

红岭煤矿工作面突出预测敏感指标测定及应用

Determination and Application of Sensitive Index and Critical Value for Outburst Prediction of Working Face in Hongling Coal Mine

何志刚, 邢祥, 王振刚, 谷晓亮(安阳鑫龙煤业(集团)有限责任公司, 河南 安阳 455000)

摘要:为测定工作面突出预测敏感指标及临界值,首先通过实验模拟煤层不同吸附瓦斯压力下的钻屑量(S)、钻孔瓦斯涌出初速度(q)及钻屑瓦斯解吸指标(Δh_2),得到突出预测指标与瓦斯压力的关系。以红岭煤矿区域预测指标中瓦斯压力临界值0.69 MPa为基准,确定工作面预测指标的临界值。再根据煤层瓦斯压力与工作面预测指标间离散度确定预测指标的敏感度,最终确定了二₁煤层工作面突出预测敏感指标及临界值,可以作为矿井防突工作的重要依据。

关键词:煤与瓦斯突出;突出预测;敏感指标;临界值

中图分类号: TD722 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)02-0053-06

Abstract: Hongling coal mine is a coal and gas outburst mine. In order to determine the sensitive index and critical value of outburst prediction in working face, the drilling cuttings quantity (s), initial gas emission velocity (q) and drilling cuttings gas desorption index (Δh_2) under different adsorption gas pressures in coal seam are simulated by experiments, the relation between prominent prediction index and gas pressure is obtained. In this experiment, the critical value of coal face prediction index is determined based on the critical value of gas pressure 0.69 MPa in regional prediction index of Hongling mine. Finally, the sensitive index and critical value of outburst prediction in No.2-1 coal face are determined by determining the sensitivity of prediction index according to the dispersion between the coal seam gas pressure and the prediction index of working face. The results of this experiment can be used as an important basis for mine outburst prevention work.

Key words: coal and gas outburst; outburst prediction; sensitive index; critical value

1 前言

煤与瓦斯突出是煤炭开采过程中最严重的灾害之一。随着矿井开采深度的逐渐增加,煤层的地应力、瓦斯压力及瓦斯含量也随之增大,进而造成煤与瓦斯突出灾害越来越严重。但不同井田的瓦斯地质条件、煤层赋存状况、煤体物理性质及强度、地应力情况和开采工艺存在差异,导致煤层瓦斯、地应力和煤体自身物理性质在不同矿井对煤与瓦斯突出发生起到的作用程度不同^[1-2]。然而当前我国绝大多数煤矿采掘工作面在进行突出危险性预测时直接选用国家规定的突出预测指标,常造成所选择的预测指标不敏感、准确性不高。因此,测定工作面预测敏感指标及其临界值十分重要。

根据《防治煤与瓦斯突出细则》规定,采掘工作面突出危险性预测指标包括钻屑量(S)、钻屑瓦斯解吸指标(Δh_2)及钻孔瓦斯涌出初速度(q)等基本指标^[3]。钻屑量(S)即每米钻孔排出的钻屑质量,主要反映了煤体强度和地应力的高低,同时与瓦斯含量、瓦斯压力有一定的相关性^[4-5]。钻屑瓦斯解吸指标(Δh_2)由煤科总院沈阳研究院提出,主要反映了煤层瓦斯含量及卸压初期瓦斯解吸速度的大小^[6]。钻孔瓦斯涌出初速度(q)即2 min内规定长度钻孔内涌出的瓦斯流量^[7],能够较为全面的反映煤层瓦斯、渗透性及地应力等影响因素的变化^[8]。为研究工作面突出预测敏感指标的合理性,国内多位学者及科研院校相继开了相关研究工作,蒋承林^[9]针对突出预测敏感指标的“三率法”中存在的不足提出了实验室测定煤巷突出预测敏感指标及临界值的方法,张玉柱^[10]采用数据拟合计算、现场考察修正、扩大应用确定三步递进式方法确定敏感指标临界值。王世超^[11]基于模糊

[作者简介] 何志刚(1985—),男,工程师,主要从事瓦斯治理、煤矿安全管理方面工作。

[引用格式] 何志刚,邢祥,王振刚,等.红岭煤矿工作面突出预测敏感指标测定及应用[J].中国矿山工程,2023,52(2):53-58+69.

