第 49 卷第 5 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 5
2021 年 5 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　May，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200715

硬化水泥净浆微观强度测试与表征

葛　智[1]，姜能栋[1]，张洪智[1,2]，侯东帅[3]，Erik Schlangen[4]，Branko Šavija[4]

(1. 山东大学齐鲁交通学院，济南 250100；2. 山东大学苏州研究院，江苏 苏州 215021；3. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266033；4. 代尔夫特理工大学土木工程与地球科学学院，荷兰代尔夫特市 2628 CN)

摘　要：采用精密切片及划片技术，制备边长分别为 100 μm 和 200 μm 的硬化水泥净浆微观立方体试件。采用纳米压痕仪，利用不同几何形状的压头，对制备的试件进行无侧限轴压及单边劈裂测试，在微观尺度上研究硬化水泥净浆的抗压和劈裂强度。为了表征硬化水泥净浆微观尺度的变异性，每组工况测试 100 个样品，建立数据库，进行统计分析。结果表明：硬化水泥净浆的微观强度概率分布可以用二参数 Weibull 分布函数进行表征；高水胶比的硬化水泥净浆的平均强度较低且变异性高；试件尺寸对测试结果具有显著影响，强度和变异性均随试件尺寸增大而降低。与已有研究结果对比，发现硬化水泥净浆的微观强度和离散性介于单一水化产物和混凝土之间。

关键词：硬化水泥净浆；单边劈裂强度；无侧限抗压强度；Weibull 分布；微观尺度
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)05–0887–06
网络出版时间：2021–04–13



Strength characterization of hydrated cement paste at micro-scale

GE Zhi[1], *JIANG Nengdong*[1], *ZHANG Hongzhi*[1,2], *HOU Dongshuai*[3], *SCHLANGEN Erik*[4], *ŠAVIJA Branko*[4]

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Ji'nan 250100, China;
2. Suzhou Research Institute, Shandong University, Suzhou 215021, Jiangsu, China;
3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China;
4. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2628 CN, Delft, the Netherlands)

Abstract: Micro-cubes of hardened cement paste with the lengths of 100 μm and 200 μm were prepared by micro-dicing and thin-sectioning techniques. The compressive strength and splitting strength of these specimens were measured by a nanoindenter equipped with different types of tips. Considering the heterogeneity nature of the material in a micro-scale, we examined 100 specimens *via* a statistic analysis. The results show that the two-parameter Weibull distribution can be used to represent the probability distribution of both compressive strength and splitting strength in a micro-scale. The specimens with a higher water-to-binder ratio have a higher strength and a lower variability. Furthermore, the specimen size has an influence on the measured strength. The bigger specimens have lower strength and variability. The reported average value and variability of strengths obtained in this work are greater than those of the concrete in a meso-scale, but lower than those of the hydration product in a nano-scale.

Keywords: hydrated cement paste; one-sided splitting strength; uniaxial compressive strength; Weibull distribution; micro-scale

水泥基材料具有多相、多尺度的复杂性特征[1]，为了探明影响水泥基材料性能的相关机理，把握材料实质，避免随着研究尺度的增加而引入的不确定性，应从微观甚至更小尺度的研究开始，逐步过渡到实际结构尺寸。

目前，纳米压痕是水泥基材料小尺度力学性能研究最为常用的测试手段。该测试手段基于接触力学的基本理论，分析压头在压入过程中材料的压入深度—荷载响应，获得压痕区的硬度、弹性模量、徐变、断裂能等微观力学参数[2–8]。基于点阵压痕和大数据样本解卷积的方法，Constantinides 等[9]提出了分解水泥基材料各相水化产物力学参数的方

收稿日期：2020–09–18。　修订日期：2020–11–05。
基金项目：山东省泰山学者青年计划(tsqn201909032)；国家自然科学基金项目(52008234，51478252，51978387)；江苏省自然科学基金项目(BK20200235)。
第一作者：葛　智(1977—)，男，博士，教授。
通信作者：张洪智(1990—)，男，博士，研究员。

