

# 微波与感应加热对沥青混合料自愈特性影响研究

彭文举<sup>1</sup>, 张瑶瑶<sup>2</sup> 编译

(1.湖北工程学院 土木工程学院, 湖北 孝感 432000; 2.湖北工程学院 化学与材料科学学院)

**摘要:** 为了研究微波与感应加热对沥青混合料自愈特性的影响,采用裂一愈循环前后三点弯曲试验强度之比对愈合率进行表征,通过试验与计算对两种加热方式下沥青混合料加热特性进行分析,采用微观观测并辅以其他试验方法对混合料加热前后理化特性进行探讨。结果表明:钢棉可以增强沥青混合料抗松散性能,但混合料设计时应考虑钢棉的掺入使混合料空隙增大的影响;沥青混合料自愈机理在于混合料内部空隙的重组;微波加热具有较感应加热更好的愈合效果,但微波加热易导致温度过高造成沥青损伤,建议微波加热时间不大于40 s,有条件时应优选感应加热技术。

**关键词:** 自愈特性; 沥青混合料; 感应加热; 微波加热; 愈合率

## 1 引言

随着沥青路面里程的飞速增长,交通量与汽车荷载的不断增大导致沥青路面破坏日趋严重,大中修工作已经刻不容缓。传统的改扩建方案不仅会浪费大量的石油沥青资源,也会对环境造成较大污染,因此如何提前在预养护阶段即开始对沥青路面进行修复显得尤为必要。作为沥青路面养护与修复的创新性方法,自愈技术正得到越来越广泛的关注。

对沥青混合料自愈特性的工程认知,最早始于1939年阿尔及利亚沥青混凝土漏水斜墙坝在未经特别处理的情况下自我修复并停止漏水的现象。沥青作为典型的温度敏感性材料,各性能具有较强温度依赖性。温度升高,沥青发生流动并填充裂缝,使得混合料呈现出自愈合特性。

近年来国内外学者就沥青混合料自愈机理、表征及增强技术进行了一定研究,目前常用的沥青混合料自愈技术有:加热愈合技术与微胶囊技术。微波加热、感应加热作为加热愈合技术的典型代表,不同于传统辐射加热,可以在较大深度范围内对混合料整体进行加热,可有效避免传统加热方式在不同深度范围内受热不均的弊端。研究表明:微波与感应加热机理存在一定差异,微波加热可对沥青等极性分子产生作用,造成分子相互摩擦运动进而引起混合料温度升高,掺入

金属材料可促进加热的进行;而感应加热由于交变磁场产生电流需导电介质传播,因此必需在混合料中掺入金属材料进行诱导加热。在加热技术方面,对感应加热与微胶囊技术对比研究表明,前者在技术要求及施工等方面具有易实现且可使混合料重复愈合的优点,可作为下阶段沥青路面养护与修复的创新性方法。Breixo对比了红外和感应加热对混合料的自愈性能,探讨了级配和空隙率对愈合特性的影响,并基于能量与愈合率等相关参数提出了一种新的自愈模型,同时表明相同能量下感应加热效果显著优于红外加热。但上述研究分别采用试件空隙率过大,与实际使用过程中混合料存在较大差异,且未考虑空隙率差异对混合料性能的影响。在自愈性能测试及评价方法方面,有研究者采用沥青混合料四点弯曲疲劳试验,也有研究者采用DSR对再生或老化沥青进行疲劳性能测试,并借助原子力显微镜(AFM)进行微观扫描分析,以评价沥青自愈特性及影响因素。也有采用沥青砂浆为研究对象,采用断裂韧性 $J_c$ 作为愈合评价指标。以上研究对沥青及混合料自愈性能进行了深入研究,但总体而言,在沥青混合料自愈机理、愈合测试方法及评价指标等方面并未形成较为统一的认识。新的评价模型与测试、评价方法不断提出,导致自愈增强技术评价存在一定差异,且相关理论仍需进行深入验证。这表明现有自愈机理并不成熟且自愈增强技术研究并不完善,有必要进行深入系统的研究,形成一套符合应用实际

的、较为完整的混合料自愈特性研究体系。

该文旨在全面分析微波与感应加热对混合料自愈特性的影响,主要研究内容为:① 钢棉在混合料中分布状态及其物理与力学性能的影响;② 不同条件、不同裂一愈循环下自愈性能的变化规律;③ 基于微观分析手段及其他试验方法的感应与微波加热对试件理化性质的影响。

