DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20240311003 **文章编号**:1672-9331(2024)05-0042-11
引用格式:周宏云,张德润,曾伟,等.复合式磁感应加热沥青路面融冰性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(5):42-52.
Citation:ZHOU Hongyun, ZHANG Derun, ZENG Wei, et al. Study on ice melting performance of asphalt pavement under composite magnetic induction heating [J].J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci),2024,21(5):42-52.

复合式磁感应加热沥青路面融冰性能研究

周宏云[1,2],张德润[3],曾伟[2],刘郑[3]
(1.湖北交投建设集团有限公司,湖北 武汉 430070;2.湖北长江路桥有限公司,湖北 武汉 430077;
3.华中科技大学 土木与水利工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:**【目的】**解决传统单层导电沥青混凝土在磁感应加热融冰时出现的加热不集中、能量利用率低的问题。**【方法】**在沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt,SMA)中掺入铁屑与钢砂两种材料制备马歇尔试件,并将其切片后组合为双层位复合式试件。通过磁感应加热效果试验和融冰效果试验,采用正交分析法,确定磁感应加热效果与融冰效果的关系,分析导电材料的掺量和层位分配对磁感应加热效果的影响。**【结果】**磁感应加热效果与融冰效果成正相关,也与感应加热层铁屑掺量成正相关。当磁场反射层钢砂掺量大于4%时,磁感应加热效果与钢砂掺量成正相关;当磁场反射层钢砂掺量小于4%时,磁感应加热效果与钢砂掺量成负相关。当磁场反射层厚度大于2 cm时,磁感应加热效果与磁场反射层厚度成正相关;当磁场反射层厚度小于2 cm时,磁感应加热效果与磁场反射层厚度成负相关。三因素对磁感应加热效果的影响程度最大的是感应加热层铁屑掺量,其次是磁场反射层钢砂掺量和厚度分配,两者相等。推荐铁屑掺量为8%、厚度为1 cm的感应加热层和钢砂掺量为2%、厚度为3 cm的磁场反射层组合,其感应加热效果和融冰效果最好,平均每秒融化成的水可达0.250 g。**【结论】**复合式磁感应加热沥青混凝土在感应磁场下,具有良好的加热效果与融冰效果。本研究成果可为复合式磁感应加热沥青混凝土路面的融冰研究提供一定借鉴。

关键词:导电沥青混凝土;双层位复合式;磁感应加热;铁屑;钢砂;融冰
中图分类号:U414 **文献标志码**:A

Study on ice melting performance of asphalt pavement under composite magnetic induction heating

ZHOU Hongyun[1,2], ZHANG Derun[3], ZENG Wei[2], LIU Zheng[3]
(1. Hubei Communications Investment Construction Group CO., LTD., Wuhan 430070, China;
2. Hubei Chang Jiang Road & Bridge CO., LTD., Wuhan 430077, China;
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [**Purposes**] This paper aims to address the issues of uneven heating and low energy utilization of traditional single-layer conductive asphalt concrete when employing magnetic induction for ice melting. [**Methods**] Marshall specimens were prepared by adding two materials, iron filings and steel grits, into stone mastic asphalt (SMA), and they were then sliced and combined into double-layer composite specimens. Through the magnetic induction heating effect

收稿日期:2024-03-11;**修回日期**: 2024-06-30;**接受日期**: 2024-07-01
基金项目:湖北省交通运输厅科技项目(2023-121-1-28)
通信作者:张德润(1990—)(ORCID:0000-0001-7170-9891),男,副教授,主要从事功能型与环保型路面工程方面的研究。E-mail:derunzhang@hust.edu.cn

test and ice melting effect test, combined with orthogonal analysis, the relationship between magnetic induction heating effect and ice melting effect was determined, and the influence of the content and layer distribution of conductive materials on magnetic induction heating effect was analyzed. [**Findings**] The results indicate a positive correlation between the magnetic induction heating effect and the ice melting effect. This positive correlation is also observed with the iron filing content in the induction heating layer. When the steel grit content in the magnetic reflector exceeds 4%, there is a positive correlation with the magnetic induction heating effect. However, when it is less than 4%, a negative correlation appears. When the thickness of the magnetic reflector is more than 2 cm, the magnetic induction heating effect is positively correlated with it, and when the thickness of the magnetic reflector is less than 2 cm, the magnetic induction heating effect is negatively correlated with it. The influence of the iron filing content in the induction heating layer on the magnetic induction heating effect is the strongest, followed by that of the steel grit content in the magnetic reflector and thickness distribution between the two layers to the same degree. The combination of the induction heating layer with iron filings of 8% and thickness of 1 cm and the magnetic reflector with steel grit content of 2% and thickness of 3 cm contributes to the best induction heating effect and ice melting effect, and the average ice melting per second can reach 0.250 g. [**Conclusions**] The composite magnetic induction heating-based asphalt concrete has a good heating effect and ice melting effect under the induced magnetic field. The research results can provide some reference for the research on ice melting on asphalt concrete pavement based on composite magnetic induction heating.

Key words: conductive asphalt concrete; double-layer composite; magnetic induction heating; iron filing; steel grit; ice melting

Foundation item: Project (2023-121-1-28) supported by Science and Technology Project Fund of Hubei Provincial Department of Transportation

Corresponding Author: ZHANG Derun(1990—)(ORCID:0000-0001-7170-9891), male, associate professor, research interest: functional and environmentally friendly pavement engineering. E-mail: derunzhang@hust.edu.cn

0　引言

我国冬季受冰雪影响的区域约占国土面积的一半[1]。沥青路面结冰降低通行效率，并对行车安全造成严重威胁[2-3]。目前，实践中的除冰方式主要为机械除冰和化学盐除冰，但这两种方式均存在路面磨损加剧、设备采购成本较高、对环境不友好等缺点[4-6]。因此，有必要引入新型除冰技术，解决上述痛点，从而提高沥青路面冬季交通效率，保障行车安全。

