



矿物掺合料再生骨料混凝土的力学及耐高温性质研究

尹晓娟

(山西工程科技职业大学, 山西 晋中 030619)

摘要: 为了研究矿物掺合料对再生骨料混凝土的基本特性及耐高温特性的影响, 利用飞灰、铁渣和稻壳灰对再生骨料混凝土进行改性, 并进行高温和力学实验。结果表明, 随着温度的升高, 试样的密度和超声波速不断下降; 添加法制备的试样的密度和超声波速大于替代法制备的试样; 抗压强度和相对弹性模量随着矿物掺量的增加先增后减, 在5%~10%时达到较大值。随着温度的增加, 抗压强度先增后减, 在100℃时达到较大值; 且以添加法掺入矿物掺合料时, 试样的强度和弹性模量较高。对再生骨料混凝土耐高温性能的增强作用飞灰>铁渣>稻壳灰。此外, 采用替代法时混凝土的密度与抗压强度、密度与弹性模量和超声波速与抗压强度间的相关性较好; 而采用添加法时各个参数之间的相关性较差。

关键词: 再生骨料混凝土; 矿物成分; 密度; 抗压强度; 超声波速; 相关性分析

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.025

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)04-0143-09

社会的发展消耗了大量的自然资源,为了保护自然资源和满足工程建设的需求,需要对混凝土材料进行再生利用。但再生骨料混凝土有强度低、耐久性差、易碳化等缺点^[1]。因此需要对再生骨料混凝土进行改性,矿物成分就是最常用的改性材料。

研究表明,一定掺量的粉煤灰可以提高混凝土的强度和耐久性,降低再生骨料混凝土的徐变^[2-3];利用纳米碳酸钙和纳米二氧化硅对再生骨料混凝土的改性研究表明,纳米二氧化硅能够很好地改善再生骨料混凝土的微观结构,提高其抗压强度、抗拉强度和冲击强度;相比之下纳米碳酸钙对强度的增强作用较弱^[4-6]。此外,许多国内外的学者也对硅粉^[7]、铁尾矿砂^[8]、镍铁渣^[9]和飞灰^[10]等对再生骨料混凝土基本特性的影响进行了研究,结果证明了这些矿物成分对再生骨料混凝土的力学、耐久性以及微观结构均有较为明显的影响。

综上所述,目前矿物成分对再生骨料混凝土的研究工作大部分集中于硅粉、飞灰、铁渣和矿渣等对再生骨料混凝土的强度以及微观结构影响

方面;但对矿物成分的掺入方法对再生骨料混凝土基本特性以及矿物成分改性再生骨料混凝土的耐高温特性的影响较为缺乏。因此本文利用飞灰、镍铁渣(简称铁渣)以及稻壳灰通过添加和替代的方式对再生骨料混凝土进行改性,并对改性后的再生骨料混凝土进行耐高温性能测试;以获得不同矿物成分和不同掺入方法对再生骨料混凝土基本特性的影响规律。

1 实验材料和实验方法

1.1 实验材料

实验所用的胶凝材料为42.5#普通硅酸盐水泥,水泥的密度为3.15 g/cm³,飞灰的密度为2.31 g/cm³,铁渣的密度为2.57 g/cm³,稻壳灰的密度为2.43 g/cm³。水泥和矿物掺合料的XRF测试结果见表1。

天然细骨料为河砂;天然粗骨料为破碎的大理石,再生粗骨料是对旧混凝土进行破碎、筛分和清洗后获得的;天然粗骨料和再生粗骨料的粒径均为20 mm。天然细骨料、天然粗骨料和

收稿日期: 2021-06-21; 改回日期: 2021-07-15

作者简介: 尹晓娟(1983-),女,讲师。研究方向为混凝土材料与项目管理。

表 1 材料的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of the material

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	烧失量
水泥	22.66	4.88	3.58	64.74	0.88	2.14	0.00	1.12
飞灰	93.05	2.24	1.21	0.31	0.97	0.11	0.86	1.25
高炉铁渣	33.91	21.35	1.45	30.22	9.48	0.19	0.85	2.55
稻壳灰	29.30	13.79	4.94	45.35	3.92	0.28	0.73	1.69

再生粗骨料的基本性质见表 2。

1.2 配合比设计和试样制备

本实验所采用的水灰比为 0.45；为研究矿物掺合料和再生粗骨料对混凝土基本特性的影响，利用 100% 天然粗骨料制备了混凝土试样作为对照组；其他的试样则采用 100% 的再生粗骨料进行制备。同时，为了分析矿物掺合料的掺量以及掺入方式对混凝土强度以及耐高温的特性的影响规律，本研究采用直接添加法和替代水泥法两种方式进行矿物成分的掺入，添加和替代比例均设置

为 0%、5%、10% 和 15%。具体的试样分组和配合比见表 3。其中，NC 为对照组、RC 为再生骨料混凝土；S、F 和 H 分别代表铁渣、飞灰和稻壳灰；S 和 A 则分别代表替代和添加矿物掺合料。

表 2 骨料的物理性质
Table 2 Physical properties of aggregate

名称	最大粒径/ mm	密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率/ %	堆积密度/ (kg·m ⁻³)
河砂	5	2640	2.44	2620
天然粗骨料	20	2830	1.29	2450
再生粗骨料	20	2410	0.85	2310