数学与多元统计理论建立数据模型来确定突出敏感指标。曾金元^[12]利用掘进工作面煤壁渗透瓦斯涌出量变化情况预测煤与瓦斯突出。李长兴^[13]通过建立突出预测的 Bayes-逐步判别分析模型确定敏感指标。刘永杰^[14]、鲁锦涛^[15]等利用灰色理论确定突出预测指标的敏感指标。李长兴^[16]基于 Fisher 判别理论建立了突出预测的 Fisher 判别模型,通过逐步判别分析法确定预测敏感指标。张书金^[17]、张逸龙^[18]等利用三率法和相关性分析法相结合的方法测定了突出预测敏感指标。舒龙勇^[19]针对突出预测方法和指标提出了“层层递进-精准辨识”的理论方法,建立了综合预警系统。徐恩宇^[20]通过层次分析法与灰靶决策模型相结合的方法建立了煤与瓦斯突出危险评价模型。为了测定红岭煤矿二₁煤层工作面突出预测敏感指标,采用实验模拟煤层不同吸附瓦斯压力下的钻屑量(S)、钻孔瓦斯涌出初速度(q)及钻屑瓦斯解吸指标(Δh_2),得到工作面突出预测指标与瓦斯压力的关系。然后以红岭煤矿区域预测指标中瓦斯压力临界值 0.69 MPa 为基准,确定工作面预测指标的临界值。再根据煤层瓦斯压力与工作面预测指标间离散度确定预测指标的敏感度。

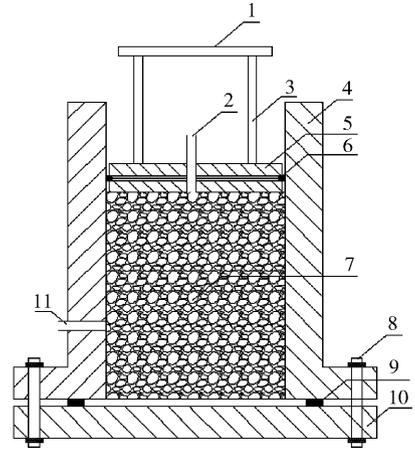
红岭煤矿位于河南省最北部,其北端与河北省接壤,南东距安阳市 38 km 处,南距水冶镇 15 km,北距岳城水库 3 km,为煤与瓦斯突出矿井。矿井主采煤层为二₁煤层,实测原始瓦斯含量为 3.280 2 ~ 6.511 8 m³/t,最大原始瓦斯压力 0.37 MPa。目前矿井布置有一个综采工作面和两个煤巷掘进工作面,即 1509 综采工作面、1703 上巷掘进工作面和 1703 下巷掘进工作面。本次试验区域为 1703 上巷掘进工作面,巷道设计长度 1 529.4 m,巷道净宽 5 200 mm,净高 3 000 mm,净面积为 15.6 m²。

2 工作面突出预测敏感指标测定

2.1 钻屑量和钻孔瓦斯涌出初速度指标的临界值确定

为保证模拟实验的准确性,在 1703 上巷掘进工作面采集煤样并密封保存,同时根据煤层埋深施加等同于地应力的压力,确保实验煤样成分及实验环境近似于井下煤层赋存原始状态,提高模拟实验的准确度。待实验煤样制作完成,分别充不同压力的甲烷气体,待瓦斯吸附平衡后利用 42 mm 麻花钻钻进测定钻屑量 S 值, S 值测定完成后立即进行钻孔

