文章编号:1007-9629(2025)12-1226-09

双层抛填轻骨料混凝土力学性能及微结构研究

董浩伟[1], 王海龙[1,2,3,4,*], 张文妍[1], 黎庆富[1], 张新宇[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 内蒙古自治区生态水文与水资源高效利用重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;3.内蒙古农业大学 黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心,内蒙古 呼和浩特 010018;4.内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:运用双层抛填法在混凝土浇筑过程中分2层抛入骨料,通过优化浮石轻骨料混凝土骨料骨架结构来提升混凝土强度,构建抛填骨料粒径区间与抛填率量化评价体系。结果表明:当抛填骨料最大粒径为19、31.5 mm,抛填率为10%、20%时,混凝土的抗压强度较基准组分别提升了16.45%、8.98%,劈裂抗拉强度同步增强;抛填骨料优化了基体的微观结构,随着抛填率的提升,有害孔隙减少,界面微裂纹宽度减小;应力-应变曲线无量纲化拟合的方差高达99%,拟合精度良好;当4.75~19 mm粒径骨料抛填率为20%时,韧性指数较基准组提升了51.9%,脆性指数降低了47.2%,抛填骨料混凝土实现了脆-韧转变。

关键词:双层抛填工艺;浮石水工混凝土;力学性能;孔隙特征;无量纲化模型

中图分类号:TU528.2 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.12.007

Mechanical Properties and Microstructure of Hydraulic Concrete Based on Double-Layer Placed-Fill Process

DONG Haowei[1], *WANG Hailong*[1,2,3,4,*], *ZHANG Wenyan*[1], *LI Qingfu*[1], *ZHANG Xinyu*[1]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Ecohydrology and High-Efficient Utilization of Water Resources, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 4. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: A double-layer placed-fill method was utilized to introduce aggregates in two layers during the concrete pouring process, with the aim of optimizing the aggregate skeleton structure of pumice lightweight aggregate concrete. This method improved the concrete strength and established a quantitative evaluation system for the particle size range and placed-fill rate of the aggregates. The results show that when the maximum particle sizes of the aggregates are 19 mm and 31.5 mm, and the placed-fill rates are 10% and 20%, the compressive strength of the concrete increases by 16.45% and 8.98% compared to the control group, respectively, and the splitting tensile strength also improves concurrently. The aggregates optimized the microstructure of the matrix. As the throwing-in rate increases, the number of harmful pores decreases, and the width of interfacial microcracks narrow. Dimensionless fitting analysis of the stress-strain curve shows that the variance reaches up to 99%, indicating a good fitting accuracy. Furthermore, the established toughness analysis system indicates that when the particle size range of the aggregates is 4.75-19 mm

收稿日期:2025-03-25; 修订日期:2025-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52469024);内蒙古自治区重大科技专项(2021ZD0007)

第一作者:董浩伟(2001—),男,山东潍坊人,内蒙古农业大学硕士生。E-mail:donghaowei@emails.imau.edu.cn

通讯作者:王海龙(1978—),男,内蒙古巴彦淖尔人,内蒙古农业大学教授,博士生导师,博士。 E-mail:nndwhl@imau.edu.cn

and the placed-fill rate is 20%, the toughness index increases by 51.9% compared to the control group, while the brittleness index decreases by 47.2%. The aggregate concrete achieves a brittle-to-tough transition. This research provides a process optimization scheme and theoretical support for the engineering application of lightweight aggregate concrete.

Key words : double-layer placed-fill method; pumice hydraulic concrete; mechanical property; pore characteristics; dimensionless nonlinear fitting

河套灌区位于中国黄河几字弯处，总面积达111.95万公顷，是中国三大特大型灌区之一，农业生产严重依赖引水灌溉[1]。由于其地处西北寒、旱区域，冬、春季渠道混凝土衬砌冻融破坏严重。天然浮石混凝土因其低密度和高抗冻性，在寒区渠道混凝土衬砌工程中展现出独特优势[2-3]。混凝土的力学性能与骨料的含量、大小、形状、位置、骨料骨架体系的形成等有关[4-7]。浮石的多孔特性虽然降低了混凝土的质量，提升了其保温性能[8]，但同时也增大了混凝土孔隙率。且浮石密度较低，强度较差，浇筑时多悬浮于水泥浆体中，难以形成有效的骨料骨架体系。综合作用下，致使浮石轻骨料混凝土强度低于普通混凝土[9-11]。抛填骨料工艺通过三维骨架重构机制，将混凝土中粗骨料体积分数提升至60%，建立了以嵌锁效应为主导的力学体系，提高了混凝土的力学性能[12-16]。李将伟等[17-19]研究表明，三层抛填工艺配合振捣优化可形成有效的骨料嵌锁结构，使混凝土的抗压强度提升22%。李明海等[20]证实骨料嵌锁效应增强与砂浆层减薄呈正相关。但蔡基伟等[21]发现砂浆层小于0.3 mm时，混凝土的相对动弹性模量下降15%，且混凝土的抗冻性能降低。吴家乐等[22]研究表明，大粒径抛填骨料对弹性模量增益的影响较抗压强度更为明显。

综上所述，当前研究主要集中在抛填骨料混凝土的力学性能及耐久性上，对其孔隙结构演化、界面过渡区(ITZ)微观形貌及宏观-微观性能关联模型构建上存在明显不足。鉴于单层抛填工艺对混凝土流动性要求较高、成型困难，不适用于寒区水工混凝土的需求；三层抛填工艺振捣时间过长，在应用于轻骨料混凝土时易导致骨料上浮、底层混凝土浆体难以渗透成型等问题[23]。本文采用双层抛填法，通过优化抛填骨料粒级序列，实现混凝土内部骨料体积分数提升，提高了浮石轻骨料混凝土的强度，为其多尺度性能调控提供了新方法。

