

水泥铁砂导热砂浆性能与多因素关联分析与评价

刘 凯¹,任晶鸽¹,王 芳²,王 志¹,陆学元³,金 灿¹

(1. 合肥工业大学 交通运输工程学院,安徽 合肥 230009; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院,
安徽 合肥 230601; 3. 安徽省交通控股集团有限公司,安徽 合肥 230088)

摘 要:为研究级配因素对水泥铁砂导热砂浆性能的影响,以及针对不同应用领域选择合理的级配组成问题,通过导热系数试验、抗折强度和抗压强度试验,分别分析了水灰比、总砂灰比、铁砂比对材料导热系数、抗折强度和抗压强度的影响;应用灰关联理论分析得到了导热性能、抗折强度、抗压强度与水灰比、总砂灰比、铁砂比之间的关联度;基于灰靶理论评价了 15 种级配组成的综合性能,并以导热系数、抗折强度、抗压强度和材料价格 4 个评价指标权重给出不同级配组成的综合性能评估方法,以及应用于融冰雪路面、桥面领域和化工导热领域时综合性能最好的级配组成。研究结果表明:随着水灰比的增大,水泥铁砂导热砂浆的导热性能、抗折强度和抗压强度均减小;随着总砂灰比的增大,导热系数增大,抗折强度与抗压强度在总砂灰比为 2.5 时最佳;随着铁砂比的增大,铁砂含量增加,导热系数和抗折强度增大,抗压强度在铁砂比为 0.6 时最佳;铁砂比对导热系数的影响最大,水灰比对抗折强度的影响最大,水灰比和铁砂比对抗压强度的影响均较大,总砂灰比对 3 项性能的影响均较小。研究结果为实际运用中选择合适的水泥铁砂导热砂浆提供了理论指导。

关键词:道路工程;水泥铁砂导热砂浆;导热性能;强度性能;灰关联分析

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Multi-factor correlation analysis and evaluation of properties of thermal cement mortars mixed with iron sand

LIU Kai¹, REN Jing-ge¹, WANG Fang², WANG Zhi¹, LU Xue-yuan³, JIN Can¹

(1. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;
2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;
3. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, Anhui, China)

Abstract: In order to study the influence of grading factors on properties of thermal cement mortars mixed with iron sand, and choose proper gradation composition according to different application fields, this paper respectively analyzed the effects of water-cement ratio, total sand-cement ratio and iron sand-total sand ratio on thermal conductivity, flexural strength and compressive strength of thermal cement mortars mixed with iron sand through thermal conductivity test, flexural strength test and compressive strength test. Correlations between the three factors and thermal conductivity, flexural strength and compressive strength were calculated with gray correlation theory. Comprehensive performance of fifteen kinds of gradation composition were evaluated based on gray target theory, and comprehensive

收稿日期:2016-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51108150,51408005);安徽高校省级优秀青年人才基金项目(2013SQRL046ZD);安徽省高速公路控股集团有限公司科技项目(AHGS 2013-9)

作者简介:刘 凯(1982-),男,湖北武汉人,副教授,工学博士,E-mail:liukai@hfut.edu.cn.

performance evaluation methods of different gradation compositions were reposed based on four evaluation index weights, such as thermal conductivity, flexural strength, compressive strength and material price, as well as gradation composition of the best comprehensive performance was suggested when thermal cement mortars mixed with iron sand used in melting snow and ice road, deck and chemical industrial field of thermal conductivity. The results show that thermal conductivity, flexural strength and compressive strength of thermal cement mortars mixed with iron sand all decrease with the increase of water-cement ratio. Thermal conductivity increases with the increase of total sand-cement ratio, and flexural strength and compressive strength of thermal cement mortars mixed with iron sand reach to the best when total sand-cement ratio is 2.5. Content of iron sand, thermal conductivity and flexural strength all increase with the increase of iron sand-total sand ratio, and compressive strength achieves the best when iron sand-total sand ratio is 0.6. Thermal conductivity is significantly influenced by iron sand-total sand ratio, flexural strength is significantly influenced by water-cement ratio, compressive strength is significantly influenced by both water-cement ratio and iron sand-total sand ratio. While total sand-cement ratio has little influence on performance of thermal cement mortars mixed with iron sand. The research results provide a theoretical guidance to choose appropriate proportion for practical application. 5 tabs, 10 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; thermal cement mortar mixed with iron sand; thermal conductivity; mechanical property; gray correlation analysis

0 引言

路面、桥面的结冰积雪问题影响道路交通安全,因此解决路面、桥面融冰雪问题至关重要。目前常用的融冰雪方法有清除法和融化法,清除法分为人工清除法和机械清除法,融化法包括化学融化法^[1-2]和热融化法^[3-4]。水泥铁砂导热砂浆属于热融法,即在路面结构中加铺一层发热电缆,在发热电缆上方铺高导热率的水泥铁砂导热砂浆,在发热电缆下方铺设隔热材料,以减小热量向下散失,提高热量利用率。这种水泥铁砂导热砂浆由于其良好的导热性能和力学性能,以及明显低于市场上无机型导热水泥(胶泥)的价格,不仅可应用于路面、桥面融冰雪,还可用于家装供暖、石油管道和化工导热等领域。

