

# 纤维素纤维对混凝土及界面过渡区性能的影响初探

**摘要:** 纤维素纤维是新一代高性能纤维,它对改善混凝土施工性能、力学和耐久性等方面具有显著效果。混凝土界面过渡区(ITZ),其水化产物的组成及形貌与基体部分不同,结构相对疏松,并对混凝土材料的力学和耐久性起着至关重要的作用。本文主要研究了一种纤维素纤维对混凝土施工性、抗压强度、劈裂抗拉强度、抗裂性能的作用。并通过纳米压痕技术、X射线衍射和扫描电镜分析了纤维素纤维对过渡区微观力学性能和组成结构的影响。为研究改善混凝土界面过渡区,进而提高混凝土各方面综合性能提供了新思路。

**关键词:** 纤维素纤维;界面过渡区;抗压强度;XRD;纳米压痕

## Study on Effect of Cellulose Fiber on Properties of Concrete and the Interfacial Transition Zone (ITZ)

**Abstract:** Cellulose fiber is a new kind of high performance fiber, it contributes to improve work ability, mechanical characteristic and durability of concrete. Interfacial Transition Zone (ITZ), its morphology and composition of hydration products are distinguished from matrix of concrete. And it has a relatively loose structure and plays an essential role in concrete materials. In this paper, the influence of a type of cellulose fiber on the work ability, compressive strength, splitting tensile strength and cracking resistance has been studied. The effect of cellulose fiber on micro-mechanical and composition of ITZ was also presented. This paper provides a new approach for studying how to further improve the performance of ITZ and concrete.

**Keywords:** Cellulose fiber; ITZ; Compressive strength; XRD; Nanoindentation

混凝土是一种多相复合材料,由于各组成材料性质、施工养护等各方面的影响,混凝土内部不可避免地存在大量的微裂缝。这些裂缝的存在严重影响了混凝土的各方面性能,特别是降低了混凝土抗拉强度和耐久性,也是混凝土呈脆性破坏的主要原因。就混凝土材料本身而言,一般认为其最薄弱的环节是水泥浆体与集料之间的区域,即所谓的界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)。由于过渡区的粘结强度较低,可视之为混凝土强度的极限相。同时由于过渡区存在的微裂缝和孔隙体积,使得它对混凝土的强度、刚性、弹性和耐久性等都具有较大的影响<sup>[1]</sup>。因此,世界上许多国家正致力于改善水泥浆体与集料间界面性能的研究,以期改善混凝土的各方面性能<sup>[2-7]</sup>。

现阶段日益受到重视的纤维混凝土,由于其拥有许多乱向分布的纤维,可以有效防止混凝土中的早期开裂,减少混凝土在施工期的裂缝和缺陷,提高混凝土的韧性、抗冲击、抗冻

融、抗渗等耐久性。目前关于钢纤维、聚丙烯纤维等对混凝土性能的改善作用已多有报道，而对于纤维素纤维则鲜有研究<sup>[8]</sup>。本文研究了一种上海罗洋新材料科技有限公司生产的纤维素纤维 UF500（下文简称 UF500）对混凝土的施工性能、物理力学性能和耐久性的改善作用进行了研究，并对其在界面过渡区的作用进行了初探。

## 1 实验

### 1.1 纤维材料

UF500 是新一代高性能纤维，其结构不同于早期天然木质纤维，也不同于近几年发展起来的聚丙烯等有机合成纤维，其基体取自经过基因改良的特殊树种。UF500 纤维直径小且具有不规则的纤维表面，因此纤维比表面积大大高于聚丙烯等有机合成纤维，纤维与水泥浆基体的结合力更强。UF500 本身具备极好的亲水性，在新拌混凝土中能够吸附一部分自由水，而且纤维基体内部有天然空腔，能够蓄存一定量的自由水，在水泥水化的过程中，这两部分水分会缓慢释放，促进水泥继续水化，补偿混凝土的收缩，从而改善了混凝土的微观结构。