## 2 原材料与试验设计

### 2.1 原材料

粗集料(粒径 5~12.5 mm,密度 2.779 g/cm<sup>3</sup>)、细集料(粒径 0.08~5 mm,密度 2.721 g/cm<sup>3</sup>)与填料组成如表 1 所示。沥青选用 CA24 沥青,密度为 1.039 g/cm<sup>3</sup>,25 ℃针入度为 56(0.1 mm),以上各指标均采用智利技术标准。

表 1 混合料各材料组成

筛孔尺寸/ mm	分计筛余 百分率/%	累计筛余 百分率/%	质量/ g
12.5	16	16	1 056
10	13	29	858
5	24	53	1 584
2.5	16	69	1 056
0.63	17	86	1 122
0.315	4	90	264
0.16	3	93	198
0.08	2	95	112
<0.08	5	100	350

注:沥青质量(350 g),占混合料质量比 5.3%。

加热诱导材料钢棉由密度为 7.180 g/cm<sup>3</sup>低碳钢制成,平均粒径 0.157 mm、平均长径比 30,长度为 2~8 mm。取 4 种不同掺量(占沥青体积比 2%、4%、6%、8%)钢棉制备钢棉沥青混合料试件,添加顺序为:沥青→钢棉→粗、细集料→填料。制备完成后将试件切割成 4 个半圆形试样,并在试样中心切割出宽×深为 4 mm×10 mm 缺口,保证缺口方向与半圆弯曲试验作用力加载方向一致(图 1)。

### 2.2 试验设计

该文主要对微波加热与感应加热两种加热方式对沥青混合料自愈性能的影响进行研究,首先探讨钢棉对沥青混合料物理力学性能的影响;然后建立愈合率评价指标,并对不同裂一愈循环下混合料的愈合特性

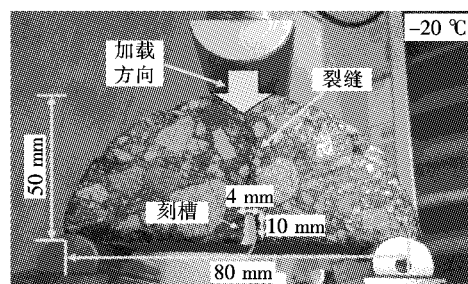


图 1 半圆弯曲试验加载装置

进行研究;最后采用微观检测评价两种加热方式对混合料理化特性的影响。具体试验设计如下。

#### 2.2.1 物理力学性能测试

测试不同掺量钢棉马歇尔试件毛体积密度,计算求取混合料理论最大密度与空隙率,对不同掺量试件进行对比分析。采用肯塔堡飞散试验评价不同掺量试件抗松散性能,试验参数为 30 r/min、旋转 300 转,飞散损失计算公式为:

$$PL(\%) = \frac{w_i - w_f}{w_f} \quad (1)$$

式中:PL 为飞散损失(%); $w_i$ 、 $w_f$ 分别为试验前、后试件质量(kg)。

试件强度采用半圆弯曲试验进行测算(装置参数如图 1 所示),试验温度 -20 ℃、加载速度 0.5 mm/min,且需将试件在 -20 ℃条件下预处理 24 h。加载完成后将试件置于 20 ℃室温下静置 2 h,保证表面冷凝水完全去除后备用。

#### 2.2.2 愈合率表征

试件愈合率表征步骤:① 进行半圆弯曲试验直至试件破坏;② 将破裂试件在室温下放置 2 h 待试件水分去除后,使用两种加热方式分别对试样加热愈合;③ 再次进行半圆弯曲试验直至破坏,如此形成一个完整的裂一愈循环周期。各循环下愈合率  $S_h$  定义为该循环下破坏强度  $F_a$  与试样初始破坏强度  $F_0$  之比(图 2):

$$S_h = F_a / F_0 \quad (2)$$

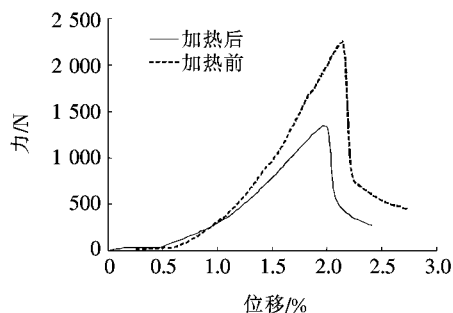


图 2 4%掺量试样加热前后力一位移曲线

微波加热使用现有研究常用的参数组合:700 W、2.45 GHz;感应加热为:700 W(保证两种加热方式功率相同)、350 kHz。与传统辐射加热原理不同,由于微波与感应加热可对试件全厚度同时进行加热,因此可用试件表面温度作代表值,采用320×240像素红外相机对试件温度进行记录。

