

废弃物,是缓解我国砂石资源紧缺和助力“双碳”战略实施的一个重要举措。然而,国内外对于固体废弃物在喷射混凝土中的研究目前还较少。

本文综述了常见工业固体废弃物在喷射混凝土中的应用,固体废弃物可以作为胶凝材料取代水泥应用于喷射混凝土中,可以减少水泥生产过剩中的资源消耗及环境污染,同时,固体废弃物也可以作为粗细骨料取代天然砂石应用于喷射混凝土,对于缓解砂石资源短缺有重要意义。

1 喷射混凝土的施工工艺及性能

1.1 喷射混凝土施工工艺

喷射混凝土因其施工简单、高效、成本低等特点被广泛应用于加固工程中。喷射混凝土的施工工艺主要有干喷混凝土、湿喷混凝土和潮喷混凝土三种。

干喷混凝土是将水泥、砂、碎石和外加剂混合均匀后,使用干式喷射机通过压缩空气输送到喷嘴处,在喷嘴处与压力水混合后喷射到受喷面,要求水灰比小于0.25,施工工艺如图2所示。干喷混凝土便于长距离管道运输(150~200m),清洗设备方便,仅需清洗喷嘴,但施工现场粉尘大,喷射混凝土回弹率大,水灰比难控制。

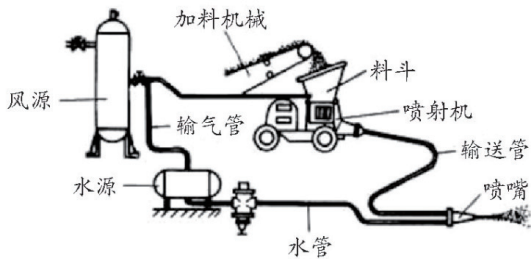


图2 干喷混凝土施工工艺^[4]

Fig.2 Construction technology of dry shotcrete^[4]

湿喷混凝土是将水泥、砂、碎石混合均匀后,通过湿喷机输送到喷嘴处,在喷嘴处与液体速凝剂混合后借助风压喷射到受喷面,施工工艺如图3所示。湿喷混凝土施工现场粉尘小,回弹率小,强度高,但清洗不方便,不适合长距离输送(<50m)。湿喷技术弥补了干喷技术的不足,适合大规模应用。

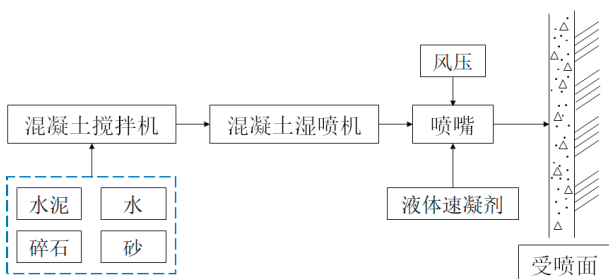


图3 湿喷混凝土施工工艺

Fig.3 Construction technology of wet shotcrete

潮式喷射混凝土是在干喷混凝土的基础上发展而来的,与干喷混凝土的区别是骨料含水率在10%~12%,与水泥搅拌生成潮料,含水率8%~10%,通过喷射机喷射到受喷

面,施工工艺如图4所示。

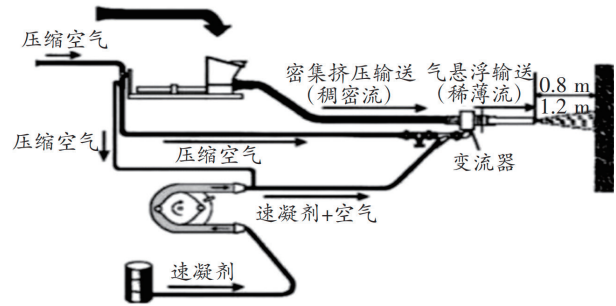


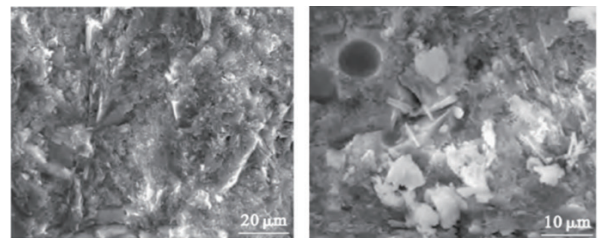
图4 潮式喷射混凝土施工工艺^[4]

