

文章编号: 1673-3363-(2012)01-0014-07

基于地质预报的煤巷顶板事故防治研究

王琦^{1,2}, 李术才¹, 李为腾¹, 王汉鹏¹, 李智¹, 江贝³, 王德超¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266510; 3. 山东科技大学资源与环境工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要 对煤巷顶板事故原因和机理进行了总结分析, 指出现有煤巷掘进支护过程中顶板事故多发的主要原因是迎头地质情况调查不明、地质条件突变时缺少相应的预警机制和合理的应对措施。经过探讨指出利用煤巷超前地质预报技术预防顶板事故是可行的。通过对巨野矿区某矿煤巷多次冒顶事故教训的总结, 指出建立合理的冒顶事故预警机制并设计相应支护预案的必要性, 在此基础上提出了基于超前地质预报的煤巷顶板事故支护预案防治方法。以“地质先行、物探紧跟、钻探核实、预案配套、监控反馈”为指导方针, 注重各预报环节的反复推演与相互修正。利用该方法成功预防了多起冒顶事故的发生, 并对其中一起案例进行了深入分析, 显示该方法具有较理想的预报效果, 以锚索梁为主的支护预案可以有效控制断层区巷道变形, 防止冒顶事故发生, 并具有很好的经济性指标。

关键词 煤巷; 顶板事故; 超前地质预报; 支护预案; 实例分析

中图分类号 TD327

文献标识码 A

Prevention of Coal Roadway Roof Accidents Based on Geological Forecast Technology

WANG Qi^{1,2}, LI Shu-cai¹, LI Wei-teng¹, WANG Han-peng¹,
LI Zhi¹, JIANG Bei³, WANG De-chao¹

(1. The Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract By the summary and analysis of the reasons and mechanism of mine roadway roof accidents, we find that the lack of geological information, the corresponding early warning mechanism and reasonable solutions are the main reasons for roof accidents during coal roadway drilling and supporting. Additionally, it has been proved that applying the advanced geological forecasting technology to prevent roof accidents is feasible. After summarizing several roof fall accidents of coal roadway in Juye mine area, it indicates that it is necessary to establish reasonable early warning mechanism of roof fall accident and design the corresponding prearranged support scheme. Thus, the prearranged support scheme and control method of roof accident are proposed based on advanced geological forecasting. The guidelines of the method in regular sequence are prior geological analysis, following geophysical prospecting, drilling to check, matched supporting plan designing and monitoring

收稿日期: 2011-04-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209407); 国家自然科学基金项目(40872203); 国家自然科学基金青年科学基金项目(50904043)

作者简介: 王琦(1983-), 男, 山东省临沂市人, 讲师, 博士, 从事地下工程灾害防治及岩土工程支护方面的研究。

E-mail: chinawangqi@163.com

Tel: 13583120068

to feed back. Meanwhile, the repeated deduction and mutual correction between different prediction parts are quite important for the method. This method has been successfully applied to prevent several roof fall accidents, and one of the cases is analyzed in depth, which shows that the method has an ideal forecasting effect. The supporting plan with anchor beam can control roadway deformation in fault zone effectively, prevent roof collapse accidents, and get great economical benefits to feed back. And repeated deduction and mutual correction between prediction parts were important for the method. This method was successfully applied to prevent some roof fall accidents, and one of the cases was analyzed in depth. The case analysis showed that the method had an ideal forecasting effect. The supporting plan with anchor beam was good for controlling roadway deformation and preventing roof collapse accidents in fault zone, and it was economical.

Key words coal roadway; roof accident; advanced geological forecasting; pre-arranged support scheme; case study

随着我国煤矿开采深度的增加, 巷道所处地质条件也更加复杂^[1]。在围岩地压大、断层构造多、岩层松散易破碎和岩层遇水膨胀等因素影响下, 巷道掘进过程中发生顶板事故的比例不断上升。顶板事故作为煤矿生产的五大灾害之一, 占煤矿总死亡事故的 40% 以上, 造成的人员伤亡比率几乎占井下所有事故死亡人数的一半^[2-4]。其中, 煤巷顶板事故次数及死亡人数又分别占顶板事故总数及死亡人数的 42.3% 和 39.7%^[5]。以上数据表明煤巷顶板事故在煤矿灾害事故中比重较大, 是造成人员伤亡最主要的矿井灾害之一。因此, 分析煤巷顶板事故发生的机理、原因及规律, 找出防治工作中的薄弱环节, 研究具有针对性的防治措施, 有效遏制煤矿顶板事故的发生, 具有很高的工程价值和现实意义。