Received date: 2020–09–18.　**Revised date:** 2020–11–05.
First author: GE Zhi (1977–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: zhige@sdu.edu.cn
Correspondent author: ZHANG Hongzhi (1990–), male, Ph.D., Researcher.
E-mail: hzzhang@sdu.edu.cn

法。在纳米压痕的基础上，联合电镜观测和能谱分析可以进一步研究压痕区化学组分对力学性能的影响并准确识别基体中的单一水化产物[10–12]。最近，有学者[13–14]相继提出通过聚焦离子束技术制备微米级别悬臂梁，利用纳米压痕仪或原子力显微镜在自由端施加荷载至破坏，进而获得水化产物微观强度的测试方法。

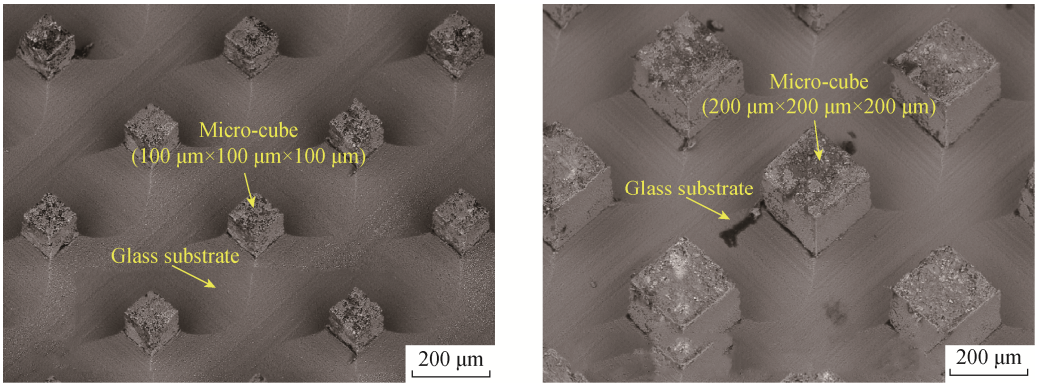
上述小尺度研究主要集中在单一水化产物的纳微观力学性能方面，缺乏针对微观尺度硬化水泥基体这一复杂体系力学性能的试验研究。水泥基体的微观力学性能需要通过夹杂均匀化理论[15–17]或数值模型[18–22]获得。然而，由于缺少实测微观数据的校验，所以硬化水泥净浆的微观强度预测值存在较大差别，其真实微观强度尚不明确，导致缺乏连接纳观和细观尺度的桥梁。基于此，本研究在微观尺度对硬化水泥净浆的力学行为开展试验研究。采用精密切片及划片技术，制备边长为 100 μm 和 200 μm 的硬化水泥净浆微观试件。通过纳米压痕仪，利用不同几何形状的压头，进行微观无侧限轴压及单边劈裂实验，在微观尺度上研究硬化水泥净浆的抗压和劈裂强度。考虑到硬化水泥净浆微观结构的高度非均质性，建立大样本数据库，采用二参数 Weibull 分布表征实验结果，研究水胶比、试件尺寸对于硬化水泥净浆微观强度的影响。最后，对水泥基材料的纳观、微观及细观力学性能的内在关联进行分析与讨论。

1 实验

1.1 样品制备

采用 P. I. 42.5 基准硅酸盐水泥制备水胶比为 0.3、0.4 和 0.5 的硬化水泥净浆微观立方体试件。立方体试件边长分别为 100 μm 和 200 μm。具体流程如下：

水泥加水搅拌均匀后，装入 30 mm×60 mm 的塑料试管中进行密闭养护，养护温度为(20±2) ℃。待养护龄期至 28 d，采用切割机从样品中间切出高度约为 2 mm 的薄片。将薄片固定于载玻片上。利用“StruersSystemAbele Accessories”进行精密切片，分别制备厚度为 100 μm 和 200 μm 的硬化水泥净浆薄片。切片完成后，通过厚度测试计对薄片中心和边缘位置进行测量，发现切片误差在 3 μm 内。采用颗粒直径 6、3、1 μm 和 0.25 μm 的金刚石悬浮抛光液对薄片进行抛光，得到具有足够平整度的抛光试样(水泥表面粗糙度<150 nm)。利用精密划片机，使用厚度为 250 μm 的树脂刀片在相互垂直的两个方向对薄片进行切割，制备硬化水泥净浆微观样品。切割过程中设置刀片切入载玻片 20 μm 深度，保证硬化水泥净浆微观样品完全分割。图 1 为 100 μm 和 200 μm 硬化水泥净浆立方体的电子显微镜照片。



