

文章编号:1007-9629(2021)06-1179-08

基于CT技术的掺锂渣再生混凝土孔隙结构特征

陈洁静¹, 秦拥军¹, 肖建庄², 卢义¹

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 利用计算机层析成像(CT)技术对不同再生骨料(RCA)替代率与锂渣(LS)掺量再生混凝土试件的孔隙结构特征进行识别, 基于计算机图像处理技术与三维(3D)建模提取并分析了二维(2D)/3D孔隙结构的特征参数, 同时利用灰色关联理论探究孔隙结构特征参数对混凝土抗压强度的影响程度. 结果表明: LS的加入可以优化再生混凝土的孔隙结构, 促进内部结构致密化与孔隙分布均匀化; 1~2 mm²孔隙表面积分布、平均密实度、平均球体度与抗压强度的灰色关联度均在0.85以上, 表明孔隙结构参数与抗压强度关联性较好.

关键词: CT无损检测; 锂渣; 再生混凝土; 2D/3D孔隙结构; 灰色关联度; 抗压强度

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.008

Pore Structure Characteristics of Recycled Concrete with Lithium Slag Based on CT Technology

CHEN Jiejing¹, QIN Yongjun¹, XIAO Jianzhuang², LU Yi¹

(1. College of Architectural Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830002, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Computed tomography (CT) technology was used to identify the pore structure characteristics of specimens with different recycled coarse aggregate (RCA) substitution rates and different lithium slag (LS) contents. Based on computer image processing technology and three-dimensional (3D) modeling, the characteristic parameters of two-dimensional (2D)/3D pore structure were extracted and analyzed. At the same time, the influence degree of characteristic parameters of pore structure on the compressive strength of the concrete was analyzed by means of the grey correlation theory. The results show that addition of LS can optimize the pore structure of recycled concrete and promote the densification and uniformity of pore structure. The grey relational degree between surface area distribution of 1-2 mm², average compactness, average sphericity and comprehensive strength all exceeds 0.85, indicating that there is a great correlation between pore structure and comprehensive strength.

Key words: CT nondestructive testing; lithium slag; recycled concrete; 2D/3D pore structure; grey relational degree; compressive strength

再生混凝土应用前景广阔,但通常认为再生骨料的初始缺陷会对混凝土整体工作性能造成劣化影响^[1-2]. 锂渣(LS)是锂盐萃取中产生的工业废渣,其堆放占地以及对环境的污染问题愈发需要关注.LS的化学成分与粉煤灰、高炉矿渣非常相似,其SiO₂含量

可达45%~70%,可用于制备不同种类的混凝土^[3-5]. Qin等^[6]发现再生混凝土掺入一定量的LS后,其立方体抗压强度等力学性能优于普通混凝土. 掺LS再生混凝土的发展,可以缓解相关环境污染问题,实现“双废再利用”,兼具生态效益与经济效益.

收稿日期:2020-08-01; 修订日期:2020-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51668061)

第一作者:陈洁静(1994—),女,广东肇庆人,新疆大学硕士生.E-mail: 18826400349@163.com

通讯作者:秦拥军(1970—),男,江苏太仓人,新疆大学教授,博士生导师,博士.E-mail: 13144180978@163.com

计算机层析成像(CT)技术是一种现代无损检测技术,可以非破坏性与非侵入性地进行混凝土组分结构特征与空间分布的研究^[7].Wong等^[8]利用CT技术研究了不同加载状态下普通混凝土和高强度混凝土圆柱体试样内部孔隙与骨料状态的演变;刘京红等^[9]用工业CT技术得到不同加载阶段下混凝土孔隙和裂纹的三维(3D)可视化模型.CT无损技术为研究混凝土细观结构提供了有利条件.

本文利用CT技术对掺锂渣再生混凝土试块进行细观尺度的研究,在计算机图像处理技术与3D可视化模型的辅助下分析了二维(2D)/3D层面下不同再生骨料(RCA)替代率以及LS掺量试块的孔隙结

构特征,运用灰色关联理论探究了混凝土孔隙结构特征参数对宏观力学强度的影响程度.本研究为掺锂渣再生混凝土的实际应用提供了细观层次联系宏观性能的理论支持.

1 试验

1.1 原材料

RCA来源于乌鲁木齐市废弃建筑的拆迁工地,经颚式破碎机二次破碎、筛分后调整粒径为5~31.5 mm连续级配.天然粗骨料(NCA)采用当地卵石,经过清洗与筛分后调整为与再生粗骨料粒径一致.NCA和RCA物理性能指标见表1,其骨料级配曲线见图1.

