

# 超高水材料在煤矿的系列应用技术

孙春东<sup>1,2</sup>, 刘树轮<sup>1</sup>, 李继升<sup>1</sup>

(1. 冀中能源邯郸矿业集团有限公司, 河北 邯郸 056008; 2. 国家能源充填采煤技术重点实验室, 河北 邢台 056004)

**摘要:** 基于超高水材料速凝早强、强度可调、再胶结等基本特性, 针对煤炭开采过程中遇到的实际问题, 制定了超高水材料制浆输送工艺流程, 发明了超高水材料充填液压支架, 并将超高水材料应用于充填采煤、沿空留巷、采空区地面注浆加固、采空区防灭火技术、“两步法”注浆改造奥灰含水层等领域。结果表明: 在对采空区实施充填开采后, 采空区上覆岩层活动较为平稳, 没有出现明显的周期来压现象, 其充填效果较好; 将超高水材料用于采空区灭火, 不仅起到隔绝空气的作用, 同时也阻止了有害气体的挥发, 降低了空气中有毒有害物质浓度, 减少了材料用量, 降低了充填成本。超高水材料作为一种新型矿山充填材料在煤矿多个领域中的应用技术已基本成熟。

**关键词:** 超高水材料; 充填采煤; 注浆加固; 沿空留巷; 防灭火

中图分类号: TD262

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)08-0042-06

## Application technology of ultra high-water material in coal mine

Sun Chundong<sup>1,2</sup>, Liu Shulun<sup>1</sup>, Li Jisheng<sup>1</sup>

(1. Jizhong Energy Handan Mining Group Co., Ltd., Handan 056008, China;

2. National Energy Backfilling Mining Technology Key Laboratory, Xingtai 056004, China)

**Abstract:** Based on the basic characteristics of ultra high-water materials, such as early strength, strength adjustable and re-cementing, in view of the practical problems encountered in the process of coal mining, the development of ultra-high water slurry process, super high water material filled with hydraulic support. The application of ultra-high water materials in the new technology fields such as coal mining, gob-side entry retaining, ground pit grouting reinforcement, goaf fire prevention and control technology, and “two-step-method” grouting transformation. The results showed that the activity of the overburden strata in the goaf was smooth and the apparent pressure was not obvious in the mined-out area, and the filling effect was better. The ultra-high water material was used for the fire-not only play the role of isolation of the air, but also to prevent the evaporation of harmful gases, reducing the concentration of toxic and harmful substances in the air, reducing the amount of materials, reducing the filling costs. The application technology of ultra-high water material as a new type of mine filling material in coal mine had been basically mature.

**Key words:** ultra high-water material; coal mining with filling; grouting reinforcement; gob-side entry retaining; fire prevention

## 0 引言

新材料、新工艺的出现, 对工程技术水平不断提高起到了极大的推动作用。冀中能源邯郸矿业集团有限公司(以下简称“邯矿集团”)为解决煤矿安全生产中的技术难题, 十多年来, 针对超高水材料在煤矿的应用, 开展了系列试验技术研究, 取得了良好的

效果, 推动了整个邯矿集团开采工艺及装备技术的进步与提升, 实现了煤炭的绿色开采。

## 1 超高水材料及其基本特性

超高水材料的定义是: 由高铝水泥熟料、悬浮分散剂、缓凝剂等组成的 A 组分和石膏、生石灰、促凝剂等组成的 B 组分构成, 2 种组分分别加水形成单

收稿日期: 2017-05-24; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.08.008

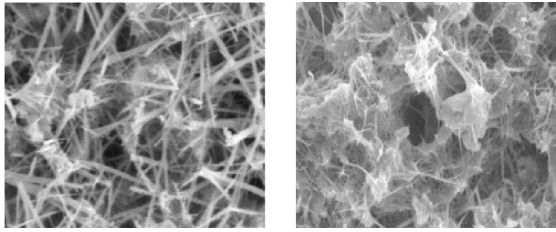
作者简介: 孙春东(1959—), 男, 河北阜城人, 教授级高级工程师, 博士。E-mail: hdsd@126.com

引用格式: 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.

Sun Chundong, Liu Shulun, Li Jisheng. Application technology of ultra high-water material in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 42-47.