(a) 100 μm micro-cubes (b) 200 μm micro-cubes

图 1 硬化水泥净浆微观立方体电子显微镜照片

Fig. 1 SEM images of the fabricated hydrated cement paste micro-cubes

1.2 测试方法

采用 KLA-Tencor G200 纳米压痕仪分别进行微观试件的单边劈裂和无侧限轴压试验。力学测试完成后，利用电子显微镜观察样品破坏形貌。考虑硬化水泥净浆微观尺度的非均质性，每组进行 100 个微观试件的测试，进行统计分析。

单边劈裂试验采用楔形压头(楔形边缘长度 200 μm，半径 9.6 μm)在微观试件上表面施加线荷载。试验采用位移控制模式，通过连续刚度法(continuous stiffness measurement)[23]控制加载速率为 50 nm/s 并记录力学响应。典型的荷载-位移曲线如图 2 所示。

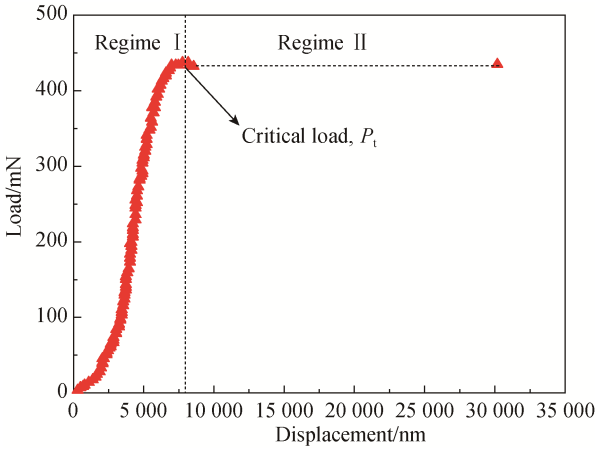


图 2　单轴劈裂实验典型的荷载-位移曲线

Fig. 2　Typical load-displacement curve of the one-sided indentation splitting test

在图 2 中，荷载位移曲线分为 2 段。第一段内，荷载随位移增长至临界荷载点，P_t。随后，出现力-位移的平台段。该平台段是由于试件的突然破坏而纳米压痕仪灵敏度不足造成的。类比于劈裂测试，基于最大应力准则，通过式(1)可计算微观试件的劈裂强度 f_t。

$$f_t = \alpha \frac{2P_t}{\pi D^2} \tag{1}$$

式中：f_t 为劈裂强度，MPa；P_t 为劈裂临界荷载点，mN；D 为立方体试件的边长，mm；α 是折减系数。Zhang 等[24]通过有限元模型分析对比了劈裂与单边劈裂两种边界条件下试件内部的应力分布，确定折减系数为 0.73。值得注意的是，在宏观劈裂测试中为了避免接触面的应力集中现象往往会在接触面放置垫片，而这在微观测试中相对难以实现，因此微观单边劈裂测试可能在某种程度上低估了硬化水泥净浆的劈裂强度。

无侧限轴压试验采用圆柱体平端压头(压头直径为 330 μm)在试件上表面施加面荷载。荷载施加过程及获得的典型荷载位移曲线与单边劈裂试验相似，利用 P_c 基于式(2)可计算试件抗压强度 f_c。

$$f_c = \frac{P_c}{D^2} \tag{2}$$

式中：f_c 为抗压强度，MPa；P_c 为压缩临界荷载点，mN；D 为立方体试件的边长，mm。

2　统计分析

由于硬化水泥净浆在微观尺度表现出高度的非均质性，因此有必要采用概率函数表征硬化水泥净浆的微观强度。采用基于最弱联接理论的二参数 Weibull 分布对实验数据进行拟合。该分布模型已被广泛应用于表征脆性和准脆性材料的强度特征，如混凝土[25–26]、岩石[27]和陶瓷[28]等。在二参数 Weibull 分布中，材料的失效概率表征为[25]:

$$\ln\ln\left(\frac{1}{1-P_f}\right) = m\ln\sigma_f - m\ln\eta \tag{3}$$

式中：P_f 为失效概率；σ_f 为应力；m 为形状参数；η 为比例参数，对应于样品失效概率为 63.2%时的破坏应力期望值，MPa。

采用卡方拟合优度检验对已经建立的 Weibull 模型进行拟合优度检验。其基本思想是统计样本理论频数与实际频数的偏离程度。偏离程度的大小通过式(4)计算 χ^2 表征。χ^2 越小表明试验值与理论模型接近程度越高；χ^2 越大则表明两者相差越大。χ^2=0，表示两者完全吻合。若 χ^2 不高于 $\chi^2_\alpha(n)$(自由度 n、显著水平 α 下的临界值)，则表明在当前显著水平下，可以认为理论分布模型与实际观测相吻合。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N}(O_i - E_i)^2 / E_i \tag{4}$$

式中：O_i 为区间 i 内的实测频数；E_i 为区间 i 内的理论频数；N 为区间总数。

3　结果与讨论

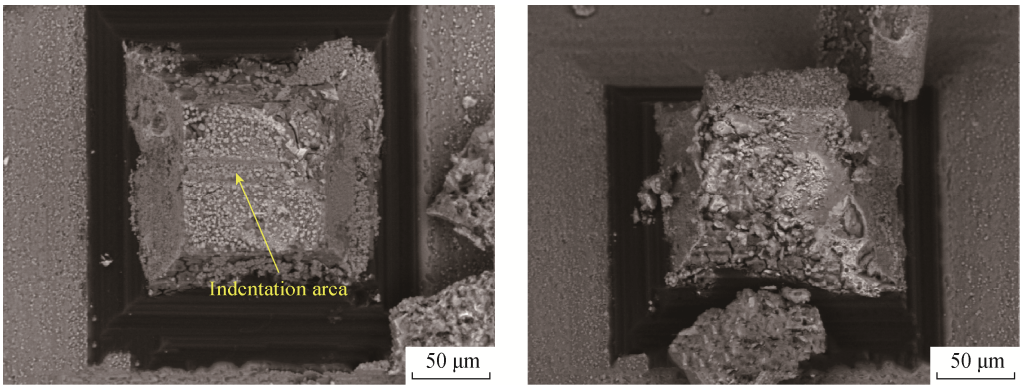
3.1　微观破坏形态

图 3 和图 4 分别为微观单边劈裂试验和无侧限轴压试验中试件的典型破坏形式。如图 3 所示，在单边劈裂试验中随着荷载的增加，试件表面与楔形压头的接触区会形成较深的压痕区，且在压痕区附近可以观测到微裂缝。随着荷载的增大和楔形压头的压入，试件被劈成两半，其破坏形式类似于细观尺度的劈裂试验。在无侧限轴压试验中(图 4)，可以观测到试件侧面产生了斜裂缝，且裂缝贯穿至受压面边缘位置。这与细观尺度无侧限抗压试验中采用低摩擦边界得到的断裂形态相似[29]。裂纹持续发展，试件发生突然破坏而被压碎。

3.2　微观强度

表 1 为各工况 100 个试件的平均强度及变异系数。由表 1 可见，试件尺寸相同时平均劈裂及抗压强度随水胶比增加而降低，这主要是由于高水胶比硬化水泥净浆的毛细孔隙率较大引起的[30]；变异系数随水胶比增加而增长，这表明高水胶比硬化水泥净浆的非均质性更强。另一方面，试验结果受试件尺寸的影响：平均强度随试件尺寸的增大而减小，这是因为大尺寸试件中包含有更多的缺陷从而导致