Fig.4 Construction technology of half-wet shotcrete^[4]

1.2 喷射混凝土性能

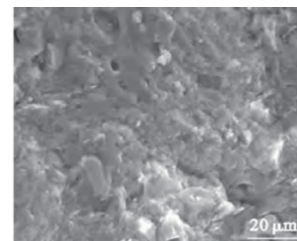
1) 力学性能。喷射混凝土质量的主要评定指标是抗压强度。喷射混凝土是在空气压力作用下通过高速喷射成型的,其拌合物与模筑混凝土相比更密实,因此有较高的强度。喷射混凝土有较高的早期强度,然而掺入速凝剂会使其后期强度降低。现在使用的喷射混凝土的粘结强度低,通过硅灰和早期减缩剂可提高其早期强度^[5]。喷射混凝土应用于隧道支护和加固工程时,其与岩石、老旧混凝土的粘结强度极其重要,粘结强度主要与岩石、老旧混凝土的粗糙程度、养护方式及结晶状态等有关^[6]。

2) 抗渗性。喷射混凝土多用于隧道工程及水利工程等,容易受地下水影响发生漏水现象,同时还会导致硫酸盐侵蚀和氯盐侵蚀等破坏,因此提高喷射混凝土的抗渗性尤为重要。喷射混凝土抗渗性与其孔隙率及孔隙结构相关,掺入硅灰后可改善水泥浆体的微观形貌(如图5),水化产物数量增多,水泥浆体结构更致密,可有效阻止有害介质侵蚀,改善喷射混凝土的抗渗性^[7]。



硅灰

硅灰+粉煤灰



硅灰+矿粉

图5 水泥浆体微观形貌特征^[7]

Fig.5 Microscopic morphology characteristics of cement slurry^[7]

3) 回弹率。喷射混凝土回弹率为溅落混凝土质量与总质量之比,即平均回弹率。根据李雪松等的研究,掺入石灰石粉、增粘剂5%及速凝剂6%可使混凝土在具有黏度的同时流动性也较好,现场试验回弹率8.6%,显著提高了喷射混凝土的喷射效率,降低了成本^[8]。

2 固体废弃物替代胶凝材料

混凝土是最常用的建筑材料。社会经济发展使得水泥的需求量和生产量持续攀升,而传统硅酸盐水泥生产具有高污染、高能耗、高碳排放量等“三高”特性。使用固体废弃物替代水泥,降低了水泥生产过程中能源和资源消耗,同时可以使工业废弃物资源循环再生,减少环境污染。Julie Armengaud等^[9]研究了掺加辅助胶凝材料的干喷混凝土的耐久性,结果表明,使用辅助胶凝材料制备干喷混凝土具有较高的孔隙率,但耐久性好,与普通混凝土相比,抗压强度、渗透性和氯离子迁移率相当或更好。