瓦斯涌出初速度 q 值的测定,实验装置如图 1 所示。



1—应力加载平台;2—进气口;3—钢支柱;4—钢筒;5—滑动钢板;6—密封圈;7—煤样;8—螺栓;9—密封垫;10—法兰;11—钻孔

图 1 测定钻屑量和钻孔瓦斯涌出初速度指标实验装置图

经过实验测得钻屑量和钻孔瓦斯涌出初速度数据,具体见表 1。

表 1 钻屑量和钻孔瓦斯涌出初速度实验测定数据表

序号	瓦斯压力/ MPa	钻屑量 S 值/ kg·m ⁻¹	瓦斯涌出初速度 q /L·min ⁻¹
1	0.21	4.0	1.61
2	0.42	4.3	3.06
3	0.60	5.7	5.14
4	0.79	6.5	5.67
5	0.98	7.9	7.98
6	1.16	9.2	9.18

根据表 1 数据进行近似线性回归分析,具体如图 2 和图 3 所示。

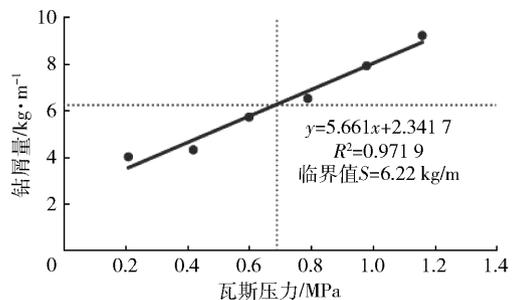


图 2 煤层瓦斯压力与钻屑量指标关系图

可以看出煤层瓦斯压力突出临界值 0.69 MPa 所对应的钻屑量和钻孔瓦斯涌出初速度分别为 $S =$

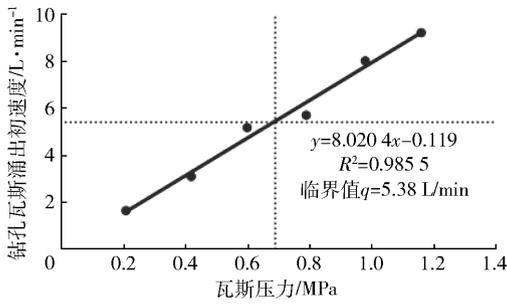


图3 煤层瓦斯压力与钻孔瓦斯涌出初速度指标关系图

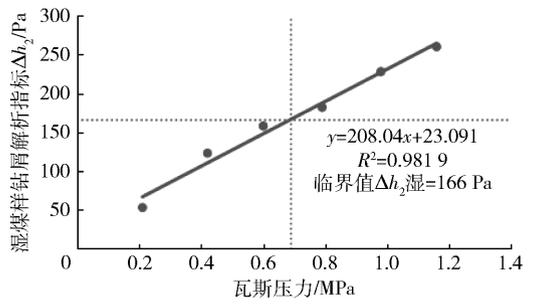


图5 煤层瓦斯压力与湿煤样钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 关系图

6.22 kg/m, $q = 5.38$ L/min。即钻屑量指标临界值为6.22 kg/m, 钻孔瓦斯涌出初速度指标临界值为5.38 L/min。

2.2 钻屑瓦斯解吸指标临界值确定

在前述钻屑量指标实验测定时,同时利用MD-2型煤钻屑瓦斯解吸仪测定解吸指标 Δh_2 。测定湿煤样的解吸指标时,在煤样筛分装入测定仪器时对煤样喷雾化水直至煤样湿润。经实验测得钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 数据见表2。根据表2数据进行近似线性回归分析,具体如图4、图5所示。

表2 钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 实验测定数据表

序号	瓦斯压力/MPa	$\Delta h_{2干}/Pa$	$\Delta h_{2湿}/Pa$
1	0.21	62	53
2	0.42	136	123
3	0.60	194	158
4	0.79	239	182
5	0.98	293	228
6	1.16	311	260

204 Pa; 湿煤样钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 临界值为166 Pa。

2.3 工作面突出预测指标敏感性分析

工作面突出预测指标敏感性分析,主要采用数据离散性来判定。由 二_1 煤瓦斯压力与局部敏感指标间的梯度公式,计算可以得出钻屑量指标、钻孔瓦斯涌出初速度及钻屑瓦斯解吸指标与瓦斯压力之间的对应值,具体数据见表3。

