industrial development in coal mine area[J]. Coal Science and Technology，2011，39(1)：6-10，56.(in Chinese)

[10] 谢贺超. 瓦斯细水雾输送系统中正态分布式弧形板除雾器性能研究[D]. 焦作：河南理工大学，2014.
Xie H C. Study on the performance of normal distribution arc plate in demister in the gas water mist transportation system[D]. Jiaozuo：Henan Polytechnic University，2014. (in Chinese)

[11] 孙艳玲，桂祥友. 煤矿热害及其治理[J]. 辽宁工程技术大学学报，2003(S1)：35-37.
Sun Y L，Gui X Y. Research on mine heat-harm and it’s fathering[J]. Journal of Liaoning Technical University，2003 (S1)：35-37. (in Chinese)

[12] 穆丹. 基于系统工程理论矿井热害危险源辨识与评价研究[D]. 阜新：辽宁工程技术大学，2007.
Mu D. Study on the disringwishments and appraisements about dangerous source of the heat disaster in mine-well which based on the theory of systems engeering[D]. Fuxin：Liaoning Technical University，2007. (in Chinese)

[13] 汤怀念，孙俊森. 采空区瓦斯防治技术的应用[J]. 中国科技信息，2014(13)：160-161.
Tang H N，Sun J S. Application of gas control technology in goaf[J]. China Science and Technology Information，2014 (13)：160-161. (in Chinese)

[14] 蓝航，陈东科，毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术，2016，44(1)：39-46.
Lan H，Chen D K，Mao D B. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology，2016，44(1)：39-46. (in Chinese)

[15] 吴祥. 煤与瓦斯突出事故链控制及应用研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2010.
Wu X. Control of coal-gas outburst accident chains and its application[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2010. (in Chinese)

[16] 胡金红. 瓦斯综合治理技术在首山一矿的应用[J]. 山东煤炭科技，2017(9)：77-79.
Hu J H. Comprehensive gas control technology in Shoushan No.1 coalmine construction[J]. Shandong Coal Science and Technology，2017(9)：77-79. (in Chinese)

[17] 刘英振. 首山矿水力冲孔消突效果研究及方案优化[D]. 焦作：河南理工大学，2012.
Liu Y Z. The effects research on outburst elimination of hydraulic Flushing and scheme optimization in Shoushan mine[D]. Jiaozuo：Henan Polytechnic University，2012. (in Chinese)

[18] 王振锋. 瓦斯抽采浓度控制机理及管路浓度自动调控预警系统研究[D]. 焦作：河南理工大学，2014.
Wang Z F. Research on gas concentration control mechanism and system of gas pipeline concentration automatic control and warning in gas extraction[D]. Jiaozuo：Henan Polytechnic University，2014. (in Chinese)

(编辑 张 苹)