

大型地下水封储库围岩快速补强灌浆体系^{*}

魏雪斐, 刘晓丽, 段云岭, 冯金铭

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要:地下水封储库工程对水封条件和水封效果要求较高,在施工期仍需保持高于洞顶的地下水位以保证水封效果。针对国内某大型地下水封储库的地质、结构和施工特殊性而出现的岩体灌浆难题,提出一套完备的技术体系,利用数字平台三维地质展示及破碎带预测提前预知地质情况,结合专用的早强快硬灌浆材料、牵引灌浆工艺,围岩补强一体化灌浆设备及相应检测手段,在工程不良地质区进行有效灌浆,较好地解决了地下水封储库灌浆难题。针对循环灌浆工艺发现基于硫铝酸盐水泥的灌浆材料在不同压力循环下水化放热峰值时间随循环时间的加长而缩短,抗压强度随循环时间的加长而降低。本文研究成果可为大型地下水封储库围岩快速补强灌浆提供重要依据和技术支持。

关键词:快速灌浆体系;数字预测预警;牵引灌浆工艺;压力循环

中图分类号:TE822

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)01-0200-12

Rapid Reinforce Grouting System for Surrounding Rock Masses in Large Underground Water-sealed Storage Caverns

Wei Xuefei, Liu Xiaoli, Duan Yunling, Feng Jinming

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. China)

Abstract: The large underground water-sealed storage caverns projects are quite different from traditional underground projects because the water-sealed conditions and effects are very strict for them. Especially in construction period, the water level must overtops the tunnels all the time in order to ensure its normal operation. In one of the large underground water-sealed storage caverns, it was encountered some grouting problems because of the specificity of geology, structure and construction. A series of solutions were proposed from these aspects: digital platform showed 3D geology model and faults to predict the geological conditions, grouting material which had high strength in early time, derive grouting technology that could expel water and leave cement in the microfissure, integral grouting machine and relative testing methods. These were applied in the poor geological sections and obtained good results. Considered about the problems of circulative grouting technology, a new type of grouting material was invented based on sulphoaluminate cement. By laboratory experiments, it is noticed that with the circulation proceeding, the hydration exothermic peak time reached earlier, and the peak temperature was higher if the pressure rose. The compressive strength would be reduced with the circulation lasting, and the long it lasts, the lower strength was. These results were very important to guide grouting construction and controlling in the projects.

^{*} 收稿日期:2017-07-10(修改稿)

作者简介:魏雪斐(1984-),男,山西太原人,博士,主要从事水利工程、地下工程等领域的科研工作。

E-mail:wxf0341@163.com

通讯作者:刘晓丽(1978-),男,山东泰安人,副教授,主要从事水岩作用及地下工程方面的科研和教学工作。

E-mail:xiaoli.liu@tsinghua.edu.cn

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013503,2013CB035902);国家自然科学基金优秀青年基金(51522903);国家自然科学基金(51479094,U1361103,51379104);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题(2015-KY-04,2016-KY-05)

Keywords: rapid grouting system; digital prediction and warning; derive grouting technology; pressure circulation

0 引言

我国在 20 世纪 70 年代曾在山东黄岛、浙江象山建设了两处地下原油存储试验库,总库容量分别为 $15\times10^4\text{ m}^3$ 和 $4\times10^4\text{ m}^3$,均位于花岗岩地层,无水幕系统。但之后中断了近 30 年,没有形成大规模石油地下水封储库设计、施工的完整技术。我国第一座自主设计并建设的 $300\times10^4\text{ m}^3$ 大型地下水封储库于 2010 年开工建设,目前主体工程已建设完成。作为战略储备的地下水封储库技术,各国间存在技术壁垒,无定量资料可供参考借鉴。我国在建设过程中遇到许多新的难题,在实践中不断探索与创新,逐步总结出一套适用于大型地下水封储库的技术与方法。

地下水封储库与水利工程的地下厂房和路桥隧道工程有显著不同。①地质特殊性:地下储库通常建设在场地稳定、天然地下水位稳定且埋深浅、坚硬完整的岩体中^[1-3],多以花岗岩、片麻岩为主,局部位置有断层穿过,岩体内通常裂隙闭合、连通性差,渗透性能差,且裂隙中存在有压水;②结构特殊性:洞室跨度大,高边墙,油品直接与洞壁围岩接触,洞壁不需要衬砌^[4-5],洞室错综密集,工作面众多,通过开挖卸荷,渗流等作用,容易引起洞室断面高边墙应力集中及不均匀受力,导致围岩剥落,断面挤压及扭转变形等^[6];③施工特殊性:为保证储库的战略隐蔽性及长期安全性,地下水封储库的地质观测点应充分利用天然和已有的人工露头,勘探孔的数量应综合利用,以减少钻探工作量^[2],岩体裂隙的灌浆不宜采用化学灌浆,洞室开挖爆破荷载频繁,工作面推进速度快,24 h 内每个工作面通常有 2 个爆破循环,相邻洞室间距近,且施工过程中需要保水,不能排水降压,必要时需进行补水,工程一旦运行,后期难以检修加固^[5]。

当洞室开挖过程中遇到断层破碎带和节理发育区域时,采用水泥浆液对这些部位进行灌浆处理是工程常用的手段。但是由于地下水封储库的地质特殊性、结构特殊性和施工特殊性等,传统灌浆很难满足工程要求。其主要原因在于岩体灌浆不同于以往水利工程大坝坝基帷幕灌浆,坝基帷幕灌浆的被灌介质多为砂粒体、鹅卵石或风化的岩层,这种介质的渗透通道较为畅通,透水性强,浆液容

易灌入其中;且被灌介质形成的帷幕体强度高于周围区域,能够有效抵抗周围的应力。岩体介质灌浆则不同,岩体介质裂隙闭合紧密,渗透性差,裂隙中常存在承压水,如不能顺利把裂隙中的承压水排出则浆液很难进入岩体中;另外岩体裂隙中的浆液即使建立起一定的强度,其强度和周围岩体相比仍然相差很大,稍有应力及位移变化则易将灌浆体撕裂破坏,导致灌浆失效,如图 1 所示。