1　试验

1.1　试验材料

胶凝材料选用内蒙古自治区乌海市草原牌P·O 42.5水泥与Ⅱ级粉煤灰。粗骨料为浮石，粒径为4.75～19 mm，表观密度为1 593 kg/m^3。抛填骨料为卵碎石，表观密度为2 665 kg/m^3，不直接加入搅拌机中进行搅拌，而是在混凝土浇筑过程中分层抛入。本文选取粒径范围为4.75～19、4.75～31.5 mm的2种连续级配的卵碎石作为抛填骨料。浮石和卵碎石的主要物理性能如表1所示，级配如表2所示。细骨料为Ⅱ区中砂。

表1　浮石和卵碎石的主要物理性能

Table 1　Main physical properties of pumice and oval pebble

Type	Apparent density/(kg·m^{-3})	Bulk density/(kg·m^{-3})	Absorption(by mass)/%	Tensile strength/MPa
Pumice	1 593	810	16.7	2.95
Oval pebble	2 665	1 560	0.8	3.76

表2　不同最大粒径抛填骨料的级配

Table 2　Gradation(by mass) of coarse aggregates with different maximum particle sizes

Unit：%

Maximum particle size/mm	2.36 mm	4.75 mm	9.5 mm	19 mm	26.5 mm	31.5 mm	37.5 mm
19	97	92	58	6	0	0	0
31.5	97	95	72	26	0	3	0

1.2　配合比设计

试验采用双层抛填法。参照GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》、JGJ/T 12—2019《轻骨料混凝土应用技术规程》，设计水胶比(质量比，文中涉及的水胶比、砂率除特别说明外均为质量比或质量分数)为0.45，砂率为41%，单位用水量为180 kg/m^3。抛填碎石骨料按照0%、10%、15%、20%抛填率，分2层抛入新拌混凝土浆体中并延长30～45 s的振捣时间，以保证骨料嵌入浆体。抛填率指混凝土中抛入骨料的比例，即抛填骨料在混凝土中的体积分数，双层抛填法中每层骨料各占总抛填骨料的50%，例如抛填率为10%，即代表1 m^{3}混凝土中抛填骨料的体积为0.1 m^3，上、下层抛填骨料各占0.05 m^3。混凝土的配合比见表3。

表3 混凝土的配合比

Table 3 Mix proportions of concretes

Group	Mix proportion/(kg·m^{-3})						Placed-fill rate/%	Placed-fill grain size/mm
	Cement	Fly ash	Water	River sand	Pumice	Water reducer		
P0	320	80	180	750	650	0.40	0	
F19P10	288	72	162	675	585	0.36	10	4.75-19
F19P15	272	68	153	637	552	0.34	15	4.75-19
F19P20	256	64	144	600	520	0.32	20	4.75-19
F31.5P10	288	72	162	675	585	0.36	10	4.75-31.5
F31.5P15	272	68	153	637	552	0.34	15	4.75-31.5
F31.5P20	256	64	144	600	520	0.32	20	4.75-31.5

1.3 试验方法

混凝土试块的制备流程及双层抛填强化机理分别如图1、2所示。图中:σ_{max}为最大应力,m_W/m_C为水灰比。制备尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的混