固废基胶凝材料是一种新型胶凝材料,利用钢渣、矿渣、脱硫石膏、粉煤灰和尾矿等工业废渣破碎粉磨后按一定比例配制而成。朴世玮等^[10]使用市售Ⅱ级固废基胶凝材料(钢渣、粉煤灰等研磨混合制成)部分取代水泥制备无粗骨料高强喷射固废基胶凝材料混凝土,研究表明,随着水泥掺量的增加,拌合物坍落度降低,混凝土1d强度发展速度大幅提高,对3d之后强度影响不大,当水泥掺量超过20%时,最大抗压强度较基准配比增加了46%,达到71.5MPa。秦琳等^[11]以粒状高炉矿渣、钢渣、工业副产石膏、粉煤灰、含铁废料等制成固废基胶凝材料代替水泥制备喷射混凝土,研究表明,其抗拉强度和粘结能力较强,固废基胶凝材料喷射混凝土性能受温度的影响显著,温度越高,凝结时间越短,早期抗压强度的提升速度越快,且养护方式主要影响混凝土早期强度。

郑磊等^[12]研究了赤泥基喷射混凝土性能,通过赤泥基地聚合物替代水泥制备喷浆材料,随着赤泥掺量的增加,喷射混凝土回弹率降低、弯曲韧性和持荷能力增加,其力学性能随着赤泥掺量的增加而降低,赤泥掺量应低于20%。曹恒等^[13]以矿粉基地聚合物为研究对象制备高强抗渗地聚合物喷射混凝土,根据其抗折强度、抗压强度和渗透性优选出激发剂最佳掺量为15%。

将含硫燃料(煤、油)燃烧后产生的烟气进行脱硫处理会得到烟气脱硫石膏(FGD石膏),主要成分是二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。荣传新等^[14]使用改性后的脱硫石膏代替水泥制备巷道喷射混凝土,并验证了其现场支护效果,结果表明,改性脱硫石膏基喷射混凝土应用于支护结构具有较高的承载能力和抗变形能力,满足支护要求。

目前,关于将固体废弃物作为胶凝材料替代水泥制备喷射混凝土的研究还较少,但现有研究表明,使用钢渣、矿渣、脱硫石膏、粉煤灰和尾矿等工业废弃物制备固废基胶凝材料,可以改善混凝土的力学性能及耐久性。

3 固体废弃物替代骨料

目前主要使用的固废骨料有隧道洞渣、尾矿砂、煤矸

石和再生骨料等。使用固废骨料代替天然骨料会对喷射混凝土性能造成负面影响,但可以通过调整配合比,掺入粉煤灰、纤维和多壁碳纳米管等措施进行弥补,并使喷射混凝土的性能得到提升。

3.1 隧道洞渣

洞渣是隧道施工中开挖出来的废渣,筛选和处理后进行机械破碎处理制备机制砂,将机制砂作为喷射混凝土细骨料使用。与天然砂相比,机制砂具有石粉含量高、颗粒级配差、表面粗糙、棱角多等缺点,会导致喷射混凝土流动性和和易性差、黏聚性不足等系列问题,给喷射混凝土在隧道工程中的应用带来困难。为此,研究者们通过调整配合比、掺入矿物掺合料和纤维等方式来改善喷射混凝土的性能。朱贤宇等^[15-16]的研究表明,增加单方用水量、增加砂率等可以改善喷射混凝土的力学性能和工作性能。通过试验优化配合比,粉煤灰20%,水胶比0.45,砂率分别为50%、55%和60%,基于此进行小型湿喷试验,工作性、可泵性和喷射性能良好,回弹率约为10%,试件28d抗压强度大于30MPa,符合喷射混凝土施工和设计要求,此外,掺加2%的玄武岩纤维后混凝土保水性和黏聚性更好。肖双清的^[17]研究表明,随着粉煤灰掺量的增加,喷射混凝土的工作性、黏聚性及和易性得到明显改善,在实际施工中掺入20%的粉煤灰代替水泥可有效提高喷射混凝土的性能,满足施工要求的同时还降低了成本。

除了将隧道洞渣制成机制砂作为喷射混凝土细骨料使用,还可以将洞渣作为喷射混凝土粗骨料使用。孙振川等^[18]研究了洞渣部分替代喷射混凝土中粗骨料的可行性和实用性,基于确定的基准配合比,改变洞渣粗骨料替代率,分别为10%、15%、20%、25%和30%,结果表明,抗压强度随着洞渣粗骨料替代率的增加而降低,替代率为30%时,1d抗压强度处于规范要求临界值附近,因此洞渣粗骨料的替代率应控制在30%以下。

