

应急自动堵漏材料的设计制备及模拟实验

张意¹, 欧忠文^{2,3}, 曾宪光², 刘晋铭³, 邓伟³

(1.重庆建工住宅建设有限公司, 重庆 400015; 2.四川理工学院,
四川 自贡 643000; 3.解放军陆军勤务学院, 重庆 401331)

摘要: **目的** 设计制备一种基于磷酸镁水泥的应急自动堵漏材料, 并进行室内模拟实验。**方法** 通过加入核桃壳粒和膨润土, 为应急堵漏材料提供骨架支撑, 调整材料密度。基于此进行单掺实验遴选抗分散组分、填料组分和膨胀组分种类, 并确定各自掺量范围。而后, 以聚丙烯酰胺 (PAM) 掺量、核桃颗粒级配和吸水树脂 (SAP) 掺量作为正交试验设计因素, 开展三因素三水平正交试验, 得到应急自动堵漏材料的基本配方。最后, 根据不同漏口位置、漏口形状、漏口大小, 掺加纤维搭建漏口阻挡体系, 加入漂珠调节堵漏材料密度实现自动堵漏。通过初凝时间和终凝时间测试、置换法和 pH 值测试, 分别测定应急自动堵漏材料凝结时间、密度和抗分散性, 依据堵漏渗水的多少判定堵漏效果。**结果** 通过单掺试验遴选材料和正交试验调整掺量, 最后得到基于磷酸镁水泥应急自动堵漏材料基础配方为 100%MPC+60%核桃壳颗粒+40%~100% 漂珠+5%膨润土+0.6% PAM+4% SAP+3%~4% 硼砂+0.4% 减水剂+0~5% 纤维, 水固比为 0.2~0.25, 对基础配方改进后能对底部、侧部不同尺度漏口进行封堵。**结论** 纤维能在漏口形成网架结构, 实现刚性填料和弹性膨胀组分拦阻, 核桃颗粒等填料可以在漏口内部狭窄处进行架桥, 提供封堵层骨架, SAP 等膨胀组分吸水可较密实地填充漏口, 漂珠可以有效调节应急堵漏材料密度。

关键词: 应急堵漏; 自动堵漏; 磷酸镁水泥; 正交试验; 模拟实验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.006

中图分类号: X505 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)06-0027-06

Design Preparation and Simulation Experiment of Emergency Automatic Plugging Material

ZHANG Yi¹, OU Zhong-wen^{2,3}, ZENG Xian-guang², LIU Jin-ming³, DENG Wei³

(1.Chongqing Construction Residential Engineering Co., Ltd, Chongqing 400015, China; 2.Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China; 3.Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, China)

ABSTRACT: **Objective** To design and prepare a kind of emergency automatic plugging material based on magnesium phosphate cement and carry out indoor simulation experiment. **Methods** Walnut shell and bentonite were provided as skeleton support of emergency plugging material to adjust the density of the material. Based on this, the single doping experiment was conducted to select anti-disperse component, packing component and expansion component type, and determine the respective dosage range. Then, the polyacrylamide (PAM) dosage, walnut grain size distribution and water absorbing resin (SAP) content were taken as orthogonal experiment design factors. Three factors and three levels of orthogonal experiments were carried out to get emergency automatic plugging material basic formula. Finally, according to different location of leakage, the shape of leak, the

收稿日期: 2018-02-27; 修订日期: 2018-03-27

基金项目: 重庆市建设科技计划项目 (城科字 2015 第(89)号)

作者简介: 张意 (1981—), 男, 江苏人, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向施工质量技术管理。

