高水材料在矿井生产中的应用

黄温钢[1,2]
（1. 中国矿业大学矿业工程学院，江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点试验室，江苏 徐州 221008）

摘要：高水材料凭借其单浆流动性好易泵送、凝固时间短且易调节、固化体强度高且抗水侵蚀能力强、无害无毒利于环保、材料来源广成本低、工艺系统简单等优点，被广泛地应用于矿井的生产实践当中，取得了良好的经济效益和社会效益。本文主要以中国矿业大学研制的ZKD 型高水材料为例，详细阐述了高水材料在矿井采空区充填、巷道支护、封堵裂隙、注浆堵水、煤层注水封孔、U 型钢壁后充填以及港口维护等其他行业中的应用情况。

关键词： 采矿工程；高水材料；充填；裂隙封堵；注浆堵水；封孔

中图分类号：TD823

The Use of High-Water Material in Coal Mine Production

Huang Wengang[1,2]
(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116;
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008)

Abstract: High-water material has been widely used in coal mine production because of its advantages of good fluidity and easy pumping in single grout， solidification in a short time and easy adjustment, solidified body with high strength and strong resistance to water erosion, non-toxic good for environmental protection, broad sources and low cost, and simple technology system, which has achieved good economic and social benefits. With the ZKD high-water material developed by China University of Mining & Technology as an example, the applications of high-water material are described in detail in this paper in the goaf filling, roadway support, plugging cracks, grouting for stopping up water, hole Sealing, wall back filling of U-steel in coal mine and applications in other industry, such as port maintenance.

Keywords: miningengineering;high-water material; backfilling; cracks plugging; grouting for stopping up water; hole sealing

0 引言

我国能源储量的特点是富煤、贫油、少气。我国能源探明剩余可采储量为 1 392 亿吨标准煤，其中煤炭占 58.8%、石油占 3.4%、天然气占 1.3%、水能占 36.5%。我国独特的能源储量结构，加上快速发展的经济对能源需求的急剧攀升，决定了煤炭在我国能源消费结构中占主导地位。然而，由于长期沿用传统采煤方法，且开采强度逐年增大，产生了一系列严重的问题：资源回收率低下、矿区地表大面积沉陷，地下水大量流失、事故频发等等。而自高水材料出现后，凭借其单浆流动性好易泵送、凝固时间短且易调节、固化体强度高且抗水侵蚀能力强、无有害有毒利于环保、材料来源广成本低、工艺系统简单等优点，即被广泛地应用于矿井的生产实践当中，对缓解上述问题起到了积极的作用，取得了良好的经济效益和社会效益。本文主要以中国矿业大学研制的 ZKD 型高水材料为例，详细阐述了高水材料在矿

基金项目：中国矿业大学“211 工程”三期建设项目（A90101 和 A90109）；教育部科学技术研究重点项目（02019）

作者简介：黄温钢（1986-），男，中国矿业大学硕士在读，主要研究方向：采煤方法. E-mail: wengang-huang@163.com

井采空区充填、巷道支护、封堵裂隙、注浆堵水、煤层注水封孔、U 型钢壁后充填以及港口维护等其他行业中的应用情况。

1 高水材料

ZKD 型高水速凝材料由甲料、乙料两种组分构成。甲、乙料以重量比 1:1 配合使用。其中甲料是以硫铝酸盐水泥熟料为基材，与悬浮剂及少量超缓凝剂混磨而成，乙料是由石灰、石膏、悬浮剂和复合速凝早强剂等混磨而成。ZKD 型高水速凝充填材料性能可根据具体条件进行配制与调整。

1.1 高水材料水化机理

硫铝酸盐水泥熟料主要有效矿物成分 $C_4A_3\bar{S}$ 和 β-C_2S 的水化过程和产物决定着 ZKD 材料的物理力学性能。

在反应体系中，存在适量的石膏和石灰下，ZKD 材料加水后，其中的无水硫铝酸钙（$C_4A_3\bar{S}$）就水化生成大量的钙矾石，每 1 mol 的 $C_4A_3\bar{S}$ 可生成 3 mol 的钙矾石，反应方程式如下[1]

$$C_4A_3\bar{S}+8C\bar{S}H_2+6CaO+80H_2O\longrightarrow 3\left(C_3A\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O\right) \quad (1)$$

