



复杂地层堵漏与护壁

第三讲 水泥护孔

利用水泥浆注入地下岩层作为堵漏、防渗和加固基础等手段,在地质勘探、石油钻井、水工建筑等部门已有悠久的历史。它具有原料来源广、价格便宜、结石体强度高、抗渗性能好和操作简单等优点。

但是,由于普通水泥浆的初、终凝时间长,凝固时间不能准确控制,早期强度低,强度增长率慢,如配制方法不当或灌注工艺不合理,水泥浆在孔内甚至不能凝固,造成灌注失败。因而使用水泥护孔长期以来一直未能得到普遍推广。

近年来,国内外许多部门对改善水泥浆性能和灌注工艺等做了大量工作。在提高水泥浆可灌性、缩短凝固时间、提高早期强度、减少泌水性和收缩性等方面取得了较大进展。特别是各种适应堵漏防渗等抢修工程的水泥新品种和各种高效速凝剂的出现,为进一步扩大水泥护孔的应用开拓了新的前景。

文化大革命以来,不少地质勘探单位由于正确掌握水灰比,合理使用速凝剂,无论在处理风化破碎的松散层、硬脆碎的破碎带,或是严重漏失的裂隙溶洞层,都有不少成功的经验。有些单位如湖北冶勘黄梅会战指挥部等,水泥护孔已经成为对付复杂地层的基本手段。实践证明,把注水泥作为堵漏和防塌的基本措施,不但有必要而且也是完全可能的。

一、水泥凝固硬化过程及其护孔机理

护孔常用的水泥是普通硅酸盐水泥,它是一种水硬性的胶凝材料。水泥所以具有水硬性,是因为锻烧水泥熟料过程中生成某些新的矿物,如硅酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$,简称为 C_3S)、硅酸二钙($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$,简称为 C_2S)、铝酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$,简称为 C_3A)和铁铝酸四钙($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$,简称为 C_4AF)等,它们在磨细条件下很容易与水发生化学反应,生成新的水化物,进而凝结硬化。

这四种主要矿物的水化速度由快至慢顺序是: $\text{C}_3\text{A}-\text{C}_4\text{AF}-\text{C}_3\text{S}-\text{C}_2\text{S}$ 。 C_3A 是影响水泥早期强度及凝结快慢的主要矿物。 C_3S 水化生成物所表现的早期与后期强度均较高,而且增长较快,它是决定水泥标号高低的主要矿物。因此,要制造快硬高强度的水泥就必须提高 C_3S 及 C_3A 的含量。

当水泥加水调和后,最初形成具有可塑性的水泥浆。由于组成水泥颗粒的各种熟料矿物在结构上都处在极不稳定的状态,所以遇水就发生了一系列的化学反应。水化产物是一些极细的线状、片状和板状的胶粒,它们溶于水水泥浆形成的网状结构的充水空间,形成一种松软的结构,这个过程称为凝结。随后这种松软结构将被不断增加的水化产物所填充和加强,这样就把原来彼此隔离开来的固体粒子联系起来,同时大大地限制了固体粒子的运动,使强度得以逐渐提高,最后变成坚固的石状物——水泥结石体,这一过程称为硬化。