通讯作者: 欧忠文 (1965—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。

size of leakage hole, and the addition of fiber, the leakage plugging system was built. The density of the material was adjusted to achieve automatic plugging by adding drift beads. Through the initial setting time and final setting time test, the displacement method and pH value test, the setting time, density and resistance to dispersion of emergency automatic plugging material were determined to judge the plugging effect according to water seepage. **Results** After the single doping test selection and the orthogonal experiment adjustment, the basic formula of emergency automatic plugging materials based on magnesium phosphate cement was obtained: 100% Magnesium phosphate cement + 60% Walnut shell particles + 40%-100% Drift beads + 5% Bentonite + 0.6% PAM + 4% SAP + 3%-4% Borax + 0.4% Water reducing agent + 1%-5% Fiber, and water cement ratio was 0.2-0.25. After improvement of the basic formula, different scales of leakage at the bottom and side can be blocked. **Conclusion** Fiber can realize the rigid structure in the leakage to achieve blocking of rigid filler and elastic expansion composition. Walnut grain and other filler might be bridges in inside the leaks to provide a layer of seal skeleton. SAP expansion components such as water absorption could fill the leaks tightly. Drift beads could effectively adjust the density of casualty plugging material.

KEY WORDS: emergent plugging; automatic plugging; magnesium phosphate cement; orthogonal test; simulation experiment

堵漏材料是指通过物理作用或与介质发生化学作用堵塞盛放容器或设施发生油水介质泄漏的工程材料。目前,针对地下水堵漏、大坝堵漏、污水井堵漏、地下工程堵漏、矿井堵漏、房屋堵漏等开发的堵漏材料名目繁多^[1-4],采用合适的堵漏材料和技术,就能很好地处理普通的渗漏问题。对于因发生重大自然灾害或重大安全事故造成的高放射性废水,有毒有害水体盛放容器或设施的在线、带水带压的无人自动堵漏来说,常规堵漏材料和堵漏技术并不合适^[5-6]。

2011年3月11日,日本发生9.0级地震并引发海啸,致使福岛第一核电站的2号反应堆取水口附近出现了长约20 cm的裂缝(其位置如图1所示),用于反应堆冷却的高放射性污水从该裂缝漏出,并经取水口电缆竖井下方的碎石层流入大海,最后造成1.14万t高浓度(其浓度是法定限度的1.3亿倍)放射性污水泄漏。泄漏发生后,抢修人员先后用水泥类堵漏材料、快凝吸水膨胀聚合物和“超级胶”等平时堵漏效果非常好的材料均未堵漏成功,最后,使用水玻璃和其他阻水化学试剂组成的堵漏材料才将裂缝完全堵

住,整个堵漏过程持续近一个月。这段时间内泄漏的放射性污水对周围海域生态环境造成了不可逆转的破坏,影响时间将达几十年之久。日本作为一个工程材料较为发达的国家,在处理福岛第一核电站污水泄漏的过程中,仍然暴露出了较大的问题。究其原因,可能在于日常情况下使用的堵漏材料绝大部分是在有人操作、借助机具、干态无水条件下施工完成的,而在当时的条件下,污水泄漏的位置位于核辐射区域内,如果安排施工人员进行堵漏抢险作业,将使施工人员遭受严重的辐射,即使采取严格的防护措施,单次作业的时间也有严格限制。在这种完全不具备堵漏施工条件的情况下,要发挥这些常规堵漏材料相应的堵漏效果显然是不可能的。

基于以上分析,针对此类对堵漏施工条件严格限制的特殊水体的堵漏,若能将堵漏材料投放到水体后,堵漏材料通过水流自动带到漏口位置,并在此处固化,堵塞渗漏通道,达到堵漏的目的,将具有重要的工程应用价值^[7-8]。普通堵漏材料在对无任何施工条件或施工条件受到严格限制,不允许对漏水处做任何处理,甚至是任何施工器械、施工装备都难以发挥作用的前提下,需要一次性带水、带压、快速、自动完成应急堵漏,是很难实现的^[9-11]。因此,研究一种具有自动堵漏、快速堵漏功能的材料十分必要,有利于应急处理放射性污水、有毒有害废水泄漏等环境问题。