甲料中另一矿物组分 β-C_2S 水化时生成水化硅酸钙凝胶，放出 $Ca(OH)_2$，并最终与水化体系中 $Al_2O_3\cdot 3H_2O$ 和 $CaSO_4\cdot 2H_2O$ 反应生成钙矾石，其反应方程式为[1]

$$3Ca\left(OH\right)_2+3C\bar{S}H_2+AH_3+20H_2O\longrightarrow C_3A\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O \quad (2)$$

但是，在反应体系中如果没有石膏参加反应，$C_4A_3\bar{S}$ 的水化反应是不能生成钙矾石的，只有当适量的石膏存在时，水化反应才可生成钙矾石，1 mol 的 $C_4A_3\bar{S}$ 只能生成 1 mol 的钙矾石，反应方程式如下[1]

$$C_4A_3\bar{S}+3C\bar{S}H_2+34H_2O\longrightarrow C_3A\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O+2Al_2O_3\cdot 3H_2O \quad (3)$$

只有当石膏、石灰同时适量存在，才可按（1）式进行反应，生成尽量多的钙矾石。

1.2 高水材料性能

在结石率为 100％的前提下，高水材料具有以下特性[1]：

（1）水灰比可调范围大，一般为 0.5～3.0，凝结时间可控，可控范围 1～30 min，可满足不同工程需要。

（2）甲、乙两浆液单独放置 24 h 不凝结，可泵时间长。

（3）固化体微膨胀，与岩壁粘结力强，注浆堵水后，不会出现水量回升等返水现象。

（4）材料颗粒小，其比表面积可达 6 000～8 000 cm^2/g，材料可注入细小的裂隙，具有较好的可注性。

（5）具有“亲水”性能。实验室试验表明，高水材料固化体在水中长期浸泡，强度不会降低，反而会略微升高。

（6）固化体强度高，力学性能良好。在不同水灰比下，其力学性能见图 1[2]。

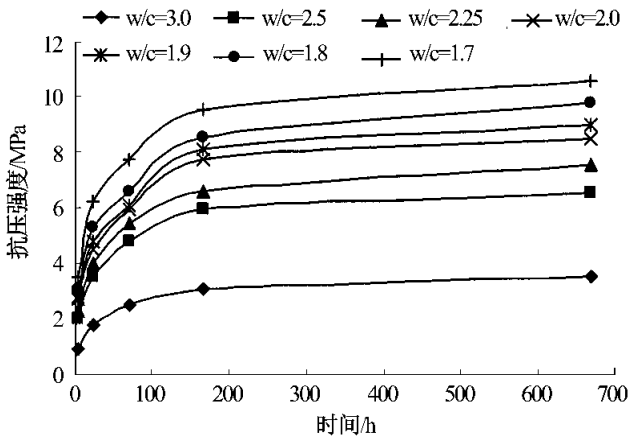


图 1　不同水灰比单轴抗压强度与时间关系曲线

Fig. 1　Relation curve between uniaxial compressive strength and time of different water-cement ratio

（7）高水固结充填体具有独特的重结晶和强度再生特性[3]。高水材料硬化体压裂后，在不失水的情况下存放一段时间后，压裂的高水材料硬化体裂隙能够重新弥合而恢复强度[4]。

2　高水材料在矿井生产中的应用

2.1　高水材料充填采空区

充填工艺不仅可以减少地下开采对地面沉陷造成的危害，减轻井下巷道和工作面受采动影响，便于顶板管理，有利于安全生产、改善巷道维护及运输、通风和瓦斯管理，而且对实现绿色开采、美化生态环境有重要意义。

