

•土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202300902



本刊网刊

风积沙粉体对风积沙混凝土微观力学性能的影响及提升机理分析

李越¹,王海龙^{1*},维利思¹,郭皓隆¹,马扩²,云振军¹

(1.内蒙古农业大学水利建筑工程学院,内蒙古自治区呼和浩特市,010010;2.内蒙古自治区水利水电勘测设计院,内蒙古自治区呼和浩特市,010020)

摘要:针对风积沙在大掺量替代河砂的情况下会导致混凝土力学性能下降的问题,本文采取“以废治废”的思路,将风积沙磨细制备风积沙粉,并以10%、20%、30%的比例替代风积沙混凝土中的水泥,通过纳米压痕试验与压汞试验(MIP)探究风积沙粉对风积沙混凝土微观力学性能的影响及提升机理。结果表明:在掺入风积沙粉后,风积沙混凝土的微观力学性能得到较大提升;20%的风积沙粉掺量相比其他掺量,对风积沙混凝土界面过渡区(ITZ)的压痕模量与硬度提升最为明显,使二者平均值分别提升了19.9%与25.9%;且从水化物相的压痕模量、硬度及体积分数来看,20%的风积沙粉掺量使风积沙混凝土ITZ的水化物相的模量及硬度均得到较大提升,低密度水化硅酸钙凝胶(LDC-S-H)及孔隙含量减少,高密度水化硅酸钙凝胶(HDC-S-H)与氢氧化钙含量上升,进而促使风积沙混凝土内部>100 nm的孔隙体积分数减少,<100 nm的孔隙体积分数增多,优化了低碳混凝土的孔隙结构,使界面过渡区产生缩进现象,厚度减小10 μm,提升了微观力学性能。该研究为固废材料在混凝土中大掺量的使用提供了新思路、新见解。

关键词:风积沙;风积沙粉;微观力学性能;界面过渡区

中图分类号:TU502

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)05-0225-12

风积沙又称沙漠沙,是被风吹沉淀的沙层^[1]。近些年随着西部大开发工程进行,大部分工程不可避免会建在沙漠中,因此就地取材用风积沙(AS)取代部分河砂制备混凝土可极大降低成本并减少挖掘河砂造成的环境污染^[2]。目前对风积沙的研究,多数局限于替代河砂制备混凝土,如李玉根^[3]、刘倩^[4]等研究表明,掺入AS超过30%时混凝土的强度会大幅下降;Seif^[5]研究表明,AS掺量与抗压强度呈负相关性,AS混凝土不能满足混凝土在工程中的使用要求。而对于使用风积沙粉的胶凝性质去提升风积沙混凝土力学性能的研究尚有不足。

随着《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915—2013)等一系列更严厉的环保标准的公布,高污染高能耗的水泥行业使人们不得不开始考虑寻找其他的新型绿色环保的替代材料。目前废料在混凝土领域广泛被研究,且“以废治废”更受学者推崇,因此利用内蒙古地区丰富的风积沙资源、“以废治废”的理念,及其胶凝性质

提升风积沙混凝土的力学性能有显著经济效益^[6]。李根峰等^[7]研究表明,风积沙粉在15%~20%掺量下对混凝土的力学性能起到较大的改善作用,其含有大量的活性SiO₂及Al₂O₃可与水泥水化生成的Ca(OH)₂反应生成高密度水化产物填充孔隙进而提升混凝土的力学性能。对于混凝土自身而言^[8-11],其结构性能很大程度上取决于骨料的质量^[8]、胶凝基体的性质^[9]及二者间的界面过渡区(ITZ)^[10],其中,ITZ其胶凝含量较低且孔隙率远大于基体,被认为是影响混凝土力学性能的关键所在。

有研究表明^[12],ITZ的微观力学性能可直接反映混凝土的宏观力学性能优劣^[13],且影响ITZ性能的因素^[14],主要在于毛细孔隙^[15]的含量及水化物相(包含毛细孔)的强度^[16]与体积分数^[17]。由于风积沙等质量替代河砂量超过40%时,风积沙混凝土的力学性能会随风积沙掺量的增加呈逐步下降趋势,为解决这一难题,可立足“就地取材”原则,对风积沙进行磨细处理制备风积沙粉(ASP),并引入“以废治废”理念,通过该

收稿日期:2023-11-11 修回日期:2024-07-11 网络出版日期:2024-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52069024;51669026)

作者简介:李越(1996—),男,硕士.研究方向:低碳混凝土力学性能. E-mail:ndliyue@163.com

*通信作者:王海龙,教授, E-mail:mndwhl@imau.edu.cn

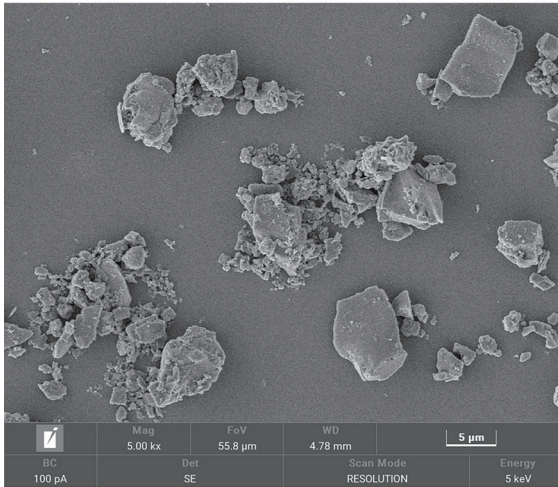
类固废资源化利用方式,实现风积沙混凝土力学性能的提升,既降低原材料成本,又为固废高效利用提供新路径。因此本文选择以风积沙替代河砂 100% 制备风积沙混凝土,同时将风积沙磨细制备 ASP, AS 按 10%、20%、30% 的比例替代风积沙混凝土中的水泥,通过纳米压痕试验探究风积沙粉对风积沙混凝土微观力学性能的影响,随后利用压汞试验(MIP)及拟合手段对界面过渡区的孔隙结构与水化物相两方面,揭示了 ASP 对风积沙混凝土微观力学性能的影响机制。

1 试验材料和方法

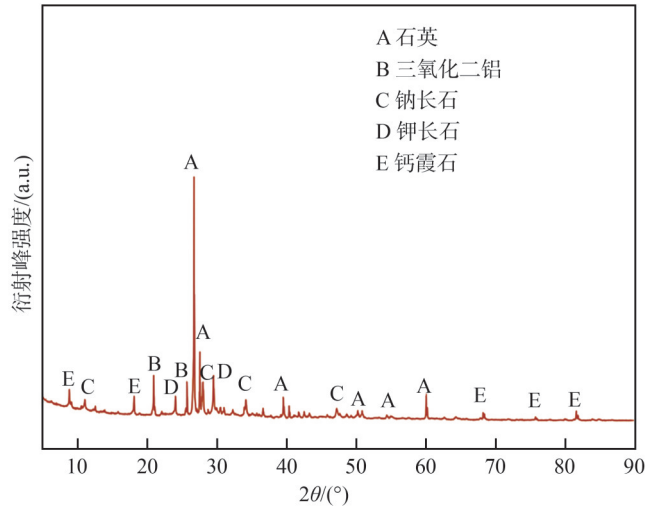
1.1 试验材料

- 1) 水泥:冀东水泥 P·O42.5, 细度 1.4%, 初凝时间 180 min, 终凝时间 385 min, 体积稳定性合格。
- 2) ASP:采用 WEM-10 型超微粉碎振动将风积沙

