



风积沙混凝土力学性能及孔隙特征

薛慧君¹, 申向东^{1*}, 侯雨丰², 柳宗旭¹, 郑建庭¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)



薛慧君

摘要: 为了解决中国西北地区天然河砂分布不均及资源短缺的问题, 利用库布齐沙漠风积沙替代部分天然河砂作为细骨料配制风积沙混凝土, 通过立方体抗压强度、劈裂抗拉强度与核磁共振孔隙等因素对风积沙混凝土进行试验研究。结果表明: 随着风积沙掺量增加, 混凝土立方体抗压强度与劈裂抗拉强度均呈先增高后降低的趋势, 且风积沙掺量分别为 20%、30% 与 40% 的混凝土可满足设计强度要求; 随着养护龄期增加, 风积沙掺量为 30% 的混凝土强度值增长幅度最大。风积沙混凝土核磁共振 T_2 图谱共有 3 个特征峰, 随着养护龄期增加, 混凝土中大孔隙都向着小孔隙方向发展; 随着风积沙掺量增加, 孔隙度呈先降低后增高的趋势, 且凝胶孔与毛细孔呈先增加后减少的趋势。该研究可以为风积沙混凝土在中国干旱半干旱地区水利工程中应用推广提供理论依据。

关键词: 风积沙混凝土; 抗压强度; 劈裂抗拉强度; 核磁共振; 孔隙

中图分类号: TV431; TU528; S277.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2021)07-0720-07

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0239

薛慧君, 申向东, 侯雨丰, 等. 风积沙混凝土力学性能及孔隙特征[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(7): 720-726.

XUE Huijun, SHEN Xiangdong, HOU Yufeng, et al. Mechanical properties and pore characteristics of aeolian sand concrete[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2021, 39(7): 720-726. (in Chinese)

Mechanical properties and pore characteristics of aeolian sand concrete

XUE Huijun¹, SHEN Xiangdong^{1*}, HOU Yufeng², LIU Zongxu¹, ZHENG Jianting¹

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: In order to solve the problem of uneven distribution of natural river sand and resource shortage in northwestern of China, aeolian sand concrete was prepared by using the aeolian sand of Kubuqi Desert to replace part of natural river sand as fine aggregate. The experimental study on aeolian sand concrete was carried out through the cube compressive strength, splitting tensile strength and nuclear magnetic resonance porosity. The research results show that with the increase of the aeolian sand content, the early cubic compressive strength value and the splitting tensile strength value of the aeolian sand concrete both first increase and then decrease. The aeolian sand content with 20%, 30% and 40% concrete can meet the design strength requirements. With the increase of the curing age, the cubic compressive strength and splitting tensile strength of each group of aeolian sand concrete specimens increase differently, and the strength value of concrete with 30% aeolian sand has the largest increase. The T_2 spectrum of aeolian sand concrete has three characteristic peaks. With the increase of

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-09-28; 网络出版时间: 2021-06-24

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20210624.1134.016.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51769025); 内蒙古自然科学基金资助项目(2020BS05008); 内蒙古农业大学引进优秀博士人才科研启动项目(NDYB2018-40)

第一作者简介: 薛慧君(1989—), 男, 内蒙古包头人, 讲师, 博士(xuehuijun@yeah.net), 主要从事水工混凝土结构与材料研究。

通信作者简介: 申向东(1955—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士生导师(ndsxd@163.com), 主要从事工程结构与材料研究。

curing age, the large pores in the concrete develop towards small pores. As the amount of aeolian sand increases, the porosity first decreases and then increases. The gel pores and pores show a tendency to increase first and then decrease. This research can provide a theoretical basis for the application and promotion of aeolian sand concrete in water conservancy projects in arid and semi-arid areas in China.

Key words: aeolian sand concrete; compressive strength; splitting tensile strength; nuclear magnetic resonance; pore

随着中国西部地区诸多大型灌区渠道衬砌、堤防工程等水利设施建设不断推进,混凝土是不可或缺的基础材料.对于地处干旱半干旱地带的西部各省区,若过度开采河砂资源作为混凝土细骨料,势必会导致河砂资源日趋匮乏,加速当地生态环境恶化.但若在该地区寻求能够替代传统河砂的绿色环保资源作为混凝土细骨料,则一定程度上可以降低材料成本,同时也利于该地区生态环境保护.