### 2.2.3 理化特性分析

为了观察不同加热方式对试件微观结构的影响,取4%掺量半圆形试件切割成50 mm×20 mm×15 mm小梁(图5),固定于可旋转工作台,采用X射线CT技术对加热前后试样进行观察,试验参数为:80 kV、120 μA。试件距射线源11.8 mm,射线源与检测器间距1155 mm,以保证集斑大小为2 μm,从而获取4 μm的空间分辨率。扫描完成后使用ImageJ软件利用图像阈值分割法对集料、钢棉、沥青和空隙进行图像处理与分割计算。

为了解沥青热分解特性,对沥青进行热重试验分析,试验参数为:氮气气氛、升温速率20 °C/min、升温区间为0~600 °C。同时为了研究不同加热方式对沥青的分解作用,对试样裂一愈循环前后质量进行记录。

## 3 结果与分析

### 3.1 物理力学性能

图3(a)为不同掺量钢棉沥青混合料试件毛体积密度与空隙率关系,由图3(a)可知:①等掺量下毛体积密度与空隙率线性相关,这是由于空隙率是通过毛体积密度与最大理论密度计算得到,等掺量下各散点连线斜率绝对值实际为理论最大密度值;②掺钢棉后空隙率和毛体积密度较无钢棉试样变小,这是由于掺钢棉后混合料各组成材料总体积增加,试件将不易压实、空隙增加,导致空隙率随着钢棉含量的增加而增大(掺钢棉试样平均空隙率随掺量增加依次为:7.92%、8.67%、8.96%、10.54%),相应由空隙率计算原理可知此时毛体积密度减小。特别地,当掺量过高达到8%时试件出现较为明显的难以压实现象,使用甲苯将成型试件中沥青溶解并提取出钢棉,通过扫描电镜微观检测发现钢棉出现缠绕现象,这与相关文献研究结论一致。表明过高的钢棉掺量将使钢棉在沥青中的分布达到“饱和”,因此过高掺量将不利于钢棉性能的发挥。

由图3(b)肯塔堡飞散试验结果可知:①等掺量下质量损失随空隙率增加呈指数增长,这是由于空隙率增大,混合料内部有效黏结面积减小,进而导致抗松

散性能下降;②等空隙率下钢棉掺量的增加减少了试样飞散质量损失,即钢棉增强了混合料的抗松散性能。因此在进行掺钢棉混合料配合比设计时有必要考虑钢棉对混合料体积参数的影响,通过调整级配组成等方式使试样空隙率接近无钢棉试样目标空隙率。

