

低温低湿养护条件对混凝土微观结构影响

陈俊豪¹, 李炎隆¹, 周恒², 李阳¹, 郭涵誉¹

(1. 西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘要: 为了进一步认识中国西北气候环境对混凝土材料微观结构的影响, 采用纳米压痕技术对不同温湿度养护条件下混凝土的微观结构特征开展试验研究。结果表明: 从不同水化产物相的体积分数结果来看, 养护温湿度不足会使得水泥砂浆中毛细孔隙和低密度水化硅酸钙(C-S-H)凝胶含量增多。通过对不同养护条件下混凝土界面过渡区的压痕模量和硬度统计结果可知, 相比于 20 °C-95%相对湿度(RH)养护条件, 当养护条件为 10 °C-70% RH 和 3 °C-50% RH 时, 混凝土的界面过渡区平均厚度分别增加了 5 μm 和 10 μm。

关键词: 混凝土; 养护条件; 纳米压痕; 微观力学; 界面过渡区

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1202-08

网络出版时间: 2023-04-13



Effect of Low Temperature and Low Humidity Curing Condition on Microstructure of Concrete

CHEN Junhao¹, LI Yanlong¹, ZHOU Heng², LI Yang¹, GUO Hanyu¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: To further understand the influence of climate environment on the microstructure of concrete materials in northwestern China, the microstructure characteristics of concrete under different temperature and humidity curing conditions were investigated by a nano-indentation technology. The results show that the lack of curing temperature and humidity leads to the increase of capillary pores and low-density calcium silicate hydrate (C-S-H) gel content in cement mortar. The indentation modulus and hardness of concrete interfacial transition zone (ITZ) under different curing conditions were statistically analyzed. It is indicated that the average thickness of concrete ITZ is increased by 5 μm and 10 μm when the curing conditions are 10 °C-70% relative humidity (RH) and 3 °C-50% RH, respectively, compared with that the curing condition is 20 °C-95% RH.

Keywords: concrete; curing conditions; nano-indentation; microscopic mechanics; interfacial transition zone

养护温湿度是影响混凝土早期水化反应的重要因素, 随着筑坝技术水平的提升, 水利工程建设逐渐转向海拔较高、环境条件复杂的西北地区^[1-4]。由于混凝土是一种非均质材料, 当养护条件无法达到标准养护条件时, 其内部水化反应规律和微观结构就会发生不同程度的变化, 从而会影响到混凝土建筑物的宏观力学性能和耐久性能^[5-8]。因此, 研究非

标准养护条件下混凝土微观结构性能的变化规律问题, 对于中国西北寒旱地区的水利工程混凝土施工和维护具有实际工程意义。

影响混凝土水化程度和微观结构的外部因素主要包括环境温度、湿度和养护龄期。相对于养护龄期而言, 研究温度和湿度对混凝土微观力学性能的影响至关重要, 因为在混凝土的整个养护龄期都会

收稿日期: 2022-06-13。 修订日期: 2022-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金(52079109)。

第一作者: 陈俊豪(1990—), 男, 博士研究生。

通信作者: 李炎隆(1980—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-06-13. Revised date: 2022-07-20.

First author: CHEN Junhao (1990—), male, Doctoral candidate.

E-mail: chenjunhao0966@163.com

Correspondent author: LI Yanlong (1980—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: liyanlong@xaut.edu.cn

受到所处环境温度和湿度的影响^[9-12]。对于混凝土自身而言,其结构性能在很大程度上取决于骨料的类型和质量、胶凝基质的性能以及二者之间的界面过渡区,尤其界面过渡区被认为是砂浆和混凝土性能的一个关键特征。因为在界面过渡区范围内的胶凝含量较低且孔隙率远远大于基体,所以该区域通常被认为是三者中最为薄弱的一环。除了因集料堆积不良导致局部含水率增加的边壁效应外,还存在其他影响界面过渡区性能的因素,如混凝土的水胶比、胶凝材料组分及养护制度等^[13-16]。因此,本工作采用纳米压痕技术,对不同温湿度养护条件下混凝土的微观结构特征进行了研究,研究结果不仅能够更好地认识中国西北寒旱地区混凝土内部微观产物的结构性能,还有助于从本质上理解其不同温湿度条件下宏观性能和耐久性能上的差异,能够为制定合理可行的质量控制措施提供理论依据。

1 实验

1.1 原材料

采用水胶比为 0.35 的 C30 混凝土试件进行研究。所用水泥品种为 P.O42.5 水泥,粉煤灰等级为 I 级。粗骨料采用范围为 5~20 mm 和 20~40 mm 的(粗骨料两种粒径范围的质量比为 1:1)二级配破碎石灰石,最大骨料尺寸为 40 mm。所用水是普通的自来水,选用颗粒级配良好、细度模量为 2.59 的天然砂,并在混凝土混合料中使用了减水率为 20%的减水剂(占胶凝材料质量的 1%)和引气剂(占胶凝材料质量的 0.03%)。混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportions of concretes

Wate-binder ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)					Mass fraction/%	
	Water	Cement	FA	Gravel	Sand	AEA	SP
0.35	130	317	55	1234	691	0.03	1

Note: FA—fly ash; AEA—air entraining agent; SP—Superplasticizer.