风积沙是来自于沙漠及戈壁地区经受风吹、积淀作用下形成的一种特细砂,分布于沙漠及沙地的表层与边缘地带^[1].将风积沙部分或全部替代传统河砂配制风积沙混凝土可以有效缓解西部地区河砂分布不均的客观问题,最大程度上体现就地取材、节约资源等优势,具有非常重要的现实意义和社会效益.诸多研究者对风积沙混凝土从不同角度进行了研究并取得了一定的成果. AL-HARTHY等^[2]、ZHANG等^[3]研究表明风积沙作为混凝土细骨料后能改变混凝土的和易性,其坍落度随风积沙替代率增大而增大,当替代率大于50%时,其坍落度显著减小,且混凝土的强度随风积沙替代率增大而减小. SEIF等^[4]、LUO等^[5]研究表明风积沙混凝土的强度与风积沙的掺量呈反比例关系. 刘海峰等^[6-7]研究表明沙漠砂有明显的尺寸效应,峰值压应力随粗骨料颗粒最小粒径增大而降低,随粗骨料颗粒最大粒径增大而先上升后降低. 董伟等^[8-9]研究表明不同风积沙替代率的风积沙混凝土弹性阶段应力-应变曲线基本趋于一致,进入弹塑性阶段后,风积沙混凝土较普通混凝土应力增长更快且脆性增加. 文献[10-12]研究发现,采用相对动弹性模量作为评价混凝土耐久性指标更准确,风积沙能起到“填充”作用,能有效降低混凝土孔隙度,使混凝土结构更加密实,且风积沙的掺入能显著提升混凝土的抗冻性.

然而,针对适用于中国西部干旱半干旱地区水利工程的风积沙混凝土基本力学性能及孔隙特征的相关研究尚不充分.基于此,文中选取内蒙古库布齐沙漠风积沙为原材料配制风积沙混凝土,以满足

内蒙古河套灌区水工混凝土设计要求为前提,设计C30强度的风积沙混凝土,研究其基本力学性能及孔隙特征,并探讨风积沙混凝土在干旱半干旱地区水利工程中的适用性.

1 试验材料与方法

1.1 试验原材料

水泥选用蒙西P·O 42.5普通硅酸盐水泥,3和28 d抗压强度分别为29.9和51.5 MPa,3和28 d抗折强度分别为6.7和10.8 MPa,其主要物理性能指标:表观密度 ρ_s 为2 950 kg/m³、比表面积 A 为325.9 kg/m³、细度 α 为1.8%、标准稠度体积用水率 β 为28.5%、烧失率 γ 为1.32%,初凝、终凝时间分别为220和260 min,体积安定性合格.粉煤灰取自内蒙古呼和浩特市金桥热电厂Ⅱ级粉煤灰,其主要物理性质指标:表观密度 ρ_s 为2 151 kg/m³、比表面积 A 为354.1 kg/m³、烧失率 γ 为3.06%、需水率 θ 为97.3%、微珠体积分数 δ_{ms} 为93.3%,80和45 μm 筛余细度分别为1.7%和12.2%.

试验选取天然河砂和风积沙作为混凝土细骨料,其中天然河砂取自呼和浩特市周边砂场,风积沙取自内蒙古自治区鄂尔多斯市库布齐沙漠(108°33'13"E,40°18'44"N).普通砂与风积沙的主要物理化学参数见表1,表中物理量为堆积密度 ρ_a 、细度模数 m 、体积含水率 φ 、含泥质量分数 ω_m 、泥块质量分数 ω_c 、氯离子体积分数 δ_{Cl} 、硫酸盐与硫化物体积分数 δ_s .风积沙颗粒级配曲线如图1所示,图中 d 为粒径、 D_c 为累计分布率、 D_0 为密度.由图可知风积沙粒径主要分布在50~250 μm 之间,约占总体的82.78%,其中>250 μm 占15.24%,<50 μm 仅占1.98%.