关于各种水泥导热砂浆强度、导热率等性能的研究已有很多,如钢纤维^[5-6]、碳纤维^[7-9]、粉煤灰^[10-11]、改性橡胶^[12-14]、矿物混合料^[15]、铁砂^[16]、废旧轮胎橡胶粉^[17]等物质的掺入对水泥砂浆导热性能和强度性能的影响,以及特殊养护条件对水泥砂浆强度性能的影响^[18]。在水泥砂浆中掺入铁砂是提高其导热率的一种有效方法,不同水灰比、总砂灰比和铁砂比掺配所得水泥砂浆的导热性能、强度性能和价格迥异。当水泥导热砂浆应用于不同场合时,可根据其对强度性能、导热性能的不同要求,选择合适的级配。为使砂浆发挥最大作用,选择合适

的级配组成十分重要,在实际应用中有时还需要在客观评价的基础上,结合实际需求对材料的综合性能进行评价。

鉴于此,本文依托安徽阜新(阜阳—新蔡)高速公路阜阳南匝道融冰雪桥面实体工程,分析了水泥铁砂导热砂浆的导热系数、抗折强度和抗压强度分别与水灰比、总砂灰比、铁砂比 3 个影响因素的关系,以及 3 个影响因素与 3 项性能之间的灰关联度;然后,通过灰靶理论分析评价了 15 种级配组成的综合性能,提出加权综合分析评价方法,为水泥铁砂导热砂浆的实际应用提供依据和理论指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

水泥铁砂导热砂浆原材料包括铁砂、河砂、水泥和水,铁砂分天然铁砂和纯铁砂 2 种。天然铁砂是从天然河砂中磁选所得,如下页图 1 所示。含铁量(质量分数)约为 59%,河砂含量(质量分数)约为 40%,其余 1%为泥等杂质,故铁砂在总砂量中所占比例近似为 60%,大部分粒径集中在 0.075~0.15 mm 的范围内,密度为 3.78 g/cm³,市场价格约为 500 元/t。纯铁砂为安徽省六安市霍邱矿区采购所得,如下页图 2 所示,含铁量约 81%,其余 19%为其他矿砂及杂质,55%的粒径大于 0.075 mm,密度为 4.37 g/cm³,市场价格约为 2 000 元/t。河砂满足《建设用砂》(GB/

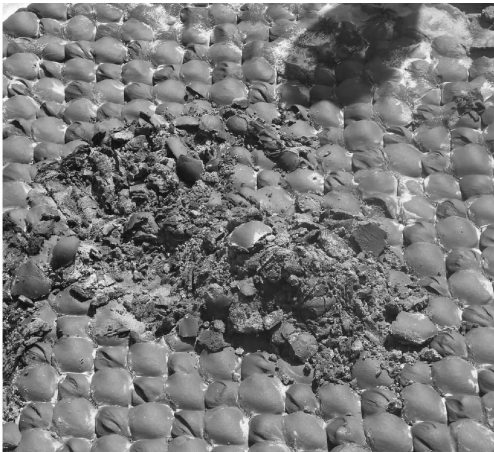


图 1 天然铁砂
Fig. 1 Nature iron sand



图 2 纯铁砂
Fig. 2 Pure iron sand

T 14684—2011)要求,密度为 2.68 g/cm^3 ,粒径为 $0.25\sim0.5\text{ mm}$,细度模数为 3.0,市场价格约为 400 元/t。所用水泥为满足《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)的 42.5 级硅酸盐水泥,市场价格约为 450 元/t。水采用自来水。

1.2 材料配合比组成设计

试验用水泥砂浆组成如表 1 所示。材料配合比组成设计主要围绕 3 种铁砂比展开:①级配 1~5 由天然铁砂、水泥、水拌和而成,混合料的铁砂与总砂质量比(m_1/m_s ,简称铁砂比,其中 m_1 为铁砂质量, m_s 为总砂质量)为 0.6;②级配 6~10 由纯铁砂、河砂、水泥、水混合而成,由于纯铁砂中的其他杂质主要为其他矿砂,导热率较高,故可近似认为混合料中铁砂含量等于纯铁砂的质量,则河砂与铁砂比例为河砂与纯铁砂含量之比,控制铁砂比为 0.8;③级配 11~15 为纯铁砂、水泥、水拌和而成,即混合料的铁砂比为 1.0,无河砂。

配合比设计时,先控制总砂(河砂和铁砂)灰比(m_s/m_c ,其中 m_c 为水泥质量)为 2.0 不变,水灰比(m_w/m_c ,其中 m_w 为水质量)分别为 0.5、0.55、0.6;再控制水灰比为 0.60,总砂灰比分别为 2.0、2.5、3.0,具体见表 1。

