

超高水材料采空区充填工艺系统与应用研究

冯光明,王成真

(中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221008)

摘要:为解放建筑物下压煤,结合超高水材料的基本性能和使用方法,提出进行超高水材料采空区充填开采并设计了相应的充填工艺系统。详细介绍了浆液配制系统的工作原理并分析了其制浆能力和生产周期,研究了超高水材料浆液的流变性及其可泵性。研究表明:半连续的超高水材料浆液配制系统能够提供连续的浆液,该系统生产能力大,周期短,材料配比准确;A、B单浆液流动性好,适合在管路中长途输送,混合浆液的输送应在 $2/3$ 凝结时间内完成,浆液输送时柱塞泵工作压力小,充填泵型号选择范围广。在密闭、潮湿、低温的采空区环境中,超高水材料是一种性能良好的“三下”采空区充填材料,充填工艺系统结构简单,机械化程度高,实际应用与操作方便,对煤矿地质条件适应性强。

关键词:超高水材料;充填工艺系统;浆液配制;管路输送

中图分类号:TD823.83

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)02-0001-08

Process System of Goaf Filling with Ultra-high-water Materials and Application

FENG Guangming, WANG Chengzhen

(School of Mining Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Based on the basic properties and usage of ultra-high-water materials, the goaf filling mining with ultra-high-water materials was proposed and the corresponding process system was designed so as to liberate the coal resources under buildings. The working principle of slurry preparation system was introduced and its pulping ability and production cycle were analyzed in detail. The rheology behavior and pumpability of ultra-high-water slurry were studied. The results show that the semi-continuous preparation system of ultra-high-water material slurry can provide the continuous slurry with characteristics of great production ability, short cycle and accurate material mixture ratio. The single slurry A or B has a good fluidity, suitable for long-distance transportation with pipelines, and the transportation of mixed slurry should be completed before $2/3$ of the solidifying time. The piston pump has a low working pressure when slurry is transported, so, the range of filling pump selection is wide. The ultra-high-water material is a type of good filling material in a wet, cold and closed goaf environment, and its process system of filling has the advantages of a simple structure, high degree of mechanization, convenient practical operation, strong adaptability to the geological conditions of coal mines, and so on.

Key words: ultra-high-water material; process system of filling; preparation of slurry; transportation with pipelines

随着矿井储量的逐渐减少,煤炭资源的枯竭与经济矛盾的日益突出,有效地进行“三下”压煤开采对充分利用地下资源,延长矿井寿命,促进煤炭工业的健康发展具有重要意义^[1]。采空区充填开采逐渐成为解放“三下”压煤的主要方法之一,按充填材料不同,采空区充填有水砂充填^[2]、矸石充填^[3-4]和膏体充填^[5-6]等。

收稿日期:2011-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50774077)。

作者简介:冯光明(1963—),男,山西垣曲人,教授,博士,主要从事充填注浆材料及充填开采技术方面的研究。

E-mail: fgm20004@163.com.

充填开采的核心是充填材料,不同的充填材料所需要的充填工艺系统和采空区充填开采方法不同。

超高水材料是中国矿业大学研究发明的一种新型材料,水体积比和水灰比分别可达 97% 和 11 : 1,是一种理想的采空区充填材料^[7-9]。该材料用水量大,使用时将其各组分按照一定比例加水配制成浆液,混合方可凝固。在进行超高水材料充填开采时,需要专门的设备将材料骨料配制成浆液,然后运用管路将浆液输送至采空区进行充填,浆液凝固后控制上覆岩层的活动。研究超高水材料采空区充填工艺系统的设计方法及其使用要求对超高水材料“三下”压煤充填开采具有重要指导意义。

1 超高水材料及其充填工艺系统简介

超高水材料是相对于高水材料而言的,超高水材料的水灰比可达 11 : 1,而普通高水材料水灰比为 2.5 : 1 左右,两者用水量相差甚大,文献^[7]~文献^[10]将水体积大于 95% 的材料界定为超高水材料,而小于 95% 的材料界定为普通高水材料。

