

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.185

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



建筑材料密强综合评价方法

郑振^{1a}, 李明东^{1a,1b}, 孙林柱², 舒阳³, 刘客^{1a}

(1. 东华理工大学 a. 土木与建筑工程学院; b. 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013;

2. 温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035; 3. 连云港市住房和城乡建设局, 江苏 连云港 222000)

摘要: 建筑材料具有高强度和低密度的要求, 有必要建立适合优化选择其力学性能的评价指标。在密度和强度评估的背景下, 提出对建筑材料密度和强度进行综合评价的密强法。基于密强法进行了不同材料之间的优选和同一材料不同参数之间的优选, 研究了不同建筑材料的密度和强度参数在密强图的分布情况。结果表明: 不同材料在密强图上的密强不同, 在优选材料时可由密强图分别计算出各材料的相对密强改进量及改进角, 然后进行比选; 同一材料在不同参数下的密度与强度的表现不同, 由密强图可对影响材料性能的因素进行优选; 密强能综合反映建筑材料密度和强度的性质, 是表达材料轻质高强性的一种直观易懂的方法。

关键词: 建筑材料; 高强材料; 密强法; 优选

中图分类号: TU501 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)05-0158-08

Comprehensive evaluation method of density-strength of building materials

ZHENG Zhen^{1a}, LI Mingdong^{1a,1b}, SUN Linzhu², SHU Yang³, LIU Ke^{1a}

(1a. School of Civil and Architectural Engineering; 1b. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment,

East China University of Technology, Nanchang 330013, P. R. China; 2. School of Architectural Engineering,

Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China; 3. Lianyungang Housing and Urban-Rural

Construction Bureau, Lianyungang 222000, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Building materials have requirements of high-strength and low-density, and it is necessary to establish evaluation indexes suitable for optimal selection of mechanical properties. Under the background of density and strength evaluation, a method for comprehensive evaluation of the density and strength of building materials, density-strength method, is proposed. Based on the density-strength method, the optimization of different materials and the optimization of different parameters of the same material are carried out, and the distribution of the density and strength parameters of different building materials in the density-strength diagram is studied. The results show that the density and strength of different materials is different on the density-strength diagram, and when selecting materials, the density-strength diagram can

收稿日期: 2019-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(51609093); 东华理工大学研究生创新基金(DHYC-201931); 江西省“双千计划”创新领军人才项目(李明东)

作者简介: 郑振(1996-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: 211236452@qq.com。

李明东(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: ytlimd@163.com。

Received: 2019-10-15

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51609093) Graduate Innovation Fund of East China University of Technology (No. DHYC-201931); Innovation Forerunner Talents Project of "Double Thousand Plan" of Jiangxi Province (LI Mingdong)

Author brief: ZHENG Zhen (1996-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 211236452@qq.com.

LI Mingdong (corresponding author), PhD, professor, E-mail: ytlimd@163.com.

be used to calculate the relative density improvement amount and the improvement angle of each material for comparison and selection; the density and strength of the same material under different parameters are different, and the factors affecting the properties of the material can be optimized by the density-strength diagram; density and strength can comprehensively reflect the properties of density and strength of building materials, which is an intuitive and understandable method to express the lightweight and high strength properties of materials.

Keywords: building material; high strength material; density-strength; optimum selection

