

文章编号:0253-9993(2013)03-0353-08

瓦斯与煤自燃共存研究(II):防治新技术

周福宝^{1,2},夏同强^{1,3},史波波¹

(1. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:基于瓦斯与煤自燃共生发生场所的不同定义了煤岩跨尺度裂隙场概念,深入探讨了共生灾害防控机理及技术方法,即通过合理改变跨尺度裂隙场中的场流分布以消除瓦斯与煤自燃共生灾害——共生区域 $S_0=0$,提出固相颗粒输运改变煤岩体裂隙漏风场尺度、低温液态惰气改变采空区温度场和气体浓度场两种防治共生灾害新技术。建立了固相颗粒输运改变网络裂隙场场流模型,讨论了颗粒填充漏风裂隙场后,漏风裂隙尺度、可通路径的变化,致使漏风阻力增大,保证了瓦斯抽采处于安全的煤岩体裂隙场和低氧气浓度场;理论揭示了低温液氮防治共生灾害机理,并自主设计了液氮防灭火模拟平台,结果表明:液氮注入火区能迅速吸热膨胀,产生大量的低温氮气,扩散进入采空区空间,对热(火)源形成惰化隔离带,同时低温氮气携带水凝气与采空区隐蔽热(火)源产生的热风压进行热交换,降低热(火)源温度在可燃点温度以下,主动吞噬热(火)源。

关键词:瓦斯;煤自燃;共存;跨尺度裂隙场

中图分类号:TD752,TD712 **文献标志码:**A

Coexistence of gas and coal spontaneous combustion (II): new prevention and control technologies

ZHOU Fu-bao^{1,2}, XIA Tong-qiang^{1,3}, SHI Bo-bo¹

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Taking into consideration the differences of disaster prevention in gas and spontaneous combustion of coal seam and goaf cross-scale fracture fields, the cross-scale fractures field of coal and rock mass were defined in this study. In addition, this paper studied the symbiotic disaster prevention and control mechanism, and technical change in cross-scale fractures field flow distribution, through the rational elimination of gas and coal spontaneous combustion symbiotic disaster, that is, the symbiotic region was equal to 0. The authors also proposed two new control technologies, which are: to change coal-rock fractures leak-scale through solid-phase media transport, and to change the goaf temperature field and the gas concentration field through low-temperature liquid inert gas seepage. A network graph theoretical model of a particle transport of fine solid phases to change coal-rock fractures scale had been developed in this study, which reveals that solid phase media can be embedded in the pneumatic transport blocking air leakage in the coal-rock fractured field, to reduce air leakage fractures scale and the effective fissure numbers, and change the scale of coal-rock fractures leak field, as well as to increase air leakage resistance to ensure the safety of coal spontaneous combustion for high gas extraction. Also, the authors built an experimental simulation platform for investigating liquid nitrogen extinguishing characteristics, and the results show that the liquid nitrogen injected into the fire area can quick-

收稿日期:2012-08-02 责任编辑:张晓宁

基金项目:江苏省杰出青年基金资助项目(BK2012003);国家自然科学基金资助项目(51174199);霍英东教育基金会高等院校青年教师基金基础性研究资助项目(131049)

作者简介:周福宝(1976—),男,江苏南京人,教授,博士生导师。Tel:0516-83899753, E-mail: f.zhou@cumt.edu.cn

ly cause heat expansion, resulting in a large number of low-temperature nitrogen pockets in the goaf, forming a three-dimensional buffer zone to reduce the external air leakage into the goaf or fire zone, to isolate the goaf or fire area. At the same time, the low-temperature nitrogen gas carries water vapor condensation into the goaf, exchanging heat with hidden heat source (fire source), which can reduce the temperature of the heat (fire source) to below the temperature of flammable point and actively engulf the heat source (fire source).

Key words: gas; coal spontaneous combustion; coexistence; cross-scale fracture fields

随着对能源高强度集约化的开采,浅部资源日益减少乃至枯竭,国内外矿山都相继进入深部资源开采阶段^[1-2]。深部资源开采面临“三高一扰动”动力现象愈加明显,深部煤岩体的力学行为表征更趋复杂,煤岩破碎量大,为自然发火提供了供氧、蓄热条件;同时,随着开采深度的增加,瓦斯含量、瓦斯涌出量以及地温梯度也急剧增大,瓦斯超限、煤与瓦斯突出现象愈加频繁^[2-4]。对国内重点煤矿中的 229 对矿井调研发现,有 32.3% 的矿井存在瓦斯与煤自燃共生灾害,且随着开采深度延伸,共生灾害有增加的趋势,并成为矿井重特大事故发生的普遍模式^[5]。深部煤矿开采瓦斯与煤自然发火主要集中在破碎煤岩体以及采空区等跨尺度裂隙场中。这里所谓的跨尺度裂隙场是指在煤矿开采中不同尺度裂隙场的统称,包括煤岩体裂隙、采空区松散体以及巷道空间等。然而,目前国内外学者对跨尺度裂隙场中瓦斯与煤自燃共生灾害防治机理及技术方面的研究还相对较少。文献^[5]建立了瓦斯与煤自燃共生致灾的多场交汇数学模型,得出瓦斯与煤自燃共生致灾是裂隙场、CH₄ 浓度场、O₂ 浓度场和温度场 4 场时空危险交汇,提出防治关键是消除自然发火区或瓦斯与煤自燃共生危险区。本文基于瓦斯与煤自燃共生致灾机理,探讨共生灾害防控机理及技术方法。