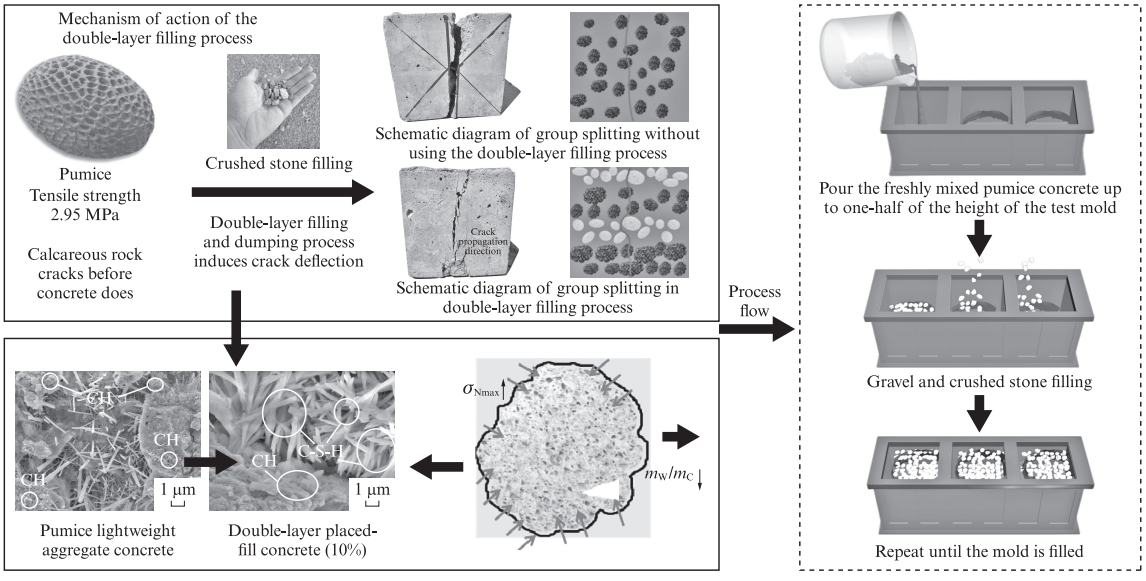


图1 双层抛填工艺混凝土强化机理

Fig. 1 Strengthening mechanism of double-layer placed-fill concrete

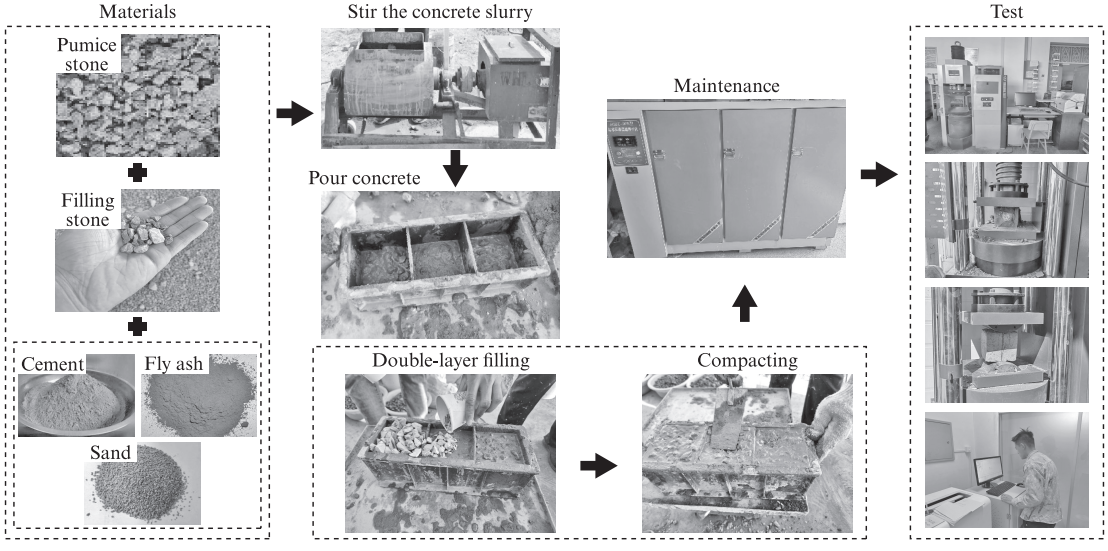


图2 抛填工艺混凝土制备流程和测试方法

Fig. 2 Concrete preparation process and testing methods for the placed-fill construction method

凝土试块，待混凝土试块成型后置于室内养护24 h后脱模，参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行立方体抗压强度试验及劈裂抗拉试验，并借助纽曼MesoMR-T1-T2型核磁共振仪（NMR）及捷克TESCAN MIRA LMS型扫描电镜（SEM），分析双层抛填工艺对浮石轻骨料混凝土微观特性的影响。

2　结果与分析

2.1　工作性

根据JGJ/T 12—2019的要求，基准混凝土坍落度设计为120 mm（容许偏差±10 mm）。表4为混凝土的坍落度。由表4可见，随着抛填率从10%增至20%，混凝土坍落度由118 mm降至102 mm，降幅达13.6%。研究表明[17-20]，随着骨料含量的增加，混凝土流动性会出现一定程度的下降。抛入的骨料一方面增强了骨料间的机械嵌合作用，压缩了自由水空间。另一方面，抛填骨料充分吸收水分，致使骨料与浆体间界面过渡区的水灰比降低，有利于混凝土内部密实。

进一步对比发现，在20%相同抛填率的条件下，抛填骨料最大粒径为31.5 mm F19P20组的坍落度较最大粒径为19 mm的F31.5P20组低了6.9%（由102 mm降至95 mm）。这一差异可归因于大粒径抛填骨料的比表面积较小，具有更高的吸水特性，在浇筑初期持续吸水减少了自由水含量，进而在一定程度上降低了界面区的水灰比。

表4　混凝土的坍落度

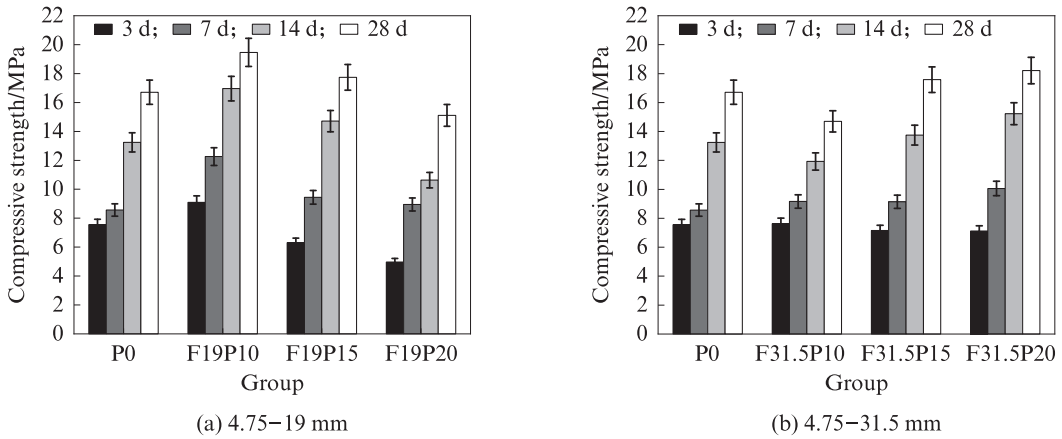
Table 4　Slump of concretes

Group	P0	F19P10	F19P15	F19P20	F31.5P10	F31.5P15	F31.5P20
Slump/mm	124	118	108	102	113	106	95

2.2　抗压强度与劈裂抗拉强度

图3为混凝土的抗压强度。由图3可见：粒径区间在4.75～19 mm的抛填骨料混凝土在抛填率为10%时的抗压强度最佳，相较于基准组提升了16.45%，粒径区间在4.75～31.5mm的抛填骨料混凝土在抛填率为20%时的抗压强度最佳，相较于基准组提升了8.98%。结果表明，双层抛填工艺对混凝土抗压强度的提升效果明显：最大抛填骨料粒径为19 mm双层抛填混凝土的抗压强度随着抛填率的提升，总体上呈现逐步减小的趋势；而最大抛填粒径为31.5 mm的双层抛填混凝土则相反。分析可知，较大粒径的抛填骨料有利于混凝土内部骨料间的相互填充，形成较为密实的骨架结构，提升其强度。而在较小抛填率条件下，更大粒径骨料的嵌锁效应较弱，骨料与浆体间界面过渡区更为薄弱，从而使混凝土的强度下降。

