

# 煤矿超高水材料充填工艺系统与实践

冯光明<sup>1\*</sup>, 李乃梁<sup>1</sup>, 丁玉<sup>2</sup>

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116)

**摘要:**根据超高水材料充填的一般工艺过程,将系统划分为浆体制备、浆体输送、浆体混合及充填 4 个子系统;结合应用领域,提出了大流量系统和小流量系统的概念;对于 4 个子系统,结合应用目的和流量大小分别给出了设计时需要重点考虑的因素;最后结合典型工程实践,证实了各类系统的可用性。

**关键词:**超高水材料;充填;工艺系统

**中图分类号:**TD823.7      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2019)01-0013-10

## Process System of Filling with Supper High-water Materials and Practice in Coal Mine

Feng Guangming<sup>1</sup>, Li Nailiang<sup>1</sup>, Ding Yu<sup>2</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Chemical Engineering Institute, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** According to the general filling process of super-high water material, the system is divided into four subsystems, i.e. slurry preparation, slurry transportation, slurry mixing, and filling. The concepts of large flow system and small flow system are put forward in combination with the application fields. For the four subsystems, the design requirements are given respectively according to the application purpose and flow size. Finally, combined with typical engineering practice, the availability of various systems is verified.

**Keywords:** super high-water materials; filling; process system

超高水材料基于煤矿充填开采实际需求由中国矿业大学于 2007 年研发成功并应用于工程实践,其概念在 2009 年首次明确提出,是指将其粉料与水混合制成浆体,经水化反应形成的固结体中水体积可达 95% 及以上,而材料本身所占体积小于 5% 的一种水硬性胶凝材料。目前超高水材料最新研究成果是固结体中水体积可达 99%,水固比为 33 : 1。

自该材料面世以来,由于超高水材料具有用水量大、渗流性好、速凝早强、具胶结性及固结后体积应变小的优异特性<sup>[1-3]</sup>,得到了煤炭企业和科研院所的高度重视,不仅在解放“三下”压煤的大规模充填开采<sup>[1,4,5]</sup>中得到了广泛应用,而且在煤矿工作面预充空巷开采<sup>[6-9]</sup>、防灭火<sup>[8,10-12]</sup>、沿空留巷<sup>[12-14]</sup>、地裂缝治理<sup>[12,15]</sup>、含水层注浆改造<sup>[12]</sup>等领域均呈现出了良好的应用前景。因此,为了更好地指导超高水材料的工程实践,下面就其主要应用领域的工艺系统及工程实践关键环节展开论述。

### 1 超高水材料充填工艺系统

超高水材料由 A, AA, B 和 BB 这 4 种材料组成。A 料主要以铝土矿、石膏等独立炼制成主料并配以复

合超缓凝分散剂 AA 使用,加水制成 A 浆体;B 料由石膏、石灰混磨成主料并配以少量复合速凝剂 BB 使用,加水制成 B 浆体;A、B 这 2 种浆体以 1 : 1 比例在充填地点混合后使用.为了实现充填过程的连续作业,需要特定的工艺系统予以保证.一般来说,超高水材料充填工艺系统由 4 个部分组成,分别是浆体制备子系统、浆体输送子系统、A 与 B 浆体混合子系统及充填子系统.按应用领域分,超高水材料充填工艺系统又分为应用于工作面大规模充填开采使用的大流量系统(通常能力  $\geq 300 \text{ m}^3/\text{h}$ )和应用于其他领域的小流量系统(通常能力  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  左右),两类系统的基本工作原理类似,主要区别体现在设备与管路型号以及充填子系统等方面.下面分别对各个子系统主要环节进行论述.

### 1.1 浆体制备子系统

浆体制备子系统是充填工艺系统的重要组成部分,是将超高水粉料与水混合制备成浆体的设施.由于 A 浆体和 B 浆体制备的工艺相同,故其设备系统也相同.该子系统的浆体制备能力和站点选址是 2 个重要的决策点.

#### 1) 浆体制备能力

制备能力取决于需求与应用领域.工作面大规模充填开采时,制备能力  $Q$  通常用式(1)确定,由于充填使用 A、B 这 2 种浆体,故每种浆体的制备能力为  $Q/2$ .式(1)中  $L$  为工作面宽度(面长加两巷宽度); $H$  为采高,  $m$ ;  $S$  为充填步距,  $m$ ,一般与工作面循环进尺成倍数关系,确定时主要考虑充填体的自稳和充填液压支架可提供的支护跨度; $\eta$  为充填率; $T$  为允许的充填时间,在以班为循环时间单位进行采充间隔安排时,考虑到充填前的准备工作与充填后的收尾工作, $T$  一般取 2~3 h.

$$Q = LHS\eta/T. \quad (1)$$

当浆体制备子系统用于工作面过空巷与防灭火等时,由于不是长期连续使用,往往采用小流量充填系统,其浆体制备能力往往取决于待充空间充填时间的可接受程度.