1.3 试验方法

按照表 1 级配组成,每种级配成型 3 个 $40\text{ mm}\times$

表 1 试验用水泥导热砂浆组成

Tab. 1 Compositions of experimental thermal cement mortar

级配编号	水质量/g	水泥质量/g	总砂质量/g	铁砂质量/g	河砂质量/g	水灰比	总砂灰比	铁砂比
1	107.1	214.3	428.6			0.50	2.0	0.6
2	116.2	211.3	422.5			0.55	2.0	0.6
3	125.0	208.3	416.7			0.60	2.0	0.6
4	109.8	182.9	457.3			0.60	2.5	0.6
5	97.8	163.1	489.1			0.60	3.0	0.6
6	107.1	214.2	418.4	334.7	83.7	0.50	2.0	0.8
7	116.2	211.2	422.4	337.9	84.5	0.55	2.0	0.8
8	125.0	208.4	520.0	416.0	104.0	0.60	2.0	0.8
9	109.4	182.4	456.0	364.8	91.2	0.60	2.5	0.8
10	97.9	163.1	489.3	391.4	97.9	0.60	3.0	0.8
11	107.1	214.3		428.6		0.50	2.0	1.0
12	116.2	211.3		422.5		0.55	2.0	1.0
13	125.0	208.3		416.7		0.60	2.0	1.0
14	109.8	182.9		457.3		0.60	2.5	1.0
15	97.8	163.1		489.1		0.60	3.0	1.0

40 mm×160 mm 的标准试件,在温度(20±1)℃,相对湿度大于 90%的标准条件下养护 28 d。导热系数采用 QTM-300 型热线法快速导热系数测试仪测试,如图 3 所示,每组 3 个试件,结果取 3 个试件的平均值。抗压强度和抗折强度试验按照《公路工程水泥与水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)中水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)进行。先采用三分点法做抗折强度试验,如图 4 所示,随后立即用抗折试验断块进行抗压强度试验,受压面为 40 mm×40 mm 的无破损侧面。抗压强度和抗折强度结果均取同组所有试件的平均值。



图 3 导热系数试验
Fig. 3 Thermal conductivity test



图 4 抗折强度试验
Fig. 4 Flexural strength test

2 试验结果及分析

2.1 多因素对水泥导热砂浆导热性能的影响

2.1.1 水灰比对导热系数的影响

导热系数与水灰比、铁砂比的关系见图 5。由图 5 可知,保持总砂灰比为 2 不变,铁砂比分别为 0.6、0.8、1.0 时,水泥铁砂导热砂浆的导热性能均随水灰比的增大而减小。原因为:随着水灰比增大,

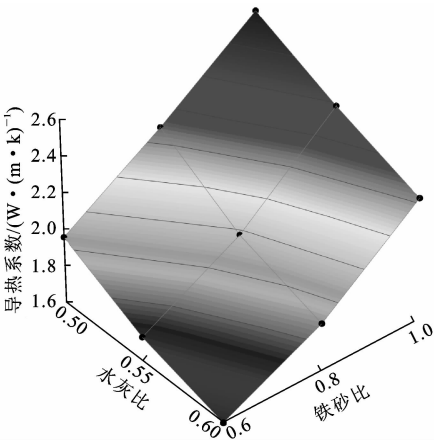


图 5 导热系数与水灰比、铁砂比的关系
Fig. 5 Relationships between thermal conductivity and m_w/m_c and m_1/m_s

混合料中水的含量增加,在试件养护过程中,混合料中的水分蒸发,导致成型试件表观密度较小,孔隙率较大,这些孔隙均被空气填充,常温下空气的导热系数为 0.029 W/(m·K),远小于固体水泥砂浆的导热系数,故试件的导热系数减小^[19]。

2.1.2 总砂灰比对导热系数的影响

导热系数与总砂灰比、铁砂比的关系见图 6。由图 6 可知,保持水灰比为 0.60 不变,铁砂比分别为 0.6、0.8、1.0 时,水泥铁砂导热砂浆的导热性能均随总砂灰比的增大而增大。原因为:随着总砂灰比的增大,混合料中砂的含量增加,若铁砂比不变,则混合料中铁砂含量增加,铁砂的导热系数远大于石灰的导热系数,故导热系数增大。

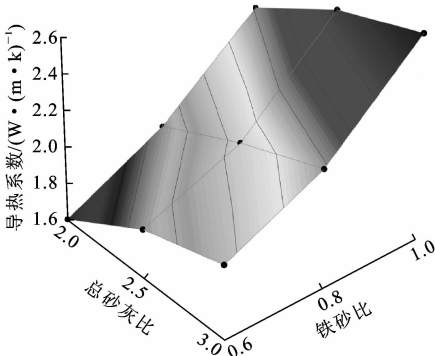


图 6 导热系数与总砂灰比、铁砂比的关系
Fig. 6 Relationships between thermal conductivity and m_s/m_c and m_1/m_s

2.1.3 铁砂比对导热系数的影响

由图 5、图 6 可知,当水灰比和总砂灰比均保持不变时,水泥铁砂导热砂浆的导热性能均随铁砂比的增大而增大。原因为:随着铁砂比的增大,混合料中铁砂含量增大,一方面铁砂的导热系数大于普通

