

坚硬顶板厚煤层采场来压强度分级 预测方法研究

霍丙杰¹, 荆雪冬¹, 于斌², 韩军¹

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 大同煤矿集团有限责任公司, 山西 大同 037003)

摘要: 采场来压强度预测是矿压灾害防治的重要组成部分, 是岩层控制的主要依据。首次定义矿压显现强度指数, 并据此提出坚硬顶板厚煤层采场来压强度分级预测新方法。根据大同矿区坚硬顶板厚煤层开采实践, 以远场高位结构失稳条件为核心, 综合考虑影响矿压显现的基础指标和强化条件, 建立坚硬顶板厚煤层采场矿压显现分级预测指标体系。基于模糊数学理论, 构建矿压显现强度分级预测模型, 并给出不同因素 4 个不同级别的量化指标。应用该方法对同忻煤矿坚硬顶板特厚煤层 8105 工作面矿压显现强度进行预测, 预测结果与开采实践较吻合, 应用研究表明, 该方法可准确地预测坚硬顶板厚煤层工作面矿压显现特征。矿压显现强度指数分级预测方法指标体系普适、全面、系统, 指标参数分级划分详实、可操作, 该方法可为其他矿区坚硬顶板厚煤层采场来压强度预测、顶板管理等提供理论参考。

关键词: 采矿工程; 坚硬顶板; 厚煤层采场; 矿压显现; 强度指数; 分级预测

中图分类号: TD 326

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)09 - 1828 - 08

A classification forecasting method for the weighting intensity of stopes of thick coal seams with hard roofs

HUO Bingjie¹, JING Xuedong¹, YU Bin², HAN Jun¹

(1. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

2. Datong Coal Mine Group Co., Ltd., Datong, Shanxi 037003, China)

Abstract: Prediction of the stope weighting intensity is an important part of mine pressure disaster prevention and control and a main basis of strata control. A strata strength index was defined and a new method for classification forecasting of strata behaviors of thick coal seams with hard roofs was put forward. According to the mining practice in Datong mining area, a classification and prediction index system of strata behaviors of thick seams with hard roofs was established by taking the instability condition of far-field high-level structure as the core and taking into account the basic indexes and strengthening conditions that affect the strata behaviors. Based on the fuzzy mathematics theory, a classification forecasting model of the strata behaviors was established, and four different levels of quantitative indexes for different factors were given. The proposed method was applied to

收稿日期: 2019 - 01 - 31; **修回日期:** 2019 - 04 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504127); 国家重点研发计划资助(2017YFC0804203); 辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金资助课题(LNTU17KF06)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51504127), National Key R&D Program of China(Grant No. 2017YFC0804203) and Open Projects of Research Center of Coal Resources Safe Mining and Clean Utilization, Liaoning(Grant No. LNTU17KF06)

作者简介: 霍丙杰(1980 -), 男, 博士, 2004年毕业于辽宁工程技术大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事矿山压力与矿井动力灾害防治方面的教学与研究工作。E-mail: huobingjie@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0094

predict the weighting strength of 8105 working face of the extra-thick coal seam with a hard roof in Tongxin coal mine. It is shown that the predicted result is in good agreement with the mining practice and that the method can accurately predict strata behaviors in hard roof thick coal seams. The index system of the classification and prediction method of the weighting strength index is universal, comprehensive and systematic, and the classification of index parameters is detailed and operable. The proposed method can provide theoretical reference for the prediction of the stope weighting intensity and the management of roofs of thick seams with hard roofs in other mining areas.

Key words: mining engineering; hard roof; stope with thick coal seam; strata behaviors; intensity index; classification forecasting

1 引言

坚硬顶板在煤层开采后易形成大面积悬顶, 短期内不易自然垮落, 一旦垮落易形成采场大面积来压、支架压死、矿压风暴等矿压灾害。当开采条件为坚硬顶板与厚煤层同时存在时, 则采场矿压显现更为强烈、矿压影响范围更广、矿压显现机制更加复杂。我国坚硬顶板赋存煤层储量约占总量的 1/3, 坚硬顶板破断失稳产生的强矿压事故占比很高, 严重威胁矿井的安全生产, 若能够用一种方法提前预测坚硬顶板工作面的来压强度, 针对其来压强度特征, 在工作面开采前采取相应的预控技术措施, 对保障工作面安全, 特别是厚煤层工作面具有重要意义。