#### 2) 站点选址

浆体制备子系统的站点选址有 2 种选择,一种布置于井下,一种布置于地面.2 种方式主要对比分析内容及关注点见表 1.工程实践表明,工作面充填开采时,由于材料搬运及浆体输送与比例控制的费用属日常运营支出,故在开采煤层中等及更大埋深情况下,通常选用地面布置方式;对于短期使用的小流量充填系统由于基本没有基建工程,往往选择在使用地点附近布置.

表 1 浆体制备子系统站点选址对比分析内容及关注点

| 对比内容        | 站点位置                     |   |
|-------------|--------------------------|---|
|             | 井下                       | 地面  |
| 基建工程        | 硐室工程量                    | 地面基建工程量                                   |
| 管路铺设        | 管路长度短、壁厚小                | 管路长度长、通常壁厚大                               |
| 制浆用水供应      | 井底水仓水                    | 井下外排水                                     |
| 材料搬运        | 来料需矿井辅助运输系统转运            | 来料直接进入地面储料罐                               |
| 输送动力与比例控制方式 | 通常使用活塞泵提供输送动力和进行浆体输送比例控制 | 在自然压力能够克服沿程输送阻力的情况下,采用电动阀门配合流量计进行浆体输送比例控制 |

#### 3) 浆体制造子系统构成

浆体制备子系统的构成由其工艺过程决定,包括来料接收后的储料、储水、水称量、料称量、混合搅拌、浆体储备等.由于大流量充填系统浆体制备能力要求大,目前已经开发出集储料、储水、上水、称水、上料、称料、搅拌及浆体储备于一体的自动化系统与成套装备,实际建造时根据制备能力需求进行定制.小流量充填系统由于多为短期使用,目前浆体制备子系统自动化程度低,其构成包括储料区、4 个搅拌桶(A、B 浆体各 2 个,分别循环用作搅拌制浆和储浆)、供水管路等,其中料的搬运与计量、水的添加与计量均由人工完成与控制.

### 1.2 浆体输送子系统

#### 1) 子系统分类

浆体输送子系统实现从浆体制备点的储浆池(或桶)到使用点前混合处的连续传送.该子系统通常按

结构形式分为无动力输送和有动力输送2种结构形式,见图1.无动力输送借助于浆体制备点到使用点高程之差产生的自然压力进行浆体输送,为保证A,B这2种浆体1:1需求,通常使用电动阀门和流量计进行比例控制.有动力输送子系统则使用活塞泵(定量泵)提供输送动力.在大流量充填系统中,A,B浆体分别用一台同型号的活塞泵进行浆体输送和比例控制,而小流量充填系统中A,B浆体则共用一台双液泵来实现同样功能.

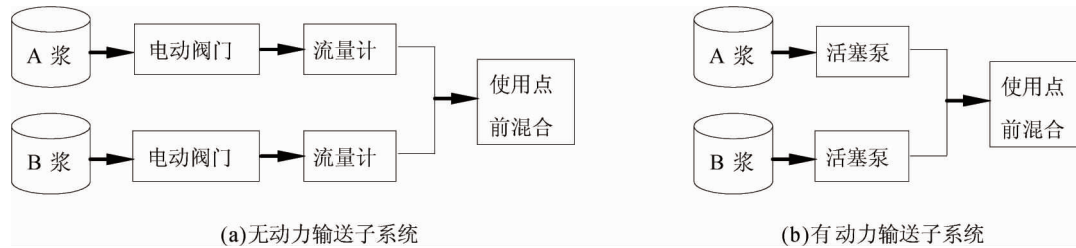


图1 浆体输送子系统结构形式

浆体输送子系统的确定主要考虑是否使用活塞泵,以及其与输送管路等的规格型号,两者的选型都均决于管路输送阻力.

## 2) 输送阻力计算及动力选择

为了得到管路输送阻力,需首先确定保证浆体呈现紊流流速所需的最大管径内径:

$$D = 18.81V_0^{0.5}u^{0.5}. \quad (2)$$

式中: $D$ 为管径内径,mm; $V_0$ 为管内介质体积流量, $m^3/h$ ; $u$ 为浆体在管路内的流速, $m/s$ ,要求大于 $2m/s$ .

然后,计算局部水头损失 $h_j$ 、沿程水头损失 $h_f$ 和管路水头总损失 $h_w$ .

$$h_j = \xi v^2 / (2g); \quad (3)$$

$$h_f = \lambda l v^2 / (2dg); \quad (4)$$

$$h_w = h_j + h_f. \quad (5)$$

式中: $\xi$ 为管路局部阻力系数; $v$ 为选定管径内径后反算得到的实际流速, $m/s$ ; $g$ 为重力加速度, $m/s^2$ ; $\lambda$ 为沿程阻力系数; $l$ 为管路长度,m.

输送浆体所需克服的管路输送阻力 $P$ 为

$$P = \rho g (h - h_w). \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为浆液密度, $kg/m^3$ ,基于材料配比确定; $h$ 为浆体制备点到使用点的高程之差,m.

如果 $P \geq 0$ ,则浆体输送采用无动力输送子系统,否则需选用输送压力不低于 $P$ 的活塞泵.