表3 工作面预测指标与瓦斯压力对应计算数据表

瓦斯压力/MPa	$S/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	$q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	$\Delta h_{2干}/Pa$	$\Delta h_{2湿}/Pa$
0.1	2.91	0.68	48	44
0.2	3.47	1.49	74	65
0.3	4.04	2.29	101	86
0.4	4.61	3.09	128	106
0.5	5.17	3.89	154	127
0.6	5.74	4.69	181	148
0.7	6.30	5.50	208	169

根据前述确定的局部指标临界值结果: $q = 5.38$ L/min, $\Delta h_{2干} = 204$ Pa, $\Delta h_{2湿} = 166$ Pa, $S = 6.22$ kg/m,对表3中的突出预测指标数据进行标准化处理,计算突出预测指标的极差、标准差,结果见表4。

表4 二_1 煤层局部突出预测指标离散性分析表

S	$E(S)$	q	$E(q)$	$\Delta h_{2干}$	$E(\Delta h_{2干})$	$\Delta h_{2湿}$	$E(\Delta h_{2湿})$
2.91	0.4674	0.68	0.1270	48	0.2339	44	0.2650
3.47	0.5584	1.49	0.2762	74	0.3648	65	0.3906
4.04	0.6494	2.29	0.4254	101	0.4957	86	0.5162
4.61	0.7404	3.09	0.5745	128	0.6266	106	0.6418
5.17	0.8314	3.89	0.7237	154	0.7575	127	0.7674
5.74	0.9224	4.69	0.8729	181	0.8884	148	0.8930
6.30	1.0134	5.50	1.0220	208	1.0193	169	1.0185
标准差:0.1820				标准差:0.2983		标准差:0.2618	
标准差:0.2512				标准差:0.5460		标准差:0.7536	
极差:0.5460				极差:0.8950		极差:0.7854	
极差:0.7536				极差:0.8950		极差:0.7854	

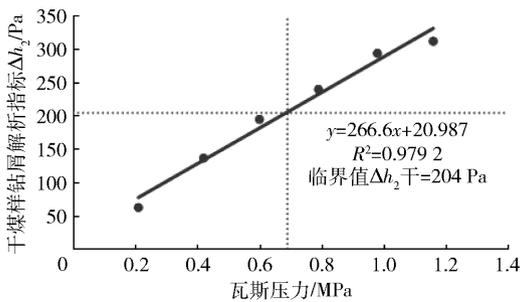


图4 煤层瓦斯压力与干煤样钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 关系图

根据线性回归公式可以计算得出,瓦斯压力临界值为0.69 MPa 对应的干煤样钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 为204 Pa, 湿煤样钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 为166 Pa。即干煤样钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 临界值为

依据表4可以看出:红岭煤矿二₁煤层局部突出预测指标的离散性结果为 $q > \Delta h_{2\text{干}} > \Delta h_{2\text{湿}} > S$,即工作面预测指标敏感性排序为 $q > \Delta h_{2\text{干}} > \Delta h_{2\text{湿}} > S$ 。

3 工作面突出预测指标敏感性及其临界值可靠性验证

首先跟踪测定1703工作面上巷掘进过程中的预测指标及瓦斯含量值,然后对比各预测指标数值的离散性,确定各预测指标的敏感性排序是否可靠。另外,依据瓦斯含量值以及实验研究得出的瓦斯压力与各预测指标的梯度关系式,则可计算出工作面煤层所含残余瓦斯对应的各预测指标的推算值,最后与各预测指标的实测平均值进行误差计算分析,即可验证出前述确定的各预测指标的临界值是否可靠。

3.1 工作面突出预测指标跟踪测定

自2022年2月8日至2022年2月28日在1703上巷掘进工作面进行了各突出预测指标的跟踪测定,共计19个循环(S_{18} 测点41 m~142.6 m),每个循环测定了钻孔瓦斯涌出初速度 q 、钻屑瓦斯解析指标 Δh_2 及钻屑量 S 指标,测定结果见表5。