表1 NCA和RCA物理性能指标
Table 1 Physical indexes of NCA and RCA

Material	Bulk density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Apparent density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Water absorption (by mass)/%	Crush value/%	Ruggedness/%	Mud content (by mass)/%	Fine power content (by mass)/%
NCA	1 536	2 687	0.52		1.0	0.2	0.2
RCA	1 530	2 417	4.40	14	5.2	0.4	0.5

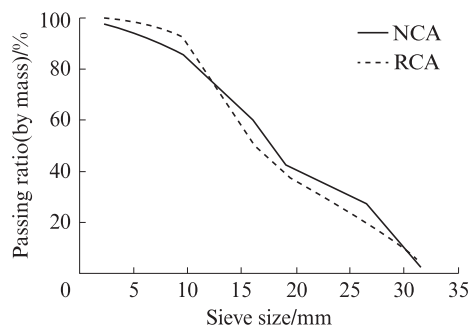


图1 NCA和RCA的骨料级配曲线
Fig. 1 Aggregate grading curves of NCA and RCA

采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥(C);锂渣取自乌鲁木齐锂盐厂,经过烘干及研磨处理后投入试验;细骨料为天然水洗中砂,细度模数为3.5.水泥和锂渣的化学组成^[1]见表2.

1.2 试件的制备

试件的具体配合比参考课题组的研究成果^[10-11],RCA部分替代NCA,LS掺入并减少水泥用量,水灰比为0.45,制备C30掺锂渣再生粗骨料混凝土.将水

泥、锂渣、骨料等采用HJW60型单轴强制式搅拌机搅拌均匀,倒入150 mm×150 mm×150 mm的模具中,试件经过28 d标准养护后,每组随机取3个试件,进行立方体抗压强度测试和CT扫描.抗压强度根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行测试,采用定向荷载控制,加载速率为0.5 MPa/s,结果取平均值.试件配合比与抗压强度见表3,表中 w_{RCA} 、 w_{LS} 分别为RCA的替代率、LS的掺量.

1.3 CT扫描

采用YXLON的Y.CT Compact设备对试件进行扫描,扫描电压为430 V,扫描电流为1.55 mA,最大工作功率为0.70 kW,扫描间距为0.50 mm,放大系数为2.02,扫描方式为线阵扫描.扫描所得混凝土CT图像的分辨率高达3 000×2 084,三相组分在图像上能够相对清晰区分.

1.4 图像处理与2D/3D数据提取

用Matlab函数对CT图像进行预处理^[12].预处理步骤主要包括:增强,以凸显各相形貌信息;滤波除

表2 水泥和锂渣的化学组成
Table 2 Chemical components of cement and LS

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	IL	R ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
C	55.32	25.44	7.06	2.89	2.77	2.25	2.23	0.88	0.67	0.49	
LS	22.02	41.72	18.10	1.24	15.14	0.54	0.40		0.33	0.14	0.37

1)文中涉及的组成、替代率、掺量、水灰比等均为质量分数或质量比.

表3 试件配合比与抗压强度
Table 3 Mix proportions and compressive strength of specimens

Specimen	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						$w_{RCA}/\%$	$w_{LS}/\%$	Compressive strength at 28 d/MPa
	LS	C	Water	Sand	NCA	RCA			
LZ	0	433.00	195.00	523.50	1 221.40	0	0	0	35.56
R0L20	86.60	346.40	195.00	523.50	1 221.40	0	0	20	41.84
R30L0	0	433.00	202.84	523.50	854.98	366.42	30	0	42.26
R30L15	64.95	368.05	202.84	523.50	854.98	366.42	30	15	46.99
R30L20	86.60	346.40	202.84	523.50	854.98	366.42	30	20	49.75
R30L25	108.25	324.75	202.84	523.50	854.98	366.42	30	25	43.97
R50L20	86.60	346.40	208.07	523.50	610.70	610.70	50	20	46.49
R70L20	86.60	346.40	213.30	523.50	366.42	854.98	70	20	45.35

噪,以减少分割的误差;形态学处理.预处理后的CT图像转化为灰度模式,有256个灰度级,根据孔隙所占灰度级的不同,利用最大类间方差法计算出孔隙的阈值,提取出只余孔隙相的二值化图像.利用Image Pro

Plus软件对图像进行孔径、表面积等2D孔隙特征参数提取(见图2),同时使用VG Studio软件,将主视图(front),俯视图(top),右视图(right)三视角度的CT切片构建成交孔隙结构的3D模型(见图3).

