



掺超贫铁矿石混凝土力学性能及微观结构研究

王文利¹, 龙一飞², 潘婵², 郭晓琴², 李扬薇²

(1. 武汉交通职业学院, 湖北 武汉 430083; 2. 武汉城市学院城建学部, 湖北 武汉 430083)

摘要:这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。对超贫铁矿石进行加工处理, 将良好级配的超贫铁矿石作为骨料, 制备新型的蒸压加气混凝土砌块, 进而研究不同骨料的掺量、水灰比和蒸压时间对蒸压加气混凝土性能以及微观结构的影响。结果表明: 随着水灰比, 石灰掺量、骨料取代率和蒸压时间的增大, 混凝土的抗压强度均呈现先增大、后减小的趋势; 超贫铁矿石骨料的取代率为 40%, 粉煤灰掺量为 10%、石灰掺量为 18%、水泥掺量为 60%, 水灰比为 0.45 和蒸压时间为 5 h 时, 混凝土的性能达到较佳。同时, 超贫铁矿石的掺入对新物相的产生和混凝土自身以及孔隙结构具有较大的影响。

关键词: 超贫铁矿石; 陶瓷及复合材料; 水灰比; 石灰掺量; 骨料取代率; 孔隙结构

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.03.012

中图分类号: TD985;TD325 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 03-0070-08

随着科技的不断发展, 蒸压加气混凝土砖在建筑领域的使用日益增多, 主要以废弃粉煤灰和矿渣等为原材料^[1-4], 制备出的混凝土砖具有重量轻、保温效果好、制备成本低等特点。将废弃超贫铁矿石作为骨料制备蒸压加气混凝土砖可以有效解决超贫铁矿石堆积的问题, 也积极响应了国家的可持续发展战略, 减轻了石料等资源的过渡开采, 进一步促进了新型建筑材料的发展^[5]。崔静洁等^[6]探究了蒸压加气混凝土砖内部结构与自身性能之间的关系, 发现了有效控制材料的气孔孔径均匀度使得材料的保温性能得到显著提升。李国强等^[7]为了提升蒸压加气混凝土砖在整体建筑结构中的承载力, 采用软件模拟了蒸压加气混凝土砖与结构连接点的受力情况, 进而提出通过增加连接点处的塑性变形来提升结构的变形能力和承载力。金彪等^[8]研究了不同再生建筑骨料掺量下混凝土的微观结构性能, 得出当建筑骨料掺量达到 85% 时, 制备出的混凝土具有良好的强度。朱萌萌等^[9]采用废弃混凝土作为骨料制备加气混

凝土, 并对其微观结构性能进行了分析, 发现当废弃混凝土骨料掺量较多时会导致混凝土性能急剧下降。研究主要以对超贫铁矿石为研究对象, 将处理后良好级配的超贫铁矿石作为骨料, 代替部分天然石料来制备新型的蒸压加气混凝土砌块, 研究不同超贫铁矿石骨料的掺量、水灰比和蒸压时间对蒸压加气混凝土砖性能的影响, 进而使制备的蒸压加气混凝土砖的性能较佳。

1 混凝土材料

1.1 实验原材料选择

水泥选取当地水泥厂生产的普通硅酸盐水泥 PO 42.5, 初凝时间为 1.05 h, 终凝时间为 4.2 h, 烧失量 2.5%, 细度 3.3%; 粉煤灰取自当地电厂, 其主要组成成分和含量分别为 SiO_2 (40.25%)、 Al_2O_3 (38.49%)、 CaO (7.64%)、 SO_3 (5.32%)、 Fe_2O_3 (4.78%), 含水量 0.29%, 烧失量 3.52%, 细度 90.58%; 石膏采用脱硫石膏, 其性能指标为固体分为 64.7%、细度为 1.78%、活性铝为 92.5%、无

收稿日期: 2021-08-23

基金项目: 2019 年度湖北省教育厅科研计划指导性项目“BIM 技术在风电场升压站设计中的应用研究”(B2019428)

作者简介: 王文利(1984-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事结构工程、BIM 和矿产改性混凝土研究。

团粒；骨料采用超贫铁矿石，取自鞍山某矿区，粗骨料采用当地石料厂生产的天然石子。

超贫铁矿石的是指在铁矿的品位定级上，含铁 25% 以下为超贫矿。因为超贫铁矿石里面成分比较复杂且体积较大，需要对其加工处理后才能使用，处理流程如下：（1）经过初试破碎将超贫铁矿石掺杂的杂质进行分离；（2）二次破碎和球磨后，对超贫铁矿石的粒径进行筛分，得到良好级配的超贫铁矿石骨料；（3）对制备的超贫铁矿石进行简单的烘干处理，以去除其内部多余的水分；（4）将烘干后的超贫铁矿石骨料静置一段时间后制备混凝土。经过 XRF 实验测定出该超贫铁矿石的主要组成成分和含量分别为 TFe(11.56%)、FeO(7.69%)、SiO₂(48.14%)、Al₂O₃(18.12%)、CaO(8.38%)、MgO(4.64%) 和其余少量氧化物 (1.47%)。