表5 1703上巷掘进工作面工作面突出预测指标跟踪测定数据

日期	$\Delta h_2/\text{Pa}$	$S/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	$q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
02-08	41	2.5	0.24
02-10	41	2.5	0.37
02-11	21	2.5	0.37
02-12	41	2.5	0.24
02-13	41	2.5	0.37
02-14	41	2.6	0.19
02-15	59	2.9	0.35
02-17	41	3.0	0.28
02-18	40	2.8	0.28
02-19	40	2.6	0.28
02-20	41	2.5	0.28
02-21	41	2.5	0.28
02-22	41	2.6	0.48
02-23	41	2.6	0.35
02-24	41	2.6	0.28
02-25	41	2.5	0.35
02-26	41	2.5	0.28
02-27	41	2.6	0.28
02-28	41	2.5	0.28
平均值	40.79	2.59	0.31

另外,在1703上巷掘进工作面工作面预测指标跟踪测定期间,同时测定了4组瓦斯含量,测定结果见表6。

表6 1703上巷掘进工作面瓦斯含量测定数据

煤层	编号	取样深度/m	损失量/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	解吸量/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	残存量/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	瓦斯含量/ $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$
二 ₁	1 [#]	10	0.413 1	1.267 1	1.844 9	3.525 1
	2 [#]	12	0.406 9	1.221 0	1.844 9	3.472 8
	3 [#]	14	0.585 3	1.231 8	1.844 9	3.662 0
	4 [#]	8	0.295 6	1.473 3	1.844 9	3.613 8
	平均			3.568 4		

3.2 工作面突出预测指标敏感性可靠性验证

根据表5各工作面预测指标实测数据的平均值: $q = 0.31 \text{ L}/\text{min}$, $\Delta h_{2\text{干}} = 41 \text{ Pa}$, $S = 2.59 \text{ kg}/\text{m}$,对表5中的各突出预测指标数据进行标准化处理,计算各突出预测指标的极差、标准差,结果见表7。

表7 1703上巷掘进工作面各工作面突出预测指标离散性分析表

$\Delta h_{2\text{干}}$	$E(\Delta h_{2\text{干}})$	S	$E(S)$	q	$E(q)$
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.24	0.782 2
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.37	1.205 8
21	0.514 8	2.5	0.963 5	0.37	1.205 8
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.24	0.782 2
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.37	1.205 8
41	1.005 2	2.6	1.002 0	0.19	0.619 2
59	1.446 5	2.9	1.117 6	0.35	1.140 7
41	1.005 2	3	1.156 2	0.28	0.912 5
40	0.980 6	2.8	1.079 1	0.28	0.912 5
40	0.980 6	2.6	1.002 0	0.28	0.912 5
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.28	0.912 5
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.28	0.912 5
41	1.005 2	2.6	1.002 0	0.48	1.564 3
41	1.005 2	2.6	1.002 0	0.35	1.140 7
41	1.005 2	2.6	1.002 0	0.28	0.912 5
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.35	1.140 7
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.28	0.912 5
41	1.005 2	2.6	1.002 0	0.28	0.912 5
41	1.005 2	2.5	0.963 5	0.28	0.912 5
标准差:0.151 5		标准差:0.055 2		标准差:0.206 9	
极差:0.931 6		极差:0.192 7		极差:0.945 1	

据表7可以看出:红岭煤矿1703上巷掘进工作面实测二₁煤层局部突出预测指标的离散性结果为

$q > \Delta h_{2干} > S$, 该排序结果与前述实验研究确定的排序结果一致。从而证明实验研究得出的各预测指标敏感性排序结果 $q > \Delta h_{2干} > \Delta h_{2湿} > S$ 是可靠的。