传统的充填材料有矸石、碎石、砂卵石、山砂、河沙和工业废渣等，采用水力输送方式、通过充填管路将充填料浆送人采空区进行充填。但由于采用水力充填采空时需消耗大量充填材料，充填工艺艺复杂，全部人工操作，且由于输送时易造成输送管路堵塞、输送成本高等原因未能得到广泛的应用[5]。高水材料具有用料少、材料颗粒小、单浆可泵时间长（距离长）、浆液流动性强、工艺系统简单、成本低以及凝结时间短、固化强度高等优点。高水充填料浆在采空区不脱水，充填体接顶率高，尤其是在仰采情况下，可采用开放式充填工艺，采充周期短，提高采场生产能力，对井下环境基本无污染[6]。是一种理想的新型充填材料。

河北邯矿集团陶一煤矿自 2008 年 9 月以来，在井下生产中尝试采用高水材料开放式充填技术，取得了良好效果。该矿在此基础上总结经验，根据充填工作面下段单体炮采的实际情况。找出控制工作面直接顶不跨落的方法，确保地面不受采动影响，在充填工作面进行了高水材料包式充填试验。至 2009 年 4 月，工作面机头充填 28 m，机尾充填 26 m. 工作面共计充填包体 61 个。该工作面采高 1.9～2.2 m。采空区直接顶除局部掉矸外，整体没有出现垮落现象，充填体在可观测范围内没有出现明显变形。

此外，高水材料也较多地被应用于金属矿山的采空区充填（被称之为“高水固结全尾砂充填采矿工艺”），且使用效果良好，取得了较好的社会效益和经济效益。

2.2　高水材料在沿空留巷技术中的应用

沿空留巷是将上区段的运输巷保留下来，作为下一区段的回风巷使用；或者是在高瓦斯矿井中，将本区段一回采巷道保留下来形成 Y-型通风，以避免工作面上隅角瓦斯积聚，同时可抽采邻近煤层瓦斯。沿空留巷不仅可以提高矿井采出率，而且可以缓解采掘接替紧张的

局面。从资源回收和高产高效的角度来看，沿空留巷技术是未来煤矿发展的趋势。

传统的留巷方式主要有在巷旁架设木垛、密集支柱、矸石带或混凝土砌块等，但均存在较大的缺陷。如[7]：木垛巷旁支护增阻速度慢、可缩量大、支护阻力小、巷道控顶宽度大、木材消耗量大、不能密闭采空区且留巷效果较差；密集支柱留巷可缩量与支护阻力小、稳定性较差、木材消耗量大同时也不能密闭采空区，留巷效果也不理想；用矸石带留巷法因可缩量大、前期支护阻力较小，不能及时控制顶板，常常会造成顶板下沉量较大，此外也存在劳动强度大与密闭采空区效果差的缺点；用混凝土砌块法留巷，存在可缩量小、成本高、劳动强度大以及辅助运输环节复杂缺点，应用受到很大限制。上述留巷方法的支护阻力以及可缩性等与沿空留巷围岩变形的适应性都较差，密闭采空区效果也差，对巷道维护、防采空区漏风以及防自然发火不利，特别是机械化程度低的缺点阻碍了这些技术的推广与应用。

随着高水速凝充填材料的开发成功，留巷技术水平得到了大幅度提高，因其凝固速度快、早期强度大、增阻速度快、密闭采空区效果好、留巷效果佳及水用量大、固体料用量少、易于泵送、机械化程度高、劳动强度低，是一种理想的巷旁充填材料。

邯郸矿业集团陶一煤矿采用中国矿业大学研制的新型高水速凝充填材料，使用时，甲、乙 2 种料以重量比 1:1 配合，分别加水搅拌形成浆体，然后混合，泵入具有抗风化、抗静电、接顶性能好的充填袋中，充填袋不仅可以使充填体成形，而且可以保证浆体固化后含水率接近 90%，避免高水材料风化[2]。此外，在充填袋中置入锚栓后，可使充填体两侧表面由二向受力状态变成三向受力状态，其承载与抗变形能力可大大提高[7]。

