

# 低液限红黏土对混凝土和易性及力学性能的影响

吴福飞, 董双快, 赵振华, 黄宗辉, 陈荣妃

(贵州师范大学 材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 为了探究低液限红黏土对混凝土和易性及力学性能的影响, 采用低液限红黏土、碎石、机制砂制备塑性混凝土, 探讨黏土掺量与水灰比对混凝土和易性、抗压强度、劈裂强度、弹性模量的影响。结果表明: 低液限红黏土能改善混凝土的流动性、黏聚性和保水性, 1 h 后的坍落度仍能保持在 173 mm 以上, 同时黏土能大幅度地延迟混凝土的初凝和终凝时间和显著降低混凝土的表观密度。黏土等质量替代水泥后, 随着养护龄期的延长, 混凝土抗压强度、劈裂强度呈对数关系增加。相对而言, 黏土掺量对混凝土抗压强度的影响比水灰比要大。黏土掺量越大, 混凝土的弹性模量越小, 且可采用混凝土抗压强度的线性关系来预测。

**关键词:** 低液限红黏土; 混凝土; 和易性; 力学性能

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0168-05

## Effect of low liquid limit red clay on workability and mechanical properties of concrete

WU Fufei, DONG Shuangkuai, ZHAO Zhenhua, HUANG Zonghui, CHEN Rongfei

(School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Plastic concrete was prepared by low liquid limit red clay, sand and gravel to discuss the effect of low liquid limit red clay on concrete workability and mechanical properties. The effect of low liquid limit red clay content and water cement ratio on plastic concrete workability, compressive strength, splitting strength, modulus of elasticity was discussed in the paper. The results showed that: low liquid limit red clay can improve liquidity, adhesiveness and water retention of the concrete, after 1 hour slump remained above 173 mm, and red clay can significantly delay initial setting and final setting time of concrete and significantly reduce apparent density of concrete. Compressive strength, splitting strength of concrete increases with logarithmic relationship with extension of curing age when clay replaces cement. Relatively speaking, the effect of clay content on concrete compressive strength was higher than water cement ratio. The larger the clay content is, the smaller the elastic modulus of the concrete are, which can be predicted by the linear relationship between compressive strength and elastic modulus of concrete.

**Key words:** low liquid limit red clay; concrete; workability; mechanical properties

## 1 研究背景

塑性混凝土通常具有变形能力大、弹性模量低和高抗渗性等特点, 晏继杰<sup>[1]</sup>对塑性混凝土配合比、成槽机具、施工工艺等进行研究。王四巍等<sup>[2]</sup>发现膨润土对塑性混凝土体积最大压缩量的影响显著, 对弹性模量和强度却不明显。文献[3-6]研究

也发现黏土掺入后降低了混凝土的力学性能, 提高抗渗性, 并对混凝土的本构关系和破坏准则进行了详细研究, 得出一系列的研究成果。当膨润土和黏土按一定比例替代水泥后, 显著降低了混凝土的力学性能, 但能抵抗长期溶蚀作用, 提高了其服役年限<sup>[7]</sup>。焦凯等<sup>[8]</sup>发现膨润土掺量对塑性混凝土抗压强度的差异性影响不大, 但李谈谈等<sup>[9]</sup>发现当红

收稿日期: 2017-10-02; 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 贵州科技厅—贵州师范大学联合基金项目(黔科合 LH 字[2017]7351 号); 贵州师范大学 2016 年博士科研启动项目(0517073)