1 煤巷顶板事故发生机理、原因分析

顶板事故发生的根本原因是由于掘进过程中的矿山压力活动。顶板在矿山压力活动过程中发生不同程度的变形, 如果顶板管理不当, 支护质量不好, 压力继续增大, 就会出现断裂、垮落、片帮或局部冒顶等现象, 国内外众多学者对此进行了研究并取得一定成果^[6-12]。

从发生冒顶事故的原因分析, 顶板事故预防的主体应当是围岩、支护和人^[13]。现阶段大部分煤矿都非常重视煤巷顶板问题, 从上到下在意识上的重视加上相对更加成熟施工工艺和支护技术在一定程度上减少了顶板事故的发生, 也就是“人”和“支护”的因素已经得到了较好解决。但是煤巷冒顶事故却依然层出不穷, 困扰着广大研究人员和煤矿管理人员。究其原因, 是起到核心作用的“围岩”因素不确定所导致的。顶板岩层条件不明, 即便是从上

到下都非常重视, 依然会导致领导决策艰难, 造成支护方案与实际顶板地质情况不匹配, 要么保守, 浪费材料, 要么支护强度太弱, 出现冒顶问题。所以, 在以上 3 个因素中, 得到准确的巷道顶板岩层具体信息无疑是前提条件和核心因素。贾明魁^[14-15]通过对锚杆支护煤巷冒顶事故实例的分析研究指出, 如何有效地防治岩层组合劣化型冒顶是保证锚杆支护煤巷安全的首要任务。国外相关研究^[16-17]同样说明巷道顶板地质情况对预防顶板问题的重要性。所以, 解决地质条件不明, 是预防顶板事故發生的首要问题。

2 煤矿地质预报预防冒顶可行性探讨

隐藏的地质构造是影响煤矿生产安全的重要因素之一, 地质预报工作做得好坏直接影响着煤矿的生产安全。掘进前对前方地质情况的准确了解对于巷道顶板支护设计有着十分重要的作用。通过综合预报手段, 及时发现地质异常情况, 预报迎头前方不良地质体的位置、产状及其围岩结构的完整性与含水的可能性, 为正确选择开挖断面、支护设计参数和优化施工方案提供依据, 以预防为主, 为存在冒顶倾向的煤巷关键段进行超前支护设计, 可从源头上杜绝顶板事故的发生。

地质预报是根据现有地质资料对采掘工作面前方的地质变化进行预测, 为矿井生产设计和生产安全提供地质依据, 从而保证生产的正常进行。经过几十年的发展, 隧道工程超前地质预报方法日趋成熟, 已经由单一的地质分析的预报阶段发展到地质分析结合地球物理探测的综合预报阶段, 为避免隧道建设风险发挥了巨大作用^[18]。但是由于矿井瓦斯、设备防爆、工程临时性、巷道工期短等煤矿特

有问题,超前地质预报技术在矿山工程领域虽然有了一定的推广和发展,却远没有隧道工程应用的广泛和成熟,没有发挥出其应有的作用。

近年来,不少学者和现场工作人员对隧道超前地质预报方法如地质雷达、瞬变电磁、激发极化等预报方法在煤矿掘进中的推广应用情况进行了探讨和初步实践^[18-20],证明现有部分隧道超前地质预报手段可以用在煤矿地质预报工作中。因此充分利用各种超前地质预报手段,做好地质预报工作,探明顶板地质情况,预防为主,做好应急预案与顶板支护补强,能为避免煤巷顶板事故提供有效途径。

3 典型煤巷冒顶事故分析

3.1 典型煤巷冒顶事故概况

巨野矿区某矿多次发生顶板事故,大多是由于地质条件突变造成的。其中一次典型的冒顶事故发生在锚杆-锚索-钢带联合支护的某回风平巷中,当掘进支护至 835# 钢带左右时,冒顶发生。冒顶总长度约为 13 m。冒顶最高位置离原底板将近 11 m,最宽处约为 6 m,面向迎头方向左侧冒顶严重,呈尖顶状,如图 1 所示。

