

石墨尾矿在建筑材料方面的相关应用研究现状

曹晓鹏 孙天瑞 宋卫吉 王一辰 刘培治

黑龙江大学建筑工程学院，黑龙江省哈尔滨市，150006；

摘要：石墨尾矿是石墨生产过程中产生的主要废弃物。我国每年有大量石墨尾矿需要处理。本文介绍了石墨尾矿在土木工程领域作为建筑材料方面的研究：对石墨尾矿本身的静力学特性的研究；作为掺和物加入后对材料性能的影响，主要分为混凝土、加气混凝土、砌块砖、公路基底等四种材料，研究性能包括力学性能，耐久性能，导电性能；以及其余一些小方向的研究。

关键词：石墨尾矿；建筑材料；研究现状

DOI：10.69979/3029-2727.24.05.033

引言

我国的石墨矿藏在世界上的占比巨大，其中黑龙江省的储量又占全国的64%以上。现今，石墨因其优秀的物化性能（如导电性、导热性、耐高温、润滑剂等）在我国已被广泛使用与各行各业，是我国不可或缺工业材料。但以现今的生产工艺，石墨的生产过程必然伴随石墨尾矿的产生，每生产1t石墨会伴随10t以上石墨尾矿的产生。这不仅占用了我国大量土地资源，而且会造成水体污染、土体污染、大气污染等环境问题。

2020年9月中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标，为响应国家号召，推进我国生态文明建设，提高气候安全保障水平，有效应对气候变化挑战，增强发展的协调性和可持续性，现对我国石墨尾矿作为掺入料制备新型土木工程材料方面的相关研究进行如下总结。

1 石墨尾矿砂体自身土力学性质

目前进行的大部分研究都是以石墨尾矿作为掺合料添入其它建筑材料为方向，关于石墨尾矿砂体自身土力学性质的研究较少，主要是含水率、级配、抗剪强度方面的研究。

赵浩男^[1]等对鸡西和萝北石墨尾矿进行土力学性质试验研究，试验表明两种石墨尾矿中的天然含水率都较低，分别为1.34%和0.41%，说明两种石墨尾矿的保水性极差；两种石墨尾矿的不均匀系数 $C_u > 5$ ，且曲率系数 C_c 在1~3之间，级配良好；击实试验表明石墨尾矿的含水率——干密度相关曲线有两个峰值，这一点与其它土料不同；细粒含量对石墨尾矿抗剪强度有一定影响，垂直荷重低于200KPa时，影响不大，高于200KPa时，细粒含量增加，抗剪强度先升高后减小，在细粒含量30%处达到峰值；细粒含量对石墨尾矿黏聚

力和内摩擦角有较大影响，随细粒含量增加，黏聚力先降低后升高，存在最小值，内摩擦角先升高后降低，存在最大值。

2 石墨尾矿用于普通混凝土以外建筑材料的相关研究

石墨尾矿一般作为细骨料取代砂直接加入建筑材料制备混凝土、砖，或作为公路基底材料。主要研究它们的力学性能，耐久性，电阻率与石墨尾矿掺量的关系，以及电阻率与力学性能之间的关系。

2.1 石墨尾矿加气混凝土性能研究

加气混凝土方向分别有泡沫混凝土和蒸压加气混凝土。试验验证了石墨尾矿加气混凝土的可行性。在泡沫混凝土中加入石墨尾矿会增大干密度和导热系数，抗压强度随着掺量增大而先增大后减小，且低于河砂制备泡沫混凝土；而增压加气混凝土中，随着石墨尾矿掺量下降，干密度与抗压强度先增大后减小，最后又增大。