掺入导电材料的沥青混凝土在交变磁场下能够迅速升温，针对这一特性，将其应用于沥青路面升温融冰具有可行性。近年来，对于导电沥青混凝土升温融冰的研究，国内外学者不断提出新的研究思路和方法。查旭东等[7]研究了碳纤维导电苯乙烯－丁二烯－苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene block copolymer, SBS)沥青混合料的融冰性能，认为当碳纤维掺量为0.4%时，沥青混合料存在最佳的路用性能、导电性能和融冰效率。叶群山等[8]通过研究多相复合导电沥青混合料的伏安特性和电热特性，发现掺入石墨烯、碳纤维和钢渣的多相复合导电沥青混合料具有良好的升温性能。胡春华等[9]使用铜渣体积代替细集料，并添加短切碳纤维制备导电沥青混合料，研究导电材料掺量、荷载大小、加载时间及循环加荷次数对沥青混合料电阻率的影响。袁玉卿等[10]研究了电压和碳纤维质量分数对导电沥青混凝土升温与融雪的影响，表明电压和碳纤维质量分数越高，沥青混凝土的升温越快、融雪效率也越高。李科

宏等[11]研究了钢丝绒长度、掺量对沥青混合料除冰效果与路用性能的影响,发现钢丝绒长度和掺量均与感应加热平均融冰速率成正相关。YANG等[12]通过灰色关联熵分析,探究了在掺入钢纤维的沥青混凝土中,纤维含量、纤维长度、输出电流、环境温度、冰层厚度对融冰速率的影响程度,发现5个影响因素对平均融冰速率的影响程度从大到小依次为纤维含量、纤维长度、输出电流、环境温度、冰层厚度。FANG等[13]通过对上覆不同厚度冰层、不同钢纤维掺量的沥青混凝土进行加热实验,探究钢纤维沥青混凝土的融冰性能,结果表明,感应加热钢纤维改性沥青混合料能显著提高沥青混凝土的融冰效率,且冰层的厚度对沥青混凝土的感应加热速率影响不大。WAN等[14]在超薄磨耗层中加入钢渣,发现钢渣可以增强磨耗层的感应加热性能,提高融冰雪效率,并且添加钢渣的沥青混凝土表现出足够的体积和耐久性能。APOSTOLIDIS等[15]通过建立三维感应加热有限元模型来研究感应加热系统在不同的感应线圈形状、供电功率和移动速度下的加热效果。LI等[16]通过感应加热钢纤维沥青混凝土,研究了其加热温度场和梯度愈合行为,量化了感应加热温度梯度与加热距离和加热时间的关系。LIU等[17]通过将碳粉部分替代沥青混凝土中的细集料,提高了微波加热环境下沥青混合料的能量利用率和融冰效率。XIA等[18]研究了钢丝绒含量和长度对磁感应加热融冰雪沥青路面路用性能的影响,发现钢丝绒的含量和长度的增加可以在一定程度上提高道路性能。LIU等[19]利用聚磁技术,设计了两种沥青磁吸附层,提高了预埋线圈的沥青路面感应加热能量转换效率。这说明可以通过分层设置沥青路面结构来提高路面在磁场下的感应加热效率,但其并未对导电沥青混合料本身进行分层设计,且预埋线圈会导致施工成本较高。合肥工业大学的许培欣[20]同样利用了聚磁技术,将铁屑和废弃铁氧体分别作为沥青混凝土上下两层的外掺材料,使沥青路面上面层被分层设置为感应面层和磁诱导层,并使用下卧的磁诱导层增强上覆感应面层的融冰雪性能,且使用车辙板试件作为载体检验了这种分层路面结构优良的升温性能与融冰雪效果。

综上所述,传统的导电沥青混凝土路面研究主要为掺加单一金属导电材料的单层设计研究,其提高感应加热效率的措施一般为改变掺加导电材料的种类、掺量和几何尺寸,对导电沥青混凝土的层位结构少有研究。纵有学者使用拆分层位的思路设计沥青混合料,以增强其融冰雪效果,但其使用车辙板试件筛选和验证的过程比较繁琐,工作量较大且层位厚度难以精准控制。本研究使用废弃铁屑、钢砂制备双层磁感应加热沥青混凝土,并使用切片马歇尔试件作为载体来精准控制层位厚度,从而研究这种双层结构路面在感应磁场下的加热性能与融冰性能,并探究加热性能与融冰性能的关系。本研究完善导电沥青混凝土路面融冰研究与应用具有积极意义。

1 材料与试验

1.1 试验材料及测试设备

本试验采用武汉某公路物资有限公司生产的SBS聚合物改性沥青,集料选用安徽某道路工程有限公司生产的辉绿岩(包括粗、细集料),填料选用安徽某新型节能建材有限公司出品的石灰石矿粉,纤维选用四川某纤维制品集团有限公司生产的玄武岩纤维。根据现行规范《公路工程集料试验规程》(JTG 3432—2024)和《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),对本研究的沥青和集料的基本技术性能进行了测试,结果分别如表1和表2所示。试验选用沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt,SMA),其最大公称粒径为13 mm,玄武岩纤维质量分数为0.4%,最佳油石比为6.0%,矿料级配如表3所示。

此外,采用武汉某机械厂的车床切削铁屑作为感应加热层的磁感应材料,经表面除油、干燥后,取4.75 mm筛下部分,其物理参数如表4所示。采用义乌市铭飒磁性材料有限公司生产的废弃钢砂(有效成分为Fe_3O_4)作为磁场反射层的导磁材料,其公称直径为1 mm,详细物理参数如表5所示。

表1 SBS聚合物改性沥青的物理性能指标

Table 1 Physical properties of SBS-modified asphalt

物理性能指标	规范要求	实测值
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	40~60	51
延度(5 ℃, 5 cm/min)/ cm	≥20	33
软化点/℃	≥60	79.0