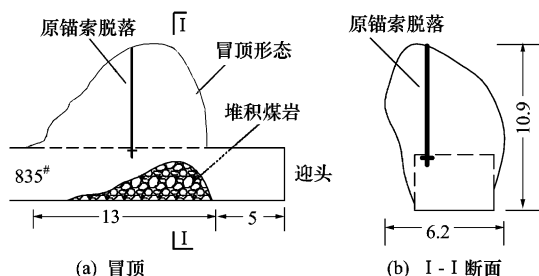


图 1 冒顶形态规模示意图 (m)

Fig.1 The form and scale of the roof collapse accident

冒顶后经地质勘察发现,冒顶处巷道处于两组断层相交处,地质条件极为复杂,煤岩交错分布,岩体破碎,围岩强度低,顶板稳定性极差。

3.2 补救方案及经济性分析

事故发生后矿方及时进行了架棚-木垛-注浆联合治理。将冒顶位置揭露围岩面上进行锚杆-金属网支护,架设间距 0.8 m 工字钢棚支护,同时在工字钢棚上填充木垛,围岩表面喷化学浆液,内部围岩和木垛通过注化学浆液充填加固,起到及时封闭围岩、隔绝外部空气、及早提供支护抗力、防止顶帮围岩进一步变形破坏的作用。

该处冒顶事故补救方案的实施占用工期 23 d,工程造价达 113.73 万元/100 m。治理后效果如图 2。

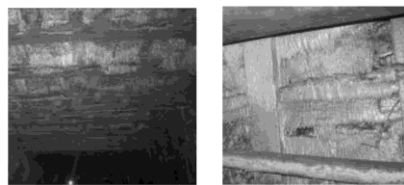


图 2 冒顶治理后效果

Fig.2 The treatment effect of the roof collapse

3.3 原因分析

综合分析该类冒顶事故,其原因为顶板地质条件突变,迎头遇断层,原支护方案对突变后顶板不能起到足够的控制作用。另外,因为没有提前判断出该处隐藏的地质构造,没有合理的预警机制,在断层出现后不能对其进行及时有效地支护,最终导致冒顶发生。该顶板事故是典型的顶板地质条件不明造成的事故。

4 防治方法主要内容

基于上述对冒顶事故原因分析、煤矿地质预报可行性探讨、平巷冒顶实例分析以及多次现场预报实践,提出基于超前地质预报的煤巷顶板事故支护预案防治方法。具体指:在巷道掘进施工时,利用现有的预报手段对迎头前方地质情况进行超前预报,在地质条件突变的地段进行预警并使用适合的支护预案,以避免冒顶事故的发生、人员的伤亡和高造价补救方案的实施。

上述基于地质、物探与钻探相结合的煤巷顶板事故综合预报及防治体系,可概括为“地质先行、物探紧跟、钻探核实、预案配套、监控反馈”二十字方针,主要包括以下内容:

① 以原始地质资料为基础:将原始地质资料作为已有勘探成果,仔细研究,宏观预测,为地质预报提供指导。同时,找出原始资料中不准确和不细致信息,作为地质预报工作的重点区域。

② 以迎头地质编录为补充:在巷道掘进过程中,对重点地段巷道围岩岩性、构造、层理、节理、涌水等情况进行描述和记录,尤其是对断层构造进行详细编录,对断层的类别、规模、位置、产状、破碎带的宽度、富水程度等进行记录和描述。补充原始地质资料中的空白或不准确信息。利用三维推演方法,在已知已掘进巷道揭露断层的走向、倾向、倾角等准确信息的情况下对相邻未掘进巷道的断层信息进行推演。为未开挖巷道地质预测提供准确可靠的地质信息。

③ 以物探手段识别定位:以物探手段对巷道

中的岩层界线、断层、富水带等不良地质体进行超前探测。利用地质雷达等手段快速识别迎头前方 30 m 范围内的断层和破碎带等不良地质地段，并建立对地质突变地段的识别与解释准则，优化反褶积技术^[21]，提高预报的精度与准确度；利用全空间瞬变电磁法或复合式激发极化法的超前探测技术与装备，快速识别、定位 80 m 以内含水构造及其水量预测。

