

干湿循环条件下龙门石窟防渗灌浆材料 耐久性试验研究

赵 莽^{1,2}, 方 云²

(1.安徽省建筑工程质量监督检测站,安徽 合肥 230000; 2.中国地质大学(武汉) 工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要: 为评价龙门石窟灌浆材料在干湿循环条件下的耐久性,两组优选偏高岭土配合比 MK001、MK002 为研究对象,超细水泥配合比 CXSN 作为对比,体积、质量与强度等作为评价材料耐久性指标。结果表明:(1)在干湿循环后,三组配合比体积有所增长,以 MK002 增长率最大,为 7.543%,而质量均有一定损失;(2)三组配合比强度在前期均有一定增长, MK001、CXSN 配合比表现为前 6 次循环, MK002 持续增长时间达到第 12 次,强度后期出现严重损失,但 MK002 强度仍大于原始强度,波速与强度变化规律相似,可相互校正;(3)MK001、MK002 配合比的致密性明显下降, CXSN 配合比的 SEM 图中,裂隙发育明显;(4)MK001、MK002 配合比的易溶盐总量远小于 CXSN 配合比,且 Cl⁻ 的含量较低,反应前后,离子含量变化较小,固离子性较好,三组配合比的 pH 均较高,有利于维持水泥水化产物的稳定性;(5)试样以物理破坏为主,化学作用较为微弱,材料的化学成分变化较小;(6)MK002 配合比在干湿循环条件下的耐久性较好。

关键词: 龙门石窟; 渗水; 灌浆; 耐久性; 干湿循环

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3550(2019)01-0156-05

Experimental study on durability of impervious grouting material in Longmen Grottoes under dry-wet cycles

ZHAO Mang^{1,2}, FANG Yun²

(1. Anhui Province Construction Engineering Quality Supervision and Inspection Station, Hefei 230000, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to evaluate the durability of grouting materials in Longmen Grottoes under wet and dry cycles, the two groups of optimized metakaolin formula were selected with MK001 and MK002 as the research object, the superfine formulation of CXSN as a comparison, and selecting the volume, quality and strength as the evaluation index of durability of materials. The results showed that: (1) after the dry-wet cycles, the volume of three groups formulations growth, the largest growth rate of MK002 is 7.543%, the quality of the sample has a certain loss; (2) the strength of three formulations has a certain growth in the early, the formulations of MK001 and CXSN mainly growth in the first cycles, then the growth duration of MK002 up to twelfth times. The strength of the samples appeared serious losses in the late period, but the MK002 strength is greater than the original strength, and velocity and strength similar to that of mutual correction; (3) the compact of MK001 and MK002 decreased obviously, and the crack of CXSN growth significantly in the SEM; (4) the soluble salt content of MK001 and MK002 formulations is far less than the CXSN formula, and the content of Cl⁻ was low, as the favorable solid ion, the small change of ion, the stability of hydration products was maintained as the higher of the three formulations; (5) the physical damage is mainly to the sample, and the chemical effect is relatively weak, which the chemical composition have small changes; (6) MK002 formulation has good durability under dry-wet cycles.

Key words: Longmen Grottoes; water seepage; grouting; durability; dry-wet cycles

0 引言

龙门石窟在 1 500 多年的自然及人为因素的作用下,产生了严重的环境地质病害,研究表明渗水病害所产生的破坏最为严重^[1]。防渗灌浆是治理渗水的根本途径。但冻融、干湿、硫酸盐侵蚀等作用,严重破坏了灌浆材料的耐久性。因此,耐久性侵蚀的研究是重要课题。

收稿日期:2018-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40972183)

国内外学者关于材料耐久性试验做了众多研究。Houssarn、Toutanji 等^[2-3]对有 FRP 纤维布的混凝土梁和柱进行了研究,发现混凝土梁和柱抗压强度与抗弯强度在干湿循环后都有所降低。Robert D.Cody 等^[4]发现混凝土在硫酸盐溶液中经干湿循环后的膨胀量大于连续浸泡和冻融循环。Ababneh 等^[5]建立了干湿交替作用下的氯离子传输模型,并利用有限差分数值方法分析。宿晓萍等^[6]通过研究