表 3 试样分组及混凝土配合比/(kg·m⁻³)
Table 3 Grouping of samples and concrete mix ratio

分组	样本编号	水泥	水灰比W/C	飞灰	高炉铁渣	稻壳灰	河砂	粗骨料	减水剂
对照组	NC	429	0.45				725	973	35
	RC-0%	429	0.45				747.5	832	35
	RC-F5%-A	429	0.45	21.5			747.5	832	35
	RC-F10%-A	429	0.45	42.9			747.5	832	35
	RC-F15%-A	429	0.45	64.5			747.5	832	35
A (添加)	RC-S5%-A	429	0.45		21.5		747.5	832	35
	RC-S10%-A	429	0.45		42.9		747.5	832	35
	RC-S15%-A	429	0.45		64.5		747.5	832	35
	RC-H5%-A	429	0.45			21.5	747.5	832	35
	RC-H10%-A	429	0.45			42.9	747.5	832	35
	RC-H15%-A	429	0.45			64.5	747.5	832	35
	RC-F5%-S	407	0.45	21.5			739	832	35
	RC-F10%-S	386	0.45	42.9			734	832	35
	RC-F15%-S	364	0.45	64.5			726	832	35
	RC-S5%-S	407	0.45		21.5		739	832	35
S (替代)	RC-S10%-S	386	0.45		42.9		734	832	35
	RC-S15%-S	364	0.45		64.5		726	832	35
	RC-H5%-S	407	0.45			21.5	739	832	35
	RC-H10%-S	386	0.45			42.9	734	832	35
	RC-H15%-S	364	0.45			64.5	726	832	35

根据表 3 配合比对材料称量和搭配，然后进行混合搅拌；充分搅拌之后进行分批浇筑和养

护。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准 GB/T 50081—2016》，试样为 150 mm×150 mm×150

mm 的标准立方体。需要注意的是,在浇筑过程中须对试样进行振捣,以保证试样均匀密实。在浇筑 24 h 后,进行脱模、编号;并放入标准养护环境(20±3℃ 和相对湿度 90% 以上)下养护 28 d。

1.3 实验方法

为了研究矿物掺合料对混凝土在常温下以及高温后基本特性的影响,在养护 28 d 之后将部分试样放入马弗炉中进行 100、200 和 400℃ 的高温处理;炉子的平均升温速率为 5℃/min,达到目标温度后持续保持温度 2 h。然后,缓慢冷却到室温后对其进行密度、超声波速和抗压强度测试;通过与常温环境下的实验结果相比获得矿物成分对混凝土耐高温特性的影响规律。

抗压强度测试采用 RMT -201 岩石与混凝土力学实验机,实验步骤参照《GB/T 50081—2016 普通混凝土力学性能试验方法标准》进行;实验的加载速度设置为 0.5 MPa/s,每种试样均进行三次测试,取三次测试的平均值为最终结果。

2 实验结果

2.1 混凝土的密度

参照《GBT 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准》对混凝土进行密度测试,不同试样在不同温度下的密度结果见图 1。从图 1 可以看出,所有试样的密度均低于对照组,且温度越高,试样的密度值越低。

同时,随着温度和矿物掺量的变化,不同试样密度的变化规律也有所不同。对比结果可知,在常温和 100℃ 环境下,试样的密度随着矿物成分的掺量增大而稍有下降;且密度均大于 2200 kg/m³。但是,当温度达到 200℃ 和 400℃ 时,试样的密度随着矿物成分掺量的增加出了明显的下降。在 200℃ 时,RC-F-S、RC-F-A 以及 RC-H-S 试样的密度随着矿物含量的增加先减后增,在 10% 时达到密度的较小值。在 400℃ 时,RC-F-S、RC-F-A 以及 RC-H-A 试样的密度也随着矿物含量的增加先减后增,在 5% 时就达到较小值;其他的试样则持续降低;且部分试样的密度已经低于 2000 kg/m³。此外,对比替代和添加试样的密度可知,采用添加法制备的试样的密度稍大于替代法制备的试样密度。