表1 细骨料主要理化参数
Tab.1 Main physical and chemical parameters of fine aggregate

种类	$\rho_s /$ (kg·m ⁻³)	$\rho_a /$ (kg·m ⁻³)	m	$\varphi / \%$	$\omega_m / \%$	$\omega_c / \%$	$\delta_{Cl} / \%$	$\delta_s / \%$
风积沙	2 584.1	1 579.2	0.7	0.3	0.4	0	0.03	0.37
河砂	2 576.5	1 790.3	3.1	2.1	3.6	0.3	0.28	0.41

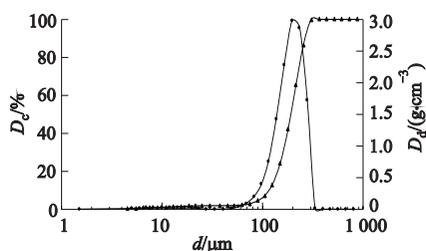


图 1 风积沙粒径分布曲线

Fig.1 Distribution curves of aeolian sand particle size

选取的普通卵碎石作为粗骨料,卵碎石取自呼和浩特市周边石场,其主要物理力学性能指标:堆积密度 ρ_a 为 $1\ 650\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、表观密度 ρ_s 为 $2\ 669\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、含泥质量分数 ω_m 为 0.37% 、压碎指标 B 为 3.7% 、粒径为 $4.75\sim 31.50\ \text{mm}$. 试验用水为普通自来水,外加剂为萘系减水剂,减水率为 20% .

1.2 配合比设计

风积沙混凝土设计强度为 C30,粉煤灰掺合料为胶凝材料的 20% ,减水剂为胶凝材料的 0.1% . 根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011),配制水胶比为 0.45 、砂率为 41% ,风积沙替代率 S 分别为 $0, 10\%, 20\%, 30\%, 40\%, 50\%, 60\%, 70\%$ 的 8 种混凝土(分别以 A, B, C, D, E, F, G, H 表示). 混凝土配合比见表 2,表中 ρ 为各配料的体积质量.

表 2 风积沙混凝土配合比
Tab.2 Mixture ratio of aeolian sand concrete

组号	S/%	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$						外加剂
		水泥	粉煤灰	河砂	风积沙	卵碎石	水	
A	0	320	80	750		1 060	180	0.4
B	10	320	80	675	75	1 060	180	0.4
C	20	320	80	600	150	1 060	180	0.4
D	30	320	80	525	225	1 060	180	0.4
E	40	320	80	450	300	1 060	180	0.4
F	50	320	80	375	375	1 060	180	0.4
G	60	320	80	300	450	1 060	180	0.4
H	70	320	80	225	525	1 060	180	0.4

1.3 试验设计

依照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)相关要求,采用“干拌法”进行混凝土拌合成型.依照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)和《水工混凝土试验规程》(SL 352—2006)进行抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验,分别测试 8 组不同风积沙掺量的混凝土在不同龄期的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度,试件尺寸为 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 标准立方体试件.

借助核磁共振测定不同龄期及不同风积沙掺

量下的风积沙混凝土孔隙特征.测试前对风积沙混凝土进行钻芯取样,芯样为 $\Phi 48\ \text{mm}\times H 50\ \text{mm}$ 的圆柱体试件.将芯样进行真空饱水处理,采用蒸馏水为孔隙的流体介质,真空压力值为 $-0.1\ \text{MPa}$.为了避免测试过程中芯样水分散失影响测试精度,测试前用白色生料带在水中包裹试件,随后取出被包裹试件并擦去生料带表面的水分进行核磁共振 T_2 谱测试.测试后对 T_2 谱积分得到试件孔隙中总的流体含量,通过 T_2 图谱可以计算得到混凝土孔隙特征参数.