④ 以钻探手段细化核实：对利用地质资料分析和物探手段得出的重点不良地质区域布置超前探孔，并利用钻孔窥视仪进行观测，得出最为直观可靠的信息。

⑤ 支护预案设计实施：对超前预报得到的相关地质信息进行分析，结合存在冒顶危险巷道的实际情况，设计出相应安全合理的支护预案，并适时进行实施，从根本上防止冒顶事故的发生。

⑥ 监控量测动态反馈：对实施支护预案的区域进行重点监控，及时反馈监测信息，对支护仍不合理断面进行支护补强，动态反馈设计。

5 防治方法工程实践

5.1 超前地质预报

前文提及的冒顶事故发生矿煤层埋深大，地应力高，地质构造复杂。为尽量避免冒顶事故发生，采用综合预报防治体系对该矿 5 条平巷进行指导和组织施工，顺利通过 7 条断层破碎带和 5 处顶板异常区。以其中一例进行具体介绍。

首先，综合预报工作人员认真分析原始地质资料，标出重点盯防区域，并通过相邻工作面地质编录情况对原始地质资料进行修正和补充。

根据该平巷右侧已掘进巷道穿越的 F3 断层走向、倾向、倾角等参数进行三维推演，得出在该运输进口 331 m 处可能有一正断层揭露，如图 3 所示。考虑到推断结果存在的误差并结合原始地勘资料，将该运输平巷进口 300~350 m 段作为可能穿越不良地质异常体（断层）的关键区段。

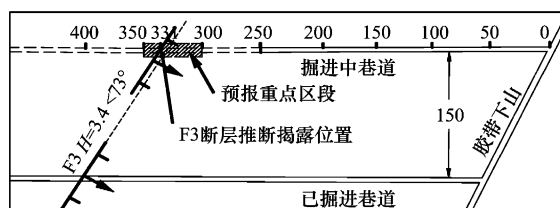


图 3 三维推演结果示意图

Fig.3 Schematic diagram of three-dimensional inference results

在巷道将掘进至 250 m 时开始进行了具有针对性的地质预报工作。由地质资料勘察预测可知，该地区富水带不多，断层破碎带是导致顶板事故发生的主要因素，所以平巷的监测以地质雷达和超前探孔预报为主。250~313 m 区段预报及掘进均未遇到不良地质构造。但当巷道掘进至 313 m 时，顶板围岩破碎程度加剧，顶板压力变大，掘进留顶困难，网兜现象明显。根据该矿以往工程经验，在断层前后 15 m 范围内此现象经常发生，由此怀疑迎头已进入断层影响区。遂在该迎头进行了细致的地质雷达超前探测，结果显示距探测迎头前方 9.5 m 左右存在地质异常区，如图 4 所示。该处雷达反射波呈现规律性偏移，后方反射强度明显高于前方，根据建立的识别与解释准则，结合地质推演结果，推断该处是由煤至岩的岩性交界面，存在断层构造。该断层应当与右侧掘进巷道揭露的 F3 断层属同一断层，由于前期三维推演存在的误差，比地质推演结果提前出现。

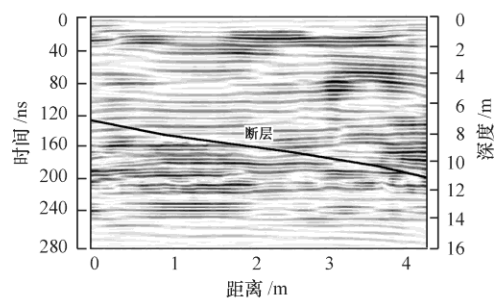


图 4 地质雷达探测结果图像

Fig.4 Detection results of GPR

在此基础上进行了钻孔窥视仪超前探孔工作，钻孔深度 14.2 m。断层煤岩交界面图像及位置如图 5 所示，在迎头前方 9.8 m 存在煤岩交界面，岩性由煤转岩，结合其它结果推断为由正断层下降盘穿越至上升盘。

