

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.056

引用格式:张卓森,李昊,于淑玉,等. 碳酸钙晶须对风积沙混凝土力学性能影响研究[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(1): 106-114.



碳酸钙晶须对风积沙混凝土力学性能影响研究

张卓森,李昊,于淑玉,郭皓隆,孙常伟,周一

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018)

摘要:为提高风积沙利用率,研究不同体积掺量的碳酸钙晶须对风积沙混凝土抗压及劈裂抗拉强度的影响规律。通过扫描电镜和核磁共振等手段,从微观角度观察碳酸钙晶须与水泥浆体的黏结形态并分析其作用机理,基于试验结果分析并提出抗压、劈裂抗拉强度与养护龄期之间的理论模型。结果表明,掺入适量的碳酸钙晶须能够有效地改善风积沙混凝土的孔隙结构,提高力学性能。当风积沙替换率为 60% 时,碳酸钙晶须对应抗压强度与劈裂抗拉强度的最佳体积掺量分别为 0.15%、0.2%。提出的理论模型与试验数据吻合程度较高,可较好地预测龄期下的强度值。

关键词:碳酸钙晶须;风积沙混凝土;抗压强度;劈裂抗拉强度;扫描电镜;核磁共振;预测模型

中图分类号:TU528;S277.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2026)01-106-09

Experimental study on the effect of calcium carbonate whiskers on the mechanical properties of aeolian sand concrete

ZHANG Zhuosen, LI Hao, YU Shuyv, GUO Haolong, SUN Changwei, ZHOU Yi

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P. R. China)

Abstract: To improve the utilization efficiency of aeolian sand, this study investigates the influence of varying calcium carbonate whisker volume fractions on the compressive and splitting tensile strengths of aeolian sand concrete. Scanning electron microscopy (SEM) and nuclear magnetic resonance (NMR) were employed to examine the interfacial bonding between whiskers and cement paste and to elucidate the strengthening mechanism. Based on the experimental results, a theoretical model of relationships among compressive strength, splitting tensile strength and curing age was established. The findings show that the incorporation of an appropriate amount of calcium carbonate whiskers significantly improves pore structure and mechanical performance. When the aeolian sand content is 60%, the optimal whisker volume fractions for compressive strength and splitting tensile strength are 0.15% and 0.20%, respectively. The proposed predictive model aligns well with the experimental data and effectively predicts strength development with age.

Keywords: calcium carbonate whiskers; aeolian sand concrete; compressive strength; splitting tensile strength; SEM; NMR; predictive mode

收稿日期:2023-12-20 网络出版日期:2024-07-17

基金项目:内蒙古农业大学博士启动费资助项目(RZ190000201);内蒙古自然科学基金资助项目(2021MS05045)。

Supported by the Inner Mongolia Agricultural University PhD start-up fee (RZ190000201), and the Inner Mongolia Natural Science Foundation (2021MS05045).

作者简介:张卓森(1997—),男,硕士研究生,主要从事水工混凝土耐久性研究,(E-mail)nndzszs@163.com。

通信作者:李昊,男,教授,硕士生导师,(E-mail)hao.li@imau.edu.cn。

在沙漠地区农业和工矿业开发建设过程中,如何利用沙漠地区丰富的风积沙资源制备工程所需的混凝土材料具有重要意义。风积沙是沙漠、戈壁等地区经风吹并自然沉淀的特细砂,是一种颗粒细小均匀且成分稳定的硅质材料^[1]。为了合理利用风积沙缓解沙漠地区河沙不足的问题,发挥节约资源、就地取材等优势促进“沙漠化”治理,学者对风积沙混凝土进行了研究,取得了大量成果。国内对风积沙混凝土的研究起步较晚,内容主要涉及风积沙混凝土配合比设计及其基本力学性能等^[2-3]。杨维武等^[4]通过设计正交试验得到风积沙配制混凝土的最优配合比及混凝土抗压强度随风积沙替换率的增加经历的“先增大后减小”的变化过程。董瑞鑫等^[5]和刘倩等^[6]发现掺入适量风积沙粉体后对混凝土内部的孔隙结构起到了一定的改善作用,延长了使用寿命。李玉根等^[7]研究表明,风积沙可用作混凝土细骨料,用适量风积沙代替河砂可配制出满足工程需要的风积沙混凝土。董伟等^[8]研究表明,随着风积沙替换率增加,混凝土轴心抗压强度、弹性模量均有“先增大后减小”的变化过程。

碳酸钙晶须是一种低成本新型无机填充材料,是具有无毒、无味特点的白色蓬松状固体,因其结晶形式为单晶,晶体内部几乎无缺陷。其长度为 20~30 μm,直径为 0.5~1.5 μm,尺寸远小于常见的短纤维,兼有矿物微粉和纤维的特性,与水泥基材料有良好的相容性,可较好地填充混凝土在浇筑过程、水化过程中产生的微孔洞,其机械强度较高,分散性好,不会发生团聚现象而降低混凝土材料的物理性能,是理想的增强材料^[9-10]。Cao 等^[11]在水泥基复合材料中加入 10% 掺量的碳酸钙晶须,发现碳酸钙晶须能够在微观尺度上抑制微小裂纹的发展,并改善水泥基复合材料的内部孔隙结构及整体物理性能。文国富等^[12]研究表明,碳酸钙晶须与混凝土之间的摩擦系数较聚丙烯纤维、钢纤维等常用的混凝土外掺纤维要高,与混凝土浆体的结合性能要优于其他外掺纤维。