1 防控机理

跨尺度裂隙场中,发生瓦斯与自燃共生致灾的条件^[5]为

$$S_e(\tau, x, y, z) = S(O_2)(\tau, x, y, z) \cap S_T(\tau, x, y, z) \cap S_l(x, y, z) \cap S(CH_4)(\tau, x, y, z) > 0 \quad (1)$$

$$S(O_2)(\tau, x, y, z) = \{S_{C(O_2)}(\tau, x, y, z) \mid C(O_2) \geq C'(O_2)\}$$

$$S_T(\tau, x, y, z) = \{S_{(T)}(\tau, x, y, z) \mid T \geq T'\}$$

$$S_l(x, y, z) = \{S_{(l)}(x, y, z) \mid l_a \leq l \leq l_b\}$$

$$S(CH_4)(\tau, x, y, z) = \{S_{C(CH_4)}(\tau, x, y, z) \mid C'(CH_4) \leq C(CH_4) \leq C''(CH_4)\}$$

式中, S_e 为瓦斯与煤自燃灾害共生致灾区; $S(O_2)$ 为满足瓦斯燃烧(爆炸)的氧气浓度分布区; S_T 为瓦斯可燃或可爆温度区; $S(CH_4)$ 为可燃或可爆瓦斯浓度

分布区; S_l 为满足灾害发生的裂隙尺度场区域; 0 为跨尺度裂隙场中不存在共生致灾区域; $C(O_2)$ 为氧气浓度; $C'(O_2)$ 为瓦斯燃烧(爆炸)的氧浓度下限,注氮条件下取 12.1%,注二氧化碳条件下取 14.3%; T 为裂隙场温度; T' 为自燃或瓦斯燃烧(爆炸)的临界温度; l 为裂隙场尺度; l_a, l_b 为满足蓄热氧化自燃要求的裂隙场尺度上、下限,其受流体扩散、渗流以及介质传热等作用影响; $C(CH_4)$ 为瓦斯浓度; $C'(CH_4), C''(CH_4)$ 为可以发瓦斯爆炸的上、下限瓦斯浓度。

式(1)跨尺度裂隙场中,瓦斯与自燃共生致灾条件等价于

$$S_e(\tau, x, y, z) = \{S_e(\tau, x, y, z) \mid C(O_2) \geq C'(O_2), T \geq T', l_a \leq l \leq l_b, C'(CH_4) \leq C(CH_4) \leq C''(CH_4)\} > 0 \quad (2)$$

式(1), (2)表明:当且仅当跨尺度裂隙场中, O₂ 浓度场、温度场以及 CH₄ 浓度场和空间裂隙场发生危险时空交汇时,才会发生瓦斯与煤自燃共生灾害。因此,消除瓦斯与煤自燃共生灾害的途径就是合理改变跨尺度裂隙场的场流状态分布,使得 $S_e = 0$ 。基于此,笔者提出采用固相颗粒输运改变煤岩体漏风裂隙场尺度,来消除由于煤层瓦斯抽采而引起煤体自燃危险性;同时,提出低温液态惰气改变采空区温度场及气体浓度场,防止采空区火灾治理时引起瓦斯灾害。

2 固相颗粒输运改变煤岩体漏风裂隙场尺度

2.1 技术原理及工艺

瓦斯抽采是治理矿井瓦斯和防治煤与瓦斯突出的治本性措施^[6]。然而,在煤层瓦斯抽采过程中,受采动或抽采影响煤岩体固体骨架变形,形成与外界贯通的微裂隙或裂纹网络,在抽采负压的作用下大量空气被引入钻孔周边的破碎煤体内,蓄热氧化存在瓦斯和煤自燃共生的潜在威胁^[7-10]。针对该难题,2007 年中国矿业大学课题组首创微细固相颗粒改变煤岩体漏风裂隙场尺度,实现煤层瓦斯安全抽采的新方法及成套装备^[11]。其技术原理是微细固相颗粒在气力输运动力下,送入煤岩体漏风裂隙场中,保证瓦斯与煤自燃共生致灾危险区的裂隙场满足

$$S_i(x, y, z) = \{S_{(i)}(x, y, z) \mid l < l_a \text{ 或 } l > l_b\} \quad (3)$$

将式(3)带入式(1)得

$$\begin{aligned} S_c(\tau, x, y, z) = \{S_c(\tau, x, y, z) \mid C(O_2) \geq \\ C'(O_2), T \geq T', \\ l < l_a \text{ 或 } l > l_b, C'(CH_4) \leq C(CH_4) \leq \\ C''(CH_4)\} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

即通过微细固相颗粒输运来改变煤岩体裂隙场中的可能致灾区域,以消除瓦斯抽采过程中引起的瓦斯与煤自燃共生灾害。图1为微细固相颗粒改变煤层层顺层和穿层钻孔漏风裂隙场尺度技术工艺。