2 结果与讨论

2.1 风积沙混凝土立方体抗压强度

2.1.1 风积沙掺量对立方体抗压强度的影响

风积沙混凝土抗压强度随风积沙掺量的变化规律如图 2 所示,图中物理量为风积沙掺入质量分数 ω_s 、立方体抗压强度 σ_p 、龄期 T .由图可知,3 d 和 7 d 龄期下风积沙掺量为 0 的基准组(A 组)立方体抗压强度最高,分别为 $16.3\ \text{MPa}$ 和 $26.4\ \text{MPa}$,且从 10% 开始随着风积沙掺量增加,强度都呈先上升后下降的趋势;14 d 和 28 d 龄期下风积沙混凝土强度随风积沙掺量增加同样呈先增加后降低的趋势,风积沙掺量 30% 的混凝土(D 组)强度与 A 组基准组持平,两龄期下 A 和 D 组混凝土强度均可达到 $27\ \text{MPa}$ 和 $34\ \text{MPa}$ 以上;此外,28 d 龄期下除了风积沙掺量 0 和 30% 组外,20% 和 40% 组混凝土抗压强度也满足 C30 的设计强度要求.风积沙掺量为 30% 的混凝土强度与未掺风积沙的混凝土强度持平.考虑经济合理,可以选择掺量为 $20\%\sim 40\%$ 的风积沙混凝土作为普通水工混凝土的替代材料.

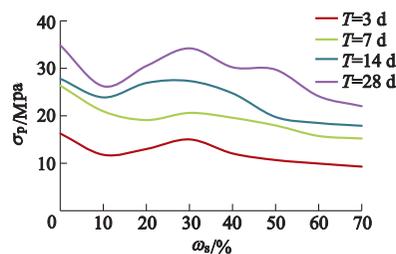


图 2 风积沙混凝土抗压强度随风积沙掺量的变化
Fig.2 Variation curves of compressive strength of aeolian sand concrete with content of aeolian sand

2.1.2 龄期对立方体抗压强度的影响

风积沙混凝土抗压强度随龄期的变化曲线如图 3 所示.由图可知,不同风积沙掺量的混凝土随龄

期增长其立方体抗压强度的增长幅度也有所不同.未掺风积沙的基准组与风积沙掺量为20%,30%和40%的强度增长幅度明显高于其他组,养护龄期为28 d时掺量为30%的D组立方体抗压强度与基准组基本持平;此外,基准组7 d龄期强度26.4 MPa可达到28 d强度34.9 MPa的75.6%,而风积沙掺量20%~40%的混凝土7 d龄期强度19.2~20.7 MPa为28 d强度30.3~34.3 MPa的60.3%~64.9%.虽然适量风积沙的掺入降低了混凝土的早期强度,但28 d龄期时风积沙掺量20%~40%的风积沙混凝土强度仍能够满足C30设计强度.从节约资源、降低成本的角度,风积沙混凝土在抗压强度方面完全能够替代普通混凝土进行应用.

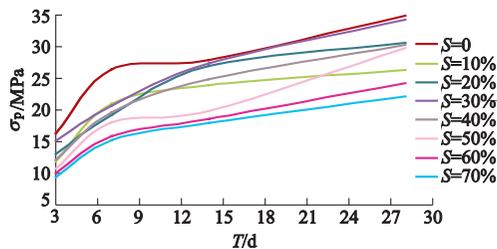


图3 风积沙混凝土抗压强度随龄期的变化
Fig.3 Variation curves of compressive strength of aeolian sand concrete with age

2.2 劈裂抗拉强度试验

2.2.1 风积沙掺量对劈裂抗拉强度的影响

风积沙混凝土劈裂抗拉强度随风积沙掺量变化曲线如图4所示,图中 σ_{pm} 为劈裂抗拉强度.由图可知,不同龄期下风积沙混凝土劈裂抗拉强度均随着风积沙掺量增加呈降低后先增加再降低的趋势,且风积沙掺量为30%时的混凝土劈裂抗拉强度不同程度大于包括基准组的其他组,28 d龄期时风积沙掺量为30%的混凝土劈裂抗拉强度可达1.9 MPa,略高于基准组,这说明适量的风积沙掺量可以改善混凝土劈裂抗拉强度.