在隧道洞渣的使用过程中会产生一些副产品,合理利用可以提高母岩资源的利用率。刘骁凡等^[19]将隧道洞渣花岗岩机制砂应用于混凝土中,对水洗除泥后的机制砂进行破碎研磨处理后得到干净的隧道洞渣石粉,外掺隧道洞渣石粉,分别以机制砂和石粉总质量的7.3%、11.4%、15.1%和18.6%掺入,研究了石粉掺量对于混凝土工作性、力学性能和电通量的影响,结果表明,混凝土拌合物的流动性随着石粉含量的增加而降低,特别的,强度越高混凝土拌合物黏度增加越显著,当石粉含量超过11.4%时,3d和28d抗压强度增加,28d电通量增加。

赵立等^[20]研究了石屑取代机制砂对喷射混凝土性能的影响,石屑替代机制砂改善了混凝土的力学性能,但工作性和耐久性较差,研究表明,增大砂率和粉煤灰掺量可以改善混凝土的孔结构及耐久性,当喷射混凝土砂率为55%、粉煤灰掺量为20%时,耐久性最好。Chen等^[21]将隧道洞渣生产人造石、人造砂过程中产生的土石渣回收利用制备湿喷混凝土,研究表明,随着土石渣掺量的增加,混凝土抗压强度和塌落度均降低,并给出了土石渣最佳取代率为75%,并进行了大板喷射现场试验,抗压强度和回弹率均符合标准要求。

3.2 尾矿砂

尾矿砂是选矿厂排放的尾矿矿浆脱水后形成的固体矿物废料,是综合利用率最低的固废之一,将尾矿应用于喷射混凝土对提高尾矿利用率、降低成本有重要意义。黄正均等^[22]研究了铁尾矿砂替代天然砂对喷射混凝土和易性及力学性能的影响,铁尾矿砂取代率分别采用0%、20%、40%、60%、80%和100%,结果表明,当铁尾矿砂占总体细骨料的20%时,喷射混凝土和易性、凝结时间、耐久性最好,块体密度最大,各龄期抗压强度和抗拉强度最高。Zou等^[23]以废石为粗骨料尾矿为细骨料制备湿喷混凝土,以强度和坍落度为优化目标,确定了湿喷混凝土的最佳配合比为水泥掺量290kg/m³,质量浓度79%,废石掺量70%,粉煤灰掺量16%。

利用尾矿砂制备喷射混凝土存在胶凝材料耗量大,强度提升不明显等问题。胡亚飞等^[24]使用水泥-固废资源(硅灰-粉煤灰-矿渣粉)复合胶凝体系对其性能进行改善,探究了复合胶凝体系对尾矿砂湿喷混凝土力学性能的影响规律,并优化其配合比,结果表明,在单因素对抗压强度影响中,由大到小依次为硅粉、矿渣粉和粉煤灰,在交互因素中,矿渣粉-粉煤灰交互作用对强度影响最大,硅粉-粉煤灰交互作用对强度影响最小。Hu等^[25]探究了不同因素对尾矿湿喷混凝土抗压强度的影响规律,结果表明,随着矿粉掺量和细度模数的增加,抗压强度增加,粉煤灰掺量为120kg/m³时,抗压强度最大,矿粉掺量低于80kg/m³主要影响中后期强度,矿粉掺量高于80kg/m³主要影响早期强度,粉煤灰掺量对混凝土早期强度影响最显著。