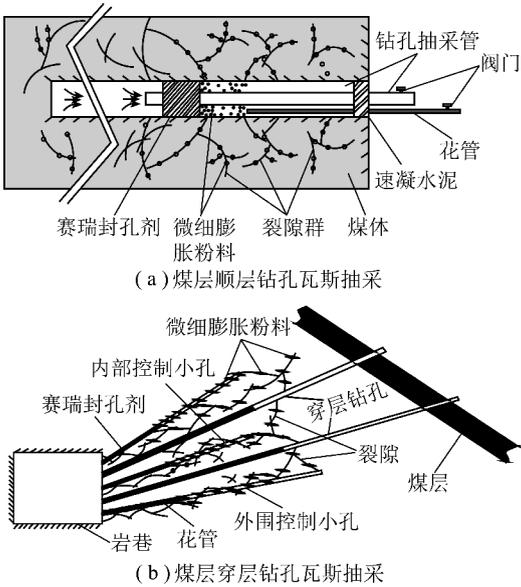


图1 微细固相颗粒输运改变煤岩体漏风裂隙场尺度技术工艺

Fig. 1 Using the principle of fine solid particles transport to change the coal-rock air leakage cracks field scale process

2.2 固相颗粒输运改变网络裂隙场流模型及讨论

在图论中,一个图 G 是由节点集合 V 和分支集合 E 构成的,其本质是节点和分支之间的拓扑关系,即 $G = (V, E)$, 其中 $V = |v_1, v_2, \dots, v_m|$, $E = |e_1, e_2, \dots, e_n|$ ^[12]。在煤层顺层或穿层钻孔瓦斯抽采过程中,将外界煤岩壁、煤层内部与钻孔沟通的裂隙群(可通有效裂隙)视为有向的连通体系,外界与钻孔沟通的任意一条裂隙 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 通道分支,记为 e_i ,煤层内部与钻孔沟通的裂隙群视为一条裂隙通道,记为 e ,气体流动方向标为相应通道分支的方向;若把连通的裂隙通道 e_i 的相关参数(如流量 Q_i 、阻力 h_i 、长度 s_i 、尺度 l_i 等)对应相应的边,则形成了钻孔瓦斯抽采网络,如图2所示。

假设煤层外部与钻孔沟通的的裂隙数目为 N ,裂隙 i 对应的等效裂隙尺度为 l_i ,等效裂隙通道长度 s_i ,气体流动等效横断面积为 S_i ,等效周长为 L_i 。取裂隙

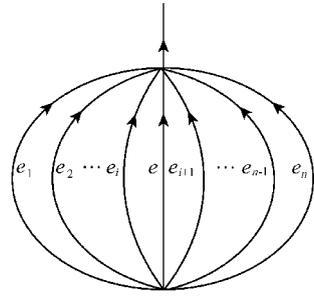


图2 钻孔瓦斯抽采系统网络

Fig. 2 Borehole gas drainage network diagram

i 的摩擦阻力系数为 α_i 、裂隙通径 e_i 的等效摩擦风阻 R_i 满足函数:

$$R_i = \alpha_i f(l_i, s_i) \quad (5)$$

其中, f 为算子,反映裂隙摩擦风阻的本身特性,与等效裂隙尺度 l_i 和通径长度 s_i 密切相关。一般情况下与等效裂隙通径长度 s_i 、等效周长 L_i 成正比,与气体流动等效横断面积 S_i 的立方成反比^[13]。则式(5)变为

$$R_i = \frac{k\alpha_i L_i s_i}{S_i^3} \quad (6)$$

式中, k 为比例调节系数。

由并联网路风阻计算公式,外界煤岩壁与煤层沟通裂隙的摩擦总风阻 R_z 为

$$R_z = \left(\sum_{i=1}^N R_i^{-1} \right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{S_i^3}{k\alpha_i L_i s_i} \right)^{-1} \quad (7)$$

则抽采纯瓦斯流量和外界漏风量的计算公式^[13]

分别为

$$\begin{cases} Q_g = \frac{h_g}{R} \\ Q_k = \sum_{i=1}^N Q_i = \sum_{i=1}^N \frac{h_k}{R_i} = \sum_{i=1}^N \frac{h_k S_i^3}{k\alpha_i L_i s_i} \end{cases} \quad (8)$$

式中, Q_g, Q_k 分别为抽采煤层纯瓦斯抽采流量和漏风量, m^3/s ; h_g, h_k 分别为原始抽采煤层内部瓦斯和外界漏风阻力, Pa, 忽略动能损失, $h_g = p_g - p$, $h_k = p_0 - p$, 其中, p_g, p_0, p 分别为煤层压力、外界漏风压力和钻孔抽采负压, Pa; R 为原始漏风裂隙尺度场的内部煤层裂隙摩擦风阻, $N \cdot s^2/m^8$ 。

联立式(6) ~ (8)得原始漏风裂隙场中氧气浓度为

$$C^l(O_2) = \frac{\varphi(O_2) Q_k}{Q_g + Q_k} = \frac{\varphi(O_2)}{\frac{h_g k \left(\sum_{i=1}^N \frac{S_i^3}{\alpha_i L_i s_i} \right)^{-1}}{h_k R} + 1} \quad (9)$$