1.1 超高水材料基本性能及其使用要求

超高水材料由 A、B 两种骨料和 AA、BB 两种辅料组成,通常呈面粉状。A 料主要以铝土矿、石膏等独立高温烧制而成,B 料由石膏、石灰混磨而成,AA 料为复合超缓凝分散剂(又称外加剂 AA),BB 料为复合速凝剂(又称外加剂 BB)。A、B 两种骨料以 1 : 1 比例使用,AA、BB 两种辅料根据实际要求配合使用,通常 A : B : AA : BB 为 10 : 10 : 4 : 1(质量比),具体使用方法如图 1 所示。水体积在 95%~97% 时,超高水材料固结体抗压强度可根据水体积和外加剂配方的不同而进行调节,且能实现初凝时间在 8~90 min 之间的按需调整,其 28 d 强度可达到 0.66~1.5 MPa。超高水材料 A、B 两主料单浆液可持续 30~40 h 不凝固,混合以后材料可快速水化并凝固,调整外加剂配方可改变材料性能,固结体初凝强度约为最终强度的 20%,7 h 抗压强度可达到最终强度的 60%~90%,后期强度增长趋势较慢^[7-10]。超高水材料固结体由钙矾石、铝胶和游离水构成,钙矾石是其中的主要物质。

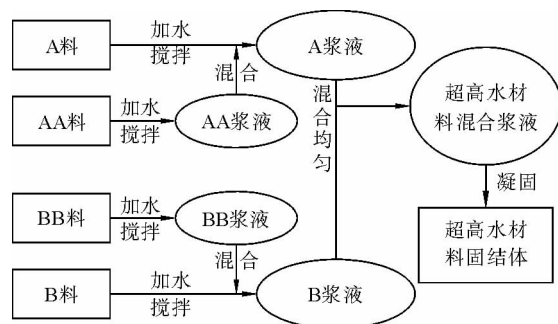


图 1 超高水材料使用方法图

Fig. 1 Usage of superhigh-water material

生产超高水材料的原料在我国非常丰富,且生产工艺简单。超高水材料具有早强快硬、两主料单浆(A 或 B 浆液)流动性好、初凝时间可调等特点,生成的固结体具有亲水性,在水环境中不收缩不扩散,稳定性良好且体积应变小,在三向受力状态下有良好的不可压缩性。超高水材料唯一的不足就是抗风化及抗高温(400 °C 以上)性能较差,即该材料不适于在干燥、开放及高温环境中使用。因此,在井下密闭、潮湿、低温的采空区中,超高水材料是一种非常好的充填材料。

1.2 采空区充填工艺系统设计

结合超高水材料的基本性能和使用方法,首先运用专门的生产系统将 A、B 两种主料配合外加剂制成 A、B 两种浆液,然后通过柱塞泵经管路分别输送至充填工作面,在即将到达采空区之前将两种浆液混合,最后运用相应的方法将混合浆液保持在采空区,凝固后的充填体控制上覆岩层活动,如图 2 所示。

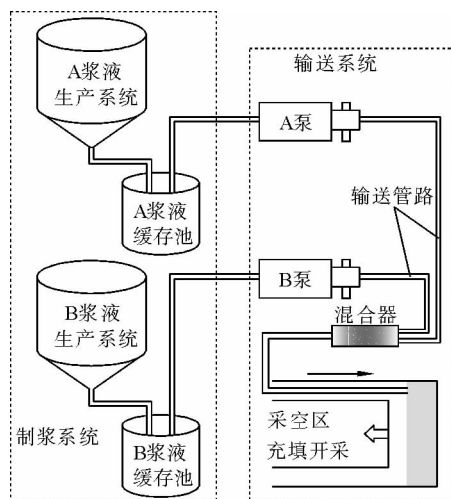


图 2 超高水材料充填开采工艺系统图

Fig. 2 The process system of filling mining with superhigh-water material

由图 2 可知,超高水材料充填开采工艺系统包括超高水材料制浆系统、输送系统和采空区充填三部分。制浆系统由 A、B 两条生产线组成,由超高水材料的

使用要求可知,两生产线布置方式完全相同,配制完成的单料浆分别放入相应的缓冲池。输送系统由柱塞泵、输送管路和混合器组成。待缓冲池内单料浆液累积到一定量后,同时开启 A、B 柱塞泵,经输送管路将 A、B 浆液输送到工作面附近的混合器,混合浆液最后经混合管到达采空区充填作业点。

