

采矿与井巷工程

浅埋深薄基岩高强度开采工作面压架机理分析

王兆会, 杨胜利, 孔德中

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要:为解决浅埋深薄基岩高强度开采影响下引起的压架事故,采用数值模拟和理论分析的手段,分析了工作面推进过程中覆岩的破坏过程及压架事故发生机理。结果表明:在煤层开采过程中,不同岩性的岩层中应力分布差异很大,其破断冒落条件也不相同;覆岩中上行裂隙、下行裂隙同时发育贯通是压架事故发生的前提;覆岩载荷传递因子的变化、基本顶破断岩块架后切落、地表厚风积沙的存在以及水沙对基本顶破断岩块运动形式的影响,均增加了顶板沿煤壁大范围切落并导致压架事故发生的概率。通过对乌兰木伦煤矿31402工作面局部压架事故进行分析可知,采高增大而破断岩块长度减小,基本顶结构仅以单关键块形式出现,是基本顶结构容易发生切落的主要原因。

关键词:浅埋深煤层;厚松散层;薄基岩;压架事故

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2015)03-0001-05

Analysis on jammed mechanism of hydraulic powered supports in high intensity coal mining face in shallow depth seam with thin base rock

WANG Zhao-hui, YANG Sheng-li, KONG De-zhong

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the hydraulic powered support jammed difficult problem caused by a large area roof cutting and falling along the coal mining face under the high intensity mining influences, the numerical simulation and theoretical analysis were applied to analyze the overburden strata failure process and disaster occurred mechanism during the coal mining face pushing forward process. The results showed that during the seam mining and excavation process, the distribution difference of the stresses in different lithology strata would be high and the breaking and falling conditions also would be different. The upward cracks and downward cracks in the overburden strata were developed at the same time and the run-through were the prerequisite of the catastrophe occurred. The load of the overburden strata could transit the variation of the factors, the basic roof could break the rock block and then cut the rock block, the thick aeolian sand existed on the surface ground and watery sand affected to the broken rock block movement mode of the basic roof would totally increase the probability to the hydraulic powered support jammed disaster occurred by the large area roof cutting and falling down along the coal wall. The mining height increased and the length of the broken rock block would be reduced and the basic rock structure would appear in a single key block only. The paper explained the cause the cutting and falling phenomenon easily occurred by the basic roof structure. Finally the paper analyzed the partial powered supports jammed accident occurred in No. 31402 coal mining face of Wulanmulun Mine.

Key words: shallow depth seam; thick soft stratum; thin base rock; jammed hydraulic powered support

0 引言

神东矿区位于鄂尔多斯侏罗纪聚煤盆地,矿区

内地质构造简单,整体为一倾向正西的单斜构造,原始地应力分布单一,不受构造应力影响,目前开采区域主要集中在埋深150 m以内的1-2和2-2煤层,

收稿日期:2014-10-20;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2015.03.001

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB227903)

作者简介:王兆会(1987—),男,山东泰安人,博士研究生。Tel:18810538296, E-mail:supermanzh1024@126.com

引用格式:王兆会,杨胜利,孔德中.浅埋深薄基岩高强度开采工作面压架机理分析[J].煤炭科学技术,2015,43(3):1-5,9.

WANG Zhao-hui, YANG Sheng-li, KONG De-zhong. Analysis on jammed mechanism of hydraulic powered supports in high intensity coal mining face in shallow depth seam with thin base rock[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 1-5, 9.

浅埋深、薄基岩、上覆厚松散层是矿区煤层的主要赋存特征,为实现这些优质煤炭资源的安全、高效回收,大尺度、快速推进的高强度开采工作面在神东矿区迅速增加。但埋深浅、地质条件简单并不代表资源可以顺利回收,由于煤田对应地表覆盖有厚松散层,松散层下部孔隙和基岩强风化带上部裂隙中的潜水是维持该区域生态平衡的重要水源,矿区开发过程中,顶板沿煤壁大范围切落后,潜水在重力作用下携带散沙进入工作面,采场发生压架、突水溃沙等异常矿压显现,增加了浅埋采场围岩控制难度,造成环境破坏和采场安全问题并存,为有效的指导浅埋采场围岩控制,我国学者对薄基岩煤层覆岩移动规律做了大量的研究工作。