磨细制备风积沙粉体外观呈现灰色粉末状,且风积沙经过粉碎机按全功率 0.75 kW·h 进行研磨,制备 1.0 kg 耗电量为 0.188 kW·h,远低于制备 1.0 kg 硅灰产生的耗电量(0.5~0.8 kW·h)及耗煤量(0.5~1.0 kg)所带来的能耗。图 1 和 2 分别给出风积沙粉的微观形貌、粒径分布、物相组成及物相的定量分析。利用 Hitachi Regulus8100 型 SEM-EDS 分析仪分析 ASP 微观形貌,并从图 1 可以看出,ASP 以絮状物及不规则块状颗粒组成,且利用德国 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪得出风积沙粉中主要以石英、Al₂O₃ 等衍射峰为主;由图 2 可知,ASP 中石英含量为 48.16%, Al₂O₃ 等含量为 51.84%, ASP 的中位粒径为 13.32 μm, 表观密度为 590.41 m²/kg。利用 RIGKU ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪分析 ASP,并得出风积沙粉的化学组成见表 1。



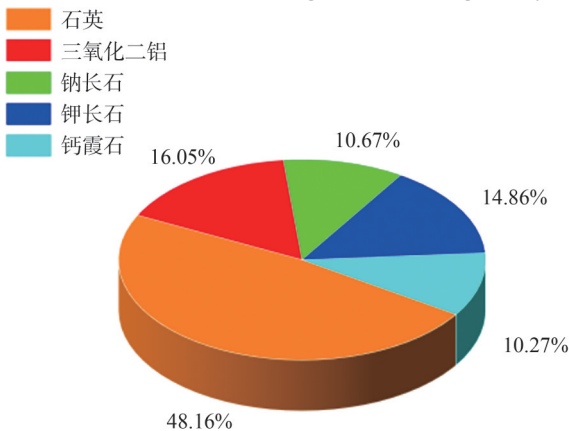
(a) 风积沙粉SEM分析图



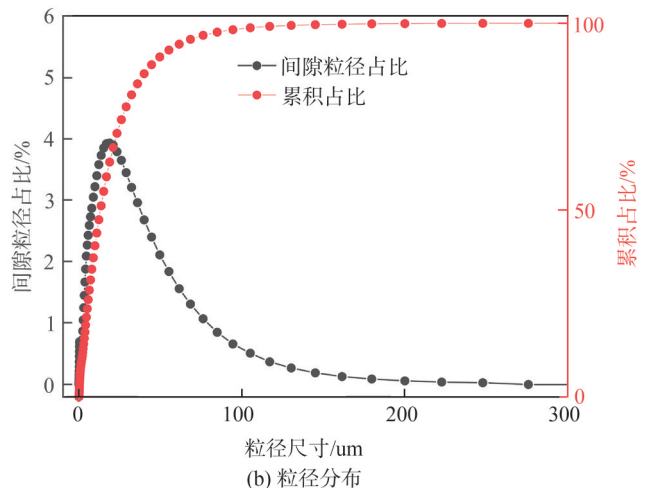
(b) 风积沙粉XRD图谱

图 1 风积沙粉的 SEM 图像及 XRD 图谱

Fig. 1 SEM image analysis and XRD pattern of Aeolian sand powder



(a) 物相组成定量分析



(b) 粒径分布

图 2 风积沙粉的物相定量分析与粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution and quantitative phase analysis of Aeolian sand powder

表1 ASP的主要化学成分

Tab.1 Main chemical components of ASP

化学组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	C	MgO	其他
质量分数	43.5	16.1	4.0	3.1	1.9	2.0	1.8	1.2	26.4

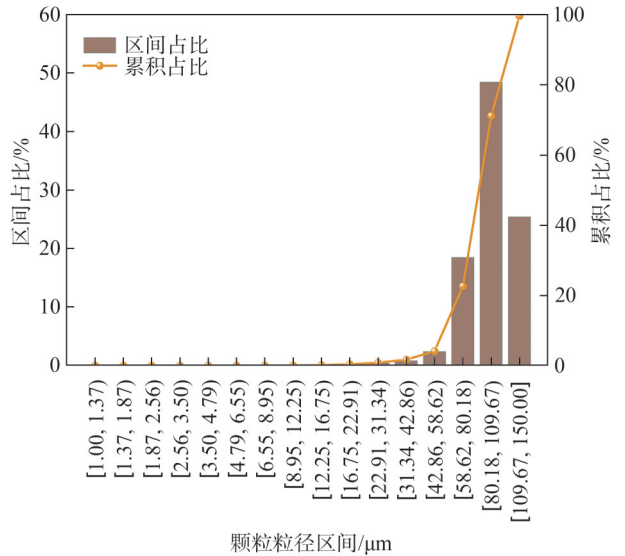
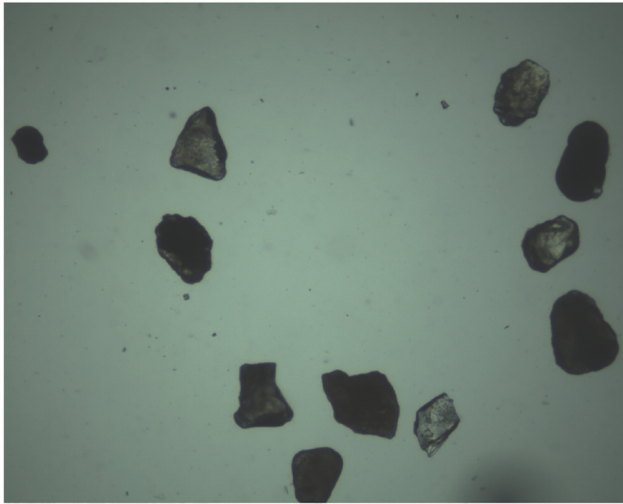
3)细集料:普通河砂(RS)与取自于乌兰布和的AS。表2给出风积沙与河砂的物理性质,由此可知,风积沙的细度模数为0.6远低于河砂,这说明风积沙颗粒粒径远小于河砂,单位重量的砂子表面积越大,需水

量越大,在胶凝材料用量相同的情况下,会降低混凝土强度;同时由图3颗粒分析可知,AS的中位粒径为105.67 μm,平均圆形度为0.80,平均长径比为1.44,并呈现较为规则表观形貌。

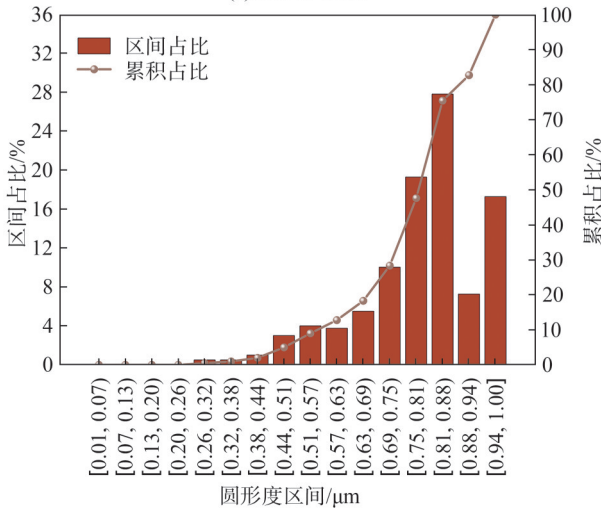
表2 风积沙与河砂的物理性质

Tab.2 Physical properties of aeolian sand and river sand

原料类型	表观密度/(kg·m ⁻³)	紧密密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	孔隙率/%	含水率/%	含泥量/%	细度模数
AS	1 370	1 580	2 610	48	—	1.4	0.60
RS	1 730	1 740	2 620	34	2.6	1.2	3.01