作者简介: 吴福飞(1985-), 男, 贵州兴义人, 博士, 副教授, 从事现代水泥混凝土材料与固体废弃物处理技术及生态环境材料的教学与科研工作。

通讯作者: 董双快(1988-), 女, 贵州盘县人, 硕士, 讲师, 从事新型环境材料研发及应用研究。

黏土掺量在 150 ~ 200 kg/m<sup>3</sup> 时,塑性混凝土性能能达到最优。除了红黏土和膨润土的掺量显著影响混凝土的力学性能外,骨料也对混凝土有一定的影响,黄杰等<sup>[10]</sup>发现尾矿砂掺量越大,混凝土强度越低,相对渗透系数均随着砂率的增加呈现出 U 型的变化规律<sup>[11]</sup>。张廷毅等<sup>[12]</sup>发现黄河特细砂取代率对混凝土的渗透系数呈减小趋势。高丹盈等<sup>[13-14]</sup>和王四魏等<sup>[15]</sup>对塑性混凝土的应力-应变、本构关系、破坏准则、抗渗性进行了详细的研究。为了计算的准确性,程金标等<sup>[16]</sup>采用三维非线性有限元法对塑性混凝土心墙大坝应力变形进行计算。王永明等<sup>[17]</sup>引入多轴强度的安全度准则评价防渗墙的安全状态,建议在拉应力较明显的条件下优先采用多轴强度的安全度准则进行复核。刘璐璐等<sup>[18]</sup>发现预压次数对应力-应变曲线的影响并不大。但是这些研究中对低液限红黏土塑性混凝土的研究却较少,为此,本文采用低液限红黏土、机制砂、碎石、减水剂等配制塑性混凝土,探讨低液限红黏土对塑性混凝土和易性和力学性能的影响,即分析低液限红黏土掺量对塑性混凝土流动性、黏聚性、保水性、表观密度和凝结时间的影响,探索塑性混凝土力学性能与龄期之间的关系,劈裂强度和弹性模量与抗压强度的关系,并提出简易预测弹性模量的关系模型。通过研究,以期对低液限红黏土制备塑性混凝土提供试验基础。

2 材料与方法

2.1 原材料

水泥采用西南水泥厂生产的 32.5 复合硅酸盐水泥,3 d 的抗折强度和抗压强度分别为 4.3 MPa 和 18.4 MPa;28 d 的抗折强度和抗压强度分别为 8.7 MPa 和 36.4 MPa,细度为 13.4%,沸煮法安定性检测合格。掺合料采用低液限红黏土,密度为 2.72 g/cm<sup>3</sup>,液限为 48.1%,塑限为 25.5%,塑性指数为 23.8%,不均系数为 5.8,曲率系数为 0.64。砂为机制砂,细度模数为 2.7,颗粒级配满足 JGJ52-2006《普通混凝土用砂质量标准与检测方法》的 II 区范围。小石和中石采用 5~20 mm 和 20~40 mm 的碎石,小石和中石按 1:1 混合构成 5~40 mm 的连续颗粒级配。减水剂选用缓凝型萘系高效减水剂,根据外加剂适应性试验确定最佳掺量。水采用实验室自来水。

2.2 试验方法

影响混凝土的力学性能和和易性的因素主要有

水灰比和掺合料掺量,对于黏土作为掺合料时也不例外,因此,主要考虑水灰比和掺量的影响。根据《水电水利工程防渗墙施工规范》(DL/T5199-2004)的相关规定,黏土的掺量不宜大于 25%,水胶比不宜大于 0.65,胶凝材料用量不低于 350 kg/m<sup>3</sup>。因此,选取水灰比分别为 0.55、0.60、0.65,黏土掺量分别为 15%、20%、25%,具体的试验混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比

| 编号  | 水胶比  | 黏土掺量/% | 单方混凝土各项材料用量/kg |     |     |     |     |     |      |
|-----|------|--------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|     |      |        | 水泥             | 黏土  | 水   | 砂   | 小石  | 中石  | 减水剂  |
| NT1 | 0.55 | 15     | 323            | 57  | 209 | 633 | 539 | 539 | 5.32 |
| NT2 | 0.55 | 20     | 344            | 86  | 236 | 605 | 515 | 515 | 6.02 |
| NT3 | 0.55 | 25     | 360            | 120 | 264 | 576 | 490 | 490 | 7.20 |
| NT4 | 0.60 | 15     | 306            | 54  | 216 | 647 | 539 | 539 | 5.40 |
| NT5 | 0.60 | 20     | 304            | 76  | 228 | 635 | 529 | 529 | 6.84 |
| NT6 | 0.60 | 25     | 323            | 107 | 258 | 605 | 504 | 504 | 6.88 |
| NT7 | 0.65 | 15     | 306            | 54  | 234 | 648 | 529 | 529 | 4.32 |
| NT8 | 0.65 | 20     | 288            | 72  | 234 | 648 | 529 | 529 | 4.32 |
| NT9 | 0.65 | 25     | 285            | 95  | 247 | 636 | 519 | 519 | 4.94 |