表 2　辉绿岩集料的物理性能指标

Table 2　Physical properties of diabase aggregate

项目	规范要求	实测
压碎值/%	≤26	6.4
磨耗值/%	≤28	10.1
磨光值	≥42	49.7
对沥青的黏附性/级	≥5	5

表 3　SMA-13 型沥青混合料矿料级配

Table 3　Mineral grading of SMA-13 asphalt mixture

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16.000	100.0	1.180	18.4
13.200	94.8	0.600	16.2
9.500	63.6	0.300	13.9
4.750	26.3	0.150	12.5
2.360	21.4	0.075	9.8

表 4　铁屑的物理参数

Table 4　Physical parameters of iron filings

密度/($g\cdot cm^{-3}$)	电导率/($S\cdot m^{-1}$)	属性长度/mm	平均长度/mm	等效宽度/mm
7.85	4.0×10^{6}	3.60~5.90	4.30	0.26~0.65

表 5　废弃钢砂的物理参数

Table 5　Physical parameters of waste steel grits

相对磁率/($H\cdot m^{-1}$)	固有电阻率/($\Omega\cdot m$)	表观密度/($g\cdot cm^{-3}$)	导热系数/[$W\cdot(mK)^{-1}$]	比热/[$J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$]
2 200.00	7.0	4.86	5.00	600.00

采用高频感应加热设备（见图 1）进行磁感应加热，使用海康威视公司生产的 HM-TPH11-3AXF 型手持红外测温仪，拍摄试件表面热像图，并使用 HIKMICRO Analyzer 软件（见图 2）测量经磁感应加热后试件的表面温度变化情况。

图 1　加热平台示意图

Fig. 1　Heating platform

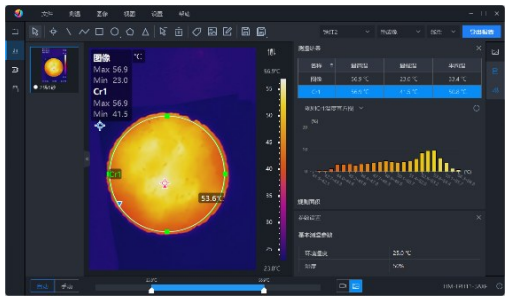

图 2　HIKMICRO Analyzer 操作界面

Fig. 2　HIKMICRO Analyzer operation interface

1.2　试验方法

1.2.1　磁感应加热原理

根据法拉第电磁感应定律与焦耳定律，导电材料在交变磁场中切割磁感线并产生感应电动势，从而产生感应热。置于交变磁场中的导体产生的感应电动势与磁场强度和导体回路围成的面积成正比，其表达式如式（1）所示：

$$\varepsilon = \omega BA = 2\pi fm\mu HA \tag{1}$$

式中：ε 为感应电动势，V；ω 为磁场角频率，rad/s；B 为磁通量，Wb；A 为导电材料围成回路的面积，m^2；f 为磁场频率，Hz；m 为互感系数，H；μ 为磁通量系数；H 为磁场强度，T。

导体中的感应电动势会产生涡流，根据焦耳定律，导体中的涡流能使导体产生热能，其表达式如式（2）所示：

$$P = RI^2t_1 = \left(\frac{\varepsilon}{R}\right)^2 Rt_1 = \frac{4\pi^2 f^2 H^2 \mu^2 A^2}{R} t_1 \tag{2}$$

式中：P 为电热能的功率，J；R 为导电材料的电阻，Ω；I 为感应电流强度，A；t_1 为磁场持续时间，s。

铁屑作为一种导电性能良好、涡流损失大的材料，当其被投入沥青混合料并置于交变磁场时会迅速升温，并将热量传导给周围的沥青和集料。当导电材料均匀分布在沥青混合料中时，沥青混合料整体加热。当混合料表面附着冰层时，混合料将热量传导给冰层，使得冰层融化。

1.2.2　分层设计原理

当磁感应加热沥青混凝土路面用于融冰雪时，仅需路面表面快速集中升温，而传统的单层磁感应加热沥青混凝土在交变磁场下会被整体加热，其远离表面的部分对表面温度的升高贡献较小。因此，若能通过调整磁感应沥青混凝土的层位分布，使得沥青混凝土上表面集中加热，则融冰

雪效果更好。

对磁感应加热沥青混凝土路面设置不同层位的本质是调节沥青混凝土中的磁场分布,而铁氧体、硅钢片等高磁导率的磁性材料,可以为发散的磁感线提供磁阻小的磁路,以降低磁能消耗。若能在磁感应沥青混凝土表面以下的部分掺入高磁导率的材料,则可以吸收上方发射的磁感线,并阻止其继续深入,从而达到减少磁能损失的效果。因此,本研究采用破碎的钢砂(有效成分为Fe_3O_4)作为磁场反射层掺入的导磁性材料,将磁场反射层置于感应加热层之下,形成双层位的复合式磁感应加热沥青混凝土路面结构,增强上方感应加热层铁屑所在的磁场强度,从而提高磁感应加热效果。

1.2.3 基本试件成型

本研究选用不同厚度的马歇尔试件切片叠放组合进行磁感应加热效果试验,模拟不同层位结构路面在磁场作用下的升温响应。具体步骤如下:对于各层位结构,分别成型相应的马歇尔试件。本试验将铁屑、钢砂作为外加剂掺入对应的沥青混凝土,并参照文献[12]、[17],将初始掺量分别设定为2%、4%、6%、8%。当掺量超过4%时,为防止材料结团,分3次投入拌合锅进行拌合,每次拌合时间为60 s。将上述成型的马歇尔试件,每组均切割为1 cm、2 cm、3 cm的马歇尔试件薄片,按照上层为感应加热层、下层为磁场反射层的层位分布,将马歇尔试件薄片依次叠放。马歇尔试件总厚度为4 cm,组成三种层位厚度分配形式,即(感应加热层+磁场反射层)分别为3 cm+1 cm、2 cm+2 cm、1 cm+3 cm。