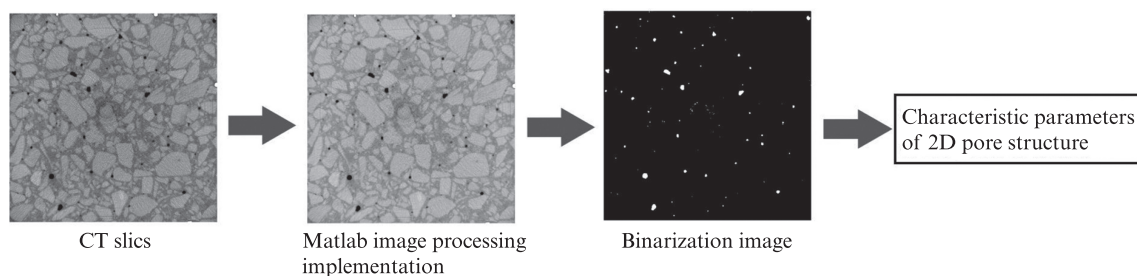


图2 图像处理及2D孔结构提取

Fig. 2 Image processing and 2D pore structure extraction

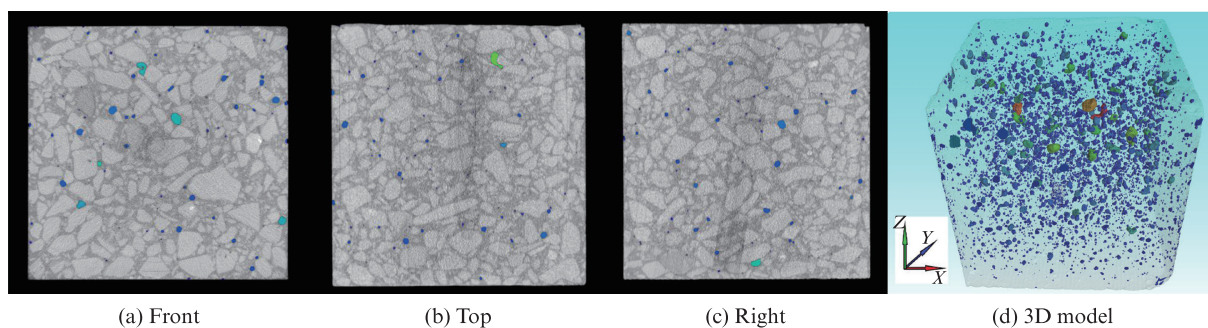


图3 基于三视图的3D模型构建

Fig. 3 3D model construction based on three views

2 2D孔隙结构

2.1 孔隙率

沿Z轴等间距选取30张CT图片进行孔隙结构特征的提取与分析.图4为试件沿Z轴的孔隙率,图中L为距Z轴原点的距离.由图4可见:试件孔隙率沿Z轴变化明显;孔隙率在接近试件上下表面时表现出了离散性波动,而60~100 mm间逐渐趋向于平均值附近.

方差越大,说明孔隙率离散程度越大,孔隙分布越不均匀.试件的平均孔隙率与方差见表4.由表4可见:方差最小值出现在R30L20组;在30%RCA替代率下,方差随着LS的掺入而降低,而25%掺量的LS使试件方差发生了回升,说明适量的LS掺入可有效改善孔隙分布的均匀性,但过量的LS却不利于孔隙分布均匀;R30L0的平均孔隙率最大,比LZ增大了17.213%,这是因为RCA比NCA更粗糙,棱角更分