孙小魏^[2]用萝北石墨尾矿采用预制泡沫混合法制备泡沫混凝土，形成石墨尾矿泡沫混凝土，依据规范分别测出干密度、抗压强度、吸水率、抗折强度和导热系数，掺入比例在0%~60%之间，测得干密度随着石墨尾矿掺入比例的增大而增大，抗折强度逐渐降低，抗压强度先增大后减小。以掺入比例20%不变时，测得石墨尾矿泡沫混凝土力学性能与尾矿细度有很大关系，抗压强度和抗折强度随细度增加而增大。随着水料比的增大，干密度逐渐降低，吸水率逐渐增大，抗压和抗折强度先增大后减小，在0.6时达到峰值。

王少海^[3]用湖北地区某石墨尾矿制备石墨尾矿泡沫混凝土，不需分级可以制备出满足《泡沫混凝土砌块》(JC1062-2007)标准中B08、A3.5等级的泡沫混凝土。由于石墨尾矿中含有一定量的轻质物料和云母，较河沙

制备的泡沫混凝土强度有所降低。

王青^[4]以石墨尾矿作为掺合料制备蒸压加气混凝土,试验验证了以石墨尾矿作为硅质原料制备蒸压加气混凝土的可行性,随着钙硅比升高,石墨尾矿加气混凝土强度与干密度先增后减再增,当钙硅比密度为 0.6 时,托勃莫来石晶体数量最多。且得出石墨尾矿蒸压加气混凝土的适宜配比为石墨尾矿:水泥:石灰:磷石膏=60:15:22:3,铝粉掺量 1.4%,按照此配方可制得 A5.0, B07 级蒸压加气混凝土。

2.2 石墨尾矿制备砖相关研究

以石墨尾矿制备免烧砖和烧结砖中的试验结果都表明,石墨尾矿的掺入能够满足规范要求,且在烧结砖中,石墨尾矿掺入后,力学性能相较于传统粘土砖有所提高,但容易出现泛霜的问题,可通过掺入添加剂和控制原料细度的方法解决。

杨中喜^[5]试验制备的石墨尾矿固化砖,成本低于普通粘土砖,且经过抗压、抗折和抗冻试验测试,结果满足 JC422-91 一等免烧砖标准。

张卫卫^[6]以石墨尾矿为主要原料制备烧结砖,除泛霜问题,其它性能均符合 GB 5101-2003 要求,可采用添加外加剂和控制原料细度解决。

郭伟娟^[7]的研究结果表明硫酸钙会引起石墨尾矿烧结砖泛霜,添加一定量外加剂和碾磨原料后可以抑制泛霜现象,添加不同量的 MnO_2 、钛白、铁红可以改变石墨尾矿烧结砖的颜色。

杨敏^[8]试验了不同温度对石墨尾矿烧结砖性能的影响,温度升高,体积收缩率升高,吸水率降低,抗压强度增大。当烧结温度为 1060℃ 时,抗压强度达到 26MPa,吸水率 10%,符合规范 GB/T 5101-2003 的要求。

陈宝海^[9]用萝北石墨尾矿制备烧结砖,尾矿中 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量偏低, MgO 和 CaO 的含量偏高,导致泛霜和石灰爆裂,放射性超标。石墨尾矿烧结砖存在泛霜问题,其余性能均满足规范 GB 5101-2003 中 MU20 优等品级别要求。

解家伟^[10]在传统粘土制砖的基础上掺入石墨尾矿,试验证明生产石墨尾矿空心高强砖是可行的,性能较粘土砖有所提高,且尺寸更大,密度更小。

白志民^[11]采用煤矸石制备烧结砖的工艺过程,以石墨尾矿为原料。在 1040℃~1060℃ 下烧制 20min,生产出的石墨尾矿烧结砖可以满足国家标准对砖瓦的性能要求。初步分析石墨尾矿烧结砖瓦投入市场生产是可行的。