文献[1-7]对浅埋薄基岩采场异常矿压显现进行了大量实测,得到如下特点:覆岩不再出现离层,而是以整体切落形式破断,顶板断裂角度增大,有明显台阶下沉现象,工作面具有明显的周期来压现象,非来压期间支架载荷小,来压时突然增大,受动载作用明显,容易发生压架事故;文献[8-10]研究了浅埋薄基岩上覆厚松散层采场压架发生机理,认为含水松散层的存在改变了覆岩载荷的传递规律,使基岩关键层发生复合破断,破断岩块的重力成倍增加,失稳后导致工作面压架,并分析了工作面来压同松散层水位的联动效应;文献[11-16]研究了浅埋薄基岩工作面的支架适应性,认为采高、工作面长度和推进速度是影响支架工作阻力大小的主要因素,支架不合理工作状态、上覆遗留煤柱均可导致压架事故的发生。

通过大量的相似模拟试验验证现场实测得到的浅埋采场矿压显现规律,我国学者从覆岩运动特征角度对神东矿区浅埋薄基岩高强度采场发顶板切落压架矿压现象的原因进行了解释。但浅埋采场压架事故仍没有得到很好的控制,为找到正确的方法实现顶板的有效控制,对事故发生机理有待进一步研究。灾变的发生是覆岩破坏积累到一定程度,由微观破坏发育为宏观破坏的结果,但岩体的破坏取决于所受的应力状态,笔者通过分析煤层开挖过程中覆岩中应力分布的变化,反演覆岩的破坏形式及破坏后的运动特征,进而分析切顶压架灾害发生的内在原因。

1 覆岩破断演化规律

浅埋薄基岩高强度采场出现异常矿压现象,本

质上是由于煤层赋存条件和开采技术条件的改变,导致岩体破坏过程和裂隙演化过程有别于深埋厚基岩采场,而围岩控制方法仍沿用传统的理论分析做指导,采取的支护手段同围岩运动特征不能相互适应,最终发生采场大面积来压。为较好的控制浅埋薄基岩高强度采场的稳定性,支护强度必须能够预防顶板切落压架、突水溃沙等灾害的发生,而掌握薄基岩采场覆岩破坏演化过程是得到灾变发生机理的关键,以神东矿区某煤矿四盘区2-2煤层工作面为工程背景,采用FLAC^{3D}模拟软件建立覆岩破坏数值模型(图1),分析覆岩破坏的过程,模型高100 m、长200 m,四周及底部为固定位移约束,顶部为自由表面,模型中岩体采用摩尔-库仑模型,冒落岩石采用应变硬化模型,岩层间的软弱结构面和工作面支架分别采用接触面和梁结构单元代替。

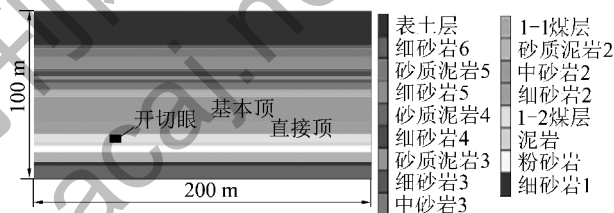


图1 数值模型

FLAC^{3D}模拟软件中规定压应力为负,拉应力为正,因此 σ_3 为最大主应力,而 σ_1 为最小主应力,摩尔-库仑模型中强度曲线用主应力表示的形式如式(1)所示,不同应力状态时强度曲线同应力圆的关系如图2所示,当岩石破坏危险因数 $f > 0$ 时,岩石进入塑性屈服状态, $f = 0$ 时,岩石处于极限平衡状态, $f < 0$ 时,岩石处于弹性状态,编写Fish程序可以得到 f 的云图分布,根据围岩中参数 f 的分布可以得到有断裂冒落危险岩层的范围以及断裂线的位置。

$$f = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 - C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi / 2 \quad (1)$$