3 结果与分析

3.1 和易性

和易性是混凝土拌合物的重要参数,直接影响混凝土硬化后的力学性能和耐久性,在一定程度上控制着混凝土的施工质量。文献[19-24]证实了掺合料能改善混凝土拌合物的和易性,黏土作为掺合料是否会达到同样的效果是本文研究的重点内容,试验结果如表 2 所示。

流动性是混凝土和易性测试的重要参数,结果发现,引入黏土和缓凝型减水剂后,混凝土的流动性较好,基本都在 189 mm 以上,扩散度基本在 365 mm;即使在 1 h 后,坍落度仍能保持在 173 mm 以上,因此,本试验具有较好的保坍性,能满足塑性混凝土作为防渗墙的浇筑。

另外,混凝土的黏聚性和保水性都较好。这主要是黏土矿物的颗粒细小,用水拌合后具有较好的可塑性,在较小压力下发生变形但能长久保持其原来的状态,而且黏土的比表面积大,颗粒上带有负电性,因此具有较好的物理吸附性和表面化学活性,加上减水剂的减水和缓凝效果,因此黏土配制的混凝土流动性较好。

表 2 塑性混凝土的和易性

| 编号  | 坍落度/<br>mm | 1 h 后坍落度/<br>mm | 扩散度/<br>mm | 黏聚性 | 保水性 | 凝结时间/h:min |       | 表观密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|-----|------------|-----------------|------------|-----|-----|------------|-------|----------------------------------------------|
|     |            |                 |            |     |     | 初凝         | 终凝    |                                              |
| NT1 | 209        | 193             | 419        | 好   | 好   | 10:22      | 16:13 | 2313                                         |
| NT2 | 194        | 177             | 373        | 好   | 好   | 10:41      | 16:28 | 2289                                         |
| NT3 | 208        | 180             | 381        | 好   | 好   | 11:03      | 18:11 | 2259                                         |
| NT4 | 189        | 181             | 352        | 好   | 好   | 10:08      | 16:59 | 2326                                         |
| NT5 | 207        | 194             | 380        | 好   | 好   | 11:42      | 17:25 | 2293                                         |
| NT6 | 223        | 202             | 372        | 好   | 好   | 11:26      | 17:14 | 2261                                         |
| NT7 | 205        | 196             | 391        | 好   | 好   | 10:18      | 16:12 | 2321                                         |
| NT8 | 204        | 197             | 390        | 好   | 好   | 10:44      | 16:51 | 2258                                         |
| NT9 | 189        | 173             | 365        | 好   | 好   | 11:34      | 17:12 | 2293                                         |

凝结时间的长短也会影响混凝土的施工质量,通常水泥的初凝不早于 45 min,终凝不迟于 390 min,拌制混凝土后,初凝和终凝都会有所改变。黏土等质量替代水泥后,初凝延迟 10 h 以上,终凝在 16 h 以上。可见黏土替代水泥后能显著改善混凝土的初凝和终凝时间,主要是黏土在较小压力下可以变形并能长久保持原状,且比表面积大;另外,减水剂为缓凝型萘系高效减水剂,也会在一定程度上改善混凝土的凝结时间。

黏土等质量替代水泥后,明显降低了混凝土的表观密度。通常混凝土的表观密度在 2 350 ~ 2 450  $\text{kg}/\text{m}^3$  之间,黏土替代后最大表观密度仅为 2 326  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,最小为 2 258  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,远小于普通混凝土的表观密度。这主要是黏土的密度为 2.72  $\text{g}/\text{cm}^3$  比水泥(密度为 3.15  $\text{g}/\text{cm}^3$ )小,因此黏土等质量替代水泥后,混凝土的表观密度有所降低。

