[文章编号] 1003－4684(2025)04-0084-06

铁粉和橡胶颗粒改良水泥砂浆抗冻和导热性能的对比研究

万祥淼，谭 燕，赵 犇，钱 锟

（湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 为研究铁粉和橡胶颗粒对道路融雪化冰回填水泥砂浆抗冻和导热性能的影响，以 M30 水泥砂浆为基体，分别掺入不同粒径、掺量的铁粉和不同质量分数的橡胶颗粒，研究其抗冻和导热性能，并对比分析了二相体系材料导热模型。结果表明：铁粉对水泥砂浆抗冻和导热性能均有改善效果，当掺入 4%的细铁粉时抗冻性能最佳，当掺入 10%的粗铁粉时导热性能最佳；橡胶颗粒的掺入使水泥砂浆的抗压强度和导热性能有一定程度的下降，但显著改善了抗冻性能。掺 5%橡胶颗粒时水泥砂浆在抗冻性显著增强的同时，抗压强度和导热性能下降幅度较小。由二相体系材料导热模型对比分析最终确立了适合铁粉和橡胶颗粒的串并联混合模型，所得预测值与实测值均表现出了良好的一致性。

[关键词] 铁粉；橡胶颗粒；融雪化冰；抗冻性能；导热性能；导热模型

[中图分类号] TU525.9 [文献标识码] A

对内置碳纤维进行通电使其发热的发热电缆技术是一种除冰雪效果优良且长期稳定的主动融雪化冰技术[1]。道路回填是发热电缆技术的重要施工环节，路面埋置碳纤维发热线后，开槽勾缝需用回填材料填实，最后铺上新的沥青层[2]。回填材料的导热系数直接影响碳纤维发热线的热传导效果，并且回填材料还起到对碳纤维发热线的保护作用[3-5]。但实际工程中，往往直接铺上沥青。发热电缆工作时产生的高温易使沥青材料出现软化，强度大幅度降低[6]。因此，目前迫切需要寻找新的回填材料保证发热电缆的正常工作。

发热电缆技术的回填材料主要包括水泥基和砂石材料等。庄迎春等[7]将膨润土和水泥按照一定比例混合作为回填材料，发现膨润土本身的导热系数不能满足常见地层的需求。因此，在实际的回填中不能将二者混合使用。司刚平[8]利用模拟试验研究了回填材料在地埋管中的导热性能，试验结果表明：相较于膨润土，水泥基回填材料的导热性能更好，且可应用的领域也更多。导热性能更好的回填材料对减少投资成本和提升发热电缆工作性能有重要作用。陈卫翠等[9]对工程实例进行研究，发现性能良好的回填材料可以减少传导中的热能损耗，进而有效减少地埋管长度。因此针对水泥基回填材料的性能进行研究，可以使发热电缆融雪化冰技术效果更加良好。

水泥砂浆是工程中常用的回填材料，但是现如今对其强度和耐久性提出了更高的要求[10]。张广兴[11]研究表明铁粉的掺入能有效提高水泥砂浆试样的抗压强度，XRD 显示铁粉的存在会促进水化硅酸钙(C-S-H)的结晶形成，SEM 测试表明适量的铁粉能够优化试样的内部结构。侯云芬等[12-13]在水泥砂浆中掺加不同粒径的铁尾矿粉，发现铁尾矿粉粒径的减小有利于其优化试块内部结构，起到更好的填充作用。Rong Wan[14]等将铁尾矿粉应用到黄土地区回填材料中，试验测定了黄土和铁尾矿粉在不同干密度、含水率和配合比条件下的导热系数，研究发现铁尾矿粉能够有效改善回填材料的导热性能，而导热性能是道路回填材料关键热工性能之一。

Eshmaiel Ganjian[15]等研究了以废弃轮胎橡胶为骨料的混凝土混合料的性能，发现随着掺入橡胶颗粒百分比的增加，橡胶混凝土的抗压强度和抗拉强度会随之降低。Kamil E. Kaloush[16]等研究了碎屑橡胶混凝土的性能，发现碎屑橡胶含量高的混凝土有着更高的延展性和韧性。随着相关学者[17-19]对

[收稿日期] 2023－05－29

[基金项目] 桥梁结构健康与安全国家重点实验室项目(BHSKL19-04-KF)

[第一作者] 万祥淼(2000－)，男，湖北随州人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为固废资源化利用。