复合盐与干湿循环下的混凝土的耐久性发现,在干湿循环后,混凝土的质量先增加后减小,弹性模量也有小幅增长但后期呈下降趋势。张亚梅等^[7]在研究橡胶水泥混凝土性能时,采用浸-烘的方式模拟干湿交替的试验情况。乔宏霞等^[8]研究发现粉煤灰混凝土在干湿循环后的动弹性模量有所下降。王琴等^[9]研究发现材料灌注于岩石裂缝中,约束性较强,当出现干燥收缩时,会产生拉应力,一旦超过材料强度,就会产生裂缝,发生破坏。

干湿循环是造成灌浆材料耐久性降低的主要侵蚀破坏因素之一。本试验以优选偏高岭土材料为研究对象,探究了偏高岭土材料的干湿循环破坏机理,为后期石质石窟的

保护与防渗灌浆材料的研发提供了理论依据。

1 试验方案设计

1.1 原材料

试验原材料主要包括偏高岭土、超细水泥和硅灰石粉,其中偏高岭土(MK)是河南奇明耐火材料有限公司采用粉尘悬浮煅烧法煅烧高岭土制备的,超细水泥(CXSN)是山东润成粉体有限公司生产的,细度为1250目,硅灰石粉(GHSF)是江西广洁化工有限公司生产的,细度400目,密度2.8 g/cm³,白度90,熔点1540℃。三种原材的主要化学成分如表1所示。

表1 偏高岭土、超细水泥和硅灰石粉的化学成分

组分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TFe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	Loss
MK	50.87	40.97	0.05	0.390	0.02	0.095	1.78	1.110	0.005	0.060	0.52	4.80
CXSN	21.49	5.81	2.80	58.67	0.37	0.670	2.94	0.380	0.150	0.120	0.20	4.40
GHSF	15.37	0.20	18.42	26.44	-	0.018	0.11	0.004	0.200	0.009	-	39.45

为激发偏高岭土活性,增强材料早期强度,选取水玻璃作为碱激发剂。其他添加剂还包括消泡剂、减水剂等。

试验以两组偏高岭土配合比为研究对象,超细水泥配合比作为对比,具体材料配合比如表2所示。参考JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》,将试样统一制作

为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的正方体,采用湿养护28 d(温度(20±2)℃,相对湿度95%)。

1.2 试验方法及评价指标

为评价材料的耐久性,选取试样的体积、质量、强度等指标进行耐久性评价。主要试验方法如下:

表2 试验材料配合比

	主材料(重量比)/%			添加剂			加水量/%
	超细水泥	MK	硅灰石粉	碱激发剂(占MK)	减水剂	消泡剂	
MK001	20	40	40	0	0.3	0.2	55
MK002	20	40	40	0.6	0.3	0.2	55
CXSN	60	-	40	0	0.3	0.2	55

(1)将养护28 d试样取出,放入(60±5)℃烘箱,烘至恒质,取出后,冷却至室温,对试样进行编号,并测定各指标。

(2)将试样放入(20±5)℃水槽中浸泡10 h,保持水面高于试样表面至少20 mm,然后取出,晾干放入(60±5)℃烘箱中烘10 h,此为一个循环。

(3)每6次循环,取出试样,进行各指标测定。试验共设置了30次循环,当一组样品中有2个样品出现明显的破坏或达到设置循环次数时,即可停止试验。

(4)干湿循环结束后,测定各组配合比指标数据。

2 结果与分析

2.1 体积稳定性变化

图1是各组配合比试样的体积变化率。由图1可知,三组试样的体积变化率随循环周期的变大而增长,以MK002配合比试样的平均体积变化率最大,30次循环后达到6.204%。MK001配合比和CXSN配合比的平均体积变化率处于一直增长的状态,CXSN配合比增长幅度较大。

试验结果表明:

(1)3组材料遇水均表现出一定吸水膨胀性,有利于提高材料抗渗性,掺碱激发剂的偏高岭土配合比材料(MK002)抗渗性最好,干湿循环30次后试样膨胀了4.507%~7.543%。