研究表明,风积沙的最佳替换率在 20%~40%,李玉根等^[7]发现风积沙替换率过高会导致有害孔含量增大而降低混凝土的力学性能。为就地取材,降低成本并提高风积沙利用率,文中以 60% 的风积沙替换河砂,通过掺入碳酸钙晶须改善混凝土内部孔隙结构提高混凝土力学性能的方式制备晶须风积沙混凝土。从微观的角度分析其力学性能及影响因素,为碳酸钙晶须在风积沙混凝土的应用提供理论支撑。

1 试验设计

1.1 试验材料

原材料:水泥为冀东 PO42.5 普通硅酸盐水泥,性能指标如表 1 所示。粉煤灰为内蒙古呼和浩特市金桥热电厂 F 类 II 级粉煤灰;粗骨料采用普通卵石;细骨料采用天然河砂和乌兰布和沙漠风积沙,风积沙粒径分布曲线如图 1 所示,沙粒粒径主要分布在 100~500 μm,占总体的 94.48%;100~250 μm 的占 49.12%;250~500 μm 的占 45.36%。乌兰布和风积沙的物理指标和化学组成如表 2 和表 3 所示;碳酸钙晶须采用东莞某公司的文石型碳酸钙晶须,其化学组成如表 4 所示;外加剂采用上海臣启化工科技有限公司的 CQJ-JSS02 型聚羧酸减水剂,减水率为 25%。

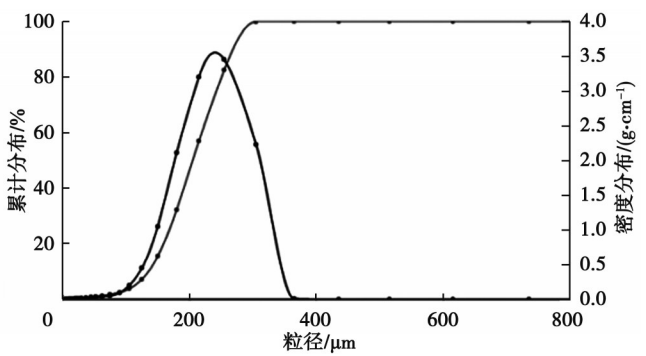


图 1 乌兰布和风积沙粒径分布
Fig. 1 Grain size distribution of Wulanbuhe aeolian sand

表 1 水泥性能指标
Table 1 Cement performance index

细度/%	密度/(g·cm ⁻³)	标准用水量/%	初凝/min	终凝/min	安定性	烧失量/%
1.4	3.12	28.5	180	395	合格	1.3

表 2 乌兰布和风积沙物理指标
Table 2 Physical indexes of Wulanbuhe aeolian sand

堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	空隙率/%	含水率/%	含泥量/%	细度模数
1 375	2 600	48	0.4	2.2	0.6

表 3 乌兰布和风积沙化学组成
Table 3 Chemical composition of Wulanbuhe aeolian sand %

SiO_2	MgO	Al_2O_3	Na_2O	Fe_2O_3	K_2O	CaO	C	其他
69	2	10	2	3	3	5	4	2

表 4 碳酸钙晶须化学组成
Table 4 Chemical composition of calcium carbonate whiskers %

CaCO_3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Na_2O	Fe_2O_3	P_2O_5	MnO
73.38	22.9	0.81	1.24	0.75	0.76	0.02	0.13

1.2 配合比设计

试验根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011),以 60% 的风积沙代替河砂,用 20% 的粉煤灰代替水泥,外掺 0%、0.05%、0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.3% 体积掺量的碳酸钙晶须,配制水胶比为 0.45 的风积沙混凝土试块,砂率为 40%,减水剂掺量为胶凝材料的 0.5%,混凝土配合比如表 5 所示,单位为 kg/m^3 。

表 5 风积沙混凝土配合比
Table 5 Mixture proportion of aeolian sand concrete

组别	水泥	粉煤灰	水	卵碎石	河砂	风积沙	减水剂	晶须掺量
F60J0	285	71	160	1 130	302	452	1.78	0.0
F60J5	285	71	160	1 130	302	452	1.78	1.4
F60J10	285	71	160	1 130	302	452	1.78	2.8
F60J15	285	71	160	1 130	302	452	1.78	4.2
F60J20	285	71	160	1 130	302	452	1.78	5.6
F60J25	285	71	160	1 130	302	452	1.78	7.0
F60J30	285	71	160	1 130	302	452	1.78	8.4
F40J0	285	71	160	1 130	452	302	1.78	0.0
F0J0	285	71	160	1 130	754	0	1.78	0.0