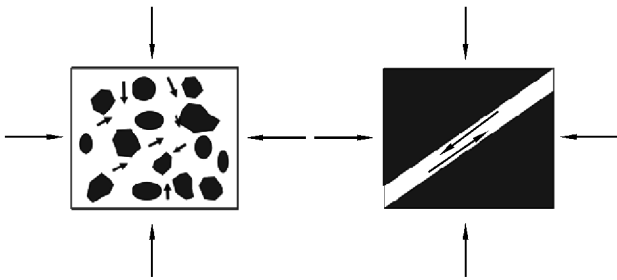


图 1 散粒体和岩体灌浆示意图

Fig.1 Schematic diagram of grouting in granular and rock masses

基于以上原因,地下岩洞的灌浆历来是工程界的难题。如锦屏二级水电站引水隧洞,岩体埋深 1 500~2 000 m,混凝土衬砌厚度 60 cm,先对衬砌后的顶拱回填灌浆,再在衬砌上钻泄压孔,然后固结灌浆^[7]。对大流量的地方,利用相邻洞室开横道反向掘进贯通出水洞段分流泄压,再灌浆封堵^[8]。再如 1981—1989 年修建的大瑶山隧道,埋深 70~910 m,通过十多条大断层,灌浆采取以排为主,截、堵、排结合的措施,灌注水泥-水玻璃^[9]。但是隧道建成后长期漏水,致使衬砌腐蚀,钢轨锈蚀,产生翻浆冒泥等现象,故 2000—2003 年又对其进行整治,通过设置引水暗槽、PVC 管排水、超细水泥灌浆等,虽然取得了一定效果,但对拱顶较大面积的渗漏水,特别是有一定压力的漏水,始终没有一种好的解决办法^[10]。

针对地下水封储库的特殊性及地下岩洞灌浆的难题,本文以国内第一座 $300\times10^4\text{ m}^3$ 地下水封储库的勘探、设计、施工等过程为背景,从数字平台辅助勘探、破碎带预测预警、围岩快速补强灌浆材料、压力循环下材料性能演变、牵引灌浆工艺、围岩补强一体机等方面进行了一系列探索及研究,总结出一套适用于地下水封储库围岩快速灌浆补强体系,并在工程中得以成功应用。该地下水封储库由 9

条主洞室、10 个竖井、6 条施工巷道、5 条水幕巷道组成,主洞室埋深为 110~390 m,长度为 500~800 m,如图 2 所示。断面为三圆心拱顶加直立高边墙,断面宽 20 m,高 30 m,相邻洞室间距 20 m,顶部布置水幕巷道和交通巷道,每间隔 10 m 布置长 100 m 的水幕孔。

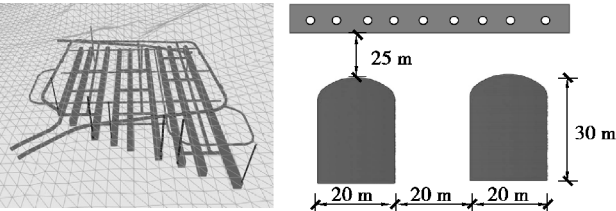


图 2 地下水封储库空间布局模型及洞室立面图
Fig.2 3D model of water-sealed underground storage caverns

1 数字平台与破碎带快速定位

大型地下水封储库勘探孔的数量要求尽可能少,一些勘探资料要在洞室开挖过程中边施工边补充,这为掌握工程地质和水文地质信息带来了困难。借助现代化的数字系统平台,不仅能有效弥补前期地质勘探不足带来的难题,而且能利用数字化手段进行创新性的辅助动态勘探、动态设计、动态施工、工程预警、工程管理等,为传统的工程建设提供了新的技术方法和手段。

1.1 地下水封储库综合管理平台 (iMPT)

地下水封储库综合管理平台 (iMPT,integrated Management Platform for Tunnels) 之某地下水封储库全生命周期一体化系统平台 (DKDAP),如图 3 所示,是以我国第一座大型地下水封储库工程为背景开发的系统平台,也是我国首次自主开发 (源代码完全自主),无任何外援软件集成和拼装的系统平台。其基础构架可靠,功能模块易拓展,覆盖了选址、勘探、设计、施工、运行的全生命周期,实现了数据收集、决策支持、反馈控制、风险评估等功能。

平台在工程建设的各个环节,充分利用计算机技术、网络技术、数据库技术等,对工程项目的各种信息进行采集、存储、加工、计算处理及辅助决策。系统平台以模块化形式汇集勘探、设计、现场监控量测等第一手资料,结合专用的快速计算分析模块,实现施工过程中洞室群安全监控与预警,为动态设计、动态施工提供基础平台,实现施工过程循环控制。

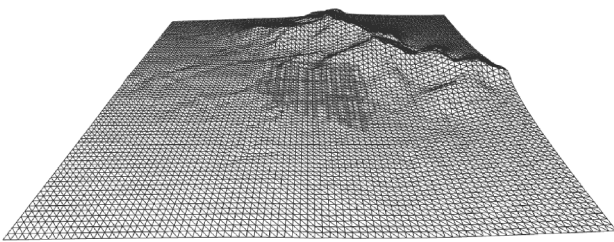


图 3 地下水封储库综合管理平台

Fig. 3 Integrated management platform for tunnels

1.2 项目区地质信息三维展示分析

借助 DKDAP 平台,勘探人员将原有二维地质剖面信息等信息录入平台中 (如图 4、图 5),平台根据录入的数据自动生成勘探孔、断层及地质风化层等三维模型,不需复杂人工建模,所有模型均参数化生成,如图 6 (图中勘探孔深浅交错的颜色表示不同岩石质量分层) 和图 7 所示。