由于组合试件仅用于磁感应加热效果试验,因此只需控制马歇尔试件的切面平整与厚度精确,保证组合试件紧密接触,即可确保试件传热良好。此外,因组合试件不涉及力学试验,为兼顾试验操作便捷性与试件重复利用性,最终选择使用马歇尔试件切片叠放的方式来模拟复合式磁感应加热沥青路面。

1.2.4 正交试验设计

以感应加热层铁屑掺量、磁场反射层钢砂掺量、感应加热层与磁场反射层厚度分配为三因素,其中铁屑掺量和钢砂掺量为4水平,厚度分配为3水平,进而设计L16(4^3)正交试验,如表6所示。通过分析各试验组合的磁感应加热效果,得出铁屑掺量、钢砂掺量、厚度分配的最佳组合。

表6 磁感应加热正交试验因素水平表

Table 6 Factors and levels in orthogonal test of magnetic induction heating

因素水平	铁屑掺量/%	钢砂掺量/%	厚度分配
1	2	2	3 cm+1 cm
2	4	4	2 cm+2 cm
3	6	6	1 cm+3 cm
4	8	8	

1.2.5 磁感应加热效果试验

使用高频感应加热设备对分层马歇尔组合试件进行感应加热试验。试验者手持红外测温仪测量试件顶部温度,分析导电材料掺量与试件层厚对导电沥青混凝土路面结构顶部升温速率的影响。

上表面平均升高温度T反映新型路面结构的上表面温度场分布特性,可由红外图像软件后处理得到,反映新型路面结构的表面整体感应加热效果。因此,本研究选择T作为融冰道面的感应加热效果试验评价指标。

1.2.6 融冰效果试验

本试验通过制作冰-道面耦合试件,模拟路面结冰情况,主要分为四个步骤。第一步,根据所需冰层厚度(本文为1 cm)确定容器水位线。此步骤需考虑到冰(密度为0.9 g/cm^3)与水(密度为1.0 g/cm^3)的密度不同。向容器内注水直达刻度线,将容器放入-3 ℃的冰箱冷藏3 h后将温度调至-10 ℃冷藏10 h,分两次调节温度是为了避免内外冻结不同步导致的冰面隆起现象。第二步,在已成型的冰面上注入薄薄一层的水,将感应加热层马歇尔试件放置在冰层之上。第三步,继续冷藏5 h,让冰层与试件表面充分冻结。第四步,将冰层脱模后即可得到与感应加热层耦合的特定厚度(1 cm)的冰层,最终得到的试件的冰层在感应加热处理后能够完全消融。完整过程如图3所示。需要强调的是,本文设定冰层为特定厚度1 cm的原因包括两点:1)前期预研工作发现该厚度方便人工精确控制,且融冰效果显著;2)严格控制各试件冰层厚度相同,以减少因冰层厚度不一致导致感应加热距离产生差异,进而对融冰效果造成显著影响。

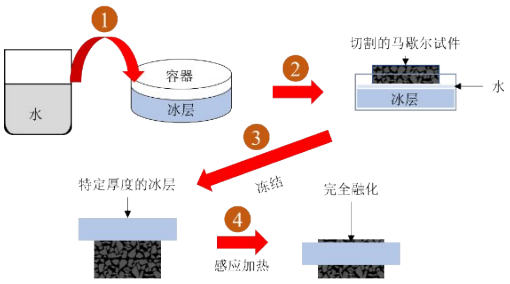

图 3　冰–路面耦合试件成型过程

Fig. 3　Forming process of ice-road coupling specimen

试验环境温度为 18 ℃，感应加热设备输出功率为 15 kW，频率为 22 kHz。将冰–道面耦合的复合马歇尔试件置于感应线圈中心下方，冰面与感应线圈的距离为 2 cm。当冰层从试件上自然脱落时，融冰效果试验结束。使用融冰速率δ作为融冰效果的评价指标，该值越大融冰效果越显著，且其与磁感应加热效果试验中红外测温仪获取的试件表面平均升高温度T之间理论上成正相关，均用于量化磁感应加热效果。融冰速率δ计算表达式为

$$\delta = \frac{m_0 - m_1}{t_2} \tag{3}$$

式中：m_0为融冰实验前耦合冰层试件的质量，g；m_1为融冰效果试验结束时试件与残余冰层的质量（由分别称取干燥试件与残余冰层质量并进行累加得到），g；t_2为融冰时间，s。

1.2.7　结构稳定性试验

参照经过磁感应加热效果试验与融冰效果验证试验优选后的组合试件，制作相应层位结构的复合式磁感应加热沥青混凝土车辙板试件，并设置未掺任何导电材料的车辙板试件作为对照组。制作分层车辙板试件时，采用控制装填质量与上覆钢板相配合的方式控制每层厚度，具体操作如下：按厚度计算每层混合料的质量，将混合料置入车辙板模具中，并将预热的特定厚度的钢板置于混合料之上，从而成型预设层厚的车辙板试件，第二层成型前应在第一层沥青混合料的表面布撒粘层油。本研究通过层间剪切试验和车辙试验对复合导电沥青混凝土试件进行结构稳定性测试，以验证复合式磁感应加热沥青混凝土的路用性能。

2　结果

2.1　磁感应加热效果与融冰效果试验结果分析

本研究将感应加热层铁屑掺量、磁场反射层钢砂掺量和层位厚度分配视为互不影响、相互正交的三种影响因素。经过正交试验后，其感应加热效果与融冰效果如表 7 所示。

表 7　感应加热效果与融冰效果正交试验结果

Table 7　Orthogonal test results of induction heating effect and ice melting effect