超高水材料采空区充填方法主要有开放式、袋式、混合式和分段阻隔式等,文献[7]~文献[9]已有详细的叙述,在此不再赘述。

2 超高水材料浆液制浆系统

超高水材料采空区充填现场实践时,由于采空区范围巨大,对浆液的需求量大,需要机械自动化较高的专用的浆液配制系统,因而系统应完全由可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)控制,从而确保超高水材料内部各组分严格的配比并提供足量的浆液。

2.1 浆液配制系统设计原理

由超高水材料使用方法可知,配制 A、B 两单浆液过程完全相同。因此,在采空区充填系统中 A、B 两生产线的设计及布置方式也完全相同,充填开采之前,首先须生产制作两套完全相同的单浆液配制系统。

单浆液配制系统设计时,除要保证能生产出合格的浆液外,还需确保系统的生产能力,即在单位时间内能生产最大量的浆液。制浆系统生产能力最大时,理想的状态是系统的各个装置时刻在工作,且本装置的工作开始与上一环节装置的工作结束之间的等待时间应最短。粉料上料和搅拌桶搅拌浆液是制浆系统的主要工作,所耗费的时间也最多,任一搅拌桶完成放浆后应有已经称量好的粉料和水等待搅拌,因此,粉料上料可采用螺旋输送机,一台上料机为两个搅拌桶供料,又考虑到搅拌桶搅拌时间较长,可再增加一台螺旋上料机和两个搅拌桶,具体如图 3 所示。将各装置工作能力合理设计,可确保四个搅拌桶顺序放料,但不宜继续增加多个上料机和搅拌桶,以免系统过于复杂而导致 PLC 控制失灵。

由图 3 可知,超高水材料浆液配制系统属于半连续的制浆系统,但能提供连续的超高水材料浆液,该系统可置于井下,也可在地面;一套浆液配制系统包括两台螺旋上料机、四个单浆液搅拌桶和多个称量装置等,每台上料机为两个搅拌桶服务;又结合超高水材料的使用方法和各组分分配比可知,外加剂的用量较少,外加剂浆液的制备和称量所耗时间也较少,在骨料上料和单浆液搅拌过程中完全可以完成,即浆液配制系统的所耗时间主要为骨料上料和四个搅拌桶搅拌浆液;系统中的任何一次用料都经过称量装置,从而可保证超高水材料内部各组分配比的严格性。

2.2 制浆系统生产周期及生产能力

合理安排浆液配制系统各装置的工作能力和工作时间,可确保四个搅拌桶顺序放浆并循环生产。用料称量在 90 s 内完成,搅拌桶内浆液搅拌在 210 s 内完成,粉料卸料和放出浆液时间均为 30 s,任一搅拌桶开始放浆至该搅拌桶下一次开始放浆之间的时间为浆液配制系统的生产周期,在一个周期内,四个搅拌桶分别放浆一次,具体见表 1。

从表 1 可看出,浆液配制系统的生产周期为 240 s,每个周期内,四个搅拌桶各放出浆液一次,所耗时间主要用于粉料上料和浆液搅拌。若每个搅拌桶每次搅拌的浆液体积为 $V \text{ m}^3$,则单浆液配制系统制浆能力为 $60 V \text{ m}^3$,整套制浆系统(A、B 两套单料浆生产系统)的生产能力为 $120 V \text{ m}^3$ 。

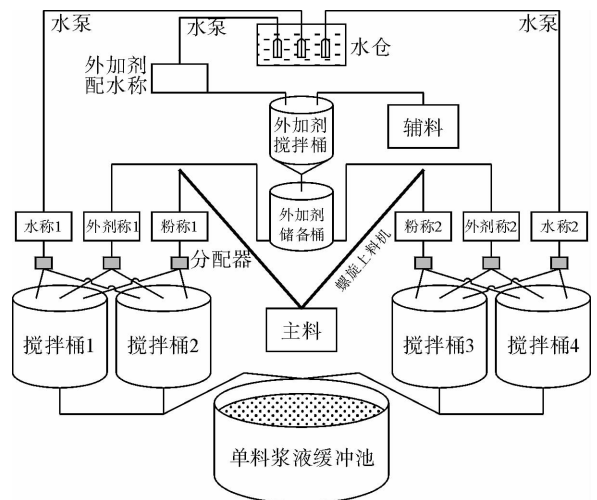


图 3 单浆液配制系统工作原理图

Fig. 3 The working principle of preparation system of single slurry

表 1 超高水材料浆液配制系统生产周期表

Tab. 1 The production cycle preparation system of superhigh-water material slurry