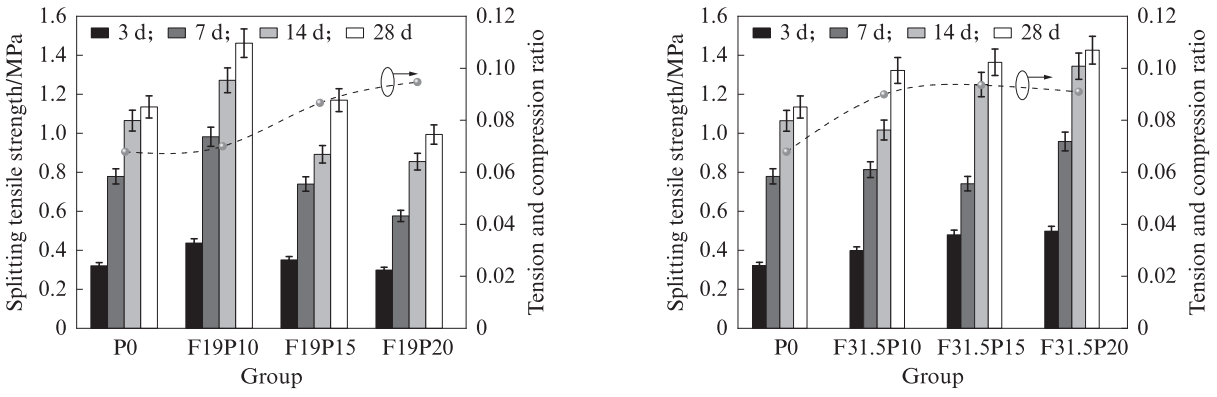
图4为混凝土的劈裂抗拉强度与拉压比。由图4可见：F19P10组与F31.5P20组的劈裂抗拉强度高于其他组，相较于P0组分别提升了29.2%和25.7%；且小粒径抛填骨料混凝土的拉压比与抛填率正相关，说明抛填工艺提升了混凝土的劈裂抗拉性能，增大抛填骨料抛入量可增强混凝土的韧性；大粒径抛填骨料组混凝土在抛填率为20%时出现拉压比下降的现象，这是由于抛入较大粒径骨料使得混凝土内部的骨料嵌锁程度增大，水泥浆体黏结层变薄，混凝土的韧性降低。



(a) 4.75−19 mm　　(b) 4.75−31.5 mm

图3　混凝土的抗压强度

Fig. 3　Compressive strength of concretes



(a) 4.75−19 mm (b) 4.75−31.5 mm

图4 混凝土的劈裂抗拉强度和拉压比

Fig. 4 Splitting tensile strength and tension and compression ratio of concretes

2.3 孔隙分析

2.3.1 孔隙分布特征

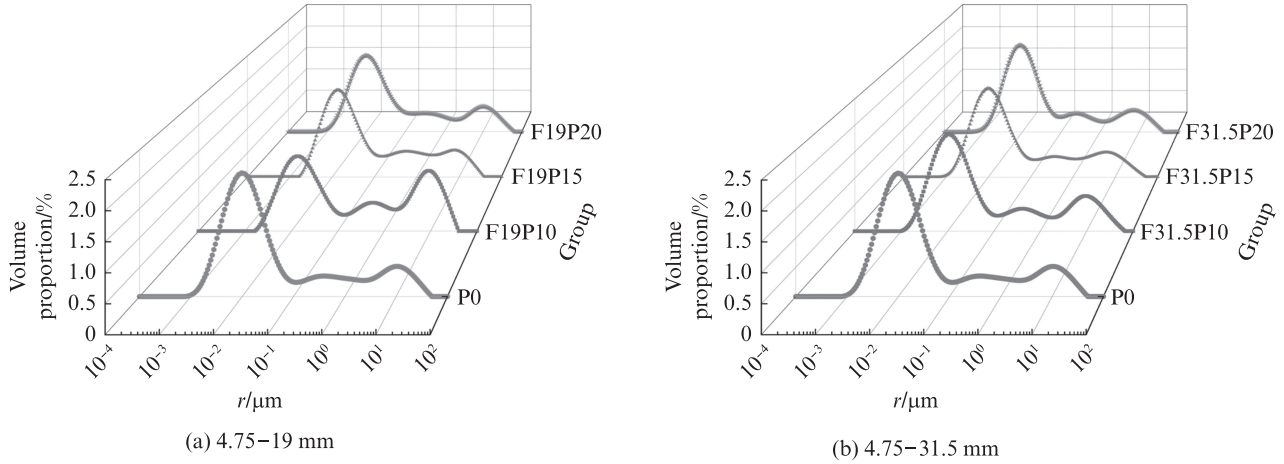
图5为混凝土的28 d孔隙分布曲线。由图5可见:各组混凝土的孔隙半径(r)范围主要为0.000 2～0.100 0、0.100 0～3.000 0、3.000 0～50.000 0 μm,其中0.000 2～0.100 0 μm尺寸的孔隙占比最多,其次为3.000 0～50.000 0 μm孔隙,0.100 0～3.000 0 μm孔隙占比最少;当抛填率为10%时,2种抛填骨料混凝土中半径为0.000 2～0.100 0 μm孔隙的占比最少,半径为3.000 0～50.000 0 μm孔隙的占比最多;当抛填率为20%时,2种抛填骨料混凝土中半径为0.000 2～0.100 0 μm孔隙的占比最多,半径为3.000 0～50.000 0 μm孔隙的占比最少。

2.3.2 孔隙分类

根据Yaman等[24]的研究,可将混凝土中的孔隙分为凝胶孔(r<0.01 μm)、毛细孔(0.01 μm≤r≤10.00 μm)、多害孔(r>10.00 μm)3种。对28 d孔径分布曲线进一步进行划分,得到混凝土的孔隙分类占比,如图6所示。由图6可知:

(1)随着抛填率的增加,混凝土内部有害孔的占比减少,凝胶孔的占比增多。当抛填率为10%时,2种粒径抛填骨料混凝土内部多害孔的占比达到最高,分别为13.67%和10.28%。当抛填率为20%时,2种粒径抛填骨料混凝土内部多害孔的占比有所减小,分别为8.93%和5.68%,凝胶孔占比最多,分别为30.8%和37.2%。