1 试验

1.1 凝结时间

按照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行,采用截锥圆模(上口直径为65 mm,下口直径为75 mm,高度为40 mm)制备试样,在标准养护条件下,利用水泥标准稠度凝结时间测定仪对堵漏材料初凝时间和终凝时间进行测定。

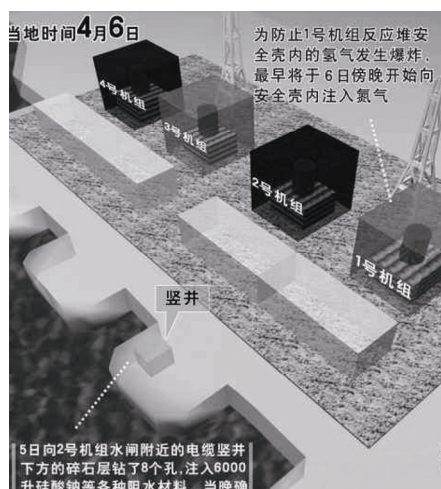


图1 福岛第一核电站2号反应堆取水口附近竖井裂缝示意

1.2 流动度

按照 GB/T 50448—2008《水泥基灌浆材料应用技术规范》进行，测定堵漏材料在无扰动情况下的自由流动度。操作方法为：将制备好的堵漏材料迅速倒满放在玻璃板上的截锥圆模（上口内径为 70 mm，下口内径为 100 mm，高度为 60 mm）内，堵漏材料与截锥圆模上口平齐。缓慢提起截锥圆模，待堵漏材料自由流动停止后，测出最大扩散直径及与其垂直方向直径，取二者平均值作为流动度。

1.3 密度

取制备好的堵漏材料 100 g，加入盛有 800 mL 水的 1000 mL 量筒中，观察并记录量筒液面的高度变化，作为 100 g 堵漏材料的体积。用堵漏材料质量除以体积即得到堵漏材料密度，重复 3 次试验，取其平均值作为堵漏材料密度。

1.4 抗分散性

参照 DL/T 5117—2000《水下不分散混凝土实验规程》对新拌水下不分散混凝土抗分散性测试的方法，对堵漏材料的抗分散性进行测定。《水下不分散混凝土实验规程》中包含称重法测水泥流失量、悬浊物含量测定和 pH 值测定三种方法。文中采用 pH 值测定法，将 500 g 堵漏材料均分成 10 份，将每份堵漏材料缓慢加入到盛有 800 mL 水的 1000 mL 烧杯中，操作时间不超过 20 s，静置 3 min。用吸管在 1 min 内轻轻吸取 600 mL 烧杯中的水，作为 pH 值测定试验样品，然后测定 pH 值，并根据 DL/T 5117—2000《水下不分散混凝土实验规程》中附录 A 的规定评价堵漏材料的抗分散性。

1.5 力学强度

按照 GB/T 17671—2005《水泥胶砂强度检验方法》进行搅拌，采用 40 mm×40 mm×160 mm 试模成型，脱模成型后进行标准养护。对养护不同龄期的试件进行抗折、抗压强度测试。应急自动堵漏材料的粘

结强度用抗折强度进行反映。试验步骤为：将前期浇筑的 40 mm×40 mm×160 mm 尺寸普通砂浆试块，标准养护至 28 d 龄期后从中间折断，将得到的两个试块分别与应急自动堵漏材料浇筑成 40 mm×40 mm×160 mm 尺寸的试块，标准养护至规定天数后测试其抗折强度，以测得的抗折强度作为应急自动堵漏材料的粘结强度。