UF500 纤维外观及微观如图 1 所示，纤维材性详见表 1。

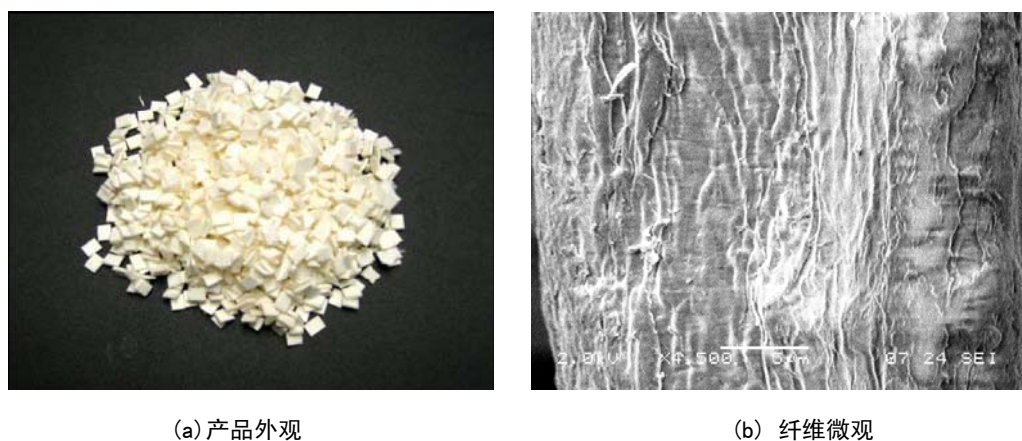


图 1 纤维素纤维 UF500 产品外观及微观图片

表 1 纤维素 UF500 纤维材性

纤维直径/mm	比表面积/(cm <sup>2</sup> /g)	纤维长度/mm	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度/MPa
0.016~0.020	23000~26000	2.1~2.3	1.10	600~900

### 1.2 混凝土配合比

表 2 为试验采用混凝土配合比及纤维掺量。水泥采用海豹 42.5 普通硅酸盐水泥，砂的细度模数为 2.6，碎石粒径为 5~25mm，减水剂为减水率 25% 的聚羧酸型减水剂。

表 2 混凝土配合比及纤维掺量 (kg/m<sup>3</sup>)

试样	水泥	砂	石	外加剂	水	UF500 纤维	PP-1 纤维	PP-2 纤维
A	400	720	990	4	196	0	0	0
B	400	720	990	4	196	0.9	0	0

试验测试了 UF500 纤维对新拌混凝土的工作性、物理力学性能（抗压和劈裂抗拉强度）、抗裂性能的影响。

对 A、B 两组配比拌合并养护到一定龄期的混凝土试样，采用 X 射线衍射仪（X-ray diffraction, XRD）、环境扫描电镜（Environment Scanning electron microscope, ESEM）研究纤维素纤维对界面过渡区微观组成特征。

为探索界面过渡区微观力学性能特性，采用美国 Hysitron 公司研制的 Tribo-indenter 型

纳米压痕仪，连续测量试样受到载荷与相应的位移，并建立两者之间的相应关系（即  $P-h$  曲线）。通过卸载曲线的斜率可以得到弹性模量  $E$ ，计算方法如下：<sup>9-13</sup>

$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (1)$$

$$A = 24.5 h_c^2 \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (3)$$

式中： $S$  为卸载曲线顶部的斜率（ $S=dP/dh$ ）； $h_c$  为接触深度； $A$  为接触面积； $E$  和  $\nu$  分别为测试材料的杨氏模量和泊松比； $E_i$  和  $\nu_i$  分别为压头的相关参数，对于金刚石压头，其参量分别为  $E_i=1114\text{GPa}$ ， $\nu_i=0.07$ 。

试验过程中，首先在视野范围内查找测试表面的粗集料，然后在它的外侧以界面法线方向上  $5\mu\text{m}$  为间距布设 3 层试点进行测试，最里面一层以定位标尺与颗粒外侧相切方式定位，每层均布 15 个测点，每个试样共 54 个测点，尽量保证压痕点覆盖整个材料的理论分布。材料的最大载荷设定为  $1\text{mN}$ ，每两个测试点之间的间距为  $5\mu\text{m}$ 。每个测试点加载 10s，在最大载荷处持荷 5s，卸载 10s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 新拌混凝土工作性能