国内外学者在坚硬顶板矿压显现与控制技术方面进行了大量研究工作。于斌等^[1-3]建立了特厚煤层开采大空间采场岩层结构演化模型, 开发了相应的坚硬岩层控制技术。张宏伟等^[4-5]应用弹性板理论建立了坚硬顶板特厚煤层采场覆岩柱壳结构力学模型和数学模型, 探讨了采场大小周期来压及动载矿压发生机制。刘长友等^[6-7]探讨了大同矿区多采空区下坚硬顶板群结构的破断失稳对工作面矿压的影响。夏彬伟等^[8-11]分析了采场坚硬岩层的破断特征、破断结构及其失稳对工作面矿压显现及动载矿压的控制作用。朱志洁等^[12]研究了大同矿区坚硬顶板特厚煤层采场在远距离煤柱作用下的强矿压显现机制。胡千庭等^[13]基于 Hoek-Brown 准则对重复采动上覆坚硬顶板力学特性进行了研究。

在矿压显现分级预测方法方面, 窦林名等^[14]基于危险性指数对冲击地压进行等级预测。徐琛等^[15]构建了应变型岩爆组合权重-理想点法预测分析模型。文畅平^[16]基于 Bayes 判别分析法, 研究了冲击地压的预测与危险性分级问题。陈红江等^[17]建立了

岩爆预测的集对分析模型, 对各个工程岩爆烈度级别进行预测。刘章军等^[18]建立了岩爆烈度分级预测的模糊概率模型, 在模型中引入了模糊权重的概念。姜大威等^[19]建立了岩爆烈度等效数值法预测模型。刘晓斐等^[20]进行了采前冲击危险性区域预测。何江等^[21]采用震动波 CT 技术实现了动载与静载结合对冲击危险预测与实时监测预警。欧阳振华等^[22]提出了一种自震式微震监测技术, 开展了煤层动载矿压预测。

上述研究多针对坚硬顶板对矿压显现的控制作用, 冲击地压、岩爆等动力灾害发生危险性、级别进行预测研究, 很少涉及坚硬顶板厚煤层采场矿压显现强度分级预测指标、方法等方面研究。目前还没有一套系统的针对坚硬顶板厚煤层采场来压强度分级预测方法, 能够在坚硬顶板厚煤层工作面开采之前进行来压强度预测, 为坚硬顶板厚煤层采场矿压灾害的预控提供理论依据。本文拟建立一种基于强度指数的坚硬顶板厚煤层采场来压强度分级预测新方法, 可以对坚硬顶板厚煤层工作面来压强度进行预测, 科学地指导坚硬顶板控制技术的实施, 为坚硬顶板厚煤层工作面安全、高效开采提供保障。

2 矿压显现强度影响因素分析

影响采场矿压显现的因素众多, 为了深入研究矿压显现发生的核心因素及不同因素对矿压显现的定量影响关系, 笔者根据其对于矿压显现控制作用的机制将其分为基础类、核心类和强化类三类因素。

基础类因素主要包括: 采高、工作面长度、基本顶赋存特征、煤层埋藏深度、原岩应力等。根据大同矿区石炭系坚硬顶板特厚煤层采场强矿压显现

机制^[2, 4, 9]，确定高位结构失稳是工作面产生强矿压的根本原因。所以，核心类因素主要包括：远场高位结构的层位、结构刚度、结构稳定性等；强化类因素指工作面四邻及邻近煤层的开采特征，指标主要分解为：区段煤柱宽度、邻近工作面的开采时间、邻近层的层间距、上覆邻近层开采后采空区覆岩结构特征等。上覆邻近层采空区覆岩结构特征主要针对采空区中是否遗留大型煤柱、覆岩中是否存在厚层坚硬岩层进行分析。

依据矿压显现特征将来压强度分为 4 级，图 1 为坚硬顶板厚煤层采场矿压显现强度预测指标及分级。由图 1 可知，核心类因素是坚硬顶板厚煤层采场矿压显现强烈的关键因素。当这些影响矿压显现强度的因素比较突出或多项比较突出因素同时存在时，则工作面将会出现矿压显现强烈或极强烈现象。

3 矿压显现分级预测的强度指数法

3.1 矿压显现强度指数及等级划分原则

来压强度预测、预报是矿压灾害防治的重要组成部分，本文拟通过矿压显现强度指数进行采场来压强度预测。这里定义矿压显现强度指数，是指影响矿压显现的各种因素对采场矿压显现的综合作用，强度指数越大表明矿压显现越强烈，强度指数取值范围为 0~1。

强度指数法是在分析大同矿区坚硬顶板特厚煤层已开采的 30 多个坚硬顶板厚煤层综放工作面发生的 200 余次强矿压灾害的基础上，综合分析开采区域的基础类因素、核心类因素和强化类因素对矿压显现强度影响的权重，细化各影响因素的分类等级参数，分别计算得出三类因素的强度指数，通过

建立的矿压显现强度指数分级预测模型，最终确定矿压显现的强度指数，依此对工作面矿压显现等级进行评价，为坚硬顶板工作面来压强度预测、矿压灾害预控、顶板管理等提供理论基础。