采用高水材料作为沿空留巷巷旁充填材料不仅具有很大的技术优势，而且与新掘进巷道相比经济上也较为优越。以冀中能源邯矿集团陶一煤矿 12701 工作面沿空留巷为例[7]：沿空留巷综合成本（包括人工、材料等）每米约 3 000 元，而目前掘进巷道综合成本（巷道断面为 4.5 m×2.6 m）约 4 500 元，每米可节约资金 1 500 元，另外可以解放两个工作面之间的煤柱，煤柱宽度按 10 m 计算，高度按 2.3 m，工作面走向长按 500 m 计算，可以多回收煤炭资源 2 万 t，可创经济效益 740 万元，可获利润 200 万元，经济效益十分可观。

到目前为止，已经在陶一矿、郭二庄煤矿以及亨健矿等不同条件下进行了新型高水速凝充填材料巷帮充填沿空留巷工业性试验研究，都取得了成功。

2.3 高水材料封堵岩壁裂隙防治漏风

煤炭自燃是我国矿井的主要灾害之一，长期以来严重威胁煤矿的安全生产和影响矿井的经济效益。在我国国有重点煤矿中存在有煤炭自燃的矿井占矿井总数的 56%，因煤炭自燃而引起的火灾占矿井火灾总数的 90～94%[8]。对于煤矿高瓦斯易燃煤层采空区火灾，可采用高水材料封堵漏风裂隙，灌注粉煤灰隔绝带进行采空区快速灭火，而采空区火灾封堵漏风是灭火措施成功的关键。

采用高水材料做为封堵漏风材料，其机理如下[9]：由泥浆泵压力通过钻孔注入漏风通道的岩石裂隙中，高水材料发生反应，生成长针状、柱状高结晶水化物钙矾石，长针状、柱状结构交织在一起形成了坚固的网状骨架，骨架中含有大量结晶水，网状骨架象海绵一样吸咐着大量游离水。高水材料矿化体充填于裂隙中隔离漏风通道。特别是当岩层来压再度破坏后，由于材料中游离水存在的条件下，充填凝固体受压破坏有重新再结晶能力，因此具有很好的封堵漏风的作用。

通化矿区苇塘矿一井采用高水材料封堵漏风裂隙，灌注粉煤灰隔绝带进行采空区的技术途径从而达到了快速灭火的效果。该矿漏风通道压力充注封堵方法如下[9]：

（1）喷混凝土巷道漏风的封堵。巷道断面内压注充填孔一般布置之 1～2 个，孔深钻入混凝土碹后岩壁 0.2～0.3 m，每组钻孔间距沿巷道根据高水材料流动情况每 8～20 m 布置一组钻孔即可，注浆孔内插入注浆管，封孔后联接注浆管路即可压注高水材料。

（2）岩壁裂隙及岩石破碎带漏风封堵。将注浆孔钻入有裂隙岩层内 1.5 m 左右，插入注浆管封孔后压力充注高水材料，使岩壁破裂带形成 1 m 以上的岩层裂隙及岩层破裂带间隙充满高水材料凝固体，如有更大空间可以补充压注粉煤灰充填。

（3）巷道局部空顶的充填处理。巷道局部空顶区，由于围岩受上覆岩层作用产生变形，岩层裂隙漏风，是自然发火危险区域，空顶的处理：在空顶下 1/2 采用高水材料加粉煤灰混合充填，上部采用粉煤灰直接填入剩余空间，全层充填改善了支架空顶区的受力状态，充填体重量低，减轻了支架的承载压力，粉煤灰的致密性及高水材料的流动性使岩石裂隙使充填巷道的稳定性得到加强，又消除了漏风及自然发火危险。

（4）密闭墙及其附近漏风封堵。在密闭墙外 0.4～0.5 m 处构建临时封闭墙，中间充入高水材料，密闭墙周边巷道打压注孔，对四周巷壁漏风进行压力充注高水材料。

采空区周边裂隙漏风通道封堵后，接着灌注粉煤灰隔绝带。其采空区灭火效果如下[9]：采空区漏风裂隙高水材料充注由+250 m 大巷开始，共用 15 个小班充注高水材料 15.3 t，封堵漏风巷 26.5 m，漏风裂隙面积 217.05 m^2 漏风源封堵结束。至此受火区影响停产的+300～+500 m 北翼采区正式恢复生产。