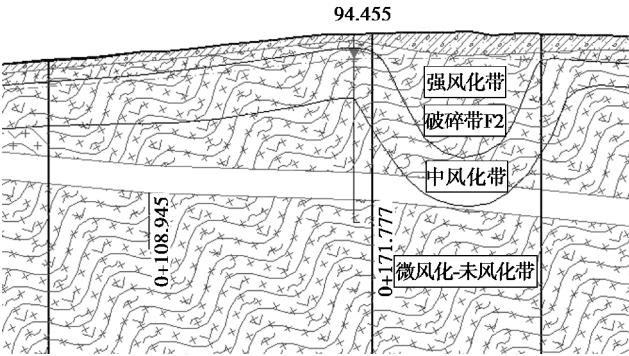


图 4 二维地质剖面图

Fig.4 Two-dimensional geological profile



图 5 勘探孔信息录入界面

Fig.5 User interface for borehole information

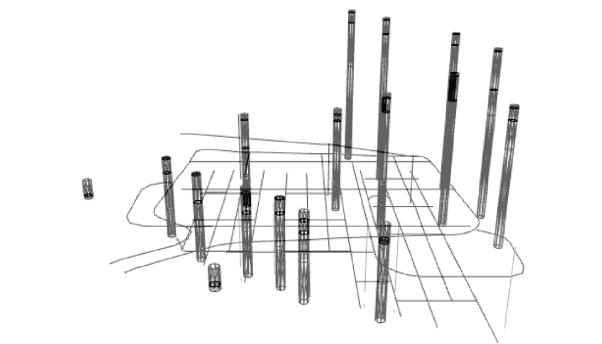


图 6 勘探孔岩石质量分层

Fig.6 3D model of borehole rock quality

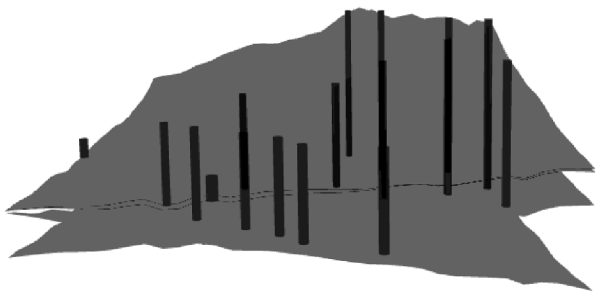


图 7 项目区地质风化层三维展示

Fig.7 3D model of weathered layer

随着洞室开挖不断揭露地质信息,将基本数据录入平台中即可实时生成三维模型。如将洞室的沿程岩石质量及节理裂隙分布信息录入平台中,平台即可绘制出洞室的沿程岩石质量图以及三维模型和节理玫瑰花图,如图 8 所示(图中颜色深表示沿程岩石质量较好,颜色浅表示沿程岩石质量较差),供勘探和设计人员参考。

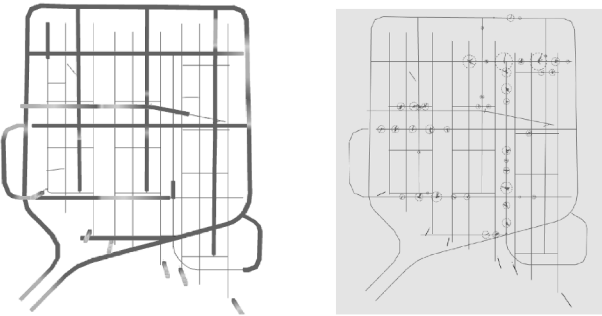


图 8 洞室沿程岩石质量及玫瑰花图

Fig.8 3D model of tunnel rock quality and rose diagram of joints

1.3 断层破碎带数字预测及预警

将前期少量的勘探孔断层信息及破碎带地表出露点信息输入 DKDAP 平台,如图 9 所示。平台可利用空间地质模型快速算法展示出断层破碎带

的空间位置,还可将破碎带未来与地下洞室开挖可能的交汇点位置预测出来(如图 10)。再综合参考洞室沿程质量分布、节理分布等信息,可基本确定破碎带与洞室的相交位置,提前做好应对措施,为洞室的施工提供安全保证。



图 9 破碎带信息录入界面

Fig.9 User interface for fault information



图 10 断层破碎带空间预测

Fig.10 3D prediction of faults

平台结合洞室施工进度等信息做出相应数字预警,提前预知工作面前方可能遇到的工程隐患。如 5 号主洞室 1 号工作面施工到 0+323 m 位置、6 号主洞室 1 号工作面的施工进度为 0+321 m 时,平台预测出 5 号主洞室 1 号工作面约 14 d 后会遇到 F8、F3 断层,桩号位置约在 0+366 m 和 0+368 m 处(如图 11 和图 12);6 号主洞室 1 号工作面前方 45 m 左右会遇到 F3 断层(如图 13)。将上述预测结果反馈给施工单位,可提前采取对策,保证工程安

全与顺利施工。以上预测结果与实际工程开挖揭示的地质信息基本吻合。

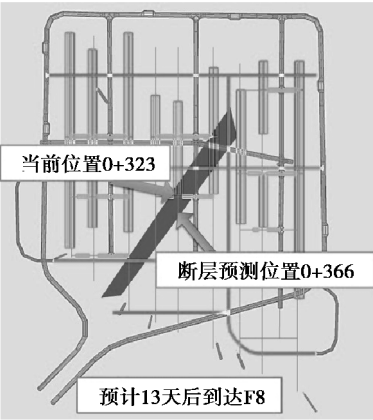


图 11 5号洞 F8 预警
Fig.11 Warning of F8 in 5# tunnel

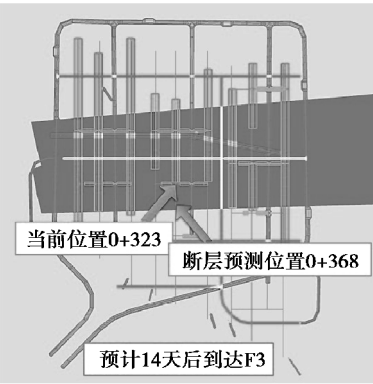


图 12 5号洞 F3 预警
Fig.12 Warning of F3 in 5# tunnel

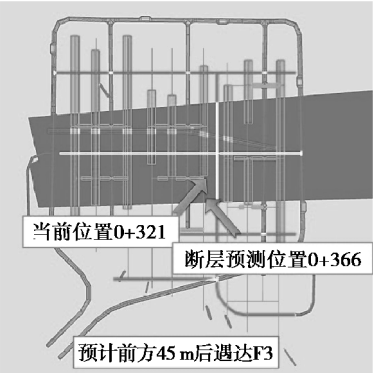


图 13 6号洞 F3 预警
Fig. 13 Warning of F3 in 6# tunnel

破碎带数字预测是地下洞室快速灌浆的前提，地下洞室工作面施工进度快，洞室布局复杂，通过数字预测可以快速定位破碎带的位置，进而为预注

浆或洞室开挖后及时灌浆补强提供依据。

2 快速补强灌浆及其压力循环下性能演化

2.1 岩体补强灌浆材料

地下储库施工工作面 24 h 内通常有两个爆破作业循环,加之除碴排险等,留给灌浆作业及浆液建立强度的时间平均不超过 6 h,所以水泥浆液如果不能在 6 h 内达到一定强度来抵抗后续爆破冲击波,则灌浆效果会大大减弱,甚至效果甚微。针对该情况,研制出一种以硫铝酸盐水泥为基料,加入特种胶凝材料、高活性材料、改性剂等特种外加剂的专用早强快硬灌浆材料,如图 14 所示。