(2)MK001配合比在前18次干湿循环有一定收缩现

象,MK002配合比则未出现收缩现象,说明碱激发剂在激发偏高岭土活性时具有一定的抗收缩性能,表现出很好的抗渗性。

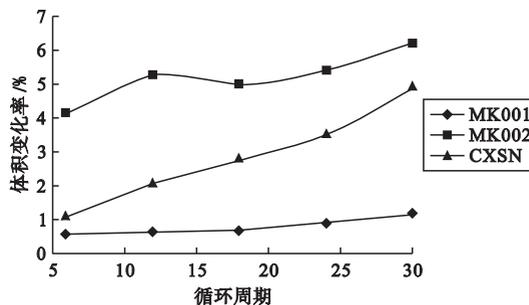


图1 试样体积变化率

在干湿循环试验过程中,材料吸水膨胀,干燥收缩作用反复进行,造成试样破坏。同时,试样内部裂隙被扩大扩宽,新裂隙发育,且因干燥失去内部水,会出现干收缩,导致“新月”的形成,造成一定的质量损失。偏高岭土配合比试样的体积变化率较大,就是因为干湿循环过程中,试样内部的孔隙的增长及发育而造成的,孔隙由内而外发展延伸,引起表面裂纹的发育。在CXSN配合比试样中,因水化产物钙矾石、石膏等矿物膨胀性,体积增长率较大。

2.2 质量变化

图2是三组配合比试样质量周期变化规律如。由图可

知,试样质量变化率随循环周期增大而降低,出现质量损失,以 MK001 配合比样品的下降幅度最大,由 8.461% 下降至 0.452%。MK002 配合比试样,在前 12 次循环质量有所增长,随后不断降低,这与试样的干收缩、碱激发剂的作用及水泥的缓慢水化有关。

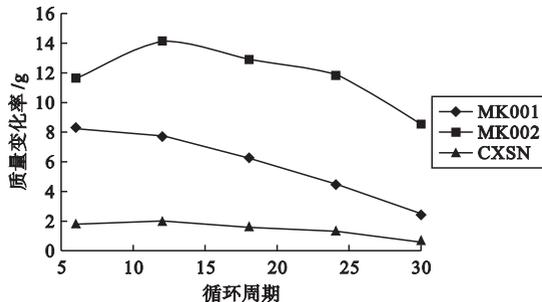


图2 试样质量变化率

CXSN 配合比试样的质量变化率逐步降低,但变化幅度较小,主要原因是该组样品的水泥水化程度较高,已基本完成,在后期作用较小所导致的。

2.3 力学性能及波速变化

图3是三组配合比试样强度变化率。可知, MK001、CXSN 配合比试样在前6次循环中,强度有较大幅度增长, MK002 配合比强度一直持续增长至12次循环。但在后期随循环周期增长,各配合比试样的强度下降幅度均较大,其中 MK001 配合比在30次循环后的强度相对于6次循环强度下降幅度达到34.882%, CXSN 配合比下降幅度也达到22.860%,而 MK002 配合比下降幅度也达到11.775%,但平均强度变化率大于0。

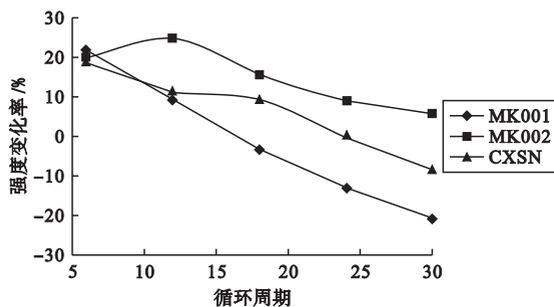


图3 试样强度变化率

对比 MK001、MK002 配合比试样可发现,掺碱激发剂的加入,使试样的强度有所增高,主要是 MK002 配合比中 0.6% 的碱激发剂,进一步激发了偏高岭土与水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应所造成的。

材料波速与强度呈正相关的关系,相互有一定校正作用,如图4所示。由图4可知,三组配合比试样的波速随循环周期的增长而逐渐降低,其中 CXSN 配合比试样的下降率最快,30次循环后的波速出现了大幅度的下降,可见 CXSN 试样的内部结构破坏较为严重,原因是水泥基材料对干湿循环作用较为敏感,内部的孔隙较为发育。试样在干湿循环过程中,内部结构遭受破坏,孔隙相互贯通,声时有所延长,导致波速大幅度降低。