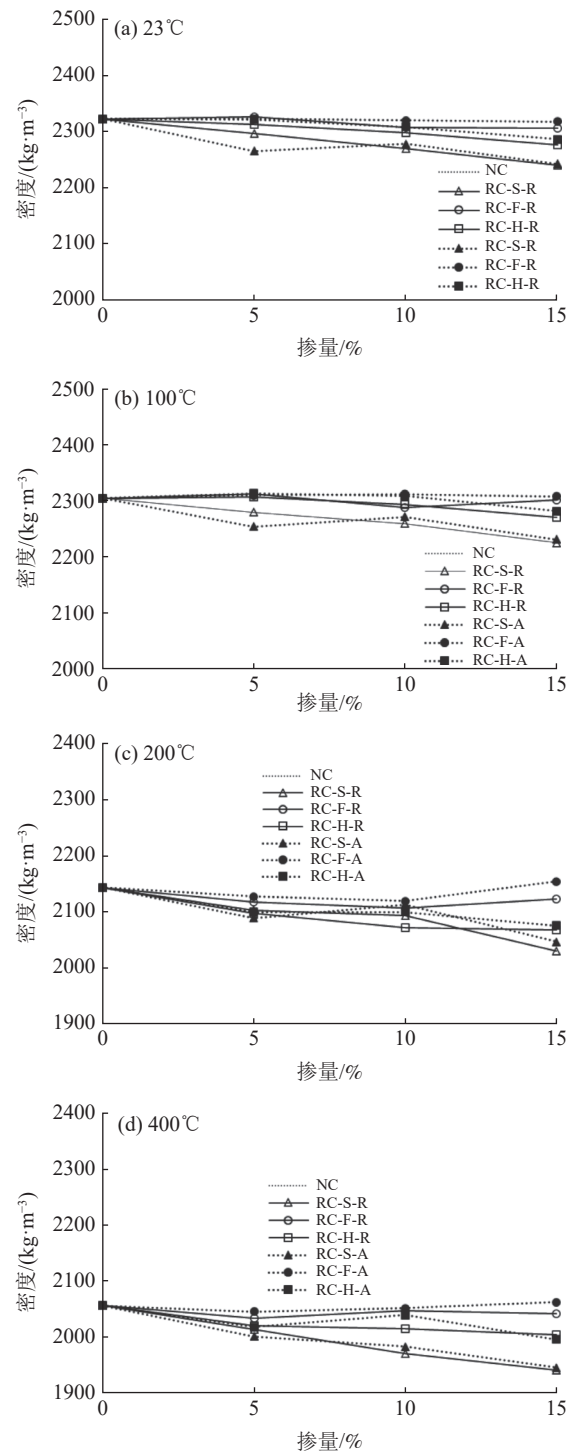


图 1 掺量对混凝土密度的影响

Fig.1 Effect of mixing amount on concrete density

试样密度随着温度的变化规律见图 2,采用再生骨料制备的混凝土的密度明显低于对照组试样,RC-0% 的密度较 NC 平均降低了 8.7%。此外,所有试样的密度均随着温度的升高逐渐降低,当温度达到 400℃ 时,掺入铁渣、飞灰和稻壳灰试样的密度分别平均降低了 12.95%、11.77%

和 12.33%，均大于对照组试样的密度降低率（7.74%）和 RC-0% 的密度降低率（11.4%）。相比之下，从 23℃ 到 100℃ 的密度降低较小，掺入铁渣、飞灰和稻壳灰试样的密度分别平均降低了 0.61%、0.56% 和 0.45%；而从 100℃ 到 200℃ 的密度降低最为明显，此时上述三种试样的密度分别降低了 8.52%、8.53% 和 9.43%。这可能是因为当温度从 100℃ 增加到 200℃ 时，毛细水和结合水发生了挥发。

对比三种不同矿物成分的混凝土密度变化规律还可以看出，在温度较低（≤100℃）时，三种试样的密度变化差别较小；但当温度达到 200℃ 时，含稻壳灰试样的密度降低率大于铁渣和飞灰改性试样的密度降低率；铁渣和飞灰改性试样的

密度变化率基本相同。当温度达到 400℃ 时，含铁渣试样的密度降低率较大，稻壳灰改性试样的密度降低率次之；飞灰改性试样的密度降低率较小。

2.2 混凝土的抗压强度

混凝土抗压强度随着矿物成分含量的变化规律见图 3。

在不同温度下，试样的密度均随着矿物成分含量的增加先增加后减少。在常温下，采用替代法制备的试样的强度在掺量为 5% 时达到较大值，而采用添加法制备的试样的强度在 10% 时才达到较大值，且 RC-SA>RC-H-A>RC-F-A，见图 3a。在 100℃ 下也有相同的结果，但是此时 RC-S-A 试样的抗压强度大于对照组试样的强度，见图 3b。这说明 100℃ 有利于混凝土强度的增大，且采用替代法时的较佳掺量为 5%，此时三种矿物成分改性试样的抗压强度较大值分别为 45.2 MPa、43.2 MPa 和 44.8 MPa；采用添加法时的较佳掺量为 10%，此时试样的抗压强度较大值分别为 52.4 MPa、46.1 MPa 和 47.9 MPa，这表明添加法更有利于提高再生骨料混凝土的强度。当温度较高（≥200℃）时，高温处理后试样的抗压强度出了明显的下降且低于对照组试样的抗压强度，见图 3c 和 3d。

试样的强度随着温度的变化规律见图 4。相比于 RC-0% 试样，掺入矿物掺合料之后试样的抗压强度均有所增长，且试样的抗压强度随着温度的升高呈先增加后减少的现象，在 100℃ 时较大，在 400℃ 时较小。一般而言，在经受 400℃ 高温后，NC、RC-0%、飞灰、铁渣和稻壳灰改性再生骨料混凝土的抗压强度分别平均降低 47.5%、56.2%、49.3%、59.2% 和 59.6%，这表明飞灰对再生骨料混凝土的耐高温性能较为有利，铁渣次之，稻壳灰较差。相比之下，以添加法掺入矿物掺合料时，试样的强度较替代法制备的试样的强度高；尤其是在 100℃ 时；但当温度达到 400℃ 时，两种方法制备的试样的残余强度差别较小。

2.3 超声波速 (UPV)