注:F60J5 中 F60 表示风积沙替换率为 60%,J5 表示晶须体积掺量为 0.05%。

1.3 试验设计

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/T 352—2020)进行抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验,分别测试 9 组混凝土在不同龄期的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度,试件为 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times100\text{ mm}$ 标准立方体。扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)测试:对试件进行制样,放置于样品托上涂布导电胶带,置于离子溅射仪中进行喷金处理,并采用 Hitachi S-4800 型场发射电镜观测晶须风积沙混凝土水化产物的微观形貌。核磁共振(nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)测试:将试块切割钻芯为 $\Phi50\text{ mm}\times50\text{ mm}$ 的圆柱体试件放在真空饱和装置进行 24 h 真空饱水,使其达到饱和状态,采用中国苏州纽迈科技 MesoMR23-60 型核磁共振分析系统,测定不同龄期晶须风积沙混凝土的 T_2 谱特征值及孔隙特征。

2 结果与讨论

2.1 立方体抗压强度

不同掺量的碳酸钙晶须风积沙混凝土抗压强度随龄期的变化曲线如图 2 所示。由图可知,风积沙替换率为 40% 的试验组 (F40J0) 在 28 d 龄期时,抗压强度相对于未掺风积沙组 (F0J0) 降低了 11.82%,而风积沙替换率为 60% 的基准组 (F60J0) 相对于未掺风积沙组 (F0J0) 降低了 22.2%,说明高替换率风积沙会较大幅度地降低混凝土的抗压强度。掺入碳酸钙晶须对高替换率风积沙混凝土强度有一定的增长,而不同碳酸钙晶须掺量的风积沙混凝土随龄期增长其抗压强度的增长幅度也有所不同。风积沙混凝土随碳酸钙晶须掺量的增加,其抗压强度呈先增后减趋势,说明增加晶须掺量对风积沙混凝土抗压强度具有一定的提升作用。由图 2 可知,最佳晶须掺量 0.15% 的试验组 (F60J15) 3 d 抗压强度相对基准组 (F60J0) 增长了 33.38%,当碳酸钙晶须掺量为 0.05%~0.3% (F60J5~F60J30) 时,混凝土在 3、7、14、21、28 d 抗压强度比基准组 (F60J0) 平均提高了 26.04%、19.98%、19.67%、18.38%、13.93%,可以看出碳酸钙晶须的加入对风积沙混凝土前期抗压强度的提高更显著。由图可知,碳酸钙晶须会使风积沙混凝土抗压强度提高,但抗压强度的提高与晶须掺量并不成正比关系。因此,一定掺量的碳酸钙晶须有助于提高混凝土抗压强度,但当晶须掺量超过 0.15% 时,会劣化混凝土的内部孔隙结构,从而影响混凝土抗压强度^[13]。

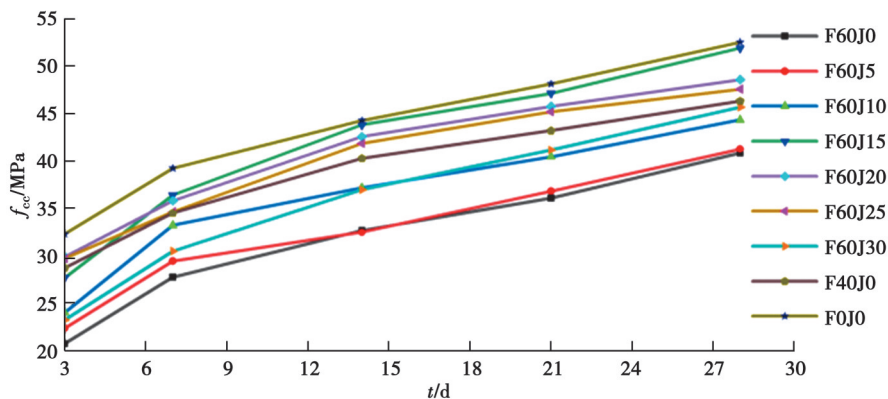


图 2 晶须风积沙混凝土抗压强度随龄期的变化

Fig. 2 Variation of compressive strength of whisker aeolian sand concrete with age

2.2 劈裂抗拉强度

不同掺量的碳酸钙晶须风积沙混凝土劈裂抗拉强度随龄期的变化曲线如图 3 所示。由图可知,风积沙替换率为 40% 的试验组 (F40J0) 在 28 d 龄期时,劈裂抗拉强度相对于未掺风积沙组 (F0J0) 降低了 3.88%,而风积沙替换率为 60% 的基准组 (F60J0) 相对于未掺风积沙组 (F0J0) 降低了 18.8%,说明高替换率风积沙会较大幅度降低混凝土的劈裂抗拉强度。随着碳酸钙晶须的掺加,明显提升了高替换率风积沙混凝土的劈裂抗拉强度,但是混凝土劈裂抗拉强度随着晶须掺量的增加呈现先增后减的变化过程,晶须掺量 0.2% 在 28 d 龄期时,试验组 (F60J20) 劈裂抗拉强度达到最大值 3.56 MPa,相对基准组 (F60J0) 增长了 30.88%,较未掺风积沙