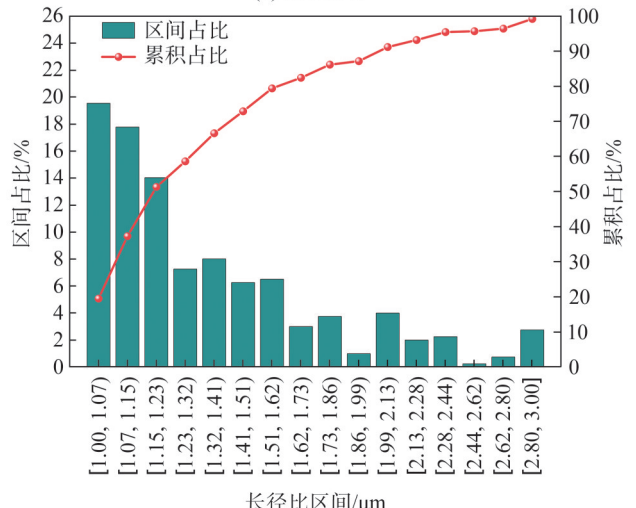


(a) 风积沙形貌



(c) 圆形度分布

(b) 粒径分布



(d) 长径比分布

图3 风积沙的相关颗粒分析

Fig.3 Particle analysis of aeolian sand

4)粗骨料:5~25 mm碎石,连续级配,堆积密度1 550 kg/m³,表观密度2 680 kg/m³。

5)水:普通自来水。

6)外加剂:江苏赵佳建材科技有限公司生产的聚羧酸减水剂,外观为白色粉末,减水率20%,含水量2.3%。

1.2 配合比设计

根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080—2016)配制C40普通混凝土(OC)。先将风积沙100%替代河砂制备风积沙混凝土(ASC),再将ASP按10%、20%、30%的比例等质量替代ASC中的水泥,ASC组别命名为ASC-A,其中,A代表掺入风积沙粉的量,见表3。

表3 风积沙混凝土配合比
Tab. 3 ASC mixture ratio

组别	水泥	风积沙粉	河沙	风积沙	粗骨料	水	外加剂
OC	489.80	0	761.9	0	1 777.7	210.6	3.3
ASC	489.80	0	0	761.9	1 777.7	210.6	3.3
ASC-10	440.82	48.98	0	761.9	1 777.7	210.6	3.3
ASC-20	391.84	97.96	0	761.9	1 777.7	210.6	3.3
ASC-30	342.86	146.94	0	761.9	1 777.7	210.6	3.3

1.3 样品制备

将风积沙粉、水泥、河砂、风积沙、粗骨料、水及外加剂按表 3 依次倒入搅拌锅中,制备尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,24 h 后脱模,并放入养护箱中分别进行 3、7、14 及 28 d 龄期的标准养护,养护时,根据《普通混凝土混合料力学试验方法标准》(GB/T 50081-2002)分别进行无侧限抗压强度试验和劈裂抗拉试验。

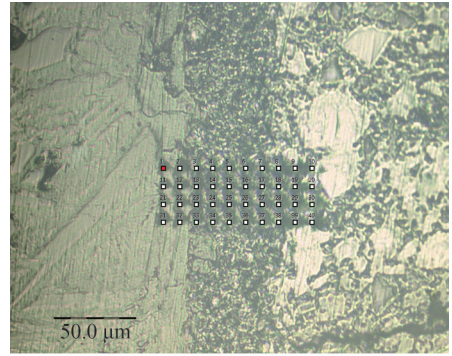
在养护 28 d 时,将混凝土试块放置在切割机上切割成尺寸为 60 mm×60 mm 且厚度小于 9 mm 带有骨料的试件,并对样品进行抛光处理,采用 400、800、1 200、2 000 目的金相碳化硅砂纸依次打磨,然后用颗粒粒径分别为 3.00、1.00、0.50、0.25 μm 的酒精基金刚石悬浮液依次抛光,用激光显微镜测得试样表面粗糙度约为 100 nm。试样制备完成后,对样品进行纳米压痕、压汞试验分析风积沙粉对风积沙混凝土界面过渡区微观性能的影响。

1.4 微观性能测试

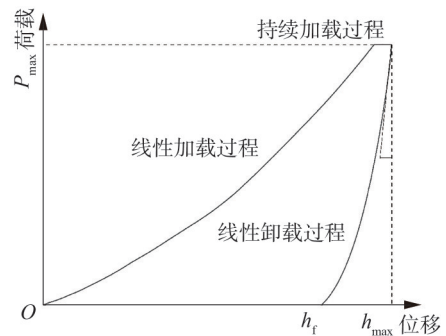
1.4.1 纳米压痕试验方法

纳米压痕试验采用的仪器是奥地利 Hysitron TI 950 UNHT,最大荷载为 1 000 mN,荷载分别率为 6 nN,压头的总行程和最大压入深度分别为 1.5 mm 和 320 μm,位移的量程和精度分别为 80 μm 和 0.04 μm,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。

首先利用光学显微镜对各组混凝土选取合适界面过渡区。以骨料距界面过渡区边缘 20 μm 为基点,以间隔 10 μm 的距离分别向水平、垂直两个方向进行矩阵纳米压痕测试,得到 10×4 的网格压痕矩阵,总矩阵面积为 90 μm×30 μm,在每个混凝土试件表面选取 3 个压痕矩阵进行界面过渡区的纳米压痕试验,如图 4(a)所示。随后采用荷载控制模式,压头以 0.2 mN·s⁻¹ 的速率线性加载到 2 mN,持载 10 s 后以 0.2 mN·s⁻¹ 的速率线性卸载,记录该过程中的荷载值及压入测试材料中的位移,得到荷载位移曲线(P-h),如图 4(b)所示,图 4 中, h_f、h_{max} 分别表示卸载压痕位移与最大压痕位移, P_{max} 表示最大加载荷载。



(a) 压痕矩阵



(b) 荷载位移曲线

图 4 低碳混凝土试样压痕矩阵与荷载位移曲线

Fig. 4 Indentation matrix and load displacement curve of low carbon concrete samples

1.4.2 MIP 试验方法

对每组的一个纳米压痕试样进行 MIP 试验。采用仪器 Quantachrome Poremaster GT-60 Instrument 进行孔隙结构分析,为准确了解水泥的耐久性,使用水泥的超声脉冲速度(UPV)这种非破坏性的测试方法。压力范围为 0.02~33 000 Pa,获得混凝土的孔隙度和孔径分布。

2 结果与分析

2.1 力学性能分析

图 5 为不同风积沙混凝土的力学性能。从图 5 中可以看出,ASC 抗压强度和劈裂抗拉强度均低于 OC,而随着风积沙粉的加入,风积沙混凝土的力学性能有不同程度的提升。其中,ASC-20 组混凝土的力学性能逼近 OC 组混凝土,其抗压强度在 3、7、14 及 28 d 相比于 ASC 提升了 21.6%、20.3%、16.4% 和 15.1%;劈裂抗拉强度增长了 19.1%、18.4%、16.2% 和 15.6%。

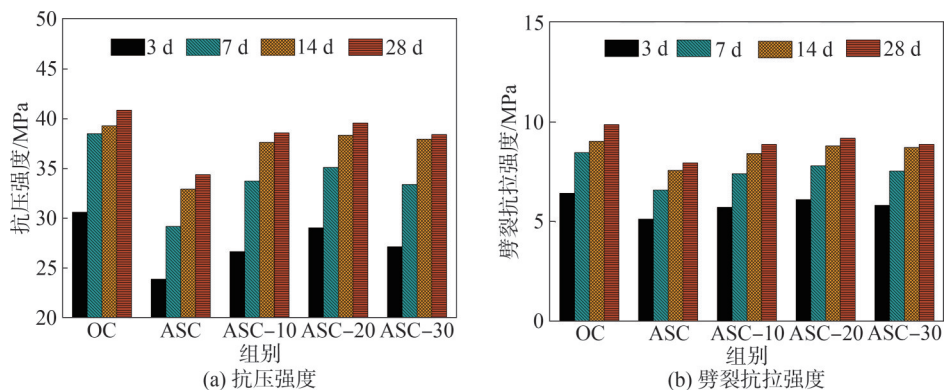


图 5 不同风积沙混凝土的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of different aeolian sand concretes