随着建筑物高度的不断增加,多孔混凝土、多孔铝等轻质建材在建筑工程中得到了广泛应用。地下工程、基础工程及公路工程中采用大量轻质土以减小地基荷载。材料科学领域也对材料的轻质高强度存在需求,如航空金属材料在保障强度安全的情况下希望越轻越好,车辆制造材料及一些纤维材料也是如此。一般采用“比强”来进行评价和选用。比强是强度与密度之比,比强越大,材料的轻质高强度越好^[1-3]。如朱伟等^[4]采用比强对砂土 EPS(聚苯乙烯泡沫塑料)颗粒混合轻质土进行了分析,发现混合轻质土的最优击实含水率(使得比强最大的击实含水率)随原材料配方的不同而不同,并且该混合轻质土的最优击实含水率不一定与原料土的最优含水率相关。Narasimman 等^[5]研究了热发泡法制备的碳基复合泡沫材料的力学性能随纤维平均长度和纤维浓度的变化规律。发现该泡沫材料的密度及抗压强度随纤维平均长度的减小而缓慢增加,当碳纤维长度减小到 $33 \mu\text{m}$ 时,材料的抗压强度最大可增加 125%。鹿健良等^[6]对影响陶粒泡沫混凝土强度及表观密度的因素如陶粒掺量、陶砂掺量及水泥用量等进行了研究,发现 0.8 m^3 为陶粒的优选用量,此时材料的表观密度代表值最大,比强代表值最大。Gong 等^[7]及 Gu 等^[8]分别研究了铜元素和铁元素对厘米级钛基金属玻璃力学性能的影响,发现玻璃态合金的屈服强度会随铜与铁加入量的提高而逐渐提高,但压缩性会逐渐降低。加入少量铜与铁元素之后,玻璃态合金的密度会略有增加,但合金的比强度会分别提高 18% 和 12%。张林春等^[9]研究了煤矸石对泡沫混凝土的影响,发现随着煤矸石的掺入引起泡沫混凝土的抗压强度下降,在掺入比为 10% 时,掺煤矸石泡沫混凝土比强值最高;在掺入比为 20% 时,掺煤矸石泡沫混凝土比强值下降到 6.15 N/tex ,无法确认在 10%~20% 的区间内是否有更佳的掺入比。

比强是强度与密度之比,用于评价轻质高强度材

料则存在一定的局限性,它不能反映密度与强度等比增加的情况,容易忽视材料的密度大小,无法保证材料的轻质性,因此,需要建立更合适的方法来对材料的低密度、高强度性能进行评价。用密度和强度建立坐标系,绘制密度-强度关系图,揭示密强指标,给出了密强的评价方法,并分别从不同材料之间和同一材料不同参数之间对建材进行了优选评价。

1 密强法

针对低密度高强度建筑材料的双重需求,建立了能综合考虑材料轻质性与高强性的评价方法,即密强法。运用密强法能直观快捷地对同种材料与不同参数下的性能进行比选,使材料的研制更加便利。

1.1 密度与强度关系图

采用密度强度关系图可对材料的密度和强度进行综合表达,如图 1 所示。密度-强度关系图采用直角坐标系,横坐标为密度,纵坐标为强度,由于材料的密度和强度均大于 0,密度强度关系图仅为坐标系的第一象限部分。其中,强度指标可依据材料的应用环境及破坏方式选取,如选取抗压强度、抗拉强度或抗剪强度。依据密度-强度关系图,可以对材料的密度及强度性能进行直观的整体把控。在密度-强度关系图中,与密度轴平行的直线是强度保持恒定的线,可用作强度的上、下界;与强度轴平行的直线是密度保持恒定的线,可用作密度上、下界;经过原点的直线即为“比强”恒定线。

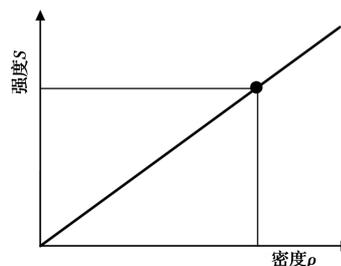


图 1 密强图

Fig. 1 Plot of density-strength

密度-强度关系图中的一个区域可以表达材料密度和强度的变化范围及其相对变化趋势。密强图上的点、线和面都具有特定的物理意义,能综合反映该材料的密度及强度特性。与比强相比,密强在表达材料密度及强度特性时更加直观易懂。

1.2 密强 d_s

密强为密度与强度关系图上从原点到图中任意一点的向量,如图 2 所示,记为 d_s (density strength)。密强对应的数组为 (ρ, S) , ρ 是材料密度的数值, S 是材料强度的数值。

密强的模和方向角是其作为向量的两个参数,密强的模即其长度,是其对应数组的 2-范数;密强的方向角,简称密强角,是从密度轴转向密强的夹角,由于密度与强度关系图在第一象限,因此,密强角在 $0\sim 90^\circ$ 之间。与比强相比,密强角可以表达比强,比强却无法表达密强的模。