3.3 煤矸石

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的排放量最大的工业固体废弃物之一,其储存不仅消耗土地资源,且污染水、空气和土壤。为促进煤矸石就地利用,研究人员尝试将煤矸石作为粗骨料制备混凝土。梁巨理等^[26]使用泥岩矸石、砂岩矸石和煤基矸石三种不同类型的矸石来替代喷射混凝土骨料,以石灰岩基作为对照组,探究各类矸石基喷射混凝土的性能,结果表明,煤基喷射混凝土总体强度偏低,砂岩矸石喷射混凝土和石灰岩矸石喷射混凝土强度与弹性模量相差不大,可以用来替代粗骨料,砂岩基喷射混凝土最佳配合比为水灰比0.55,级配0.6,单轴抗压强度13.56MPa。Chen等^[27]探究了将煤矸石骨料作为单一骨料源配制喷射混凝土,结果表明,煤矸石掺量为68%时抗压强度最大,煤矸石掺量增加可提高喷射混凝土抗氯离子渗透能力,与天然骨料喷射混凝土相比,煤矸石喷射混凝土界面过渡区机械性能更好。

Sun等^[28]采用煤矸石替代粗骨料,研究了煤矸石集料与砂的质量比(G/S)和煤矸石粒径对轻集料煤矸石喷射混凝土工作性能和力学性能(抗压强度、劈裂强度)的影响,结果表明,煤矸石集料与砂的质量比对抗压强度影响较大,且随着G/S的增加,混凝土抗压强度降低,煤矸石粒径对混凝土劈裂强度的影响较大,粒径越大,劈裂强度越低。魏鹏等^[29]采用破碎后的煤矸石取代粗骨料,采用气化渣取代细骨料,结果表明,无论是单替还是双替混凝土的力学性能都较差,无法满足现场施工要求,后使用硅烷偶联剂裹

覆煤矸石对骨料进行改性,改性后喷射混凝土整体强度提升约7MPa。Xiao等^[30]提出使用非活性煤矸石(NACG)碎石代替传统骨料配制混凝土,研究表明,NACG细集料取代率增加,混凝土和易性和抗拉强度降低,且随着粗集料取代率增加,混凝土抗压强度增加。

3.4 再生骨料

再生骨料是由废弃砖瓦、混凝土等经处理、破碎、分级之后制得。与天然骨料相比,再生骨料表面粗糙、棱角较多,有残留的水泥砂浆,机械破碎会导致再生骨料内部产生大量的微小裂纹,使得再生骨料质量较差^[31]、强度较低。近年来,随着再生骨料在工程中的应用推广,关于再生骨料制备混凝土的研究得以增加。刘家明等^[32]的研究表明,随着砂率和水胶比的增加,再生骨料喷射混凝土的力学性能呈先增加后减小的趋势,并给出C20喷射混凝土的配合比,水泥360~380kg/m³,水灰比0.55~0.60,砂率48%~52%。陈海霞等^[31]研究再生骨料喷射混凝土的基本性能,结果表明,再生骨料喷射混凝土回弹率和粘接强度均高于天然骨料混凝土,且混凝土坍落度、超声波速、强度和弹性模量均随着再生骨料掺量增加而降低。Gonçalo Duarte等^[33]使用再生粗骨料替代天然骨料制备喷射混凝土,采用干喷工艺,研究表明,掺入再生骨料后劈裂抗拉强度与抗压强度均降低,对劈裂强度的影响较小,再生骨料有较高的变形能力,弹性模量降低,完全取代时弹性模量降低31%,由于再生骨料的粗糙度和形状特征,其与水泥浆体之间的粘结能力好,耐磨性提高,且使用再生骨料完全取代时厚度损失减少了13%以上。José Nobre等^[34]使用再生骨料替代天然骨料制备干喷混凝土,研究表明,再生骨料替代率为20%时收缩降低了18%,掺入再生骨料会造成性能的损失,但在再生骨料的百分比下,材料损失减少约30%,回弹效应较少,因此在喷射混凝土中使用再生骨料作为粗骨料是可行的。使用再生骨料完全取代天然骨料时对喷射混凝土的性能有负面影响,Li等^[35]使用多壁碳纳米管(MWCNTs)改善喷射混凝土的性能,研究表明,掺入多壁碳纳米管后喷射混凝土的相对屈服应力和塑形粘度增加,适量的MWCNTs(0.06wt%和0.09wt%)可以优化喷射混凝土内部孔径分布,增加结构致密性,加快水化速度,提高水化产物的产率。