风积沙粉使风积沙混凝土力学性能提升的主要原因可能是风积沙粉在混凝土中起到了与高火山灰活性矿物材料类似的作用,即风积沙粉使风积沙混凝土中砂浆与 ITZ 的微观力学性能得到改善,最终提升了宏观力学性能^[18]。因此,为了探究风积沙粉对风积沙混凝土力学性能的提升机理,对 ASC、ASC-10、ASC-20 及 ASC-30 进行 ITZ 相关性能的分析。

2.2 压痕模量及硬度分析

由于 ITZ 的微观力学性能是影响宏观力学性能的关键所在,其直接影响了宏观力学性能的优劣^[19]。

纳米压痕试验是测试骨料与浆体力学性能的有效方法,它的测试结果能有效反映混凝土材料的微观结构性能,并通过计算得出骨料、界面过渡区及砂浆基体的压痕模量^[20]、压痕硬度^[21],进而直观比较各

组混凝土界面过渡区的微观力学性能。图 6 为在各组风积沙混凝土选取的 3 个压痕区域界面过渡区的压痕模量及压痕硬度平均值分布^[22]。从图 6 可以看出,各组 ASC 的 ITZ 压痕模量与压痕硬度分布规律基本一致,骨料的压痕模量与硬度处于最高位置,砂浆次之,界面过渡区位置最低,不难看出混凝土的 ITZ 是其力学性能最薄弱的。由图 6 可知,随着风积沙粉的掺入,风积沙混凝土的压痕模量与硬度均有较为明显的提升。这可能是由于风积沙粉的掺入,促使 ASC 中水化物相含量升高并使低密度水化物相转化为高密度的水化物相,而高密度水化物相的硬度及模量远高于低密度水化物相^[23],且较高含量的水化物相会填充 ITZ 的孔隙,优化微观孔隙结构,进而提升 ITZ 的微观力学性能。

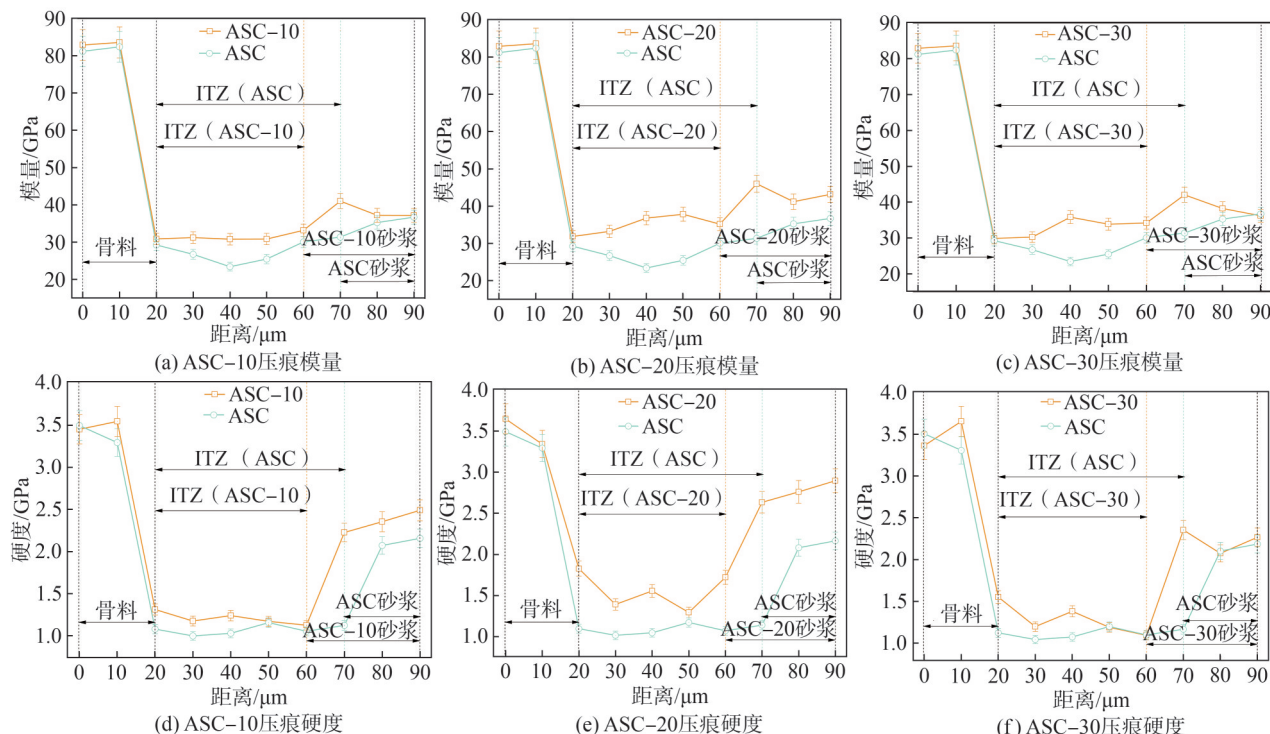


图 6 不同风积沙混凝土的压痕模量及压痕硬度曲线

Fig. 6 Indentation modulus and indentation hardness of different aeolian sand concrete

表4为不同基体压痕硬度与模量统计结果的平均值。由表4可知:1)掺入10%、20%、30%的风积沙粉对ASC的ITZ及砂浆部分的硬度和模量有明显的提升;2)当掺入比例为20%时提升幅度最显著,且最接近OC。相比ASC,ASC-20在ITZ处的模量与硬度分别提升了19.9%与25.9%,且通过图7弹性模量云图可以更

直观地看出,随着风积沙粉的掺入,ASC界面过渡区中强度较低的水化物相覆盖面积先减少后增大,并产生缩进现象使其厚度由大于80 μm 缩减到80 μm 以内,大约减少了10 μm ;但ASC-20与ASC-10、ASC-30相比,砂浆基体与ITZ中的强度较低的水化物相覆盖面积更小。

表4 不同基体纳米压痕模量与硬度统计结果的平均值

Tab. 4 Average values of nanoindentation modulus and hardness statistical results

组别	骨料		ITZ		砂浆		GPa
	模量	硬度	模量	硬度	模量	硬度	
OC	82.350 9	2.566 1	35.256 1	1.579 8	43.245 1	2.871 2	
ASC	83.446 3	2.418 9	24.210 9	0.892 3	35.231 2	1.504 5	
ASC-10	80.368 1	2.657 7	30.445 7	1.013 2	40.253 6	1.802 4	
ASC-20	82.244 5	3.488 1	34.966 4	1.549 6	43.050 3	2.356 2	
ASC-30	81.674 3	2.923 1	30.056 1	0.992 6	39.870 3	1.790 1	