式中: C 为岩石的黏聚力,MPa; φ 为岩石的内摩擦角,(°)。

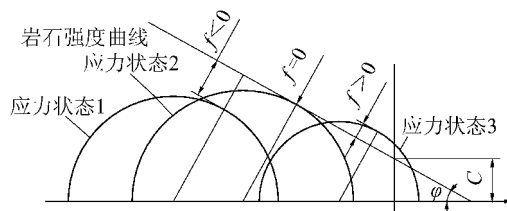


图2 Mohr-Coulomb 屈服条件

工作面推进50 m时覆岩中参数 f 的分布如图3

所示,同直接顶离层范围达到极限跨距时出现大范围冒落危险区不同,基本顶中仅出现 3 个断裂危险点,基本顶中 3 个受拉区的拉伸应变 ε 超过岩石的拉伸变形极限时,岩层上下表面的 3 个受拉区首先出现竖向拉伸裂缝,拉伸裂缝在拉剪应力作用下扩展,最终贯穿整个基本顶岩层,基本顶断裂,断裂线位于工作面的前方,因此基本顶断裂后不会迅速落向采空区,而是在工作面推进至断裂线下方之前有一段缓慢回转的时间,若断裂岩块满足平衡条件基本顶便可形成砌体梁结构。

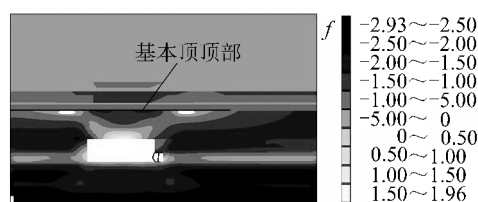


图 3 工作面推进 50 m 时覆岩中 f 值的分布

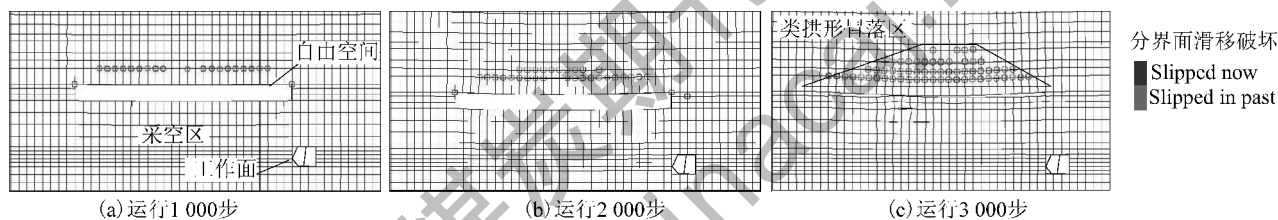


图 4 软弱岩层间结构面的破坏发展过程

动影响后,自由表面不均匀变形不受位移边界条件约束,容易产生单向受拉应力区,当拉应变达到岩层的拉伸变形极限时,基岩表面出现下行裂隙并向下发展,随工作面向前推进,下行裂隙同岩层冒落产生的上行裂隙相互贯通,覆岩中不再存在拱形承载区,上覆所有基岩的运动均对工作面支架产生影响,若工作面支护不合理,上下行裂隙贯通后会导致灾变发生。

2 工作面压架机理分析

2.1 载荷传递因子的变化

根据基本顶破断岩块之上载荷传递的时效性可知,基本顶断裂后,会产生卸荷效应,并非所有软弱岩层及表土层载荷都作用在基本顶岩块之上。由于覆岩断裂后产生的裂缝表面不光滑,可将此时的基岩视为含有表面凹凸不平、黏聚力很小的结构面的岩体,基岩沿裂缝产生一定的位错移动后,再次达到自身平衡,作用在基本顶破断岩块之上的载荷仅为下位覆岩的重力,基本顶载荷传递如图 5 所示,区域 I 和区域 II 在外摩擦力的作用下再次达到平衡状

态,对工作面支架作用影响很小,但由于神东矿区地表为很厚的松散层,且下部含有潜水,自身黏聚力很小,可视为理想的散体,基岩中产生裂缝后,在水动力的作用下沿裂缝向下流动,由于水沙的冲刷和微小沙粒的存在,基岩保持自身平衡的能力减弱,传递至基本顶破断岩块之上的载荷增加,经直接顶转移至支架上的压力增大。

由基本顶断裂后覆岩主应力分布可知,由于基本顶断裂,受采动影响的岩层范围迅速向上发展,直至基岩上表面,基岩表面同第四系松散层之间的耦合作用较弱,可将其视为受均布载荷的自由面,受采