基于模糊数学理论，建立矿压显现综合强度指数模型：

$$W_p = \sum_{i=1}^3 (\omega_{pi} A_{pi}) \tag{1a}$$

其中，

$$A_{p1} = \frac{\sum b_i}{\sum b_{mi}}, A_{p2} = \frac{\sum c_j}{\sum c_{mj}}, A_{p3} = \frac{\sum r_n}{\sum r_{mn}} \tag{1b}$$

式中： W_p 为矿压显现强度评定的强度指数； ω_{pi} 为不同类型因素对矿压显现强度影响的权重，通过大同矿区坚硬顶板厚煤层开采实践、矿压观测研究，结合专家打分综合确定， $\omega_{pi} = \{\omega_{p1}, \omega_{p2}, \omega_{p3}\} = \{0.3, 0.5, 0.2\}$ ； A_{p1} 为基础类因素对矿压显现强度的影响程度及来压强度等级评定指数； b_i 为各种基础类因素的实际影响强度指数； b_{mi} 为各种基础类因素的最大影响强度指数； A_{p2} 为核心类因素对矿压显现强度的影响程度及来压强度等级评定指数； c_j 为各种核心类因素的实际影响强度指数； c_{mj} 为各种核心类因素的最大影响强度指数； A_{p3} 为强化类因素对矿压显现强度的影响程度及来压强度等级评定指数； r_n 为各种强化类因素的实际影响强度指数； r_{mn} 为各种强化类因素的最大影响强度指数。

工作面矿压显现强度指数 W_p 值越高，评估区域的矿压显现等级越高。根据矿压显现强度评定的强度指数 W_p ，将矿压显现的强烈程度分为 4 个强度等级，分别为矿压显现一般、矿压显现较强、矿压显现强烈、矿压显现极强烈，分级标准见表 1。

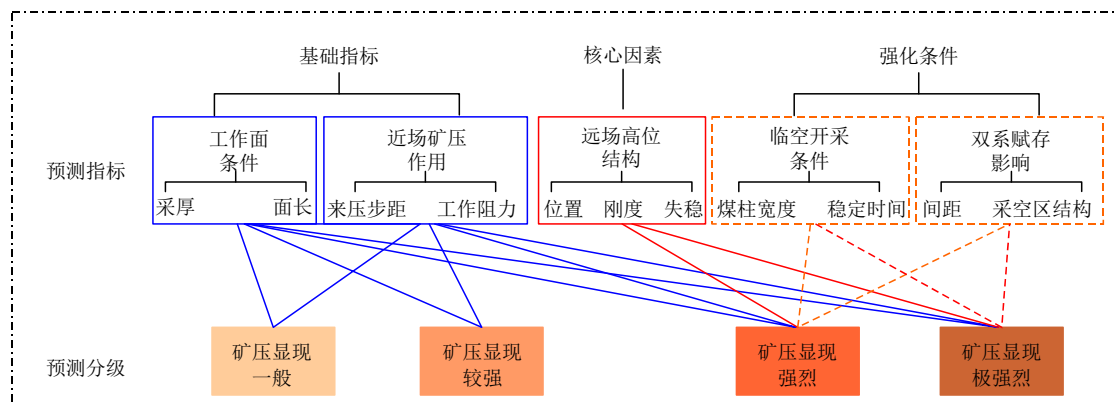


图 1 坚硬顶板厚煤层采场矿压显现强度预测指标及分级

Fig.1 Prediction indices and classifications of stope weighting intensity of thick coal seams with hard roofs

表 1 矿压显现强度等级划分
Table 1 Classification of strata behaviors

强度等级	显现特征	强度指数
I, 矿压显现一般	矿压显现强度低, 无明显周期来压现象	$W_p \leq 0.25$
II, 矿压显现较强	有明显周期来压现象	$0.25 < W_p \leq 0.5$
III, 矿压显现强烈	来压期间, 煤壁片帮严重, 支架活柱大幅下缩	$0.5 < W_p \leq 0.75$
IV, 矿压显现极强烈	来压期间, 煤壁炸帮, 支架压死, 超前单体支架折损严重	$W_p > 0.75$

3.2 不同影响因素的强度指数划分方法

强度指数法中各种基础类、核心类、强化类因素指数大小的确定采用分段划分, 划分主要依据经验和各因素生产实践中的常规参数特征。对于指标分段值的确定, 根据生产实践对分段特征值进行连续化处理, 使指标值更为科学。

(1) 基础类因素影响的矿压显现强度指数

对于每一种基础类影响因素和每一种基础类影响因素的强度指数均分为 4 个等级, 由低至高依次为 0, 1, 2, 3; 其中, 0 表示对矿压显现强度没有影响, 1 表示对矿压显现强度影响程度弱, 2 表示对矿压显现强度影响程度中等, 3 表示对矿压显现强度影响程度强。表 2 为基础类影响因素的等级分类参数划分及相应的矿压显现强度指数。