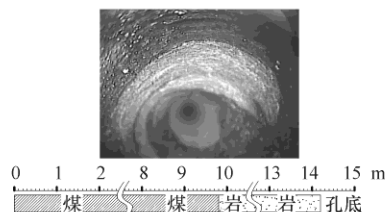


图 5 钻孔窥视仪探测结果

Fig.5 Detection results of borehole spy device

综合分析以上探测结果，迎头前方 9~10 m 处存在一正断层，掘进方向为由断层上盘至断层下盘，断层断距为 3~4 m。地质异常情况与前文所述

冒顶事故所处的地质情况相似，均为断层构造。

5.2 支护预案设计

通过地质预报及分析得到的相关信息，对原支护方案进行调整。迎头前方将遇正断层，巷道由断层下降盘穿越至上升盘，顶煤变厚，支护压力变大，顶板破碎程度加深。根据高预应力强力支护理论^[22]与现场围岩情况的分析，确定在该平巷进行以下支护变化：1) 改用大直径强力锚索，加大锚索支护密度，并提高锚索、锚杆预应力；2) 增设锚索梁结构，加大顶板护表面积，更有效的保持和传递预应力至顶板深部围岩。

根据围岩的实际参数，采用有限差分数值计算进行了多方案比较，设计出相对应的支护预案，原方案与支护预案如图 6a, b 所示。

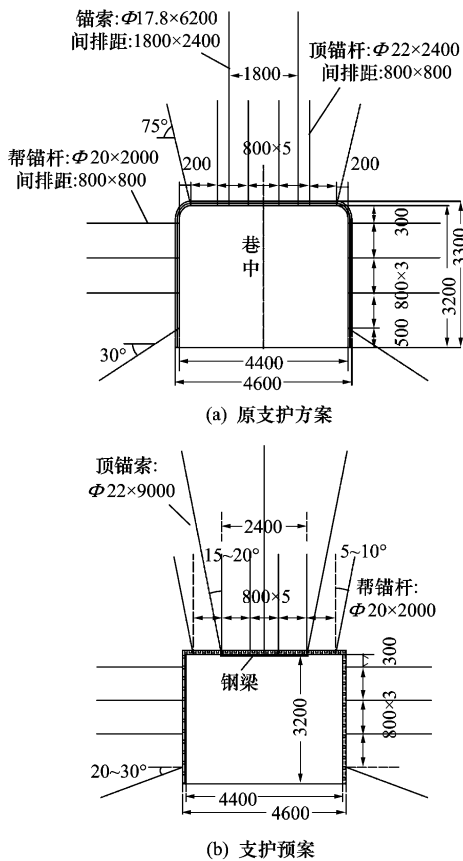


图 6 支护方案 (mm)
Fig.6 Support schemes

5.3 支护预案效果的数值验证

为了对支护预案效果进行对比验证，根据顺槽处的地质资料，利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件，建立模型，如图 7 所示。对该顺槽预案支护与原支护方案的支护效果进行对比分析。重点对断层区附近围岩变形进行研究。

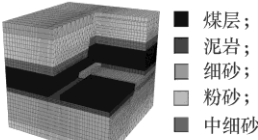


图 7 三维巷道模型
Fig.7 3D model of roadway

本文设计了 2 种计算方案进行对比分析：计算方案 1 为断层前后巷道支护形式全部采用原支护；方案 2 为前半段使用原支护方案，迎头距断层 5 m 处改为支护预案，如图 8 所示。

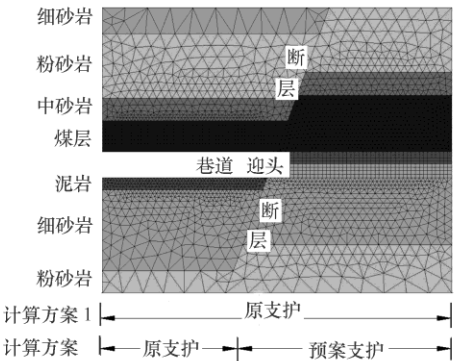


图 8 冒顶处地质剖面及计算方案设计
Fig.8 Geological section and settings of the simulation schemes