式中, $\varphi(O_2)$ 为外界漏风空气中的氧气浓度; $C^l(O_2)$ 为原始抽采漏风裂隙场中的氧气浓度。

当对煤岩体漏风裂隙场实施固相颗粒输运后,有

效裂隙数目变为 N' ($N' \ll N$), 裂隙 i 对应的裂隙等效尺度为 L'_i ($L'_i < l_a$), 裂隙等效通径长度为 s'_i ($s'_i \leq s_i$), 气体流动等效横断面积为 S'_i ($S'_i < S_i$), 等效周长为 L'_i ($L'_i < L_i$)。取裂隙 i 的摩擦阻力系数为 α'_i ($\alpha'_i \leq \alpha_i$), 则裂隙通径 e'_i 的等效摩擦风阻 R'_i 满足函数

$$R'_i = \frac{k\alpha'_i L'_i s'_i}{S_i'^3} \quad (10)$$

则实施固相颗粒输运后, 外界煤岩壁与煤层沟通裂隙的摩擦总风阻 R'_z 为

$$R'_z = \left(\sum_{i=1}^{N'} R_i'^{-1} \right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^{N'} \frac{S_i'^3}{k\alpha'_i L'_i s'_i} \right)^{-1} \gg R_z \quad (11)$$

同理, 漏风裂隙场封堵后瓦斯抽采纯流量和外界漏风量分别为

$$\begin{aligned} Q'_g &= \frac{h'_g}{R} \\ \{Q'_k &= \sum_{i=1}^{N'} Q'_i = \sum_{i=1}^{N'} \frac{h'_k}{R'_i} = \sum_{i=1}^{N'} \frac{h'_k S_i'^3}{k\alpha'_i L'_i s'_i} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, Q'_g, Q'_k 分别为漏风裂隙场尺度改变后抽采纯瓦斯流量与漏风量, m^3/s ; h'_g, h'_k 分别为漏风裂隙场尺度改变后抽采煤层内部瓦斯和漏风阻力, Pa, 忽略动能损失, $h'_g = p_g - p'$, $h'_k = p_0 - p'$, 其中, p' 为漏风裂隙场尺度改变后钻孔抽采负压, Pa。

煤岩体裂隙场中氧气浓度改变为

$$C''(\text{O}_2) = \frac{\varphi(\text{O}_2) Q'_k}{Q'_g + Q'_k} = \frac{\varphi(\text{O}_2)}{\frac{h'_g k \left(\sum_{i=1}^{N'} \frac{S_i'^3}{\alpha'_i L'_i s'_i} \right)^{-1} + 1}{h'_k R}} \quad (13)$$

式中, $C''(\text{O}_2)$ 为漏风裂隙场尺度改变后抽采煤岩体漏风裂隙场中的氧气浓度 ($C''(\text{O}_2) < C'(\text{O}_2)$)。

式(5)~(9)与式(10)~(13)类比分析可知, 微细固相颗粒在气力输运下, 嵌堵在外界煤岩壁与煤层之间的可通有效裂隙内, 改变了煤岩体漏风裂隙场尺度, 降低了可通裂隙有效连通路数数目 N , 改变了原始煤岩体可通等效裂隙尺度 l_i ($L'_i < l_a$), 即 $S_i(x, y, z) = \{S_{(l)}(x, y, z) | l < l_a\}$; 同时, 裂隙有效通径数目和等效裂隙尺度的变化, 改变了煤岩体漏风裂隙场中的流场分布, 氧气浓度大大减小, 使得 $C(\text{O}_2) < C'(\text{O}_2)$, 即 $S(\text{O}_2)(\tau, x, y, z) = \{S_{C(\text{O}_2)}(\tau, x, y, z) | C(\text{O}_2) < C'(\text{O}_2)\}$ 。将改变后的裂隙场 $S_i(x, y, z)$ 和氧气浓度场 $S(\text{O}_2)(\tau, x, y, z)$ 带入式(1)得

$$S_e(\tau, x, y, z) = \{S_e(\tau, x, y, z) | C(\text{O}_2) < C'(\text{O}_2), T \geq T', l < l_a, C'(\text{CH}_4) \leq C(\text{CH}_4) \leq C''(\text{CH}_4)\} = 0 \quad (14)$$

式(14)表明: 对受外界煤岩壁与煤层之间沟通的小尺度裂隙场影响的低瓦斯抽采浓度的钻孔, 特别是高瓦斯易自燃煤层低浓度瓦斯抽采钻孔, 实施微细固相颗粒输运改变煤岩体漏风裂隙场尺度技术, 可有效降低漏风裂隙场尺度, 减少有效裂隙通径数目, 增大漏风阻力, 隔堵外界空气向破碎煤体裂隙场的渗入, 使得整个瓦斯抽采过程处于安全的裂隙场和低氧气浓度场区域 ($S_e = 0$), 有效实现高瓦斯易自燃煤层瓦斯安全抽采。

2.3 技术应用

近年来, 固相颗粒输运改变煤岩体漏风裂隙场尺度技术在山西晋城寺河煤矿、贵州六枝化处煤矿、比德煤矿和淮北芦岭煤矿等高瓦斯或易自燃矿井进行了顺层和穿层钻孔试验, 抽采效果如图3所示。结果表明, 当瓦斯抽采浓度下降到30%左右时, 采用微细固相颗粒改变煤岩体漏风裂隙场尺度技术, 能显著提高抽采瓦斯的浓度和钻孔利用率, 消除钻孔抽采过程中煤体自燃隐患, 与传统封孔技术相比, 单孔瓦斯浓度可提高20%~70%, 平均延长瓦斯抽采期2~3个月, 封孔成本可节省100~130元^[9-10]。

