

[文章编号] 1003-4684(2020)05-0113-04

铁粉对水泥砂浆强度和导热性能的影响

钱 锬, 谭 燕, 肖衡林

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为研究一种具有更高导热效率且具备一定强度的填埋碳纤维发热线的道路回填材料,对 M30 的水泥砂浆分别内掺 3%、5%、7%、10% 质量分数的铁粉,研究不同铁粉掺量对水泥砂浆的抗压强度、抗折强度以及其导热系数的影响。结果表明:试块抗压强度与抗折强度均随着铁粉掺量的增大而逐渐减小,导热系数随着铁粉掺量的增大呈现先增大后减小的趋势;得到了合适的铁粉掺量,强度满足要求且导热系数达到最大值,为实际工程应用提供参考。

[关键词] 水泥砂浆; 铁粉; 抗压强度; 抗折强度; 导热系数

[中图分类号] TU528 **[文献标识码]** A

目前,内置碳纤维发热线应用于道路融雪化冰已经比较广泛^[1-2],对已有道路改造,通常需要铲除沥青层,对混凝土层进行开槽,在埋置碳纤维发热线后,需要对开槽勾缝进行回填。实际工程中,往往直接用沥青作为回填材料,但是沥青材料具有强度不足、导热性能较差的缺点^[3]。因此,需要使用具有一定强度且导热性能良好的材料,既可以有效保护碳纤维发热线,又可以减少热能损失。

水泥砂浆是一种传统回填材料,应用广泛,对道路砂浆的强度要求一般为 M20 强度等级以上^[4]。铁粉是指尺寸小于 1 mm 的铁颗粒集合体,是粉末冶金的主要原料。铁粉颗粒的密度一般为 7.854 g/cm³,远远高于细骨料砂的密度(中粗河砂一般为 2.58 g/cm³),将高强度的细骨料混入砂浆中替代河砂可以提高材料力学强度^[5],同时作为金属材料,其导热能力也远远优于普通河砂。郑宇博等^[6]将钢纤维掺入水泥砂浆,得出河砂可以使纤维混杂体系硬化物保持较高的强度,胶砂比为 1:2 时,硬化物的力学性能较好。张伟平、沈雷等^[7-8]对于砂浆混凝土进行导热系数研究,发现砂率、骨料种类及其体积分数、水灰比和饱和度也均对其导热系数有影响,需用热线法导热系数仪来测试这种固体导热系数^[9]。雷岩等^[10]将铁粉加入电缆复合材料之中,结果表明:在电缆复合材料中掺加一定量的铁粉可以降低材料的电阻性能,提高其导热性能。

然而,目前对水泥砂浆内掺铁粉的研究相对较少,笔者通过对不同铁粉掺量的水泥砂浆试块进行抗压、抗折和导热系数试验,研究材料的力学性能和导热性能的变化规律,得出铁粉掺量与材料强度及导热系数之间的关系,为实现新型、高效道路融雪化冰回填材料的研究打下基础。

1 试验方案

1.1 原材料与配合比设计

采用华新水泥(鄂州)有限公司制造的 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥,厦门艾思欧标准砂有限公司生产的标准试验砂以及南通新华铁粉厂生产的中号铁粉,主要为 30~100 目(图 1)。



图 1 中号铁粉

拌合水采用普通自来水,满足规范对水泥基材料试验用水的要求^[4]。考虑到铁粉相比于钢纤维,更易分散和拌和,适当提高胶凝材料的含量,最终胶砂比取为 1:3。由于该配合比砂浆强度要高于 M30 砂浆强度,故对胶凝材料采取内掺的方法,即

[收稿日期] 2020-01-13

[基金项目] 湖北省技术创新专项(2018AAA028);湖北工业大学绿色工业项目(BSQD12060);湖北省教学研究项目(2017314,2016299)

[第一作者] 钱 锬(1996-),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为道路融雪化冰技术

[通信作者] 谭 燕(1981-),女,湖南娄底人,工学博士,湖北工业大学讲师,研究方向为建筑新材料力学性能

用同等质量的铁粉取代同等质量的水泥,达到减少工程成本的目的。分别对 M30 水泥砂浆内掺质量分数为 3%、5%、7% 和 10% 铁粉进行试验,抗压、抗折和导热系数试验分组见表 1。

表 1 试验分组 kg/m^3

试验编号	水泥	砂	水	铁粉
A1	585.9	1757.8	293.0	0
A2	568.4	1757.8	293.0	17.6
A3	556.6	1757.8	293.0	29.3
A4	544.9	1757.8	293.0	41.0
A5	527.3	1757.8	293.0	58.6