2 结果及分析

2.1 应急堵漏材料基础配方确定

通过单掺试验进行材料遴选^[12-13]，以磷酸镁水泥为参比对象，确定应急堵漏材料中，选择掺量为 0.4%~0.6%的 800 万分子量 PAM 作为应急自动堵漏材料的抗分散组分，核桃壳颗粒的掺量固定为 60%，膨润土掺量为 5%，参加 3%~4%的 SAP 作为膨胀组分，漂珠掺量为 40%~100%，纤维掺量 1%~5%，减水剂掺量为 0.4%，水灰比为 0.35。为调整磷酸镁水泥凝结时间，掺入硼砂，掺量为 3%~4%。

以 PAM 掺量、核桃壳颗粒级配、SAP 掺量作为正交试验的设计因素，每个因素取三个水平，开展三因素三水平正交试验，其适用的正交表是 L₉（3³）。所进行正交试验的影响因素及水平值见表 1，试验中堵漏材料体系组成为：*m*(MPC)：*m*(核桃壳颗粒)：*m*(膨润土)：*w*(水)=1：0.6：0.05：0.35。

表 1 应急堵漏材料正交试验方案的因素水平表

水平	影响因素		
	PAM 掺量/%	核桃壳颗粒级配 (粗：细)	SAP 掺量/%
	A	B	C
1	0.4	1.5：1	3
2	0.5	1：1	3.5
3	0.6	1：1.5	4

正交试验结果见表 2，以抗分散效果为评价依据，选用 pH 值作为评价指标，采用极差分析法进行分析。应急堵漏材料 pH 值试验结果极差分析见表 3。

表 2 应急堵漏材料正交试验结果

试验编号	PAM	核桃壳级配（粗：细）	SAP	抗压强度/MPa	粘结强度/MPa	流动度/mm	pH 值
1	1	1	1	22.1	2.6	134	8.35
2	1	2	2	25.6	2.8	138	8.44
3	1	3	3	23.8	3.0	130	8.51
4	2	1	2	24.4	2.4	128	8.3
5	2	2	3	25.1	2.9	132	8.48
6	2	3	1	20.3	2.5	129	8.24
7	3	1	3	19.8	2.8	127	8.28
8	3	2	1	26	2.5	136	8.17
9	3	3	2	23.1	2.3	127	8.21

表 3 应急堵漏材料 pH 值试验结果极差分析

试验 编号	影响因素			pH 值
	PAM 掺量	核桃壳颗粒级配 (粗:细)	SAP 掺量	
	A	B	C	
1	1 (0.4%)	1 (1.5:1)	1 (3%)	8.35
2	1	2 (1:1)	2 (3.5%)	8.44
3	1	3 (1:1.5)	3 (4%)	8.51
4	2 (0.5%)	1	2	8.3
5	2	2	3	8.48
6	2	3	1	8.24
7	3 (0.6%)	1	3	8.28
8	3	2	1	8.17
9	3	3	2	8.21
K1	25.3	24.93	24.76	
K2	25.02	25.09	24.95	
K3	24.66	24.96	25.27	
$\overline{K1}$	8.43	8.31	8.25	
$\overline{K2}$	8.34	8.36	8.32	
$\overline{K3}$	8.22	8.32	8.42	
R	0.21	0.05	0.17	

由表 3 可知, PAM 掺量的极差 R 最大, SAP 掺量次之, 核桃壳颗粒级配 (粗:细) 最小, 因此该次试验中, 影响应急自动堵漏材料 pH 值的主次关系为: $A>C>B$ 。在确定各因素对抗分散性的优水平时, 由于抗分散性越好, pH 值越小, 故从表 3 $\overline{K1}$ 、 $\overline{K2}$ 、 $\overline{K3}$ 中选取值最小的水平作为优水平。三个因素的优水平分别为 A_3 , B_1 , C_1 , 优水平组合 $A_3B_1C_1$ 即为保证最小 pH 值、亦即抗分散性最好的最优水平组合, 此时的配比为: PAM 掺量 0.6%, 核桃壳颗粒中粗、细颗粒质量比为 1.5:1, SAP 掺量 3%。该组配比在表 3 中无对应试验, 补充试验, 测得 pH 值为 8.2。应急堵漏材料基础配方见表 4。

