

粉煤灰与矿渣复掺对渠道衬砌模袋混凝土流动性和力学性能的影响

谢天逸¹, 娄宗科¹, 霍轶珍², 吉仁古日巴³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 河套学院土木工程系, 内蒙古 巴彦淖尔 015000;
3. 内蒙古新禹水利水电工程建设有限公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘 要:为了研究复掺粉煤灰和矿渣粉对模袋混凝土流动性保持能力和含气量保持能力以及力学性能的影响, 为寒冷地区渠道衬砌工程生产实践提供参考, 对分别复掺 10%, 20%, 30%, 40% 粉煤灰和 10%, 15%, 20% 矿渣粉、具有相同扩展度和含气量水平的新拌模袋混凝土, 以扩展度 1 h 损失率、含气量 1 h 损失率和 28 d 抗压强度为考察指标, 分析研究了模袋混凝土扩展度 1 h 损失率和含气量 1 h 损失率的变化规律与特点。结果表明, 在粉煤灰掺量 ≤ 30%、矿渣粉掺量 ≤ 20% 时, 随着粉煤灰和矿渣粉掺量的提高, 新拌模袋混凝土含气量损失率与扩展度损失率降低, 最优掺量为 30% 粉煤灰与 20% 矿渣粉; 掺合料掺量增加会降低混凝土早期强度, 但是 28 d 抗压强度依旧满足设计要求, 并且随矿渣粉掺量增加而提高, 最优掺量为 10% 粉煤灰与 20% 矿渣粉。综合考虑含气量损失率、扩展度损失率和力学性能时, 最优搭配为 30% 粉煤灰与 20% 矿渣粉。

关键词:渠道衬砌; 模袋混凝土; 粉煤灰; 矿渣粉; 扩展度; 含气量
中图分类号:S277.7 **文献标志码:**A

The impact of mixing fly ash and slag powder with concrete on the flow ability and mechanical property of channel lining of mold bag concrete

XIE Tian-yi¹, LOU Zong-ke¹, HUO Yi-zhen², JIREN Guriba³

(1. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Department of Civil Engineering, Hetao University, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China;
3. Inner Mongolia Xinyu Water Resources and Hydropower Engineering Construction co., Ltd., Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: This paper studied the influence of compound admixture on the liquid retention capacity, the air holding capacity, and the mechanical properties of the concrete bags, and provided reference for the production practice of the tunnel lining in the cold region. For double-mixing 10%, 20%, 30% or 40% of fly ash and 10%, 15% or 20% slag powder, at the same degree of extension and air content level of new mixing, we used mold bag concrete loss rate at 1h extension degrees, 1h air content and 28d compressive strength loss rate as examining index. The results showed that when the mixture with less than 30% of fly ash and less than 20% of slag powder, with the increase in fly ash and slag powder, air hold capacity of mold bag concrete loss rate and expansion loss rate were reduced. It is found that the optimal addition rate was 30% of fly ash and 20% of slag powder. Increasing amount of admixture reduced the early strength of concrete, but 28d compressive strength met the design requirements, and increased with the increase in slag powder content. The optimal addition were 10% of fly ash and 20% of slag powder. The best combination was 30% of fly ash and 20% of slag powder.

Keywords: channel lining; mold bag concrete; fly ash; slag powder; extended degree; air content