[通信作者] 谭 燕(1981－)，女，湖南娄底人，工学博士，湖北工业大学副教授，研究方向为高性能混凝土材料与结构、固废资源化利用。

橡胶混凝土的深入研究，发现掺入适当掺量的橡胶颗粒，可以有效提高混凝土的抗冻性能，提高其在冻融环境下的耐久性。总体上看，在保证足够力学性能的情况下，在水泥砂浆中添加适量的橡胶颗粒，可以大幅度提升水泥砂浆的抗冻性能。

本文研究了掺铁粉和掺橡胶颗粒水泥砂浆的性能，并以 M30 水泥砂浆为对照，分析了铁粉和橡胶颗粒这两种掺料对水泥基回填材料性能的影响。并在对传统混凝土导热系数模型分析的基础上，建立适用于掺铁粉和掺橡胶颗粒水泥砂浆的串并联混合导热模型，为其工程实际应用提供理论依据。

1　试验方案

1.1　试验原材料

试验采用湖北华新生产的 P·O42.5R 普通硅酸盐水泥，其物理性能参数见表 1。铁粉采用南通某厂生产的铁粉，细铁粉粒径大小为 100～200 目，中号铁粉粒径大小为 50～100 目，粗铁粉粒径大小为 20～50 目。骨料为厦门艾思欧生产的 IOS 标准砂。橡胶颗粒采用 epdm 橡胶颗粒，粒径大小为 1～3 mm。

表 1　P·O42.5R 水泥物理性能

烧失量/%	凝结时间/min		比表面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	28 d 强度/MPa	
	初凝	终凝		抗压强度	抗折强度
3.28	222	227	348.7	55.1	8.5

1.2　试块制备及配合比设计

结合《砌筑砂浆配合比设计规程》(JTJ-T98－2010)[20]中 M30 砂浆配合比，胶砂比取为 1∶3。水泥砂浆试块编号为 S，铁粉与橡胶颗粒作为添加剂，铁粉分为细、中、粗三种，分别设为 A、B、C，采取外掺法按 2%、4%、6%、8%、10%质量分数等质量加入水泥砂浆。如 SAT2 表示在对比试块基础上，外掺 2%细铁粉的砂浆，之后依次类推。橡胶颗粒按照 5%、10%、15%、20%、25%质量分数等质量替换砂，如 SX5 表示在对比试块基础上橡胶颗粒替换量为 5%的砂浆，之后依次类推。配合比见表 2。本次试验使用 JJ-5 型砂浆搅拌机，将细集料与胶凝材料以及添加剂混合后进行两分钟慢搅，同时缓慢加入水，再进行两分钟快搅，使材料充分搅拌均匀。将拌合好的混合料一次性注入模具中，放置到振捣台上振捣 1 min，之后用刮平尺刮平试块表面，做好标记，用塑料薄膜遮盖试块表面防止硬化期间水分蒸发，24 h 后拆模后，移至标准养护室(温度 20±5 ℃，相对湿度 95%)养护 28 d。

1.3　试验方案

冻融试验使用全自动混凝土冻融仪，试块尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。每次冻融循环时间 4 h，每冻融循环 5 次后，进行一次称重，并且拍照记录试块的外观，重复进行 60 次。冻融试验每组试块共有 3 块，当其中有 2 块外观出现明显损伤时，终止该组试块冻融试验。冻融试验结束后，将冻融后试块的抗压强度与冻融前的试块进行对比；抗压强度测量采用微机伺服抗折抗压试验机，试块规格为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm；导热系数测量使用 DRE-Ⅲ导热系数测试仪，导热试验试块规格为 Φ61.8 mm×20 mm。

表 2　配合比设计　　kg/m^3

试验编号	砂	水泥	水	橡胶颗粒	铁粉
S	1757.8	585.9	293.0	0	0
S(A、B、C)T2	1757.8	585.9	293.0	0	52.7
S(A、B、C)T4	1757.8	585.9	293.0	0	105.5
S(A、B、C)T6	1757.8	585.9	293.0	0	158.2
S(A、B、C)T8	1757.8	585.9	293.0	0	210.9
S(A、B、C)T10	1757.8	585.9	293.0	0	263.7
SX5	1669.9	585.9	293.0	87.9	0
SX10	1582.0	585.9	293.0	175.8	0
SX15	1494.1	585.9	293.0	263.7	0
SX20	1406.2	585.9	293.0	351.6	0
SX25	1318.3	585.9	293.0	439.5	0

