
超高水材料充填开采基础理论及其工程应用

Basic Theory of Superhigh-water Packing Material and Filling

Mining and Their Engineering Application

摘要: 当前我国煤炭开采面临诸多有待解决的难题, 其中“三下”(即铁路下、村庄下和水体下)压煤数量巨大, 妨碍煤矿企业的可持续发展。同时煤炭开采造成大面积地表沉陷和民房破裂, 矸石山堆积引发自燃发火等严重环境污染问题。基于以上突出问题, 煤炭绿色开采已成为我国煤炭进一步发展的必由之路, 超高水材料充填采煤理论与技术是解决上述问题的不二选择。本文在结合邯郸陶一矿工程实例的基础上, 详述超高水材料的特性及其配比、充填采煤关键技术和具体工艺流程以及工程应用。实践证明, 超高水充填采煤技术能有效减少地面沉降和矸石排放, 极大地解放了数量巨大的“三下”压煤, 为矿山企业的可持续发展奠定了坚实基础, 实现了良好的经济效益和社会价值。

关键词: 超高水充填材料; 充填采煤技术; 工程应用

Abstract: At present, China's coal mining faces many problems need to be solved, including the "three under" (that is, under the railway, the village and under the water), the huge amount of coal, which hinders the sustainable development of coal mining enterprises. And at the same time, coal mining caused rupture of large area of surface subsidence and the houses of the people, the gangue accumulation caused by spontaneous combustion serious environmental pollution problems. Based on the above problems, green coal mining has become the only way for the further development of China's coal, super high water material filling mining theory and technology is to solve the problem of choice. In this paper, based on the case of the Handan ceramic mine project, the characteristics and the ratio of super high water material, the key technology of filling coal mining, the specific technological process and the engineering application are described in this paper. Practice has proved that the ultra high water filling mining technology can effectively reduce the ground settlement and waste emissions, greatly liberating a huge number of under pressure of coal, for the sustainable development of mining enterprises laid a solid foundation, to achieve good economic and social value.

Key words: super high water filling material; filling mining technology; engineering application

1 绪论

我国长久以来采用的采煤方法已经产生诸多亟待解决的社会矛盾和环保难题。传统的长壁式采煤法处理采空区，容易导致采动影响波及地表，造成房屋拉伸式破裂和大面积地表开裂；采动裂隙的发育和贯穿将进一步破坏地下水系，打乱地下水循环，加剧荒漠化趋势并影响居民生产生活用水；井工矿开采地下煤炭资源需要建设复杂的井巷系统和附属构筑空间，不可避免地将大量矸石从地下提升到地面堆积，诱发矸石山自燃和崩塌事故。

在面临日益严峻的环保压力的同时，我国浅部煤炭资源经历几十年高强度的开采，可采储量日渐下降，迫使煤炭开采逐渐从浅部开采向深部开采发展。而深部开采将面临高地温、高地应力和高渗透压的开采环境，容易发生冲击地压并诱发瓦斯灾害。而与此相对应的是，我国的“三下”（铁路下、村庄下和水体下）压煤数量巨大，工业广场下设留保护煤柱的煤炭资源数量也十分可观。据有关数据统计，我国“三下”滞压煤炭资源数量可达 143 亿 t。以十对年产千万吨矿井计算，可供其开采一百五十年左右。

基于以上问题，钱鸣高院士于本世纪之初提出“绿色开采”体系。充填开采作为其体系中的重要组成部分，已成为解决煤炭开采所面临的环保问题和释放“三下”和工业广场下压滞煤炭资源的必然选择，是保障我国煤炭工业可持续发展的必由之路。超高水材料充填采煤又不同其他充填采煤方法，具有充填凝固速度快，充填流体含水率大、泵送性能优良和无毒无害等特点，且能在凝固之后使充填体有较高的强度和优良的“恒阻”特性，可有效地减少地面开裂和沉降。

2 超高水材料充填采煤技术国内外研究现状及问题

我国煤炭开采形式以井工开采为主。充填采矿法有提高煤炭回采率，充分利用资源，有效控制地压，减少或消除地表沉降及可在“三下”开采等优点，加上采空区可以用废石来充填，可减少矸石等废物的堆放及环境污染，改善矿区周围生态环境，是钱鸣高院士倡导的煤矿绿色开采的重要组成部分。基于这些优点，在我国目前的能源状况及形势下，充填采矿法越来越受到人们的重视，充填工艺技术也在充填采矿法不断改造与发展的过程中得到创新与发展。

2.1 国外研究概况

高水充填材料的研究可追溯到上个世纪 80 年代初英国的巷旁泵送充填技术，由英国煤炭研究院（MRDE）研发的一种称为“Aquapak”的混合水泥胶结料，它可以在水量很高（水体积达到 85%）的情况下固结，Aquapak 用料量约为 500kg/m³。大约两年后（1982 年），另一种叫做 Tekpak 的材料问世，其性能又优于 Aquapak，材料用量减少到 364 kg/m³，而可泵时间则由 Aquapak 的 45 min 增加到 Tekpak 的 180 min。相应成本由 52.06 £/m³ 降为 43.49 £/m³。Aquapak 由分别叫做 Aquacem 和 Aquabent