| 称量装置 | | 时间/s, (以下每 * 代表 30 s) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|
| | | 90 | 180 | 270 | 360 | 450 | 540 | 630 | 720 | 90 | 180 | 270 | 360 | 450 | 540 | 630 | 720 | | |
| 粉料称 1 | 称量(90 s) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 卸料(30 s) | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * |
| 粉料称 2 | 称量(90 s) | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 卸料(30 s) | | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | |
| 外剂称 1 | 称量(90 s) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 卸料(30 s) | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * |
| 外剂称 2 | 称量(90 s) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 卸料(30 s) | | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | |
| 配水称 1 | 称量(90 s) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 卸料(30 s) | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * |
| 配水称 2 | 称量(90 s) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 卸料(30 s) | | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * | |
| 搅拌桶 1 | 搅拌(210 s) | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 出料(30 s) | | | | | | * | | * | | * | | * | | * | | * | | * |
| 搅拌桶 2 | 搅拌(210 s) | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 出料(30 s) | | | | | | | | * | | * | | * | | * | | * | | * |
| 搅拌桶 3 | 搅拌(210 s) | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 出料(30 s) | | | | | | | | * | | * | | * | | * | | * | | * |
| 搅拌桶 4 | 搅拌(210 s) | | | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | 出料(30 s) | | | | | | | | | | * | | * | | * | | * | | * |

3 超高水材料浆液输送系统

在现场充填开采实践应用时,超高水材料从配制成浆液至混合,以及到使用点,都需通过管路来完成。期间,浆液经历物理流动及水化反应的过程。可见,浆液的流变性能影响着柱塞泵选型、管路形式及使用点应用方式等。

3.1 浆液的流变性能

从单浆液缓冲池开始到浆液使用点,浆液形态包括混合前的 A、B 单浆液和混合后的混合浆液。

3.1.1 A、B 单浆液流体流变性

通常,A、B 两种单浆液输送至使用点不超过 2 h,表 2 为水体积在 95%~97%的超高水材料 A、B 单浆在 2 h 内紊流状态下的表观粘度实验室测试结果。

表 2 不同水体积单浆液表观粘度随时间的变化关系表

Tab. 2 Apparent viscosity of single slurry with different water content versus time

| 水体积/% | | 时间/min | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 5 | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | 85 | 95 | 105 | 115 | 125 |
| 97(A) | | 1.18 | 1.16 | 1.16 | 1.17 | 1.17 | 1.19 | 1.18 | 1.17 | 1.15 | 1.16 | 1.16 | 1.18 | 1.19 |
| 96(A) | | 1.19 | 1.17 | 1.18 | 1.19 | 1.2 | 1.19 | 1.19 | 1.21 | 1.2 | 1.21 | 1.22 | 1.21 | 1.22 |
| 95(A) | 表观粘度/ | 1.22 | 1.23 | 1.24 | 1.22 | 1.22 | 1.23 | 1.22 | 1.23 | 1.24 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.24 |
| 97(B) | (mPa·s) | 1.15 | 1.13 | 1.14 | 1.13 | 1.16 | 1.18 | 1.17 | 1.19 | 1.21 | 1.23 | 1.24 | 1.22 | 1.23 |
| 96(B) | | 1.14 | 1.15 | 1.16 | 1.14 | 1.17 | 1.19 | 1.22 | 1.24 | 1.27 | 1.27 | 1.26 | 1.25 | 1.27 |
| 95(B) | | 1.18 | 1.22 | 1.24 | 1.22 | 1.27 | 1.29 | 1.28 | 1.32 | 1.3 | 1.32 | 1.33 | 1.35 | 1.34 |

从表 2 可看出,不同水体积 A、B 单浆的粘度随时间变化不大,但随着水体积的减少,粘度有所增大,B 浆随时间增加,粘度略有增大的趋势。从工程应用角度考虑,A、B 单浆粘度仍属低粘度,时间对单浆流体影响不大,可视为牛顿流体,因而为超高水材料浆液长距离输送提供了理论依据。

3.1.2 混合浆液流变性

超高水材料 A、B 单浆液混合后发生水化反应并凝固,且能实现初凝时间在 8~90 min 之间的按需调整,不同水体积的混合浆液在凝结时间为 60 min 时粘度随时间变化情况如图 4 所示。