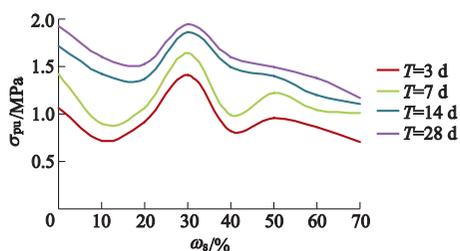


图4 风积沙混凝土劈裂抗拉强度随风积沙掺量的变化
Fig.4 Variation curves of splitting tensile strength of aeolian sand concrete with content of aeolian sand

2.2.2 龄期对劈裂抗拉强度的影响

风积沙混凝土劈裂抗拉强度随龄期变化曲线如图5所示.由图可知,基准组未掺风积沙的A组与风积沙掺量为30%的D组劈裂抗拉强度高于其他组别.随着龄期增长,A和D组的强度增长幅度也大于其他组,风积沙掺量30%的D组3 d和7 d龄期劈裂抗拉强度为1.4和1.6 MPa,可达到其28 d龄期劈裂抗拉强度1.9 MPa的73.7%和84.2%;而基准组3 d和7 d龄期劈裂抗拉强度1.1和1.4 MPa仅为28 d龄期劈裂抗拉强度1.9 MPa的57.9%和73.7%,这说明适当掺量的风积沙混凝土早期劈裂抗拉强度明显优于普通混凝土.

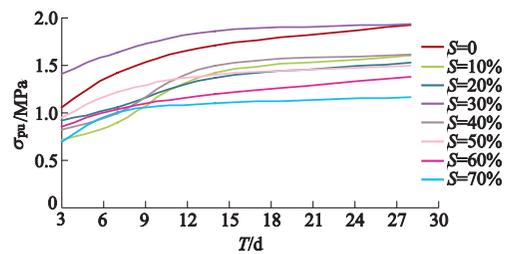
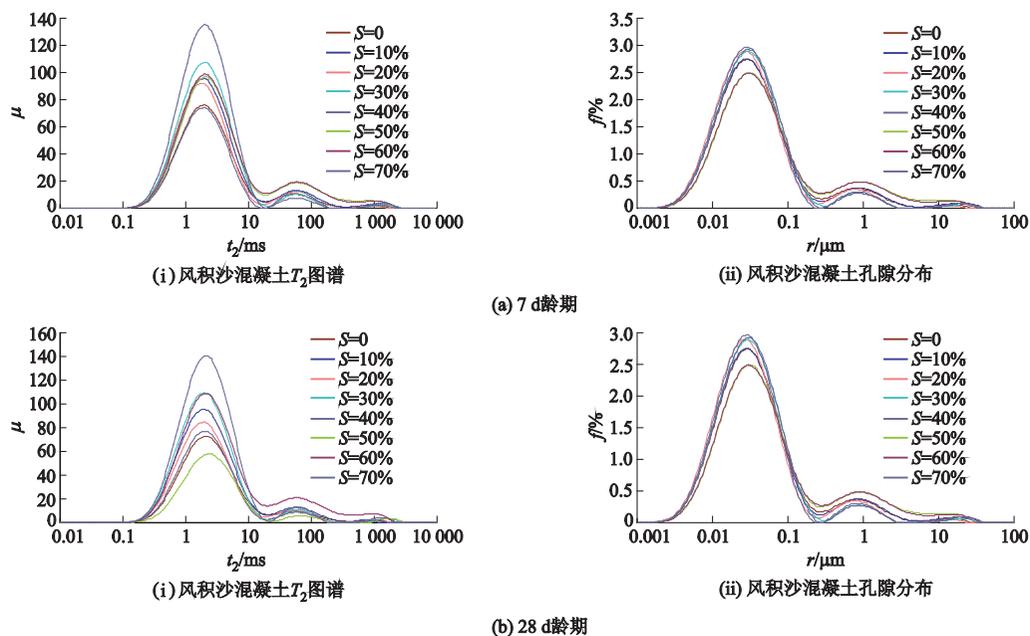


图5 风积沙混凝土劈裂抗拉强度随龄期的变化
Fig.5 Variation curves of splitting tensile strength of aeolian sand concrete with age