为研究 UF500 纤维对新拌混凝土工作性能的影响，测试了 A、B 配合比的新拌混凝土坍落度及其经时损失值，结果见表 3。

表 3 新拌混凝土坍落度及经时损失值（mm）

试样	初始坍落度	坍落度减少值	1.5h 后坍落度	1.5h 经时损失
A	200	/	170	30
B	195	5	180	15

从表 3 可以看出，由于 UF500 纤维的长度较短，分散性良好，对新拌混凝土坍落度基本没有影响，纤维素纤维的保水作用反而能够改善混凝土泌水、离析等现象提高混凝土的流变性能，对混凝土坍落度损失有明显改善作用。

### 2.2 力学性能

#### 2.2.1 抗压强度

分别测试两种配合比的混凝土，养护至 1、3、7、28 四个龄期的抗压强度，结果见表 4。

表 4 各龄期混凝土抗压强度

试样	1d	3d	7d	28d
A	4.8	17.5	24.3	34.7
B	5.2	16.9	26.1	35.3

从表 4 可以看出，掺加 UF500 纤维的混凝土各龄期抗压强度与基准混凝土基本一致。因为混凝土受压时，基体裂缝的产生和扩展需要很大的能量，所以纤维的掺加对混凝土抗压强度影响不大。

#### 2.2.2 劈裂抗拉强度

由于混凝土是一种脆性材料，其抗压强度要明显高于其抗拉强度，对高性能混凝土来说，提高混凝土的抗拉强度非常有实际意义。而劈裂强度能间接反应混凝土的抗拉强度，并能部

分反应混凝土界面过渡区粘结性能。因此试验研究了两种混凝土在 28d、56d 两个龄期的劈裂抗拉强度，结果见表 5。

表 5 各龄期混凝土劈裂抗拉强度

试样	28d	56d
A	3.45	4.30
B	3.87	4.49

从表 5 可以看出，掺加 UF500 纤维的混凝土劈裂抗拉强度的得到提高。这是因为一方面由于纤维内部的空腔能够在水泥水化的过程中调节微水化环境，对水泥水化起到改善作用；另一方面，UF500 纤维更短，由 2.1 可知其对拌合物的工作性具有极大改善作用，有效的防止了泌水，并减少了水分在集料表面的聚集，对过渡区的薄弱特性进行了改善，从而对混凝土的力学性能的提高起到了极大的促进作用。

### 2.3 抗裂性能

几种纤维对混凝土抗裂性能的影响试验方法参考 ASTM C 1579《评估纤维混凝土约束条件下塑性开裂的标准方法》进行，结果见表 6。

表 6 两种混凝土抗裂指数

试样	A	B
开裂指数(mm)	483.8	80.3
裂缝改善率(%)	-	83.4

从表 4 可以看出，在混凝土中掺加 UF500 纤维可显著提高其抗裂性能，裂缝改善率达到了 83.4%。

两种混凝土的抗渗试验（表 7）结果也同样验证了上述结果。纤维对混凝土微裂缝的改善，以及 UF500 纤维特有调节水泥水化能力，可以优化水泥石内部结构，从而促进混凝土抗渗能力提高。

表 7 两种混凝土在 1.2MPa 压力下渗透高度

性能	A	B
渗透高度(mm)	120	5

### 2.4 对混凝土过渡区影响

#### 2.4.1 过渡区微观组成

为研究 UF500 纤维对混凝土过渡区组成的影响，对 A、B 两种配比拌制的混凝土，养护至相应龄期后切割破碎后，取与集料相接触且表面较为平整试样进行 XRD 及 SEM 分析，结果分别见图 2、3。