2.3 石墨尾矿用于公路基底的研究

试验和工程实践都已经证明了石墨尾矿用于公路基底材料的可行性,以水泥稳定石墨尾矿,在 6% 的水泥掺量下,基底具有良好的力学性能和温缩性能。

潘春娟^[12]采用水泥、石墨尾矿砂加风化砂粒做底基层,试验压实度和强度都较好地满足施工规范要求,并得以在施工中大面积推广应用。

毛洪录^[13],^[14]提出水泥掺量 6% 为石墨尾矿作为高速公路基底时的合理掺量。水泥稳定石墨尾矿击实曲线存在两个峰值,现场碾压质量控制应采用第二个峰值。已应用于潍(坊)一莱(阳)高速公路部分路段,路面使用情况良好。

房建果^[15]对水泥稳定石墨尾矿作为高速公路底基层进行了可行性试验,结果表明适宜的水泥掺量为 6%,强度满足规范要求,击实曲线有两个峰值,施工中以第二个峰值为准,干缩变形介于水泥土和水泥砂砾之间,温缩变形较低,自然风干条件下干缩变形较大,主要发生在养生后 100h 的干燥期内。

3 石墨尾矿用于普通混凝土的研究

大部分研究表明,随着石墨尾矿取代率的升高,力学性能普遍先升高后减小,存在最优取代率。随着时间增长,最优取代率下降,表明石墨尾矿有类似早强剂的作用。水灰比对最优取代率也有较大影响,在一定范围内水灰比下降,最优取代率上升,当水灰比下降到某一极限时,最优取代率为 0。

陈真^[16]对石墨尾矿混凝土的断裂性能进行了研究,在石墨尾矿替代率为 0%~10% 时,断裂性能有小幅提升,替代率为 10%~30% 时,断裂性能有较大提升,起裂韧度和失稳韧度提升显著。

冯博雅^[17]对石墨尾矿砂混凝土梁抗弯性能进行了研究,分别试验了五根不同石墨尾矿砂取代率钢筋混凝土梁的抗弯试验。测得:石墨尾矿砂混凝土梁破坏形态,裂缝发展,均与普通混凝土梁相似,符合平截面假定;荷载—挠度曲线与普通混凝土梁发展趋势一致,石墨尾矿砂取代率在 30% 以下时强度高于普通混凝土梁,10%~20% 时,抗弯性能最优。提出了石墨尾矿砂混凝土梁极限弯矩的修正公式,基本可以满足 10%~40% 石墨尾矿砂混凝土梁的极限弯矩的要求,在计算跨中挠度时引入了修正系数 η 。

薛景^[18]对石墨尾矿混凝土力学性能进行研究,与普通混凝土一样,石墨尾矿混凝土强度随着养护时间的增长而增长,但在一定取代率下强度比普通混凝土要高。试验表明:3~28d 的石墨尾矿混凝土的最优取代率为砂子体积的 30%,抗压强度提高了 17.65%,劈裂强度提高了 36.36%;28d~56d 最优取代率为 30%,56 天的抗压强

度提高了 26.45%;90 天最优抗压强度尾矿取代量为 20%,抗压强度提高了 13.58%;150d~180d 最优取代量为 10%,150 天、180 天的抗压强度分别提高了 6.05%、10.82%。随着时间增长,最优取代率下降,抗压强度提高比例先增加后减小,适量的碳纤维掺入能提高混凝土力学性能。薛景^[18]认为石墨尾矿的物理性质与砂相似,可以取代部分砂作为细骨料应用在混凝土中,并且尾矿中含有火山灰活性物质,对水泥水化有促进作用。

张大双^[19]的研究表明水灰比和石墨尾矿含量对石墨尾矿混凝土强度影响很大,抗压强度随着水灰比和石墨尾矿掺入量的增大而减小。

徐超^[20]进行了 4 种不同掺量石墨尾砂的混凝土单轴压缩试验,试验表明随着石墨尾砂取代率增加,抗压强度先增大,当石墨尾砂取代率达到 30%后趋于稳定。徐超^[20]认为一定比例的石墨尾砂有助于加速形成水化凝胶物,从而增强强度和变形性能。