的两种物料构成,两种物料按 1:1 的比例与水拌和,然后分别送到充填地点混合,20 min 后固化,2 小时强度可达 0.4 MPa/m²。

2.2 国内研究概况

我国最早开展高水材料的研究是在上个世纪 80 年代中期,由中国矿业大学校本部承担的国家“七 五”科技攻关项目“灰渣应用于井下充填的研究”成功开发出 ZKD 高水速凝材料及高水灰渣充填材料,于 1991 年通过煤炭部鉴定。ZKD 高水充填材料由石家庄水泥制品厂工业化生产后,经煤炭部高水充填材料检验中心检测,各项技术指标达到或超过国际先进水平。其主要性能指标水灰比 2.5:1;初凝时间 6 分钟;可泵时间大于 24 小时;抗压强度分别为 2 小时 2.05MPa,24 小时 3.97MPa,7 天 5.08MPa。随后又承担了国家“八五”重点科技攻关项目“沿空留巷机械化构筑护巷带技术”,对材料及其泵送充填技术又进行了深入的研究,并在新汶矿务局翟镇煤矿进行了井下工业性试验研究。

与此同时,中国矿业大学北京研究生部也研制成功高水材料,并把材料用于金属矿山,完成了金属矿山全尾砂速凝固化胶结充填技术的工业性应用。此后,高水充填材料在全国范围内得到了广泛的应用研究,在巷旁充填、注浆堵水、油井堵水、采空区及煤层火区灭火、三软煤层的注水防尘封孔、软土地基处理、壁后充填、软岩加固、港口工程以及非煤矿区的胶结充填等方面得到了广泛的应用。

2.3 存在的问题

目前我国的煤炭资源状况及开采现状,无论从保护资源、提高资源回收利用率,抑或从保护环境,减少生态破坏及环境污染的度来分析,充填开采都是最好的选择,而胶结充填又是各充填开采方法中较好充填方法之一。用充填法进行采矿对充分回收煤炭资源,提高资源回收率,延长矿井服务年限,控制地表沉陷并实现“三下一上”采煤,减少生态环境破坏等均有一定的经济效益、社会效益和环境效益,具有广阔的发展前景。

胶结充填的核心是充填胶结材料。对充填胶结材料的要求有以下几个方面:(1)尽可能的降低充填成本;(2)充填工艺简单易行;(3)有好的环境效益,可以充分利用如矸石、尾砂等废料;(4)材料具有良好的强度与凝结性能。

现有的胶结材料中,赤泥胶结材料具有许多优良的性能,而矿渣胶结材料在达到相同或相近充填效果的前提下,成本仅为普通水泥充填的一半左右,具有明显的技术和经济优势。此外,二者均可实现全尾砂胶结充填抑或膏体泵送充填,对充分利用尾砂、煤矸石、粉煤灰等废料,减少环境污染具有重要作用。但二者依托的充填开采技术皆为高浓度全尾砂胶结充填及膏体泵送充填。前者在生产实践中,目前依然存在制浆技术难度较大的问题,尤其是利用全尾砂造浆时,难以达到预期的浓度;高浓度料浆输送存在一定的困难;输送及参数控制设备技术要求较高,在目前的条件下难以在一般矿山全面推

广应用。而后者主要优点是充填料浆浓度高，减少了水泥用量，降低了充填成本；充填体收缩率小，接顶率高，充填质量好，强度较高；采场无任何溢流水，改善了井下作业环境，节省了排水及清理污泥的费用。但全尾砂膏体泵送充填存在一次性投资大，泵压输送技术要求很高以及输送管子容易堵塞等问题，在推广应用过程中存在的困难较明显。而上述论及的赤泥胶结料的生产受到地域性限制，使用时存在过高的远程运输费用，往往使充填成本大幅度增加，使用户难以承受。

高水速凝固化材料胶结充填的优点是：用水量比较高，使用时具有良好的悬浮性，使前述充填料浆的悬浮性和流动性得到改善，可实现中低浓度料浆的水力输送，避免了高浓度料浆输送困难的问题，简化了工艺过程，减少了运行成本。但采用纯高水材料采空区充填时，吨煤成本很高，按目前价格吨煤成本大概在 300 元及以上，企业难以承受，另一方面高水材料来源较少，成为推广应用的另一障碍。

若能研制出一种新型充填材料，既具有高水材料性能上的优点，又具有应用时充填工艺简单，特别是使单位体积材料用量能大幅度减少，充填成本显著降低，材料来源受限问题得到解决，则煤矿充填开采技术就有可能在采空区充填领域得到广泛的推广与应用，使我国的充填开采技术走向一个新的阶段。超高水充填材料开发研究的想法由此产生。

