

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.005

富水条件下低热沥青浆液流动特性试验研究

黄立维, 邢占清, 李娜, 符平

(中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 低热沥青灌浆是在动水条件下封堵大空隙地层渗流通道的一种非常有效的方法。文中开展了富水条件下低热沥青浆液扩散性能和抗冲性能试验研究,揭示了低热沥青浆液在富水条件下的性能变化规律,该浆液具有良好的扩散能力,可基本满足在中等块石地层中灌浆孔排距对浆液扩散范围的要求。通过试验获得了不同流速条件下低热沥青的抗冲性能指标,并与速凝石膏浆、水泥-水玻璃浆液进行了对比研究,采用低热沥青浆液进行封堵时,封堵率100%,封堵速度快,并且低热沥青-水泥基灌浆材料的复合灌浆弥补低热沥青结石体强度较低的不足。其成果可为类似工程提供有益的参考。

关键词: 低热沥青;扩散性能;抗冲试验;砂砾石层

中图分类号: TV543

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0026-06

Experimental Study on the Flow Characteristics of Low Heat Asphalt Slurry in Rich Water Condition

HUANG Liwei, XING Zhanqing, LI Na, FU Ping

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Low heat asphalt grouting is a very effective method for plugging large-void formation seepage channels under moving water conditions. In this paper, we analyzed the diffusion performance and impact resistance of low heat asphalt slurry under the condition of rich water, and revealed the performance of low heat asphalt slurry under water-rich conditions. The results show that the slurry has a good diffuse ability, it can meet the medium plug in the formation of grouting hole pitch on the slurry diffusion range requirements. In this test, we obtained the impact resistance index of low heat asphalt under different flow rate conditions. The results were compared with the quick-setting plaster slurry and the cement-water glass slurry with low heat asphalt slurry to plug, the plugging rate is 100% and it is. The composite grouting of low heat asphalt-cement material grouting slurry make up the strength of low heat asphalt. The results can provide useful information to similar projects.

Keywords: low heat asphalt; diffusion performance; impact test; sand and gravel layer

渗漏是水电工程、地下洞室工程及地下矿山等工程中经常遇见的问题,建设堤坝、围堰、隧道(洞)、地下厂房、矿山井巷、地铁、基坑等工程时,经常会出现不同类型的渗漏水。渗漏对已建水库(大坝)不仅会带来经济损失,而且还可能会威胁到大坝的安全;而对于土(堆)石围堰渗漏水会导致基坑不能闭气,影响后续工作的施工;对于隧道(洞)工程,由于突涌水而迫使施工中断,拖延工期,甚至有些工程不得不改变施工线路。

常规的灌浆堵漏(包括水泥浆、水泥砂浆、水泥石膏浆及化学浆液等)原理为:浆液通过灌浆泵扩散、充填至砂卵石孔隙(或岩石裂隙)等位置凝固、硬化,形成一定强度的灌浆结石体(或凝胶体),从而封堵渗漏通道,其主要是通过水泥水化或浆液主剂和固化剂间的化学反应来实现。而热沥青灌浆是利用沥青“加热后变为易于流动的液体、冷却后又变为固体”的物理性能而达到堵漏的目的。沥青浆液与水不互溶,当沥青被加热成流态时,浆液具有良好的流

动性和可灌性,通过灌浆泵进入渗漏部位后,遇水发生冷凝作用,逐渐粘附在渗透通道表面,堵塞漏水通道。与其它灌浆材料不同,沥青浆液具有不被水稀释而流失的特点,因而特别适合于大流量、高流速的大空隙地层的漏水封堵处理^[1-5]。

符平^[6]利用先乳化后破乳原理开发出“油包水”状态的低热沥青,在 70℃ 时仍具有良好的流动性和可泵性,在多个工程中得到应用。李娜等^[7]进行了低热沥青性能试验、不同材料配比试验、强度试验、流变参数试验等,对低热沥青的材料选择、流变性、可灌性、破乳速度、温感性能等进行了深入研究,完善了低热沥青材料的性能指标。然而,这些指标主要是在无水条件下浆液本身的性能指标,对于其在砂砾石地层中的流动特性研究开展较少,尤其是低热沥青浆液在富水砂砾石地层下的流动特性研究更没有见到相关报道。影响浆液扩散特性的影响因素及其作用机理不够明确,富水环境将对浆液性能的变化过程与凝胶特性将产生极为不利的影 响,亟待开展相关研究工作。