河砂,故试件导热系数大;另一方面,由导热系数影响因素可知,混合料粒径的大小及粒径分布会影响材料的导热系数,铁砂的粒径略小于河砂的粒径,而大于水泥的粒径,混合材料的粒径分布连续性较好,故导热系数较大。

2.2 多因素对水泥导热砂浆抗折强度的影响

2.2.1 水灰比对抗折强度的影响

抗折强度与水灰比、铁砂比的关系见图 7。由图 7 可知,保持总砂灰比为 2.0 不变,铁砂比分别为 0.6、0.8、1.0 时,随着水灰比的增大,水泥铁砂导热砂浆的抗折强度减小。原因为:随着水灰比的增大,混合料中水的含量增加,在试件养护过程中水分蒸发,导致试件的孔隙率较大,故其抗折强度降低。

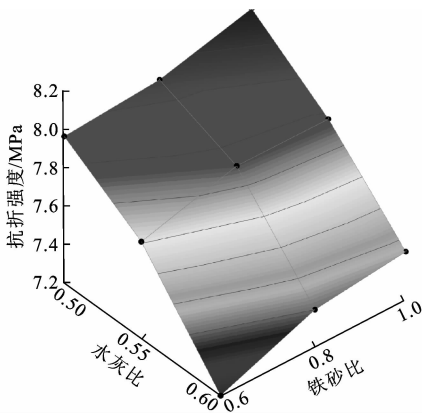


图 7 抗折强度与水灰比、铁砂比的关系
Fig. 7 Relationships between flexural strength and m_w/m_c and m_1/m_s

2.2.2 总砂灰比对抗折强度的影响

抗折强度与总砂灰比、铁砂比的关系见图 8。由图 8 可知,保持水灰比为 0.60 不变,铁砂比分别为 0.6、0.8、1.0 时,随着总砂灰比的增大,水泥铁砂导热砂浆的抗折强度先增大后减小,在总砂灰比为 2.5 时达到最大。原因为:当总砂灰比为 2.0 时,混合料中砂所占比例较少,难以形成较好的骨架结构;当总砂灰比为 3.0 时,混合料中砂所占比例过大,以至于形成的骨架结构没有足够的细料填充,故其抗折强度较差;当总砂灰比为 2.5 时,混合料中砂所占比例适中,能够形成骨架结构且有足够的细料填充,形成骨架密实结构,故抗折强度最好。

2.2.3 铁砂比对抗折强度的影响

由图 7、图 8 可知,当水灰比和总砂灰比均保持不变时,水泥铁砂导热砂浆的抗折强度随铁砂比的增大而增大。原因为:随着铁砂比的增大,混合料中铁砂所占比例明显增加,且铁为延性金属,在抗折强度试验时,铁会产生较大的塑性形变以阻止试件被

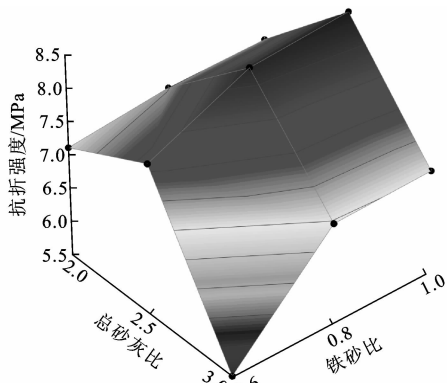


图 8 抗折强度与总砂灰比、铁砂比的关系
Fig. 8 Relationships between flexural strength and m_s/m_c and m_1/m_s

压断,从而提高了试件的抗折强度。该结果与文献 [20]、[21] 中结果相吻合,即铁含量越高,抗折强度越大。

2.3 多因素对水泥导热砂浆抗压强度的影响

2.3.1 水灰比对抗压强度的影响

抗压强度与水灰比、铁砂比的关系见图 9。由图 9 可知,保持总砂灰比为 2.0 不变,铁砂比分别为 0.6、0.8、1.0 时,水泥铁砂导热砂浆的抗压强度均随水灰比的增大而减小,与抗折强度的变化规律相同。原因为:随着水灰比的增大,混合料中水的含量增加,在试件养护过程中水分蒸发,导致试件的孔隙率较大,抗压强度降低。

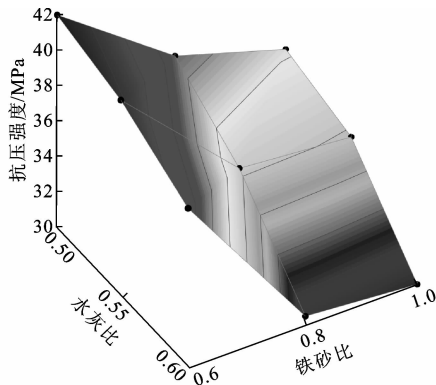


图 9 抗压强度与水灰比、铁砂比的关系
Fig. 9 Relationships between compressive strength and m_w/m_c and m_1/m_s