### 3.2 抗压强度

矿物掺合料等质量替代水泥后,由于具有潜在活性的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  参与二次反应生成水化硅酸钙和水化铝酸钙<sup>[11-13]</sup>,因此,适量矿物掺和料掺入后能提高混凝土的力学性能和耐久性<sup>[14-16]</sup>。黏土与粉煤灰、矿粉等掺合料不同,由于不具有活性,能显著降低混凝土的力学性能,但其塑性较好,通常能满足水库防渗墙的浇筑。黏土等质量替代水泥后,混凝土的力学性能和拟合曲线如图 1 所示。随着养护龄期的延长,低液限黏土配制的混凝土抗压强度逐渐增大,并呈对数关系增加,这同普通混凝土的发展规律一致。经拟合曲线发现,对数关系拟合结果较好,相关系数均在 0.95 以上。因此在实际试验数据不够时,可采用对数关系进行初步预测。黏土的

掺量和水灰比越大,其抗压强度越低。如水灰比 0.55 时,黏土替代率从 15% 增加至 25% 时,抗压强度从 18.2 MPa 降低至 15.7 MPa;当掺量均为 25% 时,水灰比从 0.55 增加至 0.65 时,混凝土抗压强度从 15.7 MPa 降低至 14.5 MPa。可见掺量对混凝土抗压强度的影响比水灰比要大。因此,在配制黏土混凝土时应注意黏土掺量的选择。

### 3.3 劈裂强度

劈裂强度是混凝土抵抗剪力破坏的重要参数,黏土掺量和水灰比对混凝土劈裂强度的影响规律和拟合曲线如图 2 所示。劈裂强度也随黏土掺量的增加显著降低,相关系数均在 0.97 以上,当水灰比为 0.55 和 0.65 且黏土掺量从 15% 增加至 25% 时,28 d 的劈裂强度分别从 1.75 MPa 和 1.42 MPa 降低至 1.43 MPa 和 1.32 MPa。水灰比增加时,劈裂强度不断降低,当黏土掺量为 15% 和 25% 时,劈裂强度分别从 1.75 MPa 和 1.43 MPa 降低至 1.40 MPa 和 1.32 MPa。对比上述的数据不难发现,水灰比相对较小时,黏土掺量的影响较大,反之较小。

通常,混凝土劈裂强度和抗压强度之间存在一定的相关性,黏土替代水泥后混凝土劈拉强度和抗压强度之间的相关性如图 3 所示。从图 3 看出,塑性混凝土的劈拉强度与抗压强度之间存在线性关系,相关系数为 0.6215。可粗略采用线性关系进行数据预测。

### 3.4 弹性模量

弹性模量又称为杨氏模量,是混凝土中一种最重要、最具特征的力学性质。黏土替代水泥后,混凝土弹性模量的试验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,黏土掺量越大,混凝土的弹性模量越小,显著呈