1.2 混凝土的养护要求

按照实验要求制备好建筑骨料混凝土，静置养护，使混凝土内部的铝粉与水泥拌和物充分稠化，保证胚体的建筑稳定，混凝土结构性能良好；然后将进行蒸压养护，混凝土内部物质的水热和反应完全，促进内部水化产物产生的结晶度达到要求，使得经过蒸压养护后的混凝土性能得到进一步提升。蒸压养护工艺为^[10]：升温升压大约 3 h，仪器内部压力达到 1.0 MPa 以上、温度达到 170 ℃ 左右；（2）混凝土试样静置大约 5 h 后，从蒸压箱取出放置室内自然冷却至常温。

1.3 超贫铁矿石的性能

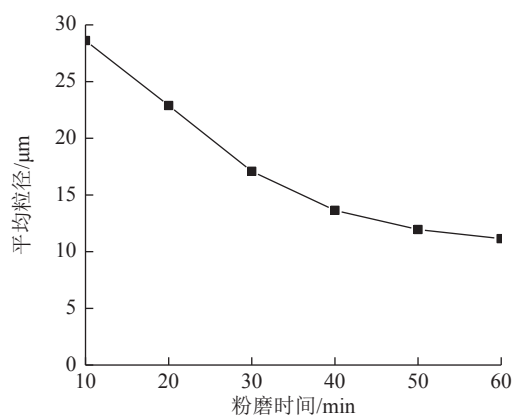
通过机械粉磨对超贫铁矿石进行粉磨满足制备混凝土骨料的要求，采用激光粒度仪来测定超贫铁矿石的粒径大小和粒度分布，绘制出粉磨时间与超贫铁矿石颗粒平均粒径的关系以及超贫铁矿石粒径分布和频度分布的变化规律见图 1。

由图 1 (a) 可知，随着机械粉磨时间的不断增大，超贫铁矿石颗粒平均粒径的变化规律呈现出先不断减小后趋于稳定的变化趋势，即在机械粉磨时间小于 30 min 时，对于超贫铁矿石颗粒的粉磨效果较好，但是超过 30 min 时，机械粉磨的效果就会变差。因此，为了使得超贫铁矿石既满足混凝土骨料粒径的要求，又要满足经济效率方面的要求，选择机械粉磨时间为 30 min 的超贫铁矿石来作为本次制备超贫铁矿石再生混凝土的骨料，且此次超贫铁矿石的平均粒径在 0.5~100 μm 范围内。

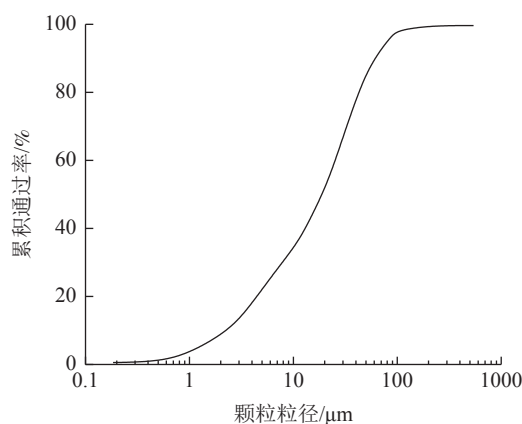
由图 1 (b)、(c) 可知，超贫铁矿石经过机械粉磨后的中位粒径大约为 18.62 μm，表面积平

均粒径大约为 6.15 μm，体积平均粒径大约为 25.92 μm，且大部分超贫铁矿石粒径均在 26 μm 以内，得到所选用超贫铁矿石的 XRD 见图 2。

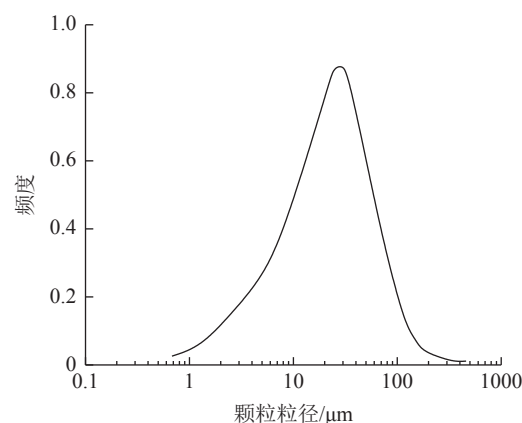
由图 2 可知，所选用超贫铁矿石所包含矿物成分主要有磁性铁，硅酸铁，钛铁矿，褐铁矿以及少量的硫化铁。其中，衍射峰最高的是具有一定活性的总铁衍射峰，其次衍射峰较高的是硅酸铁衍射峰。