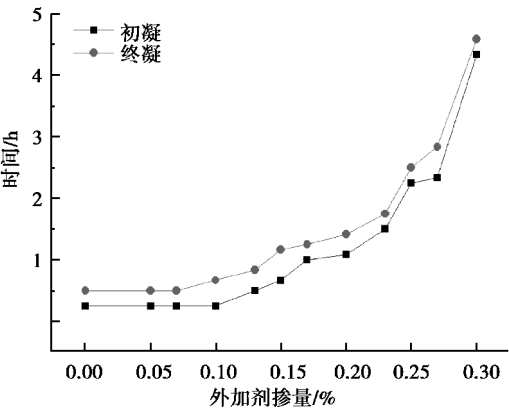


图 14 外加剂掺量与灌浆材料初凝终凝关系图
Fig.14 Initial setting and final setting time of grouting material with different amount of admixture

此种灌浆材料早期流动性好,满足可灌性要求,初凝时间可控制在 1~3 h,5~8 h 的抗压强度≥25 MPa,属于无机水硬性材料,具有抗冻、抗渗、耐久性好、后期强度不倒缩等特点,技术性能指标如表 1。

表 1 灌浆材料主要技术性能表			
Table 1 Properties of grouting material			
初始流动度	30 min 流动度	4~8 h 抗压强度	3 d 抗压强度
/mm	/mm	/MPa	/MPa
≥240	≥200	≥25.0	≥45.0

2.2 灌浆材料压力循环下性能演化

现场采用循环式灌浆法,这种方式采用回浆管

将岩体灌浆多余的浆液返回灌浆机。其主要优点是浆液不易沉淀,有利于保证灌浆质量^[11]。但施工中常压配制3 h初凝的材料,在压力为3 MPa 情况下,45 min 发生初凝,55 min 发生终凝^[12-13],浆液来不及清洗就在机器和管路中凝固,导致整台灌浆设备报废。目前国内外对灌浆压力与灌浆材料性能之间的关系研究较少^[14-16],故本文进行了一系列的试验研究,采用硫铝酸盐水泥在室内模拟压力循环灌浆,对比不同压力下水泥材料性能的变化。

压力循环试验流程如图 15 所示,试验设备采用如图 16 所示灌浆机,灌浆机管道长 10 m,排料量约 20 L/min。恒压循环试验压力分组为 0 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa。首先进行 0 MPa 恒压循环试验(0 MPa 表示刚好维持浆液循环不额外加压),将 50 kg 水泥和外加剂干粉拌和均匀后,再加水快速搅拌 3 min 制浆,将制好的浆液全部倒入灌浆机储料斗中,开机恒压循环。开机起 0 min、10 min、20 min、30 min 分别从灌浆机中取样 250 mL 放入容器中在环境温度下静置测量温度,同时取样浇筑 3 个 10 cm×10 cm×10 cm 模块组待测量抗压强度,其余浆液仍在灌浆机中继续恒压循环。30 min 取样结束后停机全部清洗,一组循环试验结束。然后按以上步骤分别进行 1 MPa、2 MPa、3 MPa 压力组循环试验。

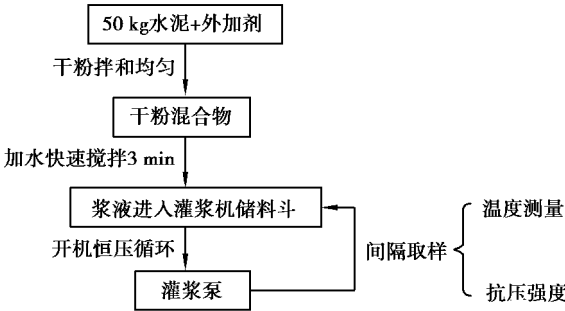


图 15 试验流程图

Fig. 15 Flow chart of experiment



图 16 试验用灌浆机

Fig.16 Grouting equipment

试验结果如表 2 所示,图 17 为 0~3 MPa 每组压力循环下,各取样的温度变化曲线,T1-0 min,T2-10 min,T3-20 min,T4-30 min。表 3 为每组取样 10 h 的抗压强度值,图 18 为每组取样 10 h 的抗压强度曲线。

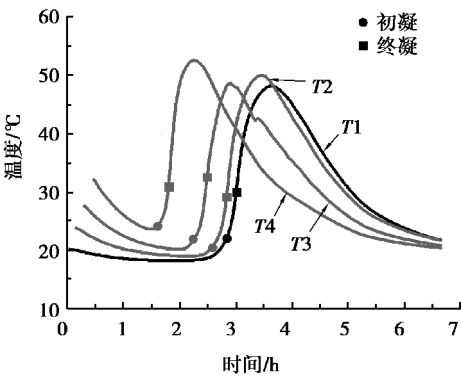
表 2 水泥浆循环试验记录表

Table 2 Data records of the cement experiment

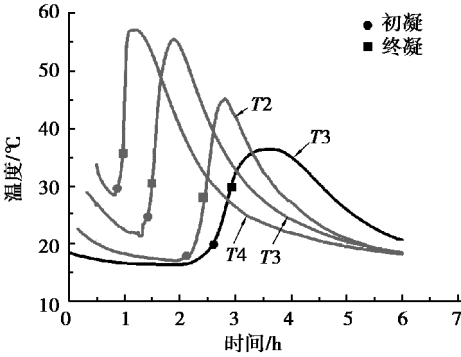
循环压力 /MPa	室温 /℃	水温 /℃	时间组	初始温度 /℃	初凝前最低温 /℃	低温时间 /(h·min ⁻¹)	初凝温度 /℃	初凝时间 /(h·min ⁻¹)	终凝温度 /℃	终凝时间 /(h·min ⁻¹)	峰值温度 /℃	峰值时间 /(h·min ⁻¹)
0	17.7	14.3	0 min	20.1	18.3	2:08	22.0	2:50	29.6	3:00	48.1	3:36
			10 min	23.8	19.0	2:08	20.7	2:35	28.9	2:50	49.9	3:27
			20 min	27.5	20.2	2:01	21.9	2:15	33.6	2:30	48.7	2:54
			30 min	32.2	23.6	1:30	24.9	1:32	30.9	1:48	52.5	2:15
1	17.9	14.5	0 min	18.5	16.3	1:47	19.9	2:35	29.9	2:55	36.4	3:40
			10 min	22.5	17.1	1:54	17.4	2:05	28.5	2:27	45.2	2:48
			20 min	28.9	21.4	1:17	24.9	1:25	30.6	1:30	55.4	1:53
			30 min	33.8	28.5	0:49	29.2	0:52	35.7	0:58	57.1	1:12