2.4 高水材料在注浆堵水技术中的应用

注浆法是矿山岩层防治水比较普遍采用的有效方法之一。注浆法是依靠注浆泵的作用，将预先配备好的并能凝结固化、且具有充填密实性能的浆液通过注浆管路、封孔管及注浆孔压注进岩层渗水空隙（孔隙、裂隙、空洞等）中，浆液在注浆压力的作用下，或挤走岩层裂隙中的水，或直接与岩层裂隙中的水进行化学反应，并最终凝固、硬化、充填裂隙，堵住地下水源流向巷道、井筒的通路，达到减少或避免地下构筑物涌水或渗水的目的[10]。

而注浆所用的材料种类较多，传统的有石灰、粘土、水泥浆、高分子有机化学浆液以及水泥——水玻璃等。其中石灰、粘土、水泥浆等。因其颗粒大、可注性差或凝固体强度低以及结石率低等缺陷而影响使用；尽管高分子化学浆液在堵水中应用效果很好，但因其价格太高使用户难以接受；水泥——水玻璃浆镀在注浆堵水中效果尚可，但它一个致命的弱点是固化体受水的浸泡而发脆且固化体微收缩，强度大幅度降低，这样往往造成披封堵住的水又开始渗漏，水量回升，这样就不得不进行多次注浆，给生产部门带来诸多麻烦[1]。

理想的注浆材料应满足以下要求[1]：（1）粘度低、流动性和可注性好，能进入细小裂隙；（2）浆液凝固时间易调节；（3）稳定性好，在流动过程中不产生分层、离折现象；（4）浆液固化体无收缩现象，结石率高，结石体抗渗性好；（5）固化体抗水侵蚀能力强；（6）材料来源广，价格低廉。

ZKD 高水速凝材料具备上述性能，其混合浆液在液态、凝胶态和固态三种不同状态都具有不同程度的屏蔽静水涌出的能力，此外该浆液具有浆液扩散所需要的流动性，又可以迅速地不析水而形成高结石强度的堵水帷幕，因此其具有良好的堵水效果[11]。

河南车集矿副井井筒水文地质条件复杂，虽然井筒施工时都进行了工作面预注浆，但井筒施工后，仍然渗漏水严重。为此，该井筒原施工单位用水泥—水玻璃对其进行了两次壁后注浆，之后不久，水量又回升，后又由专业注浆队再次用水泥—水玻璃进行了第 3 次注浆，但时隔不足半年，水量又回升至 58 m^3/h。为彻底解决井筒渗漏水问题，采用了由中国矿业

大学研制的 ZKD 型高水速凝充填材料，对井筒进行第 4 次注浆。由于井筒已经过多次注浆，导致壁后水路复杂以及井筒上渗漏情况和出水点大小不一，因此，需要根据出水点水量的不同来调整注射浆液的水灰比[1]（注浆压力均为 6 MPa）：出水点水量在 0.8 m^3/h 左右时，浆液水灰比可选 1.0～1.2；当出水水量达 1.5 m^3/h 以上时，注浆水灰比应降低至 0.8:1；对于渗透性差，裂隙细小出水点，则需采用水灰比大于 1.5:1 的浆液来进行注浆。

其注浆效果如下[1]：注浆段高 100 m，涌水量由原来的 42 m^3/h 降至 4 m^3/h，堵水率达到 90%，且没有发现返水现象。实践表明高水材料是一种理想的注浆材料。

2.5 高水材料在煤层注水封孔技术中的应用

煤层注水是通过密封在钻孔内的注水管，将水注入钻孔并渗入煤体。封孔就是把注水管封在钻孔内，使注入水无法从钻孔内泄出，只能沿煤层裂隙向深部渗透[13]。但是，对于“三软”难封孔煤层，达到上述要求就比较困难。水泥砂浆封孔在煤层注水中应用较多，因此工人施工操作比较熟练；但该技术在“三软”煤层中使用，存在封孔不严、漏水、窜孔、出现“月牙”离层等一些问题。封孔器封孔工艺简单，但对钻孔质量、注水设备等要求较高，在“三软”煤层中使用，存在塌孔压死封孔器，造成封孔器不能复用等一些问题，严重制约着煤层注水的实施[12]。