水泥浆的凝结和硬化是一系列复杂的化学反应及物理化学反应过程。凝结和硬化的进行是互相交叉而不能截然分开的。其大致变化可用图1表示。

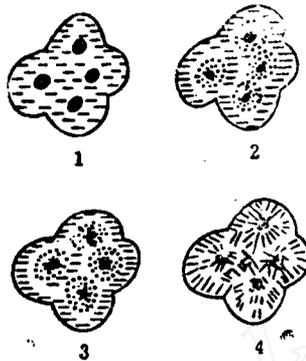


图1 水泥凝结硬化过程示意

- 1.水泥颗粒与水拌合；2.水泥和水起作用，一部分溶解在水里变成水泥浆；3.在水泥颗粒周围结成线状、片状、板状的胶粒；4.溶液逐渐转成晶体而硬化。

影响水泥凝结硬化速度的因素很多，除矿物成分外，尚有水泥颗粒的细度，拌和时的水灰比，凝结时的温度和其他盐类的存在等。

水泥粉磨得愈细，水化作用愈迅速而充分，因而凝结硬化愈快，早期强度亦能提高。

水灰比是指水泥加水拌和时用水量与水泥重量的比值。它是影响水泥流动性、凝固时间和机械强度的重要因素。它们之间的关系如图2所示。由图2可知，在保证必要流动性的前提下，应尽量降低水灰比。掌握好水灰比是灌注水泥工艺中的关键问题。

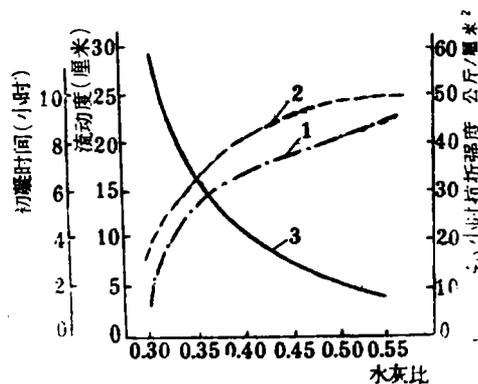


图2 水灰比与水泥物理机械性能关系

- 1.初凝时间；2.流动性；3.抗折强度

水泥中各种矿物成分的水化速度都随温度的增加而急剧地加快，所以水泥浆的凝结时间也随温度的升高而缩短（图3）。

水泥护孔的机理就是利用水泥浆在凝固前具有的流动性，借助水泵或孔内灌注工具压入地层的裂缝和孔隙中并在其中凝固硬化，将缝隙堵塞或把松散的岩石胶结起来，提高孔壁岩石的稳定程度，从而达到堵漏和护壁的目的。显然，性能好的水泥浆，在灌注时应有一定的流动性，到达岩石缝隙之后，要能迅速胶凝和硬化，结石体的早期强度要能迅速地增长。这就是我们研究水泥护孔效果的主要内容。

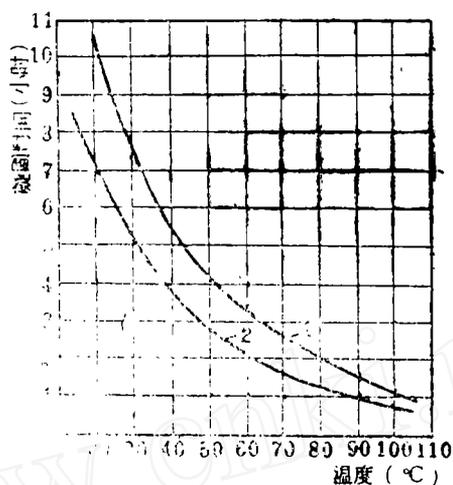


图3 温度对水泥凝固时间的影响

1.终凝; 2.初凝

二、水泥浆的配制及灌注方法

1. 水泥浆的配制

灌注水泥浆之前应按孔径、灌注高度及水灰比来确定水泥用量。表1是每袋水泥可灌注的钻孔长度，实际使用时根据具体情况加上适当的附加值即可。附加系数一般取1.8~2.5。

表1

钻孔直径 (毫米)	每米钻孔理 论容积(升)	不同水灰比每袋水泥灌注长度 (米)					
		35%	40%	45%	50%	55%	60%
150	17.67	1.85	2.03	2.18	2.30	2.46	2.57
130	13.27	2.50	2.71	2.90	3.06	3.27	3.43
110	9.50	3.50	3.78	4.06	4.25	4.57	4.79
91	6.50	5.12	5.53	5.94	6.26	6.68	7.00
75	4.42	7.54	8.13	8.68	9.19	9.84	10.27
66	3.42	9.75	10.28	11.28	11.90	12.80	13.30