因此，在高水材料研究的基础上，进一步提高水固比、大幅度降低材料用量是本课题的指导思想。以此为指导，从理论上研究高水材料的形成机理，探索超高水材料开发的科学依据。以此为基础，展开对超高水材料的研究。若此材料及其相关充填工艺系统能够研制成功，则必将成为推进我国矿山胶结充填开采技术向前发展的重要方法之一，为我国矿山资源的充分利用及在我国进一步实现绿色开采做出应有的贡献。

研究的超高水充填材料应具有以下特征：固结体持水量高，固体料用量少，密实度高，其水含量超过有任何胶结材料；浆体流动性好，可灌性强；材料来源广，成本低；与矸石、岩石及多数工业废弃固体物应有良好的胶结性；具有速凝早强，固结体在三维受力环境下抗压缩能力强，满足采空区充填要求。而研究的充填工艺系统应简单，操作简便，适应性强，可远距离输送，安全可靠；材料制备系统简单，自动化程度高，易于井上井下构建。

3 超高水充填材料形成机理研究

对钙矾石容水量的分析可知，理论上钙矾石可持留自身体积 95% 的水分。这说明若想制得超高水材料，应形成尽可能多的钙矾石。

钙矾石在大多数的硬化水泥浆中都有存在，当水泥中含有 CaO 、 Al_2O_3 与 CaSO_4 等成分时，理论上就有了钙矾石形成的条件。因此，从各水泥中寻找钙矾石形成需要的物质，以满足制备超高水材料的需求。

要实现超高水材料的超高水含量，其有效成分含量必须尽可能的高，且相互之间要

有合适的比例。一些非水硬性组分要尽可能的少。实现上述目标的途径除对配比进行科学调配外，烧制温度以及矿化剂的类型与掺量等，对控制有效矿物的形成、生成速度以及生成有效矿物间的比例等具有重要作用。

形成超高水材料时，水泥或类水泥烧制料、石膏与石灰等是主要组成物质。只有理论上的契合并不能满足材料的形成要求，尚须创造超高水材料的形成条件。根据对高水材料的研究经验，各种外加剂相互复合后产生的叠加作用或相互抑制效应是形成超高水材料的关键因素，且这些作用应该能够促成超高水材料的形成，并使超高水材料在不同的时刻表现出不同的材料特征。下面根据矿用超高水材料的特点，对外加剂所起的效应方面进行分析：

（1）矿化剂类

超高水材料中所需的烧制物料在烧成过程中，对其有效矿物的比例、含量等的要求均要比普通铝酸盐水泥或硫铝酸盐水泥要求高，此外，各有效成分的烧成温度也不均一。对此，严格控制物料组分，加入一定量的矿化剂来改善各有效矿物的烧成温度与稳定性应是超高水材料烧制料的基本要求。

（2）缓凝剂类

缓凝剂是超高水材料研制中关键环节之一。高效的缓凝剂不但能使充填工艺得到简化，重要的是烧制物料在水中需要通过缓凝剂使其迅速处于安定状态，避免其与水发生过早的水化作用。

（3）解缓剂与速凝剂类

充填料浆在到达充填地点后，在需要的时间段内应尽快凝固起来，对采空区顶板起支撑作用。这就要求材料中的缓凝效能迅速解除，而速凝作用迅速发挥。因此，解缓剂与速凝剂两者担当不同的作用，但二者还应具有良好的相容性，避免相互产生抵消作用。

（4）悬浮、分散剂类

由于超高水材料水含量较高，固体材料量很少，固、液两相比比例的悬殊及非均相物料的固有性质使得液、固两相的混合体很难长期稳定，尤其是在缓凝阶段。这就要求有适宜的悬浮、分散剂，使固体物料能较均匀、稳定地悬浮于液体中，使材料能均匀稳定地水化，形成均质的水硬化体。

（5）活化剂类

活化剂是针对烧制物料矿物中存在有非活性或活性较低的成分而设置的，使用时，可根据不同批次烧制物料成分决定添加与否。

以上 5 类外加剂在使用时需要认真研究，由于相互间存在相容性问题，必须弄清其作用机理，相互配合才能发挥出应有的效果。根据多年研究，复合外加剂间存在相容与相克性，弄清其在水化过程中所产生的相互作用机理，对材料的研制十分重要。

3.1 水泥及烧制物料矿物研究

对于水泥的研究主要从以下方面入手：

采用正交实验方法组织实验及筛选可用水泥胶结矿物。首先分别选择铝酸盐型、硫铝酸盐型以及快硬硅酸盐水泥来进行组成研究，各化学组成性质如表 3-1 所示。选择快硬硅酸盐水泥的原由是因为其中含 C₃S 成分较高，一般可达 50%~60%，其中还有约 8~10%的 C₃A。C₃S+C₃A 的含量一般在 60%~65%。这两种组分均能有效水化，对提高水泥早期强度有利。另外，还有约 10%以上的 C₄AF 及 15%~20%的 C₂S，前者与 C₃A 一样，在有 CaSO₄ 存在的情况下可生成钙矾石，C₂S 的后期强度也较高。典型快硬硅酸盐水泥矿物组成见表 3-2。