高水材料凝结时间短，固化体强度高，最为关键的是高水材料固化过程中具有微膨胀的特点，使得封孔材料固化体与孔壁的接触更强，提高了密封性，这一特点对封孔具有积极意义。因此，高水材料是很好的封孔材料，它完全能满足注水封孔的需要。

邢台矿务局显德旺矿 1723 工作面使用高水材料封孔，取得了较好的封孔效果。其高水材料封孔工艺如下[12]：

高水材料封孔时，采用的注水管外径为 20 mm、壁厚为 2 mm 的塑料管。管长可选 2 m，管与管之间通过用同类材料制成的接头用粘合材料连接起来。最后一根注水管，应采用相同直径、长为 0.8 m 的钢管。为确保塑料注水管能被高水材料浆液均匀地包裹起来，使其具有可靠的耐压性，可在管的一端，距端头 200 mm 处开始在圆周上焊上塑料板条或粘上木条以扶正。木条长 70 mm、宽 10 mm，与管接触的一面呈凹弧形，曲率半径与管的曲率半径相同。三个木条在管圆周上互成 120°，在轴线方向上首尾相距 30 mm。粘木条后的分布圆直径应比钻孔直径小 3~4 mm。高水材料层厚度不应小于 13 mm。在注水管上距前端管口 150 mm 处，将布条或绵纱均匀分布在管圆周上做一个浆液堵头，用钢丝捆紧，捆有布条处的直径要比封孔直径小些，以保证能顺利送进孔内。将捆有布条的注水管蘸上高水材料再送进钻孔，随后逐根送入孔内。管接头要严密连接。送完注水管后，将注水管轻轻向后拉一下，使布条在孔内固紧。这时就可用手摇泵将液体灌入钻孔。

该封孔试验取得了成功，所封的 21 个孔中，孔内没有出现漏水、窜孔现象。从注水量可看出封孔效果，达到了预期注水量，取得了煤层注水预期目的[12]。

2.6 高水材料用于 U 型钢支架壁后充填

我国使用 U 型钢可缩性支架已四十多年，获得较大发展，但在我国煤矿巷道中使用情况却并不乐观，特别是在软岩巷道中。存在的最主要问题是支架承载能力低、损坏变形严重，不能有效地控制巷道围岩变形其主要原因是支架壁后无充填或充填不密实，其次是支架架型及其参数选择不合理，连接件及背板质量差等所以，要从根本上改善和提高其支护效果，就必须在合理选择架型及提高连接件和背板质量的基础上，对支架壁后进行有效充填，改善支

架受力状况，提高围岩和支架自身的承载能力[14]。

理想的充填材料是实现壁后充填良好效果的前提。壁后充填材料应具有如下性能[14]：（1）有较高的早期强度和一定的后期强度。在传递围岩压力直至达到支架极限承载能力范围内，充填层应能保持完整或有一渐进的破裂过程，以保证其良好的力学传递性能；（2）其浆液有良好的流动性确保壁后充填层的密实和均匀；（3）应具有良好的抗水解性能，保证壁后充填层性能长期稳定；（4）应具备良好的工艺性能。泵送充填时应具备可泵性；（5）加水固结后，其体积应微胀而非收缩。

ZKD 高水材料具备上述性能。采用高水材料进行壁后充填，其作用机理如下[14]：

实施壁后充填后，支架的受力状况得到改善，使支架沿周边承受均布载荷，导致巷道围岩与支架相互作用体系发生了变化，即从无壁后充填情况下的“支架—围岩”作用体系变成了“支架—充填层—围岩”三位一体的作用体系，支架与充填层组成了复合支护结构，将无壁后充填情况下支架单独对围岩作用变成了支架与充填层共同对围岩的作用。通过壁后充填层将支架联成一体，形成共同承载体，对于发挥围岩的自承载能力更为有利。此外，高水材料充填体可封闭围岩表面，阻止围岩风化和水的侵蚀，避免围岩遇水软化、膨胀崩解，其浆液又可渗透到围岩的裂隙中，起到加固作用，从而提高了围岩的自承能力。