## 3) 输送管路选型

对于浆体输送管路,一般采用普通无缝钢管,按国标GB/T8163,GB-T17395及式(7)计算钢管壁厚 $\delta$ :

$$\delta = (P_m D S) / (2(R_m - P S)). \quad (7)$$

式中: $P_m$ 为钢管承受压力,MPa; $R_m$ 为钢管材质抗拉强度,MPa; $S$ 为钢管压力系数.

## 1.3 浆体混合子系统

由于超高水材料充填工艺采用双浆输送系统,A,B这2单浆液在充填到目的地之前,必须实现充分混合,一般使用混合三通、混合器及混合管来完成.

1) 混合三通为2个单浆管变一个混合管的结构形式,可由无缝钢管焊接而成,其结构如图2所示.

2) 混合器的主要工作原理就是让浆体在管线中流动冲击各种类型板元件,形成湍流,最终保证A,B这2种浆体得到充分混合,提高浆体在采空区的固结效果.此处所用混合器为静态混合器,通常根据经验公式 $L/D = 10 \sim 15$ ( $L$ 为混合器长度, $D$ 为管内径)来确定其长度,其结构见图3.

3) 混合管一般使用耐压胶管,其管径与单浆管确定方式相同,耐压强度参照单浆管耐压强度确定.

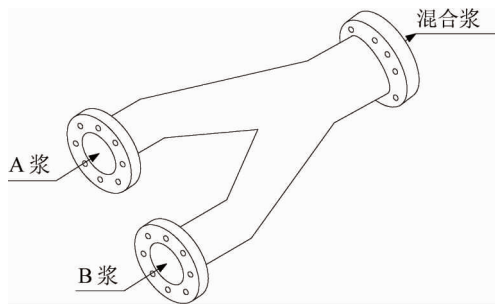


图2 混合三通

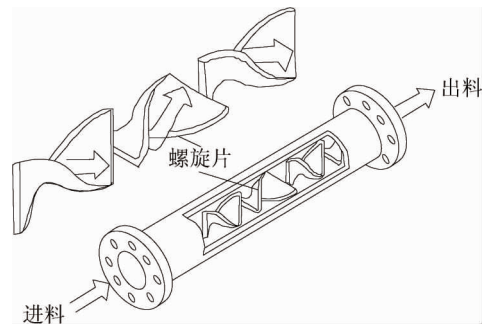


图3 混合器

#### 1.4 充填子系统

对于充填子系统,用途不同,则系统的构成不同,以下就其常见的3种应用领域进行阐述。

##### 1) 工作面大规模充填开采

工作面大规模充填开采的主要目的是解放“三下”压煤,同时控制地表移动变形,以便保护地表建(构)筑物。目前在煤矿主要使用的充填开采技术包括固体充填、膏体充填和超高水材料充填等。但不论采取哪种技术,根据开采煤层赋存条件及地表建(构)物的变形适应性,综合考虑由多个预开采工作面形成的空间布局结构及控制每个工作面的合理等价采高是取得成功的关键。超高水材料充填开采根据自身材料的特点,经过不断发展,逐渐形成了相对成熟的充填技术以适应控制工作面等价采高的需求,包括开放式、袋式、混合式和分段阻隔式4种充填技术<sup>[8,16-18]</sup>。考虑到应用的普遍性,此处以综采袋式充填开采为例,其充填子系统构成包括:充填支架、充填袋、袋间侧隔板、混合管路和分支充填管,见图4。

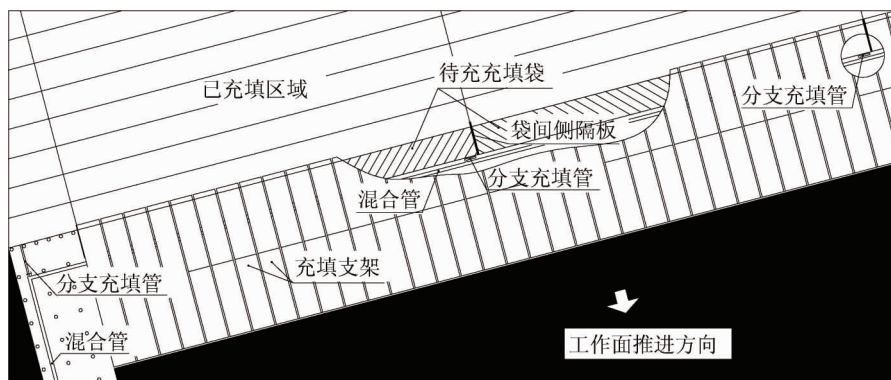


图4 工作面充填子系统

如图4所示,在综采袋式充填子系统中,充填袋是浆体收纳容器,充填支架的后挡板、袋间侧隔板与上次充填袋(或初次充填时切眼的后方煤墙)构成了超高水材料浆体的固结成型空间。