(a) 粉磨时间与超贫铁矿石颗粒平均粒径的关系



(b) 超贫铁矿石粒径分布



(c) 超贫铁矿石频度分布

图 1 超贫铁矿石的孔隙特性

Fig.1 Pore characteristics of ultra-lean iron ore

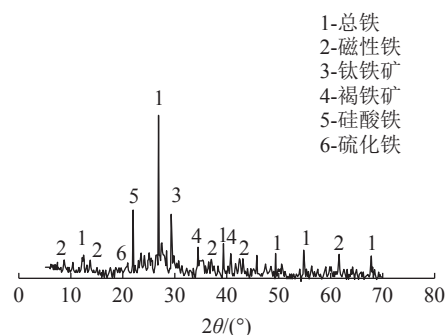


图2 所选用超贫铁矿石的XRD

Fig.2 XRD pattern of selected ultra-lean iron ore

1.4 实验设备及方法介绍

抗压强度：采用 TAW-2000 岩石系统对混凝土进行抗压实验，试样的尺寸为 $150 \times 150 \times 150$ mm 的标准立方体。实验步骤：（1）将混凝土试样的轴心与实验机承载板的轴心对齐，将加载板缓缓下降且使得加载板刚刚接触到混凝土试样；（2）采用 500 N/S 的加载速率施加荷载，直至混凝土试样完全破坏为止；（3）记录下混凝土的峰值强度值后，开始卸载荷载，并将破坏后的混凝土试样编号保存。

干密度：参考 GB 11970-1997《加气混凝土体积密度含水率和吸水率实验方法》进行测试。

物相成分测定：将混凝土材料破碎取样，研钵研磨至粉末态，用 X 射线衍射仪（型号 D/MAX2200X）进行物相分析。

压汞实验：试样的尺寸为 $150 \times 150 \times 150$ mm 的标准立方体。实验步骤：（1）对混凝土试样时间一定的荷载，并预压大约 2 h 左右；（2）将预压后的混凝土试样取出，并跳出整、无人为损伤、大小约为 5 mm 的混凝土试样；（3）将上述得到的混凝土试样放入无水乙醇浸泡 24 h 后取出；

（4）将浸泡处理好的混凝土试样放入恒温烘箱中（温度设定为 100°C ）烘至恒重后；进行压汞实验；（5）采用 Pore-master-33 型全自动压汞仪对混凝土进行孔隙结构的测定。

2 实验研究结果与讨论

2.1 超贫铁矿石骨料取代率的影响

本文选用原材料为粉煤灰、石灰、水泥、铝粉和处理后的超贫铁矿石，按照蒸压加气混凝土砌块参照标准，制定出水泥、石灰、粉煤灰间比例为 6:2:2，蒸压时间 5 h，铝粉掺量为混合物总质量的 0.1%，研究不同超贫铁矿石骨料取代率对混凝土的干密度和抗压强度的变化规律，见图 3。

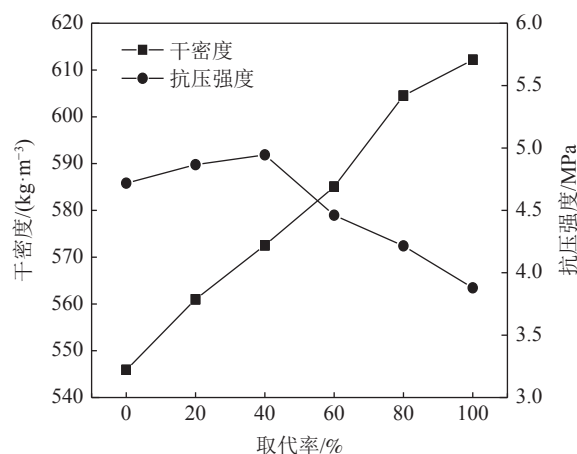


图3 不同取代率对混凝土性能的影响

Fig.3 Effect of different substitution rates on concrete properties

由图 3 可知，随着超贫铁矿石骨料的替代率的增大，混凝土的干密度呈现出增长趋势，这是由于粉煤灰会增大拌合物的和易性，使得铝粉的发气更加充分；而超贫铁矿石是多种物质组成的混合物，在混凝土拌合过程中增加了骨料之间的摩擦作用，使得拌合物的稠化过程缩短，进而造成铝粉的发气不充分。因此，当超贫铁矿石骨料越多时，混凝土在静置养护期间发气不充分，使得混凝土在蒸压养护期间气孔直径减小，最终导致混凝土的干密度增大。随着超贫铁矿石骨料的替代率的增大，混凝土的抗压强度呈现出先增长后减小的变化趋势，这是由于超贫铁矿石中矿物成分活性低于粉煤灰的，在高温高压碱性环境下产生的胶凝物质较少，且产生的胶凝物与混凝土界面的粘性也要小于粉煤灰的，故当超贫铁矿石骨料的替代率大于 40% 时，混凝土的强度出现下降趋势，故超贫铁矿石骨料的替代率宜取 40%。

2.2 粉煤灰掺量的影响

铝粉掺量为混合物总质量的 0.1%，蒸压时间取 5 h，超贫铁矿石骨料以 40% 替代率来取代天然石料作为骨料，在不同粉煤灰掺量作用下，混凝土的干密度和抗压强度的变化规律，见图 4。

由图 4 可知，随着粉煤灰在混合料中所占比例的增大，混凝土的干密度呈现下降趋势，这是由于在相同细度条件下，水泥制成砖的粘聚力要强于单独掺加石灰和粉煤灰成砖的粘聚力。随着水泥在混合料中所占比例的下降，混凝土的抗压强度也呈现下降趋势，这主要是由于混凝土干密度的下降，使得混凝土内部结构更加密实；同时，在同一水灰比作用下粉煤灰掺量越多，水化反应后的水化产物就少于掺大量水泥的，而超贫