我国是一个严重缺水的国家, 人均水资源占有量仅为世界人均水平的 1/3, 目前, 农业用水量占全

国总用水量的60%,用水效率偏低,灌溉水利用系数仅为0.51,渠系水利用系数0.55,而发达国家农业水利用系数在0.8左右,因此,提高农业水利用系数,减少农业用水损失,还有相当可观的发展前景。渠道衬砌防渗可以有效减少输水过程中的渗漏损失,是目前应用最广泛的节水灌溉工程技术措施之一^[1],根据内蒙古河套地区的测试结果,渠道衬砌可以提高渠系水利用系数20%以上^[2]。但是,在广大的北方季节性冻土区,受冻胀破坏的渠道衬砌占总量的50%以上,这成为影响渠道建设和农业节水的一大问题,严重影响灌溉工程效益^[3]。为了消除和减弱冻胀带来的危害,美日俄等发达国家采用了架空、置槽、钢筋混凝土衬砌等技术措施抵抗、消除冻胀,防渗防冻胀效果好^[4],但是这些工程措施造价高、投入大,因此,我国在结合自身实际的情况下发展了保温隔热措施、渠基土换填加固、防渗排水和膜料防渗等多种防渗抗冻胀技术措施,取得了显著成果。然而,渠道衬砌的冻胀破坏问题并未妥善解决^[5-8],我国于20世纪80年代引入模袋混凝土技术^[9],由于模袋混凝土衬砌具有良好的整体性和便于机械化施工等优点,表现出良好的冻胀融沉适应能力和耐久性,在内蒙河套灌区和黑龙江地区已获得成功应用。

渠道衬砌模袋混凝土要求高流动性以实现自密实,胶凝材料用量大,矿物掺合料可以起到改善混凝土性能、节约水泥用量的作用,因此,在模袋混凝土中掺入矿物掺合料非常必要。矿渣粉和粉煤灰作为工业生产中产生的大宗工业废料,一直以来都作为矿物掺合料运用于各类混凝土生产中^[10-11],近年来国内外学者对单掺矿物掺合料混凝土性能研究较多,阎培瑜^[12]研究了粉煤灰的作用机理,刘仍光等^[13]研究了矿渣粉的水化特性。对复掺矿物掺合料混凝土虽有一定研究,还不够完善,陈琳等^[14]研究了粉煤灰矿渣粉复合胶凝材料的强度和水化作用,高小建等^[15]研究了各种矿物掺合料对大流动性混凝土流变性能的影响,郑建岚等^[16]研究了矿物掺合料对大流动性混凝土抗碳化作用的影响,王成启等^[17]研究了复掺粉煤灰和矿渣粉对大流动性混凝土工作性变化和抗氯盐侵蚀的影响。根据内蒙古河套灌区模袋混凝土衬砌现场充灌情况以及寒区渠道衬砌抗冻标准,要求模袋混凝土具有高流动性和高抗冻性,即要求混凝土拌合物有较高扩展度和含气量以满足流动性和抗冻性要求,因此,论文研究了粉煤灰和矿渣粉共掺对混凝土扩展度、含气量及二者的1 h损失率和抗压强度的影响,以1

h扩展度损失率和1 h含气量损失率最小为目标,寻求二者最优搭配,为生产实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

水泥采用冀东水泥厂生产的盾石牌P.O 42.5普通硅酸盐水泥,表观密度 $3\,090\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,粉煤灰采用II级粉煤灰,表观密度 $2\,301\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,矿渣粉采用S105矿渣粉,表观密度 $2\,599\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,细骨料使用渭河中砂,粗骨料使用渭河卵石,粒径 $5\sim 20\text{ mm}$,砂石经检测均符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ52)规定,外加剂使用陕西秦奋建材生产的PCA-Q005聚羧酸减水剂,符合现行国家标准《混凝土外加剂》(GB8076)的有关规定。

1.2 试验仪器与方法

1.2.1 混凝土扩展度及其损失率 混凝土扩展度使用坍落度桶与扩展度板进行测定,依据《自密实混凝土应用技术规程》^[18]附录中混凝土拌合物自密实性能试验方法的相关规定,分别测定每一组拌和物的初始扩展度以及1 h扩展度,并计算扩展度1 h损失率,扩展度损失率计算公式为:

$$E_L = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100\%$$

式中, E_L 为混凝土1 h扩展度损失率(%); E_0 为混凝土初始扩展度(mm); E_1 为混凝土1 h扩展度(mm)。

1.2.2 含气量损失率 内蒙古河套灌区属于北方寒冷地区,混凝土受冻害严重,混凝土拌合物含气量是预测硬化混凝土抗冻性的重要指标,因此,论文测定了拌合物含气量及其1 h损失率。混凝土拌和物含气量使用日本三洋公司生产的LC-615A型混凝土含气量测定仪测定,依据《水工混凝土试验规程》^[19]规定的混凝土拌合物含气量试验(气压法),并结合《自密实混凝土应用技术规程》^[18]附录中混凝土拌合物自密实性能试验方法的相关规定,分别测定每一组拌和物的初始含气量及1 h含气量,并计算含气量1 h损失率,含气量损失率计算公式为:

$$A_L = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中, A_L 为混凝土1 h含气量损失率(%); A_0 为混凝土初始含气量(%); A_1 为混凝土1 h含气量(%)。

混凝土抗压强度试验依据《水工混凝土试验规程》^[19]中混凝土立方体抗压强度试验方法进行。

1.3 试验设计

配合比采用《自密实混凝土应用技术规程》^[18]中规定的方法进行计算,设计强度等级 C25,粗骨料体积率 $V_g = 0.33$,砂率 50%,聚羧酸减水剂掺量 0.6%,粉煤灰掺量分别为 10%、20%、30%、40% 共 4 个水平,矿渣粉掺量分别为 10%、15%、20% 共 3 个水平,试验因素水平及配合比见表 1。

2 结果与分析

2.1 扩展度损失率

通过试拌控制扩展度为 540 mm±20 mm 条件下,混凝土拌合物扩展度 1 h 损失率如图 1 所示。
由图 1 可以看出,在矿渣粉掺量为 10%时,模袋混凝土扩展度 1 h 损失率随粉煤灰掺量增加而降

低,即流动性保持能力随粉煤灰掺量增加而提高;在矿渣粉掺量为 15%、粉煤灰掺量不大于 30%时,扩展度损失率由 18.5%降低至 16.4%,流动性保持能力随粉煤灰掺量增加而提高,当粉煤灰掺量达到 40%时扩展度损失率提高至 16.7%,流动性保持能力相比粉煤灰掺量为 30%时变化不显著;在矿渣粉掺量为 20%、粉煤灰掺量不大于 30%时,扩展度损失率由 17.9%降低至 15.2%,流动性保持能力随粉煤灰掺量增加而提高,当粉煤灰掺量达 40%时,扩展度损失率升高至 16.1%,流动性保持能力反而有所降低。即粉煤灰掺量不大于 30%时模袋混凝土的流动性保持能力随矿渣粉掺量的增加而提高,粉煤灰掺量达 40%时模袋混凝土流动性保持能力不随矿渣粉掺量增加而改变,基本保持稳定。

表 1 试验因素水平与配合比
Table 1 Factor level and proportion

编号 Number	粉煤灰/% Fly ash	矿渣粉/% Slag powder	水泥/(kg·m ⁻³) Cement	粉煤灰/(kg·m ⁻³) Fly ash	矿渣粉/(kg·m ⁻³) Slag powder	水/(kg·m ⁻³) Water	砂/(kg·m ⁻³) Sand	石/(kg·m ⁻³) gravel
1	10	10	266.8	33.3	33.3	159.3	874.5	874.5
2	20	10	237.0	67.7	33.9	154.7	874.5	874.5
3	30	10	206.3	103.1	34.4	149.6	874.5	874.5
4	40	10	174.6	139.7	34.9	145.1	874.5	874.5
5	10	15	257.9	34.4	51.6	157.1	874.5	874.5
6	20	15	227.0	69.8	52.4	154.1	874.5	874.5
7	30	15	195.1	106.4	53.2	148.3	874.5	874.5
8	40	15	162.2	144.2	54.1	148.2	874.5	874.5
9	10	20	248.4	35.5	71.0	156.2	874.5	874.5
10	20	20	216.4	72.1	72.1	152.1	874.5	874.5
11	30	20	183.3	110.0	73.3	147.6	874.5	874.5
12	40	20	149.1	149.1	74.5	151.2	874.5	874.5