编号	铁屑掺量水平	钢砂掺量水平	层厚分配水平	T/℃	δ/(g·s^{-1})
TEST1	1	1	1	18.4	0.075
TEST2	1	2	2	17.5	0.069
TEST3	1	3	3	20.8	0.087
TEST4	1	4	3	21.4	0.059
TEST5	2	1	1	42.3	0.133
TEST6	2	2	2	24.8	0.076
TEST7	2	3	3	34.1	0.087
TEST8	2	4	3	37.2	0.094
TEST9	3	1	1	60.6	0.181
TEST10	3	2	2	44.1	0.108
TEST11	3	3	3	42.5	0.095
TEST12	3	4	3	49.0	0.130
TEST13	4	1	1	63.1	0.236
TEST14	4	2	2	63.2	0.103
TEST15	4	3	3	53.7	0.167
TEST16	4	4	3	55.9	0.216

2.1.1　平均升高温度与融冰速率的关联性

融冰效果试验的原理如下：让马歇尔试件表面迅速升温，从而实现其顶部冰层的快速融化。因此，其顶部加热温度的高低，势必影响试件融冰速率的快慢。在理想状态下，当试件顶部接触的冰层融化成水时，融化的水会作为试件与冰层之间的导热介质，使顶部冰层继续充分受热，直至顶部冰层全部融化。然而在实验过程中，马歇尔试件并非理想的表面光滑圆柱体，由于其顶部粗糙度较大，当其与冰层的接触面融化成水时，极大可能会从顶部缝隙直接流失，从而使得冰层无法与试件表面充分接触，致使融冰效果大打折扣，因此相应的融冰速率数据与顶面平均升高温度呈现出较高的离散性，如图 4 所示。

由图4可知,融冰速率与顶面平均升高温度的关系拟合表达式为δ=0.002 6T+0.012 7,相关性R^2=0.65。虽然融冰速率与顶面平均升高温度有呈正相关的趋势,但相关性较弱,无法简单地将顶面平均升高温度作为准确评价融冰效果的指标。

然而,铁屑掺量对试件表面升高温度的影响远高于钢砂掺量和层厚分配。因此,本研究选择仅铁屑掺量不同的组合试件,探究其对应的表面平均升高温度与平均融冰速率之间的关系,以减小融冰效果试验的离散性对试验的影响,选择的组合见表8,结果如图5所示。

表8 感应加热效果与融冰效果正交试验结果(筛选试件)

Table 8 Orthogonal test results of induction heating effect and ice melting effect (screened)

编号	铁屑掺量水平	钢砂掺量水平	层厚分配水平	T/℃	δ/(g·s^{-1})
TEST1	1	1	1	18.4	0.075
TEST5	2	1	1	42.3	0.133
TEST9	3	1	1	60.6	0.181
TEST13	4	1	1	63.1	0.236

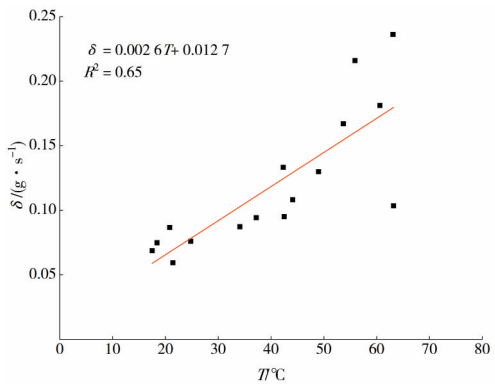

图4 筛选试件前顶面平均升高温度对融冰速率的影响

Fig. 4 Effect of average surface temperature rise on ice melting rate before specimen screening

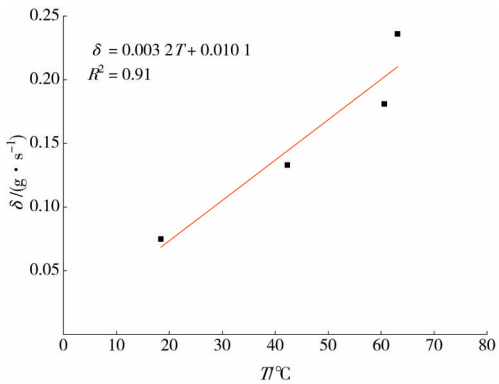

图5 筛选试件后顶面平均升高温度对融冰速率的影响

Fig. 5 Effect of average surface temperature rise on ice melting rate after specimen screening

由图5可知,融冰速率与顶面平均升高温度呈正相关的趋势,其关系拟合表达式为δ= 0.003 2T+0.010 1,相关性R^2=0.91。随着顶面平均升高温度的升高,融冰速率也逐渐提高。顶面平均升高温度与融冰速率之间表现出了较强的相关性,因此使用顶面平均升高温度表征融冰效果是切实可行的。

由于融冰效果试验易受混合料拌合工艺、混合料级配、环境温湿度、冰层成型和脱模操作等因素影响,其试验结果离散性较大,相关性较弱,R^2仅为0.65,而磁感应加热效果试验采用高精度红外测温仪,且结果处理采用专业配套软件,易于操作、测量精准且耗时较短,因此本文采用表面平均升高温度作为准确量化融冰速率的指标。

2.1.2 单因素对表面平均升高温度的影响

对表7中的数据进行正交分析,其表面平均升高温度的κ值如表9所示,κ值为每个因素的每个水平的平均值。

表9 表面平均升高温度κ值

Table 9 Analysis of κ value of average surface temperature rise ℃

水平	不同铁屑掺量的κ值	不同钢砂掺量的κ值	不同层厚分配的κ值
1	19.53	46.10	23.05
2	34.60	37.40	37.40
3	49.05	37.78	39.33
4	58.98	40.88	

单因素铁屑掺量对感应加热效果的影响如图6所示。由图6可知,不同铁屑掺量下,试件表面平均感应升高温度的κ值由大到小依次为58.98 ℃(铁屑掺量为8%)、49.05 ℃(铁屑掺量为6%)、34.60 ℃(铁屑掺量为4%)、19.53 ℃(铁屑掺量为2%),即试件表面平均感应升高温度随着感应面层铁屑的掺量增加而增大,当铁屑掺量为8%时,其对应的表面平均升高温度的κ值为58.98 ℃。铁屑掺量对表面平均升高温度κ值的贡献未出现明显放缓区间,当以表面平均升高温度作为感应加热效果的指标时,铁屑的最优掺量为8%。这是由于铁屑的导电性较强,涡流损失较大。当铁屑掺量增大时,一方面,磁场中的发热源增多,导致混合料升温速率加快;另一方面,掺入的铁屑会在沥青混合料中互相搭接,这会增大导