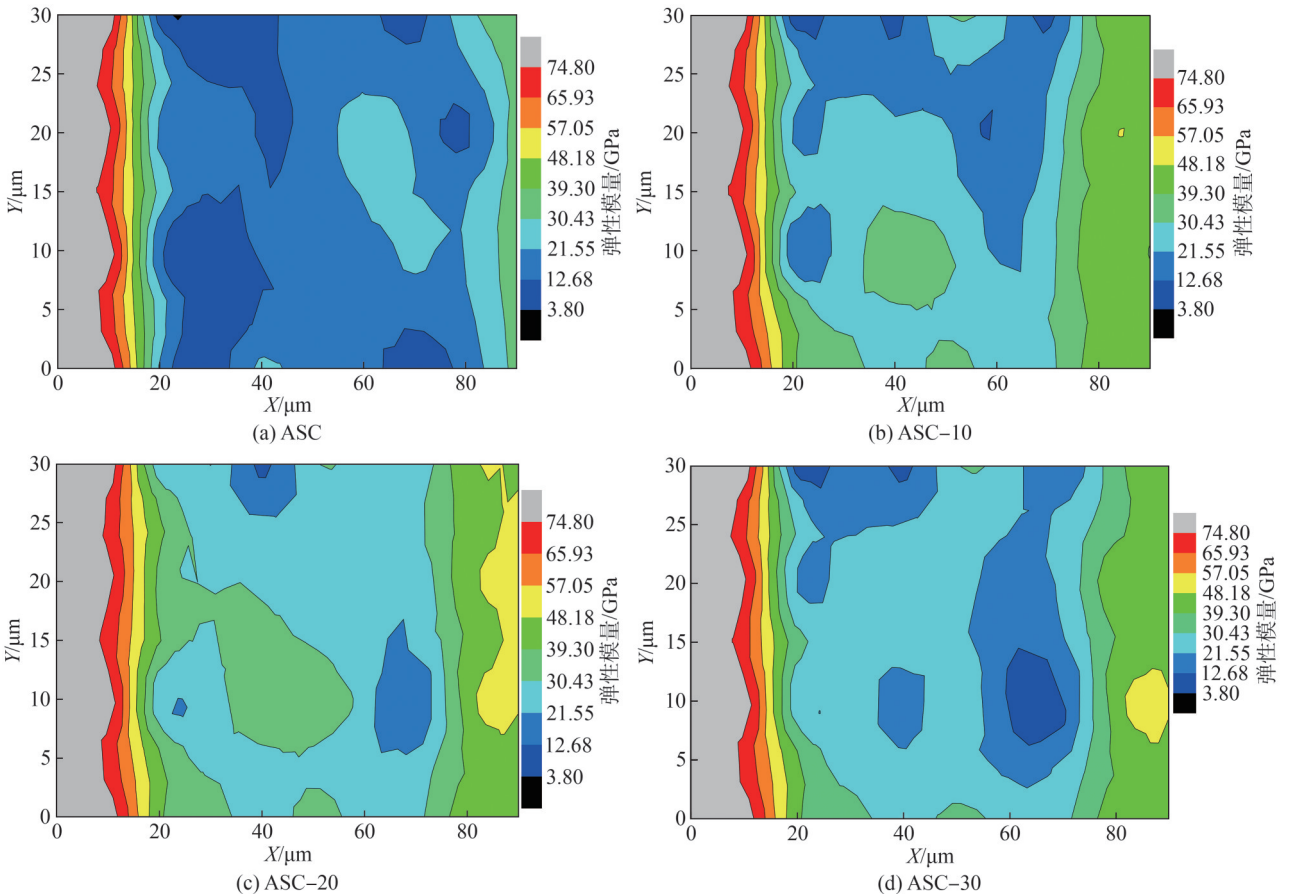


图7 ASC、ASC-10、ASC-20与ASC-30的弹性模量云图

Fig. 7 Analysis of elastic modulus contours for ASC, ASC-10, ASC-20 and ASC-30

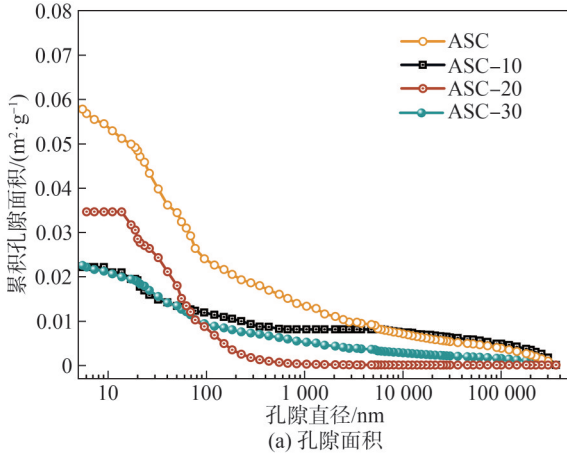
2.3 MIP分析

由第2.2节纳米压痕试验微观力学性能分析可知,风积沙粉的掺入使风积沙混凝土微观力学性能得到了显著提升,因此利用MIP试验对ASC、ASC-10、ASC-20及ASC-30进行孔隙结构层面的分析。

各组ASC的孔隙度如表5所示。随着风积沙粉

的掺入风积沙混凝土的总体孔隙度呈现先下降后升高的趋势,且均低于ASC。从图8可以看出:ASC-10、ASC-20与ASC-30整体的累积孔隙面积与体积分数均低于ASC;ASC-20在小于100 nm范围内孔隙(本文称其为无害孔)累积孔隙面积与体积分数高于ASC-10与ASC-30;大于100 nm范围内的孔隙(本文

称其为有害孔)累积孔隙面积与体积分数低于ASC-10与ASC-30。有研究^[24-25]表明,大于100 nm的孔隙对于混凝土的微观力学性能会产生较大的不利影响,而小于100 nm的孔隙对于混凝土微观力学性能几乎无害。由此可知,风积沙粉的掺入使风积沙混凝土界面过渡区的整体孔隙含量减少;此外ASC-20的有害孔累积孔隙面积与体积分数低于ASC-10及



ASC-30,这也说明风积沙粉掺量为20%时更好地改善了风积沙混凝土疏松的ITZ,使其产生缩进现象,进而缩短ITZ厚度并提升其微观力学性能。

表5 ASC、ASC-10、ASC-20与ASC-30的孔隙度
Tab. 5 Porosity of ASC, ASC-10, ASC-20 and ASC-30

组别	ASC	ASC-10	ASC-20	ASC-30
孔隙度/%	4.21	3.75	3.08	3.68

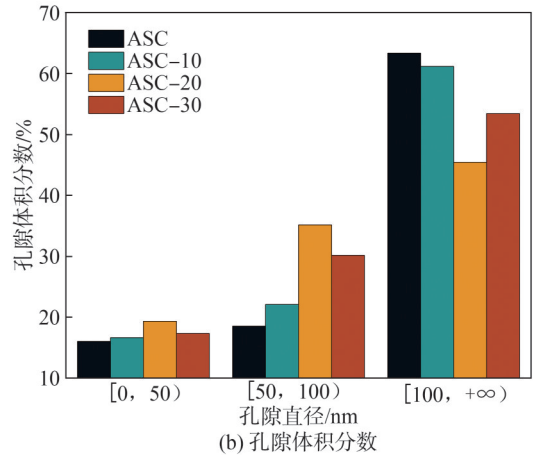


图8 ASC、ASC-10、ASC-20与ASC-30的累计孔隙面积与体积分数

Fig. 8 Accumulated pore area and volume fraction of ASC, ASC-10, ASC-20 and ASC-30

2.4 基于纳米压痕的水化物相分析

由第2.3节MIP试验得出,风积沙粉使风积沙混凝土微观孔隙结构得到优化,进而提升微观力学性能,以往的研究将这种现象归结于混凝土内部水化程度与水化产物结构的不同^[26]。因此,为了得到ASC、ASC-10、ASC-20及ASC-30微观水化物相的差异,对ASC、ASC-10、ASC-20及ASC-30的纳米压痕统计数据进行Gaussian^[27]拟合,进而分析各组风积沙混凝土微观水化物相的变化。相关研究表明^[28-29],水泥基材料中各相的弹性模量与硬度值并不一样,其中毛细孔隙相(Pore)、低密度水化硅酸钙凝胶(LDC-S-H)、高密度水化硅酸钙凝胶(HDC-S-H)和Ca(OH)₂(CH)的弹性模量范围大致为0~13、13~26、26~40、40~55 GPa,在本文中只考虑以上4种物相,忽略弹性模量大于70 GPa的未水化物相,4种水化物相的压痕位移与加载荷载(P-h)曲线如图9所示。

通过Gaussian拟合得出各组风积沙混凝土砂浆压痕模量和压痕硬度,如图10~11所示。从图10可以看出,ASC、ASC-10、ASC-20及ASC-30试样压痕模量和硬度的概率分布呈现出相似的特征,而且都包含4个明显不同的峰,分别代表孔隙、LDC-S-H凝胶、HDC-S-H凝胶和CH。根据Delesse^[31]可知,对于混凝土材料,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比表面积分数用来代替体积分数。