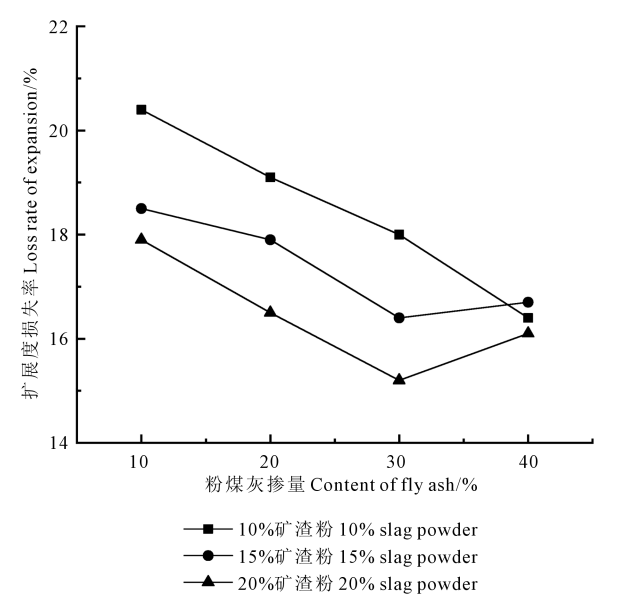


图 1 矿物掺合料掺量对混凝土扩展度损失率的影响
Fig.1 The influence of admixture content on the loss rate of concrete expansion

由此可见在多数情况下矿物掺合料掺量的增加对提高模袋混凝土拌和物流动性保持能力有正效应,这是因为矿物掺合料相较水泥拥有更高的惰性,水化速率相当缓慢,使用掺合料替代了部分水泥,使得在一定时间内参与水化的水泥减少,水分消耗降低,水化产生的絮凝结构减少,所以使得拌和物流动性在一定时间内的降低减缓;同时,粉煤灰和矿渣粉比重比水泥小,细度比水泥大,有较大的比表面积,与水泥颗粒一起形成了更优的颗粒级配,颗粒间的保水效果较高,减缓了蒸发速率;水泥对减水剂成分有较强的吸附作用,掺入矿物掺合料可以使水泥吸附的减水剂颗粒随水化过程迁移至自由水中,维持浆体中减水剂浓度,保持减水剂塑化作用,保持混凝土流动性^[20-22]。粉煤灰和矿渣粉更大的比表面积对混凝土流动性保持并非一直具有正效应,更大的系统表面积需要更多的表面层水进行润滑,当掺合料掺量达到一定比例时,所需表

面层水增多超过系统保水能力,此时负效应超过正效应,混凝土拌合物流动性保持能力降低,扩展度损失率提高。从图 1 中可以看出当粉煤灰掺量在 30%~40%时,矿渣粉掺量 10%、15%、20%的扩展度损失率分别降低、保持、增加;粉煤灰掺量达 40%时,矿渣粉掺量变化对扩展度损失率几乎没有影响,这是因为粉煤灰颗粒最小,当其掺量为 40%时对混凝土拌合物流动性保持的负效应已经大过正效应,虽然矿渣粉颗粒也较水泥更小,但是仍大于粉煤灰颗粒,所以矿渣粉掺量的变化对拌合物的影响小于粉煤灰。此时,扩展度损失率最低的最优组合为复掺 30%粉煤灰和 20%矿渣粉,扩展度损失率为 15.2%。

2.2 含气量损失率

通过试拌含气量控制在 6%±0.5%条件下,混凝土拌合物含气量 1 h 损失率如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,在不同矿渣粉掺量下,粉煤灰掺量不大于 30%时含气量损失率随粉煤灰掺量增加而降低,粉煤灰掺量达 40%时含气量损失率不再降低,与粉煤灰掺量为 30%时处于同一水平;粉煤灰掺量不大于 30%时含气量损失率随矿渣粉掺量增加而降低。