铁矿石内部的部分矿物成分也会发生水化反应产生 C-S-H 凝胶物质,进而有效地提升了混凝土的强度。粉煤灰掺量超过 10% 以后,混凝土的强度和干密度下降幅度增大,故粉煤灰掺量宜取 10%。

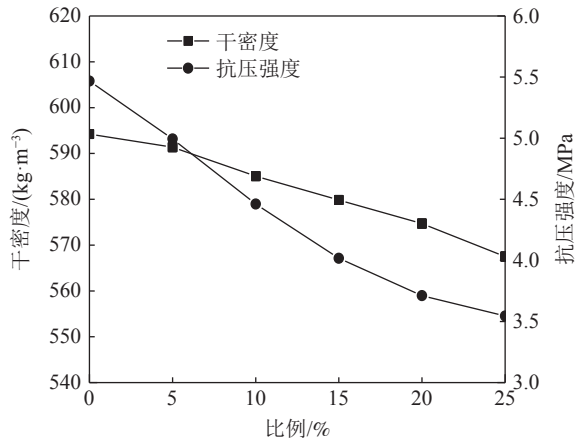


图4 不同粉煤灰掺量对混凝土性能的影响

Fig.4 Effect of different fly ash admixture on the performance of concrete

2.3 水泥掺量的影响

铝粉掺量为混合物总质量的 0.1%, 超贫铁矿石骨料以 40% 替代率来取代天然石子作为骨料, 蒸压时间 5 h, 研究不同水泥掺量作用下混凝土抗压强度和干密度变化规律, 见图 5。

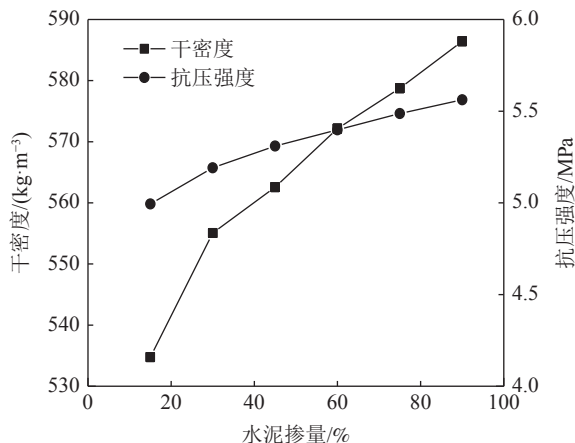


图5 不同水泥掺量对混凝土性能的影响

Fig.5 Effect of different cement blending on concrete properties

由图 5 可知,随着水泥在混合料中所占比例的下降,混凝土的干密度也呈现下降趋势,这是由于水泥与水产生水化反应,生成水化产物钙矾石,水泥越多生成的钙矾石也就越多,钙矾石使得混凝土内部气孔壁不断加厚,抑制了铝粉的发气性质,进而导致了混凝土干密度增大。随着水泥在混合料中所占比例的增大,混凝土的干密度也呈现增大趋势,这是由于水泥自身强度较大,

且产生的胶凝物有效增加了骨料的粘结力,同时产生的钙矾石充填在混凝土内部气孔中,使得混凝土试样更加密实。而在水泥掺量为 60%,混凝土的抗压强度增大幅度变得平缓,结合经济和力学性能确定水泥掺量为 60%。

2.4 石灰掺量的影响

铝粉掺量为混合物总质量的 0.1%, 超贫铁矿石骨料以 40% 替代率来取代天然石子作为骨料, 蒸压时间 5 h, 研究不同石灰掺量作用下混凝土抗压强度和干密度变化规律, 见图 6。

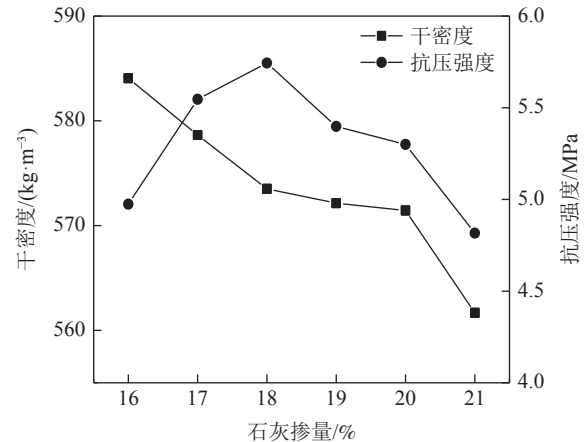


图6 不同石灰掺量对混凝土性能的影响

Fig.6 Effect of different lime dosing on concrete properties

由图 6 可知,随着石灰在混合料中所占比例的下降,混凝土的干密度呈现增大趋势,这是由于石灰呈现碱性,石灰越少拌合物所处环境的碱性越弱,使得铝粉的发气性能减弱,在拌合物稠化之前产生的气体就越少、混凝土内部的气孔就越少。随着石灰在混合料中所占比例的增大,混凝土的抗压强度呈现先增大后减小的趋势,这是由于当石灰掺量小于 18% 时,拌合物中碱性的增大有效激发了铝粉和超贫铁矿石骨料矿物成分的活性,使得水化反应的进行程度得到很大提升,胶凝物质增强了物质之间的粘结力,且产生的水化产物与未反应的物质形成了较为致密的网状结构,最终混凝土的抗压强度得到一定的增强;当石灰掺量大于 18% 时,石灰量越多使得铝粉产生的气体越多,进而混凝土内部气孔的直径就越大,在外部荷载作用下混凝土内部容易产生应力集中现象,故此时混凝土的抗压强度有所下降。故石灰掺量宜取 18%。