配制时，力求加量准确。搅拌时应尽量用搅拌机，避免人力搅拌不匀。加料时一定要先注水，在搅拌的情况下加入水泥，以免卡住搅拌机。

孔较深，水泥用量较多时，最好使用混合漏斗（图4），可提高配制速度和质量。

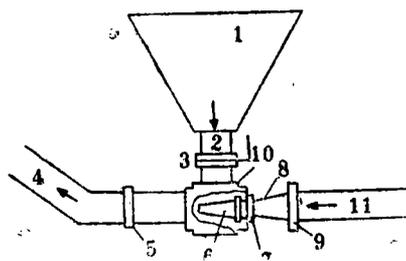


图4 水泥混合漏斗

1.漏斗; 2.接头; 3.蝴蝶阀; 4.出口管; 5.活接头; 6.喷嘴; 7.补心; 8.大小头;
9.活接头; 10.三通; 11.送水管

使用混合漏斗时，要均匀而连续地供给水泥及所需水量。漏斗上部应装上筛网，以防结块水泥堵住混合室。出口管要装成具有 $8\sim 10^\circ$ 仰角，使混合室被水充满以保证必要的真空度。水泵高压水从喷嘴喷出时，在漏斗下部形成真空，从而把干水泥粉吸入至混合室中与水急剧混合而成水泥浆，经出口管流到储浆池。

添加固体速凝剂如氯化钙、碳酸钠、食盐等，应先用一定量清水使之溶解成液体，然后加入水泥浆中。其溶解所需水量应算入配浆所需水量内。

2. 水泥浆的灌注方法

注水泥浆的方法有孔口倒入法、水泵注入法、输送器注入法和孔底混合法等。可根据具体情况选用。

孔口倒入法用于孔深在10米以内。灌注时在井口管上安装漏斗，水泥浆由漏斗注入。孔深超过10米，可在漏斗下接注浆导管（钻杆），使水泥浆经导管注入地层。

当水灰比在45%以上，注入量较大，孔较深时，应用水泵注入法。灌注时把钻杆下到被封闭孔段下部，使水泥浆由下往上返，这样可减少孔内冲洗液对水泥浆的稀释，另一方面也使水泥浆易于灌进地层裂隙，提高封堵效果。