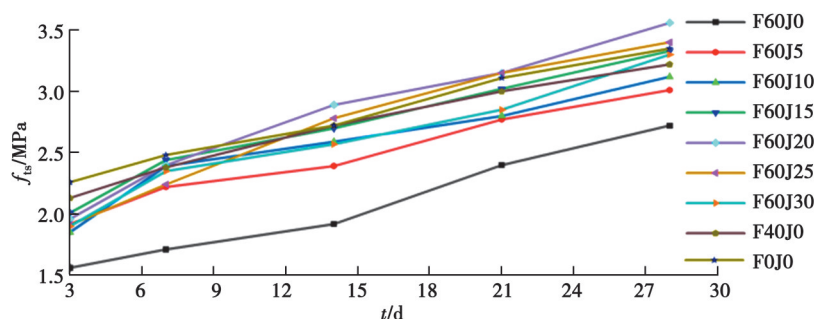


图 3 风积沙混凝土劈裂抗拉强度随龄期的变化

Fig. 3 Variation of splitting tensile strength of aeolian sand concrete with age

组(F0J0)增长了6.27%,说明碳酸钙晶须对风积沙混凝土劈裂抗拉强度提升效果明显,其28 d劈裂抗拉强度甚至高于普通混凝土。晶须掺量在0.2%的时候,混凝土在7、14、21、28 d的强度增长率为22.45%、20.41%、9.00%、13.01%,可以看出,碳酸钙晶须的加入对风积沙混凝土前期劈裂抗拉强度的提升更显著。

2.3 碳酸钙晶须风积沙混凝土核磁共振分析

核磁共振测试采用CPMG序列^[14]反演测定混凝土横向弛豫时间 T_2 。核磁共振弛豫是材料的固有属性,指材料在外界激励过程中,当外界激励撤销后恢复到原始平衡状态的性质^[15]。核磁共振的 T_2 弛豫时间能够反映试验物质内部氢质子化学环境、束缚程度及其自由度,从而深层次反映试验样品内部的结构,试验物质的内部孔隙结构决定了氢质子的束缚程度^[16]。

2.3.1 碳酸钙晶须风积沙混凝土孔隙分布

试验以7 d和28 d为例,2个龄期的碳酸钙晶须风积沙混凝土 T_2 图谱及孔隙分布曲线如图4所示。由图可知,7 d龄期时不同的晶须风积沙混凝土的 T_2 图谱及孔隙分布基本为2个特征峰, T_2 谱面积分别为3 012.183、2 314.481、1 807.699、1 904.326、2 486.344、2 386.596、2 269.414、2 775.628、1 959.645,其中第1峰曲线面积最大,第2峰曲线面积次之,而试验组F60J15、F60J20存在第3峰,甚至试验组F60J10存在第4峰,但其第3、4峰曲线面积基本小于总峰面积的1%,说明晶须风积沙混凝土相较F60J0内部大孔隙的占比很小。28 d龄期时,不同的晶须风积沙混凝土的 T_2 图谱及孔隙分布都为2个特征峰,每组总峰面积均有大幅下降, T_2 谱面积分别为2 399.739、1 942.429、1 728.266、1 570.001、1 843.823、2 098.015、2 048.304、1 809.07、1 813.56,而第2峰分别占总峰面积的1.78%、0.81%、0.96%、0.89%、0.68%、0.73%、2.83%、1.52%、1.01%,由图4(a)(b)可知,试块从养护7 d到养护28 d,最小弛豫时间也从0.056 7 ms变化为0.052 9 ms,最小孔隙在减小。说明28 d时,混凝土