超声脉冲在再生骨料混凝土中的传播速度测量结果见图 5。

与温度对抗压强度和密度的影响类似，随着温度的升高，试样的超声波速不断下降。不同的是，飞灰改性混凝土的超声波速处于 NC 和 RC-

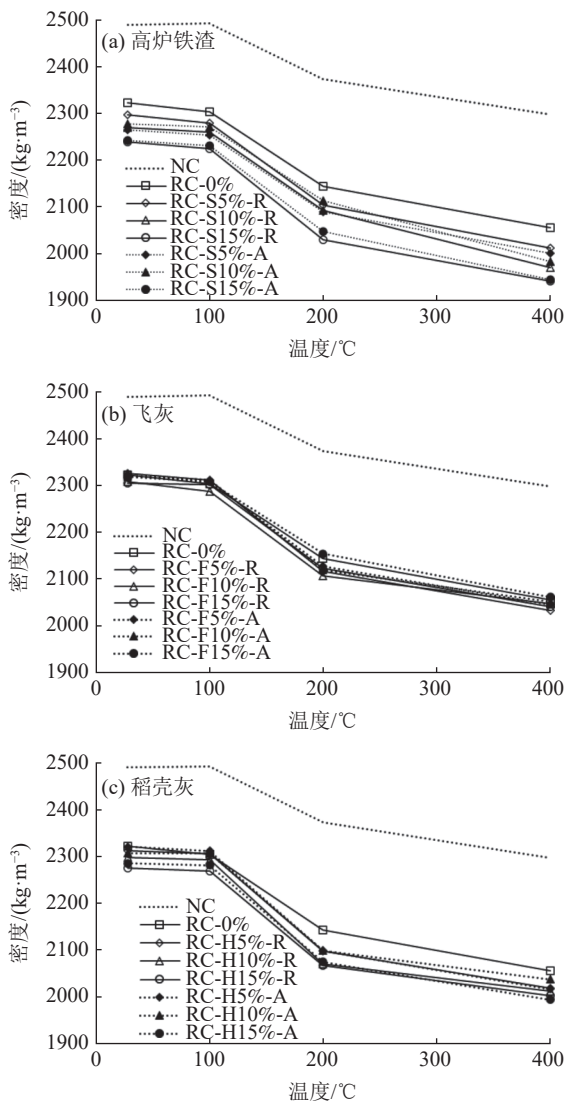


图 2 温度对混凝土密度的影响

Fig.2 Effect of temperature on the density of concrete

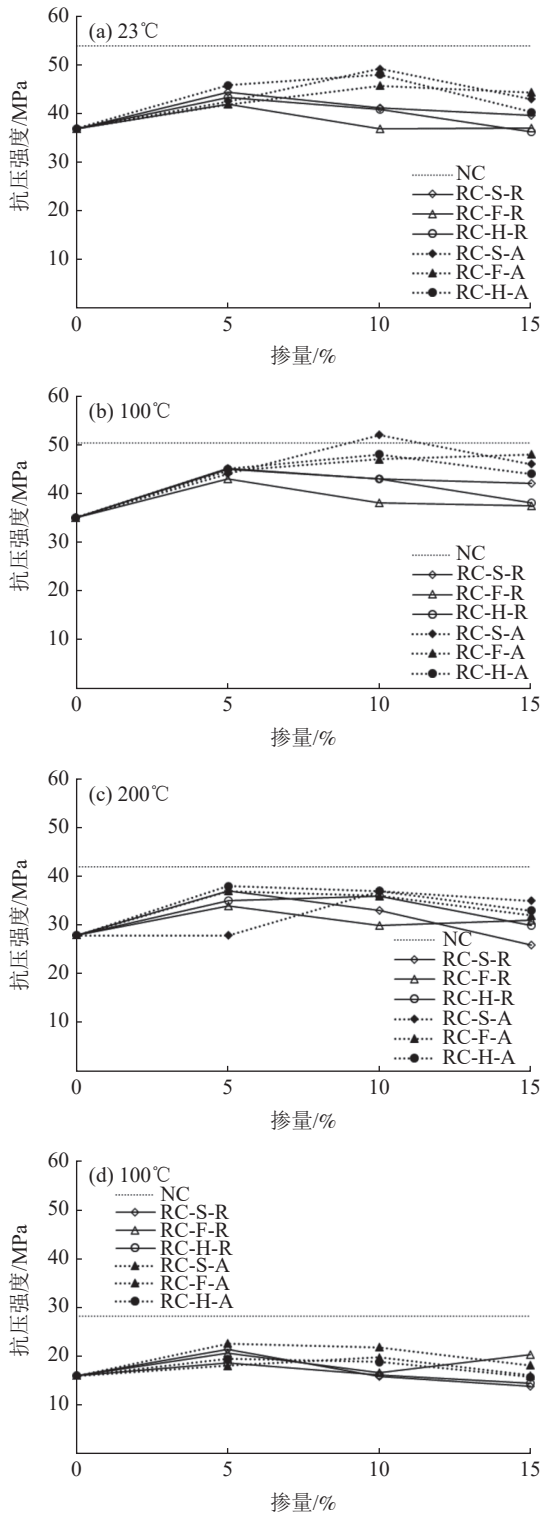


图3 掺量对混凝土强度的影响

Fig.3 Effect of mixing amount on concrete strength

0%之间, 见图5a; 铁渣改性混凝土的超声波速大部分在RC-0%试样之下, 见图5b; 而稻壳灰改性混凝土的超声波速大部分处于NC和RC-0%之间, 见图5c; 这表明试样内超声波的传播速度