淮南矿务局潘一矿西三总回风巷采用了中国矿业大学研制的 ZKD 高水材料进行 U 型钢壁后充填试验，对比试验了两段巷道，第一段有壁后充填，第二段无壁后充填。巷道布置在煤层中，为半煤岩巷，埋深约 540 m。维修时架设 25 kg/m 的 U 型钢可缩性支架，采用金属网、水泥背板护帮及接顶，棚距为 0.6 m。两段巷道对比结果如下[14]：第一段的顶底、两帮平均移近速度很低，而第二段则较大，有壁后充填段明显优于后者。从采动影响前至影响后这两段相比，可以得出结论：二段的顶底总移近量为 89.6 mm，移近速度峰值为 2.0 mm/d，影响范围约 160 m，影响峰值区滞后约 4 m；一段的顶底总移近量仅为 38.6 mm. 移近速度峰值为 0.68 mm/d，影响范围却只有 50 m. 且影响峰值区基本和采动支承压力同步（超前 3m）。

试验结果表明[14]：U 型钢支架壁后实施充填后，充填层使围岩与支架接触紧密，改善了支架受力状况，提高了支架承载能力，使巷道顶底、两帮移近量明显低于没有实施壁后充填的支护段，巷道维护效果明显改善。巷道断面收缩率仅 2.05％。所以，高水速凝充填材料是一种理想的壁后充填材料，而 U 型钢支架壁后充填技术，则是改善 U 型钢支架性能的有效途径之一。

2.7 高水材料在其他领域的应用

高水材料除上述用途外，还可用于道路紧急抢修及港口工程注浆加固和抢修抢建。高水材料若用于港口加固和抢修，其各项性能定会受水温的影响，水温虽然不会对高水材料硬化体的最终强度产生影响，但对其早期强度却能产生很大影响，这种影响是通过改变其初、终凝时间来实现的。水温越高，高水材料初、终凝时间越短[15]。此外，高水材料浇注后的养护工作对其后期的性能也很重要。试验表明[15]，只要不是特别干燥的环境，都不需要对其进行洒水养护，其内部的水分完全可以满足化学反应的要求。所以，最主要的是防止其充填体曝晒在阳光下而导致失水，这只要在其充填体的表面加盖潮湿物遮挡阳光即可。

湛江某军港对其护岸底部被淘空部分，采用了高水材料对其进行注浆加固，考虑到被淘空护岸内部有块石、碎石及细砂，故其灌浆体的强度估计较高，为增加其流动性而采用水固比 1.8:1，在水温 27℃的条件下进行浇注，浇注前先在淘空部顶端打孔，采用普通泵送机和

25 mm 硬胶管以 0.3 MPa 的压力向打孔处浇注。3 min 后发现护岸底部与海水接触处有部分浆体溢出，表明浆体流动性过大，初凝时间过长。改用水固比 1.5:1，在同样条件下浇注，底部只有少量浆体溢出，表明流动性和初、终凝时间都刚好满足要求[15]。施工后用湿草席覆盖于浇注体表面。经测试，浇注体后期各项性能指标均满足要求。

3 结论

1. 与传统采空区充填材料相比，高水材料优点显著。其充填料浆在采空区不脱水，充填体接顶率高，尤其是在仰采情况下，可采用开放式充填工艺，采充周期短，提高采场生产能力，对井下环境基本无污染。实践表明，高水材料充填采空区效果良好。此外，高水材料也被广泛地应用于金属矿采空区充填，效果显著。

2. 高水材料凝固速度快、早期强度大、增阻速度快、密闭采空区效果好、留巷效果佳及水用量大、固体料用量少、易于泵送、机械化程度高、劳动强度低，是一种理想的沿空留巷巷旁充填材料，采用充填袋可使充填体成形，保证浆体固化后含水率，避免高水材料风化。此外，在充填袋中置入锚栓后，充填体的承载与抗变形能力可大大提高。与新掘巷道相比，采用高水材料作为巷旁充填材料进行沿空留巷其经济性较为优越。