(2)最可几孔径随着抛填率的提高均呈现先增加再减少的趋势。随着抛填率的提升,混凝土内部趋于致密。当抛填率为20%时,最大抛填粒径为31.5 mm抛填骨料混凝土的内部孔隙最为致密。相较于抛入较小粒径区间的抛填骨料,采用较大粒径区间抛填骨料可使混凝土内部的孔隙结构更加致密。抛入的干燥骨料能有效吸收混凝土中的水分,降低水灰比,加快水化进程,改善微观结构;抛入大粒径抛填骨料的混凝土,抛填层骨料间更易形成紧密的嵌锁结构,从而改善局部孔隙结构。



(a) 4.75−19 mm (b) 4.75−31.5 mm

图5 混凝土的28 d孔隙分布曲线

Fig. 5 28 d pore distribution curves of concretes

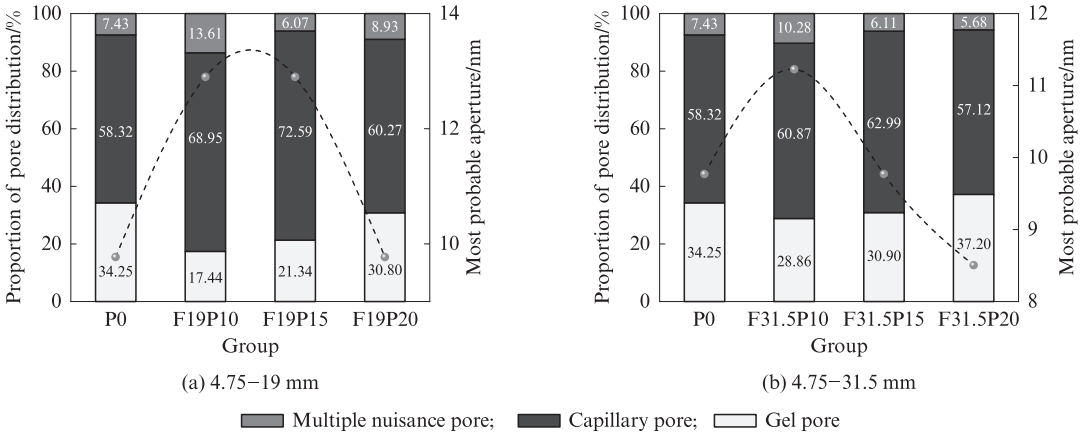


图6　混凝土的28 d孔隙分类占比

Fig. 6　28 d pore distribution of concretes

2.4　界面过渡区的微结构

为探究双层抛填法对轻骨料混凝土骨料与水泥浆体间界面过渡区微结构的影响。采用SEM对其微结构进行了观测，结果如图7所示。

根据骨料−水泥浆体成分的不同，将Ca、Si元素变化交汇处定义为界面过渡区裂缝。由图7可知：界面过渡区裂缝越宽，混凝土的力学强度越低；抛填粒径区间为4.75～19 mm混凝土骨料−水泥浆体界面过渡区的裂缝宽度呈现先减小后增大的趋势；当抛填率为10%时，其界面过渡区最为密实，微观界面裂缝宽度约为1.25 μm，相较于抛填率为20%的F19P20组减少了28.30%；抛填粒径区间为4.75～31.5 mm混凝土骨料−水泥浆体界面过渡区的裂缝宽度逐步减小，当抛填率为20%时，其界面过渡区裂缝宽度为1.65 μm，相较于F31.5P10组减小了24.24%，与宏观力学强度规律相符。原因在于抛填骨料通过吸收部分水分，降低区域水灰比，使得界面过渡区更早形成高强度结构。更大粒径抛填骨料形成了更为密集的骨料互锁结构，从而提升了界面过渡区的交叠程度，增强了内部应力传递效率。

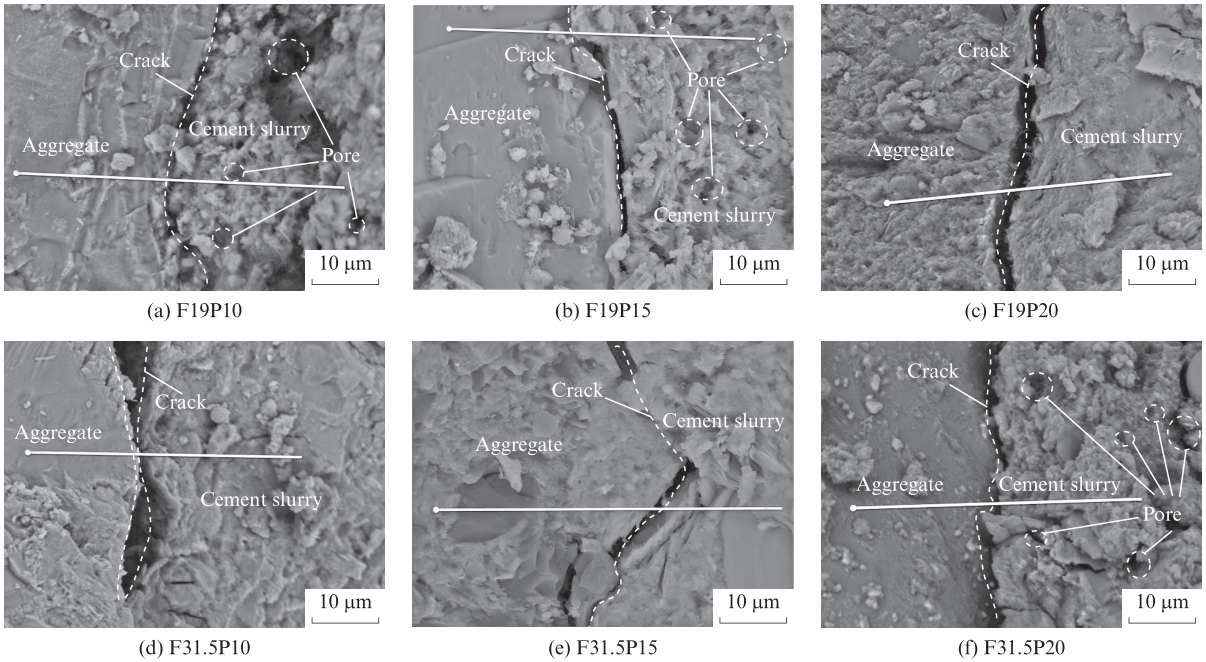


图7　试样的SEM照片

Fig. 7　SEM images of samples

2.5　基于无量纲化处理的应力−应变本构关系及抛填混凝土韧性评估

统计强度理论或统计最弱链理论多年来为传统韧脆性断裂研究奠定了基础[25]。在由多个单元构成的结构体系中，结构的完整性依赖于其最脆弱部分的稳定性。一旦该部分发生破坏，整个结构体