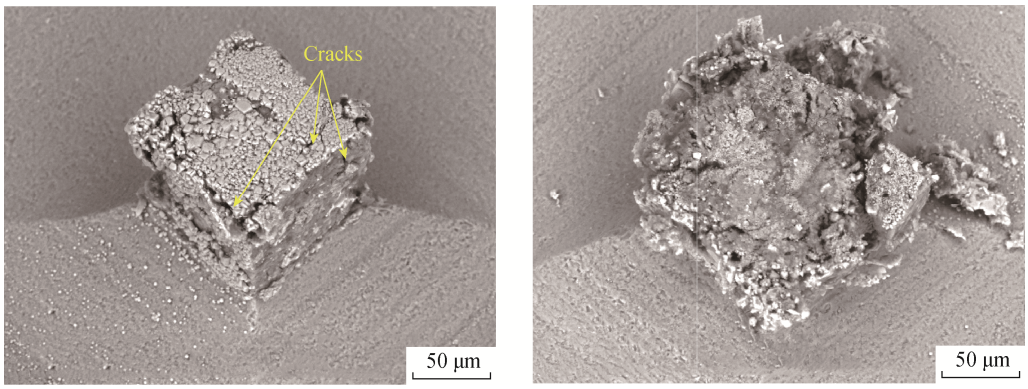
强度降低；离散性随试件尺寸的增大而减小，这表明随试件尺寸的增大其内部结构趋于稳定。值得注意的是，平均劈裂强度与抗压强度的比值在 0.144 至 0.157 之间，这与细观尺度的力学性能相近[31]。



(a) Cracked specimen at critical load (b) Specimen at failure state

图 3 单边劈裂试验微观样品的破坏形态

Fig. 3 Failure mode of the micro-cube under one-sided indentation splitting test



(a) Cracked specimen at critical load (b) Specimen at failure state

图 4 无侧限抗压试验微观样品的破坏形态

Fig. 4 Failure mode of the micro-cube under uniaxial compression test

表 1 硬化水泥净浆微观强度测试结果

Table 1 Measured strengths of the micro-cubes

Water to binder ratio	Size/μm	One-sided splitting strength/MPa	Compressive strength/MPa
0.3	100	21.42(0.183)	148.63(0.193)
0.4	100	18.81(0.211)	125.71(0.286)
0.4	200	14.73(0.190)	113.87(0.129)
0.5	100	17.23(0.250)	107.84(0.32)

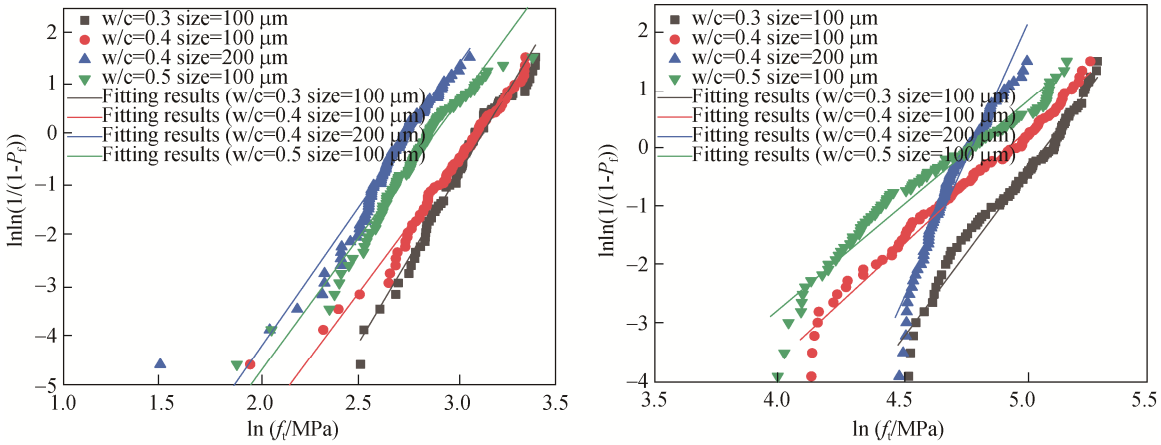
Note: coefficient of variation is indicated in parentheses.