2　结果与讨论

2.1　抗冻性能

2.1.1　掺铁粉试块抗冻性能分析　掺铁粉试块冻融循环前后抗压强度如图 1 所示。冻融循环前后，抗压强度随铁粉掺量的增多均呈先上升后下降趋势。当细、中、粗铁粉掺量为 0～4%，抗压强度逐渐提升，当掺量为 4%时，抗压强度均达到最大值；当掺量为 4%～10%，由于铁粉掺量过大，导致其体积膨胀大于水泥砂浆中孔隙体积，出现胀裂情况，抗压强度开始下降。

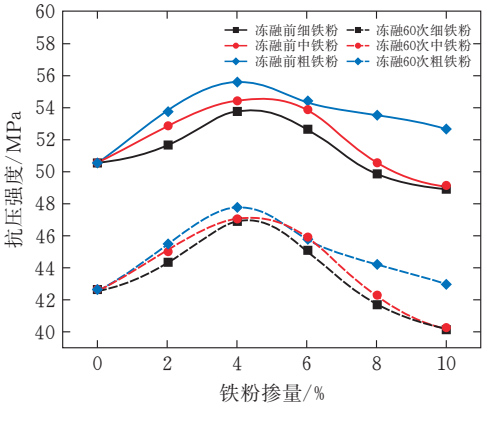

图 1　冻融循环前后掺铁粉试块的抗压强度

从整体上看，冻融循环前后，同等掺量下，掺粗铁粉试块抗压强度最大，这说明粗铁粉对水泥砂浆

试块强度改善效果相较于细、中铁粉更为明显，这是由于粗铁粉与砂颗粒的粒径相近，与砂颗粒之间具有更好的粘结作用，而细、中铁粉因为粒径相对较小，更难与砂颗粒结合，所以导致其对于强度的改善效果较粗铁粉相对较差。

掺铁粉试块强度损失率如图 2 所示，试块的强度损失率随铁粉掺量的升高均呈先降低后升高的趋势，当掺量为 4% 时，强度损失率最低，分别为 12.66%、13.42%、14.03%，较基准组分别降低了 2.98%、2.22%、1.61%，由此表明，此掺量下试块抗冻性能最佳，且细铁粉强度损失率低于中、粗铁粉，说明其相对更佳；当掺量为 4%～10% 时，强度损失率呈上升趋势，抗冻性能减弱。

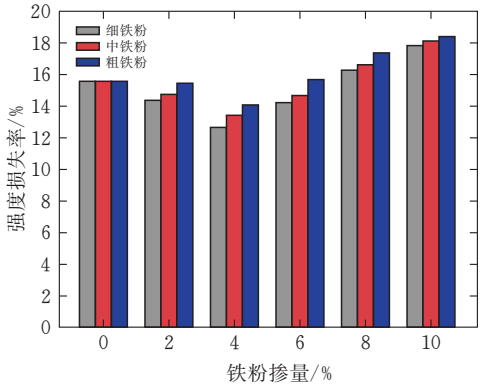

图 2　冻融循环后掺铁粉试块的强度损失率

2.1.2　掺橡胶颗粒试块抗冻性能分析　掺橡胶颗粒试块冻融循环前后抗压强度如图 3 所示。冻融循环前后，抗压强度随橡胶颗粒掺量的增多呈直线下降趋势，橡胶颗粒的掺入对试块抗压强度有不利影响。这是由于橡胶颗粒具有较高的憎水性，无法与水泥基材料产生较好的粘结，使试块内部出现了较多孔隙，进而使得试块的抗压强度出现了较大幅度的下降。其次橡胶颗粒具有较好的弹性，受压后横向变形较大，加速了孔隙的发展，进一步降低了试块的抗压强度。

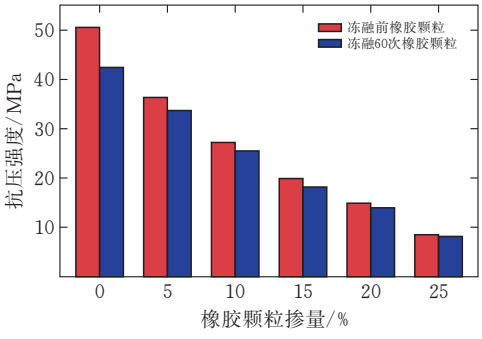

图 3　冻融循环前后掺橡胶颗粒试块的抗压强度

掺橡胶颗粒试块强度损失率如图 4 所示，试块的强度损失率随橡胶颗粒掺量的升高呈下降的趋势。当橡胶颗粒掺量在 0～5% 时，试块强度损失率出现大幅度下降，当橡胶颗粒掺量继续增加，强度损失率的下降开始迅速放缓。总体上看，当橡胶颗粒掺量在 5% 时，试块在抗冻性得到极大改善的同时，抗压强度降低的幅度也相对较小。