2.5 水灰比的影响

粉煤灰掺量为 10%、石灰掺量为 18%、水泥掺量为 60%, 铝粉掺量为混合物总质量的 0.1%, 超贫铁矿石以 40% 替代率来取代天然石子作为骨

料, 蒸压时间取 5 h, 研究不同水灰比作用下混凝土抗压强度和干密度变化规律, 见图 7。

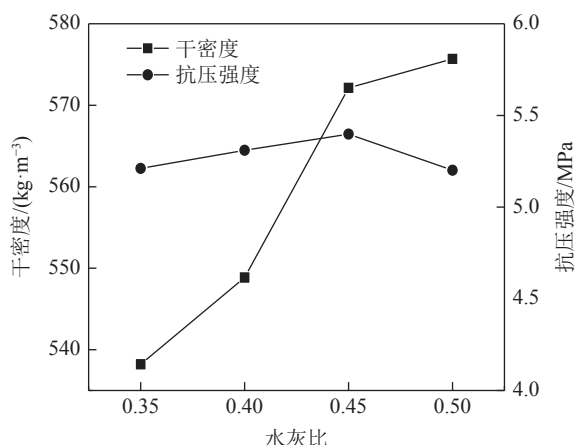


图 7 不同水灰比对混凝土性能的影响

Fig.7 Effect of different water-cement ratios on the performance of concrete

由图 7 可知, 随着水灰比的增大, 混凝土的干密度呈现增大趋势, 抗压强度呈现出先增大后减小的趋势, 这是由于水灰的增大使得拌合物更加容易搅拌, 且铝粉的发气性能也更好, 混凝土内部的气孔率也越高, 导致混凝土的干密度下降, 但是水化反应进行更加彻底, 产生的水化产物也越多, 对混凝土的强度具有提升作用, 而随着水灰比的进一步增大 (当水灰比大于 0.45 时), 拌合物中的水量过于充分, 使得浆液的保气性下降、浆液更加稀释, 导致混凝土的强度开始出现下降趋势。故水灰比宜取 0.45。

2.6 蒸压时间的影响

粉煤灰掺量为 10%、石灰掺量为 18%、水泥掺量为 60%, 铝粉掺量为混合物总质量的 0.1%, 超贫铁矿石骨料以 40% 替代率来取代天然石子作为骨料, 水灰比设置为 0.45, 研究不同蒸压时间作用下混凝土抗压强度和干密度变化规律见图 8。

由图 8 可知, 随着蒸压时间的增大, 混凝土的干密度呈现下降趋势, 这是由于蒸压时间的增大使得混凝土内部的水分由中心向表面开始迁移, 且表面水分与蒸压环境进行湿热交换, 造成混凝土的内部水分蒸发量越来越大。随着蒸压时间的增大, 混凝土的抗压强度呈现先增大后减小的趋势, 这是由于当蒸压时间小于 5 h 时, 蒸压时间越大越能激发超贫铁矿石骨料内部矿物成分的活性, 使得混凝土内部的水化反应更彻底, 生成的晶体、凝胶的含量也越多, 这有效提升了混凝土的强度; 当蒸压时间大于 5 h 时, 会使产生的晶体转化为强度较低的单碱水化硅酸钙^[11], 进而使

得混凝土强度开始下降。故蒸压时间宜取 5 h。

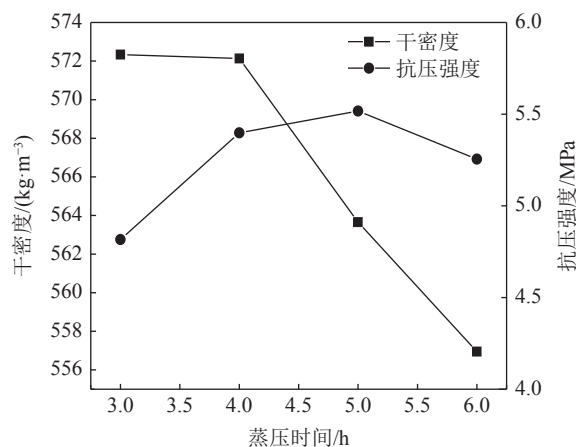


图 8 不同蒸压时间对混凝土性能的影响

Fig.8 Effect of different autoclave times on concrete properties

3 超贫铁矿石取代率对微观结构的影响

3.1 混凝土的物相分析

为了更好地研究不同超贫铁矿石骨料替代率对再生水泥水化 28 d 物相的影响^[12-13], 将混凝土材料破碎取样, 并用研钵研磨至粉末态, 使用 X 射线衍射仪 (型号 D/MAX2200X) 进行物相分析, 得到不同取代率超贫铁矿石骨料再生混凝土的 XRD 见图 9。