超高水材料充填开采的等价采高由4部分组成,分别是充填前顶底板移近量、充填支架后顶梁厚度、充填体纵向压缩量及充填体欠接支架后顶梁高度。其中顶底板移近量、充填支架后顶梁厚度均与支架设计有关,分别涉及充填支架的工作阻力和结构强度;充填体纵向压缩量与超高水材料浆体配比及工作面推进速度有关,实践中应综合考虑合理设计;充填体欠接支架后顶梁高度与现场生产组织管理有关,应加强充填作业的现场管控。

##### 2) 预充空巷开采

工作面过空巷是煤矿开采中的常见问题,采用重开切眼、支柱加强支护、顶帮锚杆索预加固、高水材料或浮煤类介质充填等传统方法不同程度地存在着费工费力、支护效果差、材料消耗大、作业安全性欠佳等不足<sup>[6,7]</sup>。超高水材料的出现为过空巷开采提供了有效途径,主要体现在:(1)使用较少物料与大量水形成的强流动性浆液渗流进入顶板、煤帮的裂隙,并将其与巷内冒落的浮煤(或矸石)胶结成一个整体;(2)固

结体充满巷道,限制了围岩的移动空间,同时对围岩或煤柱起到侧向支撑的作用,使得围岩或煤柱由两相受力状态转变为三相应力状态,增大了抗压强度;(3)工作面向前推进时,对煤、矸与超高水材料胶结形成的整体固结体进行切割,没有了支护薄弱点,防止了片帮、冒顶现象,同时提高了推进效率;(4)减少甚至可避免空巷内人员与设施的进入,提高了作业安全性。

按空巷与开采煤层的空间关系,一般分为同层空巷、上层空巷、下层空巷和穿层空巷。基于空巷的空间位态和内部条件(裂隙发育情况,是否存在高冒区,是否存在局部浆体流动液面通道堵塞等),在工程实践的基础上逐步形成了空巷充填方法,主要有开放式充填和预吊挂管路或钻孔充填等<sup>[8]</sup>。其中开放式充填适合可使浆体从高处向低向流动或水平漫流,且不存浆体流动通道堵塞的条件,见图 5;预吊挂管路或钻孔充填是在空巷中通过预吊挂管路或向难以进入区域打钻孔方式增加出浆口数量,从而构造出多个类似开放式充填的区域。

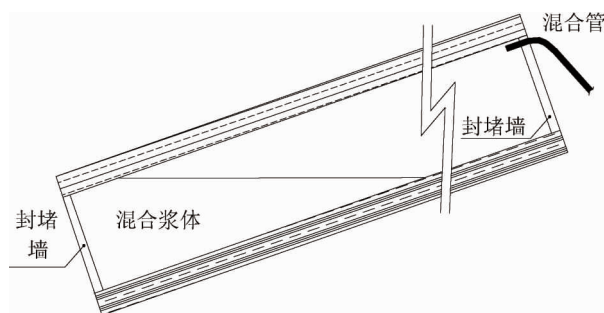


图 5 开放式充填子系统

如图 5 所示,预充空巷开采充填子系统的构成主要是巷端封堵墙、预设与吊挂的输浆管或充填钻孔,其主要思路是让空巷尽量充实饱满,不出现大面积的非接顶区域,给后续工作面开采带来困难。其实施核心技术是根据空巷与工作面的空间位态以及内部条件确定超高水材料固结体的强度需求,主要依据是工作面的支架实测工作阻力及顶板活动规律。

### 3) 煤矿防灭火

超高水材料用于防灭火的主要机理<sup>[10,11]</sup>是:超高水材料具有很好的流动性,在混合浆体进入火区时,起到了 3 个方面的防灭火效应:(1)浆体中大量存在的水促进了高温煤岩体的热交换效能,从而降低煤体的氧化活性和氧化速率;(2)随着水化反应在煤体外露面和煤块颗粒表面形成一层浆膜,隔绝与空气的接触;(3)渗流到煤岩体裂隙中的浆体及其固结后不收缩的特性堵塞了漏风通道,彻底隔绝了接触氧气的机会。

当有火情发生时,对于开放区域,可使用超高水材料对火区进行灌注;而对于封闭区域时,往往布置充填注浆用钻孔进行灭火。钻孔布置一般坚持 2 个设计原则:(1)钻孔的出浆口位置尽量位于高点,有助于浆体由高处向四周漫流;(2)注浆钻孔可根据灭火区域的大小采取多点布置,从而加快灭火速度。其充填子系统与预充空巷类似。

关于防火问题,山东义能煤矿有限公司在矿井建设之初由于确定采用超高水材料进行整个矿井的充填开采,故没有建立传统的防灭火灌浆系统,而是以充填系统兼任。对于超高水材料另一个应用领域就是采空区密闭。考虑到超高水材料浆体固结前的渗流性及固结后的体积不变性<sup>[2]</sup>,将超高水材料用于构筑采空区密闭防火墙,可阻隔密闭内外空气的流通。其充填子系统的构成包括:在密闭区端头巷道内砌筑的内外两道薄墙、预留的顶部注浆孔及混合管,见图 6。充填体构筑墙的厚度取决于密闭区围岩的裂隙发育程度,一般宽 1.5~2.5 m。