计算后得到巷道变形、塑性区面积等结果如图 9, 10 及表 1 所示。

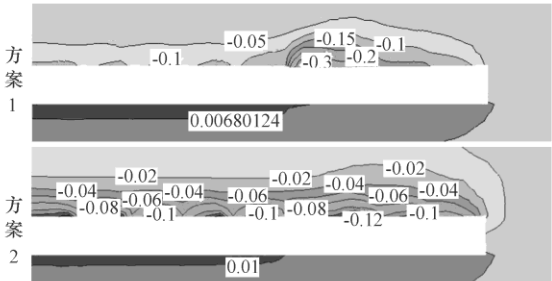


图 9 竖向位移对比 (m)
Fig.9 Vertical displacement contrast of the simulation schemes

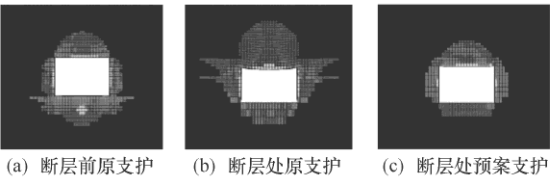


图 10 塑性区分布对比
Fig.10 Plastic zones of the simulation schemes

表 1 两计算方案计算结果对比
Table 1 Results comparison of the simulation schemes

	断层前 原支护	断层处 原支护	断层处 支护预案
顶板位移/mm	112.4	415.2	121.5
塑性区面积/m ²	29.52	41.12	19.88

对位移、塑性区等模拟结果进行对比,可得到如下结论:

① 原支护方案明显不适合于断层处巷道支护。使用原支护方案,在断层处顶板下沉量和塑性区面积分别是断层出现前的 3.7 倍和 1.4 倍。由塑性区分布可以看出,断层处原支护方案条件下顶部围岩塑性区明显高于非断层处,且在巷道肩角部分向围岩深部延伸深度远远大于非断层处,上述分析结果可以看出如果该处巷道在断层处依然采用原支护方案,巷道冒顶事故发生的可能性大大增加。

② 支护预案能够很好的控制顶板变形,避免冒顶事故的发生。在冒顶处地质条件下支护预案支护效果明显优于原支护方法,顶板下沉量、两帮移近量和塑性区面积分别是原支护方案的 29.2% 和 48.3%,基本上达到了断层前原支护方案支护效果。

5.4 支护预案的实施及现场效果验证

考虑到巷道由断层上盘进入到下盘,煤层上移,平巷斜向上掘进,在距探测处的断层位置 5 m 处开始使用支护预案。巷道掘进至 323 m 处揭露断层,与预报情况基本一致。施工期间顺利通过断层构造区。

图 11 为该平巷断层构造区支护 1 个月后的变形情况。通过监控量测对施工后巷道变形进行监测,监测结果显示支护预案支护下的巷道变形很快趋于稳定,得到了较好的支护效果。图 12 为 433[#] 钢带处围岩变形监测结果。

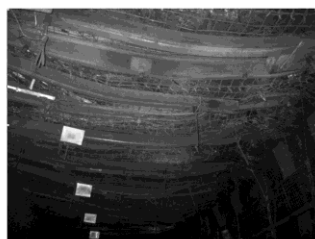


图 11 巷道锚索梁支护效果
Fig.11 Roadway supporting effects with anchor cable beams

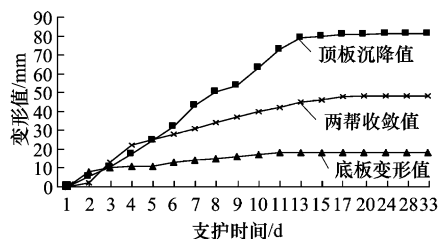


图 12 巷道变形监测结果
Fig.12 The roadway deformation monitoring results

5.5 支护预案经济性及社会效益分析

从经济行方面比较,根据该矿区支护材料成本,经过统计,该支护预案成本(16.45 万元/100 m)仅比原支护方案(15.51 万元/100 m)高出 6.0%;如对比前面提到的冒顶后注浆补救方案(113.73 万元/100 m),则支护预案仅为其造价的 14.5%,且该支护预案技术成熟、工艺简单、施工简便。

从社会效益方面比较,该方案以较低的支护成本较好的避免冒顶事故发生,避免人员伤亡事故和工期的延误,在保证安全的前提下保证施工进度,具有很高的借鉴意义和实用价值。

6 结 论

1) 基于超前地质预报的煤巷顶板事故支护预案防治方法根据“地质先行,物探紧跟,钻探核实,预案配套、监控反馈”的方针进行预报及支护,经过工程实践验证,证明其可以有效预防和控制煤巷顶板事故的发生,具有较高的可操作性和实用性。

2) 在该方法中提到的各预报环节及手段是互为条件、相互联系的有机体,在实际预报过程中注意它们之间反复推演和相互修正可大大提高预报效率和精度。

3) 以锚索梁为主要支护结构的支护预案可以提高支护强度,改善护表效果,有效控制断层区顶板变形,防止顶板冒落。

4) 该防治方法具有很好的经济性指标。工程实例显示利用该方法进行的预报支护试验段工程造价仅为冒顶补救方案的 14.5%,利用仅比原支护方案造价高 6%的支护预案有效避免冒顶事故的发生、补救方案的实施及工期的延误。