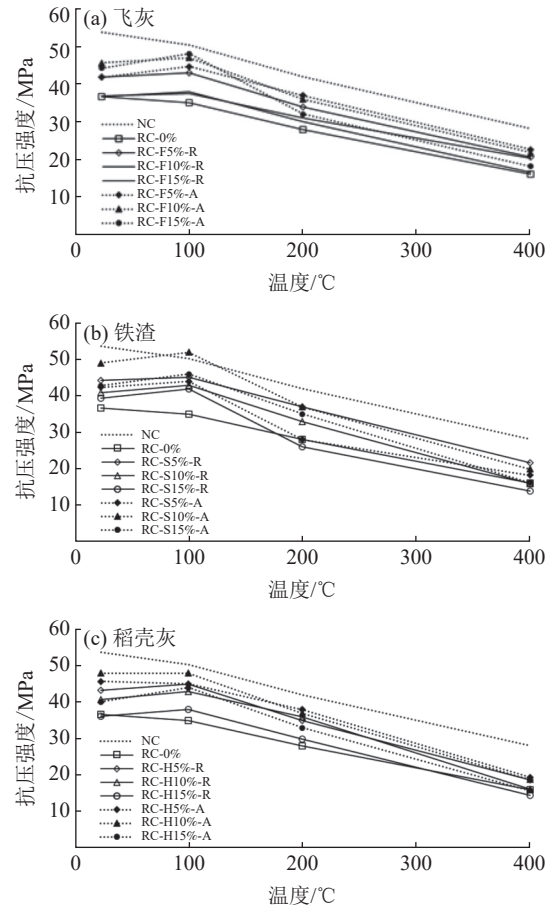


图4 温度对混凝土强度的影响

Fig.4 Effect of temperature on the strength of concrete

为: 含飞灰试样>含稻壳灰试样>含铁渣试样。实验数据也可以证明这一点, 飞灰改性试样在100°C、200°C和400°C时的超声波速平均值分别为: 3966.3、3531.8和2486 m/s。在相同的温度条件下, 稻壳灰和铁渣改性试样的超声波速平均值分别为3899、3199.8和2235.3 m/s; 3772.8、2791.3和2177.4 m/s。从图5还可以发现, 采用添加法制备的试样的超声脉冲传播速度稍高于同样条件下采用替代法制备的试样的超声波速, 这与密度和强度结果相一致。

2.4 混凝土的弹性模量

试样在不同温度和不同掺量下的弹性模量测定结果见图6; 为了显示出矿物成分对再生骨料混凝土弹性模量的影响, 在此利用RC-0%试样的弹性模型对其他试样进行归一化处理得出相对于RC-0%的相对弹性模量。由于不同温度下的结果基本相同, 在此只展示了23°C和400°C下的测量结果。

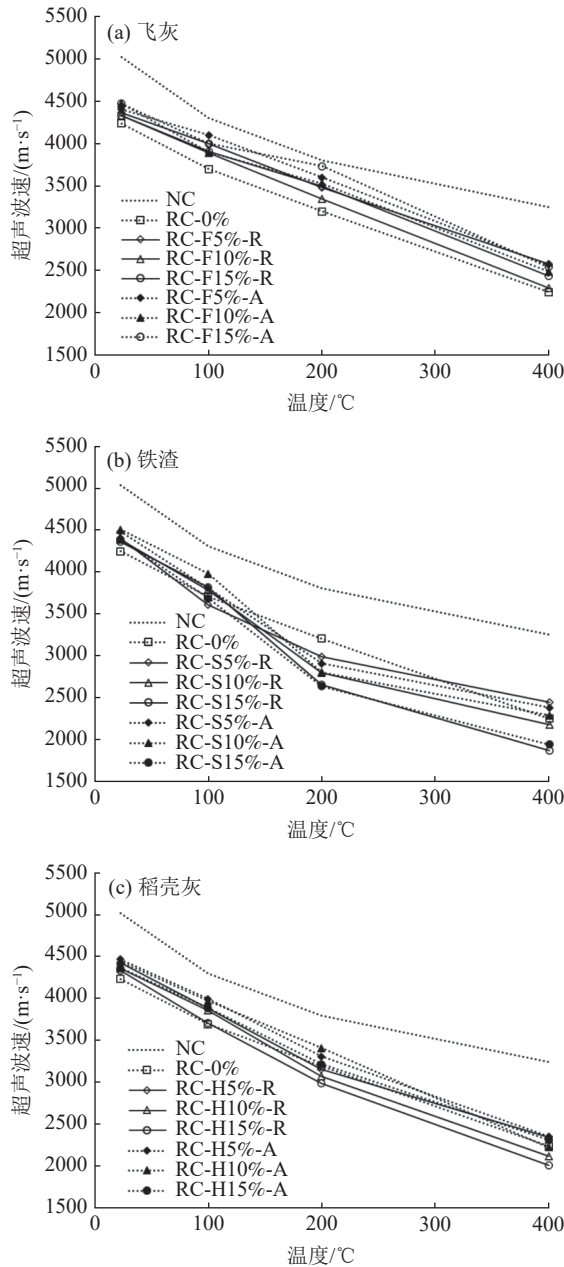


图5 温度对混凝土超声波速的影响
Fig.5 Effect of ultrasonic wave velocity on the strength of concrete

从图6可以看出,在不同温度下,试样的相对弹性模量随着矿物掺量的增加先增后减,在5%时达到较大值。同时,两种矿物成分掺入方法的试样的实验结果表明在常温和高温下,添加法比替代法能更有效地提高再生骨料混凝土的弹性模量。对比三种矿物成分改性的试样可知在常温和添加条件下,飞灰、铁渣和稻壳灰改性试样的较大相对弹性模量分别为134.9%、114%和123%,见图6a,这表明飞灰对试样弹性模量的增强效果