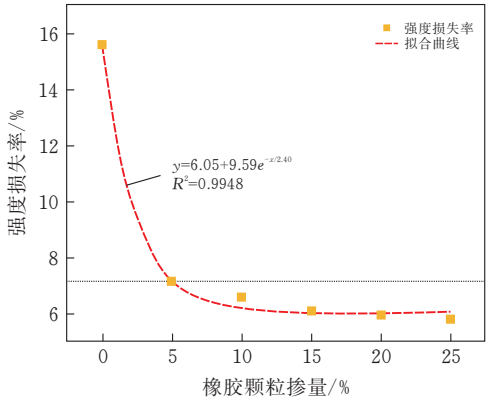

图 4　冻融循环后掺橡胶颗粒试块的强度损失率

2.2　导热性能

2.2.1　掺铁粉试块导热性能分析　掺入不同型号铁粉后，试块的导热性能试验结果如图 5 所示，随着细、中、粗铁粉掺量的增多，导热系数呈上升趋势，且同等掺量下，掺粗铁粉试块导热系数最高。这说明掺铁粉对导热性能有良好的优化效果，且粗铁粉对水泥砂浆导热性能优化效果要高于细、中铁粉。

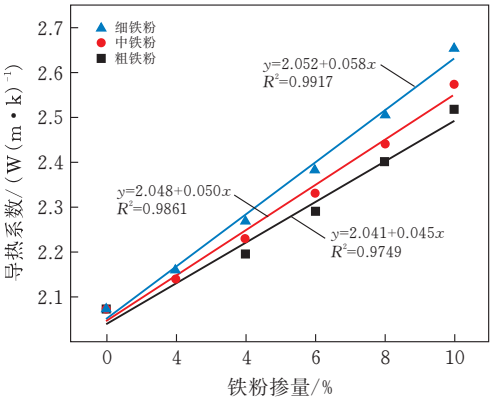

图 5　不同型号铁粉掺量对试块导热性能的影响

这是因为铁粉的导热系数远大于水泥砂浆的导热系数，铁粉替换一定量水泥砂浆后，提升了整体的导热性。同时由于铁粉的掺入，减少了砂浆内部孔隙体积，改善了其密实性，也起到了提升试块导热性的效果。粗铁粉与砂颗粒的粒径相近，与砂颗粒之间具有较好的粘结作用，便于热量在铁粉与砂颗粒间传递。中铁粉和细铁粉更难与砂颗粒结合，内部孔隙较多，导热效果相对较差，因此粗铁粉对试块导热性能改善最为明显。

2.2.2　掺橡胶颗粒试块导热性能分析　橡胶颗粒掺量对试块的导热性能试验结果如图 6 所示，试块导热系数与橡胶颗粒掺量呈负线性相关，且 R^2 = 0.9811。由此可知，橡胶颗粒掺量的增加与试块导

热系数的下降相关性较强。为了保证掺橡胶颗粒试块具备足够的导热性，橡胶颗粒掺量不宜大于 5%。

橡胶颗粒的导热系数约为 0.2 W·(m·k)$^{-1}$，远低于对比砂浆的导热系数 2.0734 W·(m·k)$^{-1}$，因此橡胶颗粒的掺入会使得试块整体导热系数出现下滑。橡胶颗粒的掺入还会带入一些气体，使试块内部出现了较多孔隙，这也是试块导热性下滑的重要因素。