1.2 养护温度和湿度

为了模拟中国西北地区水利工程建筑物在不同施工月份的平均温湿度^[17-19],因而在混凝土试件养护过程中,利用 FH1000-20 环境养护箱对温湿度进行控制。设定 3、10 ℃和 20 ℃ 3 种养护温度分别模拟春末秋初(4~5 月份、9~10 月份)、夏季(6~8 月份)和标准养护条件的平均温度,对应月份的平均相对湿度(RH)分别为 50%、70%和 95%。因此设置 3 ℃-50% RH、10 ℃-70% RH 和 20 ℃-95% RH 3 种混凝土试件的温湿度养护条件。

1.3 样品制备

参照试验标准 GB/T50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,混凝土试件浇筑在尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的钢制模具中,随后立即移至预先设定相应温湿度的养护箱中进行养护。当养护龄期达到 28 d 时,取出试件在自动切割机上切割成 15 mm 含有界面过渡区的立方体试件并进行打磨、抛光以达到光滑的表面,每组样品均取 3 个平行试样进行下一步的纳米压痕测试。

1.4 微观结构性能测试

纳米压痕技术因其具有极高的分辨能力和在纳米尺度下的力学表征行为,也被叫作深度敏感压痕技术。本试验所采用 Keysight G200 纳米压痕仪器的最大荷载为 1 000 mN,荷载分辨率 6 nN,压头的总行程和最大压入深度分别为 1.5 mm 和 500 μm,位移的量程和精度分别为 80 μm 和 0.04,位移分辨率小于 0.01 nm,试样载物台 x 轴和 y 轴的分辨率为 1.5 μm,数据的采集频率为 100 kHz。每次试验采用间距为 30 μm 的 10×10 点阵压痕。为了获得整个压痕试验过程中的力学性能指标,以便于消除压入深度尺寸效应的影响,试验时设定 2 mN 的最大压痕力进行控制,最大压痕深度选择 800 nm。压痕加卸载制度的选择同样对试验结果具有很大影响,压痕加载以 4 mN/min 的恒定速率线性加载至 2 mN,峰值保持时间为 5 s 以消除试件的徐变影响,然后以相同的速率卸载至零。整个试验过程中控制热漂移指数为 0.05 nm/s。

对由不同组分($j=1, \dots, n$)组成的非均质材料进行了大量的纳米压痕试验,计算每种水化物相所占体积分数(f_j)。其基本假设为各个阶段的力学性能参数分布可以近似为正态分布或者 Gaussian 分布(ψ_j),并用均值(μ_j)和标准差(s_j)进行表示,统计分析的目的是估计未知参数(μ_j 、 s_j 和 f_j)。

$$\psi_j(x) = \frac{1}{s_j \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2s_j^2}\right) \quad (1)$$

$$\mu_j = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} x_k, \quad s_j = \frac{1}{N_j - 1} \sum_{k=1}^{N_j} (x_k - \mu_j)^2 \quad (2)$$

式中: N_j 代表纳米压痕测试数据中不同组分对应的点数; x_k 为试验所得值。

所以由纳米压痕试验测得所有力学性质 x 值的理论概率密度函数 P 可以表示为:

$$P = \sum_{j=1}^n f_j \psi_j \quad (3)$$

每种水化物相的所有未知参数 μ_j 、 s_j 和 f_j 都可以从纳米压痕试验数据获得的试验 P 中确定。对于测试数据的最佳描述(即最佳估计 P)是从理论 P 和试验 P 之间的最小标准差和最大相关系数(R^2)中确定, 如下所示:

$$\min \sum_{i=1}^m \frac{[P_{\text{exp}}(x_i) - P(x_i)]^2}{m},$$

$$\max R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m [P_{\text{exp}}(x_i) - P(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^m [P_{\text{exp}}(x_i) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P(x_i)]^2} \quad (4)$$

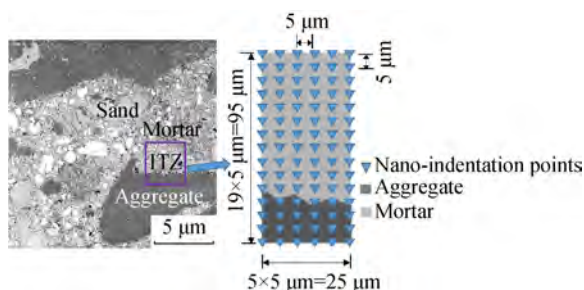
式中: m 是直方图中长条的数量, 它应在建立试验 P 的过程中适当选择。

通过对所有测试结果统计分析, 分类归纳不同水化物相的纳米力学性能。然后利用非线性最小二乘法得到与试验结果相吻合的多元正态分布曲线模型^[20]。

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

基于每个模型拟合的结果, 从中可以提取分布的均值 μ 和标准差 σ , 正态分布曲线下的面积可以看成在压痕区域内与之相关水化物相的体积分数。

为了得到混凝土界面过渡区的微观结构性能, 以及确保能够获取足够多的压痕数据进行统计分析, 进行纳米压痕试验过程中借助光学显微镜定位合适的界面过渡区。在距离骨料边缘 10 μm 选取第 1 个压痕点作为基准点, 然后以间隔 5 μm 的距离分别向水平和垂直方向进行网格纳米压痕测试, 最终得到 15 $\times$ 6 的网格压痕矩阵, 区域面积为 25 $\mu\text{m} \times 95 \mu\text{m}$, 每个混凝土试件表面选取 3 处界面过渡区进行试验, 如图 1 所示。