由图11可以看出,随着风积沙粉掺量的变化,不同

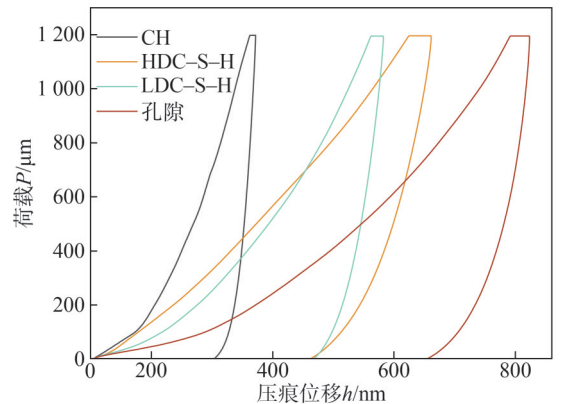


图9 不同物相的典型P-h曲线^[30]

Fig. 9 Typical P-h curves of different phases

水化物相的峰值弹性模量和峰值硬度呈现出一定规律。在峰值弹性模量方面,孔隙相的弹性模量相对较低,而CH相的弹性模量最高;LDC-S-H凝胶和HDC-S-H凝胶的弹性模量处于中间范围。对于峰值硬度,同样孔隙相硬度最低,CH相硬度最高,LDC-S-H凝胶和HDC-S-H凝胶的硬度也介于两者之间。并且,对比不同掺量试样(ASC、ASC-10、ASC-20、ASC-30),能明显发现掺入风积沙粉后,各水化物相的峰值弹性模量和峰值硬度整体有提升趋势,尤其是ASC-20试样,各相的提升幅度更为显著,这与前面关于压痕模量和硬度提升的结论相呼应,进一步表明风积沙粉的掺入对改善风积沙混凝土内部水化物相的性能起到了积极作用,有助于优化混凝土的微观结构。

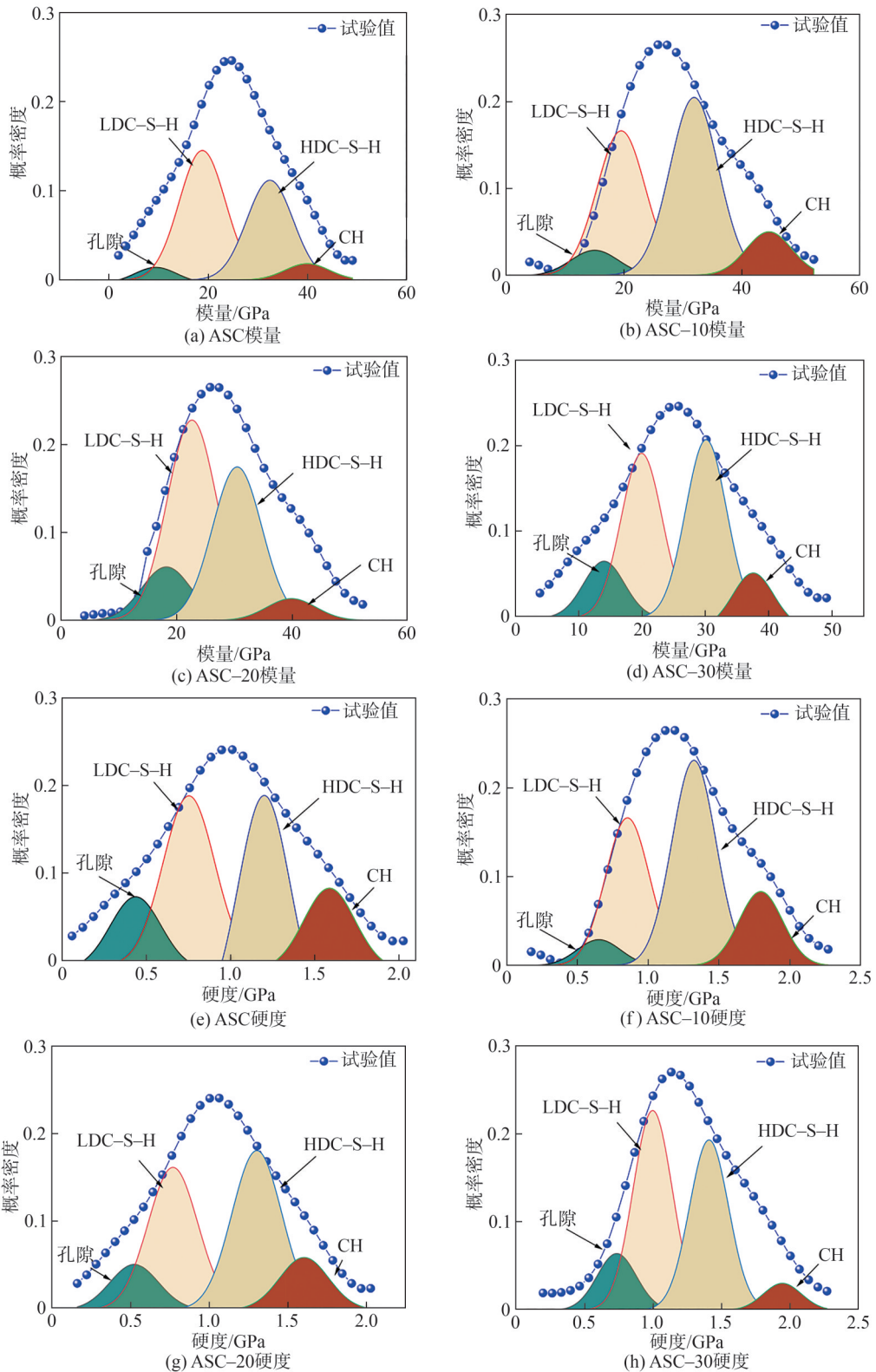


图 10 各组风积沙混凝土中各水化物相的概率分布函数

Fig. 10 Probability distribution functions of hydration products in each group of aeolian sand concrete

各水化物相的平均值、标准差和体积分数的拟合结果见表6。从表6可看出,掺入风积沙粉后的风积沙混凝土试样中各相的压痕模量与硬度相比于ASC均提升约2.0 GPa及0.3 GPa,对于各个水化物相的峰值而言,风

积沙掺量为20%时,ASC-20相比ASC水化物相的模量与硬度提升最为明显,其中孔隙相的压痕模量提升30.23%,硬度提升43.55%;LDC-S-H的压痕模量提升20.13%,硬度提升19.68%;HDC-S-H的压痕模量提升

18%,硬度提升 17.79%。由此可知,掺入风积沙粉后风积沙混凝土内部产生更多的高密度有益凝胶进而对混凝土

土内部的孔隙及缺陷进行了有效填补,进而使内部结构更加密实,微观结构性能发展更为优越。

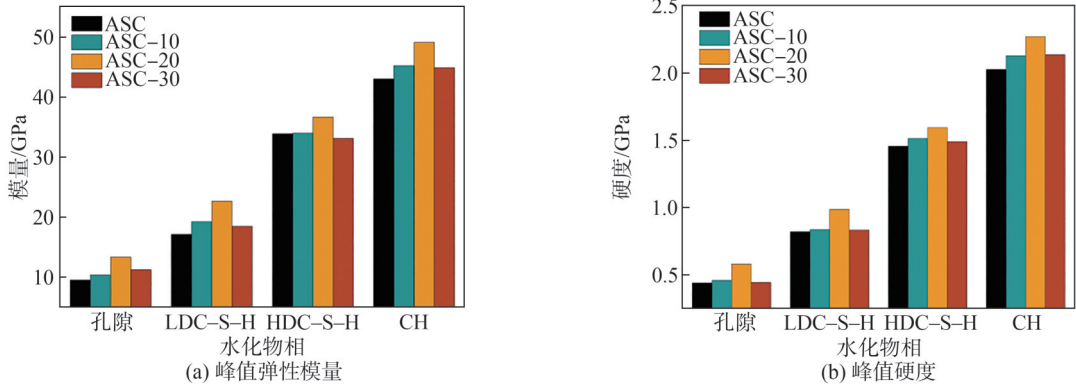


图 11 ASC、ASC-10、ASC-20 与 ASC-30 中各水化物相的峰值弹性模量和峰值硬度

Fig. 11 Probability distribution functions of hydration products in ASC, ASC-10, ASC-20 and ASC-30 phases