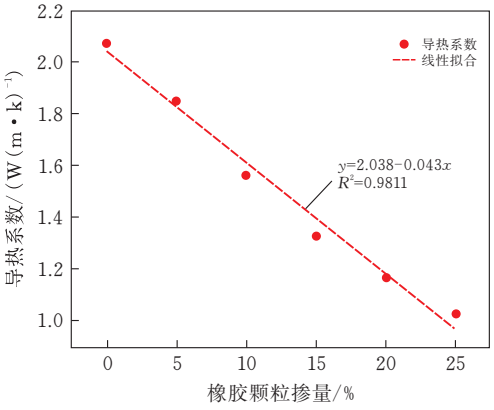

图 6　不同橡胶颗粒掺量对试块导热性能的影响

3　导热系数模型修正

根据上述试验分析，铁粉和橡胶颗粒对于水泥砂浆导热系数都有着明显影响。三种型号的铁粉中，掺粗铁粉对其导热性能的改善最为明显。橡胶颗粒的掺入则会使水泥砂浆的导热系数出现下降。本文在对传统混凝土导热系数计算模型分析计算的基础上，以张海波等[21]提出的 PVC 塑料砂浆导热模型为原型，研究粗铁粉的掺量和橡胶颗粒的掺量与水泥砂浆导热系数的数学关系，建立了掺粗铁粉水泥砂浆和掺橡胶颗粒水泥砂浆的导热系数预测模型。

3.1　混凝土导热系数模型

两相材料导热系数模型中的并联模型、串联模型、Maxwell 模型和 EMPT 模型表达式分别如表 3 所示。在两相导热系数模型中，可将掺骨料水泥砂浆看作两相复合材料，由水泥砂浆和骨料组成。

水泥砂浆为连续相，假设用 M 表示，铁粉和橡胶颗粒为分散相，分别用 IT、IX 表示。将掺铁粉试块视为 M、IT 两相组成的混合体，掺橡胶颗粒试块视为 M、IX 两种物质组成的混合体。设其导热系数分别为 λ_M、λ_{IT}、λ_{IX}，体积分数为 φ_M、φ_{IT}、φ_{IX}，通过密度试验，测出试验用砂的密度为 2.49 g·cm^{-3}，粗铁粉的密度为 3.78 g·cm^{-3}，橡胶颗粒密度为 0.87 g·cm^{-3}。根据以上假设和数据可以计算出不同掺量铁粉和橡胶颗粒时的 φ_M 与 φ_{IT}、φ_{IX}，具体结果如表 4、表 5 所示。

表 3　导热系数模型

模型	公式	材料相
并联	$\lambda=\lambda_M\varphi_M+\lambda_I\varphi_I$	两相
串联	$\lambda=\dfrac{\lambda_M\lambda_I}{\varphi_M\lambda_I+\varphi_I\lambda_M}$	两相
Maxwell	$\lambda=\lambda_M\left[\dfrac{2\lambda_M+\lambda_I-2\varphi_I(\lambda_M-\lambda_I)}{2\lambda_M+\lambda_I+\varphi_I(\lambda_M-\lambda_I)}\right]$	两相
EMPT	$\varphi_M\dfrac{\lambda_M-\lambda}{\lambda_M+2\lambda}+\varphi_I\dfrac{\lambda_I-\lambda}{\lambda_I+2\lambda}=0$	两相

表 4　φ_M 与铁粉掺量的关系　%

铁粉掺量质量分数	φ_M	$\varphi_{IT}=1-\varphi_M$
0	100	0
2	98.06	1.94
4	96.2	3.80
6	94.4	5.60
8	92.68	7.32
10	91.01	8.99

表 5　φ_M 与橡胶颗粒掺量的关系　%

橡胶颗粒掺量质量分数	φ_M	$\varphi_{IX}=1-\varphi_M$
0	100	0
5	92.16	7.84
10	84.77	15.23
15	77.80	22.20
20	71.21	28.79
25	64.97	35.03

分别将水泥砂浆导热系数 $\lambda_M\approx2.0734$ W/(m·k)、粗铁粉导热系数 $\lambda_{IT}\approx46.52$ W/(m·k)和橡胶颗粒导热系数 $\lambda_{IX}\approx0.28$ W/(m·k)以及 φ_M 与 φ_{IT}、φ_{IX} 的数据代入表 3 中基本导热模型公式，可以算出不同粗铁粉掺量和不同橡胶颗粒掺量时的试块导热系数预测值如图 7、图 8 所示。