由图 4 可知,当混合浆液接近凝结时间时,其粘度各曲线均出现拐点,之后粘度在极短时间内迅速攀升,混合浆液很快失去流动性,可见混合浆液已不再是牛顿流体,而为震凝性时变非牛顿流体。此外,在 2/3 凝结时间内超高水材料混合浆液的粘度很小且基本无变化,混合浆液的输送应该在 2/3 凝结时间内完成,以防止管路的堵塞。

3.2 浆液管路内输送流体力学分析

A、B 单浆液在混合前以及混合后 2/3 凝结时间内的浆液内,超高水材料与水没有发生水化反应,属于液固两相流。实际应用时,通常浆液浓度、管路管径和长度根据实际情况确定,重要的是确定管路内浆液的流速和柱塞泵的压力。

3.2.1 浆液管路输送的临界流速

液固两相流的流动阻力特性与单相流完全不同,在管路管径和浆液浓度一定的情况下,流速很小时,固体颗粒沉积于管底,水由沉积层表面漫过或从内部渗过;当流速很大时,固体颗粒虽完全处于悬浮状态,但用于克服沿程阻力的能量消耗也很大。因此,最理想的状态是,在一定流速条件下,浆液处于紊流状态,固体颗粒完全处于悬浮状态,为此消耗的能量和液相流动消耗的能量总和最小,将此流速称为浆液管路输送的临界流速。可见,处于临界流速时,浆液的沿程阻力处在流体的紊流光滑区^[11-12],沿程能量损失只与流速大小有关,与管壁的相对粗糙度无关。文献[7]列出了超高水材料不同水体积 A、B 单浆液的不淤临界流速,如表 3 所示。

从表 3 可看出,A、B 浆液比较稀薄,在管径一定的条件下,由于固体颗粒完全处于悬浮状态,不同水体积的不淤临界流速相差不大,随着颗粒浓度的增加略有增加;随着输送管路管径的增大,不淤临界流速相应增大。现场实践时,为防止特殊情况使固体颗粒不完全处于悬浮状态,管路内浆液实际流速应为表 3 中所示各临界流速再加上 0.3 m/s 为宜。

3.2.2 柱塞泵压力计算

柱塞泵为浆液在管路内输送提供动力,从而克服浆液在输送过程中受到的各种阻力。浆液在输送过程

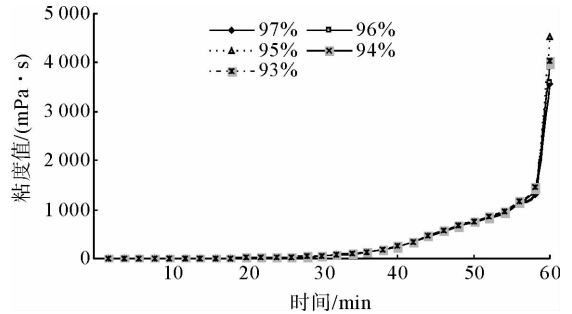


图 4 凝结时间为 60 min 时混合浆液粘度随时间变化情况图

Fig. 4 Apparent viscosity of mixed slurry versus time with setting time of 60 min

表 3 不同水体积 A、B 单浆液的不淤临界流速表

Tab. 3 Non-silting critical velocity of single slurry of superhigh-water material with different water

| 管路管径/mm | 颗粒粒径/mm | | 水体积比 | | | | |
|---------|---------|------------------|------|------|------|------|------|
| | | | 93% | 94% | 95% | 96% | 97% |
| 100 | 0.20 | | 1.75 | 1.73 | 1.71 | 1.67 | 1.7 |
| | 0.06 | | 1.66 | 1.65 | 1.63 | 1.6 | 1.58 |
| 150 | 0.20 | 不淤临界流速/ (m/s) | 1.9 | 1.88 | 1.86 | 1.83 | 1.8 |
| | 0.06 | | 1.8 | 1.79 | 1.77 | 1.74 | 1.71 |
| 200 | 0.20 | | 2.02 | 2.0 | 1.98 | 1.95 | 1.91 |
| | 0.06 | | 1.92 | 1.9 | 1.88 | 1.85 | 1.82 |