较大,稻壳灰次之,铁渣则较小;在400°C下也呈相同的规律,见图6b。

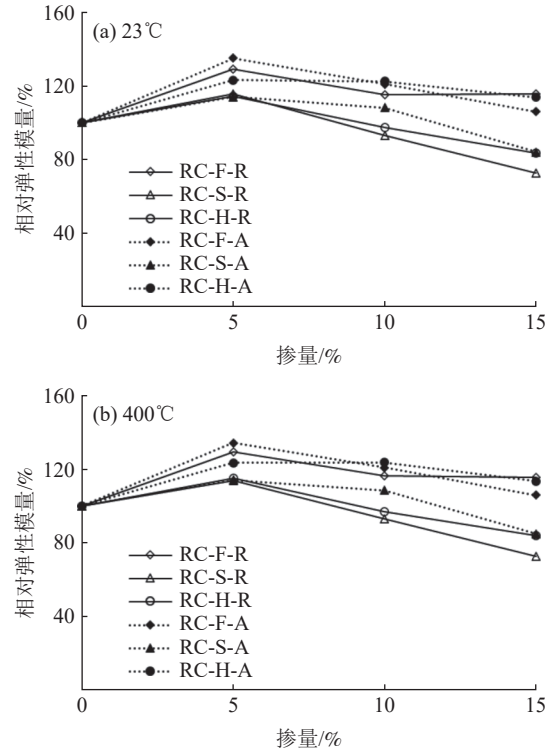


图6 掺量对混凝土相对弹性模量的影响
Fig.6 Effect of mixing amount on relative elastic modulus of concrete

2.5 相关性分析

混凝土各个物理与力学参数之间具有一定的相关性,为此本文对密度-强度、密度-弹性模量、超声波速-强度和超声波速-弹性模量间的相关关系进行了分析。

不同温度和掺入方法下混凝土密度和强度之间的关系见图7。对比四种条件下的结果可以发现,在23°C和替代法时,密度和抗压强度间的相关性较好,三种试样的R均大于0.86,见图7a。而在其他条件下,密度和抗压强度间的相关性较差。在400°C时,替代法制备的试样的密度与抗压强度之间也具有更好的相关性,见图7c。在采用添加法时,二者之间几乎不存明显的相关性。此外,图7b、7c和7d中还出现了拟合线直线斜率为负的现象,根据对飞灰对试样密度和强度的结果进行分析,添加不同比例的飞灰时,试样的密度十分接近,且飞灰含量越高强度越低,这就导致了密度与强度间的负相关关系。

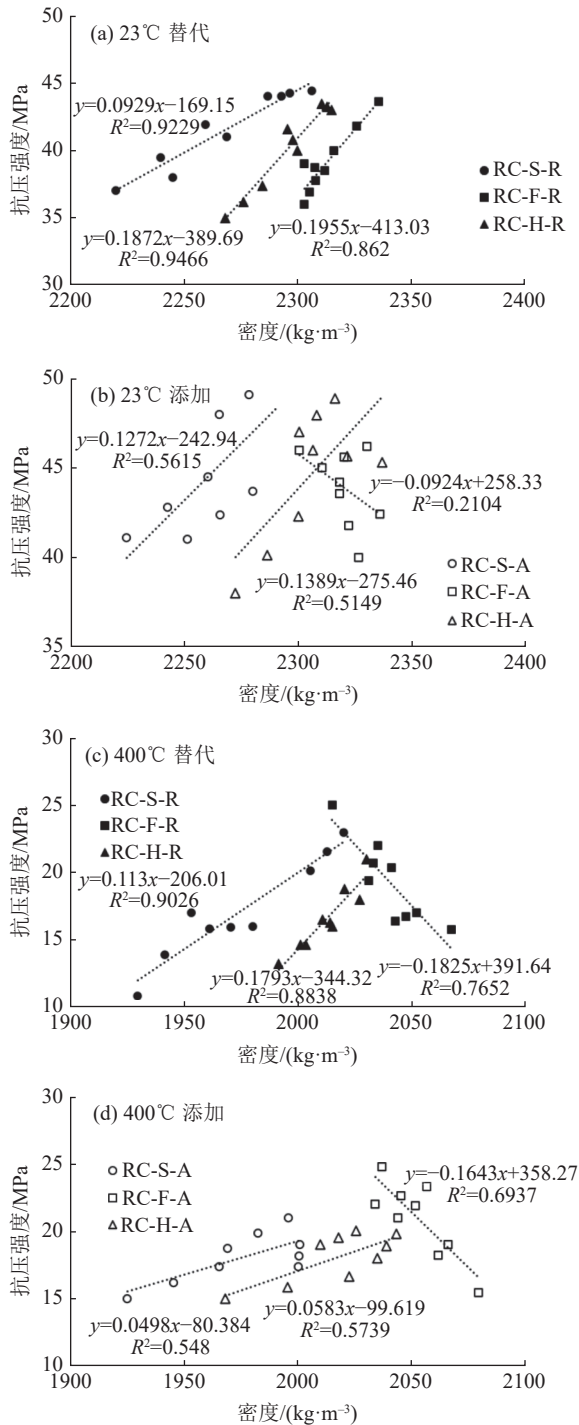


图 7 混凝土密度与强度间的关系

Fig.7 Relationship between the density and strength of concrete

常温下混凝土密度和弹性模量之间的关系见图 8。由于不同温度下的结果类似, 只展示 23℃ 下的结果。采用替代法时, RC-S-R 试样的密度与弹性模量间的线性相关性较好, R 值为 0.912; RC-H-R 次之, 而 RC-F-R 试样的密度与弹性模量