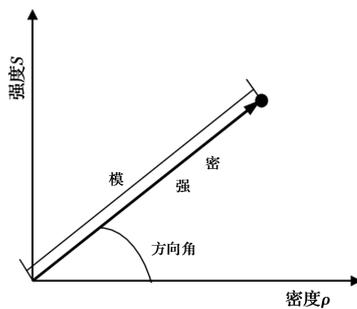


图 2 密强

Fig. 2 Definition of density-strength

1.3 密强的计算

作为向量,密强有和、差、数量积和向量积 4 种计算。密强的和没有物理意义,密强的数量积与向量积可用于直接或间接地计算两密强之间的夹角,继而推算比强的改变,但对密强本身并无实际意义。

密强的差,即密强的变化,可用于密强的比较和优选,具有明确的物理意义。其计算方法如式(1)所示。

$$\Delta d_s = d_{s2} - d_{s1} = (\rho_2, S_2) - (\rho_1, S_1) = (\rho_2 - \rho_1, S_2 - S_1) \quad (1)$$

密强的变化可分为沿原密强方向即比强恒定的变化和垂直于原密强方向的变化,垂直于原密强方向的变化又可以分为密强提高的(密度不变或减小、强度增大)变化和密强降低的(密度增大、强度减小的)变化。如图 3 所示,定义沿原密强方向的变化为密强的延伸,垂直于原密强方向的变化为密强的改

进。密强的延伸和改进用代数值可分别表示为密强的延伸量和密强的改进量。利用向量的差、数量积及向量积运算可以得到密强的延伸量和改进量,其计算方法分别如式(2)和式(3)所示。

密强的延伸量

$$\Delta y = \frac{\Delta d_s \cdot d_{s1}}{|\Delta d_s| \cdot |d_{s1}|} \cdot |\Delta d_s| = \frac{\Delta d_s \cdot d_{s1}}{|d_{s1}|} = \frac{(\rho_2 - \rho_1, S_2 - S_1) \cdot (\rho_1, S_1)}{\sqrt{\rho_1^2 + S_1^2}} \quad (2)$$

密强的改进量

$$\Delta c = \frac{|\Delta d_s \times d_{s1}|}{|\Delta d_s| \cdot |d_{s1}|} \cdot |\Delta d_s| = \frac{|\Delta d_s \times d_{s1}|}{|d_{s1}|} = \frac{\sqrt{(\rho_2 S_1 - \rho_1 S_2)^2}}{\sqrt{\rho_1^2 + S_1^2}} \quad (3)$$

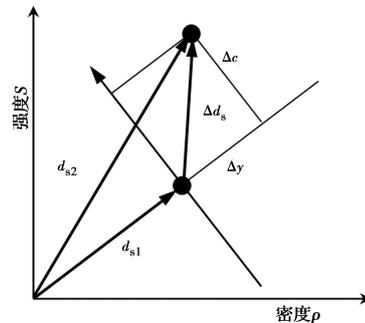


图 3 密强的计算示意图

Fig. 3 Calculation method of density-strength

1.4 密强的优选原则

通过对两个或多个密强之间的比较,可以对密强进行优选,主要方法是比较密强的改进量。对于两个密强,当材料的密度和强度均满足实际工程要求时,使密强的相对改进量大于零的密强较好;对于多个密强,与其他密强相比改进量均大于零的密强最好,它使得材料具有最好的轻质高强度性。当密强的相对改进量等于零,即两种或多种材料比强相等时,使密强的延伸量大于零的密强较好。

2 基于密强的建筑材料轻质高强度性

2.1 典型建筑材料的密强

对一些轻质建筑材料的密度及强度参数进行归纳整理并绘制出各材料在密强图上的分布,如图 4 所示。各材料在密强图上的分布区域与分布面积有较大差别。材料的分布区域越靠近右上角,其密强的模就越大,材料的分布区域越靠近左上角,其密强的方向角就越大,即比强越大。根据材料在建筑中的不同受力特征,材料的强度参数在密强图上分布

呈 3 个区域:强度 $S > 30 \text{ MPa}$, $3 \text{ MPa} \leq S < 30 \text{ MPa}$, $S < 3 \text{ MPa}$ 的区域称为①区、②区和③区。①区中的材料多用于建筑结构中受力的构件,如梁、柱、剪力墙等;②区中的材料多用于建筑物起填充作用的构件,如填充墙、隔墙等;③区中的材料多用于基础回填土、路基、桥面铺设用土等。在工程中进行材料的比选时,可根据材料的分布区域与材料的实际用途进行优选。