(2) 核心类因素影响的矿压显现强度指数

同样, 对于每一种核心类因素和每一种核心类因素的强度指数均分为 4 个等级, 由低至高依次为 0, 1, 2, 3, 不同数字代表的意义与基础类因素相同。表 3 为核心类影响因素的等级分类参数划分及相应的矿压显现强度指数。

岩体刚度是反映其承载特性的物理量, 曲面的弯曲刚度 K 增加时, 结构的曲率半径增大, 形成的高位结构尺度大, 结构失稳时释放的能量多。高位结构曲面刚度 K 为

$$K = \frac{Eh_{高}^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量(MPa), $h_{高}$ 为高位结构厚度(m), ν 为组成结构岩体的泊松比。

高位结构失稳判据^[4]:

$$2R \geq D_{max} = \sqrt[3]{\eta\alpha EI / q} \quad (3)$$

式中: R 为远场高位结构的尺度半径(m), D_{max} 为高位结构失稳(高位结构顶部组成高位结构的坚硬岩层)时的最大跨度(m), η 为高位结构稳定性系数,

表 2 基础类影响因素的矿压显现强度指数
Table 2 Intensity index of strata behaviors affected by basic factors

序号	影响因素	因素说明	因素分类	强度指数
1	A_{b1}	采高 M (单位: m)	$M \leq 3.5$	0
			$3.5 < M \leq 5.0$	1
			$5.0 < M \leq 8.0$	2
2	A_{b2}	工作面长度 L (单位: m)	$M > 8.0$	3
			$L \leq 150$	0
			$150 < L \leq 200$	1
3	A_{b3}	基本顶(垮落带、裂隙带内坚硬厚层岩层)距煤层的距离与采高的比值 $k_{基}$	$200 < L \leq 250$	2
			$L > 250$	3
			$6 \leq k_{基} < 8$	0
4	A_{b4}	基本顶范围内坚硬顶板岩层厚度 $h_{基}$ (单位: m)	$4 \leq k_{基} < 6$	1
			$2 \leq k_{基} < 4$	2
			$k_{基} < 2$	3
5	A_{b5}	埋藏深度 H (单位: m)	$h_{基} \leq 5$	0
			$5 < h_{基} \leq 10$	1
			$10 < h_{基} \leq 20$	2
6	A_{b6}	开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比 $\gamma = (\sigma_g - \sigma) / \sigma$	$h_{基} > 20$	3
			$H \leq 400$	0
			$400 < H \leq 600$	1
7	A_{b7}	埋藏深度 H (单位: m)	$600 < H \leq 800$	2
			$H > 800$	3
			$\gamma \leq 10\%$	0
8	A_{b8}	开采区域内构造引起的应力增量与正常应力值之比 $\gamma = (\sigma_g - \sigma) / \sigma$	$10\% < \gamma \leq 20\%$	1
			$20\% < \gamma \leq 30\%$	2
			$\gamma > 30\%$	3

表 3 核心类影响因素的矿压显现强度指数
Table 3 Intensity index of strata behaviors affected by core factors

序号	影响因素	因素说明	因素分类	强度指数
1	A_{c1}	高位坚硬岩层(上覆裂隙带内坚硬厚岩层)距煤层的距离与采高的比值 $k_{高}$	$k_{高} > 30$	0
			$20 < k_{高} \leq 30$	1
			$15 < k_{高} \leq 20$	2
			$8 < k_{高} \leq 15$	3
2	A_{c2}	远场高位坚硬岩层厚度 $h_{高}$ (单位: m)	$h_{高} \leq 5$	0
			$5 < h_{高} \leq 10$	1
			$10 < h_{高} \leq 20$	2
			$h_{高} > 20$	3
3	A_{c3}	远场高位坚硬岩层结构刚度 K	$K \leq 10^4$	0
			$10^4 < K \leq 10^5$	1
			$10^5 < K \leq 10^6$	2
			$K > 10^6$	3
4	A_{c4}	高位结构稳定性	不存在高位结构	0
			存在高位结构但其不失稳	1
			存在高位结构且失稳, 但其下伏自由空间小	2
5	A_{c5}	高位结构稳定性	存在高位结构且失稳, 其下伏自由空间大	3

I 为截面惯性矩(m^4), q 为荷载(MPa), α 为岩层非均质系数。

当采场基本顶之上覆岩不存在坚硬岩层时, 则采场覆岩中不会形成高位结构。当采场基本顶之上覆岩中存在坚硬岩层, 且 $k_{基} > 8$ 时, 则认为基本顶范围内垮落岩层可以充满采空区, 即为存在高位结构但其不失稳情形; 若 $6 < k_{基} \leq 8$ 时, 则认为基本顶范围内垮落岩层充不满采空区, 但其下伏自由空间小, 此时, 高位结构的稳定性需要用式(3)来判别; 若 $k_{基} \leq 6$ 时, 则认为基本顶范围内垮落岩层充不满采空区, 采场上覆岩层中存在高位结构, 且其下伏自由空间大, 此时, 高位结构的稳定性需要用式(3)来判别。