表 6 不同水化物相的压痕模量、硬度及体积分数

Tab. 6 Indentation modulus, hardness, and volume fraction of different hydration products

组别	水化产物	模量		硬度		体积分数/%
		偏离值 /GPa	相对误差/%	偏离值 /GPa	相对误差/%	
ASC	孔隙	7±1.90	1.41	0.21±0.17	1.14	3.75
	LDC-S-H	16±2.50	1.70	0.64±0.20	2.16	30.43
	HDC-S-H	33±3.13	0.56	1.20±0.13	1.08	22.10
	CH	39±1.11	2.31	1.59±0.31	0.48	3.24
ASC-10	孔隙	8±1.35	1.22	0.31±0.13	1.08	3.341
	LDC-S-H	17±1.43	1.36	0.73±0.18	2.31	29.65
	HDC-S-H	34±2.17	0.57	1.26±0.22	1.26	30.12
	CH	41±1.22	2.27	1.77±0.46	0.57	3.33
ASC-20	孔隙	10±2.35	2.10	0.37±0.20	2.33	2.51
	LDC-S-H	19±3.13	0.38	0.78±0.17	0.75	26.43
	HDC-S-H	35±2.84	2.06	1.39±0.25	1.39	32.43
	CH	43±1.12	1.31	1.86±0.21	2.55	3.50
ASC-30	孔隙	9±1.22	1.98	0.33±0.25	1.48	3.477
	LDC-S-H	17±2.41	0.57	0.76±0.18	1.25	29.15
	HDC-S-H	34±1.09	1.29	1.29±0.33	1.59	28.23
	CH	42±1.23	2.66	1.76±0.36	2.33	3.41

图 12 为风积沙混凝土中各水化物相的体积分数。由图 12 可看出,ASC-20 相比 ASC 中的水化物相变化最为明显。其中,毛细孔隙相的体积分数减少了 27.55%,与 MIP 试验得到的结果一致;LDC-S-H 凝胶的体积分数减少了 22.76%,而 HDC-S-H 与 CH 的体积分数增加了 13.91%、23.46%。由此可见,ASC-20 内部产生了较多有利于提升力学性能的高密度有益凝胶与 CH。结合以往的研究^[32-34]可知,HDC-S-H 凝胶与 CH 一般分布在空间较为狭小的区域,而 LDC-S-H 分布在相对较为宽

阔的空间,因此,激发后的低碳混凝土中 HDC-S-H 与 CH 大体积存在也表明,毛细孔隙得到了相应填充,使低碳混凝土疏松的界面过渡区变得紧密狭小。

综上所述,风积沙粉使风积沙混凝土微观力学性能提升的主要原因在于,其使风积沙混凝土界面过渡区中各水化物相的压痕硬度与模量强度更高的同时使有益凝胶物相(HDC-S-H 与 CH)含量增多,进而导致风积沙混凝土内部孔隙结构得到优化使得界面过渡区发生缩进现象,促使风积沙混凝土微观力学性能提升。

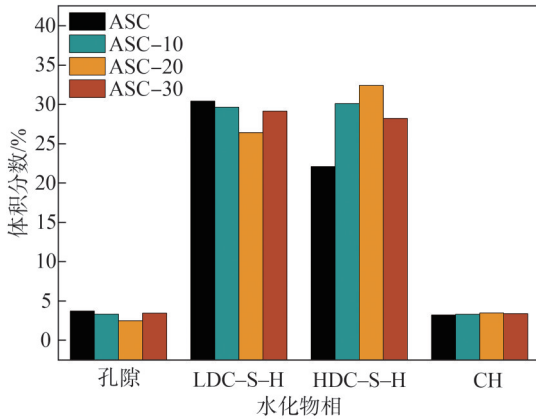


图 12 风积沙混凝土中各水化物相的体积分数

Fig. 12 Volume fractions of hydration products in each group of aeolian sand concrete

3 结论

本文主要研究风积沙粉对风积沙混凝土界面过渡区微观力学性能的影响。因此对各组风积沙混凝土界面过渡区的微观力学性能、孔隙结构、水化物相等进行分析,得出如下结论:

1) 在风积沙混凝土的微观力学性能分析可以看出:掺入风积沙粉后,其压痕模量与压痕硬度均有较大的提升;且风积沙粉掺量为 20% 时的风积沙混凝土界面过渡区处压痕模量与硬度的平均值分别提升了 19.9% 与 25.9%;界面过渡区产生了明显的缩进现象,其厚度降低了 10 μm 。

2) 在孔隙结构层面,通过 MIP 试验分析得出:掺入风积沙粉后风积沙混凝土的孔隙度得到了明显的降低,无害孔的体积分数得到明显上升相对应的有害孔的体积分数得到了显著下降;且风积沙粉掺量为 20% 时,相比 10% 及 30% 时,风积沙混凝土在大于 100 nm 范围内的孔隙占比最低,其对风积沙混凝土的孔隙结构优化程度最为明显,使整体孔隙度降低了 2.6%,改善了风积沙混凝土疏松的界面过渡区,进而提升其微观力学性能。

3) 在水化物相方面,掺入风积沙粉后,风积沙混凝土砂浆中各相的压痕模量与硬度均有较大的提升;20% 风积沙粉相比 10% 与 30% 而言,其对风积沙混凝土砂浆中水化物相优化最为明显,使风积沙混凝土孔隙相的压痕模量提升 30.23%,硬度提升 43.55%;LDC-S-H 的压痕模量提升 20.13%,硬度提升 19.68%;HDC-S-H 的压痕模量提升 18.00%,硬度提升 17.79%;20% 风积沙粉使风积沙混凝土中的毛细孔隙相与 LDC-S-H 凝胶体积分分别减少了 27.55%、22.76%、HDC-S-H 与 CH(有益凝胶)的体积分数分别增加了 13.91%、23.46%。

参考文献:

[1] Liu Qian, Shen Xiangdong, Wei Lisi, et al. Grey model re-

search based on the pore structure fractal and strength of NMR aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. JOM, 2020, 72(1): 536-543.

[2] Elipe M G M, López-querol S. Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction—The state-of-the-art[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 728-739.

[3] Li Yugen, Zhang Huimei, Liu Guangxiu, et al. Mechanical properties and impact mechanism of current sand concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1212-1221. [李玉根, 张慧梅, 刘光秀, 等: 风积沙混凝土基本力学性能及影响机理[J]. 建筑材料学报 2020, 23(5): 1212-1221.]

[4] Liu Qian, Shen Xiangdong, Dong Ruixin, et al. Grey entropy analysis on effect of pore structure on compressive strength of aeolian sand concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 108-114. [刘倩, 申向东, 董瑞鑫, 等: 孔隙结构对风积沙混凝土抗压强度影响规律的灰熵分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 108-114.]

[5] Seif E S S A. Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: An experimental study[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(3): 857-863.

[6] Huang Ning, Zheng Xiaojing. A laboratory test of the electrification phenomenon in wind-blown sand flux[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(5): 417-420.

[7] Li Genfeng, Shen Xiangdong, Zou Yuxiao, et al. Improving frost resistance of concrete mixed with aeolian sand powder based on microscopic characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(8): 109-116. [李根峰, 申向东, 邹晓晓, 等: 基于微观特性分析风积沙粉体掺入提高混凝土的抗冻性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 109-116.]

[8] Shi Huisheng, Sun Dandan, Wu Kai. Research progress on microstructure and numerical simulation methods of concrete interface transition zone[J]. Journal of Silicates, 2016, 44(5): 678-685. [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.]