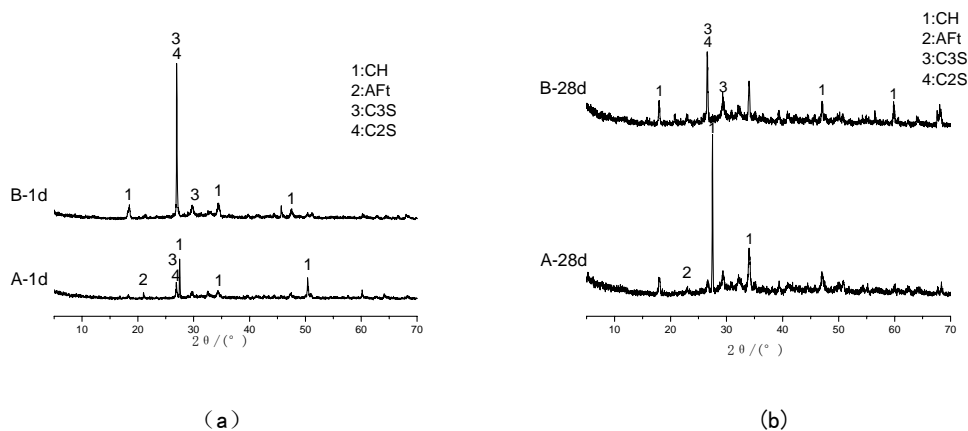


图 2 过渡区物相组成 XRD 图谱

从图 2 可以看出，在混凝土拌合初期（图 2.a），掺加纤维的混凝土过渡区仍有大量未水化的水泥颗粒，而基准混凝土则由于集料表面集中大量的水分，加速水化进程，生成了相对

大量的 CH。随着龄期增长 (图 2.b), UF500 纤维混凝土过渡区未水化水泥矿物量显著减少, 水化产物 CH、AFt 含量有所增加。从图 2 (b) 还可知, 基准混凝土 A 在 28d 水化龄期时, 其过渡区较试样 B 生成更多的 CH 晶体。这是因为 UF500 纤维根数多、比表面积大、间距小, 显著改善了混凝土的均匀性, 减少了集料表面水分富集现象的发生, 从而使得过渡区水化过程较为平缓。而基准混凝土则由于界面区含有大量水分, 使得初期水化速度较快, 且后期产生了大量 CH 晶体定向分布, 这与相关研究得出结论较为一致。<sup>[14-16]</sup>