2.4 微观结构分析

图5~7是三组配合比试验后的微观结构变化图。可

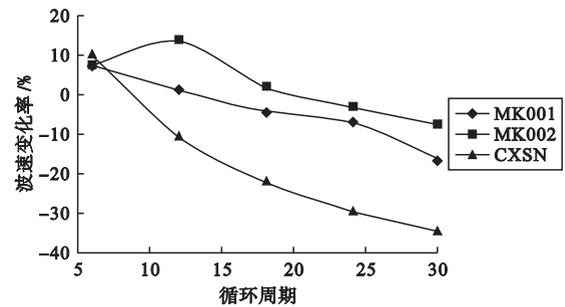
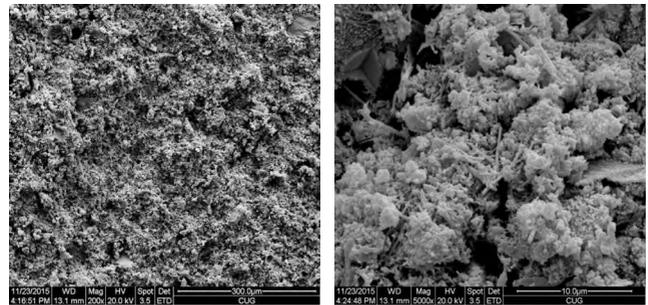
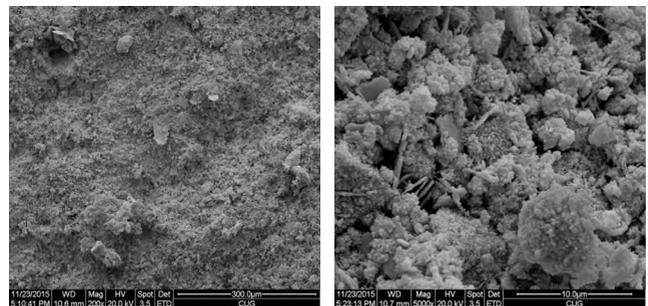


图4 试样波速变化率



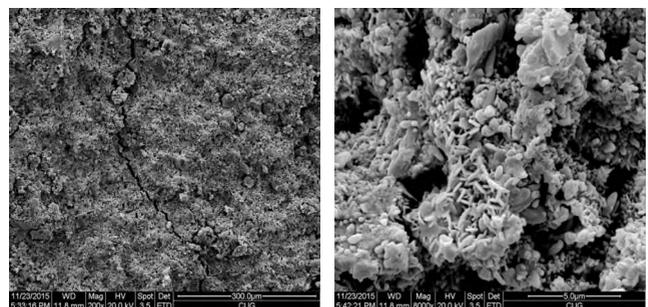
(a)200倍 (b)5 000倍

图5 MK001 配合比试样 SEM 图



(a)200倍 (b)5 000倍

图6 MK002 配合比试样 SEM 图



(a)200倍 (b)5 000倍

图7 CXSN 配合比试样 SEM 图

知,干湿循环后 MK001 配合比试样表面孔隙增多,凹凸程度变化较大,内部孔隙的增大,同时可以发现地聚物与 C-S-H 胶凝物质的生成还有薄片状的 C-H 存在,5 000 倍图中针棒状、短柱状 C-S-H 凝胶体与地聚物彼此镶嵌,形成网络状结构,在一定程度上提高了试样的致密性。C-H 在后期有所减少,说明火山灰反应及水化作用的继续进行。对比 MK001、MK002 试样可以发现,碱激发剂的加入很大程度上提高了材料的致密性。CXSN 配合比试样的变化较为明显,在干湿循环后,试样的表面有较大的裂隙发育(图7(a)),主要是超细水泥含量较高,水泥在硬化及干燥过程中,消耗较多

水分,导致试样出现了明显的干缩开裂。

对比可见, MK002 配合比试样在干湿循环后表面未出现明显破坏,整体密实性有所增加,主要是地聚与水化反应生成的产物充填于内部的孔隙中,使密实性有所提高而引起的。高倍微观结构图中,薄片状的 C-H 多内嵌于凝胶体 C-S-H 及地聚物之间,提高了试样的结构强度。

三组配合比在干湿循环过程中,内部结构都会出现不同程度破坏;因地聚物及水化产物的镶嵌,在一定程度上提高了材料的致密性,但干湿循环作用仍起主导性作用,各配合比试样均出现较大的质量与强度损失。