中处于紊流状态,期间的能量损失包括:①沿程损失,两相流体与管路内壁的摩擦而导致的能量损失;②局部损失,流体通过局部装置时由于流动方向的改变而造成的能量损失以及流体流动横截面积的变化引起的流体静水头的增大或减小;③沿程管路中的障碍物也会引起更多的能量损失,超高水材料浆液输送过程中不会混有足够大的、能引起更多能量损失的障碍物,因此这种类型的能量损失可不必考虑。因此柱塞泵的压力计算公式为

$$P = \rho g(h + h_w) \quad (1)$$

式中: P 为充填泵压力,MPa; ρ 为浆液密度,1 080 kg/m³; h 为充填泵与浆液使用点之间的高差,m; h_w 为浆液在管路输送过程中的水头损失,m。

水头损失计算公式为^[11-12]

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (2)$$

式中, h_f, h_j 分别为浆液在管路输送过程中的沿程损失和局部损失。

沿程损失和局部损失的计算公式分别为

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

$$h_j = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

其中: l 为管长,m; d 为管径,m; v 为断面浆液平均流速,m/s; g 为重力加速度,9.81 m/s²; λ 为沿程阻力系数; ξ 为局部阻力系数。

4 工程应用

超高水材料充填开采技术先后在河北、山东、山西等地的各大矿务集团实施,充填工艺系统大致相同,实施效果良好。

4.1 田庄煤矿充填开采概况

山东省临沂矿业集团田庄煤矿井田面积 30.16 km²,井田内分布着 31 个村庄及十几个独立的工矿企业。截至 2007 年底,该矿可正常回采块段为 832.1 万 t,村庄压煤 667.7 万 t。而正常块段分布较为分散,工作面布置极为困难,严重影响矿井的可持续发展。为了最大限度回收煤炭资源,延长矿井寿命,该矿首先在 16[#] 上煤层 11611 工作面实施超高水材料充填开采,煤层平均厚度 1.2 m,平均坡度 6°,工作面走向长 58~114 m,倾向长 398 m,采用分段阻隔式^[9]仰斜充填开采,充填泵站及管路布置情况如图 5 所示。

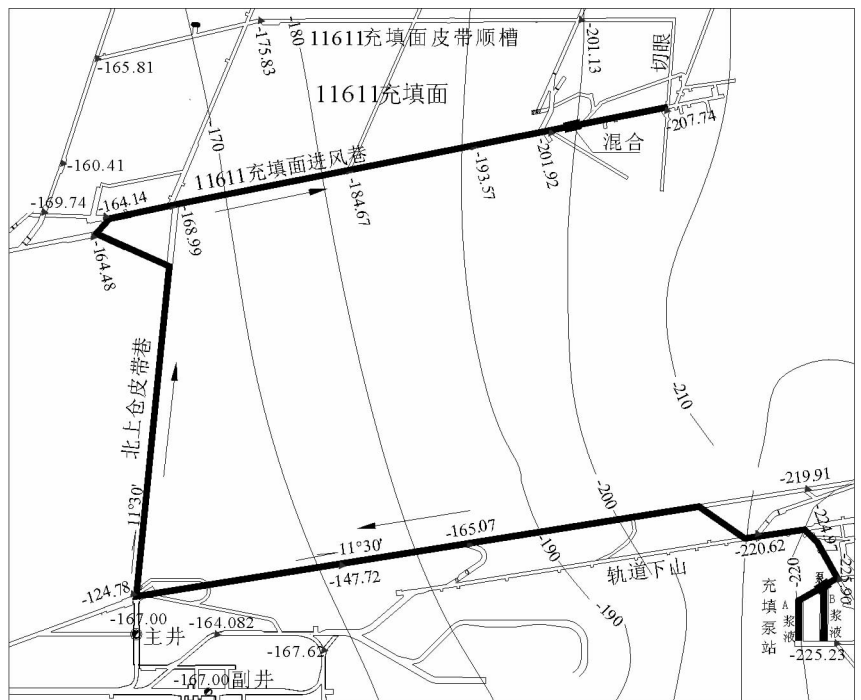


图 5 11611 充填面、充填泵站及输送管路布置图

Fig. 5 The layout drawing of 11611 filling face, filling pumping station and pipeline