续表

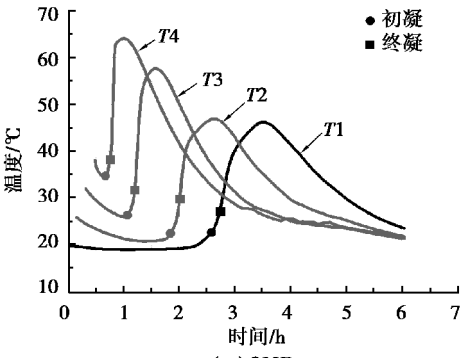
循环 压力 /MPa	室温 /℃	水温 /℃	时间组	初始温 度/℃	初凝前 最低温 /℃	低温 时间 /(h·min ⁻¹)	初凝温 度/℃	初凝 时间 /(h·min ⁻¹)	终凝温 度/℃	终凝 时间 /(h·min ⁻¹)	峰值 温度 /℃	峰值 时间 /(h·min ⁻¹)
2	18.9	15.3	0 min	19.7	18.8	1:03	22.7	2:35	28.4	2:45	46.1	3:31
			10 min	25.8	20.6	1:21	22.1	1:50	29.1	2:00	46.8	2:37
			20 min	32.0	25.9	1:01	26.3	1:05	31.7	1:12	57.6	1:35
			30 min	38.1	34.3	0:40	34.3	0:40	37.6	0:45	64.0	0:59
3	18.2	13.9	0 min	19.4	18.7	1:20	23.1	2:25	30.2	2:35	47.9	3:13
			10 min	28.8	23.3	1:05	23.3	1:05	27.6	1:20	52.0	1:53
			20 min	36.6	33.0	0:35	33.0	0:35	37.5	0:43	65.6	1:00
			30 min	44.1	44.1	0:30	44.1	0:30	47.6	0:33	71.0	0:48



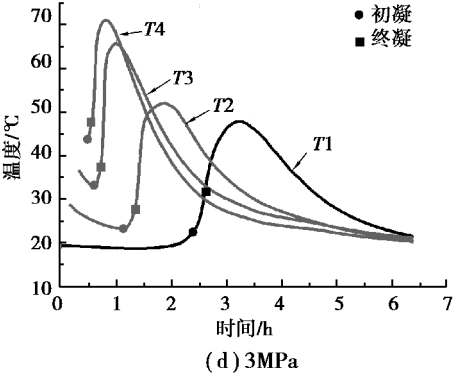
(a) 0MPa



(b) 1MPa



(c) 2MPa



(d) 3MPa

图 17 不同压力下水泥浆温度曲线及初终凝时间
Fig. 17 Temperature vs. initial setting and final setting time of cement under different pressure

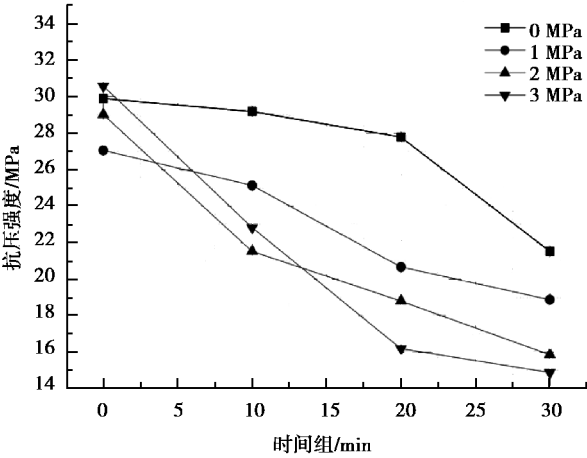


图 18 10 h 抗压强度曲线图

Fig. 18 Curves of compressive strength of 10 h

试验结果表明,在循环灌浆法情况下,材料水化放热峰值时间随着循环时间加长而缩短,且循环

压力越高,峰值提前速度越快,能达到的峰值温度也越高。

压力循环会使硫铝酸盐水泥的抗压强度产生折损。经过循环后的材料 10 h 抗压强度基本都呈下降趋势,且循环时间越长,抗压强度下降越明显。

表 3 10 h 抗压强度表

Table 3 Compressive strength of 10 h

压力组	各时间组抗压强度/MPa			
	0 min	10 min	20 min	30 min
0 MPa	29.9	29.2	27.8	21.5
1 MPa	27.1	25.1	20.7	18.9
2 MPa	29.0	21.5	18.8	16.2
3 MPa	30.6	22.8	15.9	14.9

3 牵引灌浆工艺

地下水封储库围岩灌浆时,岩体内通常裂隙闭合,连通性差,且裂隙中存在有压水,渗透性能差。由于岩体裂隙中的有压水不能在灌浆期间排出,水泥浆液不能进入裂隙中,这就是通常说的“不吃浆”,导致灌浆没有明显效果。传统灌浆工艺中水泥浆液的水灰比通常为 2:1,采用一定压力向灌浆孔内灌注浆液,待进浆量小于某个阈值后,再持续灌浆半个小时左右,然后停止,去掉灌浆管^[17]。由于裂隙的渗透性能低,灌浆期间裂隙内的水排不出去,仅少量水泥浆液在灌浆压力下由于裂隙张开而进入裂隙,没有积累沉淀过程,当灌浆压力去除后,裂隙恢复原状,水泥浆液被挤出。另外,因水灰比大,水泥颗粒在浆液内呈现游离状态,水化后的浆液也无法胶凝在一起,起不到封堵裂隙的作用,如图 19 所示。

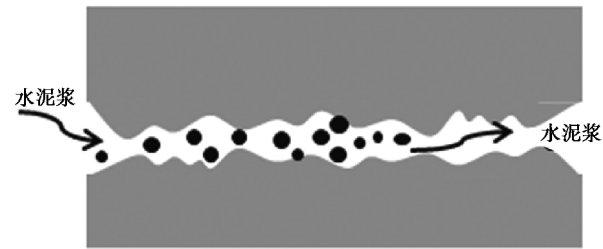


图 19 水泥颗粒游离状态示意图

Fig. 19 Schematic diagram of free state of cement particles

因此,岩体灌浆工艺首先要从排出裂隙中的水着手。通过不断的现场试验,本文提出牵引灌浆工艺,方法是:在灌浆孔周围合理布置牵引排水孔,根

据岩体裂隙的走向,以 0.5~0.8 m 间距为宜,使牵引孔在岩体内部与灌浆孔周围裂隙相通(如图 20),并采用一定装置将裂隙中和浆液中的水排出,合理地解决了裂隙区域“不吃浆”的问题。其次,水泥浆液的水灰比一定要小,减少水泥浆液中的水分,缓解裂隙排水压力,便于水泥颗粒在裂隙中的累积沉淀。