2.2 室内模拟实验

漏口的实际情况极其复杂, 在试验中难以模拟所有的漏口情况。通过查阅文献, 从漏口的位置、选择、大小出发, 设计了 8 种典型的漏口, 具体参数特征见表 5。考虑到岩石材质的漏口加工比较困难, 试验中漏口的材质均为混凝土材质。

表 4 应急自动堵漏材料配方

材料	MPC	核桃壳颗粒	漂珠	膨润土	PAM	SAP	硼砂	减水剂	纤维	水固比
掺量	100%	60%	40%~100%	5%	0.6%	3%	3%~4%	0.4%	0~5%	0.2~0.25

表 5 漏口位置及形状

漏口编号	漏口位置	漏口形状	漏口大小
1	容器底部	圆孔	直径 5 mm
2	容器底部	圆孔	直径 10 mm
3	容器底部	裂缝	3 mm×30 mm
4	容器底部	裂缝	5 mm×30 mm
5	容器侧部	圆孔	直径 5 mm
6	容器侧部	圆孔	直径 10 mm
7	容器侧部	裂缝	3 mm×30 mm
8	容器侧部	裂缝	5 mm×30 mm

为了便于观察堵漏材料在水中的运动路径, 盛水容器除漏口所在的部位应为混凝土材质外, 其余部分均可用透明的材料进行制作。试验中, 用透明的有机玻璃管和混凝土试块制作了如图 2 所示的盛水容器。有机玻璃管的尺寸: 底部直径为 100 mm, 长为 1200 mm, 管壁厚为 2 mm; 混凝土试块的尺寸: 底部直径为 150 mm、高为 50 mm。使用环氧树脂将有玻璃管粘接固定在混凝土试块上, 经盛水测试容器不存在漏水现象。

为了模拟容器底部漏水的情形, 在混凝土试块中心制作了相应参数的漏口。以制作 5 mm 圆孔漏口为例, 在混凝土试块模具中心竖直放置高为 60 mm、直

径为 5 mm 的铁棒, 将其与混凝土仪器浇筑呈现, 1 d 后将铁棒从混凝土试块中取出, 混凝土试块自然养护至 28 d, 此时便得到了一个直径 5 mm 贯通孔的混凝土试块。对贯通孔表面用砂纸进行打磨, 增加其表面粗糙度, 然后将其与有机玻璃管粘接固定, 即完成了漏口位于底部的漏水装置制作, 如图 3a 所示。在制作其他位于容器底部的漏口时, 只需在浇筑混凝土试块时放入相应尺寸的铁棒或铁片, 其他步骤与制作 5 mm 圆孔漏口的步骤完全相同。