(3) 强化类因素影响的矿压显现强度指数

同样, 对于每一种强化类因素和每一种强化类因素的强度指数均分为 4 个等级, 由低至高依次为 0, 1, 2, 3, 不同数字代表的意义与基础类因素相同。表 4 为强化类影响因素的等级分类参数划分及相应的矿压显现强度指数。对于上覆采空区覆岩结

表 4 强化类因素影响的矿压显现强度指数表

Table 4 Intensity index table of strata behaviors affected by reinforced factors

序号	影响因素	因素说明	因素分类	强度指数
1	A_{r1}	工作面与邻近采空区的关系	实体煤工作面	0
			一侧采空	1
			两侧采空	2
			三侧及以上采空	3
2	A_{r2}	邻近采空区开采时间 t (单位: a)	$t > 2$	0
			$1.0 < t \leq 2.0$	1
			$0.5 < t \leq 1.0$	2
			$t \leq 0.5$	3
3	A_{r3}	工作面与邻近采空区间煤柱宽度 B (单位: m)	$B > 50$	0
			$30 < B \leq 50$	1
			$15 < B \leq 30$	2
			$B \leq 15$	3
4	A_{r4}	上覆采空区距煤层的距离与采高的比值 d	$d > 40$	0
			$30 < d \leq 40$	1
			$20 < d \leq 30$	2
			$d \leq 20$	3
5	A_{r5}	上覆采空区覆岩结构特征	上覆采空区无大型煤柱、覆岩不存在厚层坚硬岩层	0
			上覆采空区覆岩中存在厚层坚硬岩层	1
			上覆采空区留设大型煤柱	2
			上覆采空区留设大型煤柱、且覆岩中存在厚层坚硬岩层	3

注: 煤柱宽度 B 指厚及特厚煤层工作面间留设区段煤柱的宽度, 不包括回采顺槽采用无煤柱护巷、薄及中厚煤层开采的情形; 上覆采空区中留设大型煤柱指煤柱尺寸为 40 m 以上的煤柱; 覆岩中的厚层坚硬岩层指厚度为 20 m 以上、抗压强度为 60 MPa 以上的岩层。

构特征, 本文重点分析上覆采空区有无大型煤柱、覆岩是否存在厚层坚硬岩层破断后形成的承载结构。

4 实例分析

大同矿区赋存有侏罗系、石炭系双系煤层, 双系煤层上覆岩层中赋存有多层坚硬顶板, 是国内外最具典型的坚硬顶板矿区, 本文以大同矿区同忻煤矿开采的石炭系 3~5#煤层 8015 工作面为例, 进行采场来压强度预测应用分析。

(1) 同忻矿 8105 工作面开采条件分析

同忻矿 8105 工作面, 开采 3~5#煤层, 煤层平均厚度为 15.3 m, 煤层倾角为 1°~3°工作面长为 207 m。根据盘区综合柱状及钻孔资料, 归纳总结 8105 工作面上覆 3~5#煤层至侏罗系 14#煤层之间有 24 层岩层, 其中以坚硬的砂岩和砾岩为主, 软弱的泥岩分布很少, 8105 工作面覆岩双系间坚硬岩层分布特征见表 5。基本顶(Y9)距离煤层距离为 32.4 m, 通过关键层理论分析, 确定距离煤层距离 143.5 m 的覆岩(Y22, Y23)为主关键层, 回采过程中可形成高位结构, 其失稳易造成工作面产生强矿压。工作面埋藏深度约 450 m。

表 5 同忻煤矿 8105 工作面覆岩双系间坚硬岩层分布特征及其力学参数

Table 5 Distribution characteristics and mechanical parameters of hard overburden strata between carboniferous and jurassic in 8105 working face of Tongxin coal mine

序号	岩层名称	实际厚度/m	距 3~5#煤层距离/m	体积力/($kN \cdot m^{-3}$)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
Y23	粗粒砂岩	14.3	96.3	25.24	6.44	21.31
Y22	细粒砂岩	10.7		26.82	7.01	36.12
Y9	细粒砂岩(基本顶)	14.8	23.9	25.62	8.20	35.62
Y2	K3 砂岩	5.3	3.2	25.44	7.68	36.21
	(下位基本顶)					
	3~5#煤层	15.0		17.70	8.64	35.87

邻近的 8106 工作面已开采完毕, 区段间留设煤柱 45 m。8105 工作面上覆侏罗系煤层群由永定庄矿开采, 侏罗系主要可采煤层从上至下依次为 9#, 11#, 12#, 14#煤层, 14#煤层底板距 3~5#煤层顶板间距为 130~170 m。图 2 为 8105 工作面与上覆侏罗系 14#煤层采空区对应关系平面图, 侏罗系采空区留设有多种类型煤柱; 且侏罗系煤层覆岩赋存有 K21 巨厚坚硬砂岩(平均厚度 50 m), 结合开采分析, 侏罗系采空区覆岩形成承载性结构。