气泡作为混凝土中重要的组成部分,存在于砂浆中,新拌混凝土中的气泡经过一段时间静置,小气泡聚合成大气泡逸出砂浆,导致混凝土拌合物含气量下降;由于水分蒸发和水泥水化会导致混凝土中水分减少,使得砂浆变干,减少了气泡存在的介质,也在一定程度上使含气量损失率提高。因为矿物掺合料较大的细度和较小的比重,可以改善水泥

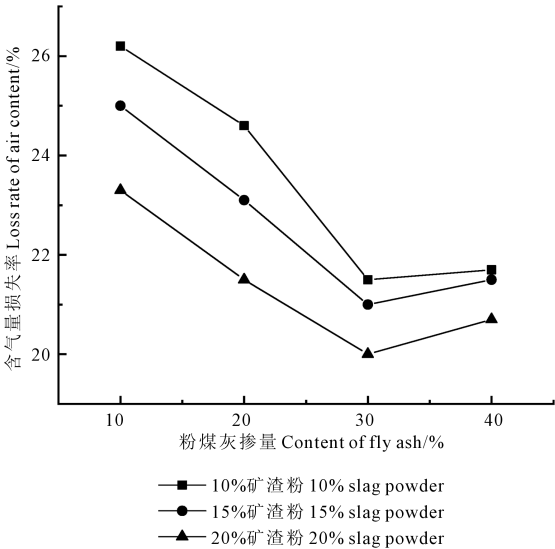


图 2 矿物掺合料掺量对混凝土含气量损失率的影响
Fig.2 The influence of admixture content on the loss rate of air content

单一的级配,减小细颗粒间的间隙,有效保持水分,减少蒸发,减少水化作用和水化热,这对保持浆体体积,减少气泡逸出是有益的,同时有研究指出^[23]单掺或双掺粉煤灰和矿渣粉都可以改善气泡结构,减小气泡直径,这可以减少拌和物中气泡聚合逸出的可能性,对降低含气量损失率也是有益的。所以掺合料掺量的提高可以有效降低混凝土含气量损失率。当粉煤灰掺量大于 30%时含气量损失率并未明显降低是因为此时砂浆体系的需水量大于保水量,含气量保持能力已达到临界点,无法进一步降低。从图 2 中看出含气量损失率最低的最优组合为复掺 30%粉煤灰和 20%矿渣粉,其含气量损失率为 20.0%。

2.3 抗压强度

不同粉煤灰和矿渣掺量组合下,混凝土 7 d 强度和 28 d 强度试验结果如图 3 和图 4 所示。

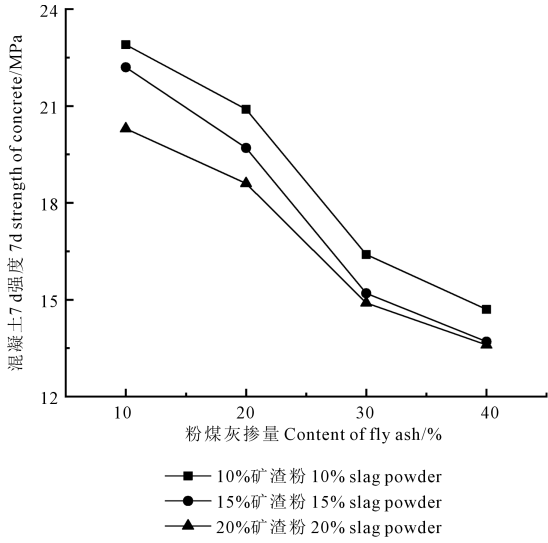


图 3 矿物掺合料掺量对混凝土 7 d 强度的影响
Fig.3 The influence of admixture content on 7 d strength of concrete