3.3 工作面突出指标临界值可靠性验证

表6显示1703上巷掘进工作面瓦斯含量实测数据平均值为 $3.5684 \text{ m}^3/\text{t}$, 利用式(1)可以推算出1703上巷掘进工作面平均瓦斯压力为 0.056 MPa 。

$$X = a \sqrt{P} \quad (1)$$

式中: X ——煤层瓦斯压力 P 所对应的瓦斯含量, m^3/t ;

a ——瓦斯含量系数, $\text{m}^3/\text{t} \cdot \text{MPa}^{0.5}$, 根据中国矿业大学测定结果取值为 9.0280 。

利用前述实验得到预测指标与瓦斯压力的梯度公式计算得知瓦斯压力 0.056 MPa 对应的预测指标值, 各预测指标的推算值与实测平均值的相对误差结果见表8。

表8 1703上巷掘进工作面局部突出预测指标实测平均值与推算值的误差计算结果表

预测指标	临界值	推算值	实测平均值	相对误差/%
$S/\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	6.22	2.66	2.59	1.06
$q/\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	5.38	0.33	0.31	0.49
$\Delta h_{2干}/\text{Pa}$	204	36.02	40.79	2.34

由表8数据可以看出:红岭煤矿1703上巷掘进工作面突出预测指标的推算值与实测平均值的相对误差均小于5%, 因此可以判定各预测指标临界值 $q = 5.38 \text{ L}/\text{min}$, $\Delta h_{2干} = 204 \text{ Pa}$, $\Delta h_{2湿} = 166 \text{ Pa}$, $S = 6.22 \text{ kg}/\text{m}$ 是可靠的。

4 现场应用

为进一步验证工作面预测指标敏感性及其临界值的合理性, 在1703上巷里段 1000 m 掘进过程中跟踪测定钻屑瓦斯解吸指标、钻孔瓦斯涌出初速度和钻屑量三个工作面预测指标。

4.1 工作面煤层瓦斯基础参数

1703上巷为金属网、T型钢带、螺纹钢锚杆配合锚索进行支护, 巷道断面为梯形, 巷道净宽 5200 mm , 下帮净高约 2554 mm , 上帮净高约 4447 mm (沿顶掘进煤层顶板坡度变化时, 以巷道中线位置净高 3500 mm 为准施工), 净面积约为 18.2 m^2 。二₁煤层稳定, 厚度变化不大, 为 $6.6 \sim 7.4 \text{ m}$, 平均煤厚 7.1 m , 煤层倾角 $16^\circ \sim 19^\circ$, 平均倾角 17° , 以碎块状为主, 局部为层状及条带状结构。

1703上巷煤层最大原始瓦斯含量为 $6.5118 \text{ m}^3/\text{t}$, 最大原始瓦斯压力为 0.37 MPa , 瓦斯放散初速度 ΔP 为 $8.86 \sim 14.3$, 煤的坚固性系数 f 值为 $0.26 \sim 0.32$, 煤的破坏类型为II~III类, 煤层透气性系数 $4.7821 \sim 5.6513 \text{ m}^2/\text{MPa}^2 \cdot \text{d}$ 。工作面煤尘具有爆炸危险性, 爆炸指数为 16.70% , 煤层自然发火等级为不易自燃, 为煤与突出危险区。

4.2 工作面突出预测方法及钻孔设计

1703上巷掘进工作面采用钻屑指标法和复合指标法进行工作面突出危险性预测。根据《防治煤与瓦斯突出细则》第八十九条规定:在近水平或缓倾斜煤层工作面应当向前方煤体至少施工3个预测钻孔, 当煤层厚度超过 5 m 时应当在工作面上方或下方适当增加预测钻孔。1703上巷掘进工作面最大倾角为 19° , 属于缓倾斜煤层, 煤层厚度最大为 7.4 m , 超过 5 m , 因此设计4个预测钻孔, 孔径均为 42 mm , 孔深各为 10 m 。钻孔尽可能布置在煤层软分层中, 若无软分层, 则按设计参数施工。其中1、2、3号钻孔倾角与掘进坡度一致, 4号孔倾角与掘进坡度成 $-10^\circ \sim -12^\circ$ 。1号、4号钻孔位于掘进巷道断面中部, 与巷道中线夹角为 0° , 2号、3号钻孔开孔靠近巷道两帮 0.5 m 处, 两帮钻孔与巷道中线夹角 $15^\circ \sim 20^\circ$, 两帮钻孔终孔点位于巷道轮廓线外 $2.1 \sim 2.9 \text{ m}$ 处, 具体如图6所示。