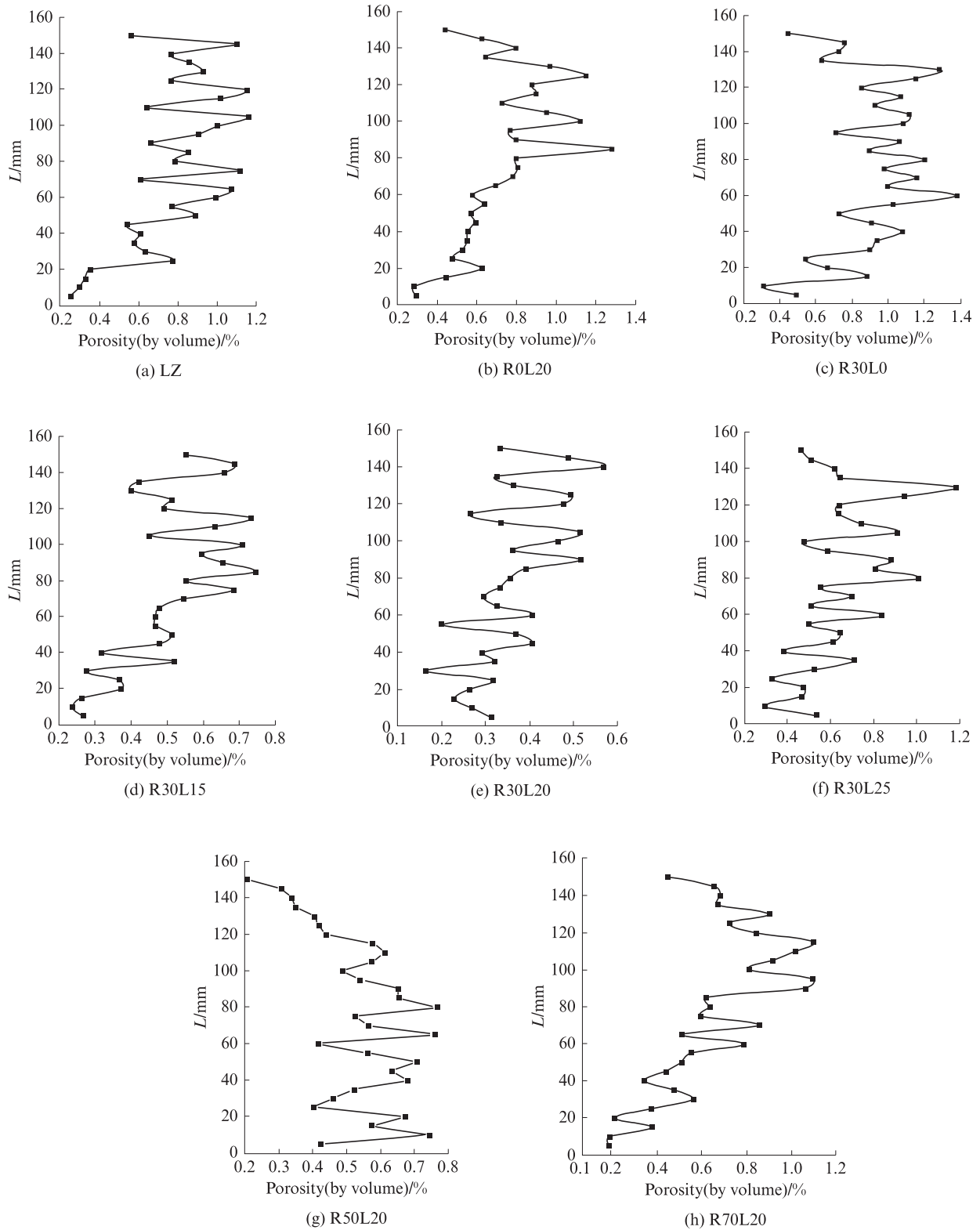


图4 试件沿Z轴的孔隙率

Fig. 4 Porosity along the Z axis of specimens

表4 试件的平均孔隙率与方差

Table 4 Mean porosity and variance of specimens

Parameter	LZ	R0L20	R30L0	R30L15	R30L20	R30L25	R50L20	R70L20
Mean porosity (by volume) / %	0.764	0.708	0.895	0.502	0.359	0.636	0.532	0.637
Variance $\times 10^6$	6.521	5.407	6.320	2.084	0.948	4.069	1.980	6.669

明,其表面包裹的老旧水泥砂浆使其孔隙率有所增加^[13-14];30% RCA 替代率下,R30L15、R30L20、R30L25的平均孔隙率分别比LZ减少了34.321%、53.017%、16.765%,这是因为LS的火山灰效应,使其与水泥水化作用产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行二次水化,生成的水化硅酸钙(C-S-H)胶凝体有填充孔隙作用^[4],此外,经过研磨后的LS粒径小于45 μm ,达到了微集料效应的条件.但LS对平均孔隙率的正面效应影响有递减现象,这意味着其掺量在优化孔隙结构方面有一个极值,可以使再生混凝土内部孔隙结构达到最佳.对此较恰当的解释是:LS具有形态效应^[15],表现为适量的LS能使混凝土需水量不增加或者减少,也会在体系中起到润滑作用,但同时LS具有多孔、疏松结构,颗粒微观形貌不规则,过量的LS会丧失形态效应的优越性,对混凝土孔隙结构、性能造

成不利影响;再者,水泥用量的减少极有可能会发生水化不完全的情况,使LS无法与足够的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生有效反应.LS掺量为20%的试件平均孔隙率均低于LZ,且R30L20的平均孔隙率最小.这是因为R30L20中RCA与LS的用量达到了一个较理想的平衡,且R50L20、R70L20均表现出比普通混凝土更致密的孔隙结构,平均孔隙率比LS分别减少了30.369%、16.568%.

2.2 孔径

有学者根据孔径范围将孔隙分为无害孔、少害孔、危害孔等,并认为一定尺寸的小尺寸孔隙对混凝土的负面影响不明显,而大尺寸孔隙的负面影响较为显著^[16].基于体视学原理的2D层面研究中,一般会把孔隙定义为圆或椭圆^[17-18],利用孔径表征孔隙尺寸,结果见表5,表中 d_{mean} 、 d_{max} 分别为孔隙的平均孔径、最大孔径.