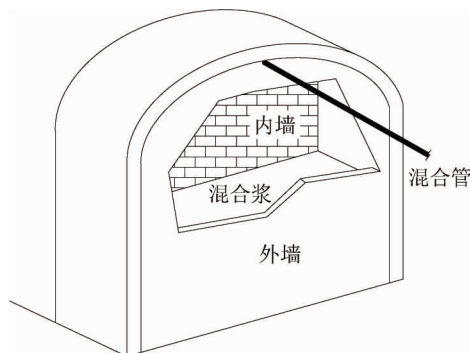


图 6 采空区密闭充填子系统结构

## 2 工程实践

基于前述超高水材料充填工艺系统研究成果多次付诸于工程实践,均取得了较为显著的效果,下面针对典型应用予以说明。



## 2.1 工作面充填开采

### 1) 义能煤矿首采区充填开采基本情况

义能煤矿位于山东省汶上县东南义桥乡和兖州市西北新驿乡之间,行政区划属汶上县,2010年10月开工建设,2014年10月试生产.因整个井田均为建下压煤,建设之初就选定采用超高水材料充填开采技术.

首采区位于井田东北部,面积约 $5.4\text{ km}^2$ ,所采3煤层倾角 $2^\circ\sim 16^\circ$ ,煤厚 $0.00\sim 3.95\text{ m}$ ,平均 $2.67\text{ m}$ ,规划布置了21个工作面.自2014年10月~2018年9月底已采完4个工作面,共采出煤炭214万t,其基本情况见表2和图7,其中CG1301和CG1303为部分充填工作面.

表2 义能煤矿已充填开采工作面基本信息

| 采工作面   | 采宽/m    | 充填宽度/m | 垮落宽度/m | 推进长度/m | 采深/m    | 平均采厚/m | 材料配比  | 结束时间    |
|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|---------|
| CG1301 | 118     | 76     | 42     | 966    | 768~797 | 3.4    | 95.0% | 2015.10 |
| CG1303 | 118~130 | 76     | 42~54  | 686    | 764~790 | 3.4    | 95.2% | 2017.04 |
| CG1302 | 118     | 全充     | 0      | 1 091  | 745~790 | 3.4    | 95.1% | 2018.09 |
| CG1306 | 104~122 | 全充     | 0      | 1 204  | 685~775 | 3.4    | 95.2% | 2018.08 |

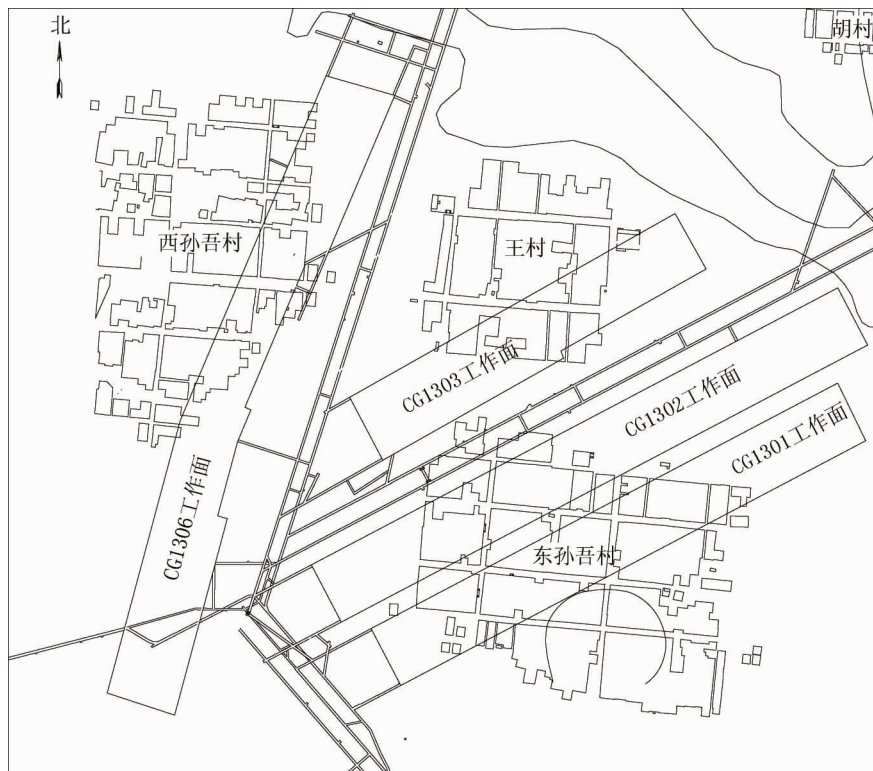


图7 义能煤矿首采区已充填开采工作面布置

### 2) 充填工艺系统构建

充填工艺系统按最大面长 $130\text{ m}$ (含两巷),充填步距 $1.8\text{ m}$ ,采高 $3.4\text{ m}$ ,充填率 $90\%$ 确定制浆系统能力为 $320\text{ m}^3/\text{h}$ ,单浆 $160\text{ m}^3/\text{h}$ ,每次充填需时 $2.25\text{ h}$ .根据表1中的主要因素及1.2节浆体输送系统设计内容,从服务于整个采区的角度,确定浆体制备系统布置于井上工厂,计算输送浆体所需克服的最大阻力 $P$ 为 $-3.13\text{ MPa}$ ,小于0,故无需使用输送泵,采用自流并借助流量计和电动阀门进行配比控制.根据最大静压 $5.25\text{ MPa}$ ,确定单浆管路为外径 $114\text{ mm}$ ,壁厚 $7\text{ mm}$ 的无缝钢管,混合管为内径 $150\text{ mm}$ 的耐压胶管.工作面充填支架采用ZC7200/19/40四柱支撑式超高水充填支架,见图8.