(2) 8105 工作面矿压显现主要影响因素分析

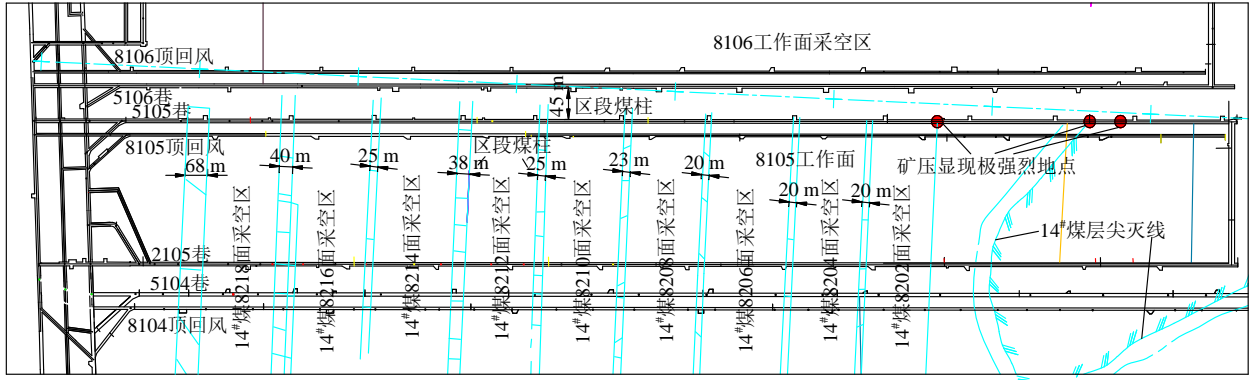


图 2 石炭系 8105 工作面与上覆侏罗系 14#煤层采空区煤柱对照图

Fig.2 Contrast map between carboniferous 8105 working face and overlying jurassic #14 coal pillar in goafs

影响 8105 工作面矿压显现主要的因素为：特厚煤层(采高 15.3 m)、覆岩含有多层坚硬顶板(3 层)、上覆侏罗系采空区遗留多种类型煤柱(区段煤柱、侏罗系井田境界煤柱)，且侏罗系覆岩中含有巨厚坚硬岩层(K21)，这些因素的耦合作用使 8105 工作面具有产生强矿压显现的条件。特别是覆岩中存在多层坚硬岩层，据前期研究成果表明，高位坚硬岩层易形成“高位承载结构”，其失稳是工作面产生强矿压的核心因素。

同忻矿北一盘区最大主应力 $\sigma_1 = 20.96 \text{ MPa}$ ，垂直主应力 $\sigma_v = 13.8 \text{ MPa}$ ，构造应力增量为 7.16 MPa，构造应力为强矿压的发生提供了必要的能量基础。

(3) 不同因素对矿压显现的影响强度指数分析

根据同忻煤矿 8105 工作面的实际赋存条件和开采条件，确定各因素对矿压显现影响的实际强度指数见表 6，7，8。

表 6 同忻矿 8105 工作面基础类因素强度指数

Table 6 Intensity index of basic factors for 8105 working face in Tongxin mine

基础类影响因素	实际因素参数特征	实际强度指数
A_{b1}	15.3	3
A_{b2}	207	2
A_{b3}	32.4	2
A_{b4}	14.8	2
A_{b5}	450	1
A_{b6}	52%	3

表 7 同忻矿 8105 工作面核心类因素强度指数

Table 7 Intensity index of core factors for 8105 working face in Tongxin mine

核心类影响因素	实际因素参数特征	实际强度指数
A_{c1}	9.38	3
A_{c2}	25	3
A_{c3}	7.7×10^5	2
A_{c4}	结构失稳且下伏空间大	3

表 8 同忻矿 8105 工作面强化类因素强度指数

Table 8 Intensity index of reinforced factors for 8105 working face in Tongxin mine

强化类影响因素	实际因素参数特征	实际强度指数
A_{r1}	一侧采空	1
A_{r2}	1.3a	1
A_{r3}	45	1
A_{r4}	11.4	3
A_{r5}	上覆侏罗系采空区留设大型煤柱、且覆岩中存在 K21 厚层坚硬岩层	3