2.3.2 总砂灰比对抗压强度的影响

抗压强度与总砂灰比、铁砂比的关系见下页图 10。由图 10 可知,保持水灰比为 0.60 不变,铁砂比分别为 0.6、0.8、1.0 时,水泥铁砂导热砂浆的抗压强度随总砂灰比先增大后减小,在总砂灰比为 2.0 时达到最大值。原因为:当总砂灰比为 2.0 时,混合

料中砂所占的比例较少,难以形成较好的骨架结构;当总砂灰比为 3.0 时,混合料中砂所占比例过大,形成的骨架结构没有足够的细料填充,故其抗压强度较低;当总砂灰比为 2.5 时,混合料中的砂所占比例适中,既能形成骨架结构且有足够的细料填充,形成骨架密实结构,抗压强度最好。

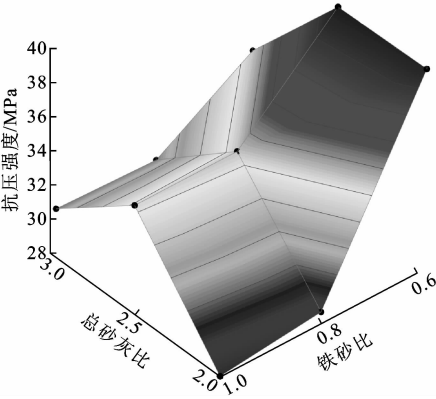


图 10 抗压强度与总砂灰比、铁砂比的关系
Fig. 10 Relationships between compressive strength and m_s/m_c and m_1/m_s

2.3.3 铁砂比对抗压强度的影响

由图 9、图 10 可知,当水灰比和总砂灰比均保持不变,铁砂比为 0.6~1.0 时,水泥铁砂导热砂浆的抗压强度随铁砂比的增大而减小。原因为:当铁砂比为 0.6 时,河砂与铁砂的比例较好,混合料形成较好的骨架密实结构,故抗压强度较高;随着铁砂比的增大,混合料中大颗粒河砂的含量越来越少,而铁砂粒径小于河砂粒径,难以形成骨架密实结构,故抗压强度明显降低。

3 多因素与水泥导热砂浆性能的灰关联分析

3.1 水泥导热砂浆性能与多因素间的关联度分析

分析试验结果可知,水泥铁砂导热砂浆的导热系数、抗压强度和抗折强度均受水灰比、总砂灰比和铁砂比的影响,且 3 个影响因素对导热系数、抗折强度和抗压强度的影响程度均不相同,运用灰关联理论,通过式(1)、式(2)对 3 个影响因素与 3 种材料性能之间的关联度进行计算,结果见表 2^[22]。

灰关联系数 $\gamma[x_0(k), x_i(k)]$ 为

$$\gamma[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) + \zeta \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)} \quad (1)$$

灰关联度 $\gamma(x_0, x_i)$ 为

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{15} \sum_{k=1}^{15} \gamma[x_0(k), x_i(k)] \quad (2)$$

式中: $\max_i \max_k \Delta_{0i}(k)$ 、 $\min_i \min_k \Delta_{0i}(k)$ 为环境参数; $i=1,2,3$, 分别为 3 个影响因素; $k=1,2,\cdots,15$, 分别为 15 种级配组成; $\zeta=0.5$, 为分辨系数; $\Delta_{0i}(k)$ 为差异序列。

表 2 三个影响因素与水泥导热砂浆性能之间的关联度

Tab. 2 Correlation degrees between three factors and properties of thermal cement mortar

影响因素	水灰比	总砂灰比	铁砂比
导热系数	0.654 0	0.627 0	0.736 2
抗折强度	0.902 9	0.470 8	0.784 8
抗压强度	0.844 1	0.459 2	0.842 0

由表 2 可得以下结论。

(1) 水泥铁砂导热砂浆的导热系数受铁砂比影响最大,其次是水灰比,最后是总砂灰比;总砂灰比通过改变混合材料中砂的含量,间接改变铁砂的含量,进而对其导热系数造成影响;铁砂比的变化直接影响混合材料中铁砂的含量,铁砂含量的变化幅度更大,故铁砂比对导热系数的影响程度比总砂灰比大;水灰比主要影响混合材料中水的含量,水的含量又影响成型试件中孔隙率的大小,进而对试件导热系数造成影响,这种影响比具有高导热系数的铁砂对试件导热系数的影响小,故水泥铁砂导热砂浆的导热系数受铁砂比的影响最大,可通过增加混合料中铁砂的含量改善砂浆的导热性能。

(2) 水泥铁砂导热砂浆的抗折强度受水灰比影响最大,其次是铁砂比,总砂灰比对其影响最小;抗折强度代表材料的韧性,水灰比影响成型试件的孔隙率和表观密度,在材料属性不变的情况下,试件孔隙率越大,表观密度越小,抗折强度越低;相比之下,铁砂虽然能增加试件的韧性,但由于铁砂呈颗粒状,改善效果不明显,故其对抗折强度的影响较小;同理,通过间接改变混合料中铁砂含量的总砂灰比对抗折强度的影响最小。