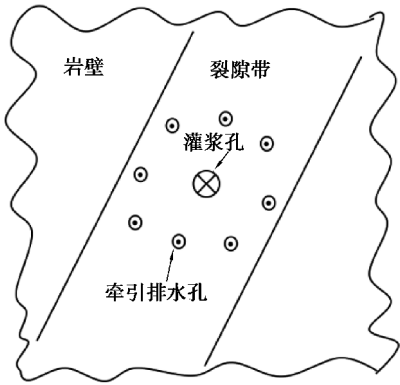


图 20 牵引灌浆孔位布置图

Fig. 20 Arrangement of derive grouting holes

应用牵引灌浆工艺,可使岩体裂隙和浆液中的水分排出,让浆液充分填充岩石裂隙,在灌浆压力的作用下将水泥颗粒挤压密实,达到明显的灌浆效果,如图 21 所示。

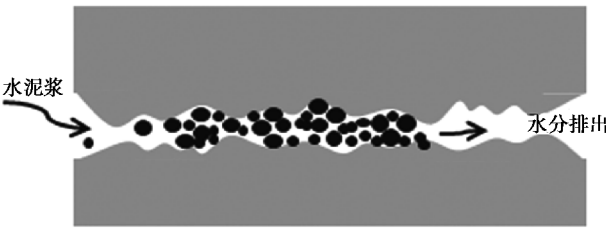


图 21 水分排出及水泥颗粒挤压密实

Fig. 21 Schematic diagram of water excretion and compaction of cement particles

4 围岩快速补强一体机

地下水封储库施工的特殊性及灌浆材料早强快硬的特性,需要灌浆设备具有操作简便、快速制浆、易于清洗等特点;采用牵引灌浆工艺,要求灌浆设备移动灵活,灌浆压力易于控制,泵送流量均匀稳定,避免有过大的瞬时脉动压力,不会造成泵送过程出现水泥浆泌水等,传统的灌浆设备很难同时满足上述要求,故自主设计研发了新型自动化、一体化围岩快速补强灌浆机。该一体机共分三大部分,即干粉搅拌部分、加水制浆部分和压力灌浆部

分,如图 22 所示。三部分相互独立又相互协调,可实现搅拌、制浆、灌浆一体化,操作简便,移动灵活,灌浆压力稳定,能充分应对地下水封储库快速灌浆施工的要求。

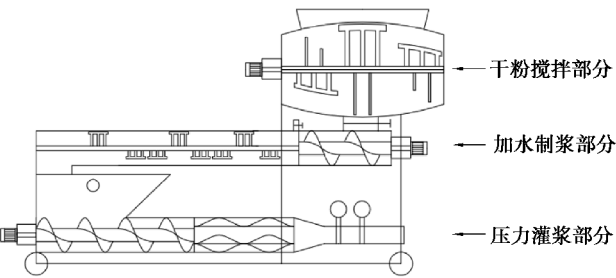


图 22 围岩快速补强一体机原理图

Fig. 22 Schematic diagram of integrated machine of fast reinforcement for surrounding rock

5 工程应用

在某大型地下水封储库建设过程中,首先结合 DKDAP 平台三维地质展示及破碎带数字预测得知某洞段在开挖前方 0+500~0+550 处会有破碎带经过。开挖后实际揭露的位置为 0+530~0+535(如图 23),破碎带处岩体质量等级 \leq IV 类,周围岩体质量等级 \geq III2 类。研究发现,需要进行快速灌浆补强作业。依据围岩破碎带补强的理念,灌浆孔需要密集布置在破碎带上,通过灌浆提高破碎带围岩的整体强度,深度略深于松动圈厚度,故现场的灌浆孔孔深 2 m,梅花型布置,孔距平均 70~80 cm。灌浆孔及声波检测孔布置如图 24、图 25 所示。应用牵引灌浆工艺及围岩补强一体机进行施工作业,如图 26 所示。当一个孔灌浆时,其周围灌浆孔充当牵引排水孔,灌浆过程中严格控制材料的各项配比参数,合理调配灌浆压力及循环时间,保证压力循环后浆液能在短时间内达到需要的强度。

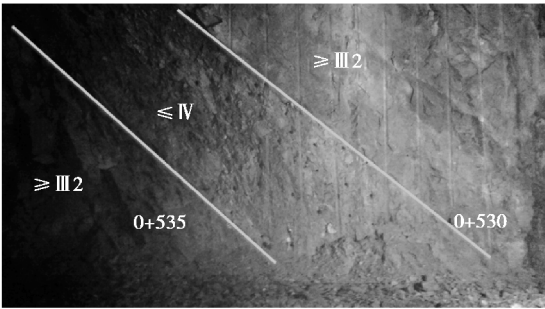


图 23 破碎带位置示意图

Fig. 23 Fracture zone location

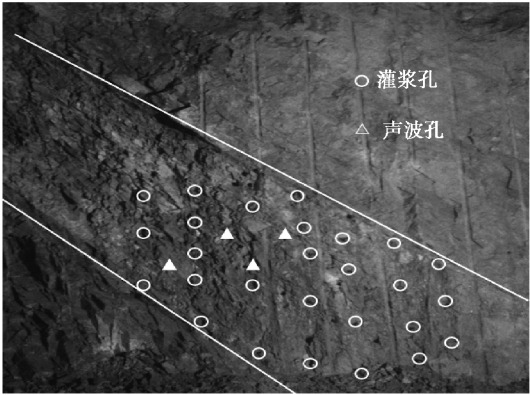


图 24 破碎带钻孔布置图

Fig. 24 Borehole layout in fracture zone

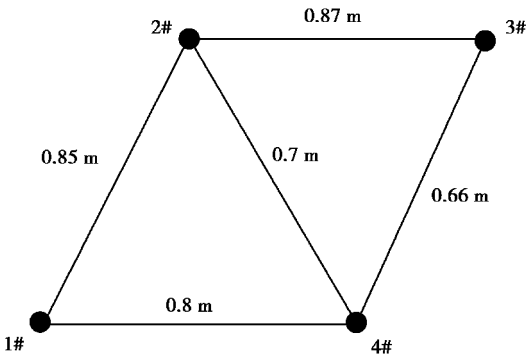


图 25 声波孔布置示意图

Fig. 25 Arrangement of acoustic holes



图 26 现场灌浆施工图

Fig. 26 Grouting construction in the tunnel

有些学者对水工隧洞灌浆前后声波检测进行了一些研究,从研究结果看,灌后 14 d 波速提高比率范围为 8%~25%,而位于爆破开挖带附近的区域波速提高率仅为 5%左右^[18~20]。为了验证早强快硬灌浆材料的早期效果,故现场在灌浆作业后 48 h 内进行灌后声波检测,检测结果如表 4 及图 27 所示。声波波速平均提升比率约 6.4%,从各孔不同深度声波变化看,灌前波速小于 3 000 m/s 的完整性较差岩体灌浆后改善幅度较大,如按水电工