2.3 风积沙混凝土核磁共振孔隙试验

2.3.1 风积沙混凝土孔隙分布

以7 d和28 d为例,不同龄期的风积沙混凝土孔隙分布曲线如图6所示,图中物理量为幅度 μ , T_2 弛豫时间 t_2 、频率 f 、孔隙半径 r .由图可知,不同风积沙混凝土的 T_2 图谱及孔隙分布均为3个特征峰,其中第1峰曲线积分面积最大,第2峰曲线积分面积次之,第3峰曲线积分面积最小.例如根据原始核磁共振数据可知龄期为7 d的8组风积沙混凝土的 T_2 弛豫时间均为0.04~2 763.84 ms,通过计算 T_2 图谱数据可知最小弛豫时间对应的最小孔隙半径分别为 3.61×10^{-8} , 2.88×10^{-8} , 3.13×10^{-8} , 2.68×10^{-8} , 4.01×10^{-8} , 4.28×10^{-8} , 2.52×10^{-8} 和 2.17×10^{-8} μm ;随着风积沙掺量增加,最小孔隙半径呈先增大后减小的趋势,初步说明适量加入风积沙可以使混凝土内部孔隙向小孔径方向发展;8组风积沙混凝土的总特征峰 T_2 谱积分面积分别为2 768.995,3 476.294,3 199.164,3 729.914,2 491.753,2 338.932,3 882.239和4 617.454,第3特征峰占总峰面积分别为1.00%,1.70%,0.70%,0.98%,1.16%,1.68%,2.40%和1.10%,同样说明适量加入风积沙可以减小大孔径的占比.

图6 不同龄期风积沙混凝土 T_2 图谱及孔隙分布曲线Fig.6 T_2 map and pore distribution curves of aeolian sand concrete at different age periods

2.3.2 风积沙混凝土孔径分布

根据 YAMAN 等^[13] 的研究,将孔径分布分为 3 种孔径:凝胶孔 ($r < 0.01 \mu\text{m}$)、毛细孔 ($0.01 \leq r \leq 10 \mu\text{m}$) 和多害孔 ($r > 10 \mu\text{m}$).结合 7 d 和 28 d 的孔隙分布曲线对孔隙进一步划分归类,可得到风积沙混凝土孔隙分布占比 τ 及孔隙度 ξ 曲线,如图 7 和 8 所示.

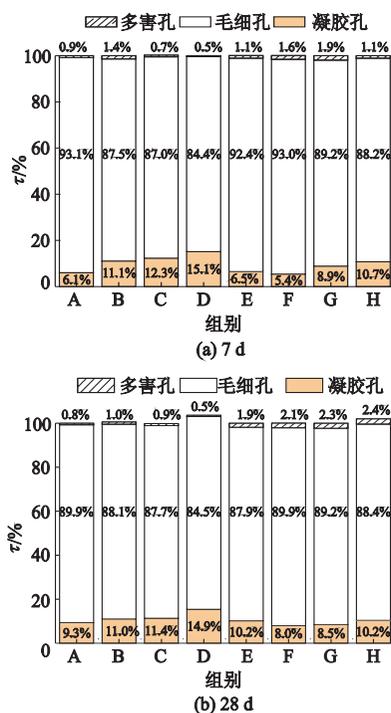


图7 不同龄期风积沙混凝土不同孔隙占比图
Fig.7 Distribution of different pores proportion in aeolian sand concrete at different ages

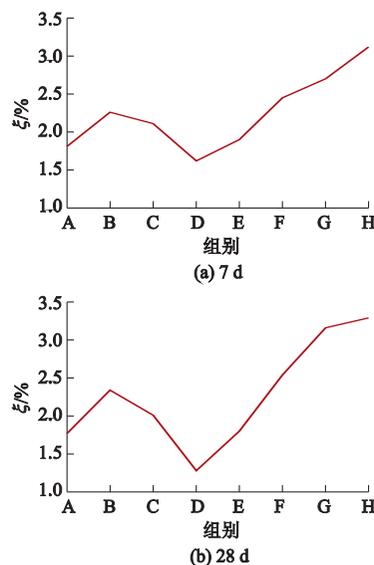


图8 不同龄期风积沙混凝土孔隙度
Fig.8 Porosity of aeolian sand concrete at different ages

由图 7 可知,将孔隙分布划分成凝胶孔、毛细孔以及多害孔 3 类后,明显发现随着风积沙掺量增加,凝胶孔呈先增多后减少的趋势,而多害孔呈先减少后增多的趋势.以 7 d 为例,风积沙掺量为 30% 的 D 组凝胶孔占比相较未掺风积沙的 A 组多 9%,多害孔占比由 A 组的 0.9% 降到 0.5%.