[9] Golewski G L. An assessment of microcracks in the Interfacial transition zone of durable concrete composites with fly ash additives[J]. Composite Structures, 2018, 200: 515-520.

[10] Xu Jing, Wang Xianzhi. The modification mechanism and multi-scale model of nano silica on the interface transition zone of concrete[J]. Journal of Silicates, 2018, 46(8): 1053-1058. [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.]

[11] Xu Zehua, Zhao Qingxin, Zhang Jinrui, et al. Influence of in-

- terface transition zone on creep properties of concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(2): 347–356. [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.]
- [12] Xiao Jianzhuang, Li Wengui, Sun Zhihui, et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37: 276–292.
- [13] Xie Yuetao, Corr D J, Jin Feng, et al. Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC)[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 55: 223–231.
- [14] Poon C S, Shui Z H, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(6): 461–468.
- [15] Liu Cheng, Qi Yue, Chen Gaofeng, et al. Multiscale numerical-analytical modelling of oxygen diffusivity in partially saturated concrete: Role of interfacial transition zone[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2023, 12(8): 983–994.
- [16] Luo Baifu, Wang Dong, Mohamed E. The process of optimizing the interfacial transition zone in ultra-high performance recycled aggregate concrete through immersion in a water glass solution[J]. *Materials Letters*, 2023, 338: 134056.
- [17] Wu Jianguo, Wong H S, Yin Qian, et al. Effects of aggregate strength and mass fraction on mesoscopic fracture characteristics of cemented rockfill from gangue as recycled aggregate[J]. *Composite Structures*, 2023, 311: 116851.
- [18] Cui Chao, Li Yuan, Dang Yingze, et al. Mechanism of interface bonding between alkali-slag-metakaolin based geopolymer and aggregates[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(1): 190–197. [崔潮,李渊,党颖泽,等.碱-矿渣-偏高岭土基地聚物与骨料的界面粘结机理[J]. *材料导报*, 2025, 39(1): 190–197.]
- [19] He Ziming, Shen Aiqin, Wang Lusheng, et al. A review of recycled aggregate reinforcement technology and its effect on the performance of recycled concrete[J]. *Journal of Jilin University(Engineering Edition)*, 2025, 55(3): 790–810. [何子明,申爱琴,王路生,等.再生骨料强化技术及对再生混凝土性能影响研究综述[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2025, 55(3): 790–810.]
- [20] Xiong Guangjing, Jiang Hao, Chen Liqiang, et al. Improvement of interfacial structure between old and repair concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2002, 30(2): 263–266. [熊光晶,姜浩,陈立强,等.新老混凝土修补界面过渡区微细观结构改善方法的研究[J]. *硅酸盐学报*, 2002, 30(2): 263–266.]
- [21] Shi Xinyu, Zhang Cheng, Wang Ling, et al. Numerical investigations on the influence of ITZ and its width on the carbonation depth of concrete with stress damage[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 132: 104630.
- [22] Gao Yuan, Jing Hongwen, Yu Zixuan, et al. Particle size distribution of aggregate effects on the reinforcing roles of carbon nanotubes in enhancing concrete ITZ[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 126964.
- [23] He Zhihai, Qian Chunxiang, Du Shigui, et al. Nanoindentation characteristics of cement paste and interfacial transition zone in mortar with rice husk ash[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science)*, 2017, 32(2): 417–421.
- [24] Ran Jin. Variation law and life prediction of concrete durability under complex environmental conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. [冉晋. 复杂环境条件下混凝土耐久性变化规律及寿命预测[D]. 北京:北京工业大学, 2017.]
- [25] Duan Yun, Wang Qicai, Zhang Rongling, et al. Study of the resistance to chloride ions penetration and pore structure of concrete with low water-binder ratio under various curing conditions[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(5): 842–847. [段运,王起才,张戎令,等.不同养护条件下低水胶比混凝土抗氯离子渗透性及孔结构试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(5): 842–847.]
- [26] Wang Meng, Xie Youjun, Long Guangcheng, et al. Microhardness characteristics of high-strength cement paste and interfacial transition zone at different curing regimes[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 221: 151–162.
- [27] Zhao Sujing. Study on mechanical properties and microstructure of ultra-high performance cement-based composites[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. [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.]
- [28] Jennings H M, Thomas J J, Gevrenov J S, et al. A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(3): 329–336.
- [29] Li Yang, Chen Xia, Wang Shuyin. Effect of fine aggregates on expansive performance of MgO mortar[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(12): 103–108. [李洋,陈霞,王述银. 细骨料品种对外掺MgO砂浆膨胀性能的影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(12): 103–108.]
- [30] Hu Chuanlin, Li Zongjin. A review on the mechanical properties of cement-based materials measured by nanoindentation[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 90: 80–90.
- [31] Mondal P, Shah S P, Marks L. A reliable technique to determine the local mechanical properties at the nanoscale for cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Research*,

- 2007,37(10):1440–1444.
- [32] Peters S J, Rushing T S, Landis E N, et al. Nanocellulose and microcellulose fibers for concrete[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2142(1): 25–28.
- [33] Velez K, Maximilien S, Damidot D, et al. Determination by nanoindentation of elastic modulus and hardness of pure constituents of Portland cement clinker[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(4): 555–561.
- [34] Gao Song, Ban Shunli, Guo Jia, et al. Effect of silica fume on interfacial transition zone of recycled concrete[J]. Materials Reports, 2023, 37(11): 97–103. [高嵩, 班顺莉, 郭嘉, 等. 硅灰对再生混凝土界面过渡区的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(11): 97–103.]

Effects of Aeolian Sand Powder on the Micro Mechanical Properties of Aeolian Sand Concrete Analysis of Impact and Improvement Mechanism

LI Yue¹, WANG Hailong^{1*}, WEI Lisi¹, GUO Haolong¹, MA Kuo², YUN Zhengjun¹

(1. School of Water Conservancy and Building Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Hohhot 010020, China)

Abstract: In response to the issue of decreased mechanical properties of concrete caused by replacing river sand with windblown sand in large quantities, this study adopts the concept of waste treatment. Windblown sand is finely ground to prepare windblown sand powder, and then 10%, 20%, and 30% replace cement in windblown sand concrete. The influence and improvement mechanism of windblown sand powder on the micro mechanical properties of windblown sand concrete are examined through a nanoindentation test and a mercury intrusion test (MIP). The results show that after adding aeolian sand powder, the indentation modulus and hardness of aeolian sand concrete significantly improve. Compared to other additives, 20% aeolian sand powder produces the most significant improvement in the indentation modulus and hardness of aeolian sand concrete, resulting in an average increase of 19.9% and 25.9%, respectively. In addition, based on the indentation modulus, hardness, and volume fraction of the hydrate phase, 20% aeolian sand powder greatly improves the modulus and hardness of the hydrated phase in aeolian sand concrete, reduces the low-density C–S–H gel and void content, and increases the high-density C–S–H gel and CH content. This further reduces the void volume fraction in aeolian sand concrete of > 100 nm, increases the void volume fraction of < 100 nm, optimizes the pore structure of low-carbon concrete, and causes the interface transition zone to shrink, reducing its thickness by 10% μm, resulting in an improvement in micro mechanical properties. This study provides new ideas and insights for using large amounts of solid waste in concrete and for treating waste with waste.

Key words: aeolian sand; aeolian sand powder; micro mechanical properties; interface transition zone

(编辑 张 琼)

引用格式: Li Yue, Wang Hailong, Wei Lisi, et al. Effects of aeolian sand powder on the micro mechanical properties of aeolian sand concrete analysis of impact and improvement mechanism[J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(5): 225–236. [李越, 王海龙, 维利思, 等. 风积沙粉体对风积沙混凝土微观力学性能的影响及提升机理分析[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(5): 225–236.]