3.5 其他固废骨料

高钛重矿渣是一种多孔型块状废渣,是在钛工业提取钛金属过程中产生的,将其作为粗细骨料制备混凝土具有较好的力学性能^[36]。虽然高钛重矿渣混凝土受到了众多关注,但其在隧道喷射混凝土中的研究仍较少。杨贺等^[36]以高钛重矿渣替代天然骨料制备高钛重矿渣喷射混凝土,通过掺入粉煤灰和钢纤维改善其性能,分析对比不同水灰比下喷射混凝土的力学性能和回弹率,得到最佳配合比,结果表明,纤维可以提高混凝土力学强度,降低回弹率,在粉煤灰和钢纤维掺量一定时,高钛重矿渣喷射混凝土的最佳水胶比为0.38,在0.38的水胶比下喷射混凝土回弹率最低为22.8%,喷射厚度最大为110mm。Sun等^[37]使用高钛重矿渣为粗细骨料制备钢纤维增强高钛重矿渣湿喷混凝土,提出最佳配合比为水胶比0.38,粉煤灰掺量15%,减水剂0.8%,钢纤维45kg/m³,并通过有限元分析得出钢纤维高钛重矿渣

喷射混凝土最佳衬砌厚度为80mm。

Hou等^[38]使用工业废渣制备了一种人工轻质陶粒,用于制备轻骨料喷射混凝土,研究表明,掺入粉煤灰和硅灰轻骨料喷射混凝土的微观结构更致密,抗氯离子渗透性提高,粉煤灰和硅灰掺量分别为15%和10%时力学性能最好。Mehdi Serati等^[39]采用废碎玻璃替代天然砂制备喷射混凝土,研究表明,掺入玻璃集料喷射混凝土有较好的早期和后期强度,最高可提高35%,可改善喷射混凝土的工作性能。

4 结语

本文通过对固体废弃物在喷射混凝土中的应用现状进行综述,介绍了固废基胶凝材料、赤泥和脱硫石膏等代替水泥应用于喷射混凝土,以及机制砂、尾矿砂、煤矸石、再生骨料和高钛重矿渣等代替粗细骨料在喷射混凝土中的应用,主要得出以下结论:

1) 合理使用固废材料作为胶凝材料制备喷射混凝土可以改善喷射混凝土的工作性能、力学性能及耐久性,降低回弹率。

2) 固体废弃物代替天然骨料会对喷射混凝土的性能有一定的负面影响,可以通过调整配合比,掺入矿物掺合料和纤维等方式改善其性能。

3) 固体废弃物可以制备满足标准的喷射混凝土,具有可行性,对降低生产成本、实现固废资源循环利用、减少环境污染有重要意义。

参考文献

- [1]朱广兵. 喷射混凝土研究进展[J]. 混凝土,2011(4):105-109.
- [2]国家统计局. 2023年中国统计年鉴[EB/OL]. [2024-07-06]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2023/indexch.htm>,(2023).
- [3]生态环境部. 2022年中国生态环境统计年报[EB/OL]. [2024-07-06]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/>,(2023-12-29).
- [4]赵麒. 煤矿支护用喷射混凝土技术与设备研究综述[J]. 能源与节能,2020(7):87-88.
- [5]郭俊波,李钰轩,付佳,等. 喷射混凝土早期力学特性及水化特征研究[J]. 混凝土,2024(7):84-88.
- [6]周旭东. 喷射混凝土在板桥加固中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2005.
- [7]陈俊松,王伟,曾鲁平,等. 低掺量矿物掺合料对喷射混凝土抗渗性的影响[J]. 混凝土,2024(7):199-203.
- [8]李雪松. 增黏剂和石灰石粉掺入对喷射混凝土性能影响的试验研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(S2):410-415.
- [9]ARMENGAUD J, CYR M, CASAUX-GINESTET G, et al. Durability of dry-mix shotcrete using supplementary cementitious materials[J]. Construction and building materials, 2018,190:1-12.
- [10]朴世玮. 高强喷射固废基胶凝材料混凝土的配制及性能研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.