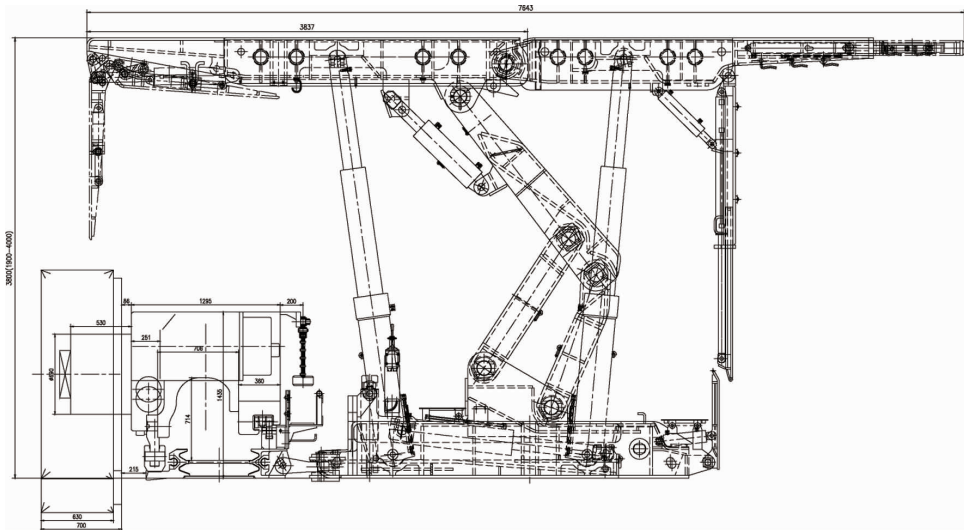


图 8 ZC7200/19/40 四柱支撑式超高水充填支架

### 3) 应用效果

自 2014 年试采开始,先后在地表布置了 8 条测线,基于 2018 年 10 月 8 号数据整理得到当前实测地表移动变形结果,通过 MSPS 开采沉陷预测预报系统进行拟合分析并预测了最终稳沉后地表移动变形结果,见表 3.从结果数据及图 7 可知,义能煤矿当前使用的超高水材料充填开采范围达到了充分采动,且地表变形处于 I 级范围之内,取得了成功.其中变形数据稍有偏大的原因主要有 2 个方面:(1)4 个工作面中有 2 个工作面采用了部分充填;(2)CG1303 和 CG1306 工作面为了降低充填成本,使用了较高的超高水材料配比,见表 2.

表 3 当前实测与最终稳沉预测地表移动变形结果

|           | 下沉/mm | 倾斜/(mm/m) | 水平变形/(mm/m) | 曲率/(mm/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|-------|-----------|-------------|-------------------------|
| 当前实测最大值   | 513   | 1.35      | 1.42        | 0.009                   |
| 最终稳沉预测最大值 | 590   | 1.40      | 1.50        | 0.010                   |

## 2.2 预充空巷开采

### 1) 王庄煤矿 5216 综放面基本情况

山西潞安王庄煤矿 5216 工作面采用倾向长壁、后退式综合机械化低位放顶煤一次采全高全部垮落采煤法,煤层厚度平均为 6.8 m,采煤高度 3.0±0.1 m,放煤高度平均 3.80 m,采放比为 1/1.26,循环进尺 0.8 m.在工作面正常推进前方有一矩形探巷斜穿其中,宽高分别为 3.2,3.5 m,总长 456.8 m.探巷与工作面的具体位置关系如图 9 所示.

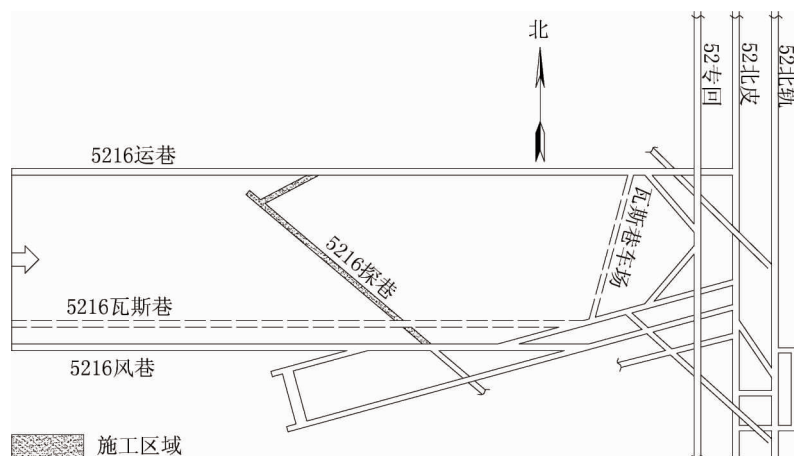


图 9 工作面空巷位置关系

### 2) 充填工艺系统构建

由于为短期使用,实验时间较充分,基于减少投资的目的,直接使用了矿井现有的 2ZBQS45/4 型气动双液泵,充填管路为与泵配套的胶管和硬质塑料预吊挂管.浆体制备、输送与混合工艺系统如图 10 所示.