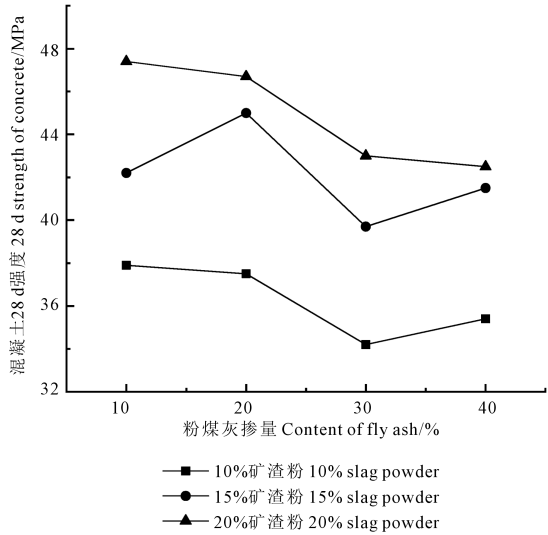


图 4 矿物掺合料掺量对混凝土 28 d 强度的影响
Fig.4 The influence of admixture content on 28 d strength of concrete

分析图 3 可知,混凝土试件 7 d 抗压强度随粉煤灰和矿渣粉掺量增加而降低,这是因为矿物掺合料活性较低,水化反应速率比水泥慢,水化产物生成少,所以当大量矿物掺合料替代水泥后混凝土早期强度有明显降低;分析图 4 可知,混凝土试件 28 d 抗压强度较 7 d 抗压强度有明显提高,此时强度随粉煤灰掺量增加而降低,并且随矿渣粉掺量增加而提高,分析认为,这是因为粉煤灰和矿渣粉通过水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发产生大量水化硅酸钙,所以后期强度增长快,同时粉煤灰细度大、颗粒小,矿渣粉次之,水泥颗粒最大,三者良好的比例可以产生微集料效应,使混凝土结构更紧密,提高中后期强度,并且矿渣粉可与水泥水化时形成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进一步水化形成 C-S-H 凝胶,使界面区的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒变小,降低孔隙率以提高强度,所以抗压强度随矿渣粉掺量增加而提高。从图 4 中可以看出,所有试件强度均达到设计强度等级 C25 要求,但是混凝土抗压强度越高抗冻耐久性也越高,因此仍选择强度较高的组合,此时强度最大组合为 10% 粉煤灰和 20% 矿渣粉,其抗压强度为 47.4 MPa。

3 结论与讨论

1) 粉煤灰和矿渣粉复掺且当粉煤灰掺量 $\leq 30\%$ 时,模袋混凝土扩展度损失率随两种掺合料掺量的增加而降低,由于粉煤灰和矿渣粉的比表面积较大,当粉煤灰掺量达到 40%、矿渣粉掺量 $\geq 15\%$ 时,掺合料需要过量水分而导致水分不足,此时扩展度损失率没有降低甚至有所提高,考虑扩展度损失率最优时粉煤灰掺量和矿渣粉掺量分别为 30% 和 20%,此时扩展度损失率为 15.2%。

2) 粉煤灰和矿渣粉复掺且当粉煤灰掺量 $\leq 30\%$ 时,含气量损失率随粉煤灰和矿渣粉掺量增加而降低,当粉煤灰掺量达到 40% 时,含气量损失率有所提高,考虑含气量损失率最优时粉煤灰掺量和矿渣粉掺量分别为 30% 和 20%,此时含气量损失率为 20.0%。

3) 粉煤灰和矿渣粉复掺时混凝土 7 d 抗压强度随掺合料掺量增加而降低,但是 28 d 抗压强度全部达到设计强度等级,由于矿渣粉颗粒特征可以增强水泥矿渣粉煤灰复合胶凝材料密实度,28 d 抗压强度随矿渣粉掺量增加而提高,粉煤灰掺量对 28 d 抗压强度影响不大,考虑强度的最优搭配为 10% 粉煤灰和 20% 矿渣粉,28 d 抗压强度为 47.4 MPa。

综合考虑扩展度损失率、含气量损失率和抗压强度,含气量损失率与扩展度损失率最优时,28 d 抗压强度为 43.0 MPa,比最优值低 9.9%;28 d 抗压强度最优时,含气量损失率为 23.3%,比最优值高 16.5%,扩