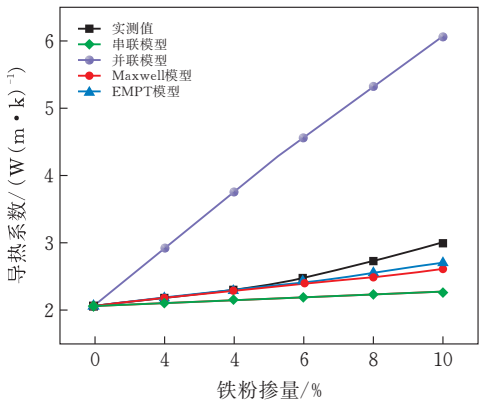

图 7　掺粗铁粉试块导热系数预测值与实测值

图 7、图 8 显示了掺铁粉试块和掺橡胶颗粒试块导热系数实测值、预测值与骨料含量之间的关系。对于掺粗铁粉试块，实测值与各模型预测值均随粗铁粉掺量的增加而增加。对于掺橡胶颗粒试块，实

测值与各模型预测值均随橡胶颗粒掺量的增加而减少。可以看出在骨料掺量较少时，Maxwell 模型和 EMPT 模型的预测值与实测值之间的变化趋势很相近。但随着骨料含量的增加，偏差值越来越大，用在工程中误差较大，因此需要对预测模型进行适当修正。从图 7、图 8 可看出，实测值与 Maxwell 模型、EMPT 模型的预测值均在串联模型和并联模型预测值之间。对串联模型和并联模型进行修正，可以确保所有实测值均位于二者之间。

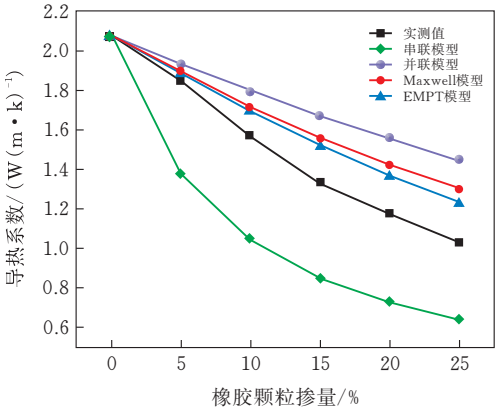

图 8 掺橡胶颗粒试块导热系数预测值与实测值

3.2 串并联混合模型

3.2.1 铁粉串并联混合模型 假设实际中连续相 M 和分散相 IT 沿着热流分布时存在着并联和串联两种形式，可引入串联系数 ν_{CT}、并联系数 ν_{BT}，其中 ν_{CT}、ν_{BT} 都$\in[0\sim1]$，且 $\nu_{CT}+\nu_{BT}=1$，设串列情况和并联情况下掺粗铁粉试块导热系数理论值为 λ_{CT}、λ_{BT}，可定义导热系数为：

$$\lambda=\nu_{CT}\times\lambda_{CT}+\nu_{BT}\times\lambda_{BT}$$

假设 ν_{CT} 是关于铁粉掺量质量分数 m_{IT} 的一元函数，设 $\nu_{CT}=f(m_{IT})$，其中 $m_{IT}\in[0\sim0.1]$，$f(m_{IT})\in[0\sim1]$，且 $f(m_{IT})$ 与 m_{IT} 呈负相关。由图 7 可知，当 $m_{IT}\in[0\sim0.04]$ 时，$f(m_{IT})$ 接近于 1，此时可得出 $\nu_{CT}=f(m_{IT})=1-m^n$，由 ν_{CT} 与 m_{IT} 负相关，且 $m_{IT}\in[0\sim0.1]$ 易得 $n>0$。经过上述推理，可设定取佳判定函数 $Z(n)=\sum|\lambda_{ST}(m_{IT})-\lambda|$，$m_{IT}=0$、2%、4%、6%、8%、10%。

经计算当 $n=0.72$ 时，$Z(n)$ 取得最小值且 $Z(0.72)\approx0.0609\ \mathrm{W\cdot(m\cdot k)^{-1}}$。由此可得出掺粗铁粉试块的导热系数公式：

$$\lambda=(1-m^{0.72})\lambda_{CT}+m^{0.72}\lambda_{BT}$$

依据该式可得出掺粗铁粉试块的导热系数的串并联计算值，并与导热系数实测值、Maxwell 模型和 EMPT 模型对比，如图 9 所示。由图 9 可知，串并联导热模型比 Maxwell 模型和 EMPT 模型的预测值更接近实测值，且偏差值与铁粉掺量之间没有线性关系，所以串并联导热模型具有很好的工程意义。