一组分浆体时,数小时不凝结,一旦混合,便能快速凝结、硬化,水体积达到 97% 时自然状态下不泌水并有一定强度的一种水硬性材料<sup>[1]</sup>。

超高水材料固结体的主要成分为钙矾石,化学分子式是  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 。钙矾石结晶体含水量较高,微观形貌为网状或针状,且随水体积的加大,钙矾石的针、杆状结构不断纤细化,固结体中水体积含量最高可达 97%<sup>[2]</sup>。其固结体 3 000 倍 SEM 分析结果如图 1 所示。



(a) 水体积95% (b) 水体积97%

图 1 超高水材料固结体 3 000 倍 SEM 图

Fig. 1 Material of ultra-high water materials consolidation body by 3 000 times SEM image

除了高含水性外,超高水材料还具有如下特性<sup>[3]</sup>:

1) 速凝早强、强度可调。超高水材料 A、B 两种单浆液混合前流体物性基本不随时间改变,可视为牛顿流体,时间对单浆流体黏度影响不大,这为该材料实施长距离管道输送提供了理论基础。而 2 种浆液一旦混合后则产生水化作用,并在一定时间内失去流动性,属时变性流体。通过调整 A、B 料的配比参数可使超高水材料浆液在 3~30 min 内初凝,其固结体 1 d 抗压强度即可达最终抗压强度的 50% 以上,7 d 抗压强度可达到最终强度的 95% 以上,这表明超高水材料具有速凝早强的特性。其单轴抗压强度根据材料配比不同而发生变化,最低在 0.1 MPa 左右,最高可达 12 MPa 以上。

2) 再胶结与强度再生性。当外力作用于超高水材料固结体时,固结体内原有孔隙被压密,呈弹性应力状态,而当外力继续加大,达到固结体屈服极限后,固结体内出现一定程度的枝状晶体断裂。当固结体被压实承压稳定后,枝状晶体会再生长,并把周围枝状晶体重新连接起来,强度随之恢复。这表明超高水材料具有再胶结与强度再生的特性。

3) “喜水性”及微膨胀性。当超高水材料固结体浸泡于水中时,固结体内未水化的 A、B 料仍可继续反应,使网状加密,强度升高。因此固结体在水中

长时间浸润时,强度不但不会降低,反而会有所提高。这表明超高水材料具有“喜水”的特性。此外,超高水材料形成固结体后不收缩,具有微膨胀性,是较理想的充填材料。

## 2 超高水材料制浆输送工艺

应用超高水材料时,需建立浆体制备及输送系统(充填站)。该系统根据实际工程需要即可建在地面,也可布置于井下。浆体制备系统包含超高水 A 料料仓、B 料料仓、A 料搅拌桶、B 料搅拌桶、输送泵等主要设备。使用时,根据设计确定的材料配比,将 A、B 料分别通过称料斗输送至各自搅拌桶,并加水搅拌制成单浆液。搅拌均匀的 A、B 浆液通过管路输送至各自的储浆池。储浆池内 A、B 浆液通过双桨匹配流量控制系统经充填管路输送至用浆地点附近混合后进行充填,如图 2 所示。

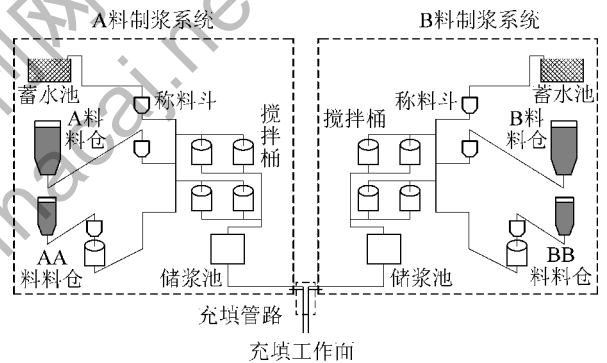


图 2 一种地面制浆充填工艺系统示意

Fig. 2 A ground slurry filling process system

## 3 超高水材料的工程应用

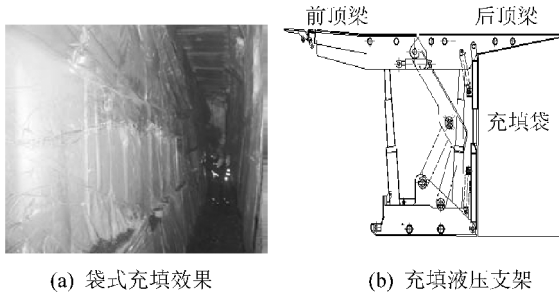
邯矿集团针对超高水材料开展了大量的工业性应用技术研究,并成功应用于煤矿安全生产不同领域,主要有以下几个方面的应用技术。