除考察表 3-1 中的九种物料外，同时考察不同水固比对材料凝固的影响。为了明确其凝固情况，首先采用较小水固比进行实验，水固比分别取 3:1 及 5:1 两种情况进行研究（中国矿业大学曾在上世纪 80~90 年代研究出高水速凝材料，水固比为 2.5:1，为了表示超高水，故取 3:1 开始研究）。按照九种物料组成分别计算辅料用量，铝酸盐及硫铝酸盐水泥按有效成分的比例进行计算，快硬硅酸盐水泥按可形成钙矾石量来进行辅料计算。实验结果如表 3-3 所示。由于水固比属高水材料范畴，材料中添加了适量的高水材料外加剂。

表 3-1 几种典型水泥化学组成

Table 3-1 Chemical components of several typical cements

水泥名称	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃
铝酸盐型 I	5.12	32.03	1.2	2.16	57.51	1.09
铝酸盐型 II	5.36	32.47	0.99	2.38	56.26	1.11
铝酸盐型 III	6.5	32.4	0.5	1.6	56.2	1.3
硫铝型 I	8.9	43.2	2.0	1.9	33.2	7.9
硫铝型 II	11.7	41.4	2.1	3.1	32.3	8.2
硫铝型 III	10.0	42.6	0.7	2.8	29.3	7.7
快硬硅酸盐型 I	19.1	64.6	0.6	3.3	7.6	2.2
快硬硅酸盐型 II	20.3	63.3	4.3	2.0	5.1	2.5
快硬硅酸盐型 III	20.0	65.6	1.4	2.5	5.2	2.3

表 3-2 典型快硬硅酸盐水泥的矿物组成^[174]

Table 3-2 Mineral composition of several typical Portland cements

编号	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	54.5	22.1	8.4	12.2
2	58.3	16.8	6.6	12.7
3	58.9	15.0	4.8	18.1

表 3-3 不同水泥水化凝结情况
Table 3-3 Hydration of different cements

水泥	水固比 3:1	水固比 5:1
铝酸盐型 I	上部析水，下部不能硬化	严重泌水，24 小时不凝
铝酸盐型 II	上部析水，下部不硬化，呈柔软的糊状物	同上
铝酸盐型 III	早期有少量析水，约 2 小时后被吸收，24 小时感觉下部较上部硬，但手感较柔软	同上
硫铝型 I	上部析水，但下部的硬化体有一定的强度	同上
硫铝型 II	早期有少量析水，约 1.5 小时后被吸收，一天后感觉有强度	同上
硫铝型 III	析水，24 小时后水分未被吸收，下部柔软	同上
快硬硅酸盐型 I	上层析水，下部硬化	同上
快硬硅酸盐型 II	上层析水，下部硬化	同上
快硬硅酸盐型 III	上层析水，下部硬化	同上

结果表明，对于水固比为 5:1 的材料组成，无论是哪一种材料，均不能形成均一的固化体。按以上材料变换不同辅料配比多次实验均不能得到满意的结果，因结果类似，此不多述。但前述分析可知，高水体积是可能实现的。因此，造成目前结果的原因只有一个，就是配比不合理。但是，要达到理论上能够实现的水体积 95%~97%，水固比至少在 6.4:1~11:1（此时取固体材料密度为 3kg/dm³，下同）以上，这与实际结果相去甚远。从材料性能上看，根据上述实验结果，水固比 3:1 时，铝酸盐水泥可以凝固，但强度稍差；硫铝酸盐水泥效果较好；快硬硅酸盐水泥持水量不多，但下部固结部分有一定的强度。因此考虑下一步的实验分两步进行：一是把铝酸盐水泥与快硬硅酸盐水泥混合形成复合材料，看其混合性能如何；二是单独考察硫铝酸盐水泥，从矿物组成上寻找突破。

3.2 辅料研究

超高水材料的辅料有石膏与石灰等。前已述及，石膏是形成钙矾石所需物质之一。辅料用量直接影响最后形成的钙矾石、铝凝胶与硅凝胶的相对比例。因为凝胶成分可以吸附、结合大量水以形成超高水材料，而钙矾石则构成强度骨架。因此二者有机结合，构成水化、硬化的整体。

3.3 外加剂研究

由于在材料的主、辅料研究阶段均未形成令人满意的超高水材料。因此考虑通过改变外加剂来实现材料的超高水化。

3.3.1 促凝剂的研究

速凝剂的作用是促进它们的快速水化，从而实现快硬、早强的目的。而在水量很多的前提下，常规的外加剂就不能发挥应有的效果，找到相容性好的复合外加剂应该是试验的目标。因此，依据双电层理论，配制相容性较好的复合速凝剂是应该采取的技术路线。

3.3.2 缓凝分散剂

配制的缓凝剂应满足两方面要求：一是确保材料缓凝达到工艺要求；二是材料能被再活化，即被解缓，与复合速凝剂有较好的相容性。

材料形成主、辅料（以下称 A、B 料）两个部分，A 料由硫铝酸盐水泥、复合缓凝分散剂组成，B 料由其他辅料如石灰、石膏及复合速凝剂组成。为均衡 A、B 组成，改善 B 料的悬浮性能，B 料有时也加入一定的悬浮分散剂。