材料的分布面积受材料的制备条件与材料各成分的含量影响较大。如尚建丽等^[10]制备的地聚物多孔轻质高强材料,该材料的抗压强度会随着超细矿渣粉与粉煤灰的掺量的增加而增加,最高可达 5.9 MPa ,而其表观密度仅为 0.51 g/cm^3 。蔡爽等^[11]制备的淤泥-粉煤灰陶粒的强度会随着焙烧温度的增加而增加,其表观密度会随着焙烧温度的增加而减少。因此在制备新型材料时,可根据材料密强图对影响材料性能的因素进行制备参数的优选。图 4 中材料 6、7、8^[12-14]分布区域较小,数据点较为集中,说明此类材料的力学性能较为稳定,受各因素影响较小。而材料 1、2、3、4、5^[10-11,15-17]分布区域较大,数据点较为分散,在制备此类材料时需严格控制环境条件及各成分的用量。

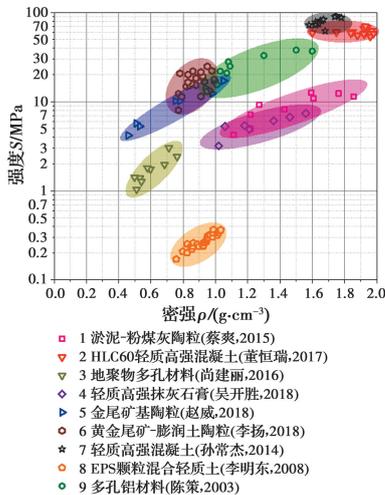


图 4 一些轻质建筑材料的密强图
Fig. 4 Density-strength of some lightweight building materials

图 4 中,一些材料分布的椭圆形区域长轴斜率较小,如材料 1、2、4、5、7,这些材料的强度变化率相对较小,密度变化率相对较大。因此,在制备这类材料时,应优先对影响材料密度的因素进行控制,使其密度的极差保持在一个相对较小的范围内。同理,材料 3、6、8 分布的椭圆形区域长轴斜率较大,因此制备这类材料时,应优先对其强度影响因素进行控制。

2.2 密强在不同建筑材料优选中的应用

在实际工程中对材料进行优选时,可根据材料在密强图上的分布区域及密强的优选原则进行比选。图 5 中,以抗拉强度为标准时,多孔铝合金、铝合金及钢材都位于①区。当材料的强度和密度均满足实际工程要求时,分别对其密强进行计算。

$$\text{钢材平均抗拉强度密强 } d_{s1} = (7.85, 432.5)$$

$$\text{铝合金平均抗拉强度密强 } d_{s2} = (2.74, 405)$$

$$\text{多孔铝材料}^{[18]} \text{平均抗拉强度密强 } d_{s3} = (1.14, 24)$$

$$\Delta d_{s1} = d_{s2} - d_{s1} = (-5.11, -27.5) \quad (4)$$

$$\Delta d_{s2} = d_{s3} - d_{s2} = (-1.6, -381) \quad (5)$$

代入式(2)、式(3)得出铝合金相对于钢材的密强延伸量及改进量分别为 $\Delta y = -27.59$ 、 $\Delta c = 4.61 > 0$ 。多孔铝材料相对于铝合金的密强延伸量及改进量分别为 $\Delta y = -381$ 、 $\Delta c = -0.97 < 0$ 。因此,铝合金较钢材有着更好的轻质高强性。一些超高层建筑、大跨度桥梁中影响较大的受拉构件等需要用到金属材料的地方,均可采用铝合金代替钢材作为主要受拉材料。

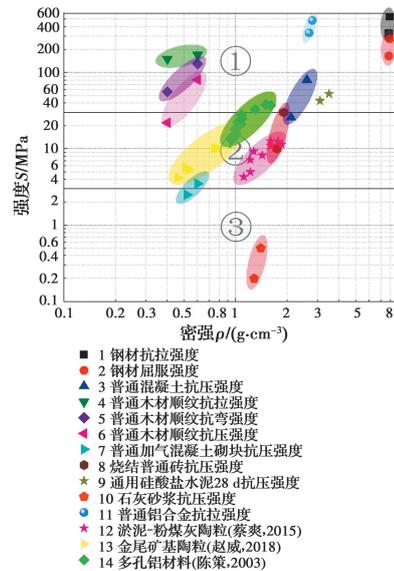


图 5 建筑材料的密强图^[19]