3. 采用高水材料做为封堵漏风材料，由于高水材料具有亲水特性，且充填凝固体受压破坏有重新再结晶能力，因此具有很好的封堵漏风的作用。与灌注粉煤灰隔绝带方法相结合，可以达到采空区快速灭火的效果。

4. ZKD 高水速凝材料混合浆液在液态、凝胶态和固态三种不同状态都具有不同程度的屏蔽静水涌出的能力。其浆液又具有浆液扩散所需要的流动性，可迅速地不析水而形成高结石强度的堵水帷幕，因此其具有良好的堵水效果。此外，注浆时，可以根据出水点的水量来调整注射浆液的水灰比，以取得预期的堵水效果。

5. 高水材料凝结时间短，固化体强度高，最为关键的是高水材料固化过程中具有微膨胀的特点，使得封孔材料固化体与孔壁的接触更强，提高了密封性，这一特点对封孔具有积极意义。因此，高水材料是很好的封孔材料。

6. 高水材料可用于 U 型钢壁后充填，使支架沿周边承受均布载荷，作用体系也由原来的无壁后充填情况下的“支架—围岩”变成了“支架—充填层—围岩”，从而提高其承载能力并保证了支架良好的可缩性能。此外，高水材料充填体可封闭围岩表面起着保护围岩的作用，其浆液又可渗透到围岩的裂隙中，起到加固作用，从而提高了围岩的自承能力。

7. 高水材料还可用于港口工程注浆加固和抢修抢建。水温不会对高水材料硬化体的最终强度产生影响，但会影响其初、终凝时间，从而影响其早期强度。工程实践中，可通过改变高水材料的水灰比，使其流动性和初、终凝时间满足要求。另外，还应注重浇注体后期的养护，保持其含水率，使各项性能满足要求。

[参考文献] (References)

[1] 冯光明，侯朝炯，贺永年. 高水材料及其在井筒注浆堵水工程中的应用[J]. 东北煤炭技术. 1998（6）：22～24.
[2] 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. 2010，15（1）：58～61.
[3] 胡　华，崔明义. 高水材料硬化体特性及其充填体力学作用机理分析[J]. 矿业研究与开发. 2001，21（5）：46.
[4] 宋存义，陈克，汪辉. 高水材料的水化硬化反应机理的研究[J]. 矿物岩石地球化学通报，1999（6）：55～57.
[5] 王　飞，张东峰. 采空区充填法的应用现状与发展前景[J]. 科技情报开发与经济. 2009，19（33）：110～

111.
[6] 王培月. 高水材料固结尾砂充填工艺在玲珑金矿的应用[J]. 中国矿业，2004，13（9）：50～52.
[7] 潘海良，卢志敏. 高水材料巷旁充填沿空留巷技术研究与应用[J]. 中国煤炭. 2009，35（8）：48～50.
[8] 卢国斌，耿　铭. 采空区煤自燃机理及其防治技术研究现状[J]. 辽宁工程技术大学学报. 2009，28：38～30.
[9] 冯建华，冯　杰. 高水材料与粉煤灰封堵采空区灭火[J]. 煤矿安全. 2004，35（4）：16～55.
[10] 宋彦波，刘洪涛，李英明. 有机高水注浆堵水材料堵水机理分析[J]. 煤炭科学技术. 2004，32（11）：18～20.
[11] 陈国锋，杨米加. ZKD 高水速凝材料浆的流动性能及其堵水机理的研究[J]. 山西煤炭. 1997，17（5）：29～32.
[12] 高清雯. 高水材料在煤层注水封孔技术中的应用研究[J]. 中国矿业. 2009，18（8）：103～105.
[13] 张英华. 综放工作面煤层注水防尘理论与工艺技术研究[D]. [硕士论文]. 北京：中国矿业大学北京研究生部，1998.
[14] 冯光明，张少华，马中国. 高水材料用于 U 型钢支架壁后充填[J]. 矿山压力与顶板管理. 2000，1：46～48.
[15] 侯林涛，唐军务，蒋凯辉. 高水材料的基本特性及其在港口工程中的应用[J]. 水运工程. 2007（5）：54～56.