[11]秦琳. 喷射固废基胶凝材料混凝土配合比研究与应用[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.

[12]郑磊. 赤泥基矿井喷浆材料的研制及性能优化[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

[13]曹恒. 高强抗渗地聚合物喷射混凝土性能调控及应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

[14]荣传新,孙世成,王彬,等. 改性脱硫石膏基喷射混凝土支护结构及其应用[J]. 广西大学学报(自然科学版),2020,45(1):67-74.

[15]朱贤宇,胡得尚,王振凡,等. 富含细粒土洞渣机制砂混凝土配合比试验研究[J]. 混凝土,2022(5):88-92.

[16]朱贤宇,杨生虎,翟胜田,等. 洞渣湿喷混凝土的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(05):1444-1450.

[17]肖双清. 粉煤灰掺量对隧道机制砂喷射混凝土性能的影响[J]. 价值工程,2024(7):117-119.

[18]孙振川,刘伟,赵海雷,等. 基于岩碴部分替代的早强喷射混凝土研制及应用[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(z2):41-47.

[19]刘骁凡,鲁凯,樊强,等. 隧道洞渣花岗岩机制砂中石粉含量对混凝土性能的影响[J]. 混凝土,2022(12):106-109.

[20]赵立,孙江涛,吴定略,等. 石屑湿喷混凝土的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报,2023,42(03):1016-1024.

[21]CHEN F, LI M, WANG C, et al. Solid waste-based super-retarded damp-shotcrete for low carbon and environmental protection[J]. Journal of cleaner production, 2024,448:141588.

[22]黄正均,张英,任奋华,等. 铁尾矿砂对喷射混凝土力学特性影响的试验分析[J]. 矿业研究与开发,2019(4):121-126.

[23]ZOU X, ZHANG Y, LIU B, et al. Study on mechanical properties and ratio parameter optimization of fly ash wet shotcrete under the influence of multiple factors[J]. Case Studies in construction materials, 2023,19:e02679.

[24]胡亚飞,李克庆,韩斌,等. 复合胶凝体系对尾砂湿喷混凝土强度的影响及其配比优化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):3999-4009.

[25]HU Y, YIN S, LI K, et al. Comprehensive utilization of solid waste resources: Development of wet shotcrete for mines[J]. International journal of minerals, metallurgy and materials, 2023,30(9):1692-1704.

[26]梁巨理. 矸石基喷射混凝土力学特性研究与配比分析[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

[27]CHEN P, ZHANG L, WANG Y, et al. Environmentally friendly utilization of coal gangue as aggregates for shotcrete used in the construction of coal mine tunnel[J]. Case studies in construction materials, 2021,15:e00751.

[28]SUN J, LIU S, MA Z, et al. Mechanical properties prediction of lightweight coal gangue shotcrete[J]. Journal of

(下转第76页)