4.2 充填系统参数

输送管路选用内径 101.6 mm 的无缝钢管,充填泵站和输送管路布置好后,充填泵站到超高水材料浆液使用点大约 1 500 m,充填泵站 A、B 两泵高程约 -225.9 m,浆液输送过程中经过的最高点为 -207.74 ~ -124.78 m。查表 3 可得,101.6 mm 管超高水材料浆液的临界流速为 1.8 m/s,实际应用时增加 0.3 m/s,则输送管路内浆液的实际流速为 2.1 m/s。取 $\lambda=0.02^{[11-12]}$,由式(3)计算得沿程阻力 $h_f=50.57$ m(浆液)。经实际观察,管路沿途经过约 20 个 90°管路弯曲点,此时的局部阻力系数取 0.8;6 个 60°管路弯曲点,局部阻力系数取 0.67;2 个 150°管路弯曲点,局部阻力系数取 1;混合管两端三通管汇合流和分支流各 1 个,局部阻力系数分别取 1.5 和 1,则整个管路的局部阻力系数 $\xi=24.52$,再根据式(4)得局部阻力 $h_j=5.51$ m(浆液)。因此,浆液输送过程中水头损失 $h_w=56.08$ m(浆液)。

根据式(1),柱塞泵压力最大值 $P_{\max}=1.67$ MPa;最小值 $P_{\min}=0.79$ MPa。

4.3 充填工艺系统实际应用情况

11 611 充填面现已充采完毕,生产原煤量 55 608 t,充填率为 94%,充填开采吨煤成本增加约 74.06 元。经过超高水材料采空区充填开采,能有效控制上覆岩层的活动,浆液制备系统和采空区充填实际情况如图 6 所示。



图 6 超高水材料浆液制备系统和采空区充填实照图

Fig. 6 Actual photos of slurry preparation system and filling situations in goaf

5 结论

- 1) 在井下潮湿、低温、封闭的采空环境下,超高水材料是一种理想的“三下”充填材料。
- 2) 超高水材料采空区充填工艺具有系统结构简单,初期投资低,机械化程度高,实际应用与操作方便,对煤矿地质条件适应性强等显著优点。
- 3) 超高水材料浆液配制系统属于半连续的制浆系统,但能提供连续的超高水材料浆液,该系统生产能力大,周期短,材料配比准确,可置于井下,也可在地面。
- 4) A、B 单浆液粘度小,可视为牛顿流体,适合在管路中长距离输送;混合浆液为震凝性时变非牛顿流体,混合浆液的输送应该在 2/3 凝结时间内完成;浆液输送时,柱塞泵工作压力小,充填泵选择范围广。

参考文献:

[1] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 1-10.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. On scientized mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 1-10.

[2] 马树元, 李报, 李桂新, 等. 高德矿增大水砂充填供水能力的研究[J]. 阜新矿业学院学报, 1991, 10(2): 25-29.

- MA Shuyuan, LI Bao, LI Guixin, et al. The study of raising the ability of water supply of the hydraulic backfilling in Gaode mine[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1991, 10(2): 25-29.
- [3] 缪协兴, 张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 379-382.
MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 379-382.
- [4] 胡炳南, 郭爱国. 矸石充填材料压缩仿真实验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1076-1080.
HU Bingnan, GUO Aiguo. Testing study on coal waste back filling material compression simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1076-1080.
- [5] 赵才智, 周华强, 柏建彪, 等. 膏体充填材料强度影响因素分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(6): 904-906.
ZHAO Caizhi, ZHOU Huaqiang, BAI Jianbiao, et al. Influence factor analysis of paste filling material strength[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(6): 904-906.
- [6] 卢央泽, 苏建军, 姜仁义, 等. 深部矿体胶结充填开采沉陷规律模拟分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 44-50.
LU Yangze, SU Jianjun, JIANG Renyi, et al. Simulation analysis on the rule of mining subsidence with cementation filling method in deep mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 27(3): 44-50.
- [7] 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.
- [8] 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.
FENG Guangming, DING Yu, ZHU Hongju, et al. Experimental research on a superhigh-water packing material for mining and its micromorphology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6): 813-819.
- [9] 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.
FENG Guangming, SUN Chundong, WANG Chengzhen, et al. Research on goaf filling methods with super high-water[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.
- [10] 冯光明, 王成真, 李凤凯, 等. 超高水材料开放式充填开采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 453-457.
FENG Guangming, WANG Chengzhen, LI Fengkai, et al. Research on open back-filling with highly-water-absorbing material[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 453-457.
- [11] 孙尚勇. 流体力学与流体机械[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [12] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学与风机[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.