图 5 列出了采用最小二乘法获得的劈裂强度和抗压强度的二参数 Weibull 分布拟合结果，其确定系数(R^2)均高于 0.9。在 Weibull 概率图中，m 对应于斜率，η 可通过与 x 轴的截距计算得到。表 2 和表 3 为对应的拟合参数及拟合优度测试结果。在显著性水平 α=0.05 条件下，各分布的检验统计量 χ^2 均小于临界值表中的临界值 $\chi^2(0.05)$，说明二参数 Weibull 分布对微观劈裂强度和抗压强度建模具有较好的拟合优度。由于高水胶比的硬化水泥净浆具有更强非均质性，其强度概率分布模型对应的 m 和 η 也高于低水胶比的。另外，m 值随试件的尺寸增大而提高，η 随试件的尺寸增大而减小，这是由于尺寸较大的试件强度虽然降低，但均质性有所提高。

3.3 讨论

本实验的测试结果高于通过标准测试方法获得的硬化水泥净浆或混凝土细观尺度的强度值而低于单一水化产物。该规律符合准脆性材料的尺寸效应[32–33]。文献[13]通过微观悬臂梁试验获得的内部水化产物、外部水化产物和氢氧化钙的平均抗拉强度分别为 700.2、264.1 MPa 和 655.1 MPa，比本实验测试结果高出 1 个数量级。文献[34]通过微柱轴压试验获得的水化硅酸钙的平均强度高于 800 MPa，是本实验测试结果的 5 至 8 倍。而在细观尺度，硬化水泥净浆、砂浆或混凝土的试件尺寸在厘米级

别，其劈裂强度和抗压强度分别在数兆帕和数十兆帕，远低于微观尺度的测试结果。这主要是由于水泥基材料中包含不同尺度的缺陷造成的[35]：一方面，毛细孔的存在会显著降低硬化水泥净浆的微观强度；另一方面，微观裂缝和气孔的引入则会进一步降低水泥基材料的细观力学性能。



(a) f_t　　(b) f_c

w/c is water to cement ratio.

图 5　硬化水泥净浆微观强度 Weibull 概率图

Fig. 5　Weibull plot for measured strengths

表 2　微观劈裂强度二参数 Weibull 分布拟合结果

Table 2　Weibull parameters for the measured splitting strength

Water to binder ratio	Size/μm	m	η/MPa	R^2	χ^2	n	$\chi^2(0.05)$
0.3	100	5.81	23.07	0.953	8.542	6	12.592
0.4	100	5.51	20.38	0.946	3.0472	5	11.071
0.4	200	5.79	15.85	0.909	6.0218	4	9.488
0.5	100	4.32	18.46	0.963	3.382	3	7.815

表 3　微观抗压强度二参数 Weibull 分布拟合结果

Table 3　Weibull parameters for the measured compressive strength

Water to binder ratio	Size/μm	m	η	R^2	χ^2	n	$\chi^2(0.05)$
0.3	100	5.99	160.38	0.943	8.6432	6	12.592
0.4	100	4.07	137.95	0.966	5.0517	7	14.067
0.4	200	7.88	120.48	0.965	8.8304	7	14.067
0.5	100	3.27	123.30	0.973	10.3981	6	12.592

此外，相比于细观尺度的测试结果，微观样品的强度表现出更大的离散性，而该离散性会随着试件尺寸的缩小进一步增大[13,34,36]。基于此，在微观或更小尺度，需要考虑材料结构的非均质性，构建大样本数据库，给出基于概率模型的力学性能表征。

本实验的测试结果为微观力学模型的校验提供了必要的实测数据。基于微观断裂模型理论，如格构断裂模型理论[37]、近场动力学[20]、有限元[38]和相场模型理论[39]等对通过水化模型或断层扫描建立的微观数字模型进行力学性能预测，可最终建立材料组成-微结构-微观力学性能的量化关系，并通过多尺度模拟体系为细观尺度的混凝土、砂浆力学性能预测提供输入参数。

4　结论

1) 硬化水泥净浆的微观强度表现出较大的变异性，需要通过概率模型表征试验结果。二参数 Weibull 分布对硬化水泥净浆的微观劈裂强度和抗压强度建模具有较好的拟合优度。强度概率分布模型中的 m 和 η 随水胶比的增大而提高。相比于小尺寸试件，大尺寸试件的强度概率分布模型中 m 增高而 η 降低。