Fig. 5 Density-strength of common building materials^[19]

木材与混凝土作为传统的建筑材料分布于②区;淤泥粉煤灰陶粒^[11]和金尾矿基陶粒抗压^[17]作为新型材料同样分布于②区。分别对这 4 种材料进行密强计算。

$$\text{混凝土平均抗压强度密强 } d_{s1} = (2.35, 51)$$

$$\text{木材顺纹抗压强度密强 } d_{s2} = (0.5, 52.9)$$

$$\text{淤泥粉煤灰陶粒}^{[11]} \text{抗压强度密强 } d_{s3} = (1.45, 9)$$

$$\text{金尾矿基陶粒抗压}^{[17]} \text{强度密强 } d_{s4} = (1.14, 24)$$

$$\Delta d_{s1} = d_{s2} - d_{s1} = (-1.85, 1.9) \quad (6)$$

$$\Delta d_{s2} = d_{s3} - d_{s2} = (0.95, -43.9) \quad (7)$$

$$\Delta d_{s3} = d_{s4} - d_{s2} = (0.64, -28.9) \quad (8)$$

代入式(2)、式(3)得出木材相对于混凝土的密强延伸量及改进量分别为 $\Delta y=1.81, \Delta c=1.94 > 0$; 淤泥-粉煤灰陶粒相对于木材的密强延伸量及改进量分别为 $\Delta y=-43.88, \Delta c=-1.4 < 0$; 金尾矿基陶粒相对于木材的密强延伸量及改进量分别为 $\Delta y=-28.89, \Delta c=-0.91 < 0$ 。因此,木材有着更好的轻质高强度。并且木材还有着更为优越的抗拉及抗弯强度。若采用比强法对材料进行分析,在坐标轴上只有角度的变化,无法计算密强的改进量,判断不出材料的轻质性和高强度。

因此,在设计低层建筑时,可采用轻木结构作为承重及围护材料。17 世纪日本最常见的町屋及现今的装配式住宅大多都采用轻木结构。在高层建筑中,国外也有采用预制大型木构件建造房屋各个组成部分的案例,即采用重木结构。如 2015 年挪威卑尔根市建成的 14 层塔式木结构公寓楼,具有较好的结构完整性和稳定性^[20]。在基础工程中为了减少地基上部荷载以及在桥梁路面工程中减少桥梁承重,可采用轻质土材料,如 EPS 颗粒混合轻质土(LSES),LSES 在原土样的基础上,强度有所提高,并且 LSES 的密度相对于原土样降低了近 50%,是一种性质优越的轻质土^[14,20]。

2.3 密强在同一建筑材料参数优选中的应用

当确定了所用材料之后,由于材料在不同条件下的性质会有所差别,因此,在面临同一材料不同参数的优选时,可利用材料密强图,进行材料制备条件的选择。

2.3.1 密强在轻质填土优选中的应用 以 EPS 颗粒混合轻质土(LSES)为例^[4,14,21-23],针对 LSES 的密强,对其影响因素进行优选。击实含水率影响 LSES 物理力学性质的试验配比如表 1 所示^[21]。

表 1 击实含水率影响物理力学性质的试验的配方设计

Table 1 Factors and levels for determining the optimum moisture content of EPS beads mixed lightweight soil

配比	EPS 颗粒体积 置换率/%	水泥添加量/ (kg · m ⁻³)	$\omega_{opt}/\%$
配比 1	0	40	3.7
配比 2	60	120	11.4
配比 3	33	100	6.5
配比 4	50	60	6.1
配比 5	67	160	13.8