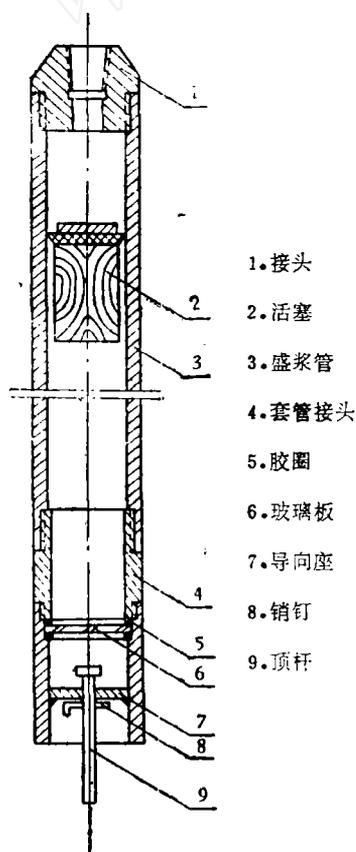


图5 水压活塞式输送器

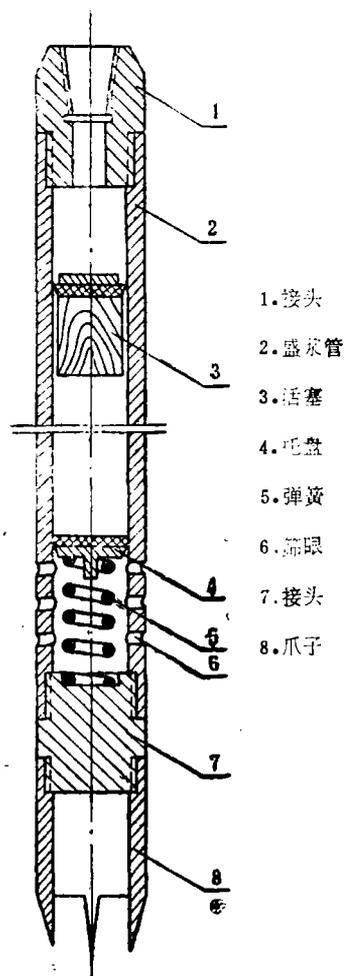


图6 水压活塞弹簧式输送器

堵塞大裂隙或溶洞，为了减少水泥浆的流失，往往选用水灰比低的浓泥浆或速凝混合物，这时用孔内输送机注入法。当封闭孔段较短，水泥浆用量不多时，也可考虑用此法。

图5是水压活塞式孔内输送机。使用时先在地面把玻璃板和顶杆装好。顶杆用销钉穿牢。水泥浆倒入盛浆管后装上活塞和钻杆接头，用钻杆送入灌注孔段。到达预定深度后，轻轻冲击输送机，剪断销钉，顶杆顶破玻璃板，同时开泵送水顶压活塞，使水泥浆通过筛眼挤出。

图6是水压活塞弹簧式输送机。特点是下部靠弹簧支持托盘密封，工作可靠。灌注时在泵压作用下，弹簧被压缩，托盘下移，露出筛眼，水泥浆由此喷出。

孔底混合法是将水泥和速凝剂分别用塑料袋装好后投入孔内，再下入刮刀或三翼钻头，开车钻破塑料袋的同时，直接利用孔内清水把水泥浆配好，使水泥浆在短时间内就能凝固。

三、提高水泥护孔效果的技术措施

1. 添加水泥速凝剂

使用普通硅酸盐水泥或油井水泥时，为了缩短候凝时间，提高早期强度，可加入速凝剂。

水泥速凝剂的种类很多，常用的有氯化钙、水玻璃、食盐、石膏、纯碱等，以氯化钙使用最广，效果亦较好。以前氯化钙的加量为水泥重量的3%，现在有加到7%以上的。

目前已研制出几种特效速凝剂，如红星一号、“711”型、阳泉I型等。这些速凝剂的特点是加量少、凝固快、早期强度高，在岩心钻探护孔工作中有推广价值。“711”型速凝剂已应用于岩心钻探护壁堵漏工作，效果良好。阳泉I型速凝剂是山西省阳泉市建筑工程公司和中国科学院工程力学研究所共同研制成功的，是一种灰色粉末，对水泥具有速凝快硬作用，加入量适宜能在数分钟内凝结硬化，有较高的早期强度和增长较快的后期强度。

目前国内还普遍使用几种复合型的速凝早强剂，如三乙醇胺加氯化钠、三异丙醇胺加硫酸亚铁、硫酸钠加食盐加重铬酸钾，等等。在岩心钻探护孔工作中以使用第一种为最普遍。三乙醇胺的加入量为水泥重量的万分之五，氯化钠为水泥重量的千分之五。但孔内候凝时间需24小时左右，适当增大三乙醇胺的加量可缩短凝固时间。

用几种速凝剂混合配成速效混合液或快干水泥，能大大提高堵漏效果。例如：

(1) 冻胶水泥 1米³泥浆 + (500~800)公斤水泥 + (20~30)公斤水玻璃 + (10~15)公斤纯碱。孔内候凝时间4小时左右。

(2) 1232快干水泥 粘土粉：水泥：生石灰：氯化钙 = 1:2:3: (总量的2%)。孔内候凝时间3~5小时。

2. 添加水泥助胀剂

水泥浆稠化和凝固过程中，由于水与水泥之间发生水化等化学反应，生成物的总体积要小于原来水及水泥的总体积，这种现象称为水泥的收缩效应。水泥的收缩效应会降低水泥的堵漏防渗效果。为此，可在水泥中加入适量的助胀剂，或者将助胀剂与水泥混合制成膨胀水泥。这样，在水泥凝固和硬化的初期，由于助胀剂的作用，使得由水化及结晶作用所生成的固体物的体积较原来加大，抵销了水泥的收缩效应。