表5 试件的孔隙尺寸
Table 5 Pore size of specimens

Parameter	LZ	R0L20	R30L0	R30L15	R30L20	R30L25	R50L20	R70L20
$d_{\text{mean}}/\text{mm}$	1.878	1.805	1.909	1.451	1.438	1.564	1.544	1.717
d_{max}/mm	14.610	12.039	11.127	7.968	7.589	8.432	8.015	9.056

由表4、5可见:不同配合比试件中孔径的发展趋势与平均孔隙率不同;平均孔隙率最大的R30L0试件平均孔径也最大;30% RCA 替代率下,随着LS掺量的增大,试件最大孔径和平均孔径均先减小后增大,证明了LS对缩小孔隙尺寸所发挥的积极作用;最大孔径出现在LZ组,与孔隙结构最优的R30L20以及RCA替代率最大的R70L20相比,LZ的最大孔径分别提高了48.059%、38.018%.由此推测,NCA的堆积方式与大孔径的出现几率可能有一定的关系.平均孔径是评价试件孔隙结构整体优劣的指标.由表5还可见:R30L0的平均孔径比LZ增大了1.673%;除了R30L0,其他试件的平均孔径均比LZ有一定程度的

降低;当LS掺量为20%时,随着RCA替代率的增大,试件的平均孔径先减小后增大,这表明适量的RCA带来的负面影响是可以在一定程度上被LS所缓解.

对孔径与抗压强度、孔径与平均孔隙率的关系进行分析,其结果见图5.由图5可见:在图示范围内随着最大孔径的增大,试件的抗压强度逐渐降低,二者基于二次方程拟合优度达0.9042;最大孔径与平均孔隙率的正相关趋势较明显,平均孔隙率随着最大孔径的增大而增大;平均孔径与平均孔隙率亦为正相关,但平均孔径与抗压强度基于二次方程的拟合优度不佳.

2.3 表面积分布

孔隙在数量与形态大小上的表征较复杂,以单

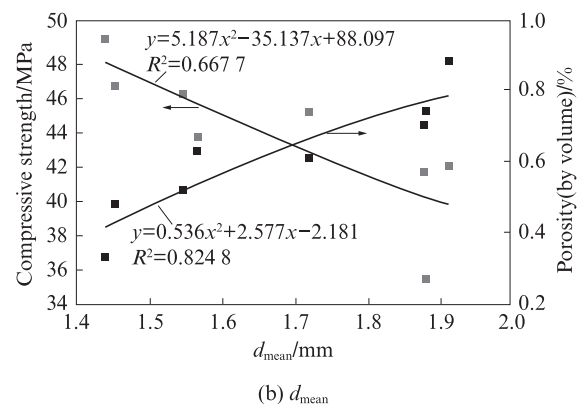
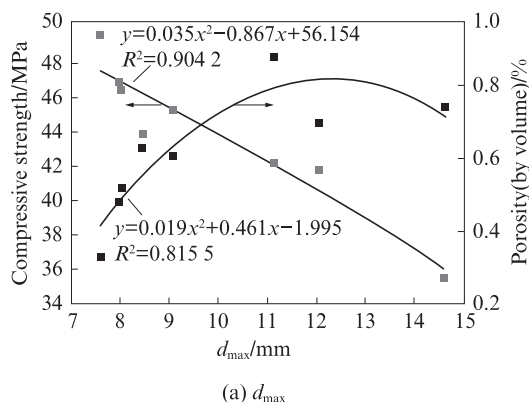


图5 孔径与抗压强度、孔径与平均孔隙率的关系

Fig. 5 Relation among pore diameter, compressive strength and porosity

一均值或极值进行分析难以表现其尺寸分布规律。本文基于统计结果将孔隙表面积 S 从0开始进行分级统计,获得不同表面积下的孔隙占比,结果见图6,图中 S_{ave} 为平均孔隙表面积。由图6可见:整体上看,孔隙面积大都集中在 $0\sim 3\text{ mm}^2$,其占比超过了60%;随着表面积分级的提高,其占比大致呈现减少的趋势;在 $0\sim 2\text{ mm}^2$ 范围的小表面积孔中,小表面积孔占

比随着LS掺量的增大表现出先增加再减少的趋势,而此范围内R30L20的小表面积孔占比R30L0减少了42.710%,证明了20%掺量的LS能显著影响孔隙生长规律,使孔隙总体趋于小孔分布。