由击实含水率对 LSES 的密强影响,可确定 LSES 的最优击实含水率。LSES 的密强改进量、延伸量和改进角随击实含水率变化的情况分别如图 6~图 8 所示。图 6 中:对于研究中的 5 个配比,LSES 的密强的改进量随击实含水率的增加呈现出逐渐减小的趋势,密强的改进量在击实含水率较小时大于 0,它随着击实含水率的增加逐渐减小,并逐渐趋近于负值。即 LSES 的密强先出现优化后逐渐劣化,并存在一个最优值,即为最优击实含水率所对应的密强,具体取值为最后一个密强改进量大于 0 的击实含水率。图 7 中:LSES 密强的延伸量随击实含水率的增加整体上呈现出先增加后减小的趋势,中间存在一个击实含水率使得 LSES 的强度最高。图 8 中:LSES 密强的改进角和密强的改进量随击实含水率的增加也逐渐呈现先大于 0 后小于 0 的减小趋势。

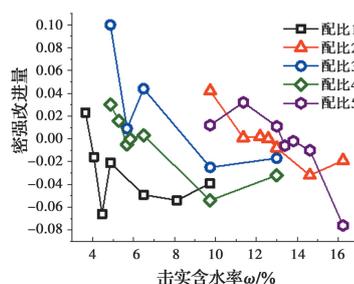


图 6 击实含水率对密强改进量的影响

Fig. 6 Effect of water content on improvement of density-strength

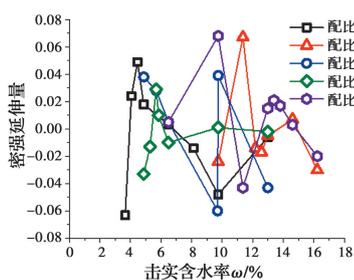


图 7 击实含水率对密强延伸量的影响

Fig. 7 Effect of water content on extension of density-strength

综上所述可知,LSES 密强的改进量随击实含水率的变化呈现先大于零后小于零的变化。存在使密强最优的击实含水率,即使得密强改进量大于 0 的最大的击实含水率,将此含水率定义为 LSES 的最优击实含水率,用符号 ω_{opt} 来表示。各配比下的 LSES 的最优击实含水率如表 1 所示。

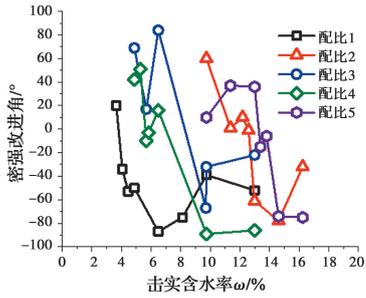


图 8 击实含水率对密强改进角的影响

Fig. 8 Effect of water content on improved angle of density-strength

2.3.2 密强在多孔混凝土优选中的应用 以掺煤矸石泡沫混凝土为例^[9],针对掺煤矸石泡沫混凝土的密强,对其影响因素进行分析。掺煤矸石掺入比影响泡沫混凝土物理力学性质的试验配比如表 2 所示^[9]。

表 2 (节选)掺煤矸石泡沫混凝土配合比(质量比)

Table 2 (excerpts)Mixing proportion of foamed concrete mixed with coal gangue (mass ratio)

配比	煤矸石掺入比/%	水泥-煤矸石混合总质量/(kg·m ⁻³)	细砂掺入量/(kg·m ⁻³)	R _{opt} /%
配比 1	0、10、20、30、40、50	400.5	400.7	15.78
配比 2	0、10、20、30、40、50	456.5	456.5	13.83

由煤矸石对泡沫混凝土的密强影响,可确定掺煤矸石泡沫混凝土的最优掺入比。掺煤矸石泡沫混凝土的密强改进量、延伸量随煤矸石掺入比变化的情况分别如图 9、图 10 所示。图 9 中:对于研究中的 2 个配比(3 个龄期),掺煤矸石泡沫混凝土的密强的改进量随煤矸石掺入比的增加呈现出先增大后减小的趋势,密强的改进量在煤矸石掺入比时大于 0,它随着煤矸石掺入比的增加逐渐减小,并迅速趋近于负值。即掺煤矸石泡沫混凝土的密强出现先优化后逐渐劣化,并存在一个最优值,即为最优煤矸石掺入比所对应的密强,具体取值为最后一个密强改进量大于 0 的煤矸石掺入比。图 10 中:掺煤矸石泡沫混凝土密强的延伸量随煤矸石掺入比的增加整体上呈现出减小的趋势,中间存在一个煤矸石掺入比使得掺煤矸石泡沫混凝土的强度最高。