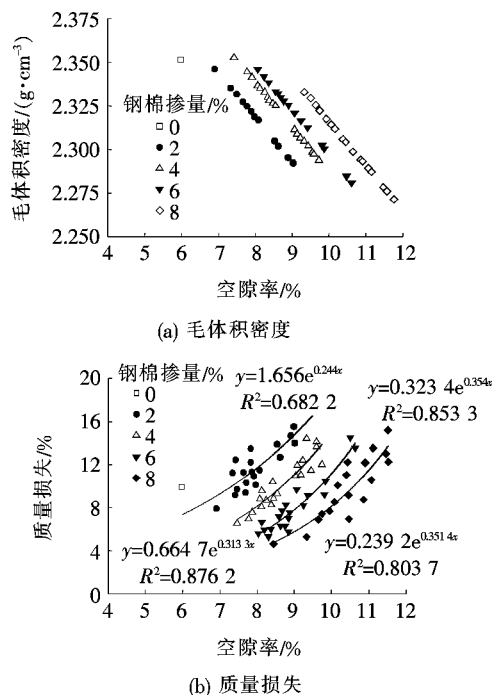


图3 钢棉掺量对混合物物理力学性能的影响

### 3.2 微波和感应加热特性

图4为两种加热方式下不同加热时间的试样温度变化。

由图4(a)可知:无钢棉试样在加热120 s后温度达80 °C左右,这是由于沥青作为一种含极性化合物的混合物,微波对其具有较好的加热效果,在无钢棉反射作用下即可对沥青进行有效加热。同时由于钢棉等金属的反射作用可提升微波加热效果,因此钢棉掺量越高升温速率越大。由图4(b)可看到:钢棉掺量越高试样升温速率越大,但无钢棉试样温度基本未发生改变。这是由感应加热的加热机理所致:交变磁场只能使导电的钢棉内部形成电流进而产生热量并传导至沥青与集料,而无钢棉试样则无法满足这一条件。对比两种加热方式,可看到试样升温基本符合线性规律,但等掺量试样微波加热温度显著高于感应加热,微波加热最大升温速率接近1 °C/s,而感应加热最大升温速率仅为0.7 °C/s。

由于两种方式加热机理存在一定差异,二者热源分别为沥青与钢棉,又因二者在混合料中含量差别

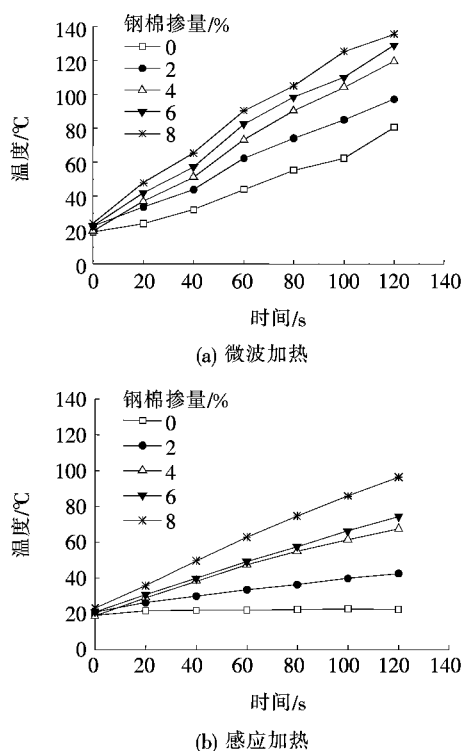


图 4 试样温度随加热时间的变化

较大,测试温度并不能完全表征混合料内部沥青、集料等各单体的实际温度,因此还需对各单体实际温度作进一步探讨。

单位时间内,忽略少量传导至集料与散失到空气中的热量,大部分仍存留于沥青或钢棉中。由于钢棉粒径小散热快,可将沥青与钢棉看作单一的受热源(下称沥青结合料),则提高混合料、结合料温度所需能量( $E_{\text{asph}}$ 、 $E_{\text{bin}}$ )简化计算分别为:

$$E_{\text{asph}} = C_{\text{asph}} * M_{\text{asph}} * \Delta T_{\text{asph}} \quad (3)$$

$$E_{\text{bin}} = C_{\text{bin}} * M_{\text{bin}} * \Delta T_{\text{bin}} \quad (4)$$

式中: $C$ 、 $M$ 、 $\Delta T$  分别为比热容 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]、质量 (kg) 和温度增量 (K), asph、bin 分别为混合料和沥青结合料。

由于加热过程中结合料吸收热量与混合料吸收热量相等,由油石比为 5.3% 可计算出单位时间结合料升高温度为:

$$\Delta T_{\text{bin}} = (0.053 + \frac{\% \text{fibres}}{100})^{-1} \cdot \frac{C_{\text{asph}} * \Delta T_{\text{asph}}}{C_{\text{bin}}} \quad (5)$$

式中: $\% \text{fibres}$  为钢棉掺量。

一段时间后结合料终止温度为混合料初始温度与单位时间内升高温度之和:

$$T_{\text{bin}} = T_{\text{asph}} + \Delta T_{\text{bin}} \quad (6)$$

为便于计算不同时间结合料加热温度,查阅文献取混合料、沥青、钢棉比热容分别为 964、1 900、482

$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。计算得到 2%、4%、6% 与 8% 钢棉掺量下结合料比热容分别为 1 511、1 290、1 147、1 047  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。利用图 4 中试验数据,取时间间隔  $\Delta T$  为 20 s 进行计算,结合料温度计算结果如图 5 所示。