间的线性相关性较差, 见图 8a; 采用添加法时, 除了飞灰改性试样外, 其他两种试样的密度与弹性模量之间的相关性较弱。

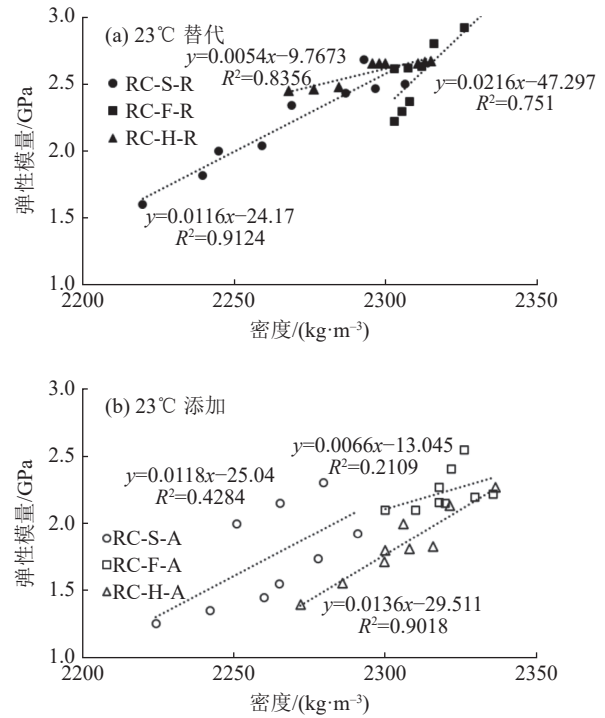


图 8 混凝土的密度与弹性模量间的关系

Fig.8 Relationship between density and elasticity modulus of concrete

常温下混凝土超声波速和强度之间的关系见图 9。密度与强度和密度与弹性模量相关的结果, 在采用替代法时超声波速与弹性模量间的相关性更好; 而在采用添加法时, 超声波速与抗压强度间的相关关系具有较大的离散性, 其中 R 较大为 0.7675, 较小为 0.4167。这表明在采用超声波速进行矿物成分改性再生骨料混凝土强度预测时, 需要考虑矿物成分的种类以及矿物成分的添加方法; 对替代法制备的试样比较适用, 而对添加法制备的试样就需谨慎。

常温下混凝土超声波速与弹性模量之间的关系见图 10。整体而言, 两种矿物成分添加方法制备的试样的超声波速与弹性模量间具有一定的相关性, 但不同试样的超声波速与弹性模量间的相关性具有明显的离散性。同时, 不同与抗压强度与密度、抗压强度与超声波速以及密度与弹性模量的相关性变化规律, 添加法制备的混凝土的超声波速与弹性模量间的相关性稍好于替代法制备的试样的相关性。

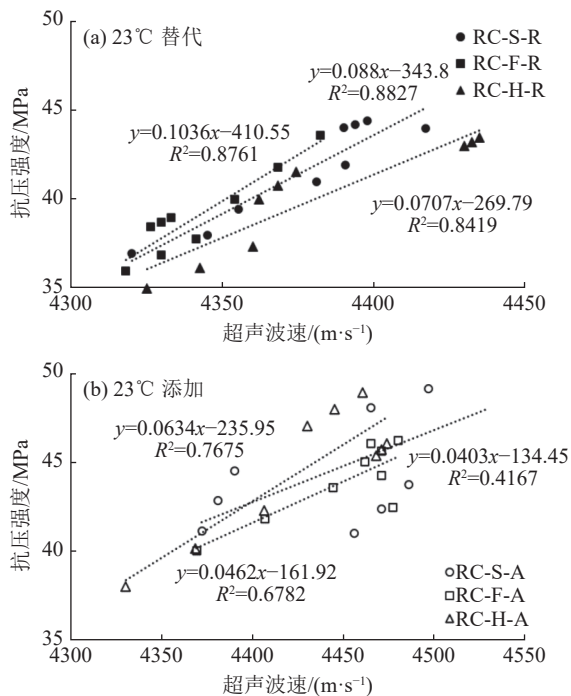


图9 超声波速与强度间的关系
Fig.9 Relationship between ultrasonic wave velocity and intensity

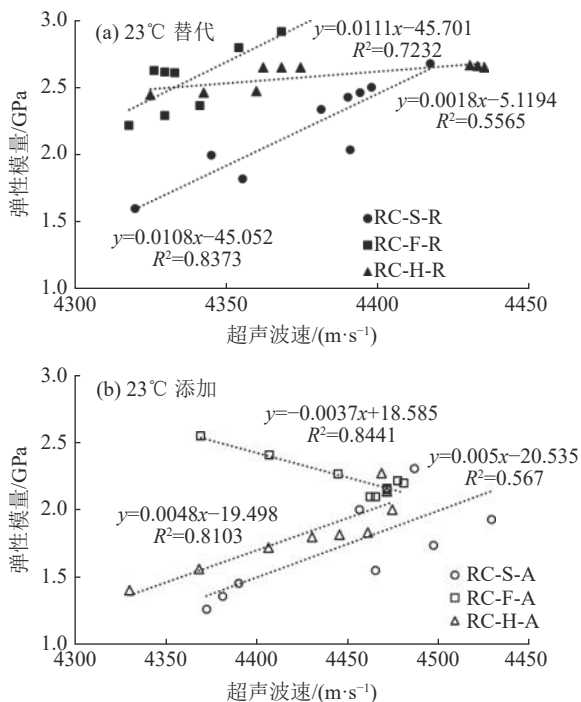


图10 超声波速与弹性模量间的关系
Fig.10 Relationship between ultrasonic wave velocity and elastic modulus