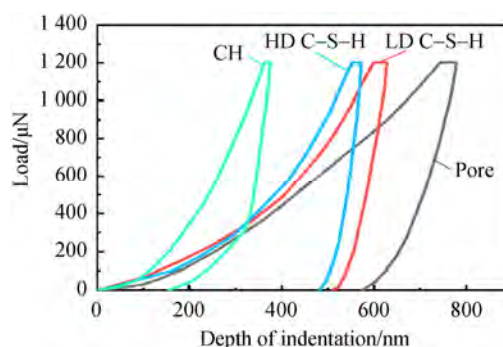
ITZ is interface transition zone.

图 1 混凝土中界面过渡区的压痕区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the indentation area of the interfacial transition zone in concrete

2 不同养护条件下砂浆的微观结构性能

在水泥基材料中各相的弹性模量和硬度并不一样^[21–22], 其中毛细孔隙相、低密度水化硅酸钙凝胶(LD C-S-H)、高密度水化硅酸钙凝胶(HD C-S-H)和氢氧化钙(CH)的弹性模量范围大致为 0~13、13~26、26~40 GPa 和 40~55 GPa。在本工作过程中只考虑孔隙和水化物相, 忽略弹性模量大于 70 GPa 的未水化物相, 不同物相的典型 p - h 曲线如图 2 所示。



Note: CH is calcium hydroxide; HD C-S-H is high density calcium silicate hydrate gel; LD C-S-H is low density calcium silicate hydrate gel; Pore is capillary interstice.

图 2 不同物相的典型 p - h 曲线

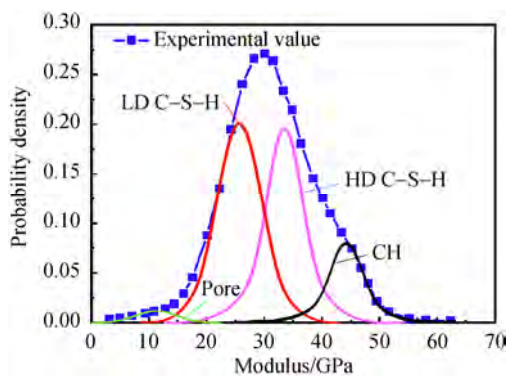
Fig. 2 p - h curves of different phases

2.1 养护条件对砂浆压痕模量和硬度的影响

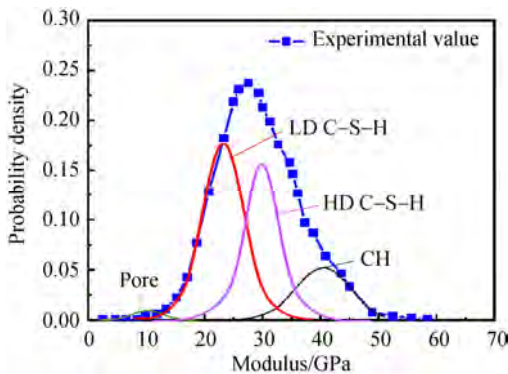
为了得到不同养护条件下砂浆的微观结构性能, 对 3 种养护条件下混凝土纳米压痕统计数据进行分析研究, 不同养护条件下砂浆压痕模量和压痕硬度的 P 及峰值, 如图 3 和图 4 所示。

通过 Gaussian 拟合得到了压痕表面各水化物相的压痕模量、硬度和体积分数。从概率分布函数中可以看出, 不同养护条件下砂浆试样压痕模量和硬度的频率分布呈现出相似的趋势, 而且都包含 4 个明显不同的峰, 分别代表毛细孔隙相、LD C-S-H 凝胶、HD C-S-H 凝胶和 CH。根据 Delesse 原理可知, 对于非均质材料(如砂浆), 其比表面积分数等于体积分数。所以可以通过计算各水化物相的面积分数用来代替体积分数。各水化物相的平均值、标准差和体积分数的拟合结果见表 2。