体回路围成的面积，根据1.2.1节中的式(2)可知，电热能功率也会随之增大，从而提高感应加热效果。

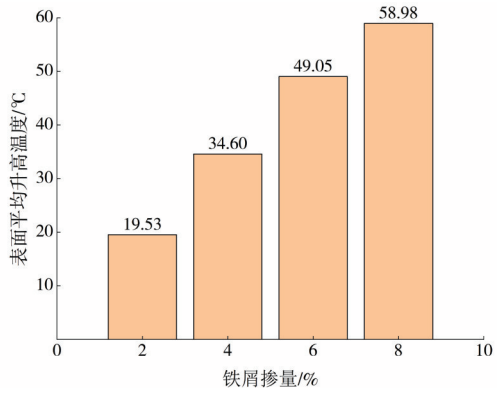

图6　铁屑掺量对感应加热性能的影响

Fig. 6　Effect of iron filing content on induction heating performance

单因素钢砂掺量对感应加热效果的影响如图7所示。由图7可知，不同钢砂掺量下，试件表面平均感应升高温度的κ值由大到小依次为46.10 ℃(钢砂掺量为2%)、40.88 ℃(钢砂掺量为8%)、37.78 ℃(钢砂掺量为6%)、37.40 ℃(钢砂掺量为4%)。即在设定的有限的4组钢砂掺量下，试件表面平均升高温度呈现先急剧降低后缓慢上升的变化趋势，当以该指标作为感应加热指标且在综合考虑材料成本情况下，钢砂的最优掺量为2%。

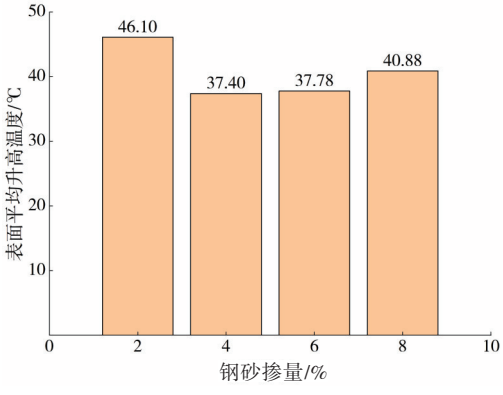

图7　钢砂掺量对加热性能的影响

Fig. 7　Effect of steel grit content on induction heating performance

单因素层厚分配对感应加热效果的影响如图8所示。由图8可知，不同层厚分配下，试件表面平均升高温度的κ值由大到小依次为46.10 ℃(3 cm+1 cm)、39.33 ℃(1 cm+3 cm)、37.40 ℃(2 cm+2 cm)。当厚度分配为感应加热层2 cm、磁场反射层2 cm时，表面平均升高温度的κ值达到拐点，即当磁场反射层厚度大于2 cm(感应加热层厚度小于2 cm)时，表面平均升高温度的κ值随磁场反射层厚度的增大而增大；当磁场反射层厚度小于2 cm(感应加热层厚度大于2 cm)时，表面平均升高温度的κ值随磁场反射层厚度的增大而减小。当感应加热层的厚度为3 cm、磁场反射层的厚度为1 cm时，该复合试件对应的表面平均升高温度的κ值为46.10 ℃。同时，废弃铁屑的价格约在800~1 600元/吨，而废弃铁氧体的价格约在500~700元/吨，若两者价格均按中间值估算，且采用前文确定的最佳掺量，则感应加热层1 cm、磁场反射层3 cm的组合的成本将比感应加热层3 cm、磁场反射层1 cm的组合的成本低127%，而表面平均升高温度仅降低15%。因此，综合考虑成本与性能，推荐1 cm感应加热层与3 cm磁场反射层的层厚分配。

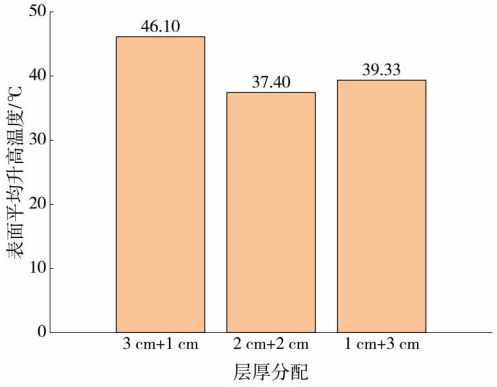

图8　层厚分配对加热性能的影响

Fig. 8　Effect of layer thickness distribution on heating performance

表10为各因素影响下，上述正交试验中试件表面平均加热升高温度κ值的极差V。

表10　表面平均升高温度极差V分析

Table 10　Analysis of range V of average surface temperature rise

不同因素下的极差V		
铁屑掺量	钢砂掺量	层厚分配
39.45	8.70	8.70

由图9可知，三因素对应的极差分别为感应加热层39.45、层厚分配8.70、磁场反射层钢砂掺量8.70。因此其对表面平均升高温度的贡献程度最大的是感应加热层铁屑掺量，其次是磁场反射层钢砂掺量和厚度分配，两者相等。