4.3 工作面突出危险性预测及数据分析

1703上巷掘进工作面突出危险性预测时, 预测钻孔每钻进 1 m 测定一次钻屑量 S 并测定钻孔瓦斯涌出初速度 q , 每钻进 2 m 测定一次钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 。测定数据小于前节确定的工作面预测指标临界值时方可正常掘进, 并保留至少 2 m 的预测超前距。

1703上巷掘进工作面里段 1000 m 掘进过程中跟踪测定171组工作面突出危险性预测数据, 其中瓦斯涌出初速度 q 最大值为 $3.22 \text{ L}/\text{min}$, 最小值为 $0.19 \text{ L}/\text{min}$, 数据变化幅度约为 16.95 倍; 钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 最大值为 123 Pa , 最小值为 21 Pa , 数据变化幅度约为 5.86 倍; 钻屑量 S 最大值为 $3.0 \text{ kg}/\text{m}$, 最小值为 $2.4 \text{ kg}/\text{m}$, 数据变化幅度为 1.25 倍。根据工作面突出危险性预测指标测定数据可知, 最大值均小于预测指标的临界值 $q = 5.38 \text{ L}/\text{min}$, $\Delta h_{2干} = 204 \text{ Pa}$, $\Delta h_{2湿} = 166 \text{ Pa}$, $S = 6.22 \text{ kg}/\text{m}$, 不具备突出危险性。根据工作面突出危险性预测指标变化幅度可知, 瓦斯涌出初速度 q 变