大空隙地层的堵漏灌浆受地质条件、空隙大小、地下水流速、浆液性能及灌浆施工工艺等因素影响较大,特别是动水堵漏灌浆,灌浆浆液在动水条件下的扩散过程和堵漏灌浆原理研究还很少,往往需要采用室内模拟试验来观察浆液在大空隙地层中的运动扩散规律,以及在动水条件下的堵漏灌浆效果。通过堵漏灌浆模拟试验可以检查灌浆材料的性能优劣,同时可以更好的指导现场堵漏灌浆施工,减少施工的盲目性。因此,本文采用现场一维、二维模型对不同条件下的低热沥青浆液的扩散特性进行试验研究,揭示浆液在富水条件下的性能变化规律;开展了低热沥青的抗冲性能测试试验,并与常用的堵漏材料水泥-水玻璃和速凝膏浆进行了对比,得到了不同流速条件下浆液的抗冲特性。

1 低热沥青的扩散性能

为检验低热沥青浆液适应不同的应用条件和堵漏效果,在室内开展了模拟堵漏灌浆试验研究。模拟低热沥青在不同配比和不同孔隙率砂砾石层中的扩散过程。

1.1 一维灌浆试验

(1) 试验模型。采用 PVC 管设计制作一维试验模型,模型内装上不同配比、不同孔隙率的砂砾石层。沙石粒径分别为 2 mm~5 mm、5 mm~10 mm、10 mm~20 mm、20 mm~50 mm、2 mm~50 mm,分别在

模型内无水与饱和情况下进行不同压力条件下的低热沥青灌注试验,其布置如图 1 所示。

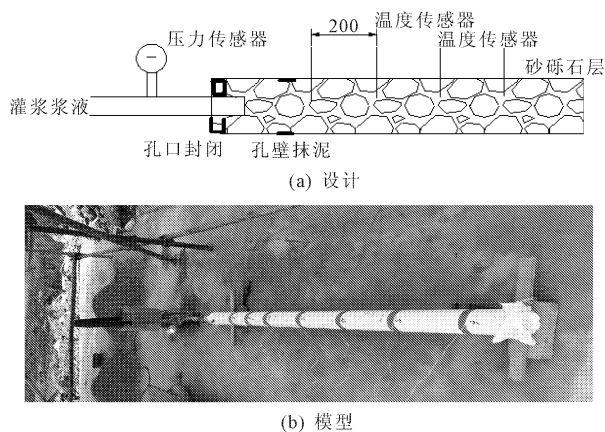


图 1 一维试验模型设计和模型示意图

将砂砾石筛分成不同粒径,然后向模型内装填。为减少不同密实状态对试验成果的影响,通过控制砂砾石的用量使所装填的砂砾石层状态为中密。对装满砂砾石的模型进行了渗透试验,在同样用量的砂砾石(中密状态)情况下,相同粒径的渗透系数差异不大。经测试,不同粒径的渗透系数如表 1 所示。

表 1 砂砾石渗透系数结果表

级配/mm	2~5	5~10	10~20	20~50	2~50
渗透系数/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	0.025	0.240	0.550	1.125	0.160

(2) 灌注试验。低热沥青灌浆材料的配比采用质量比沥青:水:水泥:外加剂=1:1:0.7:0.03。将其通过连接好的专用螺杆泵和管路灌入预制好的一维模型内。

在低热沥青浆液凝结 7 d 后,可将 PVC 管破开,获得沥青的扩散距离如表 2 所示和结石体情况如图 2 所示。

低热沥青在不同条件下扩散距离不同,在重力影响下会出现分层现象。在扩散范围内浆液的结石体比较饱满、密实,具有明显的边界。

(3) 结石体力学性能试验。在已凝固的灌浆结石体中,通过切削打磨获得 4 cm×4 cm×16 cm 的试验试块进行了不同龄期的力学性能测试试验。试验结果如表 3 所示。