同忻矿 8105 工作面矿压显现强度分级预测的强度指数由下式计算得

$$A_{p1} = \frac{\sum b_i}{\sum b_{mi}} = \frac{3+2+2+2+1+3}{3+3+3+3+3+3} = 0.722$$

$$A_{p2} = \frac{\sum c_j}{\sum c_{mj}} = \frac{3+3+2+3}{3+3+3+3} = 0.917$$

$$A_{p3} = \frac{\sum r_n}{\sum r_{mn}} = \frac{1+1+1+3+3}{3+3+3+3+3} = 0.6$$

$$\omega_{pi} = \{\omega_{p1}, \omega_{p2}, \omega_{p3}\} = \{0.3, 0.5, 0.2\}$$

$$W_p = \sum_{i=1}^3 \omega_{pi} A_{pi} = 0.3 \times 0.722 + 0.5 \times 0.917 + 0.2 \times 0.6 =$$

$$0.80 > 0.75$$

通过评价，确定同忻矿 8105 工作面矿压显现强度等级为 IV 级，即矿压显现极强烈。

开采实践表明，8105 工作面生产期间共发生 25 次强矿压显现现象，其中 3 次为极强烈型矿压显现。如在工作面出侏罗系遗留大煤柱时(采位 450 m)，在 5105 巷发生第三次极强烈矿压显现，来压后该区域顶板下沉，底鼓严重，单体支柱弯曲倾倒 30 多根，采煤侧煤帮炸帮严重。工作面强烈的矿压显现情况与理论预测评级结果相符，表明建立的坚硬顶板厚煤层采场矿压显现强度预测方法较合理。

5 结 论

(1) 首次定义了矿压显现强度指数, 并提出了一种基于矿压显现强度指数的坚硬顶板厚煤层采场来压强度分级预测新方法, 为坚硬顶板厚煤层采场矿压灾害的预控提供理论基础。

(2) 以远场高位结构失稳条件为核心, 综合影响矿压显现的基础指标、强化条件, 建立了坚硬顶板厚煤层采场矿压显现分级预测指标体系; 基于模糊数学理论, 构建了分级预测模型, 给出了评价 4 个不同级别矿压显现因素的量化指标。

(3) 应用矿压显现强度指数分级预测方法对同忻煤矿坚硬顶板特厚煤层 8105 工作面矿压显现强度进行了预测, 预测工作面来压等级为 IV 级, 即矿压显现极强烈, 预测结果与开采实践较吻合。

(4) 矿压显现强度指数分级预测方法的应用研究也进一步表明, 该方法可有效预测坚硬顶板厚煤层工作面采场来压强度特征, 且该方法预测指标全面、系统, 参数分级划分详实、可操作。所以, 该方法可为其他矿区坚硬顶板厚煤层采场来压强度预测、顶板管理等提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 于 斌, 刘长友, 刘锦荣. 大同矿区特厚煤层综放回采巷道强矿压显现机制及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1 863 - 1 872. (YU Bin, LIU Changyou, LIU Jinrong. Mechanism and control technology of pressure occurrence in roadway with extra thickness and mechanized caving coal seam in Datong mining area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1 863 - 1 872. (in Chinese))
- [2] 于 斌, 高 瑞, 孟祥斌, 等. 大空间远场结构失稳矿压作用与控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1 134 - 1 145. (YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, et al. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1 134 - 1 145. (in Chinese))
- [3] 于 斌, 朱卫兵, 高 瑞, 等. 特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 571 - 580. (YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Strata structure and its effect mechanism of large space stope for fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 571 - 580. (in Chinese))
- [4] 张宏伟, 付 兴, 于 斌, 等. 特厚煤层坚硬覆岩柱壳结构特征模型及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1 226 - 1 230. (ZHANG Hongwei, FU Xing, YU Bin, et al. Study of the cylindrical shell structural characteristic of the hard overlying strata of extra thick coal seam and its application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(6): 1 226 - 1 230. (in Chinese))
- [5] 张宏伟, 曹 煜, 朱 峰, 等. 坚硬顶板孤岛工作面冲击地压机制及前兆判别[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 118 - 123. (ZHANG Hongwei, CAO Yu, ZHU Feng, et al. Precursor discrimination and mechanism of rock burst in the island workface with hard roof[J]. Coal Geology and Exploration, 2018, 46(2): 118 - 123. (in Chinese))
- [6] 刘长友, 杨敬轩, 于 斌, 等. 多采空区下坚硬厚层破断顶板群结构的失稳规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 395 - 403. (LIU Changyou, YANG Jingxuan, YU Bin, et al. Destabilization regularity of hard thick roof group under the multi gob[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 395 - 403. (in Chinese))
- [7] 郭卫彬, 刘长友, 吴锋锋, 等. 坚硬顶板大采高工作面压架事故及支架阻力分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1 212 - 1 219. (GUO Weibin, LIU Changyou, WU Fengfeng, et al. Analyses of support crushing accidents and support working resistance in large mining height workface with hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1 212 - 1 219. (in Chinese))
- [8] 夏彬伟, 李晓龙, 卢义玉, 等. 大同矿区坚硬顶板破断步距及变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1 038 - 1 044. (XIA Binwei, LI Xiaolong, LU Yiyu, et al. Study on the breaking span and deformation of hard roof in Datong mining area[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(6): 1 038 - 1 044. (in Chinese))
- [9] 霍丙杰, 于 斌, 张宏伟, 等. 多层坚硬顶板采场覆岩“拱壳”大结构形成机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 18 - 23. (HUO Bingjie, YU Bin, ZHANG Hongwei, et al. Study on formation mechanism of arch shell large structure of overburden in coal mining face with multi layer hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 18 - 23. (in Chinese))
- [10] 朱卫兵, 于 斌. 大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 99 - 104. (ZHU Weibin, YU Bin. Breakage form and its effect on strata behavior of far field key stratum in large space stope[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 99 - 104. (in Chinese))
- [11] 吕进国, 姜耀东, 李守国, 等. 巨厚坚硬顶板条件下断层诱冲特征及机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1 961 - 1 969. (LU Jinguo, JIANG Yaodong, LI Shouguo, et al. Characteristics and mechanism research of coal bumps induced by faults based on extra thick and hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1 961 - 1 969. (in Chinese))
- [12] 朱志洁, 张宏伟, 陈 鑫, 等. 远距离重叠煤柱作用下的强矿压显现作用机制: 以大同矿区多煤层开采为例[J]. 中国安全科学学报,