结合图 7 和 8 可知,孔隙度随着风积沙掺量增加呈先减小后增加的趋势,但是孔隙度只能说明试件内部总空隙的多少,并不能说明内部孔隙的优劣,因此结合不同风积沙混凝土孔隙分布及孔隙度

分布图分析,可初步得到8组风积沙混凝土中D组总孔隙占比少且小孔隙占比多,同样可以说明适量加入风积沙可以减小大孔隙占比,使混凝土内部孔隙向小孔隙方向增加。

2.3.3 不同龄期下风积沙混凝土的孔隙演变

不同龄期混凝土孔隙演变主要针对基准A组和风积沙掺量为30%的D组混凝土孔隙半径分布

加以说明.不同龄期下普通混凝土和风积沙混凝土核磁共振 T_2 谱分布曲线和孔径生长发育演变曲线如图9,10所示.图中 B 为幅度、 t_2 为 T_2 弛豫时间、 f 为频率、 r 为孔隙半径、 T 为龄期.随着龄期增长,A和D2组的特征峰都有减小的趋势,并且大孔径孔隙也随着龄期增长而减少.由此可以初步说明大孔径孔隙是影响混凝土抗压强度的因素之一。

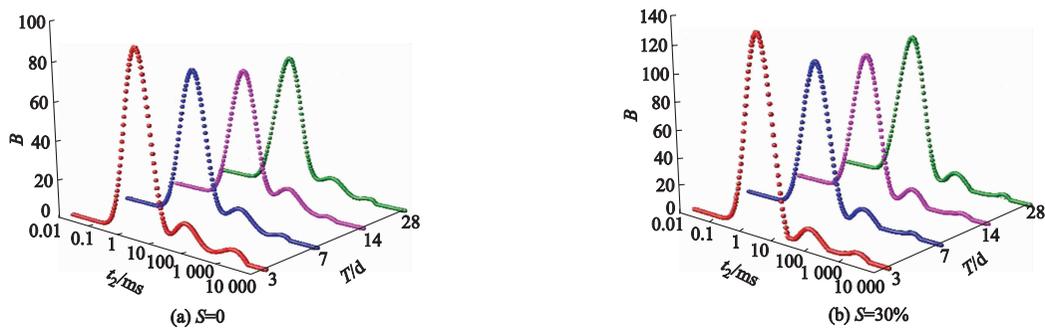


图9 不同龄期混凝土核磁共振 T_2 谱分布曲线

Fig.9 NMR T_2 spectrum distribution curves of concrete at different ages

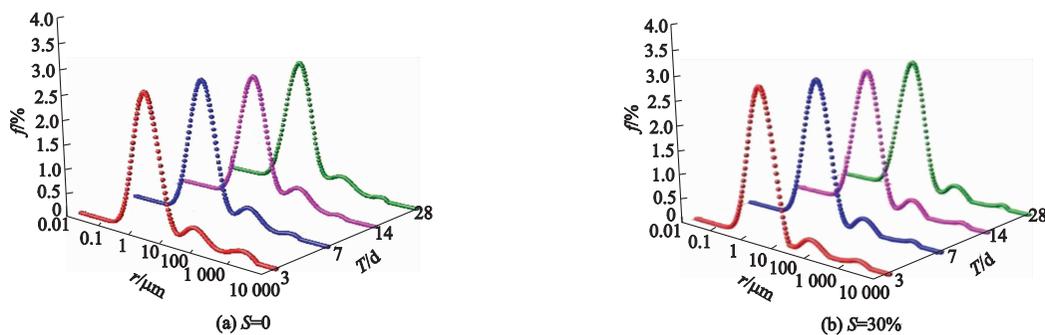


图10 不同龄期混凝土孔隙生长发育演变曲线

Fig.10 Growth and development curves of concrete pores at different ages

3 结论

1) 随风积沙掺量增加,风积沙混凝土抗压强度值和劈裂抗拉强度值均呈先升高后剧烈降低的趋势.风积沙掺量为30%时的混凝土力学性能最佳且与基准组相持平;风积沙掺量为20%~40%的混凝土也满足普通水工混凝土强度设计要求,说明适当的风积沙可部分替代河砂作为细骨料应用于水工混凝土中。

2) 随养护龄期增加,各组风积沙混凝土的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度均有不同幅度增加,风积沙掺量为30%的混凝土增长幅度较为明显,且风积沙混凝土早期劈裂抗拉强度明显优于普通混凝土。

3) 风积沙能有效填充孔隙.随风积沙掺量增加,混凝土内部孔隙率呈先下降后上升的趋势.当在风积沙替代率为30%时孔隙率最小,内部孔隙结构内最为密实,强度增加.随龄期增加,各组混凝土的孔隙明显减少,导致结构内部密实,强度增大。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] AL-HARTHY A S, HALIM M A, TAHA R, et al. The properties of concrete made with fine dune sand [J]. Construction and building materials, 2007, 21 (8): 1803-1808.
- [3] ZHANG Guoxue, SONG Jianxia, YANG Jiansen, et al.

- Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand[J]. *Building and environment*, 2006,41(11):1478-1481.
- [4] 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.
- [5] LUO F J, HE L, PAN Z, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand [J]. *Construction and building materials*, 2013,47(5):131-137.
- [6] 刘海峰,王亿颖,宋建夏.沙漠砂混凝土动态力学性能数值模拟[J].*水利学报*,2016,47(4):493-500,508. LIU Haifeng, WANG Yiyong, SONG Jianxia. Numerical simulation of dynamic mechanical behaviors of desert sand concrete [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2016,47(4):493-500,508.(in Chinese)