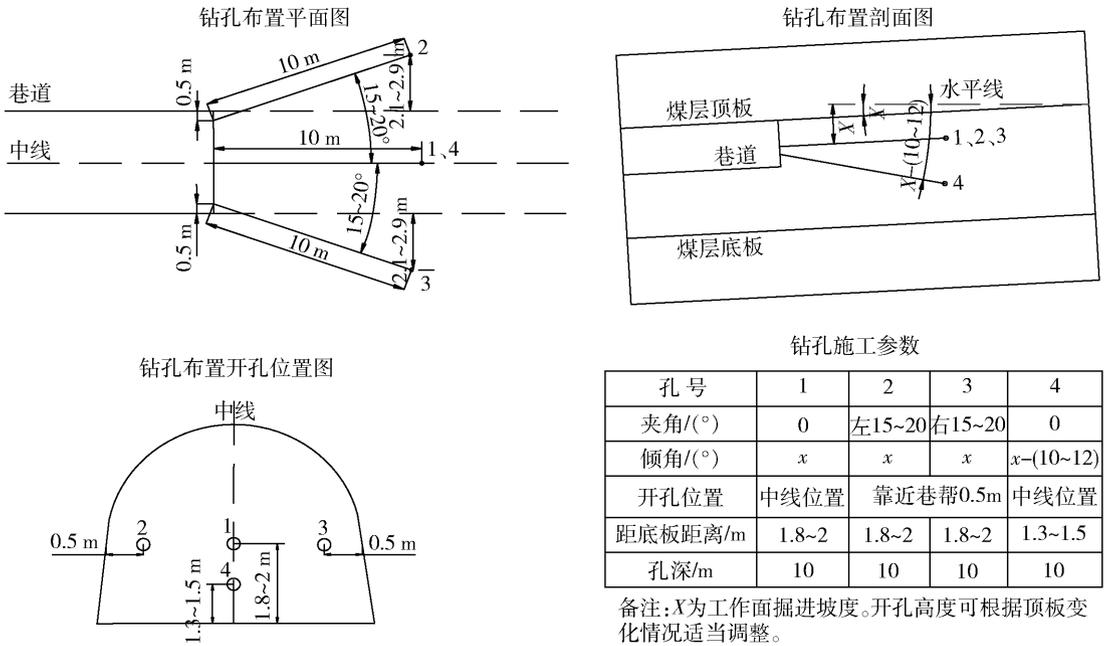


图6 1703上巷工作面预测钻孔布置示意图

化幅度 > 钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 变化幅度 > 钻屑量 S 变化幅度,说明工作面突出预测指标敏感性排序符合 $q > \Delta h_{2干} > \Delta h_{2湿} > S$ 。

1703 上巷掘进工作面突出危险性预测及掘进施工过程中未发生瓦斯动力现象、瓦斯超限事故和煤与瓦斯突出事故,完全能够满足红岭矿工作面突出预测及区域验证工作需要。

5 结论

通过模拟实验研究,测定了红岭矿二₁煤层工作面突出预测指标的敏感顺序及临界值,再利用计算值和实测值数据对比验证预测指标的可靠性,最终确定了红岭矿工作面预测指标敏感性排序为 $q > \Delta h_{2干} > \Delta h_{2湿} > S$, 预测指标的临界值 $q = 5.38 \text{ L/min}$, $\Delta h_{2干} = 204 \text{ Pa}$, $\Delta h_{2湿} = 166 \text{ Pa}$, $S = 6.22 \text{ kg/m}$,经过现场应用取得良好效果。

[参考文献]

[1] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2005.
 [2] 程远平,周红星. 煤与瓦斯突出预测敏感指标及其临界值研究进展[J]. 煤炭科学技术,2021,49(1):146 - 154.
 [3] 国家煤矿安全监察局.《防治煤与瓦斯突出细则》[M]. 北京:煤炭工业出版社,2019.
 [4] 程五一. 突出预测指标钻屑倍率的动力分析[J]. 煤矿安全,1994,25(5):18 - 22.
 [5] 文光才,王先义. 突出预测钻屑量指标的探讨[J]. 煤

炭工程师,1998(3):32 - 34.
 [6] 郭琦. 兴安煤矿矿井瓦斯涌出量预测研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(6):45 - 49.
 [7] 程红林. 注水对煤体瓦斯解吸综合影响的试验研究及分析[J]. 中国矿山工程,2022,51(4):16 - 20.
 [8] 伍友爱,肖红飞,王从陆,等. 煤与瓦斯突出控制因素加权灰色关联模型的建立与应用[J]. 煤炭学报,2005,30(1):58 - 62.
 [9] 蒋承林,俞启香,张超杰. 煤巷突出预测敏感指标及临界值的实验室测定方法及应用[J]. 煤矿安全,2021,52(10):24 - 29.
 [10] 张玉柱. 基于煤层突出特征的工作面预测指标确定[J]. 煤矿安全,2021,52(1):152 - 156.
 [11] 王世超,潘凤龙,申健. 煤与瓦斯突出预测敏感指标确定及应用[J]. 煤炭科学技术,2013,41(5):82 - 85
 [12] 曾金元,邹云龙,马金飞. 利用掘进工作面瓦斯涌出相对渗透性特征预测煤与瓦斯突出的方法研究[J]. 矿业安全与环保,2015,42(1):13 - 15 + 18.
 [13] 李长兴,关金锋,李回贵,等. 煤与瓦斯突出预测的 Bayes-逐步判别分析模型及应用[J]. 中国矿业,2020,29(2):117 - 123.
 [14] 刘永杰,李忠辉,苏飞,等. 基于灰色关联分析的突出预测指标敏感性研究[J]. 中国矿业,2012,21(9):115 - 117.
 [15] 鲁锦涛,贾小榕,郭昕曜. 基于改进灰色预测的瓦斯突出敏感指标分析[J]. 中国安全科学学报,2022,32(11):74 - 81.