对 A、B 试样过渡区 SEM 分析 (图 3) 验证上述结论, 图 3 (a) (b) 可见大量富集的板片状 CH 晶体。

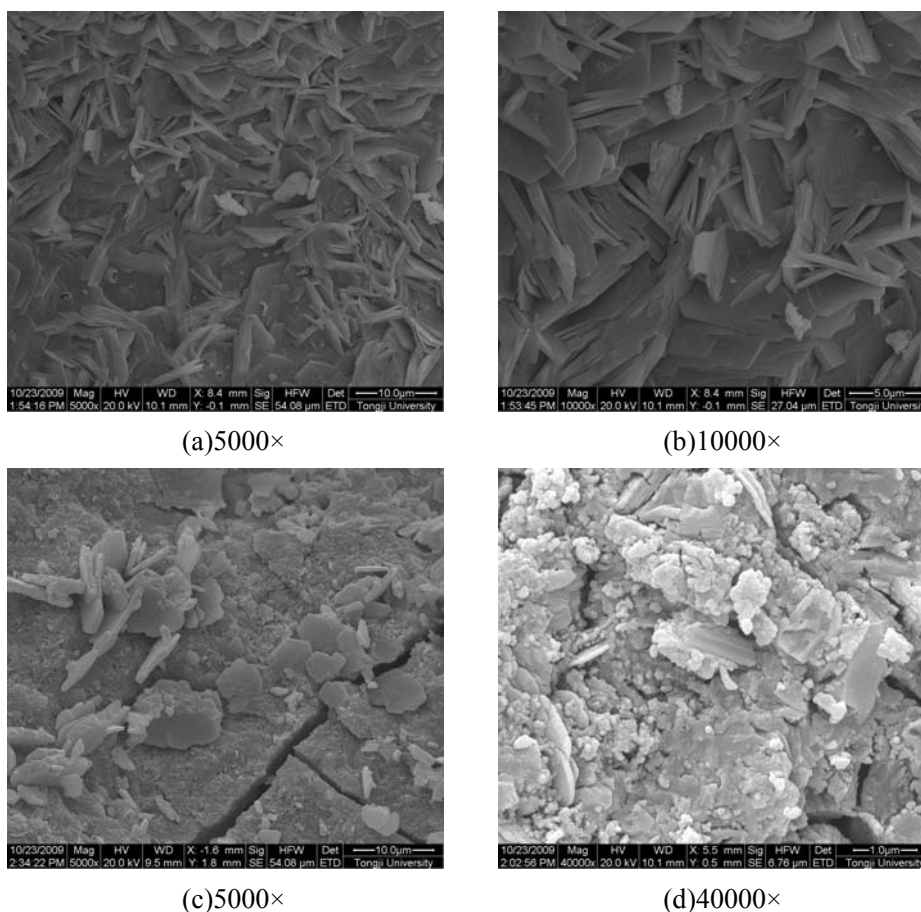


图 3 试样 A(a、b) 和 B(c、d) 过渡区 SEM 分析

#### 2.4.2 微观力学性能

已有研究表明, 纳米压痕技术可以有效表征水泥基材料的微观和纳米尺度上的力学性能。在参考已有研究方法的基础上<sup>[11-13,17-23]</sup>, 试验研究了掺加 UF500 纤维对混凝土试样过渡区力学性能的影响。将两个试件所得的弹性模量数值按照一定的置信度区间大小进行划分, 统计各个区间内数值的出现频率, 并作频率分布图, 如下图 4 所示



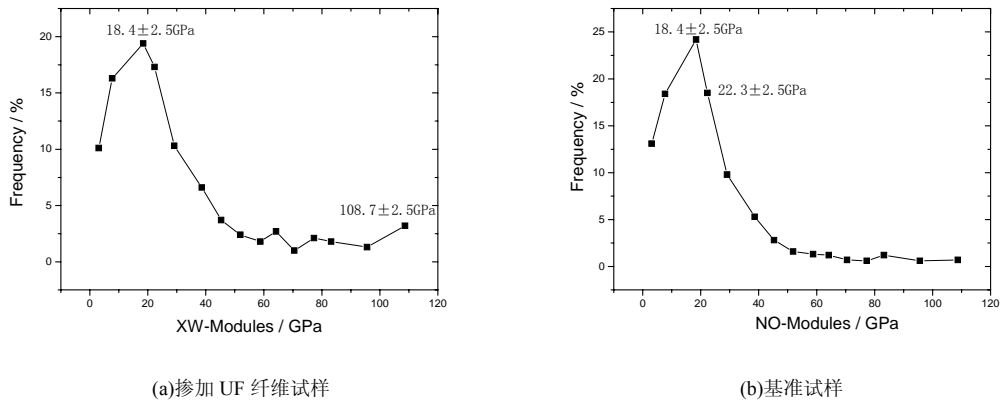


图 4 混凝土试样(28d)杨氏模量频率分布图

Paramita Mondal 等<sup>[15]</sup>研究结果显示, 过渡区杨氏模量均值约为 18GPa, 未水化水泥颗粒为 110 GPa。从图 4 可以看出, 掺加纤维的试样在模量为  $18.4 \pm 2.5$  GPa 区域内, 频率分布较基准试样少, 对过渡区组成产生了影响。在较小杨氏模量 ( $<18.4 \pm 2.5$ ) 范围内, UF500 纤维呈现的频率分布数更低, 而这部分区域可能是由于过渡区多孔性造成的<sup>[17]</sup>。因此从中可知, UF500 纤维改善了过渡区的孔隙结构, 提高了该区域的强度。

此外, 基准试样中出现的  $22.3 \pm 2.5$  GPa 值的频率较 UF500 纤维试样略高, 这是由于该区域强度由水化产物 CH 和 C-S-H 共同组成。基准试样虽然水化产物中 CH 含量更高, 但 C-S-H 量较少, 所以使得二者频率分布差距并不明显。图 4 (a) 中在  $108.7 \pm 2.5$  GPa 处出现了一个小峰, 这是由于掺加纤维的试样过渡区仍有少量未水化的水泥颗粒而造成的<sup>[17-23]</sup>。而基准试样的在集料处有较多量的水分, 使得水化反应更加充分, 因此在该区域未出现明显峰值。

本文研究内容虽然能部分反应出纤维素纤维对界面过渡区微观组成和力学性能的影响, 但仍有大量富有探索性的工作亟待进行。如怎样在不影响混凝土界面过渡区组成结构的基础上, 制得符合纳米压痕仪测试要求的试样, 并根据所得弹性模量和硬度数据, 建立纤维在界面过渡区作用的结构模型等。

### 3 结论

UF500 纤维的长度较短、间距小、分散性良好, 并具有很好的亲水性。在混凝土拌和过程中, 可显著改善混凝土和易性等施工性能。UF500 纤维不仅能改善混凝土的工作性, 而且在提高混凝土劈裂抗拉强度方面也具有优势。UF500 纤维具有良好的亲水性, 减少混凝土的泌水并减少塑性收缩裂缝出现, 增强混凝土的初期抗裂性能。