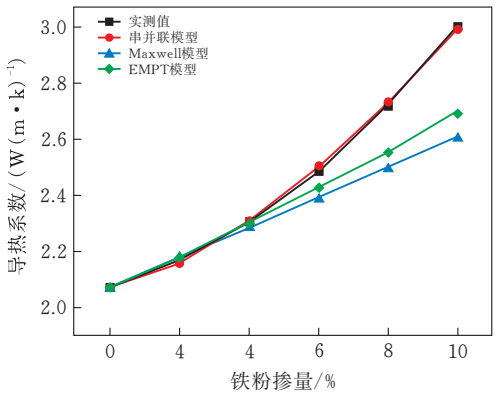

图 9 铁粉导热模型预测值与实测值的比较

3.2.2 掺橡胶颗粒试块串并联混合模型 同理，引入串联系数 ν_{CX}、并联系数 ν_{BX}，其中 ν_{CX}、ν_{BX} 都$\in[0\sim1]$，且 $\nu_{CX}+\nu_{BX}=1$，设串联情况和并联情况下掺橡胶颗粒试块导热系数理论值为 λ_{CX}、λ_{BX}，可定义导热系数为：

$$\lambda=\nu_{CX}\times\lambda_{CX}+\nu_{BX}\times\lambda_{BX}$$

假设 ν_{BX} 是关于橡胶颗粒掺量质量分数 m_{IX} 的一元函数，设 $\nu_{BX}=f(m_{IX})$，其中 $m_{IX}\in[0\sim0.25]$，$f(m_{IX})\in[0\sim1]$，且 $f(m_{IX})$ 与 m_{IX} 呈负相关。由图 8 可得出，当 $m_{IT}\in[0\sim0.05]$ 时，$f(m_{IX})$ 接近于 1，此时可得出 $\nu_{BX}=f(m_{IX})=1-m^n$，由 ν_{BX} 与 m_{IX} 负相关，且 $m_{IX}\in[0\sim0.25]$ 易得 $n>0$。可设定取佳判定函数 $Z(n)=\sum|\lambda_{SX}(m_{IX})-\lambda|$，$m_{IX}=0$、5%、10%、150%、20%、25%。

经计算当 $n=0.48$ 时，$Z(n)$ 取得最小值且 $Z(0.48)\approx0.08042\ \mathrm{W\cdot(m\cdot k)^{-1}}$。由此可得出掺橡胶颗粒回填材料的导热系数公式：

$$\lambda=(1-m^{0.48})\lambda_{BX}+m^{0.48}\lambda_{CX}$$

依据该式可得出掺橡胶颗粒试块的导热系数的串并联计算值，并与导热系数实测值、Maxwell 模型和 EMPT 模型对比，如图 10 所示。

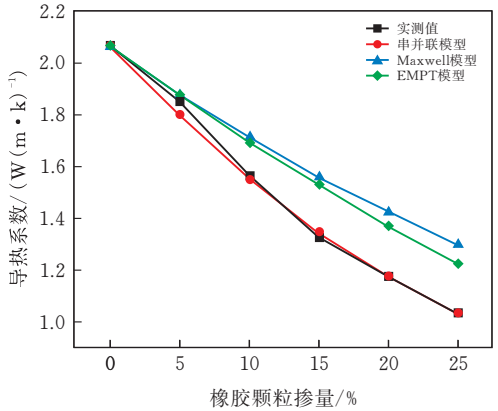

图 10 橡胶颗粒导热模型预测值与实测值的比较

由图 10 可知，串并联导热模型比 Maxwell 模型和 EMPT 模型的预测值更接近实测值，且偏差值与橡胶掺量之间没有线性关系，所以串并联导热模

型具有很好的工程意义。

4　结论

1）冻融循环前后，掺铁粉试块抗压强度随铁粉掺量的增多均呈先上升后下降趋势。当掺量为 4% 时，掺粗铁粉试块抗压强度最高，为 55.6 MPa。掺橡胶颗粒试块的抗压强度随橡胶颗粒掺量的增多呈直线下降趋势。

2）随着铁粉掺量的增加，铁粉对于抗冻性的影响呈先上升后下降的趋势，经过 60 次冻融循环后，掺 4%细铁粉试块抗压强度损失率最低，为12.66%。相比较之下，掺橡胶颗粒试块对抗冻性的改善一直呈上升趋势，强度损失率最低仅为 5.81%，对于水泥砂浆抗冻性的改善最为明显。