系将面临崩溃的风险。应力-应变关系曲线对双层抛填骨料混凝土在损伤断裂过程中存在的函数关系有着重要揭示作用。研究损伤全过程应力-应变曲线的本构关系，对于深入了解双层抛填轻骨料混凝土的韧脆性关系具有重要意义。通过引入适当的无量纲参数，将原始的物理量无量纲化，消除材料自身尺寸和比例的干扰。本文将材料的弹性模量和特征长度作为无量纲化参数，对应力和应变无量纲化处理。

经过回归分析，发现应力-应变曲线上升段符合二次函数，下降段服从对数函数，其表达式分别为：

上升段：

$$y=a_1x^2+(1.2-0.9a_1)x+b_1,\ 0\leqslant x\leqslant 1 \quad (1)$$

下降段：

$$y=a_2\exp(-x/b_2)+c_2,\ x>1 \quad (2)$$

式中：$x=\varepsilon/\varepsilon_c$；$y=\sigma/\sigma_c$；$\varepsilon$为混凝土的压应变；$\sigma$为混凝土的压应力；$\varepsilon_c$、$\sigma_c$分别为混凝土的峰值应变与峰值应力；$a_1$、$b_1$、$a_2$和$b_2$为描述分段模型曲线特征的形状因子。

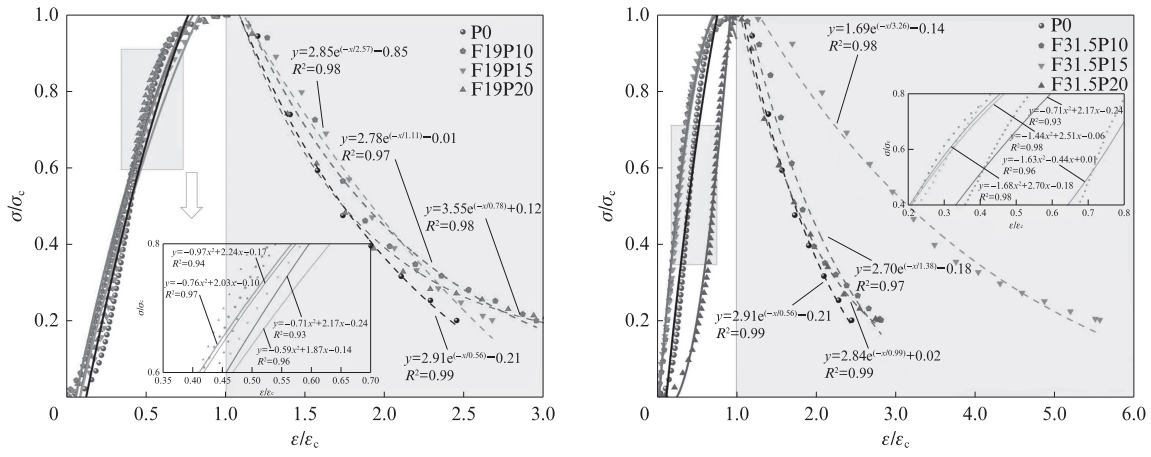
拟合结果如表5所示。

应力-应变拟合曲线对比图如图8所示。由图8可见，在上升段与下降段，拟合曲线与试验数据均吻合良好，方差R^2均在0.9以上。表明采用该分段模型对双层抛填浮石轻骨料混凝土进行应力-应变曲线的非线性分析，具有较高的可行性，可应用于双层抛填工艺浮石轻骨料混凝土的损伤预测当中，为实际工程的运用提供理论参考。

表5 分布参数计算结果

Table 5 Calculation results of distribution parameters

Group	Fitted equation		R^2	
	Incremental portion	Descending branch	Incremental portion	Descending branch
P0	$y=-0.71x^2+2.17x-0.24$	$y=2.91\times\exp(-x/0.56)-0.21$	0.93	0.99
F19P10	$y=-0.76x^2+2.03x-0.10$	$y=2.78\times\exp(-x/1.11)-0.01$	0.97	0.97
F19P15	$y=-0.59x^2+1.87x-0.14$	$y=2.85\times\exp(-x/2.57)-0.85$	0.96	0.98
F19P20	$y=-0.97x^2+2.24x-0.17$	$y=3.55\times\exp(-x/0.78)+0.12$	0.94	0.98
F31.5P10	$y=-1.68x^2+2.70x-0.08$	$y=2.70\times\exp(-x/1.38)-0.18$	0.98	0.97
F31.5P15	$y=-1.44x^2+2.51x-0.06$	$y=1.69\times\exp(-x/3.26)-0.14$	0.98	0.98
F31.5P20	$y=1.63x^2-0.44x+0.01$	$y=2.84\times\exp(-x/0.99)+0.02$	0.96	0.99



(a) 4.75-19 mm (b) 4.75-31.5 mm

图8 应力-应变拟合曲线对比图

Fig. 8 Stress-strain fitting curve comparison chart

基于该应力-应变本构模型对双层抛填骨料混凝土的韧性进行分析，其抗压韧性系数可通过能量比法获得[26]。图9为能量比法计算图。如图9所示，依据ASTM C1018 *Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)*，自曲线初始点至峰值应力点与x轴所围面积A_1为弹塑性损伤阶段混凝土所损耗能量，自峰值应力点至3倍峰值应变点曲线与x轴所围成的面积A_2为失稳破坏阶段混凝土所损耗的能量。韧性指数(I)的计算式为：

$$I=\frac{A_1+A_2}{A_1}=\frac{\int_0^{3\varepsilon_c}\sigma\mathrm{d}\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_c}\sigma\mathrm{d}\varepsilon} \quad (3)$$