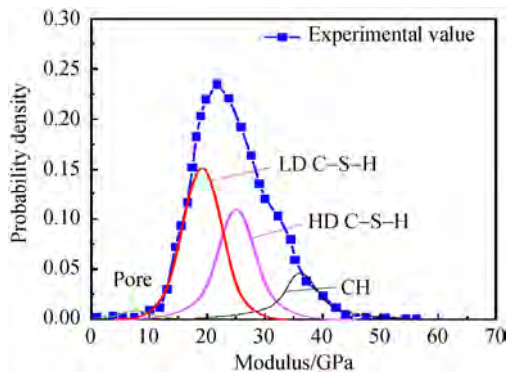
不同养护条件下砂浆各水化物相的微观结构性能如表 2 所示。可以看出, 随着养护温湿度降低, 砂浆试样的微观力学性能均出现下降趋势。整体比较能够得出, 相比于 20 $^{\circ}\text{C}$ -95% RH 养护条件, 10 $^{\circ}\text{C}$ -70% RH 养护条件下砂浆各相的压痕模量均降低 2 GPa 左右, 硬度均降低 0.2 GPa 左右。当养



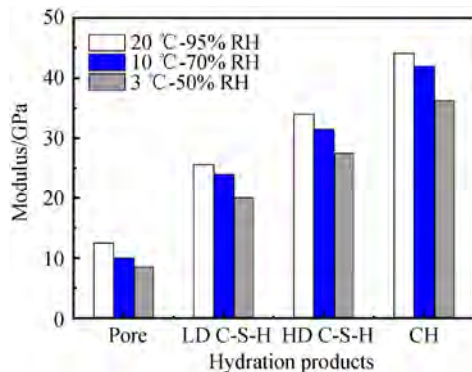
(a) Probability distribution function of 20°C-95% RH



(b) Probability distribution function of 10°C-70% RH



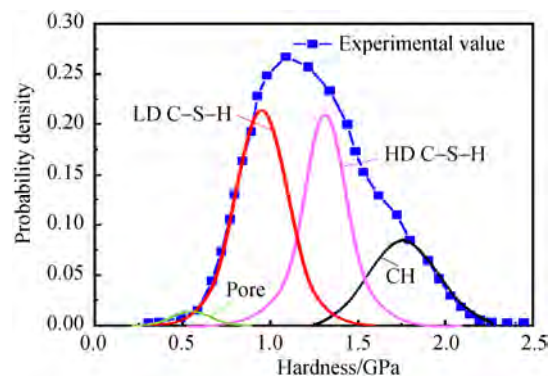
(c) Probability distribution function of 3°C-50% RH



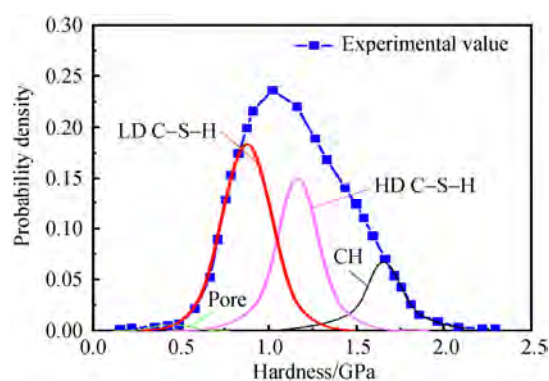
(d) Indentation elastic modulus of each hydrate phase

图 3 不同养护条件下砂浆压痕模量的概率分布函数(P)及峰值柱状图

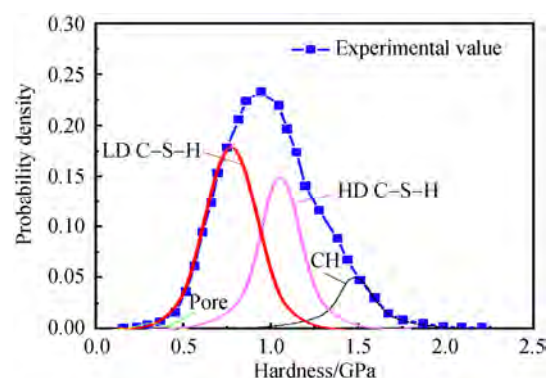
Fig. 3 Probability distribution function (P) and peak histogram of mortar indentation modulus under different curing conditions



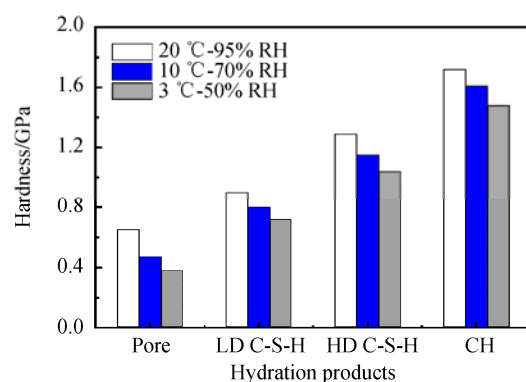
(a) Probability distribution function of 20 °C-95% RH



(b) Probability distribution function of 10 °C-70% RH



(c) Probability distribution function of 3°C-50% RH



(d) Indentation hardness of each hydrate phase

图 4 不同养护条件下砂浆压痕硬度的 P 及峰值柱状图
Fig. 4 P and peak histogram of mortar indentation hardness under different curing conditions

表 2 不同水化物相的压痕弹模、硬度及体积分数

Table 2 Indentation elastic modulus, hardness and volume fraction of different hydrate phases