表 3 试样化学成分分析

配方		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O+Na ₂ O
MK001	前	6.326	22.144	40.523	0.108	0.938	27.201	0.598	0.010	0.045	1.565	0.422
	后	6.251	22.344	40.571	0.085	1.257	26.302	0.633	0.014	0.046	1.555	0.312
MK002	前	6.239	22.012	43.041	0.106	0.812	24.696	0.625	0.015	0.043	1.594	0.699
	后	6.134	22.447	42.884	0.096	0.823	24.867	0.618	0.010	0.049	1.536	0.431
CXSN	前	6.615	5.984	30.888	0.147	2.375	50.535	0.292	0.028	0.140	2.424	0.631
	后	6.598	5.534	30.819	0.133	2.380	51.305	0.284	0.014	0.150	2.356	0.216

2.6 易溶盐含量

三组配合比试样干湿循环后的 pH 与易溶盐总量变化如图 8 所示。可见, pH 值与易溶盐的总量随试验周期的增长而有所降低,其中 pH 值对水泥的水化产物的稳定性影响较大,三组配合比试样的 pH 最低值为 10.85,会导致水化产物 C-H、C-A-H 失稳, C-S-H 可以稳定存在^[10]。CXSN 配合比试样 F-2-1 的易溶盐含量高达 18.461 g/kg,容易析出,直接污染破坏石窟,不可用于龙门石窟现场的灌浆试验。

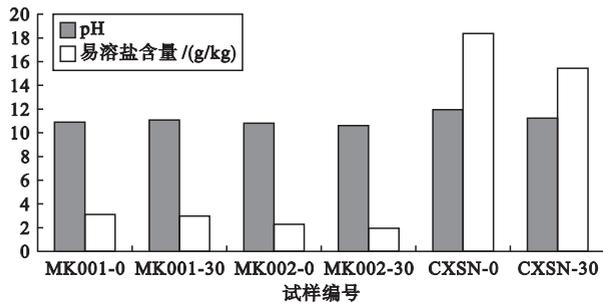


图 8 pH 与易溶盐总量

破坏性较强的 Cl⁻、SO₄²⁻ 离子,其变化规律如图 9 所示。由图 9 可知,三组配合比的 SO₄²⁻ 离子随循环周期的增长而升高,两组偏高岭土配合比的 Cl⁻ 离子含量随循环周期的增长而降低,而 CXSN 配合比的 Cl⁻ 变化规律则与之相反,含量有所增加,且 Cl⁻ 离子含量大于前两组,其中 Cl⁻ 含量高达 1.007 g/kg,比两组偏高岭土配合比大两个数量级,可见其泛盐碱概率远大于 MK001、MK002 配合比。

3 结论

(1) 三组试样整体结构保存较为完整,未出现明显破坏, MK002 配合比的体积变化率最大,干湿循环 30 次体积膨胀率为 7.543%, CXSN 配合比的体积处于稳定增长的趋势, MK001 配合比的体积变化了较小,存在一定的收缩现象。而试样的质量随干湿循环作用的进行,损失率逐渐增大,

2.5 化学成分分析

三组配合比的化学成分分析结果见表 3。由表 3 可知,配合比试样化学成分主要以 CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO 为主,在干湿循环过程中,化学成分未出现较大变化,如 MK001 配合比试样中 CaO 的含量仅减少了 0.899%,主要原因是干湿循环过程中未涉及到化学反应,而地聚及水化反应速率较为缓慢,对试样的化学成分影响较小。对于文物有害的 K₂O、Na₂O 的总量较小,且试验后均有所降低,被水携带而出,这对材料的耐久性是不利的,但含量变化较小,表明材料的固离子性较好。

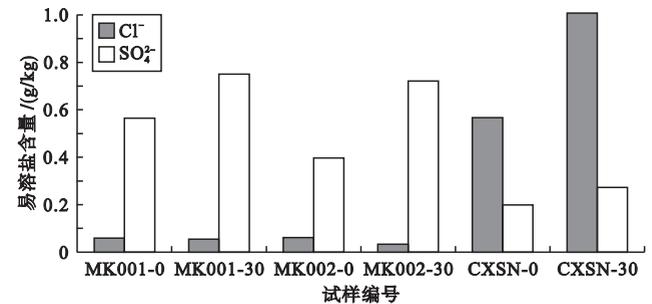


图 9 腐蚀离子含量

(2) 试样强度有一定增长,以掺有碱激发剂的 MK002 配合比增长幅度最大,且循环结束后,强度仍有一定增加。MK001、CXSN 配合比在前 6 次循环,强度有所增长,但后期出现较大强度损失。