2) 对于水胶比为 0.3~0.5 的硬化水泥净浆，其 100 μm 立方体试件的平均劈裂强度和抗压强度分别在 17.23~21.42 MPa 和 107.84~148.63 MPa 之间。虽然微观硬化水泥净浆试件的强度值和离散性随水胶比和试件尺寸变化，但介于更低尺度的单一水化产物和高尺度的硬化水泥净浆或混凝土之间，符合准脆性材料的尺寸效应规律。

参考文献:

[1] 王彩辉, 孙伟, 蒋金洋, 等. 水泥基复合材料在多尺度方面的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(4): 726–738.
WANG Caihui, SUN Wei, JIANG JiInyang, et al. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(4): 726–738.

[2] 姚武, 何莉, 梁慷. 应用纳米压痕技术表征水化硅酸钙凝胶[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 277–280.
YAO Wu, HE Li, LIANG Kang. J Build Mater(in Chinese), 2010, 13(3): 277–280.

[3] 赵庆新, 孙伟, 郑克仁, 等. 水泥、磨细矿渣、粉煤灰颗粒弹性模量的比较[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(7): 837–841.
ZHAO Qingxin, SUN Wei, ZHENG Keren, et al. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(7): 837–841.

[4] ACKER P. Micromechanical analysis of creep and shrinkage mechanisms[A]//Creep, Shrinkage and Durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials, Cambridge, MA.2001: 15–25.

[5] PICHLER C, LACKNER R. Identification of logarithmic-type creep of calcium-silicate-hydrates by means of nanoindentation[J]. Strai, 2009, 45(1): 17–25.

[6] 梁思明, 魏亚. 硬化水泥净浆微观结构对微观徐变及力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 181–188.
LIANG Siming, WEI Ya. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(2): 181–188.

[7] 刘仍光, 韩方晖, 阎培渝. 纳米压痕研究含矿渣硬化浆体 C–S–H 凝胶的特性[J]. 中国科学：技术科学, 2013, 43(8): 912–920.
LIU Rengguang, HAN Fanghui, YAN Peiyu. Sci China Tech Sci(in Chinese), 2013, 43(8): 912–920.

[8] 江俊达, 沈吉云, 侯东伟. 基于纳米压痕的水化硅酸钙断裂韧度测试与计算方法[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1067–1073.
JIANG Junda, SHEN Jiyun, HOU Dongwei. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1067–1073.

[9] CONSTANTINIDES G, ULM F-J. The effect of two types of CSH on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(1): 67–80.

[10] HU C, LI Z. Micromechanical investigation of Portland cement paste[J]. Constr Build Mater, 2014, 71: 44–52.

[11] 高岳毅, 张亚梅, 胡传林, 等. 用纳米压痕复合扫描电子显微镜分析水泥砂浆中单一组相的力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(11): 1559–1563.
GAO Yueyi, ZHANG Yamei, HU Chuanlin, et al. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(11): 1559–1563.

[12] CHEN J J, SORELLI L, VANDAMME M, et al. A coupled nanoindentation/SEM-EDS study on low water/cement ratio Portland cement paste: Evidence for C–S–H/Ca $(OH)_2$nanocomposites[J]. J Am Ceram Soc, 2010, 93(5): 1484–1493.

[13] NĚMEČEK J, KRáLíK V, ŠMILAUER V, et al. Tensile strength of hydrated cement paste phases assessed by micro-bending tests and nanoindentation[J]. Cem Concr Compos, 2016, 73: 164–173.

[14] CHEN S J, DUAN W H, LI Z J, et al. New approach for characterisation of mechanical properties of cement paste at micrometre scale[J]. Mater Design, 2015, 87: 992–995.

[15] ULM F-J, CONSTANTINIDES G, HEUKAMP F. Is concrete a poromechanics materials?—A multiscale investigation of poroelastic properties[J]. Mater Struct, 2004, 37(1): 43–58.

[16] PICHLER B, HELLMICH C, EBERHARDSTEINER J, et al. Effect of gel-space ratio and microstructure on strength of hydrating cementitious materials: An engineering micromechanics approach[J]. Cem Concr Res, 2013, 45: 55–68.