3 低温液态惰气改变采空区温度场及气体浓度场

在深部高瓦斯易自燃煤层矿井工作面正常推进过程中, 采空区瓦斯受漏风源汇作用, CH_4 浓度外低内高, O_2 浓度外高内低, 且呈不均匀非对称分布状态, 这样必然存在适宜瓦斯燃烧(爆炸)的富氧区, 即瓦斯与煤自燃共生致灾危险区^[5], 如图4阴影 $abcdea$ 区域。科学消除采空区共生致灾危险区是十分棘手的难题。

目前, 国内外针对采空区瓦斯和煤自燃的防治技术主要有注水、灌浆、喷洒阻化剂、均压通风、堵漏、凝胶、稠化剂、注惰气、泡沫树脂以及三相泡沫等^[14-16], 这些技术推动了我国矿井的安全高效发展。然而, 我国矿产资源分布辽阔, 地质条件复杂, 如我国亿吨级煤炭生产基地宁东矿区地处于干旱地区, 缺水、少土, 所采煤种多为低阶不黏煤, 自然发火期短(最短仅为23 d), 特大型及中小型火灾事故多发, 一直威胁着矿井安全生产^[17]。实践表明, 在这些矿区实施采取黄泥灌浆、阻化剂、凝胶、泡沫等常规的防灭火技术手段困难。氮气作为一种有效的惰性气体防灭火技术, 应用较为普遍, 但降温效果较差, 常需配合其他辅助灭

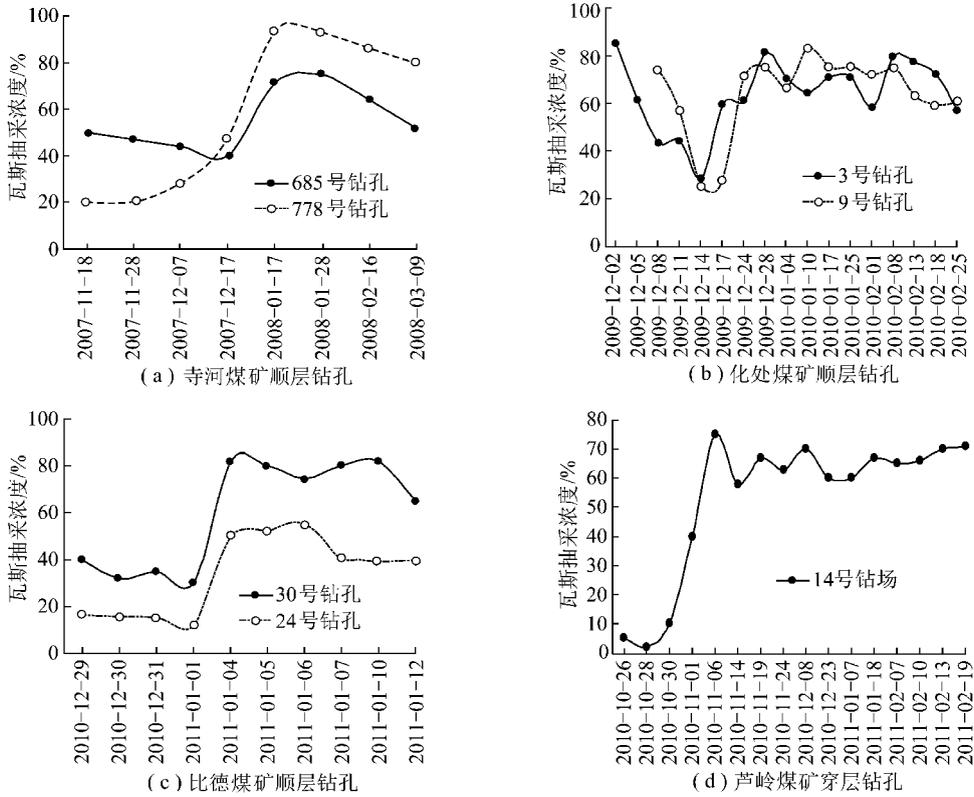


图3 固相颗粒运输改变煤岩体漏风裂隙场尺度前后的瓦斯抽采浓度变化曲线

Fig. 3 Gas extraction concentration graph before and after solid-phase particle transported to change the scale of air leakage crack field in coal-rock mass