(3) 试样化学成分未发生较大的变化,破坏以物理破坏为主,化学变化作用较为微弱。

(4) 两组偏高岭土配合比的微观结构,遭受了一定程度的破坏,致密性有所降低。超细水泥配合比有明显的裂隙发育。

(5) 两组偏高岭土配合比易溶盐总量远低于超细水泥配合比,但 SO₄²⁻ 的含量却有所增高,高达 0.749 g/kg, CXSN 配合比 Cl⁻ 的含量较大,会对材料与石窟岩体造成腐蚀。试样 pH 值较高,有利于维持水化产物稳定性。

(6) MK002 配合比在干湿循环条件下的耐久性优于 MK001、CXSN 配合比。

参考文献:

- [1] 严绍军,方云,孙兵,等.渗水对龙门石窟的影响及治理分析[J].现代地质,2005,19(3):475-478.
- [2] HOUSAM A T. Durability characteristics of concrete columns confined with advanced composite materials[J]. Composite Structures, 1999, 44(2):155-161.

[3] CODY R D ,CODY A M.Reduction of concrete deterioration by ettringite using crystal growth inhibition techtliqlles[J].Final Report , 2001.

[4] ABABNEH A ,BENBOUDJEMA F ,XI Y.Chloride penetration in nonsaturated concrete[J].Journal of Materials in Civil Engineering , 2003 ,15(2) :183-191.

[5] QIAO P Z ,XU Y W.Effect of freeze-thaw and dry-wet conditionings on the mode-I fracture of FRP-concrete interface bonds/MALLAR B MAJI A.Earth & Space Engineering Construction and Operations in Challengeing Environments -Ninth Biennial Conference of the Aerospace Division[C].Houston ,USA :ASCE ,2004 :601-608.

[6] 宿晓萍 ,王清.复合盐与干湿循环双重因素作用下混凝土耐久性试验[J].吉林大学学报(地球科学版) ,2013 ,43(3) :851-857.

·上接第 139 页

[13]再生混凝土应用技术规程 :DG/TJ 08-2018-2007[S].

[14]再生混凝土技术规程 :XJJ076-2017[S].乌鲁木齐 :新疆维吾尔自治区住建厅 ,2017.

[15]XU B W ,SHI H S.Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete[J].Construction and Building Materials ,2009 ,23(12) :3468-3474.

[16]ZAIN M F M ,MAHMUD H B ,ILHAM A ,et al.Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete[J].Cement and

·上接第 155 页

[2] 马芹永 ,冉雪美 ,袁璞.EPS 混凝土单轴冲击压缩试验及破坏形态分析[J].地下空间与工程学报 ,2017 ,13(3) :631-636.

[3] 周可可 ,陈兵 ,陈龙珠.EPS 颗粒级配对 EPS 混凝土力学性能的影响[J].哈尔滨工程大学学报 ,2010 ,31(2) :195-201.

[4] 杜骋 ,杨军.聚苯乙烯泡沫(EPS)的特性及应用分析[J].东南大学学报(自然科学版) ,2001(3) :138-142.

[5] 关辉 ,齐辉 ,郭雷.防水涂层对 EPS 混凝土抗冻性的影响研究[J].黑龙江工程学院学报 ,2017 ,31(1) :5-8.

[6] 罗玉财 ,康亚明 ,何贤元 ,等.发泡聚苯乙烯轻质混凝土饱水软化后的强度与变形特征[J].科学技术与工程 ,2017 ,17(18) :294-298.

[7] 张亚梅 ,陈胜霞 ,高岳毅.浸-烘循环作用下橡胶混凝土的性能研究[J].建筑材料学报 ,2005 ,8(6) :665-671.

[8] 乔宏霞 ,何忠茂 ,刘翠兰.粉煤灰混凝土在硫酸盐环境中的动弹性模量研究[J].粉煤灰综合利用 ,2006 ,95(1) :6-8.