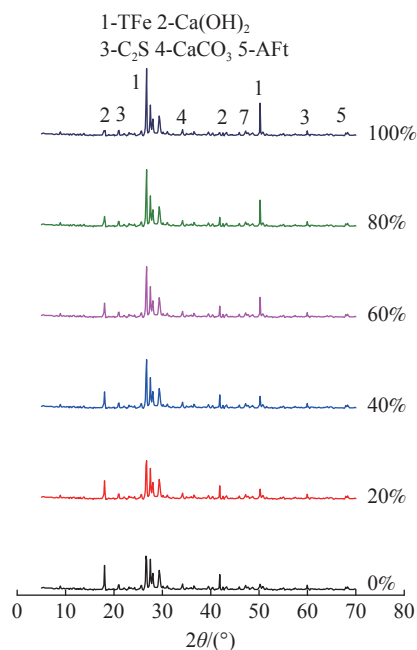


图 9 混凝土的 XRD

Fig.9 XRD patterns of concrete

由图 9 可知, 随着超贫铁矿石骨料取代率的

不断增大，混凝土的物相成分并没有太大的差异，但是氢氧化钙特征衍射峰强度值却不断减小，而总铁特征衍射峰强度值却不断增大，这是由于超贫铁矿石内部原有矿物会与水化产物氢氧化钙进行化学反应，生成大量具有胶凝性的 C-(A)-S-H 物质，即掺入超贫铁矿石骨料越多，消耗混凝土内部残余氢氧化钙就越多。而总铁衍射峰强度值增大的原因是原有超贫铁矿石内部就含有大量的总铁等矿物成分，随着掺入超贫铁矿石骨

料越多，混凝土内部的总铁含量就越多。同时，在混凝土内部新产生的物相钙矾石衍射峰的强度值均有所降低，这说明了超贫铁矿石的掺入对新物相的产生具有较大的影响。

3.2 混凝土孔隙结构变化分析

为了更好地验证超贫铁矿石取代率对微观孔隙结构的影响^[4]，现采用压汞实验测定再生混凝土的孔隙结构，绘制出不同超贫铁矿石取代率作用下再生混凝土孔隙分布变化规律见图 10。