脆性指数（B）用以表征混凝土的脆性特性，其计算式为：

$$B=\frac{A_1}{A_2}=\frac{\int_0^{\varepsilon_c}\sigma\mathrm{d}\varepsilon}{\int_{\varepsilon_c}^{3\varepsilon_c}\sigma\mathrm{d}\varepsilon} \tag{4}$$

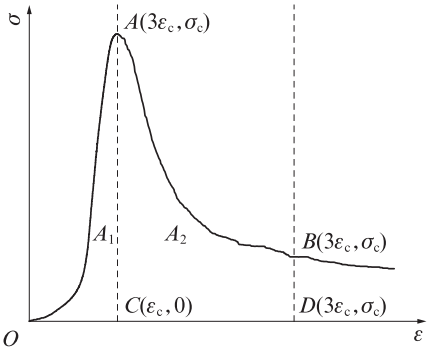


图9　能量比法计算图

Fig. 9　Energy ratio method calculation diagram

各组混凝土的韧性指数与脆性指数如表6所示。由表6可知：I与B之间呈负相关，I与抛填率之间总体上呈现正相关，与拉压比的变化趋势一致；当抛填骨料粒径在4.75～19 mm、且抛填率达到20%时，I值最大，B值最小，I与B值相较P0组分别增长51.9%、下降47.2%，表明增大骨料抛入量可增强混凝土韧性；当抛填骨料粒径为4.75～31.5 mm时，随着抛填率的提升，I值下降，B值上升，推测其原因为骨料粒径过大，骨料嵌锁程度增大，使水泥浆体的黏结层变薄，混凝土韧性降低。

表6　各组混凝土的韧性指数、脆性指数

Table 6　*I* and *B* values of each group concrete

Group	I	B
P0	2.39	0.72
F19P10	2.56	0.64
F19P15	2.61	0.62
F19P20	3.63	0.38
F31.5P10	2.39	0.72
F31.5P15	2.52	0.40
F31.5P20	2.43	0.69

3　结论

（1）双层抛填工艺提升了浮石轻骨料混凝土中粗骨料的体积分数，形成了更为有效的骨料骨架体系。当抛填骨料粒径为4.75～19 mm、抛填率为10%时，双层抛填工艺混凝土的28 d抗压强度比基准混凝土增加了16.45%，劈裂抗拉强度提升了29.2%。当抛填骨料粒径为4.75～31.5 mm、抛填率为20%时，双层抛填工艺混凝土的28 d抗压强度较基准组提升了8.98%，劈裂抗拉强度提升了25.7%。

（2）2种抛填粒径区间的双层抛填浮石轻骨料混凝土微观孔隙均在抛填率为20%时最为致密，内部多害孔的占比分别为8.93%和5.68%，凝胶孔的占比分别为30.8%和37.2%。有害孔和多害孔的占比减少，有利于混凝土强度的提升。

（3）适量的抛填骨料使混凝土内部形成更为密集的骨料嵌锁结构，有效减小界面过渡区的裂缝宽度。当抛填骨料粒径为4.75～19 mm、抛填率为10%时混凝土的裂缝宽度最小，较抛填率为20%时降低了28.30%。当抛填骨料粒径为4.75～31.5 mm、抛填率为20%时，混凝土的裂缝宽度较10%组下降了24.24%。

（4）分段本构方程与抛填骨料混凝土应力-应变曲线拟合程度良好。韧性指数（I）与抛填率之间呈正相关趋势，当抛填骨料粒径为4.75～19 mm、抛填率为20%时，I值最大，脆性指数（B）最小。I值较P0组增长了51.9%，B值较P0组下降了47.2%。

参考文献：

[1] 韩宇，邵梦璇，李彤姝，等. 河套灌区渠系优化配水模型应用研究[J]. 排灌机械工程学报，2022，40(10)：999-1006.
HAN Yu，SHAO Mengxuan，LI Tongshu，et al. Study on optimal water distribution model of canal system in Hetao irrigation district[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2022，40(10)：999-1006.(in Chinese)

[2] WANG H L，SHU L B，MA K L，et al. Durability improvement of pumice lightweight aggregate concrete by incorporating modified rubber powder with sodium silicate[J]. Materials，2024，17(4)：786.

[3] RASHAD A M. A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate[J]. Journal of Building Engineering，2019，25：100802.

[4] AKCAY B，AGAR-OZBEK A S，BAYRAMOV F，et al. Interpretation of aggregate volume fraction effects on fracture behavior of concrete[J]. Construction and Building Materials，2012，28(1)：437-443.

[5] JIN L，YU W X，DU X L，et al. Meso-scale simulations of size effect on concrete dynamic splitting tensile strength：Influence of aggregate content and maximum aggregate size[J]. Engineering Fracture Mechanics，2020，230：106979.

[6] 陈明真，何世钦，王辉，等. 考虑骨架作用的堆石混凝土三维细观建模方法[J]. 建筑材料学报，2025，28(2)：168-175.
CHEN Mingzhen，HE Shiqin，WANG Hui，et al. Three-dimensional mesoscopic modeling method of rock-filled concrete considering skeleton effect[J]. Journal of Building Materials，2025，28(2)：168-175.(in Chinese)

[7] 朱天宇，陈忠辉，张令非，等. 粒径计算方法对细观混凝土数值建模的影响[J]. 建筑材料学报，2024，27(2)：106-113，145.
ZHU Tianyu，CHEN Zhonghui，ZHANG Lingfei，et al. Influence of particle size calculation method on numerical modeling of meso-concrete[J]. Journal of Building Materials，2024，27(2)：106-113，145.(in Chinese)

[8] WANG X X，FENG R R，LI J，et al. Wear characteristics and degradation mechanism of natural pumice concrete under ice friction during ice flood season[J]. Construction and Building Materials，2022，341：127742.