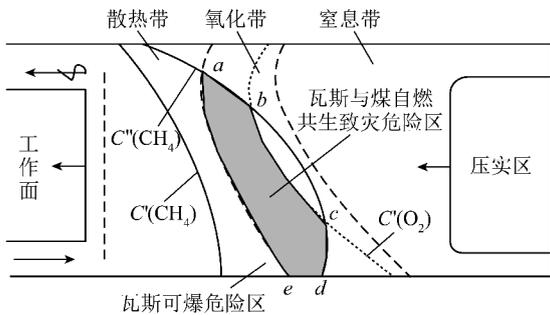


图4 采空区瓦斯与煤自燃共生致灾危险区

Fig. 4 Gas and coal symbiotic hazard risk zones in goaf

火措施,灭火工序复杂、周期长,有时甚至实施效果并不理想^[18-19]。随着科学技术的发展,液氮作为一种洁净、高效、全淹没式的防灭火技术有着广阔的发展和前景。

3.1 低温液氮防治机理

低温液氮沸点低(-195.8℃),能够在常态下发生闪蒸现象,吸热膨胀率高(标况下,1体积液氮汽化为647体积气态氮),注入采空区低温氮气携带采空区中被凝结的水蒸气,与采空区隐蔽热(火)源产生的热风压发生热交换,降低热(火)源温度至着火点以下,温度场改变为

$$S_T(\tau, x, y, z) = \{S_{(T)}(\tau, x, y, z) | T < T'\} \quad (15)$$

温度场场流的改变可以根据傅里叶定律^[20]进行计算,即

$$C_e \frac{\partial T}{\partial t} + C_g v \nabla T = \lambda_e \nabla^2 T + \frac{Q_s}{H} + h(T - T_f) \quad (16)$$

式中, C_e 为多孔介质有效热容量, $C_e = nC_g + (1-n)C_s$,其中 C_s, C_g 分别为多孔骨架、空隙低温氮气的体积当量热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; v 为低温氮气的渗流速度, m/s ; T 为采空区多孔介质(表征)温度, $^\circ C$; λ_e 为多孔介质有效热传导系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$, $\lambda_e = n\lambda_g + (1-n)\lambda_s$,其中 λ_s, λ_g 分别为多孔骨架、空隙低温氮气的热传导系数; Q_s 为传热项源汇; h 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_f 为低温风流温度, $^\circ C$; H 为遗煤厚度, m 。

此外,液氮注入火区会迅速吸热膨胀,产生大量低温氮气,这样势必会增加采空区或火区压力,形成立体隔离带,减少外界向采空区或火区的漏风,对采空区火区起到惰化、隔离作用,致使采空区中热(火)源气体流场发生显著变化,满足

$$\begin{aligned} S(O_2)(\tau, x, y, z) &= \{S_{C(O_2)}(\tau, x, y, z) \\ &\quad | C(O_2) < C'(O_2)\} \\ S(CH_4)(\tau, x, y, z) &= \{S_{C(CH_4)}(\tau, x, y, z) \\ &\quad | C(CH_4) < C'(CH_4)\} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{或 } C(\text{CH}_4) > C''(\text{CH}_4) \} \quad (18)$$

将式(15), (17), (18)带入式(1)得

$$S_c(\tau, x, y, z) = \{ S_c(\tau, x, y, z) \mid C(\text{O}_2) < C'(\text{O}_2), T < T', l_a \leq l \leq l_b, C(\text{CH}_4) < C'(\text{CH}_4) \text{ 或 } C(\text{CH}_4) > C''(\text{CH}_4) \} = 0 \quad (19)$$

式(19)表明:低温液氮兼有降温和惰化的双重作用,注入采空区对热(火)源吸热降温,同时热膨胀改变气体流态分布,迅速吞噬热(火)源,消除采空区瓦斯与煤自燃可能共生致灾区。

3.2 液氮灭火特性模拟实验及讨论

为科学考察采空区液氮防灭火特性(图5),自主设计了液氮灭火特性模拟平台^[18],其主要由自增压

液氮罐、液氮流量计、温度数据采集装置和氧气浓度数据采集和分析装置、有机玻璃罩以及松散堆积煤体实验台组成。模拟的松散堆积煤体高度 $h=40\text{ cm}$,煤块当量直径范围为 $0.5\sim 1.0\text{ cm}$,测点布置坐标为 1号(0,-8)、2号(0,0)、3号(8,0)、4号(0,16)、5号(0,16)、6号(16,0)。

受相似模拟实验的限制,考虑到煤体温度场较流量变化的滞后效应,当测煤体温度场变化时,液氮罐出口流量调定为 1.0 L/min ,测定时间为 30 min 左右,时间间隔为 60 s ;当测煤体氧气浓度场变化时,液氮罐出口流量调定为 0.5 L/min ,测定时间为 1 min 左右,时间间隔为 15 s 。各测点温度场和氧气浓度场的变化曲线如图6,7所示。