Ssamples	Hydration products	Modulus		Hardness		Volume fraction/%
		Mean±standard deviation/GPa	Relative error/%	Mean±standard deviation/GPa	Relative error/%	
20℃-95% RH	Pore	12.53±3.15	2.40	0.65±0.12	4.79	2.3
	LD C-S-H	25.64±5.30	1.77	0.90±0.07	3.56	36.1
	HD C-S-H	34.04±4.28	0.38	1.29±0.20	0.75	36.2
	CH	44.12±5.01	2.32	1.72±0.24	4.64	25.4
10℃-70% RH	Pore	10.02±4.47	3.24	0.47±0.17	6.50	4.1
	LD C-S-H	24.05±5.18	2.15	0.80±0.23	4.31	44.7
	HD C-S-H	31.49±4.63	2.01	1.15±0.10	4.02	30.9
	CH	42.08±5.32	1.46	1.61±0.31	2.92	20.3
3℃-50% RH	Pore	8.55±3.94	3.30	0.38±0.29	6.57	5.6
	LD C-S-H	20.03±4.21	2.47	0.72±0.16	4.94	49.0
	HD C-S-H	27.57±4.48	1.98	1.04±0.25	3.98	26.8
	CH	36.24±5.06	2.41	1.48±0.13	4.82	18.6

护条件为 3℃-50% RH 时, 砂浆各相的压痕模量降低了 4~8 GPa, 硬度降低了 0.25~0.3 GPa。对于各个水化物相的峰值而言, 随着养护温湿度的不足, 孔隙相的压痕模量分别降低了约 20.03%、31.76%, 硬度分别降低了 27.69%、41.54%; LD C-S-H 凝胶的压痕模量分别降低了约 6.2%、21.88%, 硬度分别降低了 11.11%、20%; HD C-S-H 凝胶的压痕模量分别降低了约 7.5%、19%, 硬度分别降低了 10.85%、19.38%; CH 凝胶的压痕模量分别降低了约 4.62%、17.86%, 硬度分别降低了 6.4%、13.95%。由于影响混凝土内部微观结构发展和宏观力学性能的关键因素是其内部水泥水化反应程度, 20℃-95% RH 养护条件下的温湿度为水泥提供了较为适宜的水化反应环境, 生成的水化产物对混凝土内部初始缺陷进行了有效填补, 使得其内部结构比较密实, 微观结构性能发展较好, 而养护温湿度不足将降低混凝土内部水分运动速度, 能够供给水化反应的水分不断减少, 生成的水化产物不足以填充初始缺陷, 使得水泥的水化反应速率受到阻碍, 最终影响混凝土内部不同水化产物相的组成结构, 导致其内部结构变得疏松, 各水化物相的力学性能受到削弱。由此可知, 养护温湿度不足对砂浆内部水化产物相的力学性能影响相对较为明显。

2.2 砂浆中不同水化物相体积分数对比分析

结合图 5 不同养护条件下水化产物中各相的体积分数可以看出, 当养护条件为 20℃-95% RH 时, 混凝土试样中毛细孔隙相和 LD C-S-H 凝胶的体积分数分别为 2.3%、36.1%、36.2%和 25.4%。相比于 20℃-95%RH 养护条件而

言, 当养护条件为 10℃-70% RH 时, 混凝土试样中毛细孔隙相和 LD C-S-H 凝胶的体积分数分别增加了 78.26%和 23.82%, 而 HD C-S-H 凝胶和 CH 的体积分数分别减少了 14.64%和 20.08%。当养护条件为 3℃-50% RH 时, 混凝土试样中毛细孔隙相和 LD C-S-H 凝胶的体积分数分别增加了 143.48%和 35.73%, 而 HD C-S-H 凝胶和 CH 的体积分数分别减少了 25.97%和 26.77%。由此可见, 随着养护温湿度的下降混凝土中产生了较多毛细孔隙相和 LD C-S-H 凝胶, 而不利于力学性能较高的 HD C-S-H 凝胶和 CH 相的生成。结合以往研究证实^[23-24], 水化产物中 LD C-S-H 凝胶主要形成在相对开阔的空间, 而 HD C-S-H 凝胶和 CH 主要分布在空间较为狭小的区域, 所以当养护温湿度出现不足, 在疏松的混凝土内部 LD C-S-H 凝胶会占据较大比例, 从而降低了其微观结构性能。

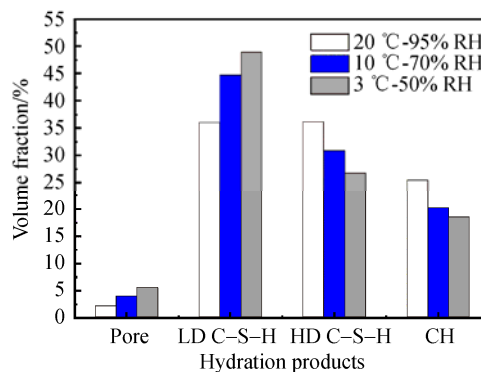


图 5 不同养护条件下水化产物中各相的体积分数

Fig. 5 Volume fraction of each phase in hydration products under different curing conditions