程围岩声波分类标准衡量,灌前质量较差的岩体灌后可提高 1 个等级左右,说明早强快硬灌浆材料及快速灌浆体系的应用具有初步成效。

表 4 声波检测结果表
Table 4 Acoustic test results

检测孔号	孔深 /m	灌前波速 /(m·s ⁻¹)	灌后波速 /(m·s ⁻¹)	变化率 /%
1#	2.0	2 315	2 500	8.0
2#	2.0	3 786	3 922	1.2

续表				
检测孔号	孔深 /m	灌前波速 /(m·s ⁻¹)	灌后波速 /(m·s ⁻¹)	变化率 /%
3#	2.0	4 167	4 444	6.6
4#	2.0	2 797	3 077	10.0
1#~2#	2.0	3 095	3 089	-0.2
1#~4#	2.0	3 832	4 065	6.1
2#~4#	2.0	4 581	4 679	2.1

注:1#~2#表示跨孔声波检测。

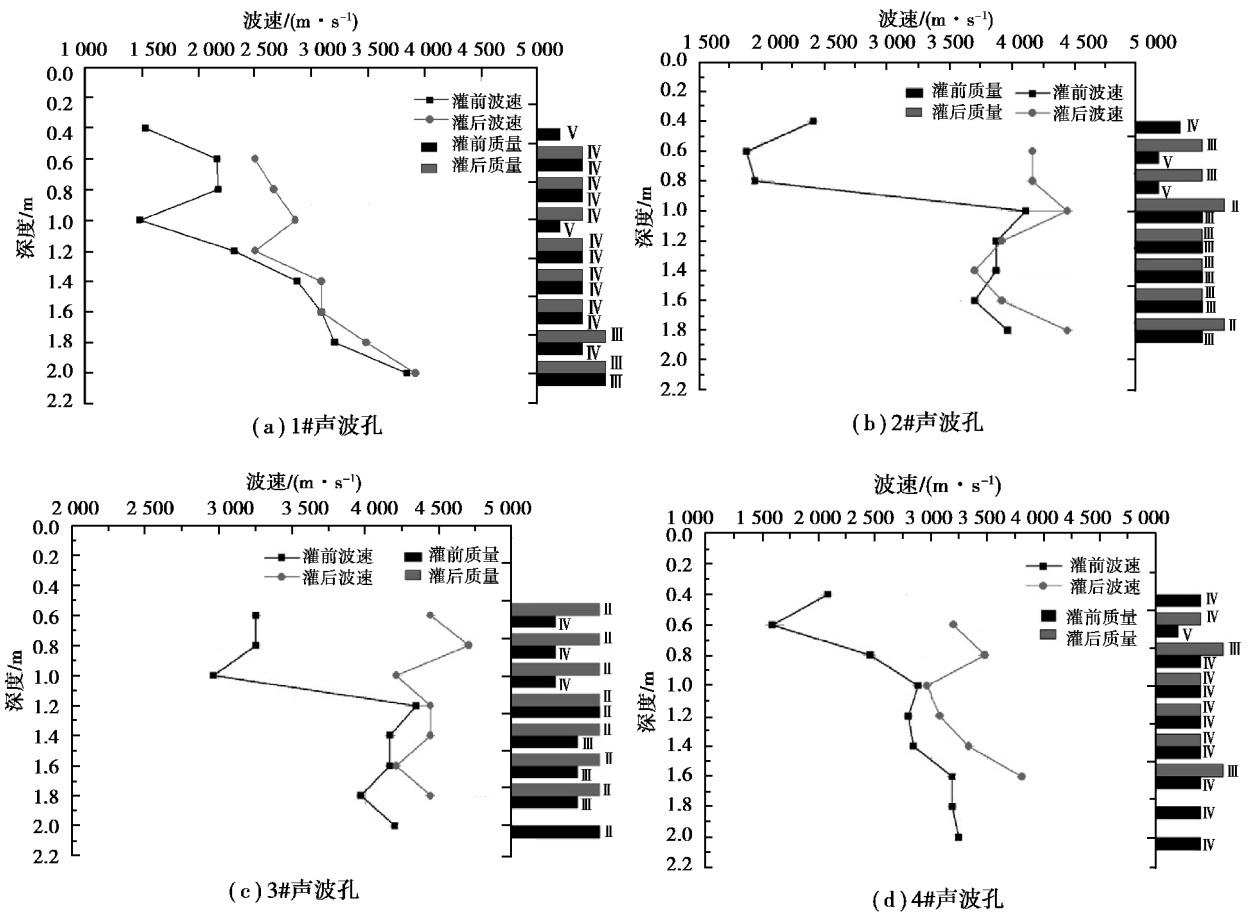


图 27 1~4#声波孔灌浆前后检测结果图
Fig. 27 Acoustic results in hole 1~4#

5 结论

依托国内某大型地下水封储库工程,针对其工程特殊性,发展了一整套围岩快速补强灌浆体系。通过分析,主要得到以下结论:

(1)地下水封储库的地质特殊性、结构特殊性
及施工特殊性决定了不能单纯套用传统方式应对

建设中出现的问題。要合理、快速地解决地下水封
储库岩体灌浆难题,需要一套完备的体系。利用数字
平台三维地质展示及破碎带预测提前预知地质
情况,开发集专用灌浆材料、灌浆工艺、灌浆设备及
检测手段于一体的成套技术体系,能够较好地解决
地下水封储库灌浆难题。

(2)应用地下水封储库综合管理平台(iMPT)

之某地下水封全生命周期一体化系统平台(DKDAP),综合分析地下储库的地质情况及预测预警地下破碎带的位置,不仅能有效解决工程前期勘探资料不足的问题,更能合理准确预知洞室开挖前方可能遇到的地质状况,为提前做好应对措施提供保障。