综上,适量LS的加入可以优化再生混凝土的孔隙结构,促进内部结构致密化与孔隙分布均匀化。

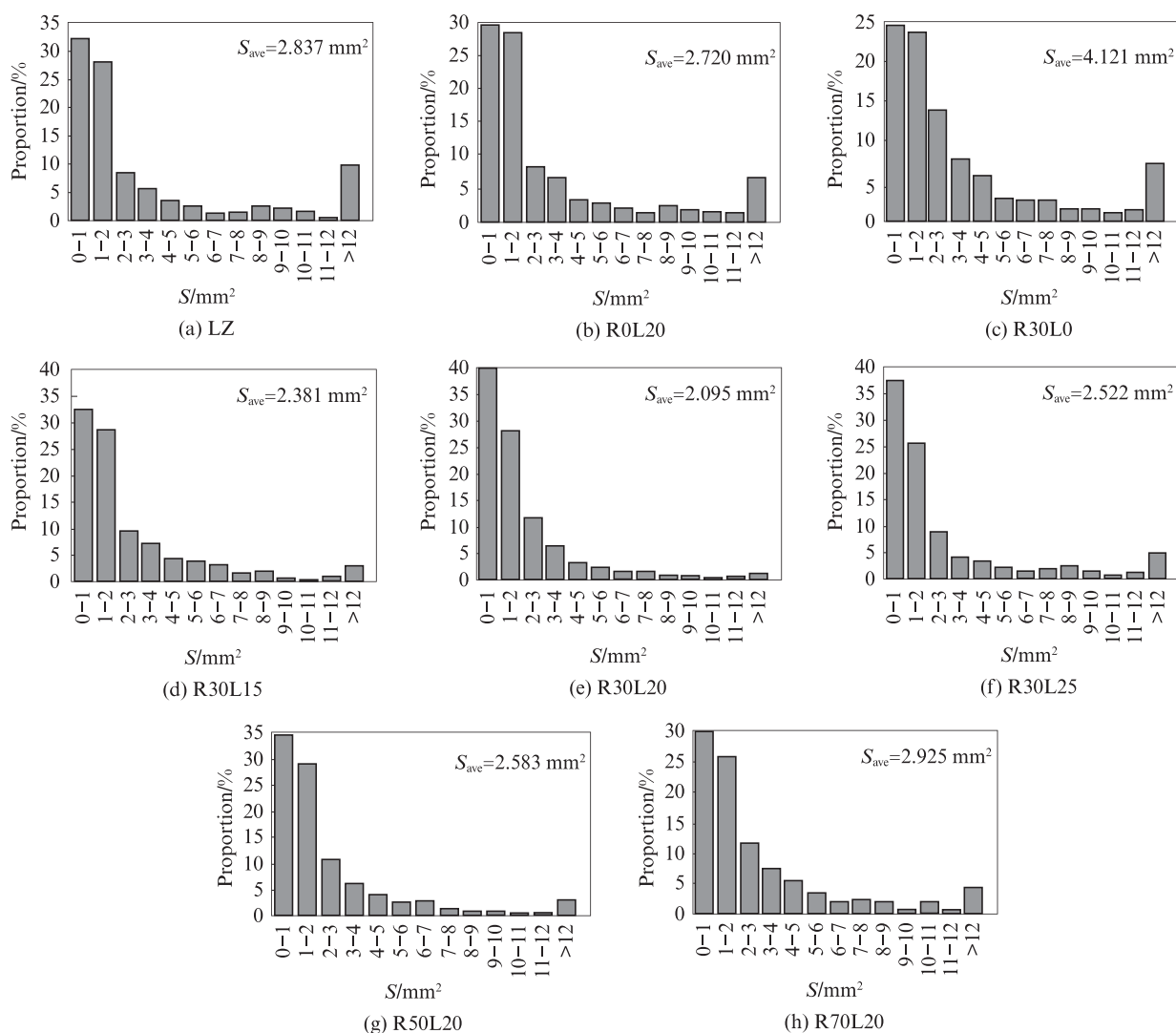


图6 孔隙表面积分布直方图

Fig. 6 Frequency histogram of pore area distribution

3 孔隙3D形态表征

在2D层面的研究中,有学者常用外接椭圆的长轴与短轴之比来量化孔隙偏离椭圆的程度;也有学者提出形状因子^[19],但都是基于与标准圆相比较的思想来实现。基于孔隙3D模型的建立,可以直观孔隙真实形态,可使用密实度(C)与球体度(S_p) 2个形态特征参数对真实孔隙形状进行描述。孔隙的球体度与密实度越接近1,则形态越接近标准圆,其计算

公式为:

$$C = \frac{V_{\text{defect}}}{V_{\text{sphere}}} \quad (1)$$

$$S_p = \frac{\pi^{\frac{1}{3}} (6 \times V_{\text{defect}})^{\frac{2}{3}}}{A} \quad (2)$$