参考文献

- [1]刘惠婧. 建筑材料燃烧总热值的测定能力验证结果分析[J]. 品牌与标准化,2023(3):147-149.
- [2]姚钟莹. 几种常见保温材料燃烧热值分析[J]. 墙材革新与建筑节能,2015(11):51-52.
- [3]郑坚. 关于低热值材料燃烧热值结果的影响因素探讨[J]. 中国建材科技,2024,33(03):130-132.
- [4]李征,李维胜. 基于建筑隔热保温材料燃烧热值检验结果的分析[J]. 绿色环保建材,2018(8):19.
- [5]徐桂灵. 低热值高效保温材料的制备研究[J]. 河南建材,2016(1):17-18+21.
- [6]GB 8624-2012,建筑材料及制品燃烧性能分级[S].
- [7]杨光辉,杨森,孙玉泉,等. 几类典型外墙保温材料燃烧热值探析[C]//中国阻燃学会. 2012年中国阻燃学术年会论文集,2012:6.
- [8]尹碧军,刘东发,李业添,等. 建筑装饰材料燃烧热值测定影响因素的研究[J]. 建材世界,2016(3):24-26.
- [9]杨修飞,黄蕾,徐玉梅,等. 我国南方地区几种常见生物质材料的热值测定[J]. 节能,2017(8):27-29+2.
- [10]刘欢,刘涛,龙志凡. 常见的保温材料燃烧热值分析[J]. 建材与装饰,2020(10):39-40.
- [11]张艳,徐晶晶. 建筑材料燃烧热值试验问题探讨[J]. 中国设备工程,2020(10):147-148.
- [12]金富. 浅谈建材燃烧热值试验结果的影响因素[J]. 品牌与标准化,2017(11):85-86.
- [13]张希瑜,尚云峰,姬宝生. 建筑材料燃烧热值测定[J]. 消防科学与技术,2013(6):582-585.
- [14]ZHANG X, SHANG Y, JI B. Determination of building materials combustion heat value[J]. Fire science and technology, 2013,32(06):582-585.
- [15]刘占清,袁志欣,周俊钧,等. 影响建筑材料燃烧热值测试结果的主要因素及解决措施[J]. 中国建材科技,2013,22(02):4-6+15.
- [16]GB/T 14402-2007,建筑材料及制品的燃烧性能燃烧热值的测定[S].
- (上接第56页)
- building engineering, 2023,80:108088.
- [29]魏鹏. 煤矸石-气化渣喷射混凝土配比优化与骨料改性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [30]XIAO M, JU F, HE Z. Research on shotcrete in mine using non-activated waste coal gangue aggregate[J]. Journal of cleaner production, 2020,259:120810.
- [31]陈海霞,张志权,宋学庆. 再生骨料喷射混凝土基本性能试验[J]. 西安科技大学学报,2020,40(03):434-440.
- [32]刘家明. 再生骨料喷射混凝土制备试验研究[J]. 低碳世界,2022(11):184-186.
- [33]DUARTE G, BRAVO M, DE BRITO J, et al. Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete[J]. Construction and building materials, 2019,210:696-708.
- [34]NOBRE J, BRAVO M, DE BRITO J, et al. Durability performance of dry-mix shotcrete produced with coarse recycled concrete aggregates[J]. Journal of building engineering, 2020,29:101135.
- [35]LI P, CHEN L, MA H, et al. Spatial distribution characteristics and microscopic mechanisms for enhancing mechanical properties of MWCNTs in recycled coarse aggregate shotcrete[J]. Construction and building materials, 2023,364:129927.
- [36]杨贺,陈伟,马双狮,等. 高钛重矿渣隧道喷射混凝土力学性能试验研究[J]. 钢铁钒钛,2023(3):118-122.
- [37]SUN J K, LI R, LI L D, et al. Develop a sustainable wet shotcrete for tunnel lining using industrial waste: A field experiment and simulation approach[J]. Advances in concrete construction, 2023,15(5):333-348.
- [38]HOU S, LI F, TANG H, et al. Investigations on the performance of shotcrete using artificial lightweight shale ceramics as coarse aggregate[J]. Materials, 2022,15(10):3528.
- [39]SERATI M, JAKSON N, ASCHE H, et al. Sustainable shotcrete production with waste glass aggregates[J]. SN applied sciences, 2022,4(3):14-82.