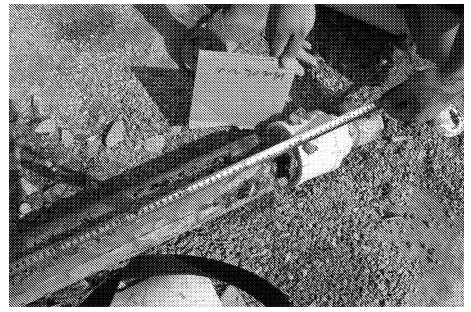
1.2 二维灌浆试验

(1) 二维试验模型设计(见图 3)。采用 1.5 m×1.5 m×1.0 m 的钢制模型,灌浆管预先置入后,在其内填设不同的实验材料,然后在顶部设置钢盖板。灌注完成后,拆除钢盖板对实验数据进行收集分析。

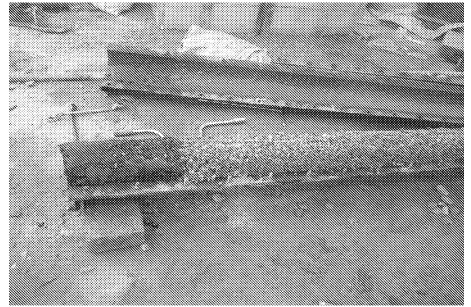
表 2 一维试验模型灌浆统计

序号	颗粒粒径 /mm	灌浆压力 /MPa	饱满扩散距离/cm		最远扩散距离/cm	
			无水条件	富水条件	无水条件	富水条件
1	2~5	0.4	17	15	40	38
2		0.6	19	15	41	40
3		0.8	20	17	32	40
4		1.2	21	18	42	48
5	5~10	0.4	36	34	45	40
6		0.6	42	41	48	44
7		0.8	48	45	51	53
8		1.2	56	48	58	54
9	10~20	0.4	65	51	73	61
10		0.6	86	61	116	66
11		0.8	98	89	105	92
12		1.2	125	110	136	115
13	20~50	0.4	93	85	96	90
14		0.6	165	133	175	143
15		0.8	166	138	186	155
16		1.2	176	140	195	160
17	2~50	0.4	76	72	86	76
18		0.6	83	73	98	110
19		0.8	99	78	120	116
20		1.2	105	81	136	134

注:饱满扩散距离是指沥青浆液扩散后完全充填的区域;最远扩散距离是指沥青浆液扩散能达到的最远距离。



(a) 数据收集



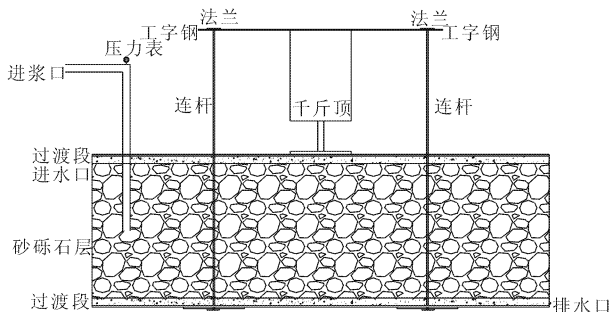
(b) 灌注样

图 2 一维试验模型低热沥青灌注后试样

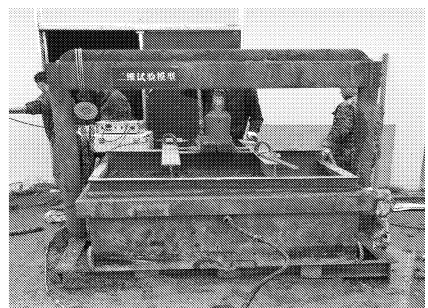
(2) 低热沥青灌注试验。通过在模型中装填不同粒径的砂砾石模拟实际地层,并使用千斤顶对模型钢板施加压力模拟不同深度下的低热沥青灌浆。试验结果如图 4 所示。

表 3 一维试验模型沥青结石体力学性能

序号	颗粒粒径 /mm	抗压强度/MPa				28 d 弹性模量/MPa		28 d 渗透系数/(cm·s ⁻¹)	
		无水条件		有水条件		无水条件	有水条件	无水条件	有水条件
		3 d	28 d	3 d	28 d				
1	2~5	2.14	2.37	1.69	2.46	5.05	5.64	1.2 × 10 ⁻⁵	3.5 × 10 ⁻⁵
3	5~10	2.45	3.45	2.18	3.15	7.70	6.53	7.1 × 10 ⁻⁶	1.7 × 10 ⁻⁵
6	10~20	2.84	3.60	2.65	3.05	5.15	7.24	3.2 × 10 ⁻⁶	1.9 × 10 ⁻⁵
8	20~50	3.62	4.81	2.98	3.34	12.90	9.45	4.8 × 10 ⁻⁶	9.6 × 10 ⁻⁶
10	2~50	3.12	4.39	2.68	3.29	12.10	10.20	5.4 × 10 ⁻⁶	2.5 × 10 ⁻⁵