1.2 试件制备方案

将水泥、砂和铁粉按比例混合,使用 JJ-5 型砂浆搅拌机先进行两分钟慢搅(自转 $140 \pm 5 \text{ r}/\text{min}$,公转 $62 \pm 5 \text{ r}/\text{min}$),同时缓慢加入相应质量的自来水,慢搅完毕后再进行两分钟快搅(自转 $285 \pm 10 \text{ r}/\text{min}$,公转 $125 \pm 10 \text{ r}/\text{min}$)。全部搅拌完毕后分别注入抹油后的 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 和 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 的试模以及 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times \Phi 20 \text{ mm}$,体积约为 60 cm^3 的环刀之中,浇筑成型后放置振捣台进行 1 min 的振捣,随后立即用塑料薄膜覆盖以防硬化期间水分蒸发,24 h 后拆模并移至标准养护室(温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$,相对湿度 95%)养护 28 d。养护完毕后分别进行抗压、抗折和导热系数试验,每种试验同一铁粉掺量需制备三组相同试块以减小试验误差。

1.3 抗压试验

对不同铁粉掺量的的五组试块进行抗压试验,试块规格为 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ (图 2)。将试件安放在试验机的下压板或下垫板上,试件的承压面应与成型时的顶面垂直,试件中心应与试验机下压板或下垫板中心对准。开动试验机,当上压板与试件或上垫板接近时,调整球座,使接触面均衡受压。承压试验应连续而均匀加荷,加荷速度为 $1 \text{ kN}/\text{s}$,当砂浆强度不大于 2.5 MPa 时,宜取下限。当试件接近破坏并迅速变形时,停止调整试验机油门,直至试件破坏,然后记录破坏荷载,抗压试验结果见表 2。



(a) 试样制备 (b) 试验中 (c) 破坏后

图 2 抗压试验

表 2 抗压强度 MPa

试验编号	试块组别			三组试验结果取值
	1	2	3	
A1	36.9	37.4	36.4	36.90
A2	35.7	34.8	34.1	34.87
A3	33.1	32.9	32.3	32.77
A4	30.3	31.7	30.5	30.83
A5	28.9	28.6	29.6	29.03

1.4 抗折试验

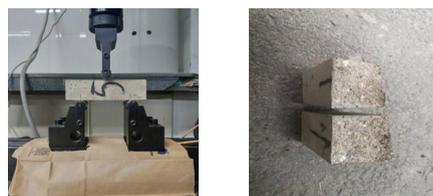
采用美特斯工业系统(中国)有限公司生产的抗折抗压试验机,对不同铁粉掺量的试块进行抗折试验,试块规格为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 。将试件一侧放置试验机支撑圆柱上,试件长轴垂直于支撑圆柱,控制 $50 \text{ N}/\text{s} \pm 10 \text{ N}/\text{s}$ 的速率均匀地将荷载垂直加在棱柱体相对侧面上,直至试块破坏,记录试件折断时施加于棱柱体中部的荷载,得到抗折强度见表 3,试件破坏前后见图 3。抗压强度计算公式如下:

$$R_f = \frac{1.5 F_f L}{b^3}$$

式中: R_f 为抗折强度, F_f 为折断时施加于棱柱体中部的荷载, L 为支撑圆柱之间的距离, b 为棱柱正方形截面的边长。其中, $L=100 \text{ mm}$, $b=40 \text{ mm}$ 。

表 3 抗折强度 MPa

试验编号	试块组别			三组试验结果取值
	1	2	3	
A1	11.0	11.1	10.5	10.87
A2	10.2	10.0	9.7	9.97
A3	9.5	9.2	9.1	9.27
A4	8.8	8.6	8.5	8.63
A5	8.0	7.4	8.2	7.87



(a) 破坏前 (b) 破坏后

图 3 抗折试块

1.5 导热系数试验

使用湘潭湘仪仪器有限公司生产的 DRE-III 导热系数测试仪,对五组不同铁粉掺量的圆饼状试块进行导热系数试验,规格为 $\Phi 61.8 \times 20 \text{ mm}$ (图 4)。将传感器用两块圆饼试块盖住夹紧,连接到仪器上,在电源电压测试均正常后进行调零,先对有机玻璃以及石英玻璃进行测试,确定仪器测试结果正常后,调好参数对各个试块进行测试,试验结果见表 4。