3 不同养护条件下混凝土界面过渡区的微观结构性能

3.1 养护条件对界面过渡区压痕模量的影响

因为纳米压痕技术是测定各种骨料和浆体力学性能的有效方法, 它的测试结果能够准确反映混凝土材料的微观结构性能。图 6 给出了不同养护条件

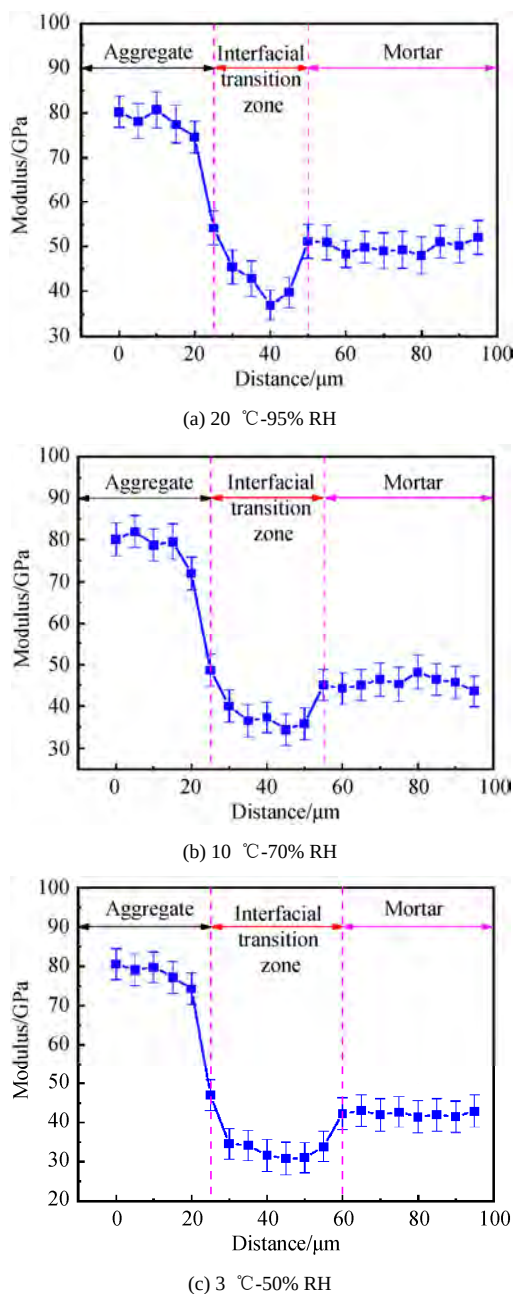


图 6 不同养护条件下混凝土界面过渡区的纳米压痕模量分布

Fig. 6 Distribution of nano-indentation modulus in the transition zone of concrete interface under different curing conditions

下混凝土界面过渡区的纳米压痕模量分布图。试验统计结果的平均值如表 3 所示, 所得结果有助于分析水泥基体、界面过渡区和骨料之间的力学性能差异, 而且不同养护条件下混凝土界面过渡区的厚度同样可以根据纳米压痕试验结果来确定, 在图 6 和表 3 中均给出。

表 3 纳米压痕模量试验统计结果的平均值

Table 3 Average value of statistical results of nano-indentation modulus test

Samples	Aggregate	Interfacial transition zone		Mortar
	Modulus/ GPa	Modulus/ GPa	Thickness/ μm	Modulus/ GPa
20 °C-95% RH	78.27	43.80	25	49.96
10 °C-70% RH	78.52	38.78	30	45.53
3 °C-50% RH	78.18	33.49	35	42.22

由图 6 可以看出, 不同养护条件下混凝土界面过渡区的压痕模量分布规律基本一致, 但是不同组分的模量值具有明显区别。从 3 种养护条件下混凝土界面过渡区的纳米压痕模量分布图来看, 骨料的压痕模量处于最高位置, 砂浆次之, 界面过渡区位置最低, 不难看出混凝土的界面过渡区是其最薄弱的环节。结合表 3 分析可知, 3 种养护条件下混凝土骨料的压痕模量基本没有差别, 但是砂浆和界面过渡区的压痕模量随着养护温湿度的降低而下降, 而且界面过渡区的厚度也会随之变大。相比于 20 °C-95% RH 养护条件, 混凝土界面过渡区的压痕模量在 10 °C-70% RH 和 3 °C-50% RH 养护条件下分别减少了 11.46%、23.54%, 同时界面过渡区的厚度也分别增加了 5 μm 和 10 μm。而且从砂浆的压痕模量也可以发现, 相比于 20 °C-95% RH 养护条件, 混凝土内部砂浆的压痕模量在 10 °C-70% RH 和 3 °C-50% RH 养护条件下分别减少了 8.87%、15.49%。以往研究者将这种差异归因于混凝土内部水化程度和水化产物结构的不同而导致的^[25]。结合文中第 2 节水化产物各相力学特征的分析可知, 水化产物的模量峰值范围在 40~45 GPa, 然而在界面过渡区, 由于含有较多的孔隙或缺陷, 其水化产物甚至低于 20 GPa。由此可知, 随着养护温湿度的降低会使得混凝土界面过渡区的结构变得疏松, 其微观结构性能也会随之下降。