3 结论

(1) 再生骨料和高温的作用都致使混凝土密

度下降；相比与添加法，采用替代法进行试样制备更有利于降低试样的密度。

(2) 试样的抗压强度均随着掺合料含量的增加先增后减，基于此得出采用替代法和添加法时外掺料的较优掺量分别为 5% 和 10%；但均小于对照组试样的抗压强度。随着温度的升高抗压强度也是先增后减，且在 100℃ 时，RC-S10%-A 试样的抗压强度达到 52 MPa，大于对照组试样的抗压强度 (50.2 MPa)。对再生骨料混凝土耐高温性能的贡献飞灰较大，铁渣次之，稻壳灰较差。此外，添加法比替代法更有利于提高试样的强度。

(3) 随着温度的升高，试样内的超声波速不断下降。试样内超声波的传播速度下降顺序为：含飞灰试样>含稻壳灰试样>含铁渣试样；且添加法试样的超声波速度高于替代法试样的超声波速；但均小于对照组试样的超声波速。

(4) 相对弹性模量随着掺合料掺量的增加先增后减，在掺量为 5% 时较大；且添加法比替代法能更有效地提高再生骨料混凝土的弹性模量。

(5) 采用替代法时，密度与抗压强度、密度与弹性模量以及超声波速与抗压强度间的相关性较好；而采用添加法时，上述参数之间的相关性较差。

参考文献：

[1] 卓庆奉, 巴蕾, 王奇峰. 掺粉煤灰的混合充填骨料配比优化实验[J]. *矿产综合利用*, 2021(3):187-192.
ZHUO Q F, BA L, WANG Q F. Optimum experiment of aggregate proportion for mixed filling with fly ash[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):187-192.

[2] 罗素蓉, 黄海生, 郑建岚. 再生骨料混凝土徐变性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(S2):115-120.
LUO S R, HUANG H S, ZHENG J L. Experimental study on creep performance of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(S2):115-120.

[3] 孙柯华, 沈阳, 王伟, 等. 不同材料增强处理再生骨料对混凝土抗压强度的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2021(5):95-99.
SUN K H, SHEN Y, WANG W, et al. Effects of different materials reinforced with recycled aggregates on the compressive strength of concrete[J]. *Concrete and Cement Products*, 2021(5):95-99.

[4] 李文贵, 罗智予, 龙初, 等. 纳米再生骨料混凝土的动态力

学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(9):92-99.

LI W G, LUO Z Y, LONG C, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of nano-recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Hunan University(Natural Science Edition)*, 2017, 44(9):92-99.

[5] 朱勇年, 张鸿儒, 孟涛, 等. 纳米 SiO₂ 改性再生骨料混凝土工程应用研究及实体性能监测[J]. *混凝土*, 2014(7):138-144.

ZHU Y N, ZHANG H R, MENG T, et al. Engineering application research and physical performance monitoring of nano-SiO₂ modified recycled aggregate concrete[J]. *Concrete*, 2014(7):138-144.

[6] Mukharjee B B, Barai S V. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 55(3):29-37.

[7] 白卫峰, 李汶昊, 杨光, 等. 硅粉掺量对再生骨料混凝土单轴压缩性能的影响研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6):59-66.

BAI W F, LI W H, YANG G, et al. Research on the effect of silica fume content on the uniaxial compression performance of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2020, 41(6):59-66.

[8] 李军卫, 刘长明, 单雪峰. 水泥改良铁尾矿砂路基填料的力学特性研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(3):193-199.

LI J W, LIU C M, SHAN X F. Research on mechanical properties of cement-improved iron tailings sand roadbed filler[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):193-199.

[9] Sun J, Feng J, Chen Z. Effect of ferronickel slag as fine aggregate on properties of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206(5):201-209.

[10] Sunayana S, Barai S V. Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 156:376-38.

Research on Mechanical and High Temperature Resistance Properties of Recycled Aggregate Concrete Containing Mineral Admixtures

Yin Xiaojuan

(Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong, Shanxi, China)

Abstract: To study the influence of mineral admixtures on the basic characteristics and high temperature resistance of recycled aggregate concrete, fly ash, iron slag and rice husk ash were used to modify recycled aggregate concrete. High temperature and mechanical tests were carried out. The results show that with the increase of temperature, the density and ultrasonic velocity of the sample continue to decrease; the density and ultrasonic velocity of the sample prepared by the additive method are greater than that of the sample prepared by the alternative method; the compressive strength and relative elastic modulus increase first and then decreases with the increase of the mineral, reaching the maximum at 5%~10%. As the temperature increases, the compressive strength first increases and then decreases, reaching the maximum at 100°C; and when the mineral admixture is added by the additive method, the strength and elastic modulus of the sample are higher. Enhancement of high temperature resistance of recycled aggregate concrete: fly ash>iron slag>rice husk ash. In addition, the concrete density and compressive strength, density and elastic modulus, ultrasonic velocity and compressive strength have a better correlation when using the alternative method; however, the correlation between the various parameters is poor when the additive method is used.

Keywords: Recycled aggregate concrete; Mineral composition; Density; Compressive strength; Ultrasonic velocity; Correlation analysis