(a) 试样制备 (b) 试验中

图 4 DRE-III 导热系数测试仪

表 4 导热系数 $W/m \cdot k$

试验编号	试块组别			三组试验结果取值
	1	2	3	
A1	2.58	2.63	2.61	2.61
A2	2.81	2.77	2.80	2.79
A3	2.84	2.85	2.81	2.83
A4	2.73	2.76	2.78	2.76
A5	2.49	2.45	2.46	2.47

2 结果分析与讨论

2.1 强度试验结果的分析与讨论

不同铁粉掺量试块的抗压和抗折试验结果分别见图 5、图 6。

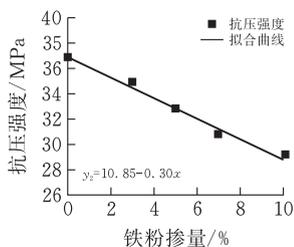


图 5 不同铁粉掺量试块抗压强度

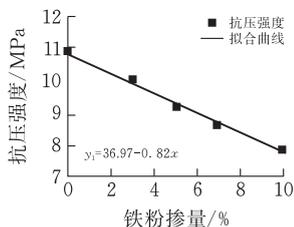


图 6 不同铁粉掺量抗折强度

由图 5、图 6 分别可以看出,不掺铁粉时,试块抗压强度与抗折强度分别是 37 MPa 和 10.9 MPa。在水与砂质量不变的情况下,掺入一定量的铁粉替换水泥后,随着铁粉掺量的增多,试块抗压强度与抗折强度均呈现下降趋势,且近似呈线性关系。将三组试块试验结果与不掺铁粉试块对比,铁粉掺量为 10% 的试块抗压强度减小了约 20.2%,抗折强度减小了约 27.6%;铁粉掺量为 5% 的试块,其抗压强度、抗折强度分别下降了约 10% 和 14.7%。由此可见,少部分质量水泥用相同质量铁粉替换后,由于铁粉凝结与硬化效果不及水泥,随着水泥含量的减少,试块抗压强度、抗折强度也随之降低,铁粉对试块力学强度的影响更偏向砂性,随着胶凝材料的减少,试

块力学强度会出现小幅度下降趋势。由于掺入铁粉的质量远远小于水泥的质量,其力学强度有所下降,然而其仍具备不掺铁粉试块 70% 以上的强度。将试验结果进行拟合,发现这两组力学强度试验结果都是呈线性关系,近似于为一次函数曲线,抗压强度试验结果拟合曲线为: $y_1 = 36.97 - 0.82x$,抗折强度试验结果拟合曲线为: $y_2 = 10.85 - 0.30x$ 。可以看出两组曲线的斜率均小于零,整体呈现下降趋势,但是明显看出抗压强度试验结果所得到的拟合曲线的斜率绝对值是要明显大于抗折强度试验结果所得到的拟合曲线,说明随着铁粉掺量的增多同时水泥质量的减少对试块抗压强度的影响是要远高于对试块抗折强度的影响。

2.2 导热系数试验结果的分析

不同铁粉掺量试块导热系数试验结果见图 7。

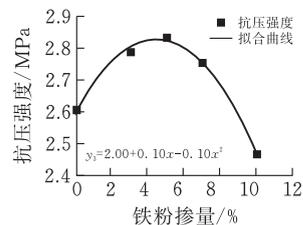


图 7 不同铁粉掺量试块导热系数

由图 7 可以看出,导热系数的变化出现先上升后下降的趋势。从不掺铁粉试块到铁粉掺量为 5% 试块导热系数呈现上升趋势,相比于不掺铁粉试块,铁粉掺量为 5%,试块导热系数提高了约 8.4%。而在铁粉掺量为 5% 到 10% 时,导热系数呈现下降趋势,在铁粉掺量为 5% 时,试块导热系数到达峰值,铁粉掺量为 10% 试块相比于铁粉掺量为 5% 试块导热系数下降了约 14.6%。当铁粉掺量小于 5% 时,由于铁粉的掺入,因其本身具有较高导热性,对导热系数有一定的提高。而当铁粉掺量大于 5% 后,此时由于胶凝材料的减少造成试块密实性的降低,其空气的体积逐渐增多,导致材料的导热系数开始降低。将试验结果进行拟合,得到导热系数的试验结果近似于二次函数,拟合曲线为: $y_3 = 2.60 + 0.10x - 0.01x^2$ 。由此曲线可以计算出峰值将出现在 $x \approx 4.42$ 时,此时 $y_3 \approx 2.83$ 。由此可以预测,当铁粉掺量为 4.42% 时,可以达到最高导热系数 2.83 W/(m·k)。