(3) 水泥铁砂导热砂浆的抗压强度受水灰比和铁砂比的影响较大,受总砂灰比影响最小;水灰比的大小直接影响成型试件孔隙率的大小,孔隙率又影响试件宏观密实结构,故对抗压强度有显著影响;铁砂比的大小影响混合料中大颗粒和小颗粒材料的比例,对材料形成骨架结构有一定影响,对抗压强度影响较小;总砂灰比的大小影响混合材料中黏结料和形成骨架的颗粒材料的比例,故较孔隙率及骨架结构的好坏对抗压强度的影响较弱。

3.2 多因素对水泥导热砂浆性能影响的评价

水泥铁砂导热砂浆用途广泛,不仅可用于路面铺装以加热融冰雪,也可用于屋顶融冰雪、家装供暖等诸多领域。不同应用领域对水泥铁砂导热砂浆的导热性能、抗折强度和抗压强度要求均不相同,且实际应用中材料的价格也影响着使用者的选择,因此选择哪种级配组成能更高效、经济地发挥水泥铁砂导热砂浆的作用也至关重要。通过灰靶理论对不同级配组成的水泥铁砂导热砂浆进行分析评价,分析过程如下^[22-23]。

(1)根据试验选用材料的市场价格,对 15 种级配组成的水泥铁砂导热砂浆单位用量的材料价格进行换算,结果见表 3。

表 3 材料价格换算
Tab. 3 Material price conversion

级配编号	材料价格/(元·t ⁻¹)
1	414.29
2	408.45
3	402.78
4	414.63
5	423.91
6	1 271.43
7	1 253.52
8	1 236.11
9	1 329.27
10	1 402.17
11	1 089.00
12	940.00
13	1 058.00
14	1 134.00
15	1 193.00

(2)选取导热系数、抗折强度、抗压强度和材料价格作为评价指标,15 种级配组成作为评价方案,根据式(3)计算 15 种级配组成与导热系数、抗折强度、抗压强度和材料价格之间的灰关联系数,计算结果见表 4。

$$\gamma[x_0(n), x_k(n)] = \frac{\min_k \min_n \Delta_{0k}(n) + \zeta \max_k \max_n \Delta_{0k}(n)}{\Delta_{0k}(n) + \zeta \max_k \max_n \Delta_{0k}(n)} \quad (3)$$

式中: $\max_k \max_n \Delta_{0k}(n)$ 、 $\min_k \min_n \Delta_{0k}(n)$ 为环境参数; $n=1, 2, 3, 4$,分别为 4 个评价指标; $\Delta_{0k}(n)$ 为差异序列。

(3)根据水泥铁砂导热砂浆的应用领域对 4 个评价指标进行权重分配,分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ,且有 $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$,则可计算 15 种级配组成的组合

表 4 灰靶理论灰关联系数
Tab. 4 Correlation coefficients of gray target theory

级配编号	导热系数的灰关联系数 $\gamma(x_0(1), x_k(1))$	抗折强度的灰关联系数 $\gamma(x_0(2), x_k(2))$	抗压强度的灰关联系数 $\gamma(x_0(3), x_k(3))$	材料价格的灰关联系数 $\gamma(x_0(4), x_k(4))$
1	0.499 4	0.778 9	1.000 0	0.901 4
2	0.433 3	0.715 1	0.892 6	0.948 2
3	0.402 9	0.618 0	0.738 7	1.000 0
4	0.472 0	0.736 9	0.755 2	0.898 9
5	0.518 2	0.433 9	0.553 9	0.835 9
6	0.650 4	0.798 8	0.673 5	0.287 3
7	0.522 1	0.752 1	0.557 5	0.307 7
8	0.468 8	0.653 1	0.433 1	0.290 8
9	0.542 7	0.939 8	0.555 0	0.282 6
10	0.621 0	0.601 0	0.468 4	0.277 2
11	0.985 7	0.845 2	0.598 5	0.271 0
12	0.757 8	0.757 3	0.545 2	0.272 3
13	0.632 4	0.665 1	0.422 5	0.273 6
14	0.821 1	1.000 0	0.547 9	0.267 1
15	1.000 0	0.609 4	0.466 8	0.262 7

权值靶心度 S

$$S = a_1 \gamma(x_0(1), x_k(1)) + a_2 \gamma(x_0(2), x_k(2)) + a_3 \gamma(x_0(3), x_k(3)) + a_4 \gamma(x_0(4), x_k(4)) \quad (4)$$

(4)将指标权重代入式(4)计算 15 种级配组成的靶心度,靶心度越大,该级配组成的综合性能越好。选取最佳级配组成,制得合适的水泥铁砂导热砂浆,以提高水泥铁砂导热砂浆的使用效率。