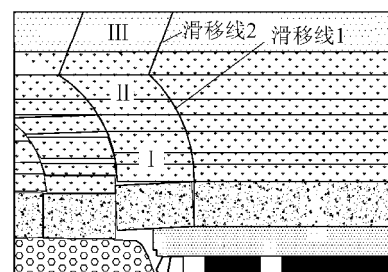


图 5 基本顶载荷传递示意

许多学者普遍采用太沙基岩土压力的计算原理确定作用在基本顶破断岩块之上的载荷时,作用于基本顶岩块之上的载荷 P_s 为

$$P_s = \gamma L^2 l_s / (2\lambda \tan \varphi) \quad (2)$$

其中: γ 为基岩的容重; L 为基本顶的断裂步

距; l_s 为基本顶的宽度; λ 为侧压因数, φ 为岩石的平均内摩擦角。载荷传递的岩性因子 K_r 为

$$K_r = 1/(2\lambda h \tan \varphi) \quad (3)$$

其中, h 为载荷层的厚度。由于贯通裂缝的产生,以及水沙对裂缝的冲刷作用,势必造成载荷传递岩性因子的增大,可理解为基岩内摩擦角的减小,因此式(3)中基岩的平均内摩擦角需考虑一定的折减因数 $k(0 \sim 1)$,即:

$$K_r = 1/[-2\lambda h \tan(k\varphi)] \quad (4)$$

2.2 厚松散层的影响

根据覆岩破断演化过程中基本顶岩层上表面载荷变化规律可知:工作面推进过程,随着受采动影响岩层范围的增加,基本顶之上软弱岩层仍可表现出一定的自承能力,所以工作面来压前随着基本顶跨距的增加,其上表面所承受的载荷并不是均匀分布的,而呈现中间小两端大的二次分布形态。这是因为软弱岩层仍具有一定的黏聚力和抗弯能力,在变形不大时可承担部分载荷,而神东矿区地表覆盖的第四系厚松散沙层中不存在起胶接作用的黏结质,可视为理想的散体,厚风积沙的存在导致基本顶断裂前承受的载荷较大,基本顶暴露长度一定的条件下,基本顶岩块长度同载荷的关系如图 6 所示,随着载荷增大,基本顶中最大拉应力增加,结合最大拉应力强度准则可知厚风积沙层的存在导致神东矿区浅埋工作面来压步距普遍减小。

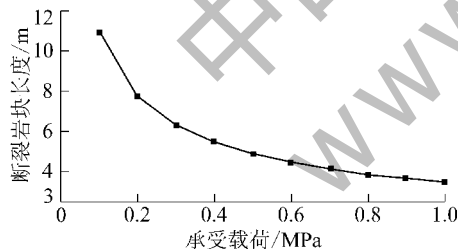


图 6 基本顶岩块长度同载荷的关系

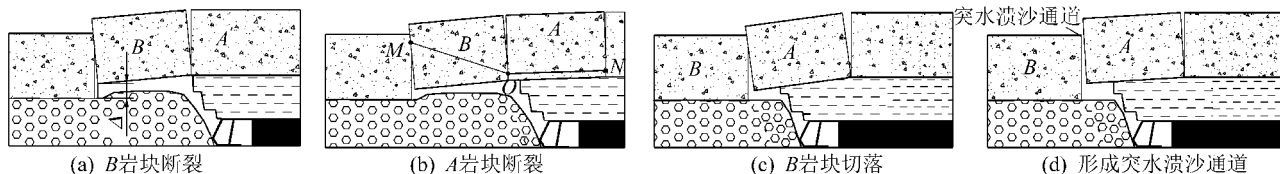


图 7 基本顶岩块运动形态

简化计算假设内力传递点均位于铰接面的中部,假设该结构可保持自身平衡,则可将关键块 A、B 简化为图中所示的铰接杆机构,杆 OM、ON 承受断裂岩块及载荷层重力。对杆结构进行受力分析可知当铰接机构处于该位态时,中间铰接点 O 处为拉力,而

基本顶断裂后,岩块保持平衡靠的是因相互挤压而产生的摩擦力,由砌体梁理论可知,破断岩块保持自身稳定性的条件为

$$LQ \tan(\varphi - \theta)/2(H - S) > Q \quad (5)$$

其中: L 为岩块长度; Q 为基本顶及载荷层施加的力; H 为基本顶厚度; S 为基本顶最大下沉量; φ 为基本顶内摩擦角; θ 为岩块的回转角。由式(5)可知基本顶破断岩块的自身稳定能力同其长度有关,即破断岩块长度 L 满足式(6)的条件要求,基本顶结构可保持自身稳定。