[9] 王琴.混凝土在干湿循环与硫酸盐侵蚀双重因素作用下的损伤研究[D].扬州 :扬州大学 ,2008 :23-26.

[10]涂鹏.注浆结石体耐久性试验及评估理论研究[D].长沙 :中南大学 ,2012 :47-48.

第一作者: 赵莽(1988-) 男, 硕士研究生, 研究方向 岩土工程领域。
联系地址: 安徽省合肥市高新区红枫路 55 号(230000)
联系电话: 18697553861

Concrete Research ,2002 ,32(8) :1251-1258.

第一作者: 宋紫薇(1994-) ,女, 硕士研究生, 主要研究方向为结构工程。
联系地址: 新疆乌鲁木齐市天山区延安路 1230 号 新疆大学南校区(830047)
联系电话: 18792760768

[7] 康亚明 ,何贤元 ,陈静波 ,等.EPS 轻质保温混凝土的制备及其物性特征研究[J].科学技术与工程 ,2017 ,17(12) :268-272.

第一作者: 牛晟(1994-) ,男, 硕士研究生, 研究方向为粉尘类固废的综合利用。
联系地址: 宁夏银川市西夏区北方民族大学化工学院(750021)
联系电话: 18095158487
通讯作者: 康亚明(1980-) ,男, 博士, 副教授, 研究方向为岩石力学与地下工程。
联系电话: 18795371200

行业资讯

广州市混凝土行业协会召开 2019 年迎春年会暨 2018 年总结大会

2019 年 1 月 10 日 ,广州市混凝土行业协会召开了 2019 年迎春年会暨 2018 年总结大会。广州市混凝土行业相关领导及混凝土企业会员单位 200 多名代表出席了本次大会。

广州市住房和城乡建设委员会建管处胡仁法处长、广州市散装水泥管理办公室陈纪凯主任分别对广州市混凝土行业协会自成立以来所取得的发展和成绩表示肯定 ,积极搭建了广州市混凝土企业学习发展的行业交流平台 ,全面贯彻落实习近平新时代中国特色社会主义思想 ,更新观念 ,勇于创新 ,进一步开拓思路 ,使各方面工作都实现规范化、制度化。

广州市混凝土行业协会秘书长李胜文先生作《2018 行业协会工作总结》报告 ,对协会的发展历程、职能进行简单梳理。过去的一年里 ,在领导们的积极引领和各会员单位的大力支持下 ,协会专注行业服务 ,努力维护会员合法权益、反映诉求 ;规范行业、促进诚信体系建设 ,推动混凝土绿色生产达标、环保生产、节能减排 ,扫黑除恶 ,净化社会环境 ;督促行业自律 ,反对恶性竞争 ;开展形式多样的行业技术交流和应用技术培训等方面做了很多努力 ,协会工作能力和服务水平得到提升。报告还就行业面临的困难和问题进行了分析、探讨 ,并提出了 2019 年协会工作思路和打算。

广州市混凝土行业协会会长梁成文先生发表了《踏遍青山人未老 ,淘尽黄沙始到金》为题的讲话 ,并针对预拌混凝土行业在规模持续扩大 ,技术水平、管理水平快速提升和产业结构不断改善中仍然存在的问题 ,提出了行业优化升级必须为之 ,否则前景堪忧的警示。他表示 ,2018 年已经过去 ,当很多人还在叹息“黄金时代”已成过往 ,还在恐惧实业寒冬已迎面而来 ,我们的确需要深思如何打破尴尬局面。在这样的时代 ,我们需要稳住心、守底线、抓管理、控质量 ,做好产品和服务才最重要。混凝土企业一定要严守质量关 ,决不能掉以轻心放松对质量的要求 ,质量和安全是混凝土企业生存的基础。以科技夯实发展基础 ,以管理促进效益提升 ,以品牌实现做大做强 ,以循环经济实现持续发展 ,实现混凝土行业的绿色高性能发展。

广州市混凝土行业协会 2019 年迎春年会暨 2018 年总结大会 ,是团圆的大会 ,也是新起点的誓师大会 ,回顾 2018 展望 2019 ,协会将紧扣“政府与企业间的桥梁作用”的定位 ,正确解读政策方向脉络 ,把握行业发展需求 ,充分发挥协会职能作用 ,不断提升协会的业务及服务水平 ,持续为广州市混凝土行业发展助力。