现出负对数降低的趋势,相关系数均在 0.99 以上,因此可采用负对数关系进行塑性混凝土弹性模量的

预测,精度相对较高。从图 4 中也不难发现,黏土掺量对混凝土弹性模量的影响比水灰比大。

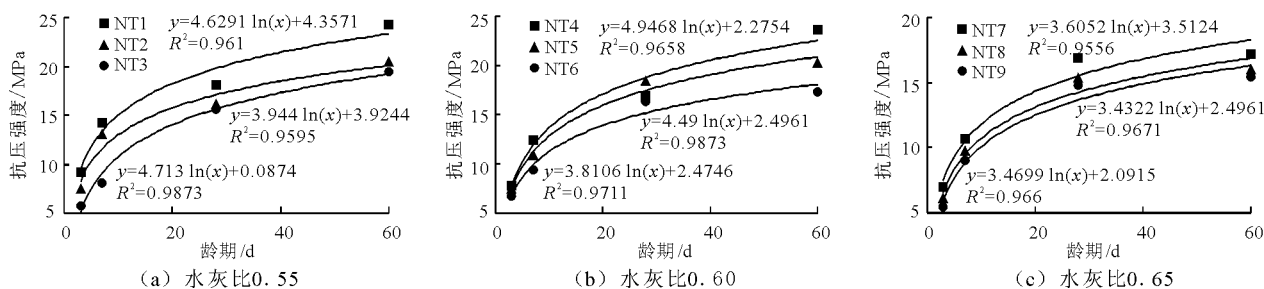


图 1 不同水灰比混凝土抗压强度随龄期变化拟合曲线

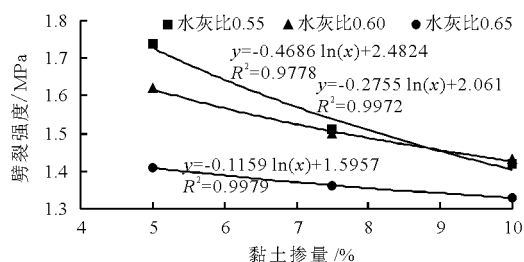


图 2 不同水灰比黏土掺量与混凝土劈裂强度的相关性

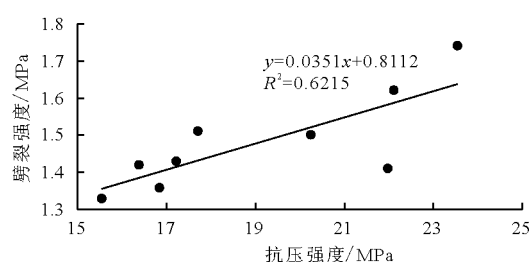


图 3 抗压强度与劈裂强度的相关性

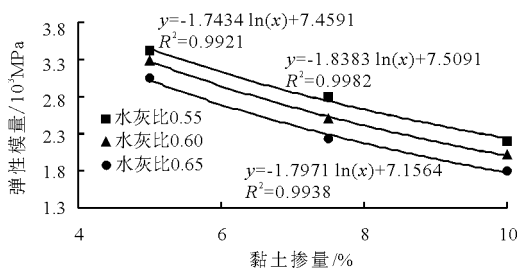


图 4 弹性模量随黏土掺量的变化曲线

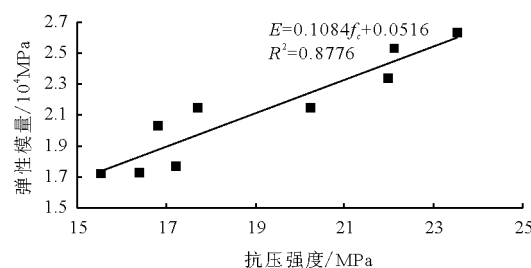


图 5 塑性混凝土抗压强度与弹性模量的相关性

通常可采用混凝土抗压强度预测弹性模量,其表达式为  $E = 10^6 / (2.2 + 330/f_c)$ ,将本文的抗压强度代入该公式发现,其弹性模量在  $4 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$  MPa 之间,远大于本文所测的实际弹性模量,因此,传统的混凝土弹性模量预测公式不再适用。黏土替代水泥后混凝土弹性模量和抗压强度之间的相关性如图 5 所示。

从图 5 看出,塑性混凝土的弹性模量与抗压强度之间存在线性关系,即,  $E = 0.1084 f_c + 0.0516$ ,相关系数为 0.8776,因此,可采用线性关系预测混凝土的弹性模量。

## 4 结 论

通过对低液限红黏土塑性混凝土和易性和力学性能的研究,得到以下结论:

(1) 黏土能改善混凝土的流动性、黏聚性和保水性,即使在 1 h 后,混凝土坍落度仍能保持在 173

mm 以上。黏土能大幅度地延迟混凝土的初凝和终凝时间和明显降低混凝土的表观密度。

(2) 黏土等质量替代水泥后,随着养护龄期的延长,低液限黏土配制的混凝土抗压强度逐渐增大。相对而言,掺量对混凝土抗压强度的影响比水灰比要大。混凝土劈裂强度也随黏土掺量的增加显著降低,在塑性混凝土的劈拉强度与抗压强度之间存在线性关系。

(3) 黏土掺量越大,混凝土的弹性模量越小,显著呈现出负对数降低的趋势,但黏土掺量对混凝土弹性模量的影响比水灰比大。塑性混凝土的弹性模量与抗压强度之间存在线性关系。