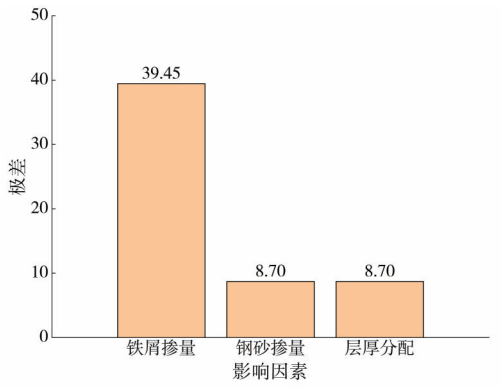

图9 三因素对加热性能的影响

Fig. 9 Effects of three factors on heating performance

2.2 融冰效果验证

根据感应加热效果正交试验可以得出,磁感应加热效果随铁屑掺量的增大而提升,且随钢砂掺量表现出先急剧下降后缓慢上升的趋势,同时在与层厚分配的关系中出现拐点,且废弃铁氧体与废弃铁屑相比具有较大的成本优势。根据以上结论,本研究优选出感应加热层铁屑掺量、磁场反射层钢砂掺量、两层位层厚分配(感应加热层+磁场反射层)分别为8%、2%、1 cm+3 cm的试件再次进行融冰效果试验,结果如表11所示。复合式磁感应加热沥青混凝土的融冰速率可达0.250 g/s,而铁屑掺量为8%的单层磁感应加热沥青混凝土的融冰速率则为0.200 g/s,作为对比的未掺加任何导电材料的试件,其在室温下的融冰速率仅为0.018 g/s。由此可以看出,本研究中的复合式磁感应加热沥青混凝土路面具有优异的除冰性能。

表11 融冰效果验证试验结果对比

Table 11 Comparison of ice-melting effect verification test results

类型	融冰速率δ/(g·s^{-1})				
	1	2	3	平均值	标准差
复合式磁感应路面	0.270	0.230	0.240	0.250	0.017
单层磁感应路面	0.180	0.203	0.200	0.200	0.021
传统路面	0.011	0.023	0.019	0.018	0.005

2.3 结构稳定性验证

使用复合式磁感应加热沥青混凝土车辙板试件进行车辙试验和钻芯后的层间剪切试验,其试验结果如表12所示。由表12可知,本文提出的新型复合式磁感应加热沥青混凝土路面的高温稳定性相较于对照组(传统路面)的有所下降,但仍符合规范《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)要求的大于3 000次/mm,而层间剪切强度则能达到对照组的87%。这是因为铁屑的表面较为光滑,其与沥青的黏附性较差,当其掺入到沥青混合料时会减弱沥青混合料整体的结构稳定性。而少量钢砂的掺入,则对沥青混合料的结构稳定性影响较小。尽管如此,从结构稳定性测试结果上看,本文中的复合式双层位磁感应加热沥青混凝土路面的结构稳定性是可以被接受的。

表12 结构稳定性测试结果

Table 12 Structural stability test results

项目	动稳定度(次/mm)	层间剪切强度/Mpa
试验组	5 982	0.92
对照组	8 461	1.06

3 讨论

本文提出了一种新型的复合式双层位磁感应沥青混凝土路面结构,并对其磁感应加热性能与融冰性能进行了研究。结果表明,将导电沥青混凝土自上而下设置为感应加热层和磁场反射层的方案能有效提高磁感应加热路面在磁场下的融冰性能。以往的研究主要集中在探索导电材料的种类、掺量、几何形貌等方面。与传统的单层位磁感应加热沥青混凝土研究相比,本文创新性地加入了掺有导磁材料的磁场反射层,并将其置于磁感应加热层之下,形成双层位复合式磁感应加热沥青混凝土。相较于传统单层位的磁感应加热沥青混凝土,复合式磁感应加热路面下方的磁场反射层能吸收上方发射的磁感线,并将磁感线聚集到磁感应加热层,从而解决了传统单层位磁感应加热沥青混凝土应用于融冰雪时出现的能量耗散大、加热不集中等问题,提高了磁感应加热沥青混凝土融冰雪的效率。

本文融冰效果数据的离散性较大,除了SMA-13马歇尔试件的宏观形貌的影响,还可能与铁屑、钢砂在沥青混合料中未充分均布有关。因此,后续可通过改进拌合工艺、改变沥青混合料的级配等方式来减小融冰效果试验的离散性,同时结合

红外相机和数值模拟,从热场分布的角度阐释设置复合式双层位磁感应加热沥青混凝土路面结构的合理性。

4　结论

在感应磁场下,复合式磁感应沥青混凝土具有优良的加热性能与融冰性能。其最佳层厚分配与导电材料掺量为感应加热层1 cm+磁场反射层3 cm、铁屑最佳掺量为8%、钢砂最佳掺量为2%。在上述最优组合下,复合式磁感应沥青混凝土的融冰速率可达0.250 g/s。磁感应加热效果与感应加热层铁屑掺量成正相关。当磁场反射层钢砂掺量大于4%时,磁感应加热效果与之成正相关;当磁场反射层钢砂掺量小于4%时,磁感应加热效果与之成负相关。三因素对磁感应加热效果的影响程度最大的是感应加热层铁屑掺量,其次是磁场反射层钢砂掺量和厚度分配,两者相等。

由于加热性能与融冰性能的特点具有一致性,因此可用表面平均升高温度作为准确量化融冰效果的指标。在传统单层导电沥青混凝土下设置磁场反射层,能更加高效地利用磁场能量,增强磁感应加热沥青混凝土的融冰效果。本研究成果可为复合式磁感应加热沥青混凝土路面的融冰研究和应用提供一定借鉴。

[参考文献]

[1] 刘佳雨,冷军强,尚平,等.冰雪路面下高速公路事故及严重程度影响因素分析[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(3):57-64. DOI:10.11918/202012124.
LIU Jiayu, LENG Junqiang, SHANG Ping. et al. Analysis of traffic crashes and injury severity influence factors for ice-snow covered freeway roads[J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(3): 57-64. DOI:10.11918/202012124.

[2] 陈玲,陈兆南,孙旭强."农村公路+安全"模式下抗凝冰沥青路面应用效果研究[J].公路与汽运,2023,(02):78-81. DOI: 10.20035/j. issn. 1671-2668.2023.02.017.
CHEN Ling, CHEN Zhaonan, SUN Xuqiang. Study on application effect of anticoagulant ice asphalt pavement under "rural road + safety" model[J]. Highways & Automotive Applications, 2023, (02): 78-81. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.017.