### 3.1 充填采煤技术

邯矿集团为解决所属矿井呆滞资源开采问题,开展了应用超高水材料充填采煤工业试验,并取得了良好的技术经济效益。2008 年首先应用于陶一煤矿建筑物下充填采煤,根据超高水材料特性及充填工作面地质条件,成功试验研究了采空区袋式充填及采空区开放式充填 2 种采煤方法,取得了采空区袋式充填采煤方法、采空区袋式充填液压支架等多项发明专利。

采空区袋式充填采煤方法:即采用专门研制的

带有尾梁的特殊液压支架,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浆体,充填浆液凝固移动液压支架后对上覆岩层直接进行支撑<sup>[4]</sup>(图3)。



(a) 袋式充填效果 (b) 充填液压支架  
图3 袋式充填效果及充填液压支架

Fig. 3 Bag filling effect and filling hydraulic support

采空区开放式充填方法:即在仰斜开采条件下,自开切眼开始,当工作面推进适当距离后,将超高水材料混合浆液直接充入采空区(图4)。随着工作面的不断推进,混合浆液液面不断上升,逐渐将低于工作面水平位置以下的采空区充填密实,并将垮落矸石胶结在一起,形成胶结岩体。利用上述方法对建筑物下呆滞资源进行置换开采,胶结岩体对上覆岩层起到支撑的作用,从而使开采后的地表不再沉陷或大幅度减小地表下沉量,实现煤炭绿色开采。



(a) 充填整体图 (b) 充填局部图

图4 开放式充填效果

Fig. 4 Open filling effect

超高水材料充填开采,回采工作面支架工作阻力变化曲线平稳,没有出现周期性突变,说明在对采空区实施充填开采后,采空区上覆岩层活动较为平稳,上覆岩层没有发生剧烈的回转下沉,没有出现明显的周期来压现象。通过钻孔窥测显示,当采用开放式充填时,除采空区外,其顶底板中大部分裂隙均被超高水材料固结体充填密实,说明超高水材料充填效果较好,且可封堵裂隙并起到阻水的作用;通过地表观测点沉降数据显示,在进行充填开采后,地表破坏等级控制在I级范围内,且变形缓慢,地表建筑物未出现明显裂缝,充填效果达到设计要求。

自2008年至2016年,陶一煤矿累计共开采呆滞煤炭500余万t,创造了较大的经济效益。随着该技术的逐步推广,目前已成功应用于山东、山西、河南等13余座煤矿,均取得了较好的效果。

### 3.2 巷旁充填沿空留巷技术

邯矿集团为缓解采掘衔接紧张,提高煤炭采出率,将超高水材料应用于沿空留巷工程,并取得了成功。

为提高巷旁充填体的承载能力,研制了“带导管的柔性充填袋”(图5),袋中植入锚栓,超高水材料混合浆液在袋内凝固。锚栓及托盘对固结体起到约束作用,提高了固结体的承载与抗变形能力;同时为使充填区域围岩更加安全可靠,不受工作面支架制约,还研制了“大型自移式充填支架”(图6)。该支架便于充填袋的架设并起到模板作用;强力支撑充填段顶板,延长了固结体有效保护时间;能适应大采高综采工作面的沿空留巷要求<sup>[5-7]</sup>。

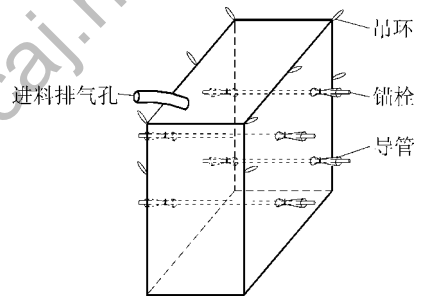


图5 带导管的充填袋

Fig. 5 Filling bag with conduit



图6 大型自移式充填支架

Fig. 6 Large self-moving filling support

邯矿集团赤峪煤矿为煤与瓦斯突出矿井,为保证矿井Y型通风要求,在赤峪煤矿C0202工作面实施了超高水材料沿空留巷。该工作面留巷长度约2000m,自2013年留巷已近4年,巷道基本保持了原始留巷状态。留巷期间,巷道变形量达到了设计



控制要求,顶板未破坏,支护的锚杆和锚索也没有拉断现象;实测巷旁支护体受力为 5.8~9.2 MPa,稳定后约为 7 MPa,现场没有出现充填体大面积开裂、破坏现象,表明设计选取充填材料和充填体规格,能够满足留巷支护强度的要求。通过顶板与充填体间补充注浆,采空区得到较好的密封,起到了防止采空区漏风和煤层自燃的效果。