上述这些规律对于低液限红黏土塑性混凝土的使用具有指导意义,同时也为塑性混凝土力学性能的预测提供借鉴。但本文只针对低液限红黏土进行试验,有待于对各种黏土进行试验,找出其一般规律,使其在各类塑性混凝土中的使用更具有适用性。

## 参考文献:

- [1] 晏继杰. 白莲河抽水蓄能电站塑性混凝土防渗墙施工[J]. 人民长江, 2009, 40(6): 31-33.
- [2] 王四巍, 李小超, 李杨, 等. 膨润土及水泥用量对塑性混凝土变形及破坏特征的影响[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(1): 33-37.
- [3] 蒋凯乐, 李云鹏, 张如满, 等. 塑性混凝土防渗墙土反力系数反演[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 389-394.
- [4] BAGHERI A R, ALIBABAIE M, BABAIE M. Reduction in the permeability of plastic concrete for cut-off walls through utilization of silica fume[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(6): 1247-1252.
- [5] 王四巍, 王畅, 高丹盈. 真三轴应力下塑性混凝土的强度和扩容[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 548-552.
- [6] 孙开畅, 田斌, 孙志禹. 高土石围堰塑性混凝土的力学特性与龄期和施工安全的关系[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 250-253+265.
- [7] 吴福飞, 侍克斌, 董双快, 等. 塑性混凝土的长期渗流溶蚀稳定性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 112-119.
- [8] 焦凯, 党发宁, 谢凯军. 膨润土与水泥掺比对塑性混凝土强度特性的影响[J]. 水力发电学报, 2016, 35(3): 11-18.
- [9] 李谈谈, 杨具瑞, 李续楠, 等. 红黏土及水泥掺量对塑性混凝土性能影响研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(8): 105-113.
- [10] 黄杰, 孟晋, 陈四利, 等. 尾矿砂塑性混凝土的力学特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(2): 225-230.
- [11] 黄杰, 孟晋, 史建军, 等. 尾矿砂塑性混凝土渗透性能的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1307-1311.
- [12] 张廷毅, 汪自力, 朱海堂, 等. 黄河特细砂塑性混凝土渗透性能[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 69-65.
- [13] 高丹盈, 宋帅奇, 杨林. 真三轴应力下塑性混凝土性能及破坏准则[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 360-367.
- [14] 高丹盈, 宋帅奇. 塑性混凝土常规三轴性能与强度计算模型[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 201-207.
- [15] 王四巍, 潘旭威, 高丹盈, 等. 三轴应力下塑性混凝土应力-应变关系试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 42-46+59.
- [16] 程金标, 王瑞骏, 郭兰春, 等. 塑性混凝土心墙坝应力变形特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 189-193.
- [17] 王永明, 任金明, 陈永红, 等. 基于混凝土多轴强度的高土石围堰防渗墙安全性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2262-2269.
- [18] 刘璐璐, 常芳芳, 解伟, 等. 循环加载下塑性混凝土的应力-应变曲线分析[J]. 长江科学院报, 2015, 32(10): 116-120.
- [19] 吴福飞, 侍克斌, 董双快, 等. 掺合料和水胶比对水泥基材料水化产物和力学性能的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 119-126.
- [20] 龙小明, 吴福飞, 董双快, 等. 低水胶比下粉煤灰复合矿粉配制高强泵送混凝土的性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 156-160.
- [21] 吴福飞, 董双快, 宫经伟, 等. 含掺合料混凝土水化产物体积分数计算及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 48-54.
- [22] WANG Qiang, YAN Peiyu. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(7): 1134-1140.
- [23] LIU Rengguang, DING Shidong, YAN Peiyu. The microstructure of hardened Portland cement-slag complex binder pastes cured under two different curing conditions[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(5): 610-618.
- [24] LI Xiang, YAN Peiyu. Microstructural variation of hardened cement-fly ash pastes leached by soft water[J]. Science China-Technological Sciences, 2010, 53(11): 3033-3038.