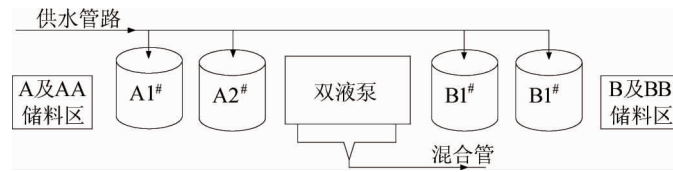


图 10 超高水材料预充空巷工艺系统

为了对比分析锚杆索加固与超高水材料充填 2 种方案,实施中分别在运巷侧 3 个高冒区(A,B,C)段和风巷侧巷道口段采用了超高水材料充填,共 243.8 m;中间仍沿用矿井传统锚杆索进行加固,每米巷道平均消耗 6 根顶锚杆、10 根帮锚杆和 3 根锚索,加固长度为 213 m.考虑到高冒区采可能存在堵塞充填通路现象,充填分 2 个阶段实施,第一阶段先分别从 A,C 处采用预吊挂管路方式,用塑料硬管斜伸到高冒区最顶端并予以固定;第二阶段在运巷与风巷口通过封堵墙进行开放式充填.

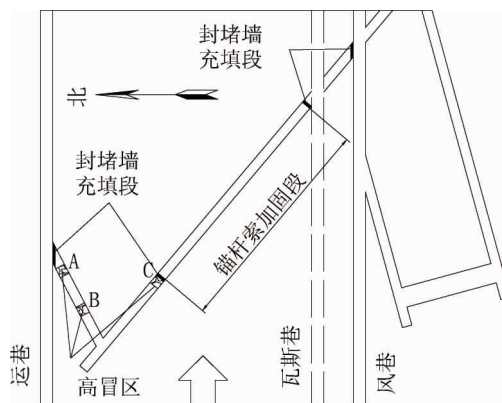


图 11 探巷加固实施方案

### 3) 应用效果

空巷充填与加固于工作面推进此处前 10 d 完成.过高冒空巷回采期间,煤墙与顶板完整,未发生一次煤墙片帮和顶板漏顶事故,见图 12.两对比方案经济比较情况为:超高水材料充填 604 元/m,锚杆索加固 3 815 元/m.实践证明,使用超高水材料提前预充空巷具有显著的技术与经济效果.

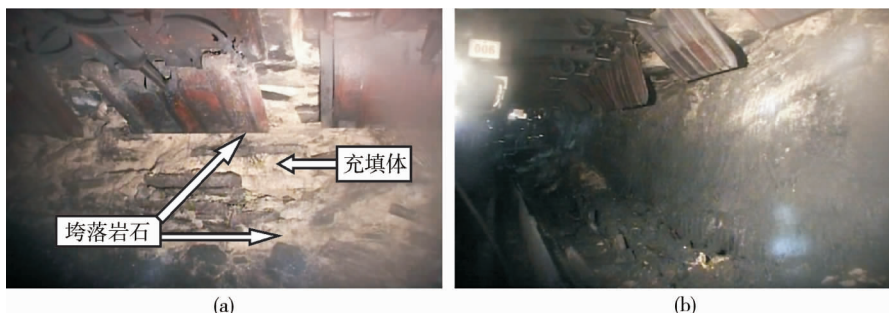


图 12 超高水材料充实高冒区及渗入煤壁裂隙效果

## 2.3 金地煤业回风巷灭火

### 1) 基本情况

金地煤矿 2011 年 9 月在 1311 回风顺槽与回风下山相交处起火,见图 13.发火巷道沿 13#煤层底板布置,巷道高 3 m,宽 4 m,上部留有 9 m 左右顶煤.在发现着火后,共筑了 6 堵密闭墙,并先后采用注水、注氮



气防灭火技术,初期火情得到抑制,而后均又复燃.