3.2 养护条件对界面过渡区硬度的影响

通过对纳米压痕试验结果的统计, 得到不同养护条件下混凝土界面过渡区的纳米压痕硬度分布, 如图 7 所示。试验统计结果如表 4 所示。

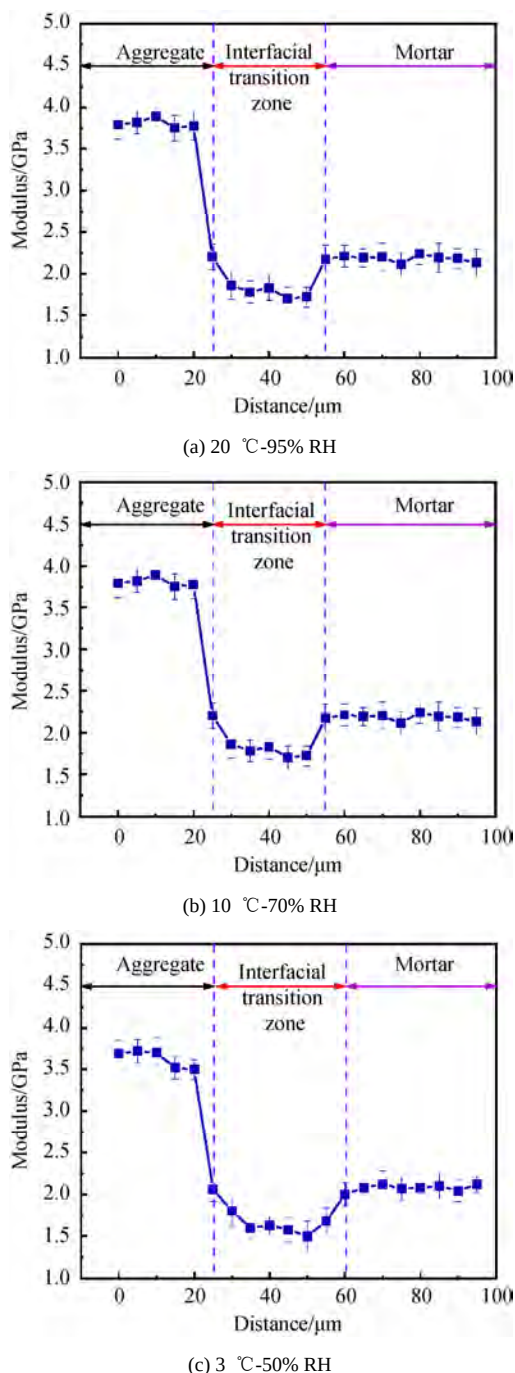


图7 不同养护条件下混凝土界面过渡区的纳米压痕硬度分布图

Fig. 7 Nano-indentation hardness distribution of concrete interface transition zone under different curing conditions

由图7可以看出,不同养护条件下混凝土界面过渡区的纳米压痕硬度分布图和模量分布图的整体规律基本一致。同样可以从表4中的结果得到,3种养护条件下混凝土骨料的压痕硬度差别较小,砂浆和界面过渡区的压痕硬度随着养护温湿度的降低而减小,界面过渡区的厚度随之变大。相比于20 °C-95% RH 养护条件,混凝土界面过渡区的压痕

硬度在10 °C-70% RH 和3 °C-50% RH 养护条件下分别减少了7.8%、18.05%。从砂浆的压痕硬度同样能够得出,相比于20 °C-95% RH 养护条件,砂浆的压痕硬度在10 °C-70% RH 和3 °C-50% RH 养护条件下分别减少了5.22%、10%。由此可知,20 °C-95% RH 养护条件下混凝土界面过渡区的性能更好,即充足的养护温湿度能够促进混凝土内部微观结构性能,且界面过渡区厚度较小。因为养护温湿度降低导致混凝土内部结构疏松,吸水率就会越高,就会促进水泥浆体中 Ca^{2+} 的基体向界面过渡区迁移速率,使得 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在该区域中聚集,从而产生更多的LD C-S-H凝胶,因此出现混凝土界面过渡区厚度不断增大的现象。

表4 纳米压痕硬度试验统计结果的平均值

Table 4 Average value of statistical results of nano-indentation hardness test

Samples	Aggregate	Interfacial transition zone		Mortar
	Hardness/ GPa	Hardness/ GPa	Thickness/ μm	Hardness/ GPa
20 °C-95% RH	3.80	2.05	25	2.30
10 °C-70% RH	3.81	1.89	30	2.18
3 °C-50% RH	3.63	1.68	35	2.07

4 结论

1) 基于不同养护条件下混凝土砂浆的纳米压痕试验结果可知,随着养护温湿度降低,砂浆试样的微观结构性能均出现下降趋势。相比于20 °C-95% RH 养护条件,当养护条件为10 °C-70% RH 和3 °C-50% RH 时,砂浆各相的压痕模量和硬度分别降低了2~8 GPa 和0.2~0.3 GPa。