$$L > 2(H - S)/\tan(\varphi - \theta) \quad (6)$$

由于浅埋上覆厚松散层高强度开采工作面基本顶断裂步距减小,断裂岩块的高长比增大,保持自身平衡的能力减弱,因此更容易发生工作面顶板沿煤壁切落压架事故。

2.3 架后切落现象的影响

基本顶断裂后,断裂岩块之间、断裂岩块同未断裂岩层之间由原来的面接触转变为线接触传递内力,断裂线处的内力传递点转移至基本顶上下表面边缘,由于回转挤压,线接触形式再次转变为面接触,为保持结构的平衡,内力传递点在接触面高度范围内可自由移动,根据结构力学可知,基本顶结构中存在 3 个铰时为静定三铰拱,有可能形成自平衡结构,若结构中再次出现新的铰接点,平衡拱失去自身稳定性,机构发生破坏,因此可以判断对工作面造成威胁的基本顶岩块最多为 2 块(图 7)。

图 7a 中岩块 A 中没有出现断裂线,此时只有 B 为关键岩块,由于浅埋煤层基本顶破断距变小,采高较大,关键块 B 回转至平衡时同冒落岩石之间的自由空间 Δ 较大,工作面推进至图 7b 所示的位置时,岩块 A 中出现断裂线,此时结构中铰的数量达到 3,可视为静定三铰拱,岩块 B 仍没有回转至触研,为

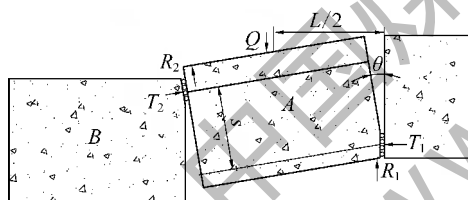
实际基本顶结构没有抗拉能力,因此当工作面同基本顶断裂岩块处于图 7b 所示的位置关系时,基本顶结构失稳,关键块 B 在架后切落,静定三铰拱结构退化为图 7c 所示的单关键块结构,若 B 岩块切落后产生的裂缝宽度较大,致使 A、B 岩块失去力学联

系,则会形成突水溃沙通道,如图7d所示,岩块A及其上载荷层的重力瞬间作用于支架之上,支架载荷增大,若直接顶同基本顶之间存在离层,岩块A有自由下落空间,对直接顶形成冲击,进而传递至工作面支架,若支架额定工作阻力不足,顶板便会沿煤壁大范围切落,压死支架甚至威胁工作人员生命安全。

2.4 水沙参与基本顶运动

工作面正常推进过程中,顶板架后切落,若工作面遭遇断层等构造,由于次生贯通裂缝的存在,第四系散沙在水流的携带下进入基本顶断裂及架后切落时产生的裂缝,便会影响并改变基本顶断裂岩块的运动形式,增加采场围岩控制难度。

由于神东矿区上覆含水松散层,上行裂隙同下行裂隙贯通后,水流携带风积沙进入工作面,潜水冲刷后,岩块接触面平滑度提高,岩石强度降低,而沙粒进入接触面并参与基本顶运动时,基本顶岩块A同切落岩块B及未断裂岩块间的接触形式发生改变,如图8所示,此时,接触面上的摩擦形式由滑动摩擦转变为滚动摩擦,摩擦因数降低,接触面上的摩擦因数减小后,岩块A极易发生滑落失稳造成顶板沿工作面大范围切落压架并产生突水溃沙通道,引发工作面顶板灾变。



T_1 、 T_2 分别为岩块 A 前后接触面所受推力; R_1 、 R_2 分别为岩块 A 前后接触面所受剪力; s 为岩块 A 前后接触面中点间垂直距离

图8 水沙参与基本顶运动示意

3 工程应用分析

乌兰木伦煤矿四盘区开采3-1煤层,31401和31402为相邻的综采工作面,其中31401工作面是四盘区的首采工作面,采高4.2 m,煤层底板标高+1 136~+1 147 m,地面标高为+1 280~+1 310 m,地表覆盖厚15~35 m松散层,松散含水层厚0~20.5 m。工作面布置ZY9000/24/50和ZY8600/24/25两种液压支架型号,开采31401工作面时,架后基本顶周期性切落并伴有少量溃沙,工作面出现少量淋水现象,说明岩层断裂产生的竖向裂缝在工作面上方闭合,架后出现张开,工作面支架工况良好,来压时工作面中部支架出现安全阀开启现象,但不