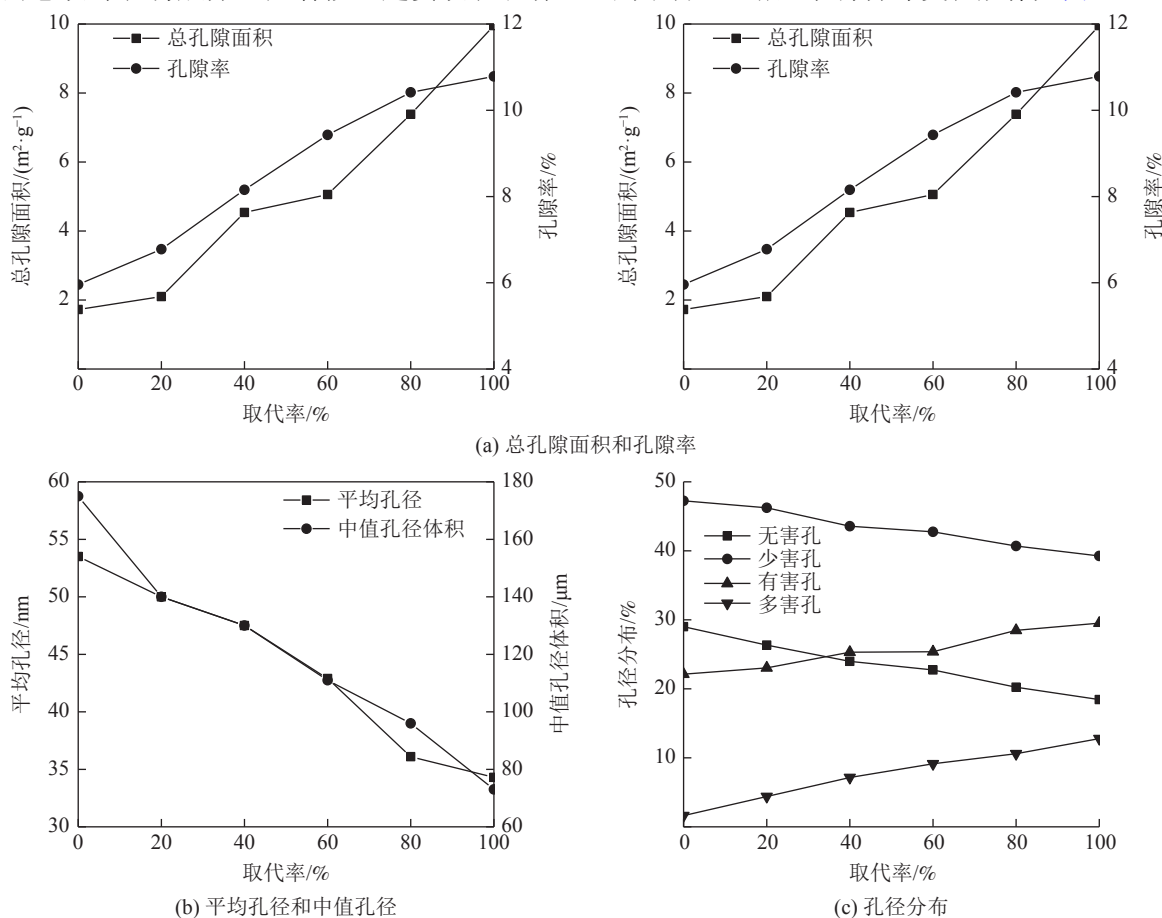


图 10 不同超贫铁矿石取代率作用下混凝土孔隙分布变化规律

Fig.10 Change law of concrete pore distribution under the action of different ultra-lean iron ore replacement rate

由图 10 可知，随着超贫铁矿石取代率的不断增大，混凝土总孔隙面积和孔隙率的变化规律呈现不断增大的趋势，而混凝土的平均孔径和中值孔径的变化规律却呈现不断减小的趋势，这主要是由于超贫铁矿石自身也具有孔隙，随着超贫铁矿石掺量的增多，使得混凝土内部总孔隙面积和孔隙率也增多；而经过机械粉磨 30 min 后超贫铁矿石的平均孔径和中值孔径要小于天然石料颗粒的平均孔径和中值孔径，故随着超贫铁矿石掺量的增多，使得混凝土内部平均孔径和中值孔径不断减小。但是混凝土内部的无害孔和少害孔占总

孔隙百分比的变化规律呈现出不断减少的趋势，而有害孔和多害孔占总孔隙百分比的变化规律呈现出不断增大的趋势。

4 结 论

(1) 超贫铁矿石骨料的取代率为 40%，粉煤灰掺量为 10%、石灰掺量为 18%、水泥掺量为 60%，水灰比为 0.45 和蒸压时间为 5 h 时，混凝土的性能达到较佳。

(2) 随着超贫铁矿石骨料取代率的不断增大，再生混凝土的物相成分并没有太大的差异，

但是氢氧化钙特征衍射峰强度值却不断减小,而总铁特征衍射峰强度值却不断增大。

(3) 随着超贫铁矿石取代率的不断增大,混凝土总孔隙面积和孔隙率的变化规律呈现不断增大的趋势,而混凝土的平均孔径和中值孔径的变化规律却呈现不断减小的趋势,但是混凝土内部的无害孔和少害孔占总孔隙百分比的变化规律呈现出不断减少的趋势,而有害孔和多害孔占总孔隙百分比的变化规律呈现出不断增大的趋势。

参考文献:

- [1] 徐风广, 杨凤玲, 李红伟, 等. 低活性钢渣在地面用水泥基自流平砂浆中的应用研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):85-88.
XU F G, YANG F L, LI H W, et al. Research on application of cement-based self-leveling floor mortar using low active steel slag[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):85-88.
- [2] 徐冬林, 谢冬冬, 张旭, 等. 基于均匀实验的赤铁矿石助磨剂复配实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(2):30-36.
XU D L, XIE D D, ZHANG X, et al. Experimental study on the mixing test of grinding aids of hematite ore based on uniform design[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(2):30-36.
- [3] 刘俊杰, 梁钰, 曾宇, 等. 利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):136-141.
LIU J J, LIANG Y, ZENG Y, et al. Preparation of baking-free bricks by iron tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):136-141.
- [4] 唐加俊, 邹春霞, 薛慧君, 等. 双掺合料模袋混凝土的孔隙特征研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7):2274-2280.
TANG J J, ZOU C X, XUE H J, et al. Study on pore evolution characteristics of double-doped molded bag concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7):2274-2280.
- [5] 马伟丽. 纤维混凝土损伤后渗透特性实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
MA W L. Experimental study on permeability characteristics of fiber reinforced concrete after damage[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [6] 崔静洁, 何文, 廖世军, 等. 多孔材料的孔结构表征及其分析[J]. *材料导报*, 2009, 23(13):82-86.
CUI J J, HE W, LIAO S J, et al. Measuring and analysing techniques of structural features for porous materials research[J]. *Materials Reports*, 2009, 23(13):82-86.
- [7] 李国强, 方明弄, 刘宜靖, 等. 钢结构住宅体系加气混凝土外墙板抗震性能实验研究[J]. *土木工程学报*, 2005(10):31-35+42.
LI G Q, FANG M Q, LIU Y J, et al. An experimental study on the seismic behavior of alc external wall panels in steel frames[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005(10):31-35+42.
- [8] 金彪, 杨留栓, 徐卓越, 等. 建筑垃圾微粉-再生骨料蒸压砖的制备研究[J]. *非金属矿*, 2018, 41(5):86-88.
JIN B, YANG L Q, XU Z Y, et al. Research on prepared autoclaved brick with the construction waste powder and regeneration aggregate[J]. *Non-Metallic Mines*, 2018, 41(5):86-88.
- [9] 朱萌萌. 建筑垃圾再生蒸压加气混凝土的实验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015.
ZHU M M. Research on construction waste regenerated autoclaved aerated concrete[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.
- [10] 宁波, 闫艳, 左夏伟, 等. 铁尾矿砂混凝土力学特性实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):159-164.
NING B, YAN Y, ZUO X W, et al. Experimental study on mechanical properties of iron tailings concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):159-164.
- [11] 何锐, 王铜, 陈华鑫, 等. 青藏高原气候环境对混凝土强度和影响[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(7):29-41.
HE R, WANG T, CHEN H X, et al. Impact of the Qinghai-Tibet Plateau's climate and environment on the strength and influence of concrete[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(7):29-41.
- [12] 肖颖, 管川, 徐晓霞. 钒钛磁铁矿铁钛物相关联分析方法[J]. *矿产综合利用*, 2019(4):98-102.
XIAO Y, GUAN C, XU X X. Determination method of iron and titanium phases for vanadium titanium magnetite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(4):98-102.
- [13] 朱琳, 赵玉卿, 石华. 电感耦合等离子体发射光谱仪法测定镍物相[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):105-109.
ZHU L, ZHAO Y Q, SHI H. Determination of nickel phase by ICP-AES[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):105-109.
- [14] 金珊珊, 林睿颖, 郑桂萍, 等. 低硅灰水泥砂浆孔隙结构及分形维数的演变特征[J]. *混凝土*, 2021(4):109-112.
JIN S S, LIN R Y, ZHENG G P, et al. Evolution of pore structure and fractal dimension of silica fume cement mortar[J]. *Concrete*, 2021(4):109-112.

Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete with Ultra-Lean Iron Ore

Wang Wenli¹, Long Yifei², Pan Chan², Guo Xiaoqin², Li Yangwei²

(1.Wuhan Transportation Vocational College, Wuhan, Hubei, China; 2.Wuhan City College Urban Construction Department, Wuhan, Hubei, China)

Abstract: This is a paper in the field of ceramics and composites. Ultra-lean iron ore was processed, and the ultra-lean iron ore with a good gradation was used as aggregate to prepare a new type of autoclaved aerated concrete block. Furthermore, the effects of different aggregate content, water-cement ratio and autoclave time on the performance and microstructure of autoclaved aerated concrete were studied. The results showed that with the increase of water-cement ratio, lime content, aggregate replacement rate and autoclave time, the compressive strength of concrete showed a trend of first increasing and then decreasing. When the replacement rate of ultra-lean iron ore aggregate was 40%, the amount of fly ash was 10%, the amount of lime was 18%, the amount of cement was 60%, the water-cement ratio was 0.45 and the autoclave time was 5h, the performance of concrete was at its best. At the same time, the incorporation of ultra-lean iron ore had a great impact on the generation of new phases, the concrete itself and the pore structure.

Keywords: Ultra-lean iron ore; Ceramics and composites.; Water-cement ratio; Lime content; Aggregate replacement rate; Pore structure

(上接第 69 页)

[47] LY X B, DENG Z G, WEI C, et al. Solvent extraction of vanadium from a stone coal acidic leach solution using D2EHPA/TBP: Continuous testing[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 154:40-46.

[48] MA Y Q, WANG X W, WANG M Y, et al. Separation of V(IV) and Fe(III) from the acid leach solution of stone coal by D2EHPA/TBP[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 153:38-45.

[49] CHEN D S, ZHAO H X, HU G P, et al. An extraction process to recover vanadium from low-grade vanadium-bearing titanomagnetite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015,

294(30):35-40.

[50] LI X B, WEI C, DENG Z G, et al. Selective solvent extraction of vanadium over iron from a stone coal/black shale acid leach solution by D2EHPA/TBP[J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 105(3):359-363.

[51] LIU H, ZHANG Y M, HUANG J, et al. Selective separation and recovery of vanadium from a multiple impurity acid leaching solution of stone coal by emulsion liquid membrane using di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 122:289-297.

Current Status and Development Trend of Vanadium Extraction by P204 Extraction

Hu Yujie, Ye Guohua, Tang Yue, Tao Yuanyuan

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: This is a paper in the field of metallurgical engineering. Organophosphorus class extractant D2EHPA (P204) is very widely used in vanadium extraction. Firstly, the form of vanadium present in the leach solution affects the effect of extraction, V(IV) is mainly stable in solution in the form of VO^{2+} in a strongly acidic solution; when the pH value gradually increases, V(V) mostly exists in the form of $\text{H}_2\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{4-}$ and $\text{HV}_{10}\text{O}_{28}^{5-}$. Secondly, based on the research of organophosphorus extractant P204 in recent years, this paper analyzes the conformational relationship of organophosphorus extractant P204 and finds that the spatial site resistance effect is equally important as a secondary factor compared with the type of phosphoryl adjacent groups, based on the hydrogen bonding effect, the extractant molecules will produce dimers or even multimers between them, thus changing the structure and properties of the extractant molecules. Finally, the progress of the development and application of P204 extractive vanadium and the outlook on the future of the related fields are presented, pointing out the future research directions of P204 extractive agents.

Keywords: Metallurgical engineering; Vanadium extraction; P204; Solvent extraction; Applications and advances