3.4 影响超高水充填材料性能的因素分析

在实验过程中，发现以下几个因素对材料有直接影响，分别是材料组成、材料细度、水固比、温度等。

（1）材料组成

材料组成是影响材料性能的重要因素。由于是超高水材料，对材料组成要求严格。配方中各矿物的水化受材料组成的影响。若烧制的 A 料组成发生变化，则相应的 B 料及各辅料也要进行配比调整，如此才能保证材料性能的稳定。这在材料应用时要根据烧制材料组分差异分批次对 B 料及各辅料配比进行调整。

（2）材料细度

材料的细度为粒度分布概念，即不同尺寸大小颗粒的组成分布。细度的度量方法有多种：平均粒径、比表面积、筛余量及颗粒分布等。不同的材料选择不同的细度量度方法，水泥业通常以通过某孔径（80 μm）的筛余量来定义，以筛余量占总物料的百分数来表示。对于水泥而言，通常要求细度不宜太细，过细颗粒易于结团，需水量上升，会造成和易性、强度等指标下降。从超高水充填材料研制过程中，对材料细度没有特殊要求，但若更细，则利于材料性能的发挥，但细度过细会造成粉磨能耗增加，加工成本升高。反之，若细度太粗，则液固比只能停留在界面反应，水化较慢，因此又不宜过粗。对于超高水材料而言，实验室细度通常磨至 5.0% 以下即可。

（3）水固比

水固比越大，材料强度越小。

（4）温度

与普通水泥一样，温度对超高水充填材料的凝固与强度有一定的影响。根据材料主要用于煤矿井下，而井下温度一般在 18~28℃，因此进行实验室试验时，以 18℃ 作为实验材料养护温度，以使试验结果具有可比性。

4 超高水充填材料基本力学性能分析

4.1 超高水充填材料的力学性能

超高水充填材料具有硬化快及早强的特点。7 天强度可以达到最终强度的

60~90%。但这种材料抗风化性能较差，因此不适合用于开放、干燥条件下，只能用于井下潮湿环境。当然，需要说明的是，材料的风化与受试试块的体积大小有直接关系，由于受试试块体积很小，置于外界环境下，会很快风化，体积加大，则其风化速度会相对减慢。材料的风化机理分析见后。固结体在井下三面受限的环境下应用，由于周围岩层的限制，使材料的强度能发挥相当于其自身强度 125% 的效果。这在实际应用中是十分有利的。

4.2 超高水充填材料的凝结时间

超高水充填材料的凝结及固化时间是涉及充填工艺及材料性能的重要参数，有必要对此进行研究。实际上，由于超高水材料的含水量很高，凝结问题一直是材料能否研制成功的关键因素。所研究的超高水材料属于早强、快硬型胶结材料，其初凝与终凝时间很近，故一般仅考查其初凝时间，并统称为凝结时间。A 料在不加调凝剂的情况下，遇水水化，其凝结时

间因其主要有效矿物的不同而不同。在应用中，每批次烧成物料的烧成情况不同，矿物含量也就不同，其相应的凝结时间也不相同，有时还会有很大的变化。在其它条件相同的前提下，超高水材料的凝结情况，主要受水固比与外加剂性能的影响。温度也是影响因素之一。

4.3 超高水充填材料固结体的稳定性

超高水充填材料固结体水体积高达 95%~97%，其稳定与否直接影响到工程的应用，对其进行研究具有重要的意义。

超高水充填材料固结体主要由钙矾石、凝胶以及游离水构成，钙矾石是其中的主要物质。显然，钙矾石的稳定性会直接影响到超高水充填材料固结体的稳定性。

置于空气中的超高水充填材料固结体，游离水的失去与凝胶的失稳，使固结体表面松散，与空气的接触面积逐渐增加，使固结体中更多的钙矾石有了与空气接触的条件，由此加速了钙矾石的崩解。随着固结体置于空气中时间的延长，这种风化现象逐渐由表面向固结体中间发展，最终导致固结体完全失稳。

4.4 超高水充填材料的流体力学性能

超高水充填材料 A、B 两种单料浆可以视为牛顿流体，在研究时间段内，其粘度变化不大，时间对单浆流体粘度影响不大。因粘度随时间变化对工程应用不会产生较大影响，为该材料实施长距离输送提供了理论基础。但混合浆体则是振凝性时变非牛顿流体。