影响生产,开采31402工作面时遭遇F62正断层,该断层斜穿整个工作面,影响工作面推进范围330 m,过断层期间,受断层影响的工作面区域由于弱面的存在,出现导通工作面和松散含水层的张开型贯通裂缝,进入工作面的水沙有增多趋势,受到水沙的影响,基本顶结构发生滑落失稳,支架工作阻力迅速增加,并出现小范围支架压死现象,由于断层不平行于工作面,受其影响范围的局限性保障工作面不会发生大范围灾变,过断层期间采取一定辅助支护措施可保证工作面顺利通过断层。

4 结 论

1)基岩中厚硬岩层的破断条件为承受载荷及跨距的变化致使岩层中某点拉应力达到抗拉极限,而薄弱岩层的冒落取决于离层范围的发展,由于靠近地表岩层边界条件、力学性质的变化,覆岩中下行裂隙、上行裂隙同时发育,裂隙的贯通是灾变发生的必要条件。

2)覆岩载荷传递因子增大、厚松散层的存在导致浅埋薄基岩采场来压步距减小、断裂岩块高长比增加,两关键块铰接平衡结构的自稳能力降低,增大了浅埋采场基本顶结构的失稳概率。

3)采高增大而基本顶破断岩块长度减小,使浅埋采场顶板结构以单关键块结构形式出现,解释了单关键块结构产生机理和演化过程。

4)高强度采动影响导致基岩沿厚断裂,第四系水沙混合流动改变基本顶断裂岩块的接触形式和运动形态,增加基本顶滑落失稳而压架的危险性,较好解释兰木伦煤矿31402工作面过断层时突水压架事故的发生原因。

参考文献:

- [1] 高登云,高登彦.大柳塔煤矿薄基岩浅埋煤层工作面矿压规律研究[J].煤炭科学技术,2011,39(2):20-22.
- [2] 黄庆享.浅埋煤层高产工作面矿压分析[J].矿山压力与顶板管理,1999,16(4):53-56.
- [3] 黄庆享.浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):1174-1177.
- [4] 尹希文,常运飞.浅埋煤层综放工作面覆岩破坏规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(8):22-25.
- [5] 石建新,侯忠杰.浅埋工作面矿压显现规律[J].矿山压力与顶板管理,1992,9(2):33-37.
- [6] 张李节,侯忠杰.浅埋工作面超前支承压力分布规律[J].矿山压力与顶板管理,1994,11(3):23-25.

(下转第9页)

10.5 m,冻结深度 770 m,钻孔工程量为 44 009 m。红庆河煤矿风井井筒设计净直径为 7.6 m,井筒深度 708 m,冻结深度 669 m。在工程实施期间,根据现场原材料和工艺技术对浆液的凝结时间进行了测定(表 3),确保了置换每根冻结管从置换钻孔内黏土浆—提钻—下放冻结管—焊接—打压试漏整个过程施工工艺的顺利实施。

表 3 施工现场 JS-1 缓凝水泥浆试验结果

煤矿	水泥比 例/%	水泥质 量/g	水体 积/mL	外加剂 质量/g	初凝时 间/h
红庆河	20	400	280	0.8	50
	30	400	280	1.2	55
白家海子	20	400	280	0.8	52
	30	400	280	1.2	54

注:水灰比均为 0.7。

4 结 论

1)缓凝水泥浆液的流动性、稳定性、凝结时间、固结体强度等是影响置换工艺实施和防水堵水的效果的关键,根据冻结法施工工艺和现场实施的技术条件,确定了水泥浆液各项技术要求。

2)通过对比试验,JS-1 型高效复合缓凝剂可在保证浆液稳定性、流动性良好的前提下大幅度的延缓其凝结时间,各项指标与 HN-1 缓凝剂比较有明显提高,初凝时间可达 40 h 以上,非常有利于冻结管的沉降。

3)当水灰比从 1.0 : 0.8 减小到 1.0 : 1.4 时,其抗压强度可从 5 MPa 提高到 12 MPa,较大范围地提高了缓凝水泥浆液的性能参数,使用单位可根据具体要求合理的选择使用。

参考文献:

[1] 张 驰,杨维好,刘计寒,等.深厚冻结基岩中新型单层井壁的
施工技术与混凝土应变实测[J].煤炭学报,2012,37(2):192-
199.