(3)地下水封储库的特殊性决定了灌浆材料需具有早期流动度好、可灌性强、凝结时间易控制、早期强度高、抗冻、抗渗、耐久性好、后期强度不倒缩等特点。以硫铝酸盐水泥为基料加以特种外加剂研制的专用灌浆材料可以很好地适用于大型地下水封储库的特点及要求。

(4)在循环灌浆法下,浆液水化放热峰值时间随着循环时间的加长而缩短,且循环压力越高,峰值提前的速度越快,能达到的峰值温度也越高。压力循环会使硫铝酸盐水泥的抗压强度产生折损。经过循环后的硫铝酸盐水泥灌浆材料10 h的抗压强度基本都呈下降趋势,且循环时间越长,抗压强度下降越明显,这是现场施工工艺控制的主要依据。

(5)牵引灌浆工艺通过在灌浆孔周围合理布置牵引排水孔并采用一定装置将裂隙中和灌浆材料中的水分排出,保留水泥颗粒在裂隙中累积沉淀,并快速凝结建立强度,有效解决了岩体不吃浆及材料不凝结等难题。

(6)自主设计研发的一体化围岩快速补强灌浆机将干粉搅拌、加水制浆和压力灌浆三者有机地结合与协调起来,可实现搅拌、制浆、灌浆一体化,操作简便,移动灵活,灌浆压力稳定,快速制浆,易于清洗等,能充分满足地下水封储库快速灌浆施工的要求。

本文提出的快速补强灌浆体系对于地下岩体工程设计与建设具有重要的参考价值。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地下水封石洞油库设计规范(GB 50455—2008)[S]. 北京:中国计划出版社, 2009. (Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of underground oil in rock caverns (GB 50455—2008)[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 国家发展改革委员会. 地下水封洞库岩土工程勘察规范(SY/T 0610—2008)[S]. 北京:石油工业出版社, 2008. (National Development and Reform Commission. Standard for underground water engineering [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 王梦恕,杨会军.地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J]. 中国工程科学, 2008, 10(4): 11-16. (Wang Mengshu, Yang Huijun. Basic principles for design and construction of underground water-sealed hydrocarbon-storage rock caverns [J]. Engineering Science, 2008, 10(4): 11-16. (in Chinese))
- [4] 杨明举,关宝树.地下水封储气洞库原理及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 301-305. (Yang Mingju, Guan Baoshu. Theoretical and numerical simulation study of underground gas-storage caverns with water curtain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3), 301-305. (in Chinese))
- [5] Lee Y N, Yun S P, Kim D Y, et al. Design and construction aspects of unlined oil storage caverns in rock [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 33-37.
- [6] Lee Y N, Suh Y H, Kim D Y, et al. Stress and deformation behavior of oil storage caverns during excavation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1997, 34(3-4): 301-305.
- [7] 刘涛.锦屏二级水电站引水隧洞围岩高压固结灌浆试验[J]. 人民长江, 2013, 44(9): 41-43. (Liu Tao. The high-pressure consolidation grouting grouting test for surrounding rock of diversion tunnel of Jinping II Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2013, 44(9): 41-43. (in Chinese))
- [8] 吴世勇,王鸽.锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设 and 工程中的挑战性问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2161-2171. (Wu Shiyong, Wang Ge. Challenge issues in construction and project of large-scale deep-buried tunnel group of Jinping II Hydropower

- Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (11): 2161-2171. (in Chinese).
- [9] 赵子荣,王梦恕.大瑶山隧道设计与施工[J]. 土木工程学报, 1989, 22 (3): 1-12. (Zhao Zirong, Wang Mengshu. Design and construction of Dayaoshan Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 1989, 22(3): 1-12. (in Chinese))
- [10] 廖树耀.大瑶山隧道渗漏水的整治方法[J]. 铁道建筑, 2004(2): 32-33. (Liao Shuyao. The treatment of seepage in Dayaoshan tunnel [J]. Railway Engineering, 2004(2): 32-33. (in Chinese))
- [11] 李茂芳,孙钊.大坝基础灌浆[M]. 北京:水利电力出版社, 1987. (Li Maofang, Sun Zhao. Dam foundation grouting [M]. Beijing: China Water&Power Press, 1987. (in Chinese))
- [12] 阮文军.基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (15): 2709-2714. (Ruan Wenjun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (15): 2709-2714. (in Chinese))
- [13] 李术才,韩松松,张庆松,等.地下工程动水注浆速凝浆液黏度时变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (1): 1-7. (Li Shucai, Han Songsong, Zhang Qingsong, et al. Research on time-dependent behavior of viscosity of fast curing grouts in underground construction grouting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32, (1): 1-7. (in Chinese))
- [14] 孙子正,李术才,刘人太,等.水泥基速凝浆液裂隙扩散机制与压力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35 (8): 2219-2225. (Sun Zizheng, Li Shucai, Liu Rentai, et al. Fracture defusing mechanism and pressure characteristic tests of rapid setting cement- based grouts [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35, (8): 2219-2225. (in Chinese))
- [15] 陈旭荣,董建军.湿磨细水泥浆材的制备及灌浆技术的研究[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(4): 38-44. (Chen Xurong, Dong Jianjun. Grouting technique and fabrication of fine cement grout materials by wet grinding method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1994, 11 (4): 38-44. (in Chinese))
- [16] 王扬,陈义斌,高鸣安,等.三峡工程基础灌浆高压下湿磨水泥浆材的性能研究[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(1): 61-63. (Wang Yang, Chen Yibin, Gao Mingan, et al. Research on properties of wet ground fine cement slurry used for foundation grouting of TGP under high pressure [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(1): 61-63. (in Chinese))
- [17] Baker W H, Cording E J, Macpherson H H. Compaction grouting to control ground movements during tunneling [J]. Underground Space, 1982, 7 (3): 205-213.
- [18] 丁陈奉,孙云,何刚,等.锦屏一级水电站基础工程灌浆检测技术及评价标准研究[J]. 水利技术监督, 2012(5): 4-8. (Ding Chenfeng, Sun Yun, He Gang, et al. The research of detection and evaluation criterion in Jinping I Hydropower Station [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2012(5): 4-8. (in Chinese))
- [19] 李维斌,张敬博,田园.声波检测在水工隧洞固结灌浆中的应用及探讨[J]. 水利科技与经济, 2014, 20 (1): 122-124. (Li Weibin, Zhang Jingbo, Tian Yuan. The application and discussion of acoustic detection technology in hydraulic tunnel consolidation grouting [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20 (1): 122-124. (in Chinese))
- [20] Winkler K W, Plona T J. Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets, 1982, 87(13): 776-780.