5 超高水材料充填采煤技术及工艺研究

5.1 超高水充填材料采空区充填方法研究

5.1.1 采空区开放式充填方法

开放式充填是指在工作面推进（仰斜开采）过程中，对采空区不进行任何调控，即允许采空区上覆岩层（主要指直接顶）垮落、采空区完全处于开放与自由状态的充填方式。

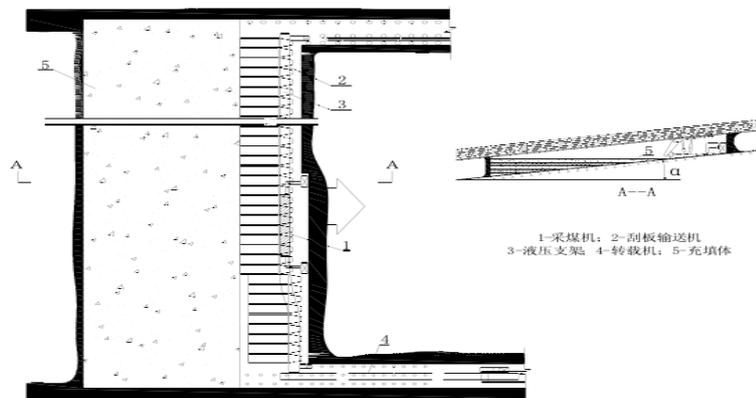


图 3-1 开放式充填开采示意图

其具体做法是：自开切眼始，工作面推进适当距离后，即可对采空区实施充填。随着充填工作的不断推进，充填浆体液面也不断上升，逐渐将低于工作面位置水平以下的采空区充填密实，并将部分垮落下来的矸石（若存在）胶结起来，形成整体支撑上覆岩层的充填胶结承载体，如图 5-1 所示。

该方式的优点：① 充填与开采互不影响，工作面产量可按要求进行增加，不受充填工艺限制；② 充填工艺简单，人员需求少，易于组织与管理，工作面支架不需改造；③ 不控制直接顶，人员作业不在采空区，充填过程安全可靠。

不足之处：当采高较大或煤层倾角较小时，开放式充填对控制上覆岩层有一定的局限性，甚至存在该方法不能实施的可能性。但是，通过在工作面后方构筑挡浆体，使充填浆体液面水平升高，缩短顶板悬跨距，使其小于老顶初次垮落步距，也可以较好地实现对采空区的及时充填。

该方法适用条件：裸露顶板跨距小于老顶初次垮落步距，或创造条件、采取措施使该条件得到满足。

5.1.2 采空区全袋(包)式充填法

采空区全袋式充填方式核心是在采空区范围内全部布置充填袋，袋内充入超高水充填材料，凝固后对上覆岩层直接进行支撑。充填时，根据工作面两巷留巷与否，该方法又分成两种，即保留工作面两侧（或一侧）回采巷道时的采空区袋（包）式充填方式与不保留两侧回采巷道的采空区充填方法，如图 5-2 所示。

本方法优点：①全袋（包）式充填能适用于现有大多数采煤方法与回采工艺条件下的采空区充填要求。与开放式充填相比，适用性更广，特别是对水平或近水平条件下的

煤层有较好的适应性（放顶煤开采除外）；② 可直接控制直接顶，充填效果直观。

不足：① 充填袋（包）架设工序繁琐，劳动组织复杂，工作量较大，对作业环节安全要求高；② 充填与回采相互影响，两工序配合管理技术要求高。

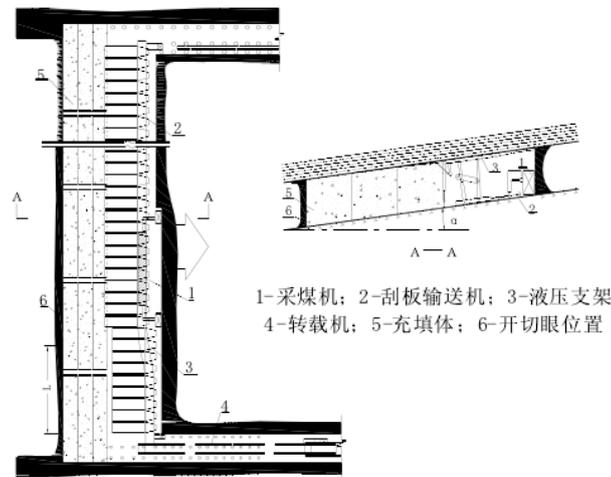


图 3-2 采空区袋（包）式充填不留巷示意图

5.1.3 采空区混合式充填方法

混合式充填是指采空区充填时，根据需要采用充填袋（包）与开放式充填相结合的方式。

充填工艺实施步骤：① 当工作面推进至适当距离后，在工作面后方架设充填袋（包），并在其中充入超高水充填材料直至饱满接顶；② 视情况对两充填袋（包）之间的剩余空间进行开放式或封闭后集中充填至饱满接顶。该方法的优点及适应性：① 与全袋（包）式充填相比，减少了吊挂充填袋（包）的工作量，提高了充填效率，降低了充填成本；② 与开放式充填相比，混合式充填可应用于水平及近水平煤层，适应性增强。