2) 从不同水化产物相的体积分数研究来看,养护温湿度的不足会导致水泥砂浆中毛细孔隙和LD C-S-H凝胶含量增多,不利于HD C-S-H凝胶和CH相的生成。

3) 随着养护温湿度的降低,界面过渡区的压痕模量和硬度均减小,其厚度也会不断增大。相比于20 °C-95% RH 养护条件,当养护条件为10 °C-70% RH 和3 °C-50% RH 时,混凝土的界面过渡区平均厚度分别增加了5 μm 和10 μm。

参考文献:

- [1] ORTIZ J, AGUADO A, AGULLÓ L, et al. Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(10): 1970–1979.
- [2] DU M Y, JIN X Y, YE H L, et al. A coupled hygro-thermal model of early-age concrete based on micro-pore structure evolution[J]. Constr

- Build Mater, 2016, 111: 689–698.
- [3] LI C, WU M X, CHEN Q, et al. Chemical and mineralogical alterations of concrete subjected to chemical attacks in complex underground tunnel environments during 20–36 years[J]. *Cem Concr Comp*, 2018, 86: 139–159.
- [4] DAVILA J M, SARMIENTO A M, FORTES J C, et al. Determination of the extreme reduction of concrete strength due to acid mine drainage by laboratory tests on specimens located in a real environment[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 269: 121817.
- [5] KJELSEN K O, DETWILER R J. Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures[J]. *Cem Concr Res*, 1992, 22(1): 112–120.
- [6] KHATIB J M, MANGAT P S. Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2002, 32(11): 1743–1753.
- [7] GERSTIG M, WADSÖ L. A method based on isothermal calorimetry to quantify the influence of moisture on the hydration rate of young cement pastes[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(6): 867–874.
- [8] SHOUKRY S N, WILLIAM G W, DOWNIE B, et al. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2011, 25(2): 688–696.
- [9] XU L L, WANG P M, ZHANG G F. Formation of ettringite in Portland cement/calcium aluminate cement/calcium sulfate ternary system hydrates at lower temperatures[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 31: 347–352.
- [10] LIU Z Z, SHA A M, HU L Q, et al. Kinetic and thermodynamic modeling of Portland cement hydration at low temperatures[J]. *Chem Pap*, 2017, 71(4): 741–751.
- [11] MI Z X, HU Y, LI Q B, et al. Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 169: 403–413.
- [12] DAVILA J M, SARMIENTO A M, FORTES J C, et al. Determination of the extreme reduction of concrete strength due to acid mine drainage by laboratory tests on specimens located in a real environment[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 269: 121817.
- [13] 施惠生, 孙丹丹, 吴凯. 混凝土界面过渡区微观结构及其数值模拟方法的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(5): 678–685.
SHI Huisheng, SUN Dandan, Wu Kai. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(5): 678–685.
- [14] GOLEWSKI G L. An assessment of microcracks in the interfacial transition zone of durable concrete composites with fly ash additives[J]. *Compos Struct*, 2018, 200: 515–520.
- [15] 徐晶, 王先志. 纳米二氧化硅对混凝土界面过渡区的改性机制及其多尺度模型[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8): 1053–1058.
XU Jing, WANG Xianzhi. *J Chin Ceram Soc*, 2018, 46(8): 1053–1058.
- [16] 徐泽华, 赵庆新, 张津瑞, 等. 界面过渡区对混凝土徐变性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 347–356.
XU Zehua, ZHAO Qingxin, ZHANG Jinrui, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(2): 347–356.
- [17] LI L, ZHA Y. Mapping relative humidity, average and extreme temperature in hot summer over China[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 615: 875–881.
- [18] SHI F Z, ZHAO C Y, ZHOU X, et al. Spatial variations of climate-driven trends of water vapor pressure and relative humidity in northwest China[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 2019, 55(2): 221–231.
- [19] CHEN D T, LIU W J, HUANG F R, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of relative humidity in arid region of Northwest China during 1966–2017[J]. *J Arid Land*, 2020, 12(3): 397–412.
- [20] CONSTANTINIDES G, ULM F J. The nanogranular nature of C–S–H[J]. *J Mech Phys Solids*, 2007, 55(1): 64–90.
- [21] WANG M, XIE Y J, LONG G C, et al. Microhardness characteristics of high-strength cement paste and interfacial transition zone at different curing regimes[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 221: 151–162.
- [22] 赵素晶. 超高性能水泥基复合材料的力学性能和微结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHAO Sujing. Study on mechanical properties and microstructure of ultra-high performance cementitious composite (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2018.
- [23] JENNINGS H M, THOMAS J J, GEVRENOV J S, et al. A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste[J]. *Cem Concr Res*, 2007, 37(3): 329–336.
- [24] HU C L, LI Z J. A review on the mechanical properties of cement-based materials measured by nanoindentation[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 90: 80–90.
- [25] WU K, SHI H S, XU L L, et al. Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties[J]. *Cem Concr Res*, 2016, 79: 243–256.