通过纳米压痕测试技术研究发现, 掺加 UF500 纤维对水泥基材料界面过渡区的微观组成产生重要影响, 并能提高界面过渡区微观力学性能, 对整个混凝土性能的改善起到积极影响。同样纳米压痕技术也为界面过渡区的研究提供了一种全新视角。但由于仪器限制, 如何在不影响混凝土界面过渡区组成和结构的基础上, 制得符合纳米压痕仪测试要求的试样, 并根据所得弹性模量和硬度数据, 建立纤维在界面过渡区作用的结构模型, 将成为后续研究的重点。

### 参考文献

- [1] 黄土元, 蒋家奋, 杨南如等. 近代混凝土技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- [2] 陈惠苏, 孙伟, Stroeven Pic. 水泥基复合材料集料与胶浆界面研究综述(一): 试验技术[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1): 63-69.

- [3] 陈惠苏, 孙伟, Stroeven Pie. 计算混凝土中平均最邻近集料表面间距的正十二面体模型[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1048-1052.
- [4] 水中和, 万惠文. 老混凝土中骨料—水泥界面过渡区(界面过渡区)(I)——元素与化合物在界面过渡区的富集现象[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(4): 21-24.
- [5] 水中和, 万惠文. 老混凝土中骨料—水泥界面过渡区(界面过渡区)(II)——元素在界面区的分布特征[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(5): 22-25.
- [6] Shen Y, Xu Z, Xie P, et al. A New Method of Enhancing Cement-aggregate Interfaces: Ideal Aggregate and Its Effects on Interfacial Microstructures[J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22(4), 612-618.
- [7] Elsharief Amir, Cohen Menashi D, Olek Jan. Influence of Aggregate Size, Water Cement Ratio and Age on the Microstructure of the Interfacial Transition Zone[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(11): 1837-1849.
- [8] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] Monteilhet L, Korb J P, Mitchell J, McDonald P J. Observation of exchange of micro-pore water in cement pastes by 2-dimensional  $T_2$ - $T_1$  nuclear magnetic resonance relaxometry[J]. Phys Rev E, 2006, 74, 061404:1-9.
- [10] 谢存毅. 纳米压痕技术在材料科学中的应用[J]. 物理, 2001, 30, 7.
- [11] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. J Mater Res, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [12] 黎明, 温诗铸. 纳米压痕技术理论基础[J]. 机械工程学报, 2003,39(3): 142-145.
- [13] 周亮, 姚英学. 纳米压痕硬度计测方法的研究进展[J]. 计测技术, 2006, 26, 6.
- [14] 杨人和, 刘宝元, 吴中伟. 水泥石与石灰石集料界面过渡区孔结构及其 CH 晶体亚微观结构的研究[J]. 硅酸盐学报, 1989, 17(4): 302-307.
- [15] Paramita Mondal, Surendra P. Shah, et al. Nanoscale Characterization of Cementitious Materials[J]. ACI MATERIALS JOURNAL, 2008, 20, 174-179.
- [16] 崔宏志, 邢锋. 用 SEM 和 FT-IR 研究轻骨料混凝土界面过渡区[J]. 混凝土, 2010, (1): 18-20.
- [17] Luca Sorelli, Georgios Constantinides, Franz-Josef Ulm, et al. The nano-mechanical signature of Ultra High Performance Concrete by statistical nanoindentation techniques[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 1447-1456.
- [18] M. Miller, C. Bobko, M. Vandamme, et al. Surface roughness criteria for cement paste nanoindentation[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 467-476.
- [19] G. Constantinides, F.-J. Ulm. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: results from nanoindentation and micromechanical modeling[J]. Cement and Concrete Research 2004, 34(1): 67-80.
- [20] G. Constantinides, F.J. Ulm, The nanogranular nature of C-S-H[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(1): 64-90.
- [21] Nadeau, J. C. Water-Cement Gradients in Mortars and Corresponding Effective Elastic Properties[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 32: 481-490.
- [22] Li, G.; Zhao, Y.; Pang, S. S.; and Li, Y. Effective Young's Modulus Estimation of Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29:1455-1462.
- [23] Ramesh, G.; Sotolino, E. D.; and Chen, W. F. Effect of Transition Zone on Elastic Moduli of Concrete Materials[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26:611-622.