常用的助胀剂有铝粉。在建筑工程中配制膨胀水泥所用的助胀剂有高碱性水化铝酸钙、石膏及经800~900℃煅烧过的白云石。在国外还有以硫酸钠、氯化钠或火山灰做膨胀剂来配制油井膨胀水泥。也有用经高温煅烧取得的钙、铝、硫氧化物的混合物作为助胀剂的。

3. 添加塑化剂

为了降低水泥浆的粘度，增加它的流动性以提高灌注效果，可在水灰比低的浓水泥浆中加入塑化剂。

塑化剂是亲水性的有机化合物，能降低水泥颗粒间的分子吸附力，防止水泥颗粒相互粘结，使其更充分地分散在水中，形成溶胶状态，从而增加水泥浆的流动性。

常用塑化剂有亚硫酸盐酒精废液的浓缩物和苇浆废液的浓缩物（即芦苇造纸的废液直接浓缩而成）。塑化剂加量要适当，一般为水泥重量的0.1~0.3%，过多会延缓水泥浆的凝结时间，降低结石体强度。

4. 使用隔离液

隔离液是注水泥时在水泥浆前面注入的一种液体，它有清洗孔壁泥皮防止水泥浆与泥浆相混合及提高顶替效率的作用。

常用隔离液有三大类：

(1) 稀释型隔离液 与泥浆接触或混合后能降低泥浆的粘度和切力，使之易被水泥浆所顶替。另外，它对泥皮的浸透力也较强。属于这类隔离液的有石灰、食盐或表面活性剂的溶液，焦磷酸钠水溶液（2.86公斤/米³），盐酸和醋酸水溶液。

(2) 清洗型缓冲液 分两种：一是用加大水灰比或用紊流添加剂配成的稀水泥浆，一是由火山灰及膨胀珍珠岩加水配成的低粘度液体。

(3) 高粘度隔离液 亦称泥浆推移型隔离液，可在未达紊流条件下以“粘性推移”作用来顶替泥浆，在与泥浆接触处可形成粘稠过渡带，起有效隔离作用。

5. 研究、试用新的水泥品种

除普通硅酸盐水泥和油井水泥外，目前用于防渗堵漏等抢修工程的水泥新品种不断增多，如快硬和特快硬硅酸盐水泥、矾土水泥、快凝膨胀水泥、超早强水泥等。这些水泥的特点是凝固硬化时间短，早期强度增长快，对缩短护孔候凝时间有很大实际意义。如超早强水泥，据上海洋泾水泥厂试验资料，其强度增长如表2。

表 2

抗 压 强 度									公斤/厘米 ²
4小时	8小时	12小时	1天	3天	7天	28天	3个月	6个月	
185	427	535	639	785	770	790	900	925	

表2数据说明，这种水泥8小时的抗压强度就超过400#普通硅酸盐水泥的标号强度（28天）。堵漏实例：该厂的回转窑摆机坑道由于长期受激烈振动，底部开裂，因坑道地势低，水位高，水压大，用各种方法堵漏无效，后用超早强水泥堵漏并用砂浆抹面，半小时即堵漏完毕。值得提出的是，这种水泥较之矾土水泥对原料的要求比较低，能在低温下烧成，工艺简单，性能良好，如能大量生产，对护孔工作将是一个巨大的促进。

据报导，国外已研制成一种“防漏水泥”，它是由铝酸三钙含量在5%以下的硅酸盐水泥与适量的石膏水泥及氯化钙按一定比率混合而成。这种水泥所配成的水泥浆的最大特点是具有触变性，因而灌注性能好，堵漏作用可靠。另外，为了提高堵漏效果，还常在水泥混合液中加入一些充填物，如木屑、碎皮革、甘蔗渣等纤维物质，配制成所谓纤维水泥。这些纤维物质在岩层裂隙中能形成网状结构，既可减少水泥浆的漏失量，也有利于提高堵漏效果。

（中南矿冶学院地质系护孔教研组供稿）