[3] 周水文,林芳,张晓华,等.低冰点沥青混合料融雪抑冰性能影响因素研究[J].中外公路,2023,43(01):207-214. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.037.
ZHOU Shuiwen, LIN Fang, ZHANG Xiaohua, et al. Study on influencing factors of snow melting and ice inhibition performance of low freezing point asphalt mixture [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2023, 43(01): 207-214. DOI: 10.14048/j. issn. 1671-2579.2023.01.037.

[4] 郭猛,蔡晓晓,王京京,等.道路融雪除冰技术生命周期内环境负荷分析[J].中国公路学报,2024,37(09):186-196. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2024.09.015.
GUO Meng, CAI Xiaoxiao, WANG Jingjing. et al. Analysis of environmental load during the life cycle of road snow melting and deicing technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(09): 186-196. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2024.09.015.

[5] 王庆,李文凯.盐-雾耦合作用对沥青混合料路用性能的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020, 17(4): 9-15. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9331.2020.04.002.
WANG Qing, LI Wenkai. Influence of salt-fog coupling on pavement performance of asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4): 9-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.002.

[6] 王明,陈华鑫.融雪剂对沥青混合料性能的影响[J].交通科学与工程,2013,29(03):8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2013.03.007.
WANG Ming, CHEN Huaxin. Snowmelt agent affect the performance of asphalt mixture [J]. Journal of Transportation Science and Engineering, 2013, 29(3): 8-13. DOI: 10.16544 / j. cnki cn43-1494 / u 2013.03.007.

[7] 查旭东,蔡良,曹艳霞.碳纤维导电SBS改性沥青混合料性能试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(1): 10-15, 23. DOI: 10.3969/j. issn.1672-9331.2014.01.002.
ZHA Xudong, CAI Liang, CAO Yanxia. Performance experiments of carbon fiber-reinforced conductive SBS modified asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2014, 11(1): 10-15, 23. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9331.2014.01.002.

[8] 叶群山,吴千里,周剑波,等.多相复合导电沥青混合料的伏安特性及电热特性研究[J/OL].长沙理工大学学报(自然科学版),1-9(2023-7-7)[2024-6-28]. https://doi. org/10.19951/j. cnki. 1672-9331. 20220602001.
YE Qunshan, WU Qianli, ZHOU Jianbo, et al. Study

on voltammertic characteristic and electrothermal characteristic of multiplex electrically conductive asphalt mixture[J/OL]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 1-9(2023-7-7) [2024-6-28]. https://doi. org/10.19951/j. cnki. 1672-9331.20220602001.

[9] 胡春华, 赵青, 李鹏飞, 等. 铜渣和碳纤维沥青混合料导电性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(10): 272-276, 281. DOI: 10.19817/j. cnki. issn1006-3536.2023.10.014.
HU Chunhua, ZHAO Qing, LI Pengfei, et al. Electrical conductivity of asphalt mixture containing copper slag and carbon fiber [J]. New Chemical Materials, 2023, 51 (10): 272-276, 281. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2023.10.014.

[10] 袁玉卿, 许海铭, 张永健. 导电沥青混凝土发热性能实验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42 (10): 128-132. DOI: 10.13245/j. hust. 141026.
YUAN Yuqing, XU Haiming, ZHANG Yongjian. Experimental study on warming performance of conductive asphalt concrete [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(10): 128-132. DOI: 10.13245/j. hust.141026.

[11] 李科宏,熊锐,蒋汶玉,等.基于感应加热的钢丝绒纤维沥青混合料除冰性能评价[J].科学技术与工程, 2019, 19 (32): 313-321. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815.2019.32.047.
LI Kehong, XIONG Rui, JIANG Wenyu, et al. Evaluation of deicing performance of steel wool fiber asphalt mixture based on induction heating[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 313-321. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.32.047.

[12] YANG F, LI K H, XIONG R, et al. Investigation on deicing property of steel wool fiber-reinforced asphalt mixture by induction heating[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(4): 1-10. DOI: 10.1155/2020/5250628.

[13] FANG H, SUN Y H, LIU Q T, et al. Ice melting properties of steel fiber modified asphalt mixtures with induction heating[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 182 (1): 012042. DOI: 10.1088/1757-899x/182/1/012042.

[14] WAN J M, WU S P, XIAO Y, et al. Enhanced ice and snow melting efficiency of steel slag based ultra-thin friction courses with steel fiber[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117613. DOI: 10.1016/j. jclepro.2019.117613.

[15] APOSTOLIDIS P, LIU X Y, KASBERGEN C, et al. Toward the design of an induction heating system for asphalt pavements with the finite element method [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2633(1): 136-146. DOI: 10.3141/2633-16.

[16] LI H C, YU J Y, WU S P, et al. Study on the gradient heating and healing behaviors of asphalt concrete induced by induction heating [J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 638-645. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.052.

[17] LIU Z M, YANG X, WANG Y D, et al. Engineering properties and microwave heating induced ice-melting performance of asphalt mixture with activated carbon powder filler[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 50-62. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.094.

[18] XIA Y F, JIA J, CHEN Q. Road performance and ice-melting characteristics of steel wool asphalt mixture[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022 (1): 7029176. DOI: 10.1155/2022/7029176.

[19] LIU K, FU C L, WANG H, et al. Exploring the energy-saving potential of electromagnetic induction pavement via magnetic concentrating technique [J]. Energy, 2020, 211: 118650. DOI: 10.1016/j. energy. 2020. 118650.

[20] 许培欣. 新型感应加热沥青路面复合磁诱导层融冰雪性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. DOI: 10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.002076.
XU Peixin. Study on melting ice and snow performance of new induction heating asphalt pavement composite magnetic induction layer[D].Hefei: Hefei University of Technology, 2021. DOI: 10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.002076.

(责任编辑:毛娜;校对:彭三军)