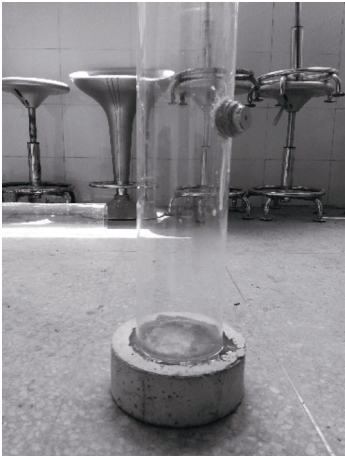


图 2 试验盛水容器

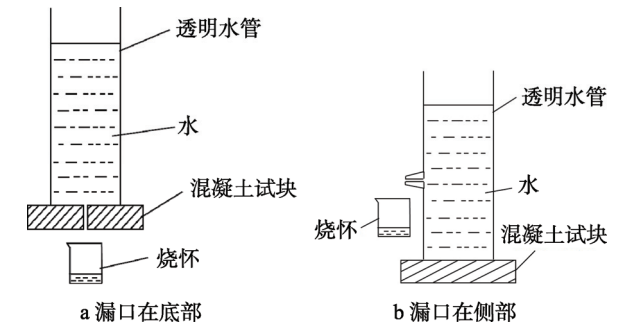


图 3 简易漏水装置

在制作漏口位于侧部的简易漏水装置时,要将包含漏口的混凝土试块固定在有机玻璃管侧壁上是非常困难的。试验中采用了在其他材料表面涂刷水泥砂浆来模拟混凝土材料的方法,选用直径为 40 mm 的橡胶塞作为漏口的制作材料。以制作位于容器侧壁的 5 mm 圆孔漏口为例,首先,利用冲击钻在橡胶塞上钻取直径 5 mm 的贯通孔,用砂纸对贯通孔表面进行打磨,使其具有一定的粗糙度,然后在贯通孔表面涂刷聚合物改性砂浆,待砂浆凝结后备用。用冲击钻在有机玻璃管侧壁上钻取直径为 40 mm 的圆孔,然后用之前制作好漏口的橡胶塞塞住有机玻璃管侧壁的圆孔,并用环氧树脂进行粘接固定。待环氧树脂固化

后,即制作完成了漏口位于容器侧壁的漏水装置,示意图如图 3b 所示。其他漏口的制作方法与此相同,仅漏口大小和形状有相应变化。

用自制的简易漏水装置对应急自动堵漏材料的堵漏效果进行评价,其堵漏效果的评价指标包含以下指标:堵漏时间,即应急自动堵漏材料从加入水中到漏口停止漏水的时间;漏水量,即装置中的水在应急自动堵漏材料从加入水中到漏口停止漏水的这段时间内,经漏口流出的水的体积。根据漏口大小选择不同尺度和种类的纤维^[16-17],见表 6。

表 6 用于不同漏口堵漏的纤维长度

漏口 编号	漏口 形状	漏口大小	玻璃纤维 长度/mm	聚丙烯纤 维长度/mm
1, 5	圆孔	直径 5 mm	6	3
2, 6	圆孔	直径 10 mm	12	3
3, 7	裂缝	3 mm×30 mm	6	3
4, 8	裂缝	5 mm×30 mm	6	3

由于漏口位置和尺度不一,对应急堵漏材料进行针对性地调整^[14-15],配方、性能参数和堵漏效果见表 7。

表 7 应急堵漏材料配方、性能及堵漏效果

漏口 编号	漂珠 掺量/%	硼砂 掺量/%	玻璃纤 维掺量/%	聚丙烯 纤维掺量/%	密度/ (g·cm ⁻³)	凝结 时间/min	堵漏 效果	堵漏 时间/s	漏水 量/mL
1	40	3.3	1	0.4	1.31	4.3	堵住	24	265
2	50	3.1	1.5	1	1.39	4.0	堵住	35	815
3	40	3.0	1	1.5	1.36	3.9	堵住	31	1280
4	40	3.0	1	2	1.44	3.8	堵住	35	1920
5	85	3.6	1	0.6	1.04	4.6	堵住	37	355
6	70	3.5	1.5	1	1.09	4.4	堵住	33	645
7	70	3.5	1	1.5	1.1	4.3	堵住	47	1810
8	60	3.3	1.5	1.5	1.14	4.1	堵住	33	1940

堵漏材料中包含有核桃壳颗粒、漂珠组成的填料,膨润土和 SAP 组成的吸水膨胀组分,复配纤维等多种材料。它们在堵漏材料中充当了不同的角色:填料为堵漏材料提供强度,将其称为刚性颗粒;吸水膨胀组分吸水后体积发生变化,称为弹性粒子;纤维在堵漏时形成网状结构。纤维首先在漏口形成网架结构^[18],实现对刚性填料颗粒和弹性膨胀组分的拦阻,填料在漏口内部狭窄处进行架桥,提供封堵层骨架,膨胀组分吸水使堵漏材料密实地填充漏口。三类材料共同作用、共同影响,形成稳定的封堵层。