由此可见,掺煤矸石泡沫混凝土密强的改进量随煤矸石掺入比的变化呈现先大于零后小于零的变化。存在使密强最优的煤矸石掺入比,即使得密强

改进量大于 0 的最大的煤矸石掺入比,用符号 R_{opt} 来表示。

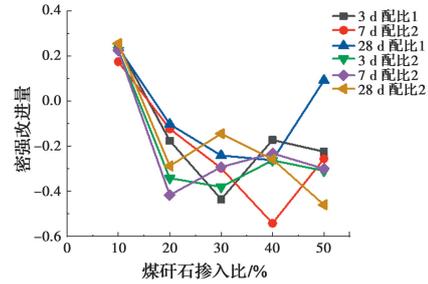


图 9 煤矸石掺入比对密强改进量的影响

Fig. 9 Dosage of coal gangue powder on improvement of density-strength

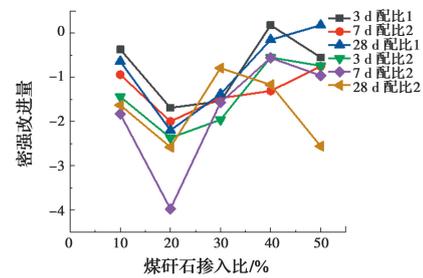


图 10 煤矸石掺入比对密强延伸量的影响

Fig. 10 Dosage of coal gangue powder on extension of density-strength

3 结论

通过对低密度高强度建筑材料的双重需求分析,建立了密强法,能够综合考虑材料轻质性与高强度性,研究了不同建筑材料的密度和强度参数在密强图的分布情况,得到以下结论:

- 1)密强 d_s 能综合反映建筑材料密度和强度的性质,是表达材料轻质高强度性的一种直观易懂的方法。
- 2)密强可用于实际工程中不同材料的比选。对于两种材料,当材料的密度和强度都满足实际工程要求时,使密强的相对改进量大于零的材料较好;对于多种材料,与其他材料相比密强改进量均大于零的材料最好,能反映出材料的轻质高强度性。
- 3)密强可用于同一材料不同参数的优选。材料在不同参数下的密度与强度的表现不同,密强图可对影响材料性能的因素进行优选。

参考文献:

[1] PARK G H, KIM J T, PARK H J, et al. Development of lightweight MgLiAl alloys with high specific strength [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016,