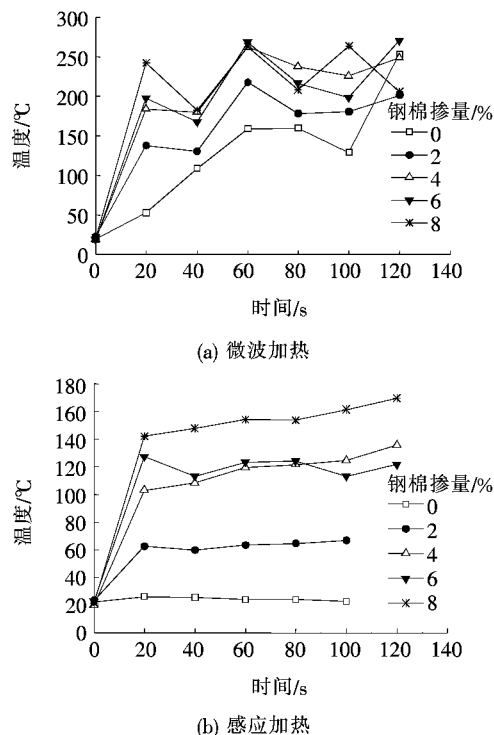


图 5 结合料温度与加热时间的关系

由图 5 可知:

(1) 微波加热下结合料在部分时间段内温度可达到 200 °C 以上,最高达到 270 °C,接近或超过沥青闪点温度。结合结合料热重曲线(图 6)可知:270 °C 时样品质量损失达到 5%,表明此温度下一定程度上会损伤沥青内部结构,进而对沥青及混合料物理力学性能造成影响,同时分解产物也会对试验人员健康造成危害。而感应加热温度整体保持在 160 °C 以下,并未达到沥青初始分解温度,不会对沥青性能造成较大影响。

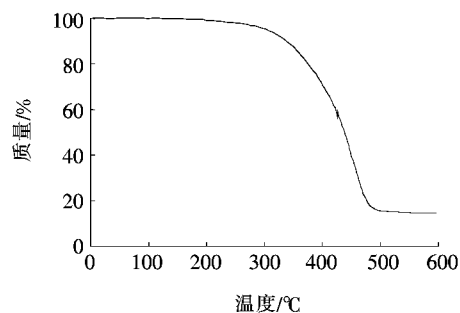


图 6 试样热重曲线

(2) 微波加热下结合料温度呈现不规则变化,表

明部分时间段内结合料吸收热量小于传导至集料的热量。由于此次计算时间间隔选取为 20 s,可推断当计算时间间隔足够小时,在微波加热过程中结合料实际温度也将呈现一定的不规则变化。感应加热与微波加热类似,结合料温度温升主要集中在前 20 s 内,不同的是感应加热下温升较微波加热小,且之后温度呈现小幅持续增长。相较微波加热,感应加热可以较好地控制加热温度,更容易使试样在目标温度范围内进行工作。

为了直观对比两种加热方式对试样外观结构的影响,取 4% 掺量试样进行两种加热方式下等效加热试验(由图 4 可知 4% 掺量试样在微波加热 40 s 与感应加热 60 s 后试样表面温度基本一致,可认为此时二者加热效果等效),加热后试样如图 7 所示。由图 7 可看到微波加热下试样出现明显损伤,而感应加热试样则较为完整,表明微波加热下沥青温度过高,不利于试样的自愈过程,这与图 5 计算结果较为一致。