[17] HU C, LI Z. Property investigation of individual phases in cementitious composites containing silica fume and fly ash[J]. Cem Concr Compos, 2015, 57: 17–26.

[18] ZHANG M, JIVKOV A P. Micromechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterisation[J]. Compos Part B-Eng, 2016, 88: 64–72.

[19] LUKOVIĆ M, SCHLANGEN E, YE G. Combined experimental and numerical study of fracture behaviour of cement paste at the microlevel[J]. Cem Concr Res, 2015, 73: 123–135.

[20] HOU D, ZHANG W, WANG P, et al. Microscale peridynamic simulation of damage process of hydrated cement paste subjected to tension[J]. Constr Build Mater, 2019, 228: 117053.

[21] HAN T-S, ZHANG X, KIM J-S, et al. Area of lineal-path function for describing the pore microstructures of cement paste and their relations to the mechanical properties simulated from μ-CT microstructures[J]. Cem Concr Compos, 2018, 89: 1–17.

[22] JIANG N, ZHANG H, CHANG Z, et al. Discrete lattice fracture modelling of hydrated cement paste under uniaxial compression at micro–scale[J]. Constr Build Mater, 2020, 263: 120153

[23] LI X, BHUSHAN B. A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications[J]. Mater Charact, 2002, 48(1): 11–36.

[24] ZHANG H, ŠAVIJA B, SCHLANGEN E. Combined experimental and numerical study on micro-cube indentation splitting test of cement paste[J]. Eng Fract Mech, 2018, 199: 773–786.

[25] TUMIDAJSKI P, FIORE L, KHODABOCUS T, et al. Comparison of Weibull and normal distributions for concrete compressive strengths[J]. Can J Civil Eng, 2006, 33(10): 1287–1292.

[26] VAN VLIET M R, VAN MIER J G. Experimental investigation of size effect in concrete and sandstone under uniaxial tension[J]. Eng Fract Mech, 2000, 65(2): 165–188.

[27] WONG T-F, WONG R H, CHAU K, et al. Microcrack statistics, Weibull distribution and micromechanical modeling of compressive failure in rock[J]. Mech Mater, 2006, 38(7): 664–681.

[28] QUINN J B, QUINN G D. A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials[J]. Dent Mater, 2010, 26(2): 135–147.

[29] VAN MIER J G. Fracture processes of concrete[M]. CRC press, 1997.

[30] COOK R A, HOVER K C. Mercury porosimetry of hardened cement pastes[J]. Cem Concr Res, 1999, 29(6): 933–943.

[31] NEVILLE A M. Properties of Concrete[M]. Pearson Education India, 1963.

[32] BAŽANT Z P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal[J]. J Eng Mech, 1984, 110(4): 518–535.

[33] CARPINTERI A, CHIAIA B, FERRO G. Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder[J]. Mater Struct, 1995, 28(6): 311.

[34] SHAHRIN R, BOBKO C P. Micropillar compression investigation of size effect on microscale strength and failure mechanism of Calcium-Silicate-Hydrates (C–S–H) in cement paste[J]. Cem Concr Res, 2019, 125: 105863.

[35] ZHANG H, XU Y, GAN Y, et al. Experimentally validated meso-scale fracture modelling of mortar using output from micromechanical models[J]. Cem Concr Compos, 2020, 110: 103567.

[36] ZHANG H, ŠAVIJA B, XU Y, et al. Size effect on splitting strength of hardened cement paste: Experimental and numerical study[J]. Cem Concr Compos, 2018, 94: 264–276.

[37] ZHANG H, ŠAVIJA B, FIGUEIREDO S C, et al. Experimentally validated multi-scale modelling scheme of deformation and fracture of cement paste[J]. Cem Concr Res, 2017, 102: 175–186.

[38] BERNARD F, KAMALI-BERNARD S, PRINCE W. 3D multi-scale modelling of mechanical behaviour of sound and leached mortar[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(4): 449–458.

[39] HAN T-S, ZHANG X, KIM J-S, et al. Area of lineal-path function for describing the pore microstructures of cement paste and their relations to the mechanical properties simulated from μ-CT microstructures[J]. Cem Concr Compos, 2018, 89: 1–17.