王亮景^[21]研究了从 10%~100%石墨尾矿掺量不同龄期混凝土试块的抗压强度,试验表明石墨尾矿混凝土最优掺量为 30%。王亮景^[22]的试验表明当掺量为 30%时,石墨尾矿混凝土的力学性能和电学性能达到相对最优。

4 结语

石墨尾矿作为一种固体废弃物,有较大的应用前景,不但每年产量大,并且长期堆积不处理还会造成环境污染等问题,对石墨尾矿的研究有望解决这部分环境问题,推动我国生态文明建设,并可能带来巨大的经济效益。

参考文献

- [1]赵浩男,孙静,周婷,等.鸡西和萝北石墨尾矿静力学特性试验研究[J].黑龙江大学学报,2022,13(1):13-17+24.
- [2]孙小巍,张雯琪,王琪,等.石墨尾矿泡沫混凝土性能研究[J].非金属矿,2020,43(3):9-13.
- [3]王少海.石墨尾矿制备泡沫混凝土的试验研究[J].中国非金属矿工业导刊,2011,(04):35-37+51.
- [4]王青,许珂,彭艳周,等.石墨尾矿蒸压加气混凝土制备方法及其性能分析[J].水电能源科学,2019,37(6):110-113.
- [5]杨中喜,岳云龙,陶文宏,等.利用固化技术研制石墨尾矿墙体材料[J].河南建材,2001(2):13-14.
- [6]张卫卫,左然芳,郭伟娟,等.利用石墨尾矿制备烧

结砖中泛霜性能的调控技术研究[J].非金属矿,2013,36(6):28-30.

[7]郭伟娟.利用尾矿制备烧结砖的工艺与机理研究[D].中国地质大学(北京),2013.

[8]杨敏,陈宝海,廖立兵,杜高翔.烧结温度对石墨尾矿烧结砖性能的影响[J].矿物学报,2012,32(S1):191-193.

[9]陈宝海.利用黑龙江萝北云山石墨尾矿制备烧结砖的工艺与机理研究[D].中国地质大学(北京),2012.

[10]解家伟,吕克政.石墨尾矿砂综合利用生产烧结多孔砖初探[J].中国非金属矿工业导刊,2001(5):16-17.

[11]白志民,廖立兵.石墨尾矿烧结砖制备工艺及性能研究[J].矿物岩石地球化学通报,1999(4):221-225.

[12]潘春娟.石墨尾矿在底基层中的应用[J].山西交通科技,2013(3):37-38.

[13]毛洪录,刘卫民.水泥稳定石墨尾矿用作高速公路底基层研究[J].山东交通科技,2003(3):21-23+14.

[14]毛洪录,姚占勇,刘树堂,等.石墨矿渣在高速公路底基层上的应用[J].中外公路,2004(2):64-66.

[15]房建果,姚占勇,苏公灿,等.石墨尾矿用作高速公路底基层[J].山东大学学报(工学版),2003(5):562-567.

[16]陈真,陈松,刘猛锐,等.不同替代率石墨尾矿砂混凝土断裂试验[J].科学技术与工程,2021,21(22):9541-9548.

[17]冯博雅,夏洪春,朱训国,等.石墨尾矿砂混凝土梁抗弯性能试验研究[J].西安理工大学学报,2022,38(2):279-286.

[18]薛景.石墨尾矿混凝土力学性能及导电性能研究[D].黑龙江大学,2019.

[19]张大双.石墨尾矿混凝土受力和导电性能研究[D].黑龙江大学,2015.

[20]徐超,舒杨,代文峰,等.石墨尾砂改性混凝土的单轴压缩与声发射试验[J].非金属矿,2022,45(1):94-97.

[21]王亮景,陈子光,刘洪波,等.石墨尾矿混凝土的力电分析及测强曲线的研究[J].水利科学与寒区工程,2019,2(5):37-41.