式中: V_{defect} 为孔隙3D体积; V_{sphere} 即以孔隙3D几何体最长轴的1/2为半径的外接球体体积; A 为孔隙3D表面积。

试件的平均密实度 C_{mean} 与平均球体度 $S_{p,\text{mean}}$ 见表

6.由表6可见:30%RCA替代率下,随着LS掺量的增加,试件平均密实度有轻微的下降,而这个趋势在平均球体度中并不明显;在20%LS掺量下,随着RCA替代率的增加,平均球体度也呈现下降趋势。

表6 试件的平均密实度与平均球体度
Table 6 Mean compactness and mean sphericity of specimens

Parameter	LZ	R0L20	R30L0	R30L15	R30L20	R30L25	R50L20	R70L20
C_{mean}	0.311 7	0.314 6	0.351 7	0.332 9	0.329 0	0.309 5	0.328 9	0.327 9
$S_{\text{p,mean}}$	0.603 7	0.608 4	0.616 6	0.613 1	0.617 3	0.605 6	0.615 0	0.605 4

以0.1为间隔对孔隙球体度进行划分,0~0.4与0.8~1.0区间的球体度占比较小且差异不明显,因此将其合并.试件球体度分布见图7.由图7可见:大部分孔隙的球体度在0.5~0.7之间,0.8以上球体度的孔隙占比极少,说明越接近标准圆的孔隙数量越少,因此以标准圆规范孔隙形态的设计与计算存在一定误差;所有试件中球体度大于0.6的孔隙占比均超过50%,可以认为大多数孔隙形态较为理想;掺LS再生混凝土试件的球体度大于0.6的孔隙占比均超过60%,比LZ组提高了12.506%.

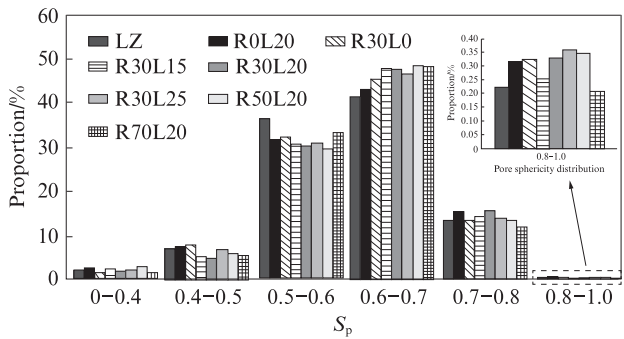


图7 球体度分布直方图
Fig. 7 Proportion histogram of pore sphericity

表7 孔隙表面积与抗压强度的灰色关联度
Table 7 Grey correlation between pore area and compressive strength

S_{ave}	S/mm^2			
	0-1	1-2	2-3	>3
0.752	0.772	0.879	0.669	0.769

表8 孔隙形态特征参数与抗压强度的灰色关联度
Table 8 Grey correlation between pore morphological characteristic and compressive strength

C_{mean}	$S_{\text{p,mean}}$	S_{p}				
		0-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-1.0
0.886	0.968	0.677	0.743	0.740	0.761	0.842

5 结论

(1)30%再生骨料(RCA)替代率下,再生混凝土的平均孔隙率随着锂渣(LS)掺量增大先降低后提高;在20%锂渣掺量下,再生混凝土的平均孔隙率随RCA替代率增加先降低后提高,R30L20平均孔隙率

4 关联性评估

由于孔隙尺寸、分布的复杂性,很难建立每个单一孔隙特征与抗压强度之间的关系.因此,本文利用灰色关联度理论,基于所提取的多个孔隙特征来量化其对抗压强度的影响程度.将孔隙特征相关参数设为比较序列,将抗压强度设为参考序列.根据文献[20],计算各孔隙特征参数与抗压强度的灰色关联度,结果见表7、8.由表7可见:除了2~3 mm²孔隙表面积外,所有试件孔隙表面积与抗压强度的灰色关联度均达到了0.700以上;表面积为0~1、1~2 mm²的孔隙对其抗压强度影响最明显,比平均表面积与抗压强度的灰色关联度分别提高了2.660%、16.888%.由表8可见:在孔隙形态特征参数中,平均密实度、平均球体度与抗压强度灰色关联度达到了0.886、0.968,比平均表面积与抗压强度的灰色关联度分别高了17.819%、28.732%,说明除孔隙的数量与大小之外,孔隙的形态特征对抗压强度的影响也值得关注;随着球体度的增大,其与抗压强度的灰色关联度持续提高,说明孔隙越接近标准圆,其与抗压强度关系更密切。

最低且分布最均匀;平均孔径与平均孔隙率呈正相关,最大孔径与抗压强度拟合优度达0.904 2;适量的LS可以优化再生混凝土的孔隙结构,促进其内部结构致密化与孔隙分布均匀化。