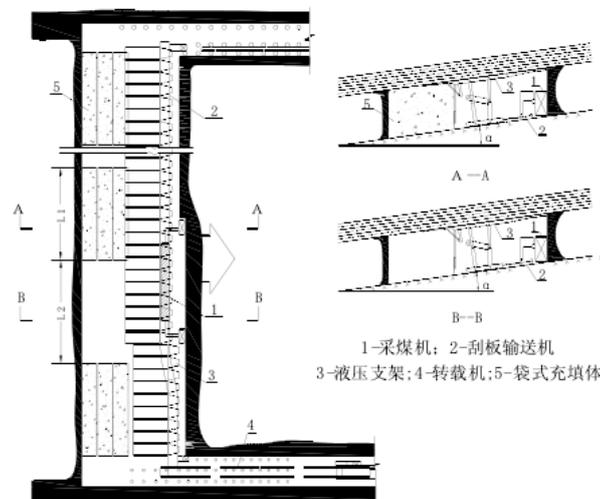


图 3-3 混合式充填示意图

5.2 超高水充填材料充填工艺系统研究

超高水材料含水量高，将其输送至采空区需要相应的配套设备与工艺。根据该材料特点，井下的充填工艺系统应包括材料存放、浆体制备、浆体输送以及浆体混合四个系统。其中，浆体制备系统相对复杂，是充填工艺系统的核心。

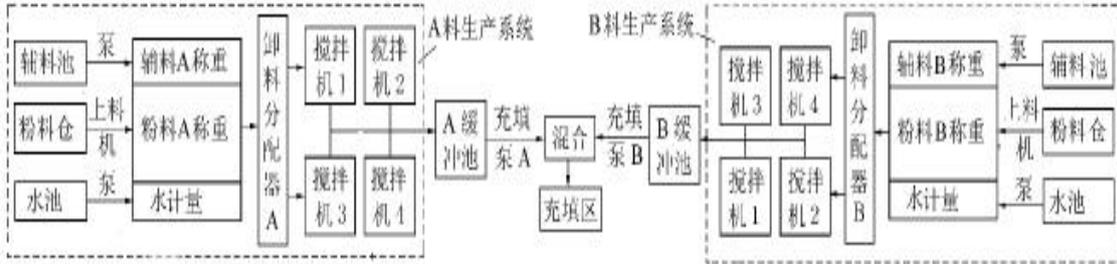


图 3-4 超高水材料充填系统

整个超高水充填流程是在地面充填站将超高水材料制成浆体，通过充填孔及充填管路输送至充填工作面，充填材料在离工作面 80m 进行混合，在经分流器分成四个充填管分别充入架后充填袋内，并在充填工作面地表设测站进行观测分析。



图 3-5 超高水材料充填采煤工作面

6 工程应用

6.1 工程概况

邯郸陶一矿地质条件复杂，煤炭资源回收率较低，截至 2008 年，陶一矿“三下”压煤 3.52 亿 t，占资源总量的 37.6%。矿区寿命仅 15 年左右，而该矿区又没有新的探明资源可供接替。因此，陶一矿急于寻求新的能有效解决“三下”煤炭开采的技术方法。

6.2 井上下概况

充填试验面位于七采区南翼、停驷头村保护煤柱范围内，共设计了 5 个充填面，即 12701 上 01 ~05 面。试验面埋深 315.1 ~365.9m，对应地面在停驷头村东部，型煤场西部。地表有民房建筑、冲沟、梯田。工作面长 50m，推进长度 220m 左右，沿

煤层走向布置，仰斜推进。

6.3 试验面生产技术状况

工作面采用倾斜长壁采煤法，综采一次采全高回采工艺，超高水材料充填法处理采空区，只在充 5 面的一小段尝试了炮采条件下的超高水材料包式充填法。工作面采用区段跳采的方法进行回采。

6.4 充填开采效果评价

充 1 面充填开采结束一年多的地面观测表明，地表没有发生明显变化。说明采空区充填后上覆岩层得到有效控制，开采对地表的影响很小。

(1) 地面观测结果

陶一矿充填试验面推进长度 200m，试验面充填开采结束一年多的地面观测表明，地表没有发生任何变化。说明采空区充填后上覆岩层基本稳定，没有影响到地表，充填效果理想。

(2) 超高水材料采空区充填效果分析

① 窥视孔探测超高水充填材料采空区充填固结状况根据陶一矿充填开采的设计要求，在工作面正上方 20m 左右布置一条巷道对其进行观测，同时在其中布置垂直钻孔对采空区进行探测，钻孔布置如图 6-1 所示。