### 3.3 采空区地面注浆加固技术

邯矿集团聚隆矿业公司为解放老工业广场压煤问题,将主副井搬迁至风井工业广场,由于风井工业广场受到采空区影响,需要对采空区进行注浆加固处理,以减少采空区残余变形对建筑物和井筒的破坏。

由于传统水泥浆等充填材料存在固结体泌水;浆体扩散范围难以控制,钻孔数量多等缺陷,聚隆矿业公司采用超高水材料作为注浆加固材料,即自地面制备超高水材料浆液,经地面钻孔输送至采空区,通过调整地面钻孔间距,超高水材料凝结时间、注浆终孔压力等参数来控制超高水材料充填范围,使得加固区内地层中的残存空隙和裂隙充填严实,形成稳定的整体结构。充填体与围岩共同作用,消除了可能被压缩的空隙,原采空区顶板不会再次产生下沉,从而使地面建筑物得到有效保护。

地面注浆加固后,采用物探验证、地表沉降观测、井筒变形监测等手段对注浆效果进行验证。注浆前后,同一区域采用瞬变电磁验证,验证结果如图 7 所示,验证结果表明视电阻率整体上发生了明显变化,原有无充水的高阻采空区转为低阻,浆液对其中的孔隙裂隙进行了填充,采空区注浆治理效果明显;地表沉降数据显示超高水材料注浆具有显著的减沉效果,注浆加固区地表实测下沉较非加固区减少了 70%以上;井筒变形监测显示主副井井壁水平移动值有了较大的降低,主副井筒井壁上最大变形量仅为 1.7、1.5 mm,注浆治理效果显著,井筒处于安全状态,井壁未产生裂缝等破坏,2014 年井筒变形曲线如图 8 所示。当超高水材料浆液初凝时间控制在 30 min 之内扩散半径可达 50~60 m。较高的扩散半径大幅减少了钻孔施工数量,提高了注浆效率,节省了工程投资。同时根据实测数据总结出超高水材料浆液在冒落裂隙带内的浆液扩散半径  $R$  与浆液流速  $v$ 、浆液初凝时间  $t$  和孔口浆液温度  $T$  的关系式为  $R=4.79 \times 10^{-4} v^{1.283} t^{2.623} T^{0.6915}$ 。

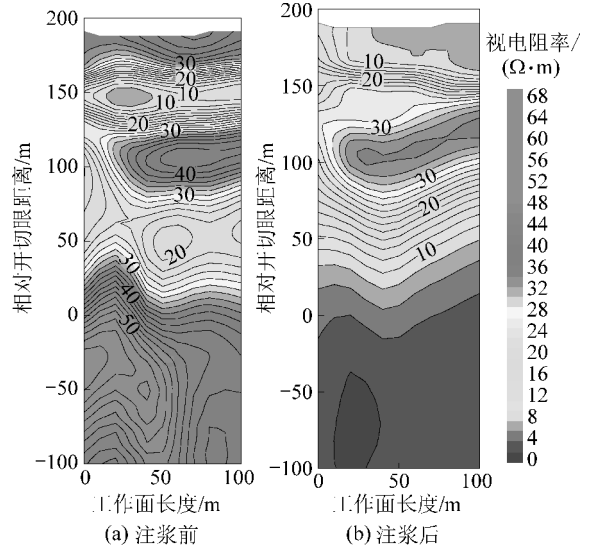


图 7 物探效果对比

Fig. 7 Comparison of geophysical prospecting effect

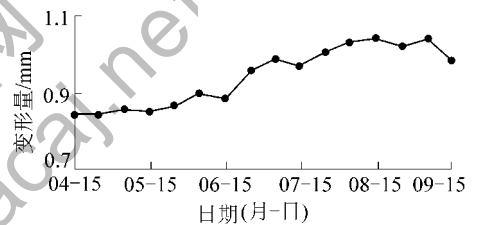


图 8 井筒变形曲线

Fig. 8 Wellbore deformation curve

邯矿集团聚隆矿业公司通过采空区地面注浆加固,解放“三下”压煤 287.76 万 t,注浆钻孔由原设计方案中 77 个(采用水泥浆注浆)减少至 15 个(采用超高水材料注浆),节省钻进距离 6 683 m,节省工业广场建设投资 1 026.70 万元,有效防止了地表残余沉陷,为同类型采空区隐患治理和采煤塌陷土地合理有效再利用提供了技术支撑。