参考文献:

- [1] 谢和平. 深部高应力下的资源开采—现状、基础科学问题与展望[C]//香山第 175 次科学会议论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 179-191.
- [2] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 88-94.
- [3] 张文勋. 煤层顶板事故的防治与实践[J]. 河北煤炭, 2009(3): 25-26.
ZHANG Wen-xun. Roof accident prevention and practice[J]. Hebei Coal, 2009(3): 25-26.
- [4] 陈波, 梁汉东. 地震活动与矿井顶板事故影响关系统计分析[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 238-245.
CHEN Bo, LIANG Han-dong. Statistical analysis on the relationship between rock accidents and earthquakes[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 238-245.

- [5] 彭成. 2004-2008 年全国煤矿顶板事故分析[J]. 中国煤炭, 2010(1): 104-105.
PENG Cheng. An analysis of mine roof accidents nationwide 2004-2008[J]. China Coal, 2010(1): 104-105.
- [6] 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 Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [7] 缪协兴, 陈荣华, 浦海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1289-1295.
MIAO Xie-xing, CHEN Rong-hua, PU Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1289-1295.
- [8] 浦海, 缪协兴. 综放采场覆岩冒落与围岩支撑压力动态分布规律的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1122-1126.
PU Hai, MIAO Xie-xing. Numerical simulation of dynamic falling of overlying rocks and abutment pressure in surrounding rocks for fully-mechanized top-coal caving stope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1122-1126.
- [9] 刘红岗, 贺永年, 韩立军, 等. 松软泥岩巷道大冒顶综合治理技术的研究[J]. 金属矿山, 2006(8): 8-12.
LIU Hong-gang, HE Yong-nian, HAN Li-jun, et al. Soft mudstone comprehensive roadway high roof technology research [J]. Metal Mine, 2006(8): 8-12.
- [10] PATRICK W C. Classification of roof falls in coal mines[J]. Mining Engineering, 1979, 3: 279-283.
- [11] ANON. Mechanical principles and basic measures for prevention and control of roof fall accidents[J]. Coal Science and Technology, 1986, 4: 4-9.
- [12] DUZGUN H S B. Analysis of roof fall hazards and risk assessment for Zonguldak coal basin underground mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64: 104-115.
- [13] 张庆春. 煤矿顶板事故的预防主体及其行为分析[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(增刊): 120-121.
ZHANG Qing-chun. Analysis on subject of prevention and behavior of coal mine roof accident[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2010, 37(Supp): 120-121.
- [14] 贾明魁. 锚杆支护煤巷冒顶成因分类新方法[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 568-570.
JIA Ming-kui. A new way of genetic classification on roof falling of bolt supporting roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5): 568-570.
- [15] 贾明魁. 岩层组合劣化型冒顶机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1343-1347.
JIA Ming-kui. Roof inferior strata combination-type mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1343-1347.
- [16] STEARS J H, CONWAY J P, BATES R C. Study of roof-fall resupport accidents[J]. Bureau of Mines, 1976, 2: 99-104.
- [17] HABERFIELD C M, SEIDEL J P. Some recent advances in the modelling of soft rock joints in direct shear[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999, 17: 177-195.
- [18] 张庆松, 李术才, 孙克国, 等. 公路隧道超前地质预报应用现状与技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 766-770.
ZHANG Qing-song, LI Shu-cai, SUN Ke-guo, et al. Analysis and present state of advanced geological forecast technology of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(4): 766-770.
- [19] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 电阻率层析成像法监测系统 在矿井突水模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 297-306.
LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Application of electrical resistivity tomography monitoring system to mine water inrush model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 297-306.
- [20] 李贵炳, 黄坤福. 隧道超前地震预报技术在煤矿水害预报中的应用探讨[J]. 矿业安全与环保, 2009, 36(6): 88-90.
LI Gui-bing, HUANG Kun-fu. Discussion of the application of seismic prediction technology used in tunnel on the coal mine water hazards prediction[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2009, 36(6): 88-90.
- [21] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [22] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233-1238.
KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238.