[9] YILMAZOĞLU M U，KARA H O，BENLI A，et al. Sustainable alkali-activated foam concrete with pumice aggregate：Effects of clinoptilolite zeolite and fly ash on strength，durability，and thermal performance [J]. Construction and Building Materials，2025，464：140160.

[10] 张高展，郭凯正，程华强，等. 轻集料用于超高性能混凝土的研究进展[J]. 建筑材料学报，2023，26(8)：886-896，905.
ZHANG Gaozhan，GUO Kaizheng，CHENG Huaqiang，et al. Lightweight aggregate in ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Materials，2023，26(8)：886-896，905.(in Chinese)

[11] 王萧萧，董培森，闫长旺，等. 严寒区浮石混凝土分级评价与孔结构响应阈值[J]. 建筑材料学报，2025，28(6)：526-535.
WANG Xiaoxiao，DONG Peisen，YAN Changwang，et al. Dynamic damage evolution of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete based on acoustic emission technology[J]. Journal of Building Materials，2025，28(6)：526-535.(in Chinese)

[12] KWAN A K H，LI L G. Combined effects of water film，paste film and mortar film thicknesses on fresh properties of concrete[J]. Construction and Building Materials，2014，50：598-608.

[13] SHEN W G，WU M M，ZHANG B L，et al. Coarse aggregate effectiveness in concrete：Quantitative models study on paste thickness，mortar thickness and compressive strength [J]. Construction and Building Materials，2021，289：123171.

[14] 刘家宝，王立权，刘彦彦，等. 利用抛填骨料工艺提升混凝土护栏抗盐冻性能效果分析[J]. 材料导报，2023，37(增刊1)：178-181.
LIU Jiabao，WANG Liquan，LIU Yanyan，et al. Analysis on the effect of improving the salt-freeze resistance of concrete nguardrail by using the technology of scattering-filling coarse aggregate[J]. Materials Reports，2023，37(Suppl 1)：178-181.(in Chinese)

[15] XU G L，SHEN W G，ZHANG B L，et al. Properties of recycled aggregate concrete prepared with scattering-filling coarse aggregate process[J]. Cement and Concrete Composites，2018，93：19-29.

[16] WANG C Q，ZHANG Z Y，LIU X，et al. Elucidating the role of recycled concrete aggregate in ductile engineered geopolymer composites：Effects of recycled concrete aggregate content and size [J]. Journal of Building Engineering，2024，95：110150.

[17] 李将伟，沈卫国，孙明伦，等. 骨架嵌锁生态混凝土性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报，2021，43(6)：1-6.
LI Jiangwei，SHEN Weiguo，SUN Minglun，et al. The study on stone-frame eco-concrete service performance [J]. Journal of Wuhan University of Technology，2021，43(6)：1-6.(in Chinese)

[18] SHEN W G，ZHANG C，LI X L，et al. Low carbon concrete prepared with scattering-filling coarse aggregate process [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials，2014，8(4)：309-313.

[19] 沈卫国. 抛填集料工艺对混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报，2007，10(6)：711-716.
SHEN Weiguo. Effect of scattering-filling aggregate technology on the mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Materials，2007，10(6)：711-716.(in Chinese)

[20] 李明海，许鸽龙，张正，等. 抛填骨料工艺对混凝土抗压强度影响的机理分析[J]. 武汉理工大学学报，2020，42(11)：26-30.
LI Minghai，XU Gelong，ZHANG Zheng，et al. Mechanism analysis of the effect of distributing-filling aggregate process on the compressive strength of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2020，42(11)：26-30.(in Chinese)

[21] 蔡基伟，刘子娴，许鸽龙，等. 骨料嵌锁型混凝土的长期力学性能及抗冻性[J]. 河南大学学报(自然科学版)，2022，52(4)：457-463.
CAI Jiwei，LIU Zixian，XU Gelong，et al. Mechanical properties and frost resistance of aggregate-interlocking concrete at long curing age[J]. Journal of Henan University(Natural Science)，2022，52(4)：457-463.(in Chinese)

[22] 吴家乐，孙江涛，许鸽龙，等. 骨料类型及粒径对抛填骨料混凝土性能的影响[J]. 武汉理工大学学报，2020，42(10)：6-10.
WU Jiale，SUN Jiangtao，XU Gelong，et al. Influence of aggregate types and sizes on properties of the scattering-filling aggregate concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology，2020，42(10)：6-10.(in Chinese)

[23] 沈卫国，马威，郝魏星，等. 3种混凝土浇筑工艺的比较研究[J]. 武汉理工大学学报，2007，29(6)：46-49.
SHEN Weiguo，MA Wei，HAO Weixing，et al. Parallel Investigation on three kinds of concrete placing process[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2007，29(6)：46-49.(in Chinese)

[24] YAMAN I O，HEARN N，AKTAN H M. Active and non-active porosity in concrete Part I：Experimental evidence[J]. Materials and Structures，2002，35(246)：102-109.

[25] 杜修力，金浏. 混凝土材料细观单元弹模非均匀统计特性研究[J]. 工程力学，2012，29(10)：106-115.
DU Xiuli，JIN Liu. Research on the heterogeneous statistical properties of elastic modulus of a concrete meso-scale unit[J]. Engineering Mechanics，2012，29(10)：106-115.(in Chinese)

[26] 董伟，泽里罗布，银英姿，等. 玄武岩纤维风积沙混凝土单轴受压应力-应变试验研究[J]. 西南交通大学学报，2025：1-9[2025-03-22]. https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20240704.1446.006.
DONG Wei，ZELI Luobo，YIN Yingzhi，et al. Experimental study on uniaxial compressive stress-strain behavior of basalt fiber-infused aeolian sand concrete[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2025：1-9[2025-03-22]. https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20240704.1446.006.(in Chinese)