(a) 模型设计



(b) 试验模型

图 3 二维试验模型设计和试验模型示意图

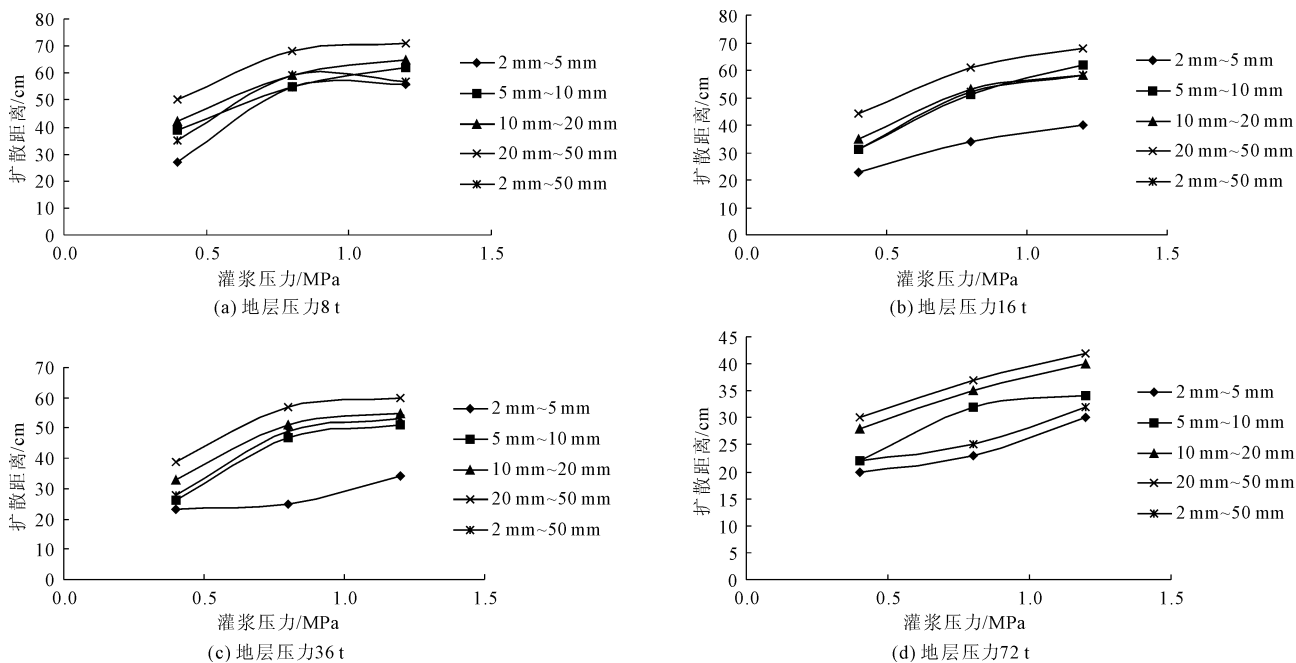


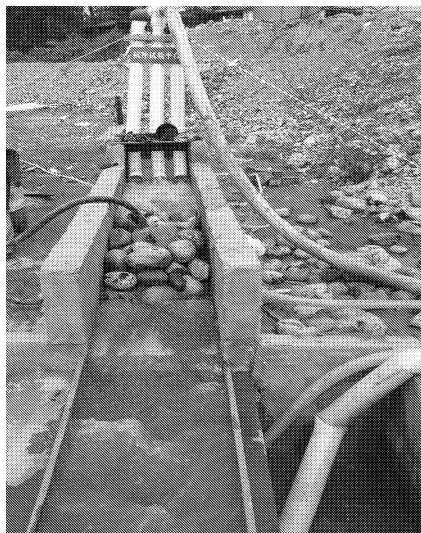
图 4 二维试验中不同粒径低热沥青最小扩散距离

2 低热沥青堵漏抗冲试验

(1) 试验模型。不同地层灌浆堵漏受地质条件、裂(孔)隙大小、地下水流速、浆液性能及灌浆施工工艺等因素影响较大,特别是动水堵漏灌浆。灌浆浆液在动水条件下的扩散过程和堵漏灌浆效果分析原理研究很少,往往需要采用室内模拟试验来观