可采用专家打分、问卷调查等方式选定加权值。当将其应用于融冰雪路面、桥面上时,首先应考虑其力学因素,根据安徽阜新高速公路融冰雪桥面实体项目调研和征求业主、施工单位意见,选取 $a_1 = 0.20$, $a_2 = 0.35$, $a_3 = 0.25$, $a_4 = 0.20$,代入式(4),计算结果见下页表 5;若将其应用于石油管道、化工导热领域,应首先考虑其导热性能,其次是其他指标,建议选取 $a_1 = 0.40$, $a_2 = 0.20$, $a_3 = 0.20$, $a_4 = 0.20$,代入式(4),计算结果列于表 5 括号内。

由表 5 可得以下结论。

(1)应用于融冰雪路面、桥面领域时,级配组成 1 综合性能最好,级配组成 8 综合性能最差;水灰比与总砂灰比不变,铁砂比为 0.6 时靶心度最大,所得水泥铁砂导热砂浆综合性能最好,其次是铁砂比为 1.0 的级配组成,铁砂比为 0.8 的级配组成靶心度最小;对于铁砂比相同的级配组成,水灰比为 0.50,总砂灰比为 2.0 的级配组成靶心度均较大,所得水泥铁砂导热砂浆的综合性能最好。

表 5 平均靶心度计算结果
Tab. 5 Calculated results of average approaching degree

级配编号	靶心度	综合性能排序
1	0.802 8 (0.735 8)	1(2)
2	0.749 8 (0.684 5)	2(4)
3	0.681 6 (0.632 5)	6(7)
4	0.720 9 (0.667 0)	3(6)
5	0.561 1 (0.572 0)	12(11)
6	0.635 5 (0.612 1)	7(9)
7	0.568 6 (0.532 3)	11(12)
8	0.488 8 (0.462 9)	15(15)
9	0.632 7 (0.572 5)	8(10)
10	0.507 1 (0.517 7)	14(14)
11	0.696 8 (0.737 2)	5(1)
12	0.607 4 (0.618 1)	9(8)
13	0.519 6 (0.525 2)	13(13)
14	0.704 6 (0.691 4)	4(3)
15	0.582 5 (0.667 8)	10(5)

(2)应用于石油管道、化工导热领域时,级配组成 11 综合性能最好,级配组成 8 综合性能最差;水灰比与总砂灰比不变,铁砂比为 0.6 和 1.0 时,所得水泥铁砂导热砂浆综合性能均较好;对于铁砂比相同的级配组成,水灰比为 0.50,总砂灰比为 2.0 时,所得水泥铁砂导热砂浆的综合性能最好。

4 结 语

(1)根据导热系数试验、抗折强度试验及抗压强度试验,分析得到了水泥铁砂导热砂浆的导热系数、抗折强度和抗压强度分别与水灰比、总砂灰比、铁砂比 3 个影响因素的变化规律。水泥铁砂导热砂浆的导热系数随水灰比的增大而减小,随总砂灰比和铁砂比的增大而增大,总砂灰比为 2.5 时达到最佳;抗折强度和抗压强度均随水灰比的增大而减小;抗折强度随铁砂比的增大而增大,铁砂比在 0.6~1.0 之间时,抗压强度随铁砂比增大而减小。

(2)通过对水泥铁砂导热砂浆导热系数、抗折强度、抗压强度与水灰比、总砂灰比、铁砂比 3 个影响因素的灰关联分析,发现铁砂比对导热性能影响最大,水灰比对抗折强度和抗压强度影响均较大,总砂灰比对 3 个性能的影响均最小,分析结果与试验结果相符。

(3)应用灰靶理论,以导热系数、抗折强度、抗压强度和材料价格为评价指标,评价分析 15 种级配组成的综合性能,并提出了加权靶心度分析计算方法。

(4)下一步应将施工难易程度、材料适用范围、

耐久性等因素引入评价体系,对导热水泥类材料进行综合评判和分析。

参考文献:
References:

[1] 姚运仕,陈团结,向 豪,等. 环保型长效自融冰雪路面涂层试验[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 8-15.
YAO Yun-shi, CHEN Tuan-jie, XIANG Hao, et al. Experiment of active deicing and snow melting pavement coating with environmental friendly and long-term action[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 8-15.

[2] 张洪伟,韩 森,张丽娟,等. 盐化沥青混凝土抑制结冰与融雪试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(2): 17-20.
ZHANG Hong-wei, HAN Sen, ZHANG Li-juan, et al. Antifreezing and snow melting of MFL modified asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 17-20.

[3] 霍曼琳,马保国,魏建强,等. 相变储能路面发热融雪材料体系的试验研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010, 34(6): 1177-1181.
HUO Man-lin, MA Bao-guo, WEI Jian-qiang, et al. Study of the surface snow heating system using phase change materials energy storage[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science Engineering, 2010, 34(6): 1177-1181.

[4] 李龙海,全 晔. 机场用导电混凝土热融除冰[J]. 混凝土, 2016(4): 150-154.
LI Long-hai, TONG Ye. Research on power optimization of cleaning snow and ice of hot melting for airport with conductive concrete[J]. Concrete, 2016(4): 150-154.

[5] DAWOOD E T, RAMLI M. High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25 (5): 2240-2247.