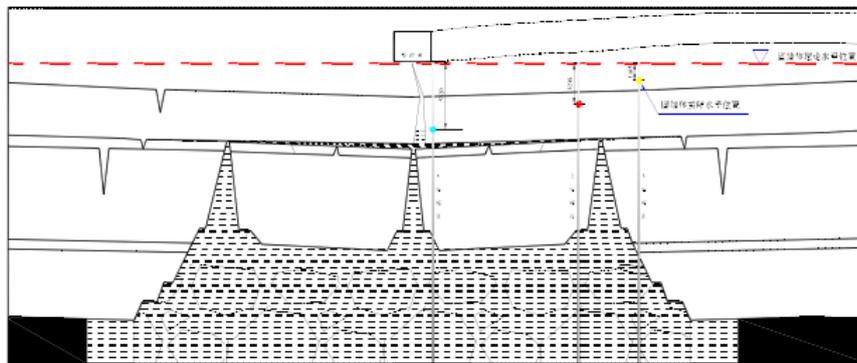


图 6-1 探巷与钻孔布置位置示意图

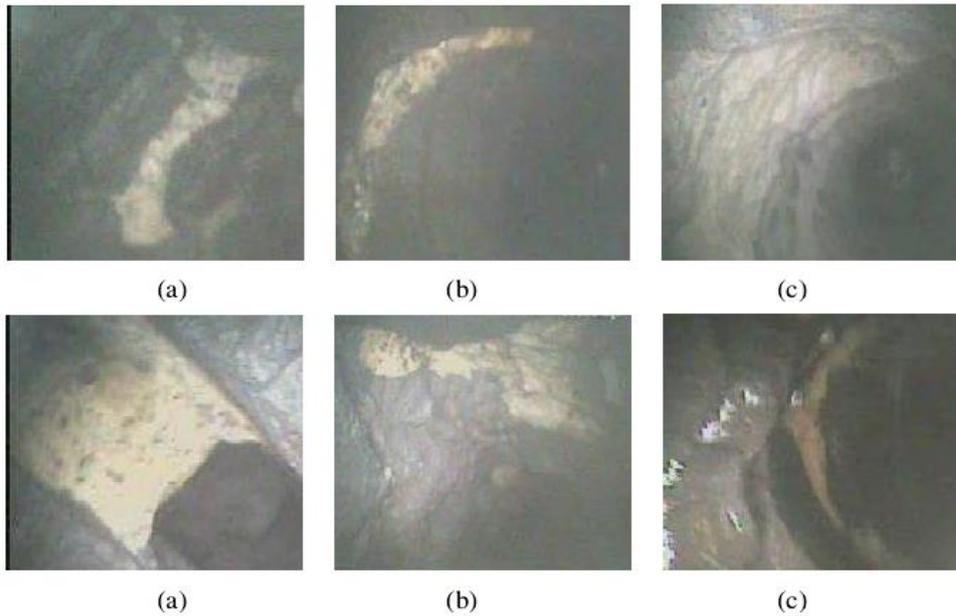


图 6-2 窥视孔超高水材料填充层间裂隙及固结情况实照

6.5 经济效益和社会效益

以吨煤售价在 400 元计算，煤炭开采的常规成本约 230 元/t，再加上增加的吨煤充填成本，则充 1 面、充 3 面净获利 4772.4 万元，充 5 面净获利 1580.7 万元，充 2 面净获利 1972.4 万元。因此，陶一矿通过充填开采目前已获利 8325.5 万元。

该技术在陶一矿充填试验面的应用成功，不仅为陶一矿“三下”煤炭开采提供了有效的技术方法，为矿井的可持续发展奠定了基础，也为邯郸矿业集团其它矿“三下”煤炭开采提供了有效的技术方法。

参考文献

- [1] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京: 煤炭工业出版社, 2013.
- [2] 杜计平, 孟宪锐. 采矿学[M].中国矿业大学出版社, 2014.
- [3]中国煤炭建设协会.煤炭工业矿井设计规范[M].北京: 中国计划出版社, 2005.
- [4]张先尘, 钱鸣高, 徐永圻, 王玉浚.中国采煤学[M].北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [5]张荣立等.采矿工程设计手册[M].北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [6]煤炭工业部北京设计研究院.煤炭工业矿区总体设计规范[M].北京: 煤炭工业出版社, 1997.
- [7] 林在康, 李希海.采矿工程专业毕业设计手册[M].中国矿业大学出版社, 2008.
- [8] 张国枢.通风安全学[M]. 中国矿业大学出版社, 2007.
- [9] 钱鸣高, 石平五, 许家林.矿山压力与岩层控制[M]. 中国矿业大学出版社, 2010.
- [10]刘玉德.采矿设计[M]. 煤炭工业出版社, 2013.
- [11] 刘建功,赵庆彪. 综合机械化充填采煤[J]. 煤炭学报,2010,35(9):1413-1418.
- [12] 李贻久,江新兵. 综采膏体充填工艺在太平煤矿的应用 [J]. 煤矿开采,2009,14(2):42-43.
- [13] 张吉雄. 矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
- [14] 缪协兴,张吉雄,郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报,2010,35(1):1-6.
- [15] 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.
- [16] 李兴尚,许家林,朱卫兵,等. 从采充均衡论煤矿部分充填开采模式的选择[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2008,27(2):168-171.
- [17] 财政部,国家税务总局. 关于实施煤炭资源税改革的通知(财税[2014]72 号) [EB/ OL]. http://szs.mof.gov.cn/zhengwux-inxi/zhengcefabu/201410/t20141011_1148669.html,2014 -11 -11.
- [18]周华强. 中国膏体充填采煤的研究与发展趋势[R]. 徐州,2010 绿色开采理论与实践国际研讨会,2010.