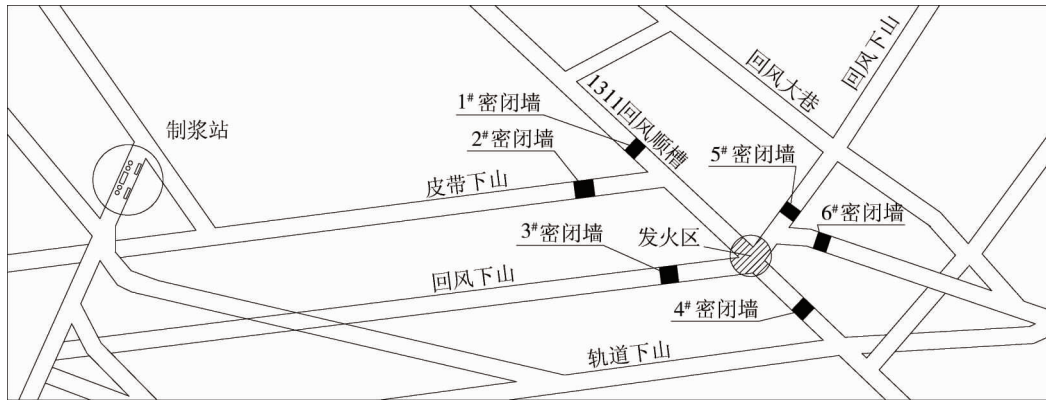


图13 发火区位置

### 2) 充填工艺系统构建

采用超高水材料充填灌注时,基于运输、供水及作业空间需求,制浆站布置于2号密闭墙附近的一段联络巷内,选用了4个 $1.5\text{ m}^3$ 搅拌桶进行循环制浆与储浆,以ZBYSB-100/18-15型矿用液压双液注浆泵作为输送动力,A,B单浆管为 $\Phi 40\text{ mm}$ 无缝钢管,混合管采用 $\Phi 50\text{ mm}$ 高压胶管.

充填分2步,首先从离火区最近点5#密闭墙向发火区顶部打高位注浆钻孔,抑制火情、封堵上部煤层裂隙;接着从最高点的1#密闭墙顶部开孔,进行灌注,对下位发火区域进行处理.

### 3) 应用效果

方案实施历时9 d,共充填 $1\ 300\text{ m}^3$ 超高水材料浆体.现场持续观测温度及 $\text{CO}$ 、 $\text{NH}_4$ 等标志性气体浓度.各密闭墙内部温度持续走低, $\text{CO}$ 、 $\text{NH}_4$ 浓度先升高,后持续走低,恢复正常,最终实现了灭火的目的.

## 3 结语

1) 超高水材料浆体具有用水量大、渗透性好、速凝早强、具胶结性及固结后体积应变小的特点,在采空区充填、过空巷及防灭火等领域已经取得了成功实践,展现出广泛的应用前景.

2) 大流量超高水材料充填工艺系统集成度及自动化水平高,为工作面的大规模充填提供了较好的产能保证.

3) 小流量超高水材料充填工艺系统适用于短期应用的场合,构建简单、灵活,开发便于移动、用人少的小型集成化装备是未来推广的一种现实需求.

### 参考文献:

- [1] 冯光明.超高水充填材料及其充填开采技术研究与应用[D].徐州:中国矿业大学,2009.
- [2] 冯光明,丁玉,朱红菊,等.矿用超高水充填材料及其结构的实验研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(6): 813-819.
- [3] 丁玉,冯光明,王成真.超高水充填材料基本性能试验研究[J].煤炭学报,2011,36(7): 1087-1092.
- [4] 尹保亭.建下多煤层复采超高水材料充填开采技术应用[J].煤炭与化工,2014,37(5): 93-97.
- [5] 贾凯军,冯光明.煤矿超高水材料充填开采技术及其展望[J].煤炭科学技术,2012,40(11): 6-9.
- [6] 杨建中.超高水材料预充空巷在综放工作面的应用[J].煤,2013,22(6): 21-23.
- [7] 罗武贤,任海兵,王琳.多位态空巷超高水材料充填技术与实践[J].矿业工程研究,2014,29(1): 58-62.
- [8] 冯光明,贾凯军,尚宝宝.超高水充填材料在采矿工程中的应用与展望[J].煤炭科学技术,2015,43(1): 5-9.
- [9] 秦大健.超高水材料空巷充填技术的研究与应用[J].煤炭与化工,2018,41(9): 17-20.

- [10] 李剑锋,任万兴,郭庆,等. 超高水材料在大倾角综放工作面防灭火中的应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(10): 143-145.
- [11] 崔坤伟. 超高水材料矿井防灭火研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.
- [12] 孙春东,刘树轮,李继升. 超高水材料在煤矿的系列应用技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 42-47.
- [13] 尹保亭,尚宝宝,李乃梁,等. 复采区超高水材料开放式充填开采留巷一体化技术[J]. 煤炭工程, 2014, 46(12): 53-55.
- [14] 陈亮,陈上元,杜斌斌. 煤矿超高水袋式充填及沿空留巷技术[J]. 煤矿安全, 2015, 46(8): 58-60.
- [15] 刘辉,雷少刚,邓喀中,等. 超高水材料地裂缝充填治理技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 72-77.
- [16] 冯光明,孙春东,王成真,等. 超高水材料采空区充填方法研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1963-1968.
- [17] 冯光明,王成真,李凤凯. 超高水材料袋式充填开采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 602-607.
- [18] 郭楠楠,冯光明,孙红卫,等. 超高水材料分段开放式充填开采研究[J]. 金属矿山, 2012, (3): 19-22.