3）掺三种型号铁粉试块的导热系数均呈上升趋势，并且增大铁粉粒径，有助于提升试块导热系数。掺橡胶颗粒试块的导热系数呈直线下降趋势。

4）综合抗压强度、抗冻性和导热系数，掺 4%细铁粉时试块抗冻性能最佳，掺 4%粗铁粉抗压强度最大，当掺入 10%粗铁粉时导热性能最佳。掺 5%橡胶颗粒时，试块在抗冻性能得到极大改善的同时，抗压强度和导热系数下降幅度也相对较小，仅下降了 8.5%和 10.7%。

5）根据掺粗铁粉试块和掺橡胶颗粒试块的导热系数实测值，对串联模型和并联模型进行了修正，建立了适用于掺粗铁粉试块和掺橡胶颗粒试块的串并联导热系数模型，所得理论值与试验实测值表现出了良好的一致性，对预测水泥基回填材料的导热性能具有一定意义。

[参 考 文 献]

[1] 谭忆秋，张 驰，徐慧宁，等.主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J].中国公路学报，2019，32(04)：1-17.

[2] 彭余华，鲍梦捷，陈绍辉.内置碳纤维发热线融冰技术的现状与发展[J].筑路机械与施工机械化，2016，33(02)：29-33.

[3] 项永亮.地埋管回填材料及孔径对传热性能影响分析[D].上海：东华大学，2016.

[4] PHILIPPACOPULOS A J，BERMDT M L. Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps[J]. Geothermics，2001，30(05)：527-545.

[5] 陈贺新，沈勇.PVC 填缝材料在砼路面养护工程中的应用[J].公路建设与养护，2010(07)：94-97.

[6] 袁溪伟.沥青路面高温导热系数研究[D].西安：长安大学，2019.

[7] 庄迎春，孙友宏，谢康和.直埋闭式地源热泵回填土性能研究[J].太阳能学报，2004，025(02)：216-220.

[8] 司刚平.地源热泵回填料的导热性能研究[D].北京：中国地质大学，2006.

[9] 陈卫翠，刘巧玲，贾立群，等.高性能地埋管换热器钻孔回填材料的实验研究[J].暖通空调，2006(09)：1-6.

[10] SILVESTRE J SIVESTRE NDE BRITO J. Review o-n concrete nanotech mnology[J]. Eurpean Journal of Environmental and Civil Engineering，2016，20(04)：455-485.

[11] 张广兴.铁粉对水泥砂浆的强度及其微观结构的影响[J].国防交通工程与技术，2021，19(03)：27-31.

[12] 侯云芬，刘锦涛，赵思儒，等.铁尾矿粉对水泥砂浆性能的影响及机理分析[J].应用基础与工程科学学报，2019，27(05)：1149-1157.

[13] 侯云芬，刘锦涛，彭小东，等.铁尾矿粉细度对水泥砂浆孔结构的影响[J].粉煤灰综合利用，2017(05)：23-26.

[14] RONG WAN，DE-QUAN KONG，JIA-YUAN KANG，et al. The experimental study on thermal c-onductivity of backfill material of ground source heat pump based on iron tailings[J]. Energy and Bu-ildings，2018(174)：1-12.

[15] ESHMAIEL GANJIAN，MORTEZA KHORAMI，ALI AKBAR MAGHSOUDI. Scraptyrerubber replacement for aggregate and filler in concrete[J]. Construction and Building Materials，2008，23(05)：1828-1836.

[16] KAMIL E. KALOUSH，GEORGE B. WAY，HAN ZHU. Properties of crumb rubber concrete[J]. Trasportation Research Record，2005，1914(01)：8-14.

[17] 袁群，郭旭东，冯凌云，等.改性橡胶混凝土抗冻性能研究[J].人民黄河，2017，39(10)：113-116.

[18] 王林龙，简宇桥，童代伟，等.橡胶混凝土研究进展[J].公路交通技术，2017，33(01)：17-20.

[19] 周梅，赵华民，徐秒，等.橡胶颗粒量及粗细对水泥混凝土路面抗渗及抗冻影响[J].公路交通科技，2015，32(04)：34-39.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.砌筑砂浆配合比设计规程：JTJ/T982010[S].北京：中国建筑工业出版社，2011.

[21] 张海波，师广岭，尚海涛，等.PVC 塑料砂浆导热性研究[J].材料导报，2015，29(08)：142-146.

（下转第 95 页）