2.3 试验结果的综合分析

砌筑砂浆按抗压强度划分为 M30、M25、M20、M15、M10、M7.5、M5 7 个强度等级^[4],本试验中铁粉掺量为 5% 以内的试块抗压强度都不低于 M30,且试块的抗折强度没有明显差异,力学强度均达要求,铁粉掺量为 5% 的试块导热系数高出其他试块

9.2%到16.8%，导热性能最好，因此，铁粉掺量为5%的新型回填材料，既能满足回填材料所需的强度要求，又具备一定的导热系数，具有较大的应用价值。

将这三组试验的结果用 Origin 拟合成曲线进行对比分析，当试块铁粉掺量为4.42%时，最大导热系数，具有较好的导热性能，由于两种力学试验的试验结果拟合曲线斜率小于0，故其力学强度会优于5%铁粉掺量试块。可见，铁粉掺量与回填材料的强度和导热系数具有很好的相关性，当铁粉掺量约为4.42%时，道路融雪化冰填埋碳纤维发热线材料各项性能最优。

3 结论

1)用铁粉替换等质量的水泥掺入水泥砂浆后，随着铁粉掺量的增加，其抗压强度与抗折强度均呈下降趋势。

2)当铁粉掺量达到铁粉与水泥总质量5%前，随着铁粉掺量的增加，同等质量水泥的减少，水泥砂浆材料导热系数呈现上升趋势；当铁粉掺量在铁粉与水泥总质量的5%到10%之间，随着铁粉掺量的增加，同等质量水泥的减少，导热系数大小呈下降趋势。

3)铁粉质量达到铁粉与水泥总质量的5%时，水泥砂浆导热性能达到最优；而由试验结果拟合得到，最优铁粉掺量为4.42%。因此，对于埋设的碳纤维发热线会有较高的传热效率，同时具备工程所需

的力学强度。相比其他材料，铁粉价格不高同时用量也不高，具有实际工程应用价值。

[参考文献]

- [1] 袁玉卿,张业,郭斌.预埋碳纤维发热线沥青混凝土融雪试验研究[J].中国科技论文,2019,14(6):637-641.
- [2] 胡天文,霍海峰,张佩浩,等.碳纤维沥青混凝土导电特性研究[J].新型建筑材料,2017,44(10):58-61,80.
- [3] 袁溪伟.沥青路面高温导热系数研究[D].西安:长安大学,2019.
- [4] 建筑砂浆配合比设计规程:JTJ/T98-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [5] 丁小蒙,陈忠范,刘琼,等.不同强度废混凝土对再生细骨料砂浆力学性能的影响[J].东南大学学报(英文版),2019,35(3):374-380.
- [6] 郑宇博,杨丽辉,陈宇,等.混杂纤维增强水泥砂浆砂胶比与力学性能的关系[J].混凝土与水泥制品,2019(8):45-49.
- [7] 张伟平,童菲,邢益善,等.混凝土导热系数的试验研究与预测模型[J].建筑材料学报,2015,18(2),183-189.
- [8] 沈雷,任青文,张林飞,等.开裂混凝土有效导热系数研究:三维模拟与试验验证[J].水利学报,2017,48(6),689-701.
- [9] 李栋伟,刘娟,蔡强,等.人工冻融黏土导热系数试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(6):1452-1456,1471.
- [10] 雷岩,谷龙艳.铁粉对电缆复合材料电性能和导热性能的影响[J].许昌学院学报,2015,34(2):99-102.

Influence of Iron Powder on the Strength and Thermal Conductivity of Cement Mortar

QIAN Kun, TAN Yan, XIAO Henglin

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to study a kind of road backfill material with higher thermal conductivity efficiency and certain strength of landfill carbon fiber hot wire, the influence of different iron powder content on compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of cement mortar was studied by mixing 3%, 5%, 7% and 10% iron powder into M30 cement mortar respectively. The results show that the compressive strength and flexural strength of the test block decreased gradually with the increase of the content of iron powder, and the thermal conductivity increased first and then decreased with the increase of the content of iron powder. The suitable content of iron powder was obtained. The strength met the requirements and the thermal conductivity reached the maximum value, which provides a reference for practical engineering application.

Keywords: cement mortar; iron powder; compressive; strength; flexural strength; thermal conductivity