- 680: 116-120.
- [2] WU Y P, WANG J Y, MONTEIRO P J M, et al. Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 87: 100-112.
- [3] BENAICHA M, HAFIDI ALAOUI A, JALBAUD O, et al. Dosage effect of superplasticizer on self-compacting concrete: correlation between rheology and strength [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(2): 2063-2069.
- [4] 朱伟, 李明东, 张春雷, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(1): 21-25.
- ZHU W, LI M D, ZHANG C L, et al. The optimum moisture content of sand EPS beads mixed lightweight soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(1): 21-25. (in Chinese)
- [5] NARASIMMAN R, VIJAYAN S, PRABHAKARAN K. Carbon-carbon composite foams with high specific strength from sucrose and milled carbon fiber [J]. *Materials Letters*, 2015, 144: 46-49.
- [6] 鹿健良, 孙晶晶. 陶粒泡沫混凝土配合比试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2012(9): 60-62.
- LU J L, SUN J J. Experimental study on mix ratio of ceramsite foam concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2012(9): 60-62. (in Chinese)
- [7] GONG P, YAO K F, WANG X, et al. Centimeter-sized Ti-based bulk metallic glass with high specific strength [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2012, 22(5): 401-406.
- [8] GU J L, YANG X L, ZHANG A L, et al. Centimeter-sized Ti-rich bulk metallic glasses with superior specific strength and corrosion resistance [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 512: 206-210.
- [9] 张林春, 张爱莲, 王倩, 等. 掺煤矸石泡沫混凝土制备及力学性能 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(9): 2800-2806.
- ZHANG L C, ZHANG A L, WANG Q, et al. Preparation and mechanical properties of foamed concrete mixed with coal gangue [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(9): 2800-2806. (in Chinese)
- [10] 尚建丽, 陈奇侠. 地聚物多孔轻质高强材料的制备及孔结构特性[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(5): 1385-1389, 1395.
- SHANG J L, CHEN Q X. Preparation and pore structure of porous geopolymer material with lightweight and high strength [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(5): 1385-1389, 1395. (in Chinese)
- [11] 蔡爽, 刘向, 李文, 等. 利用东湖淤泥制备轻质高强陶粒的研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(11): 21-25.
- CAI S, LIU X, LI W, et al. Research on preparation of high strength ceramic by using east lake silt [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(11): 21-25. (in Chinese)
- [12] 李杨, 孟凡涛, 王鹏, 等. 黄金尾矿制备轻质高强陶粒的工艺研究[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(8): 1554-1559, 1572.
- LI Y, MENG F T, WANG P, et al. Preparation process of lightweight and high strength ceramics from gold tailings [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(8): 1554-1559, 1572. (in Chinese)
- [13] 孙常杰, 尹红, 李斌斌, 等. 轻质高强混凝土的配制和性能研究[J]. *混凝土世界*, 2014(10): 86-90.
- SUN C J, YIN H, LI B B, et al. Study on preparation and properties of lightweight high strength concrete [J]. *Building Decoration Materials World*, 2014(10): 86-90. (in Chinese)
- [14] 李明东. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土(LSES)的击实特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- LI M D. Study of compaction properties of Lightweight Sand-EPS Beads Soil (LSES) [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese)
- [15] 董恒瑞, 周国平, 邓铃夕. HLC60 轻质高强混凝土试配探索[J]. *重庆建筑*, 2017, 16(5): 50-53.
- DONG H R, ZHOU G P, DENG L X. Exploration on trial preparation of HLC60 [J]. *Chongqing Architecture*, 2017, 16(5): 50-53. (in Chinese)
- [16] 吴开胜, 张传顺. 轻质高强抹灰石膏的配制与性能研究[J]. *砖瓦*, 2018(4): 27-29.
- WU K S, ZHANG C S. Preparation and property of lightweight and high-strength gypsum mortar [J]. *Brick-Tile*, 2018(4): 27-29. (in Chinese)
- [17] 赵威, 王竹, 黄惠宁, 等. 金尾矿基轻质高强陶粒的制备及性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(6): 1266-1271.
- ZHAO W, WANG Z, HUANG H N, et al. Research on preparation and properties of lightweight high-intensity ceramics based on gold tailings [J]. *Journal*

- of Synthetic Crystals, 2018, 47(6): 1266-1271. (in Chinese)
- [18] 陈策,王永进,何德坪. 高比强多孔铝合金的压缩变形性能[J]. 材料研究学报, 2003, 17(3): 230-234.
CHEN C, WANG Y J, HE D P. Study on compressive deformation of porous aluminum alloy with high specific strength [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(3): 230-234. (in Chinese)
- [19] 倪修全,殷和平,陈德鹏. 土木工程材料 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.
NI X Q, YIN H P, CHEN D P. Civil Engineering Material [J]. Wuhan: Wuhan University Press, 2014. (in Chinese)
- [20] 于辉,侯殊贝,吴亮. 高层重木结构建筑的材料选择与设计建构研究[J]. 建筑技艺, 2018(11): 108-110.
YU H, HOU S B, WU L. Research of material selection and design about high-rise building with heavy wooden structure [J]. Architecture Technique, 2018 (11): 108-110. (in Chinese)
- [21] 李明东,朱伟,张春雷,等. 击实参数对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 814-817.
LI M D, ZHU W, ZHANG C L, et al. Effect of compaction parameters on lightweight sand-EPS beads soil [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(6): 814-817. (in Chinese)
- [22] 李明东,朱伟,马殿光,等. EPS 颗粒混合轻质土的施工技术及其应用实例[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 533-536.
LI M D, ZHU W, MA D G, et al. Construction technology and application in situ of expanded polystyrene treated lightweight soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 533-536. (in Chinese)
- [23] LI M D, WEN K J, LI L, et al. Mechanical properties of expanded polystyrene beads stabilized lightweight soil [J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(3): 459-474.

(编辑 胡玲)