- [7] LIU Haifeng, MA Jurong, WANG Yiyong, et al. Influence of desert sand on the mechanical properties of concrete subjected to impact loading [J]. *Acta mechanica solida sinica*, 2017,30(6):583-595.
- [8] 董伟,肖阳,苏英,等.风积沙混凝土轴心受压力学性能研究[J].*工程科学与技术*,2020,52(3):86-92. DONG Wei, XIAO Yang, SU Ying, et al. Study on axial compression performance of aeolian sand concrete [J]. *Advanced engineering sciences*, 2020,52(3):86-92.(in Chinese)
- [9] DONG Wei, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of aeolian sand lightweight aggregate concrete [J]. *Construction and building materials*, 2016,123:792-799.
- [10] ZOU Yuxiao, SHEN Xiangdong, ZUO Xiaobao, et al. Experimental study on microstructure evolution of aeolian sand concrete under the coupling freeze-thaw cycles and carbonation [J]. *European journal of environmental and civil engineering*, 2020:1-16. doi:10.1080/19648189.2019.1707712.
- [11] 申向东,邹欲晓,薛慧君,等.风积沙掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性的影响[J].*农业工程学报*, 2019,35(2):161-167. SHEN Xiangdong, ZOU Yuxiao, XUE Huijun, et al. Effect of aeolian sand content on durability of concrete under freezing - thawing - carbonization coupling [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019,35(2):161-167.(in Chinese)
- [12] 薛慧君,申向东,刘倩,等.高寒灌区风沙吹蚀对农业水利工程混凝土抗冻耐久性的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(15):133-140. XUE Huijun, SHEN Xiangdong, LIU Qian, et al. Effect of wind-sand erosion on frost resistance durability of hydraulic engineering concrete in cold irrigation area [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017,33(15):133-140.(in Chinese)
- [13] YAMAN I O, HEARN N, AKTAN H M. Active and non-active porosity in concrete—Part 1: experimental evidence [J]. *Materials and structures*, 2002,35(2):102-109.

(责任编辑 张文涛)