[6] 吴科如,李淑进. 不同尺寸钢纤维混杂增强水泥砂浆力学性能[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 599-604.
WU Ke-ru, LI Shu-jin. Study of mechanical properties of different size hybrid steel fiber reinforced cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(6): 599-604.

[7] GARCÉS P, FRAILE J, VILAPLANA-ORTEGO E, et al. Effect of carbon fibers on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced Portland cement mortars [J]. Cement and Concrete Research,

- 2005,35(2):324-331.
- [8] 袁玉卿,张永健,蔚旭灿. 沥青混凝土预埋碳纤维绳发热升温试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2015,35(1):49-55.
- YUAN Yu-qing, ZHANG Yong-jian, WEI Xu-can. Experiments on heating and warming of carbon fibers ropes embedded in asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(1):49-55.
- [9] GARCÉS P, ZORNOZA E, ALCOCEL E G, et al. Mechanical properties and corrosion of CAC mortars with carbon fibers[J]. Construction and Building Materials, 2012,34:91-96.
- [10] 郝成伟,邓敏,莫立武,等. 粉煤灰对水泥浆体自收缩和抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报,2011,14(6):746-751.
- HAO Cheng-wei, DENG Min, MO Li-wu, et al. Effect of pulverized fuel ashes on autogenous shrinkage and compressive strength of cement pastes[J]. Journal of Building Materials, 2011,14(6):746-751.
- [11] 王亮,杨奇,何苗,等. 低水胶比下掺入粉煤灰的水泥砂浆性能的试验[J]. 混凝土,2012(11):71-72,79.
- WANG Liang, YANG Qi, HE Miao, et al. Experimental on properties of cement mortar with different quality of fly ash under low water-cement ratio[J]. Concrete, 2012(11):71-72,79.
- [12] 杨若冲,谈至明,朱吉鹏,等. 改性橡胶砂浆的物理力学性能[J]. 公路交通科技,2012,29(7):15-19,37.
- YANG Ruo-chong, TAN Zhi-ming, ZHU Ji-peng, et al. Physical and mechanical performance of modified rubberized mortar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(7):15-19,37.
- [13] 师广岭,张海波,尚海涛,等. 废旧橡胶水泥砂浆力学性能研究与改善[J]. 硅酸盐通报,2015,34(8):2419-2423.
- SHI Guang-ling, ZHANG Hai-bo, SHANG Hai-tao, et al. Research and improving of the waste rubber particles on the mechanical properties of cement mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(8):2419-2423.
- [14] 郑莉娟,余其俊,韦江雄,等. 废橡胶粉的改性及其对水泥砂浆性能的影响[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(1):52-54,74.
- ZHENG Li-juan, YU Qi-jun, WEI Jiang-xiong, et al. Surface modification of pulverized waste rubber and its effect on the properties of Portland cement mortar[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008,30(1):52-54,74.
- [15] DEMIRBOA R. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar[J]. Energy and Buildings, 2003,35(2):189-192.
- [16] LIU K, WANG Z, JIN C, et al. An experimental study on thermal conductivity of iron ore sand cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:932-941.
- [17] 陈建银,张云莲,孙德玉. 废旧轮胎橡胶粉对砂浆力学性能和导热系数的影响[J]. 混凝土,2013(9):115-117.
- CHEN Jian-yin, ZHANG Yun-lian, SUN De-yu. Influence of the waste tire crumb rubber on mechanical properties and heat-conduct coefficient of cement mortar[J]. Concrete, 2013(9):115-117.
- [18] TÜRKEL S, ALABAS V. The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(2):405-411.
- [19] 刘晓燕,郑春媛,黄彩凤. 多孔材料导热系数影响因素分析[J]. 低温建筑技术,2009(9):121-122.
- LIU Xiao-yan, ZHENG Chun-yuan, HUANG Cai-feng. Analysis effect factor of thermal conductivity for porous materials[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009(9):121-122.
- [20] 牛森森,涂军波,魏军从. Al粉加入量对凝胶粉结合铝镁不烧砖力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2010,29(4):930-934.
- NIU Sen-sen, TU Jun-bo, WEI Jun-cong. Effects of Al addition on mechanical properties of gel powder bonded Al_2O_3 — MgO unfired bricks[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010,29(4):930-934.
- [21] 刘永峰,刘开琪. ZrO_2 对 Al_2O_3 — Mo 金属陶瓷抗折强度的影响[J]. 陶瓷学报,2009,30(2):138-141.
- LIU Yong-feng, LIU Kai-qi. Influence of ZrO_2 addition on bending strength of Al_2O_3 — Mo cermets[J]. Journal of Ceramics, 2009,30(2):138-141.
- [22] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- DENG Ju-long. Grey theory foundation[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [23] 杨雅勋,李子春,李子青,等. 基于组合权值灰关联法的旧桥加固方案评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):62-65,74.
- YANG Ya-xun, LI Zi-chun, LI Zi-qing, et al. Evaluation on reinforcement schemes of existing bridges based on combination-weight-gray-relation method[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007,27(5):62-65,74.