察浆液在地层中的运动扩散规律,以及在动水条件下的堵漏灌浆效果。

为检验低热沥青浆液在块石架空地层中不同边界条件、不同流速条件下的防渗堵漏适应性,在满足相似要求的前提下制作了试验模型如图 5 所示。块石直径主要选取 200 mm~500 mm 的河卵石,随机无序抛填在模型中,利用端头的水管制造不同的流速。



(a) 模型



(b) 块石

图 5 抗冲试验模型示意图

(2) 材料参数。常用的水泥-水玻璃、速凝石膏和低热沥青浆液均为典型的宾汉姆流体,其剪切屈服强度都大致与时间呈幂函数关系即^[9]:

$$\tau = \tau_0 \times e^{at} \quad (1)$$

式中: τ 为浆液某时刻的剪切屈服强度,Pa; τ_0 为浆液初始剪切屈服强度,Pa; a 为时间系数; t 为时间,

s。

典型堵漏材料性能指标见表 4。

(3) 抗冲试验。抗冲试验后浆液留存情况如图 6 所示,试验结果如表 5 所示。

表 4 典型堵漏材料性能指标

堵漏材料名称	初始屈服强度/Pa	时间系数	备注
水泥-水玻璃	150	0.015	—
速凝膏浆	200	0.010	
低热沥青	250	0.020	70℃施工温度



(a) 低热沥青



(b) 水泥-水玻璃

图 6 抗冲试验浆液留存

表 5 试验材料抗冲试验结果

流速 ($m \cdot s^{-1}$)	封堵率/%						浆液留存率/%					
	低热沥青		速凝膏浆		水泥-水玻璃		低热沥青		速凝膏浆		水泥-水玻璃	
	光滑下垫面	2 mm~5 mm 碎石	光滑下垫面	2 mm~5 mm 碎石	光滑下垫面	2 mm~5 mm 碎石	光滑下垫面	2 mm~5 mm 碎石	光滑下垫面	2 mm~5 mm 碎石	光滑下垫面	2 mm~5 mm 碎石
0.2	100	100	100	100	100	100	100	100	88	95	75	81
0.5	100	100	100	100	100	100	100	100	72	78	62	68
1.0	100	100	85	91	95	100	100	100	61	68	48	64
1.2	100	100	70	76	88	92	100	100	52	68	34	43
1.5	100	100	45	52	62	68	92	98	41	49	28	32
2.0	100	100	21	23	37	38	71	82	15	17	11	13
2.5	70	73	—	—	10	12	52	58	—	—	5	10
3.0	42	43	—	—	—	—	18	19	—	—	—	—

3 讨论

低热沥青灌浆是在动水条件下封堵大空隙地层渗流通道的一种非常有效的方法。本文根据低热沥青材料特性,在室内试验条件下进行了一维、二维浆液扩散试验和抗冲试验。

(1) 低热沥青浆液扩散距离主要与砂砾石层的粒径级配有关,在砂砾石中密状态和灌浆压力为 1.2 MPa 时,2 mm~5 mm 的砂砾石层中浆液扩散距离为 20 cm~40 cm 左右,2 mm~50 mm 粒径的砂砾石层中浆液扩散距离可达到 80 cm~120 cm 左右,若在孔隙更大的 20 mm~50 mm 粒径组成的砂砾石层中,浆液扩散距离更可达到 150 cm 左右,说明低热沥青灌浆浆液具有良好的扩散能力,可基本满足在中等

块石地层中灌浆孔排距对浆液扩散范围的要求。

(2) 低热沥青浆液扩散距离还与灌浆压力、地层富水条件和地层上覆附加应力有关。

低热沥青的扩散距离随着灌浆压力的增大增加,在粒径较小的地层中可采用较高的灌浆压力以获得浆液良好的扩散性能。

低热沥青浆液在同等灌浆压力下,无水条件下的扩散距离较饱和状态下的扩散距离要有所增加,表明地层内水份的存在影响了浆液的温度变化,从而改变了浆液的流变参数,影响了浆液的扩散距离,最大影响幅度可达 30%。