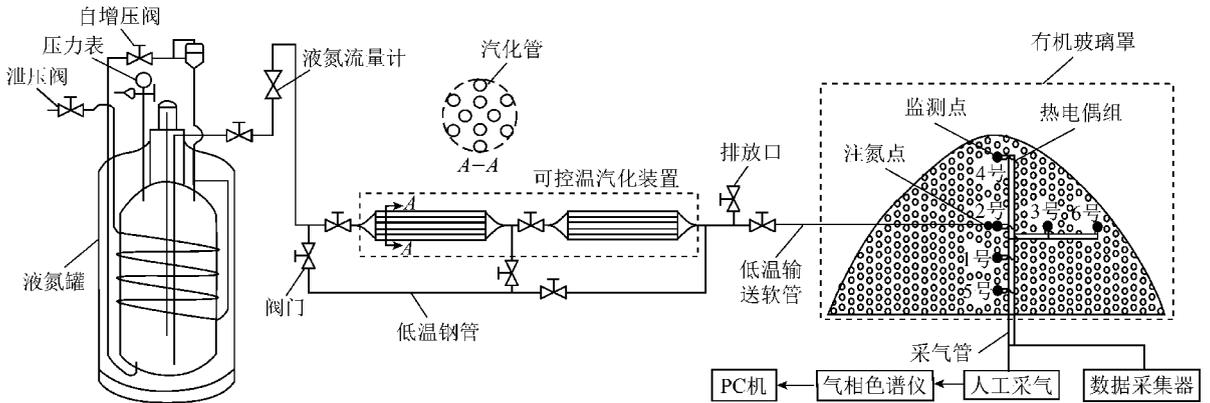


图5 液氮灭火特性模拟实验平台

Fig. 5 Liquid nitrogen extinguishing characteristics simulation platform

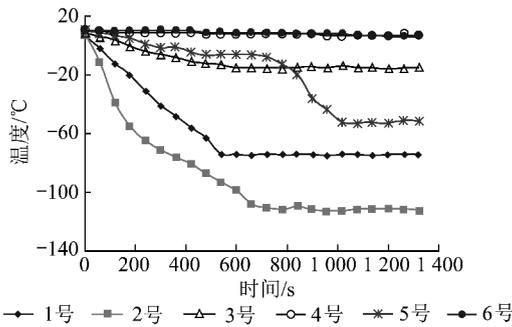


图6 测点温度场变化曲线

Fig. 6 Measured temperature field change curves

图6表明,液氮蒸气在松散介质中的扩散行为属于“重气云团”扩散,且随着不断吸收周围环境中的热量,其密度逐渐接近于空气,扩散行为由“重气云团”扩散转变为“非重气云团”扩散,因此,液氮蒸气在松散堆积煤体内运移大致由注氮口呈不规则椭球状向四周扩散,且其扩散周围的平均温度下降率表现为下高上低,能够主动大区域吞噬热(火)源。图7表明,由于液氮吸热汽化膨胀率高,汽化氮气使采空区或火区压力增加,形成立体隔离带,排除采空区和

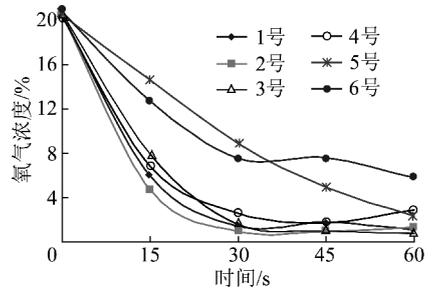


图7 测点氧气浓度场变化曲线

Fig. 7 Measured oxygen concentration field variation curves

火区的氧气,减少外界向采空区或火区的漏风,致使模拟火区附近的测点氧气浓度迅速降低 10% 以下,有的甚至低于 5% ,惰化效果显著。

试验结果与理论分析相吻合,表明低温液氮兼有降温和惰化的双重作用,注入采空区能同时改变采空区温度场和气体浓度场,保证在采空区防灭火过程中不致引起瓦斯灾害事故。

3.3 技术应用

位于宁夏贺兰山北段腹地的汝箕沟矿区是国内最严重的煤炭自燃火区之一,区内存在延续百余年不

灭的煤层露头火灾,受地面及上覆采空区自燃火区导入井下引燃瓦斯的影响,汝箕沟矿先后发生多起煤矿火灾,严重威胁了煤矿安全生产。2011-06-04T 06:20,32₂13₍₁₎综采工作面在采煤机返机至62号支架处,工作面76号支架后尾梁上方,由于顶板岩石垮落过程中摩擦起火花,引起瓦斯燃烧,火势迅速向大范围蔓延,全矿井被迫立即停产,并实行全矿井封闭。随后,立即采用地面钻孔直注式液氮和可控温汽化灌注液氮两种防灭火工艺。截至6月14日矿井封闭区域内气体情况稳定,矿井封闭区域内及32₂13₍₁₎综采面区域O₂,CO浓度均呈下降趋势,O₂浓度均稳定在5%以下,CO浓度最高为31×10⁻⁶,C₂H₄,C₂H₂浓度为0,各井口密闭内外压差50Pa左右(正压)。汝箕沟“6·4”事故,从封闭火区(6月4日23时)至成功火区启封(6月16日19时),仅用时12d。相比与之火区规模接近的白茆沟煤矿(2003年“10·24”火灾)^[17],火区启封用时近11个月,且由于灌注的泥浆淹没工作面中下部,启封后清淤工作耗时2个月,无疑液氮在大型或特大型矿井火灾防治中具有强大的优势。

4 结 论

(1)定义了瓦斯与煤自燃共生的跨尺度裂隙场概念,并基于共生致灾机理,探讨了共生灾害防控机理及技术方法,提出固相颗粒输运改变煤岩体漏风裂隙场尺度、低温液态惰气改变采空区温度场和气体浓度场两种瓦斯与煤自燃共生灾害防治新技术。

(2)基于图论理论建立了固相颗粒输运改变网络裂隙场流模型,研究表明通过固相颗粒输运可以有效改变煤岩体漏风裂隙场尺度,减少了有等效裂隙通数目,增大漏风阻力,隔堵瓦斯抽采过程中外界空气向破碎煤岩体裂隙场的渗入,保证高瓦斯易自燃煤层瓦斯安全抽采。

(3)理论揭示了低温液态惰气(氮气)防治瓦斯与煤自燃共生灾害机理,并自主设计了液氮灭火特性模拟平台,实验结果与理论分析相吻合,同时对汝箕沟大型煤矿全矿井封闭注氮的工程实践效果表明,液氮防治共生灾害是一种高效、清洁的全淹没式防灭火技术,具有广阔的发展和前景。

参考文献:

[1] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.
Zhou Hongwei, Xie Heping, Zuo Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the confining of high

ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1):91-99.