展度损失率为 17.9%,比最优值高 17.8%,并且使用更多矿物掺合料的组合可以减少水泥用量,节约工程成本。因此,渠道衬砌模袋混凝土复掺粉煤灰和矿渣粉最优搭配为 30% 粉煤灰和 20% 矿渣粉。

参考文献:

- [1] 何武全,刘群昌,邢义川,等.渠道衬砌与防渗工程技术手册[M].北京:中国水利水电出版社,2015:1-3.
- [2] 程满金,申立刚,等.大型灌区节水改造工程技术试验与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2003:118-119.
- [3] 李甲林,王正中.渠道冻胀衬砌破坏力学模型及防冻胀结构[M].北京:中国水利水电出版社,2013:3-5.
- [4] 张文郁,娄宗科,李志岩.渠道衬砌抗渗型粉煤灰-稻壳混凝土抗渗性能试验[J].农业工程学报,2011,27(4):12-17.
- [5] 廖云,刘建军,陈少峰.混凝土渠道冻胀破坏机制与抗冻技术研究进展[J].岩土力学,2008,29(增刊):211-214.
- [6] 吴富萍.冻土区渠道防渗工程冻胀的防治措施[J].东北水利水电,1996,(1):15-18.
- [7] 陈亮,刘晓路,刘湘青,等.新疆地区衬砌渠道冻胀破坏及其防治措施[J].中国农村水利水电,2004,(9):78-80.
- [8] 黄付林.浅谈混凝土防渗渠道防冻胀的技术措施[J].山西建筑,2010,36(14):365-366.
- [9] 刘志珍,葛中华,夏世民.模袋混凝土护坡技术在长江护岸工程中的应用[J].水利水电技术,2000,31(4):13-14.
- [10] Jan B. Benefits of slag and fly ash[J]. Construction and Building Materials,1996,10(5):309-314.
- [11] Berndt M L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate[J]. Construction and Building Materials,2009,23(7):2606-2613.
- [12] 阎培渝.粉煤灰在复合胶凝材料水化过程中的作用机理[J].硅酸盐学报,2006,35(S1):167-171.
- [13] 刘仍光,阎培渝.水泥-矿渣复合胶凝材料中矿渣的水化特性[J].硅酸盐学报,2012,40(8):1112-1118.
- [14] 陈琳,潘如意,沈晓冬,等.粉煤灰-矿渣-水泥复合胶凝材料强度和硬化性能[J].建筑材料学报,2010,13(3):380-384.
- [15] 高小建,孙博超,叶焕,等.矿物掺合料对自密实混凝土流变性能的影响[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(2):439-444.
- [16] 郑建岚,黄利频.大掺量矿物掺合料自密实混凝土抗碳化性能研究[J].建筑材料学报,2012,15(5):678-683.
- [17] 王成启,张悦然.复掺粉煤灰与矿渣粉的海工自密实高性能混凝土试验研究[J].水运工程,2012,(2):40-45.
- [18] 李晓斌.GCJ/T283-2012.自密实混凝土应用技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [19] 蔡跃波.DL/T5150-2001.水工混凝土试验规程[S].北京:中国电力出版社,2002.
- [20] 季亚军,高岗,孙寅斌.粉煤灰、矿渣对聚羧酸减水剂吸附分散性能的影响[J].粉煤灰,2001,(3):8-10.
- [21] 王士超,俞黎明,虎孝伟.混凝土外加剂与水泥、掺合料适应性的影响因素分析[J].粉煤灰,2007,(4):47-48.
- [22] 吴小琴,孙振平,罗琼.矿物掺合料对减水剂作用效果的影响[J].粉煤灰,2010,(6):36-48.
- [23] 黄志讲,周华新.矿物掺合料对混凝土气泡特征参数的影响[J].江苏建筑,2013,(3):98-101.