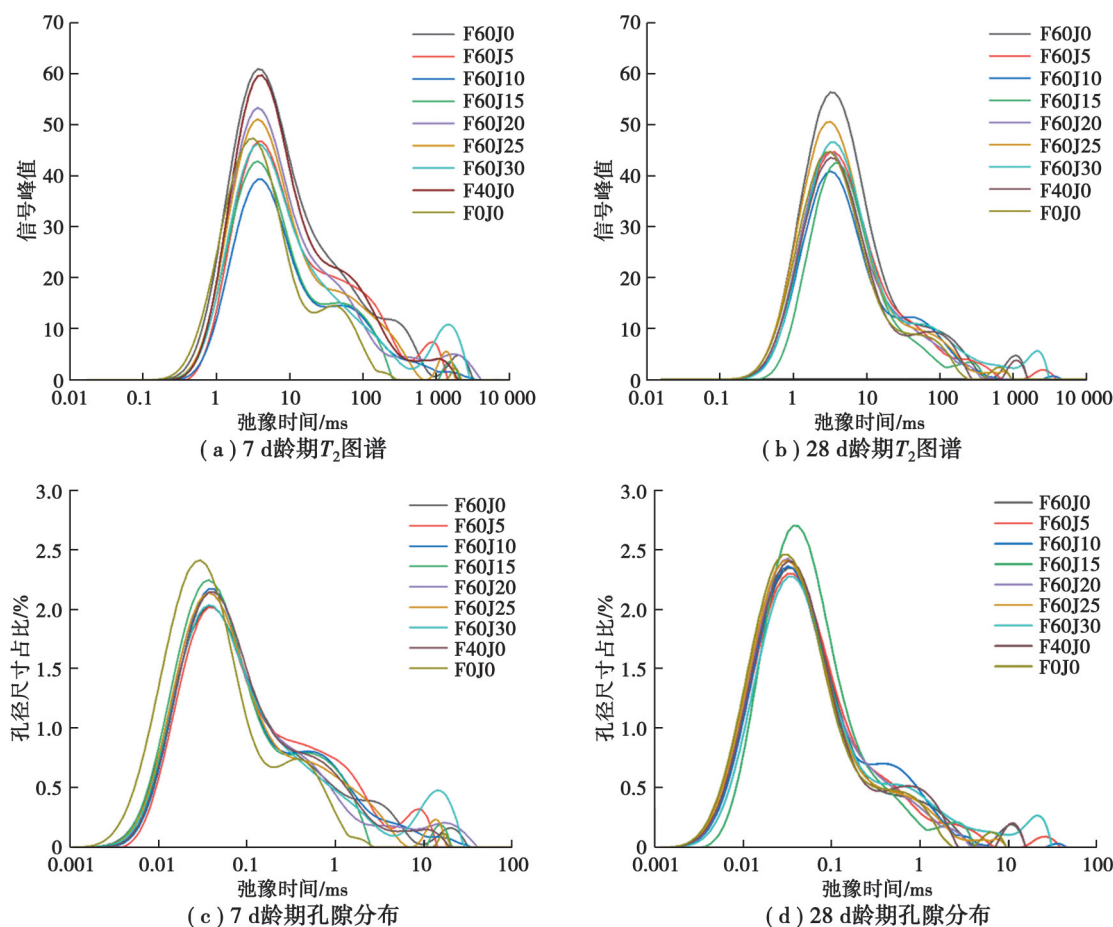


图4 不同龄期晶须风积沙混凝土 T_2 图谱及孔隙分布曲线

Fig. 4 T_2 spectrum and pore distribution curve of whisker aeolian sand concrete at different ages

水化反应较完全,在水化产物填充了部分孔隙的过程中带动了晶须填充了部分微小孔隙。较基准组(F60J0),掺加晶须的风积沙混凝土中的大孔隙占比明显下降。28 d龄期时,试验组 F60J15 总特征峰 T_2 谱面积最小,孔隙度最小,其抗压强度最高。说明掺加适量的碳酸钙晶须可改善高替换率风积沙混凝土孔隙结构,掺量过高反而会造成混凝土内部大孔隙的增加。

2.3.2 碳酸钙晶须风积沙混凝土孔径分布

根据吴中伟等^[17]对混凝土提出的孔径划分,无害孔为 $r<0.02\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙,少害孔为 $0.02\text{ }\mu\text{m}\leq r<0.05\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙,有害孔为 $0.05\text{ }\mu\text{m}\leq r<0.20\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙,多害孔为 $r\geq 0.20\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙,可以得到7 d、28 d龄期时碳酸钙晶须风积沙混凝土孔径分类的占比,如图5所示。可以看出,掺加风积沙的混凝土试验组 F60J0, F40J0 在7 d龄期时,多害孔和有害孔的占比均大幅增加,说明高替换率风积沙确实会影响混凝土内部孔隙结构,影响混凝土的力学性能。而向高替换率风积沙混凝土中掺加晶须后,28 d龄期时,多害孔和有害孔的占比均出现明显降低,结合不同龄期碳酸钙晶须风积沙混凝土的孔隙度,在加入碳酸钙晶须后,风积沙混凝土的孔隙度明显下降,如图6所示。强度最高的试验组 F60J15 孔隙度最低,多害孔占比最低。而晶须掺量最高的试验组 F60J30

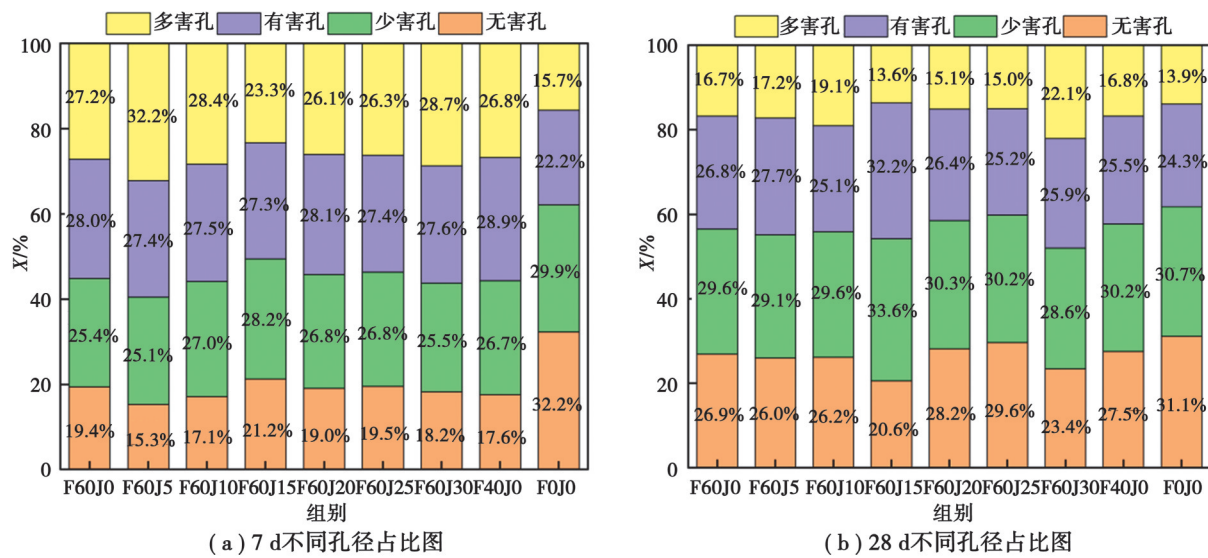


图 5 不同龄期碳酸钙晶须风积沙混凝土不同孔径占比图

Fig. 5 Proportion of different pore diameters of calcium carbonate whisker aeolian sand concrete at different ages