[2] 何满潮.深部的概念体系及工程评价指标[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2854-2858.
He Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):2854-2858.

[3] 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):2803-2813.
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):2803-2813.

[4] 袁亮.卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J].煤炭学报,2009,34(1):1-8
Yuan Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1):1-8

[5] 周福宝.瓦斯与煤自燃共存研究(I):致灾机理[J].煤炭学报,2012,37(5):843-849.
Zhou Fubao. Study on the coexistence of gas and coal spontaneous combustion (I): disaster mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5):843-849.

[6] Karacan C Ö, Ruiz F A, Cotè M, et al. Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86:121-156.

[7] 孙培德,万华根.煤层气越流固-气耦合模型及可视化模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(7):1179-1185.
Sun Peide, Wan Huagen. Visual simulation on coupling model of solid deformation and gas leak flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7):1179-1185.

[8] Karacan C Ö. Development and application of reservoir models and artificial neural networks for optimizing ventilation air requirements in development mining of coal seams[J]. Int. J. Coal Geol., 2007, 72:221-239.

[9] 周福宝,李金海,昝玺,等.煤层瓦斯抽放钻孔的二次封孔方法研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(8):764-768.
Zhou Fubao, Li Jinhai, Ze Xi, et al. A study of the second hole sealing method to improve gas drainage in coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(8):764-768.

[10] 周福宝,夏同强,刘应科,等.二次封孔粉料颗粒输运特性的气固耦合模型研究[J].煤炭学报,2011,36(6):953-958.
Zhou Fubao, Xia Tongqiang, Liu Yingke, et al. Study of gas-solid coupling model on transport properties of secondary sealing's powder particles[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6):953-958.

[11] 周福宝,张仁贵,昝玺,等.一种瓦斯抽放钻孔的二次封孔装置[P].中国专利:ZL200810023608.0,2010-06-02.

[12] 魏连江,周福宝,朱华新.通风网络拓扑理论及通路算法研究[J].煤炭学报,2008,33(8):926-930.
Wei Lianjiang, Zhou Fubao, Zhu Huaxin. Topology theory of ventilation network and path algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8):926-930.

- [13] 周福宝,王德明,陈开岩. 矿井通风与空气调节[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [14] 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,2001,3(12):28-32.
Xian Xuefu, Wang Hongtu, Jiang Deyi, et al. The summarization of the investigation on coal mine fire prevention & fire extinguishing techniques in China[J]. Engineering Science, 2001, 3(12): 28-32.
- [15] 周福宝,白兰永,杨绿刚. 巷道喷涂防治煤炭自燃新技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [16] 高广伟. 中国煤矿氮气防灭火的现状与未来[J]. 煤炭学报, 1999,24(1):48-51
Gao Guangwei. The present state and prospects for nitrogen fire prevention and fire elimination technology in coal mines of China[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 48-51.
- [17] Zhou Fubao, Ren Wanxing, Wang Deming, et al. Application of three-phase foam to fight an extraordinarily serious coal mine fire [J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 67, (1-2): 95-100.
- [18] 神华宁夏煤业集团有限责任公司,中国矿业大学. 煤矿液氮防灭火关键技术与规模化应用研究[R]. 银川,2011.
- [19] 周福宝,王德明,章永久,等. 含氮气三相泡沫惰化火区的机理及应用研究[J]. 煤炭学报,2005,30(4):443-446.
Zhou Fubao, Wang Deming, Zhang Yongjiu, et al. Inerting mechanism of three-phase foam containing nitrogen and its application to underground fire zone[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 443-446.
- [20] 李宗翔. 自燃采空区耗氧-升温的区域分布特征[J]. 煤炭学报,2009,34(5):667-672.
Li Zongxiang. Study on distribution characteristic of remaining coal oxygen consumption and spontaneous combustion heating-up in goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 667-672.

欢迎订阅 2013 年《煤炭学报》杂志

《煤炭学报》是由中国煤炭学会主办、面向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科研成果和学术论文。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-Room、中国科学引文数据库、PJK、科学技术文摘速报、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获由中华人民共和国新闻出版总署颁发的“首届国家期刊奖”。2001 年入选“中国期刊方阵”,并被评为“双奖期刊”。2008 年获“中国精品科技期刊”称号。2009 年获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。2004,2007,2010,2011,2012 年 5 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。2006 年至 2012 年获中国科协精品科技期刊工程项目资助。

《煤炭学报》受到广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的文章作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,176 页,每册订价 58 元,全年总订价 696 元。欲订阅者可直接向本编辑部索取订单,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930-806 联系人:王婉洁

E-mail:mtxbwwj@tom.com,mtxb@vip.163.com