- 2017, 27(3): 83 - 88.(ZHU Zhijie, ZHANG Hongwei, CHEN Ying, et al. Strong strata behavior mechanism under long distance overlapping coal pillar taking multiple coal seams mining of Datong mining area as an example[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 83 - 88.(in Chinese))
- [13] 胡千庭, 田成林, 谭云亮, 等. 重复采动条件下坚硬顶板力学试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 67 - 72.(HU Qianting, TIAN Chenglin, TAN Yunliang, et al. Study of the hard roof mechanical properties in the process of repeated coal mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(1): 67 - 72.(in Chinese))
- [14] 窦林名, 何学秋. 煤矿冲击矿压的分级预测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 717 - 722.(DOU Linming, HE Xueqiu. Technique of classification forecasting rock burst in coal mines[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(6): 717 - 722.(in Chinese))
- [15] 徐琛, 刘晓丽, 王恩志, 等. 基于组合权重-理想点法的应变型岩爆五因素预测分级[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2245 - 2252.(XU Chen, LIU Xiaoli, WANG Enzhi, et al. Prediction and classification of strain mode rockburst based on five-factor criterion and combined weight-ideal point method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2245 - 2252.(in Chinese))
- [16] 文畅平. 基于 Bayes 判别分析法的冲击地压预测与危险性分级[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 229 - 236.(WEN Changping. Prediction and hazard classification of bumping geopressure based on Bayes discriminant analysis method[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(5): 229 - 236.(in Chinese))
- [17] 陈红江, 李夕兵, 张毅. 基于集对分析法的岩爆烈度分级预测研究[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2008, 22(4): 10 - 14.(CHEN Hongjiang, LI Xibin, ZHANG Yi. Study on application of set pair analysis method to prediction of rockburst[J]. Journal of University of Souk China: Science and Technology, 2008, 22(4): 10 - 14.(in Chinese))
- [18] 刘章军, 袁秋平, 李建林. 模糊概率模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 3095 - 3103.(LIU Zhangjun, YUAN Qiuping, LI Jianlin. Application of fuzzy probability model to prediction of classification of rockburst intensity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 3095 - 3103.(in Chinese))
- [19] 姜大威, 杨涛. 基于等效数值法的岩爆烈度预测研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 210 - 213.(JIANG Dawei, YANG Tao. Prediction of rock burst intensity based on equivalent numerical method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 210 - 213.(in Chinese))
- [20] 刘晓斐, 王恩元, 赵恩来, 等. 孤岛工作面冲击地压危险综合预测及效果验证[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 215 - 218.(LIU Xiaofei, WANG Enyuan, ZHAO Enlai, et al. Study on multi-prediction of rockburst in the mining of gob-surrounded coal face and demonstration[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(2): 215 - 218.(in Chinese))
- [21] 李静, 何江, 巩思园, 等. 上覆遗留煤柱作用下冲击矿压预测预警案例研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(增2): 305 - 310.(LI Jing, HE Jiang, GONG Siyuan, et al. Case study on prediction and warning of rock burst under overlying pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(Supp.2): 305 - 310.(in Chinese))
- [22] 欧阳振华, 孔令海, 齐庆新, 等. 自震式微震监测技术及其在浅埋煤层动载矿压预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增1): 44 - 51.(OUYANG Zhenhua, KONG Linghai, QI Qingxin, et al. Self-shocking microseismic monitoring technology and its application in prediction of dynamic pressure in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Supp.1): 44 - 51.(in Chinese))