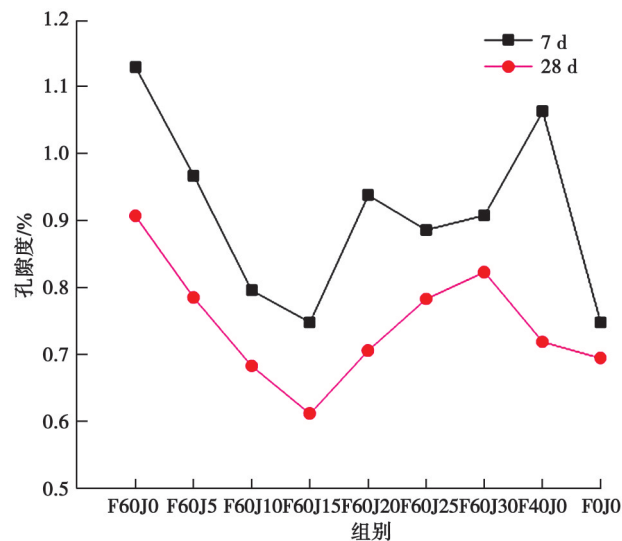


图 6 不同龄期碳酸钙晶须风积沙混凝土的孔隙度

Fig. 6 Porosity of calcium carbonate whisker aeolian sand concrete at different ages

在28 d龄期时,多害孔占比较其他组明显较大,孔隙度变化不大,说明晶须掺量过高会增加混凝土内部的大孔隙,影响混凝土强度。随着养护龄期的增加,部分内部孔隙逐渐被水化产物所填充,对大孔隙填充效果明显,而晶须能够填充更微小孔隙,降低孔隙度,提高混凝土强度。说明适量加入碳酸钙晶须可以填充部分大孔隙进而减小大孔隙占比,改善混凝土内部孔隙结构,使混凝土内部孔隙向小孔隙方向发展,提高混凝土的力学性能。

2.4 电镜分析

养护龄期28 d的碳酸钙晶须风积沙混凝土在SEM下放大5 000倍的微观结构如图7所示。可以发现,碳酸钙晶须为拥有长径比较大,表面光滑的针状结构。由图7(a)可以看出,碳酸钙晶须位于混凝土浆体当中,在这个混凝土破坏界面可以发现碳酸钙晶须拔出后留下的前端部分。混凝土基体微裂纹处碳酸钙晶须的拔出过程中会消耗部分能量,提高了混凝土的力学性能。由图7(b)可以看出,碳酸钙晶须起到了桥接作用,使混凝土内部的水泥浆体桥接在一起,周围的水化产物使晶须与水泥浆体更加紧密黏结,同时晶须也起到了填充微小孔隙的作用。晶须在微小裂纹处进行桥接,形成闭合应力,使得应力大部分加载到微裂纹侧面,而不会在尖端处产生应力集中。晶须桥接使得混凝土基体逐渐形成了晶须网状结构,起到了抑制混凝土内部微小裂缝的产生与发展的作用,使混凝土孔隙度下降,混凝土内部更加密实,从而有效提升了混凝土的力学性能。图7(c)是碳酸钙晶须掺量最高的试验组,当晶须掺量过高时,一部分晶须会集聚在一起。由于晶须的集聚,使得晶须之间不能有足够的水化产物包裹,在这个区域形成了一个薄弱空间,水化产物的流失导致薄弱空间向多害孔发展,增加了混凝土多害孔的占比,降低了混凝土的力学性能。

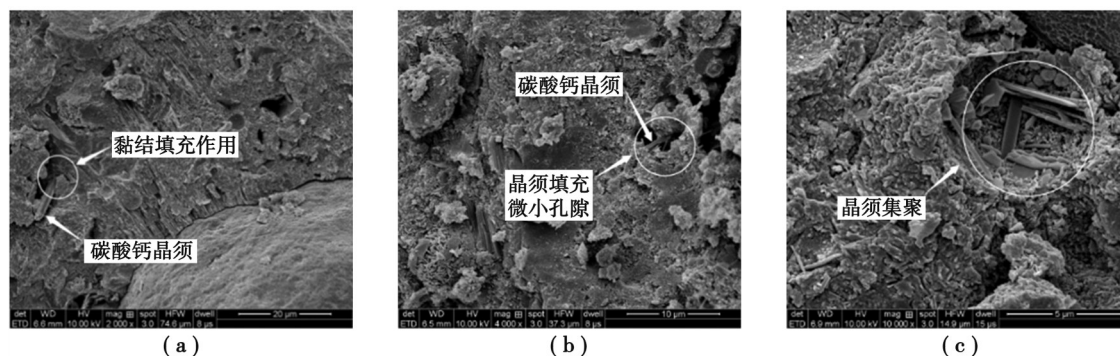


图7 碳酸钙晶须风积沙混凝土在SEM下的内部微观结构图

Fig. 7 Internal microstructure of calcium carbonate whisker aeolian sand concrete under SEM