[2] 孟志强,纪洪广,彭 飞.冻结法成井井壁在深厚表土段附加
应力研究[J].煤炭学报,2013,38(2):204-208.

[3] 樊九林,万援朝,王渭明.斜井表土冻结凿井法施工技术[J].
煤炭科学技术,2013,41(9):143-146.

[4] 王 涛,周国庆.考虑土性参数不确定性的单管冻结温度场分
析[J].煤炭学报,2014,39(6):1063-1069.

[5] 赵 强,武光辉.冻结法施工解冻水害的机理及治理技术[J].
中国矿业,2012,21(S0):533-535.

[6] 陈振国,王志晓,宋雪飞.我国西北矿区井筒地面预注浆施工
技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(2):34-37.

[7] 赵嘉亮,郭永东.用缓凝水泥浆置换冻结孔内黏土浆的研究与
应用[J].建井技术,2007(6):33-35.

[8] 刘娟红,纪洪广,贺震平,等.适于弱胶结软岩的新型冻结孔封
孔材料性能及微结构研究[J].煤炭学报,2013,38(4):595-
599.

[9] 刘 波,陈玉超,李东阳,等.局部地层扩孔填充导热材料强化
冻结试验[J].煤炭科学技术,2014,42(7):5-9.

[10] 颜世涛,王兴滨.混凝土外加剂中缓凝成分的作用机理[J].
建筑与工程,2008(16):23-26.

[11] 韩秀丽.缓凝剂与水泥的适应性研究[J].建筑材料及应用,
2009(3):35-37.

[12] 黄 伟,陶珍东,王小波,等.柠檬酸渣作水泥缓凝剂的研究
[J].建材技术与应用,2010(1):50-53.

[13] 刘娟红,纪洪广,贺震平,等.适于弱胶结软岩的新型冻结孔
封孔材料性能及微结构研究[J].煤炭学报,2013,38(4):
595-599.

[14] 张 驰,杨维好,杨志江,等.深厚含水基岩区立井外壁冻结
压力的实测与分析[J].煤炭学报,2012,37(1):33-38.

[15] 周晓敏,王梦恕,张绪忠.渗流作用下地层冻结壁形成的模型
试验研究[J].煤炭学报,2005,30(2):196-201.

[16] 姚直书,程 桦,荣传新.西部地区深基岩冻结井筒井壁结构
设计与优化[J].煤炭学报,2010,35(5):760-764.

(上接第 5 页)

[7] 屠世浩,白庆升,屠洪盛,等.浅埋煤层综采面护巷煤柱尺寸和
布置方案优化[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4):505-
510.

[8] 许家林,蔡 东,傅昆岚.邻近松散承压含水层开采工作面压
架机理与防治[J].煤炭学报,2007,32(12):1239-1243.

[9] 许家林,陈稼轩,蒋 坤,等.松散承压含水层的载荷传递作用
对关键层复合破断的影响[J].岩石力学与工程学报,2007,
26(4):699-704.

[10] 王晓振,许家林,朱卫兵,等.松散承压含水层水位变化与顶
板来压的联动效应及其应用研究[J].岩石力学与工程学
报,2011,30(9):1872-1881.

[11] 张 杰,侯忠杰.浅埋煤层开采中的溃沙灾害研究[J].湖南
科技大学学报:自然科学版,2005,20(3):15-18.

[12] 鞠金峰,许家林,朱卫兵,等.大柳塔煤矿 22103 综采面压架
机理及防治技术[J].煤炭科学技术,2012,40(24):4-7.

[13] 尹希文,朱拴成,安 泽,等.浅埋深综放工作面矿压规律及
支架工作阻力确定[J].煤炭科学技术,2013,41(5):50-53.

[14] 吕梦蛟.神东矿区长壁采场矿压显现规律与支架选型[J].煤
炭科学技术,2010,38(11):48-52.

[15] 崔廷锋,张东升,范钢伟,等.浅埋煤层大采高工作面矿压显
现规律及支架适应性[J].煤炭科学技术,2011,39(1):25-
28.

[16] 张书敬.浅埋煤层大采高工作面覆岩结构分析及支护设计
[J].煤炭科学技术,2010,38(10):20-26.

[17] 刘全明.浅埋综采工作面矿压显现的推进速度效应分析[J].
煤炭科学技术,2010,38(7):24-26.