(2)在三维孔隙表征的基础上,大部分孔隙的球体度在0.5~0.7之间,极少出现接近标准圆形态的孔

隙,LS与RCA的共同作用可以提高孔隙整体球体度。

(3)平均球体度、平均密实度与抗压强度的关系紧密,孔隙球体度越接近1,与抗压强度关联性越好;在二维表面积特征参数中,0~1、1~2 mm²的表面积分布与抗压强度关联性较好。

(4)建议采用适用于高密度部件的高压扇束型工业CT扫描技术辅以数字图像处理技术对混凝土进行细观结构无损检测,以实现其强度预测分析。

参考文献:

- [1] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 31(6):364-383.
- [2] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures [M]. Berlin:Springer-Verlag, 2018:65-98.
- [3] WANG Y R, WANG D M, CUI Y, et al. Micro-morphology and phase composition of lithium slag from lithium carbonate production by sulphuric acid process [J]. Construction and Building Materials, 2019, 203:304-313.
- [4] HE Z H, LI L Y, DU S G. Mechanical properties, drying shrinkage, and creep of concrete containing lithium slag [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147:296-304.
- [5] LI J Z, HUANG S W. Recycling of lithium slag as a green admixture for white reactive powder concrete [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2020, 22(6):1818-1827.
- [6] QIN Y J, CHEN J J, LI Z X, et al. The mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete with lithium slag [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019:1-12.
- [7] VICENTE M A, GONZÁLEZ D C, MÍNGUEZ J. Recent advances in the use of computed tomography in concrete technology and other engineering fields [J]. Micron, 2019, 118:22-34.
- [8] WONG R C K, CHAU K T. Estimation of air void and aggregate spatial distributions in concrete under uniaxial compression using computer tomography scanning [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(8):1566-1576.
- [9] 刘京红,史攀飞,杨跃飞,等.基于CT试验的混凝土裂纹扩展演化研究[J].混凝土,2017(4):74-77.
LIU Jinghong, SHI Panfei, YANG Yuefei, et al. Concrete crack evolution research based on CT test [J]. Concrete, 2017 (4):74-77. (in Chinese)
- [10] 李蕾.新疆寒冷地区矿物掺合料再生混凝土配合比设计及其性能研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2014.
LI Lei. Design and performance of recycled concrete with mineral admixtures in cold region of Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2014. (in Chinese)
- [11] 梁芮.乌鲁木齐市废弃混凝土再生粗骨料性能及应用研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2014.
LIANG Rui. Study on performance and application of recycled coarse aggregate of waste concrete in Urumqi [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2014. (in Chinese)
- [12] 杨杰.数字图像处理与MATLAB的实现[M].北京:电子工业出版社,2013:74-98.
YANG Jie. Digital image processing and MATLAB implementation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013:74-98. (in Chinese)
- [13] KOU S C, POON S, ETXEBERRIA M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2):286-291.
- [14] 肖建庄,刘琼,李文贵,等.再生混凝土细观结构和破坏机理研究.青岛理工大学学报,2009,30(4):24-30.
XIAO Jianzhang, LIU Qiong, LI Wengui, et al. On the micro- and meso-structure and failure mechanism of recycled concrete [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(4):24-30. (in Chinese)
- [15] 林玮,孙伟,李宗津.磷酸镁水泥中的粉煤灰效应研究[J].建筑材料学报,2010,13(6):716-721.
LIN Wei, SUN Wei, LI Zongjin. Study on the effects of fly ash in magnesium phosphate cement [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6):716-721. (in Chinese)
- [16] LIU J, QIU Q W, XING F, et al. Permeation properties and pore structure of surface layer of fly ash concrete [J]. Materials, 2014, 7(6):4282-4296.
- [17] KANG S H, HONG S G, MOON J. The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high-performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172:29-40.
- [18] FU J, YU Y. Experimental study on pore characteristics and fractal dimension calculation of pore structure of aerated concrete block [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019:1-11.
- [19] 方永浩,王瑞,庞二波,等.水泥-粉煤灰泡沫混凝土抗压强度与气孔结构的关系[J].硅酸盐学报,2010,38(4):621-626.
FANG Yonghao, WANG Rui, PANG Erbo, et al. Relationship between compressive strength and air-void structure of foamed cement-fly ash concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4):621-626.
- [20] 柯杨,冯诚,周琴,等.基于灰关联理论的混凝土孔结构对强度和耐久性的影响分析[J].混凝土,2019(5):42-47.
KE Yang, FENG Cheng, ZHOU Qin, et al. Analysis of the influence of concrete pore structure on strength and durability based on grey relation theory [J]. Concrete, 2019 (5):42-47. (in Chinese)