2.5 碳酸钙晶须风积沙混凝土龄期-强度模型

确立混凝土强度与养护龄期的关系,对实际工程有重要意义。文献[18-19]提出了关于考虑龄期增长的混凝土强度模型。文中提出适合试验的抗压强度预测模型,具有曲线经过(0,0)点;单调递增且有界的显著特征,能更好地描述混凝土抗压强度的发展规律。同时,提出劈裂抗拉强度模型表达式为

$$f_{cc}(t) = at^b, \quad (1)$$

$$f_{ts}(t) = c + dt^e, \quad (2)$$

式中: $f_{cc}(t)$ 为抗压强度; $f_{ts}(t)$ 为劈裂抗拉强度; t 为养护龄期; d ; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为拟合系数;通过上述回归方程,使用origin软件对试验组拟合,结果如表6所示。抗压相关系数 R^2 均大于0.96,拟合精度最高的 $R^2=0.997\ 55$,劈裂抗拉相关系数 R^2 均大于0.94,拟合精度最高的 $R^2=0.994\ 21$ 。抗压强度及劈裂抗拉强度最佳掺量组回归方程与实际强度对比图,如图8所示,相关系数分别为 $R^2=0.991\ 31$, $R^2=0.989\ 99$,说明该拟合方程与试验结果吻合较好,证明该曲线拟合方程可用于实际工程中的碳酸钙晶须风积沙混凝土的强度预测。

表 6 拟合系数及相关系数
Table 6 Fitting coefficient and correlation coefficient

组别	抗压			劈裂抗拉			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>R</i> ²
F60J0	15.368 5	0.288 67	0.988 27	1.503 49	0.012 78	1.372 56	0.981 71
F60J5	17.045 7	0.258 62	0.971 99	1.746 59	0.081 18	0.823 64	0.969 92
F60J10	19.256 5	0.249 61	0.967 22	1.168 61	0.475 95	0.416 92	0.980 27
F60J15	21.149 9	0.269 02	0.991 31	1.429 41	0.352 03	0.501 09	0.978 64
F60J20	23.586 5	0.218 19	0.997 23	1.106 85	0.520 84	0.460 39	0.989 99
F60J25	23.197 7	0.217 62	0.992 41	1.138 97	0.435 65	0.497 45	0.994 21
F60J30	16.948 3	0.295 52	0.997 55	1.632 92	0.147 38	0.716 57	0.942 81

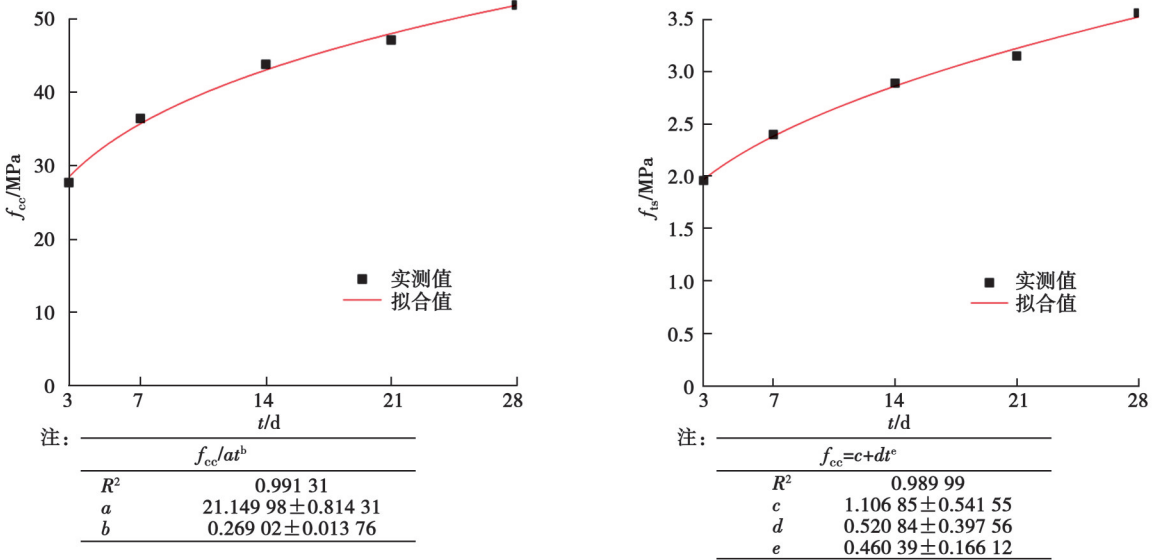


图 8 晶须最佳掺量抗压强度与劈裂抗拉强度拟合
Fig. 8 Fitting of compressive strength and splitting tensile strength with the optimum content of whisker

3 结 论

1) 60% 风积沙替换率会大幅降低混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度。适量碳酸钙晶须的掺入对风积沙混凝土力学性能的提升作用显著,在早期龄期表现明显。随碳酸钙晶须掺量的增加,抗压及劈裂抗拉强度均呈先增后减的变化趋势。所以,存在最优碳酸钙晶须掺量值,抗压强度最优掺量为 0.15%,强度达到普通混凝土的强度。劈裂抗拉强度最优掺量为 0.2%。考虑到混凝土主要以抗压作用应用到建筑中,文中选取综合力学性能最佳的 0.15% 晶须掺量为最佳掺量应用到实际工程中。