### 3.4 采空区防火技术

1) 火区隔离注浆灭火。邯矿集团山西金地煤业兴县矿业公司 13 号煤层为 II 类自燃煤层,自然发火期 3~6 个月。2011 年 9 月 14 日,该矿 13 号煤层北回风平巷高冒区发生煤层自燃。经过对该火区进行密闭、综合惰化治理,效果不佳。随后采用超高水材料浆液进行钻注灭火,即自回风巷施工钻孔至采空区,通过钻孔将混合后的超高水材料浆液注入至自燃发火地点。由于火场温度较高,超高水材料浆液在高温下会加速凝结,形成的固结体直接对火区煤体进行包裹封闭,不仅起到隔绝空气的作用,同时也阻止了有害气体的挥发,降低了空气中有毒有害物质浓度。该项技术的应用,使得采空区火情得到

迅速控制和有效治理。自燃区位置如图9所示。

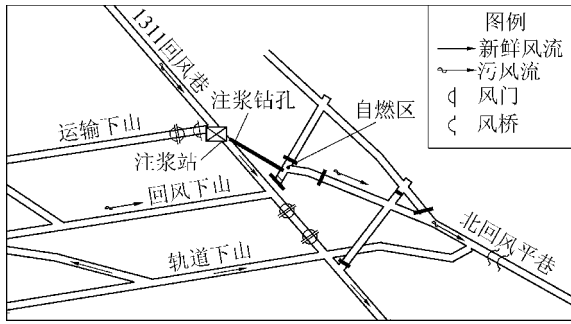


图9 自燃区位置

Fig. 9 Spontaneous location

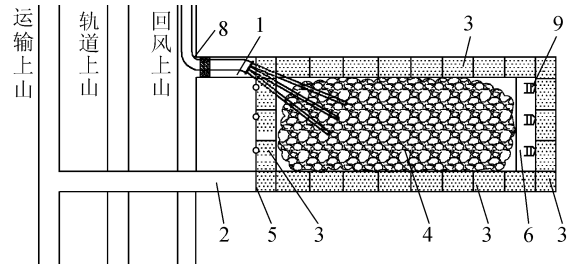
2) 密闭煤体隔离防火。超高水材料既可以用于采空区注浆直接灭火,也可以用于自燃煤层的防火。通常情况下开采易自燃煤层时,为防止采空区遗煤自燃,一般采用预防性黄泥或粉煤灰灌浆处理采空区,以此隔绝采空区遗留的煤炭与氧气的接触,达到防止煤层自燃的目的。但上述方法无法封闭采空区周边留设的煤柱,开采后的采空区如有漏风,仍存在采空区周边煤柱煤炭自燃的安全隐患。当近距离多煤层联合开采时,煤层顶底板裂隙会相互联通,易造成串风供氧,特别是高瓦斯矿井,上部煤层采空区易形成瓦斯积聚,一旦煤炭自燃,极易造成瓦斯燃烧或爆炸等重大安全事故。若利用超高水材料与煤层顶底板的良好适应性,将每一个回采工作面的采空区内沿四周暴露的煤壁,在顶板垮落后,全部用超高水材料固结体筑起一定宽度的充填带,将采空区包围在其中,隔绝采空区与四周煤壁的联系,形成封闭的独立单元。超高水材料固结体在较低强度时具有良好的缩变性能,能很好的适应围岩变形而自身不产生裂隙,与围岩紧密结合,可在采空区四周形成严密的封闭墙体。

形成的封闭单元,可以隔绝外部向采空区内漏风,消除了采空区内遗煤的自燃隐患。同时采空区内积聚的瓦斯无法扩散到外部,降低了灾害发生的可能性,对于瓦斯含量较高的煤层,还可以敷设抽采管路,将密封采空区内高浓度瓦斯抽出加以利用,提高经济效益。超高水材料防火示意如图10所示。

由于所形成的封闭单元阻断了采空区与外界生产系统的联系,具有独立性,即使某一单元发生灾害,仍可以将灾害控制在较小的范围内,并迅速加以控制,提高了矿井的减灾能力和安全系数。