3 结论

1)堵漏材料中加入的硬纤维横架于漏口端面处,

可形成纤维网架结构,网架结构能使后续到来的刚性颗粒与弹性粒子停留,刚性颗粒在漏口内部狭窄处起到架桥作用,形成封堵层骨架。

2)堵漏材料密度至关重要,过大会导致堵漏材料不受水流控制直接沉底,无法达到漏口处,过小容易浮在液体表面,恰好悬浮在需堵漏液体中效果最佳。

3)对于堵漏材料的凝结时间和分散性的调节也是完成堵漏的关键。

参考文献:

[1] 张子平. 惰性材料与水泥堵漏技术[J]. 西部探矿工程, 2002(Z1): 268.
[2] ALSABAGH A M. Surface Activity and Thermodynamic

- Properties of Water Soluble polyester Surfactants Based on 1,3-Dicarboxymethoxybenzene Used for Enhanced oil Recovery[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2015, 11(1): 48-56.
- [3] OLUWATONI A, SARAH A, JULIUS U. The Use of *Crassostrea Virginica* as Lost Circulation Material in Water-based Drilling Mud[J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2014, 4(2): 109-117.
- [4] ALI M A, DZOMBAK D A. Competitive Sorption of Simple Organic Acids and Sulfate on Goethite[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(4): 1061-1071.
- [5] DAVIDSON L. Ocean Acidification and Its Effects Upon Fitness in Nereidid Polychaetes[J]. *University of Hull*, 2013, 27(5): 1030-1037.
- [6] HERZHAFT B, SAINTPERE S, TOURE A, et al. Rheological Properties of Aqueous Foams for Underbalanced Drilling[J]. *Drilling*, 1999, 34(9): 1738-1743.
- [7] CROEE P, MODONI G. Design of Jet-grouting Cut-offs[J]. *Ground Improvement*, 2007, 11(1): 11-19.
- [8] 叶正茂, 常钧, 芦令超, 等. 硫铝酸盐水泥基防渗堵漏材料的性能[J]. *济南大学(自然科学版)*, 2007, 21(3): 189-192.
- [9] 邹建龙, 屈建省, 吕光明, 等. 纤维水泥堵漏性能评价研究[J]. *钻井液与完井液*, 2007, 24(2): 35-39.
- [10] DUAN Ping, YAN Chun-jie, LUO Wen-jun. A Novel Waterproof, Fast Setting and High Early Strength Repair Material Derived from Metakaolin Geopolymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2016(124): 69-73.
- [11] SEEHRA S, SAROJ G, SATANDER K. Rapid Setting Magnesium Phosphate Cement for Quick Repair of Concrete Pavements-characterization and Durability Aspects[J]. *Cement and Concrete Research*, 1993, 23(2): 254-266.
- [12] YUAN B, YANG Y G, TANG X, et al. A Starting Pressure Prediction of Thixotropic Cement Slurry: Theory, Model and Example[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015(133): 108-113.
- [13] 徐忠, 高学生, 王建, 等. TC-1 触变水泥堵漏剂研制与应用[J]. *钻采工艺*, 2006, 29(1): 93-95.
- [14] 俞锋, 朱华. 早强微膨胀水泥基灌浆料的性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2012(11): 6-9.
- [15] MO Li-wu, DENG Min, TANG Ming-shu, et al. MgO Expansive Cement and Concrete in China: Past Present and Future[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014(57): 1-12.
- [16] 余婷婷, 邓建民, 李建, 等. 高密度纤维堵漏水泥浆的实验研究[J]. *钻井液与完井液*, 2008, 25(2): 40-42.
- [17] 李爱民, 隆威. 轻质速凝堵漏注浆材料试验研究[J]. *混凝土*, 2003(4): 33-34.
- [18] 覃峰, 黄琼念, 包惠明, 等. 剑麻纤维水泥混凝土性能试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2008(5): 48-50.