2) 随着碳酸钙晶须掺量的增加,风积沙混凝土的孔隙度呈先下降后上升的趋势,多害孔占比呈先减小后增大的趋势。加入适量的碳酸钙晶须可以使混凝土内部形成晶须网状结构,从而抑制混凝土内部微小裂缝的发展,减小大孔隙占比。晶须填充微小孔隙,优化了混凝土内部孔隙结构,在混凝土破坏过程中晶须对水化产物的桥接黏结及拔出过程起到了能量耗散的作用,提升了混凝土的力学性能。

3) 根据龄期与抗压强度、劈裂抗拉强度之间的相关性,建立龄期与抗压强度、劈裂抗拉强度之间的曲线拟合模型,利用 origin 软件求得的变化曲线与试验结果吻合度较高,该模型可方便预测不同龄期下碳酸钙晶须风积沙混凝土的抗压强度及劈裂抗拉强度。

参考文献

[1] 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 H J, Shen X D, Hou Y F, et al. Mechanical properties and pore characteristics of aeolian sand concrete[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(7): 720-726. (in Chinese)
- [2] Wang Y H, Chu Q, Han Q, et al. Experimental study on the seismic damage behavior of aeolian sand concrete columns[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2020, 19(2): 138-150.
- [3] Wang Y H, Zhang Z P, Han Q, et al. Seismic damage behavior of aeolian sand concrete columns with an inner square steel tube[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1): 1306194.
- [4] 杨维武, 陈云龙, 刘海峰, 等. 沙漠砂高强混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2014(11): 100-102.
Yang W W, Chen Y L, Liu H F, et al. Research on the mechanical properties of desert sand high strength concrete[J]. Concrete, 2014(11): 100-102. (in Chinese)
- [5] 董瑞鑫, 申向东, 刘倩, 等. 风积沙混凝土孔隙特征对其强度影响机理的研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1901-1907.
Dong R X, Shen X D, Liu Q, et al. Influence mechanism of pore characteristics of aeolian sand concrete on its strength[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6): 1901-1907. (in Chinese)
- [6] 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.
Liu Q, Shen X D, Dong R X, 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. (in Chinese)
- [7] 李玉根, 张慧梅, 刘光秀, 等. 风积砂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.
Li Y G, Zhang H M, Liu G X, et al. Mechanical properties and influence mechanism of aeolian sand concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1212-1221. (in Chinese)
- [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 W, Xiao Y, Su Y, et al. Study on axial compression performance of aeolian sand concrete[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 86-92. (in Chinese)
- [9] Zhang C, Cao M. Mechanical properties of calcium-carbonate whisker-reinforced high-strength cement mortar[J]. Journal of Southeast University, 2012, 28(3): 331-336.
- [10] Saulat H, Cao M L, Khan M M, et al. Preparation and applications of calcium carbonate whisker with a special focus on construction materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117613.
- [11] Cao M L, Khan M, Ahmed S. Effectiveness of calcium carbonate whisker in cementitious composites[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2020, 64(1): 265-275.
- [12] 文国富, 王秀飞, 尹彩流, 等. 碳酸钙晶须含量对橡胶基摩擦材料性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(4): 80-83.
Wen G F, Wang X F, Yin C L, et al. Effect of calcium carbonate whisker content on properties of Rubber based friction materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(4): 80-83. (in Chinese)
- [13] 金光淋, 殷浚哲, 于洋, 等. 碳酸钙晶须掺量对水泥砂浆力学性能的影响研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 832-836.
Jin G L, Yin J Z, Yu Y, et al. Study on the effect of calcium carbonate whisker content on the mechanical properties of cement mortar[J]. Building structure, 2020, 50 (S1): 832-836. (in Chinese)
- [14] 孔祥宇, 朱垣晔, 闻经纬, 等. 核磁共振量子信息处理研究的新进展[J]. 物理学报, 2018, 67(22): 1-20.
Kong X Y, Zhu Y Y, Wen J W, et al. New research progress of nuclear magnetic resonance quantum information processing[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(22): 1-20. (in Chinese)
- [15] 王洪强, 付晨东, 井连江, 等. 核磁共振成像技术在岩石物理实验中的应用[J]. 测井技术, 2005, 29(2): 95-97.
Wang H Q, Fu C D, Jing L J, et al. Application of NMR imaging technology in rock petrophysics experiment[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(2): 95-97. (in Chinese)
- [16] 李根峰, 申向东, 邹欲晓, 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.
Li G F, Shen X D, Zou Y X, 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. (in Chinese)
- [17] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 41-43.
Wu Z W, Lian H Z. High performance concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999: 41-43. (in Chinese)
- [18] ACI COMMITTEES 209. Prediction of creep, shrink age and temperature effects in concrete structures(209R-92) [EB/OL]. (1992-03-11)[2020-01-14]. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/5089>.
- [19] 王伟, 周爱兆, 冯丽, 等. 再生粗骨料混凝土抗压强度-龄期数学模型[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 633-637.
Wang W, Zhou A Z, Feng L, et al. Mathematical model for age-dependent compressive strength of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(5): 633-637. (in Chinese)