### 3.5 “两步法”注浆改造奥灰含水层技术

华北型煤田在深部开采尤其是在开采下组煤



1—工作面回风巷;2—工作面运输巷;3—超高水材料充填体;  
4—采空区遗煤;5—终采线;6—开切眼;8—抽采管路;9—液压支架

图10 超高水材料防火示意

Fig. 10 Inspection of ultra-high water materials

时,多数矿井都会受到煤层下部的奥陶纪灰岩强含水层岩溶发育形成的陷落柱及导水构造带来的突水威胁。为防止突水,通常的做法是改善煤层底板隔水层性能,工程应用中常采用水泥浆注浆加固底板或对岩溶或裂隙注浆充填等方式以达到封堵导水通道的目的。由于采用水泥浆作为充填物其成本较高,同时充填体结石后的微收缩性常造成被封堵的水又开始渗漏,一次注浆有时难以达到理想效果。在当前煤炭形势低迷的情况下,高昂的充填成本给企业造成较大的经济压力,为解决该问题,邯矿集团利用超高水材料部分代替水泥浆并运用“两步法”对奥灰含水层进行了注浆改造治理技术研究。“两步法”注浆改造如图11所示。

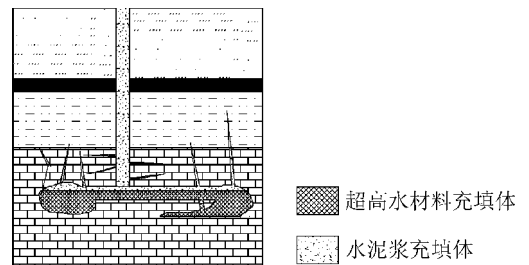


图11 “两步法”注浆改造示意

Fig. 11 “Two-step-method” grouting transformation

当对奥灰含水层进行注浆改造遇到进浆量较大的溶洞或裂隙时,利用超高水材料的高含水特性,先期采用超高水材料浆液无压(或自然压力)状态下进行注浆,此时超高水材料固结体担负充填溶洞或裂隙大部分空间及对后期水泥注浆的支撑作用;后期采用水泥浆加压封堵通向煤层的导水通道(裂隙),用以提高整个充填体强度,保证注浆加固效果,增强孔洞之上岩体的整体性。这样,将以往单纯使用水泥浆作为注浆材料调整为使用超高水材料浆液填充大溶洞和裂隙、水泥浆封堵导水通道的复合材料注浆,在降

低了注浆成本的前提下,仍能保证含水层的改造效果和安全性能。

目前,该项技术已成功应用于邯矿集团郭二庄矿二坑,相对于传统水泥浆充填每立方米节省成本50%以上,提高注浆效率4倍以上。

## 4 结 语

通过分析超高水材料在邯矿集团安全生产中的实际应用效果,表明这种新型材料在煤炭矿山多项领域中的应用技术已基本成熟。特别是充填采煤和沿空留巷技术,已经形成了行业技术标准,分别为:NB/T 51046—2016《综合机械化高水材料袋式充填采煤技术要求》;NB/T 51047—2016《沿空留巷高水材料巷旁充填技术要求》。随着业界对这一新型材料性能的不断认知和提高,工程技术人员也会不断进行其它领域的应用探索与研究,相关技术也会不断成熟和提升,并形成技术理论体系。邯矿集团的成功经验可为类似工程应用提供了很好的借鉴作用。

### 参考文献(References):

- [1] 孙春东,冯光明.新型高水材料巷旁充填沿空留巷技术[J].煤矿开采,2010,17(1):58-61.  
Sun Chundong, Feng Guangming. Technology of retaining roadway along gob by stowing with high-water-content material[J]. Coal
- [2] 王旭锋,孙春东,张东升,等.超高水材料充填胶结体工程特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):852-856.  
Wang Xufeng, Sun Chundong, Zhang Dongsheng, et al. Experimental study on engineering characteristics of super-high water filling body[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 852-856.
- [3] 孙春东,张东升,王旭锋,等.超高水材料长壁充填开采覆岩活动规律及其控制研究[J].煤炭学报,2015,40(6):1313-1319.  
Sun Chundong, Zhang Dongsheng, Wang Xufeng, et al. Study and application of overlying strata control technology in bagtype backfill longwall mining with super high-water content material[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1313-1319.
- [4] 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 material[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.
- [5] 孙春东,张东升,王旭锋,等.大尺寸高水材料巷旁充填体蠕变特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(4):487-491.  
Sun Chundong, Zhang Dongsheng, Wang Xufeng, et al. Large-size test on creep characteristics of high water material for filling body beside roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 487-491.
- [6] 孙春东.超高水材料长壁充填开采覆岩活动规律及其控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2012:20-22.
- [7] 张立亚.超高水材料充填开采设计方法及地表移动控制分析[D].徐州:中国矿业大学,2012:18-21.