不同深度地层条件下低热沥青的扩散距离将受到明显的影响,在 30 m 深度下(地层压力为 72 t),浆液的扩散距离将至少减少 20% 以上,而且表现出

粒径越细受到的影响越大的趋势。

(3) 低热沥青浆液结石体的抗压强度、渗透系数等力学参数测试结果表明:低热沥青结石体强度能达到 2 MPa~5 MPa 左右,渗透系数小于 5×10^{-5} cm/s,是一种防渗性能良好的灌浆材料,可满足一般工程防渗的要求,但其弹性模量仅有 5 MPa~10 MPa,明显偏软,加上沥青固有的蠕变特性,应采用低热沥青-水泥基灌浆材料的复合灌浆弥补低热沥青结石体强度较低的不足。

(4) 低热沥青灌浆材料在抗冲试验过程中与常用的速凝膏浆、水泥-水玻璃浆液相比,浆液留存率高,封堵效果显著。对于孔隙率小于 40%、流速低于 2 m/s 的地层,采用低热沥青浆液进行封堵时,封堵率 100%,封堵速度快。

(5) 低热沥青灌浆在富水条件下的流动和扩散情况较好,并且相对于纯沥青灌浆具有较高的结石强度,对于大孔隙、动水条件下的堵漏灌浆,材料留存率高,相对于目前常用的堵漏材料具有较大的应用前景。

4 结 论

本文围绕实际工程需要,开展了富水条件下低热沥青浆液扩散性能和抗冲性能试验研究,可以初步得出以下结论:

(1) 低热沥青在中等以上粒径的地层中扩散距离能满足灌浆孔排距的要求,其结石体强度可满足工程防渗的要求。但在微细粒径为主的地层中其扩散距离受到较大的限制。

(2) 低热沥青在大流量、快流速的地层封堵堵漏中具有不分散、遇水凝固的特性,浆液留存率高,封堵率高,效果显著。

(3) 采用低热沥青-水泥基灌浆材料复合灌浆可弥补低热沥青结石体强度较低的不足,并可降低施工造价。

(4) 低热沥青在灌注过程中需要全程保温,需要进一步研究其施工工艺及其相应的设备装置,以推广低热沥青材料在工程实践中的应用。

参考文献:

- [1] 赵卫全.大孔(裂)隙地层动水堵漏灌浆技术研究与应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2012.
- [2] Carvalho H D. Jaburu dam foundation improvement[C]//The 17th International Congress on Large Dams Committee, Austria;Vienna, 1991.
- [3] 赵卫全,张金接,符平,等.改性沥青灌浆堵漏试验研究[J].铁道建筑技术,2011(9):43-47.
- [4] Lukajic B, Smith G, Deans J. Use of asphalt in treatment of dam foundation leakage Stewartville Dam[C]//Issues in Dam Grouting, 2015:76-91.
- [5] Turkmen S. Treatment of the seepage problems at the Kalecik Dam(Turkey) [J]. Engineering Geology, 2003, 68 (3/4): 159-169.
- [6] 符平,王春,杨晓东.低热沥青灌浆堵漏技术研究[J].水利水电技术,2013,44(12):63-67.
- [7] 李娜,黄立维,邢占清,等.低热沥青堵漏材料性能试验[J].水利水电技术,2016,47(5):128-133.
- [8] 阮文军.基于浆液粘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.
- [9] 符平,赵卫全,张金接.非水反应型材料灌浆堵漏模型研究[J].岩土工程学报,2015,37(8):1509-1516.
- [10] 黄立维,符平,张金接.基于BP神经网络到差压式浆液密度监测技术[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):6-10.
- [11] 李娜,符平,黄立维.基于生化原理到砂土加固技术研究进展[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):1-5.
- [12] 倪至宽,翁祯祥,纪家宏.防止新水春隧道涌水的热沥青灌浆工法[J].岩石力学与工程学报,2004(23):5200-5206.
- [13] 傅子仁,薛文城,尚新民.热沥青灌浆工法于地下工程涌水处理的应用[C]//第六届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会论文集,2007.