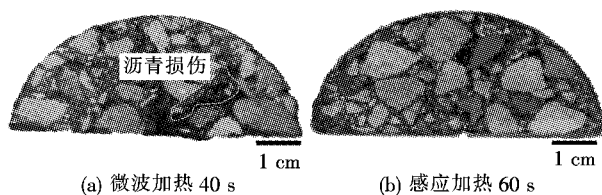


图 7 4% 掺量下加热效果

### 3.3 裂一愈循环下自愈特性

图 8 为不同掺量多组试样在两种方式下加热 40 s 后的愈合率平均值随裂一愈周期的变化,其中误差线表示标准差。

由图 8 可知:① 愈合率随裂一愈周期的增长而降低,这是由于试样在加热自愈过程中沥青不可避免受到老化损伤的影响,与集料的黏附性能及整体结构性降低,导致力学性能下降而出现愈合率降低;② 微波加热试样愈合率显著高于感应加热,这是由于微波加热具有较感应加热更高的作用温度,高温促进沥青分解产生气体,在内部压力作用下加速沥青向裂缝流动进行自愈;③ 总体而言,微波加热下试样愈合率随钢棉掺量增加呈现降低趋势,这是由于钢棉对微波加热具有促进作用,但高掺量的钢棉致使加热温度过高破坏了沥青结构。而感应加热则呈现不规则的变化趋势,这可能与钢棉在试样内的分布状态以及掺加钢棉后试样自身力学性能改变等综合作用有关,也显示愈合率与试验温度并非唯一相关。

图 9 为 4% 掺量试样在不同加热时间下愈合率平

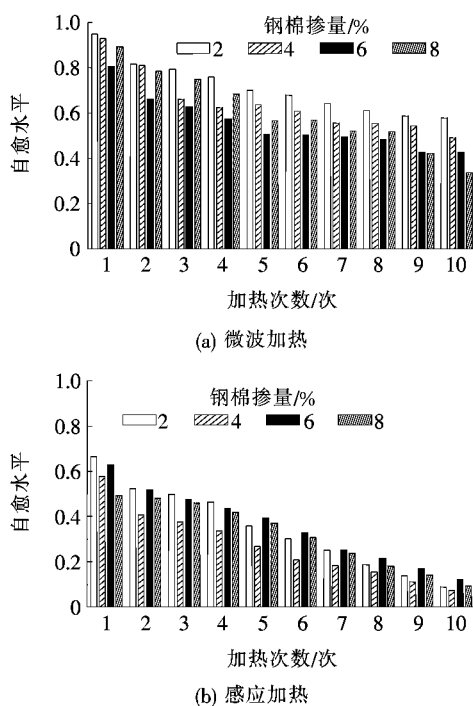


图 8 不同钢棉掺量试样在重复愈合循环下愈合率

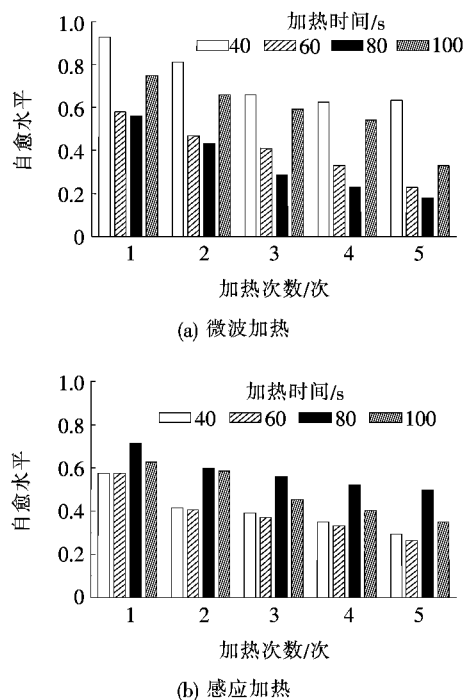


图 9 4% 掺量试样在不同自愈循环下愈合率

均值与标准差随裂一愈循环周期的变化。

由图 9(a)可知:微波加热 40 s 与 100 s 时愈合率最高,但试验过程显示此时试件均产生了浓密黑烟,表明沥青已受到损坏。感应加热下愈合率均小于 0.72,但愈合率随着加热时间的增加而增强,且使用感应加热时无烟产生。因此混合料自愈水平并不能简单比较

愈合率的高低,应结合加热对沥青的损伤程度进行综合评价。

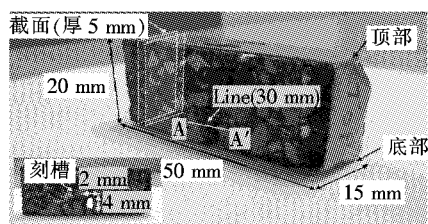


图 10 X-CT 扫描试样

为量化表征加热对试样内部结构的影响,采用 CT 扫描与图像分析软件测算 4% 掺量下图 10 所示 A-A' 断面在加热前后空隙分布及空隙率(图 11、12)。

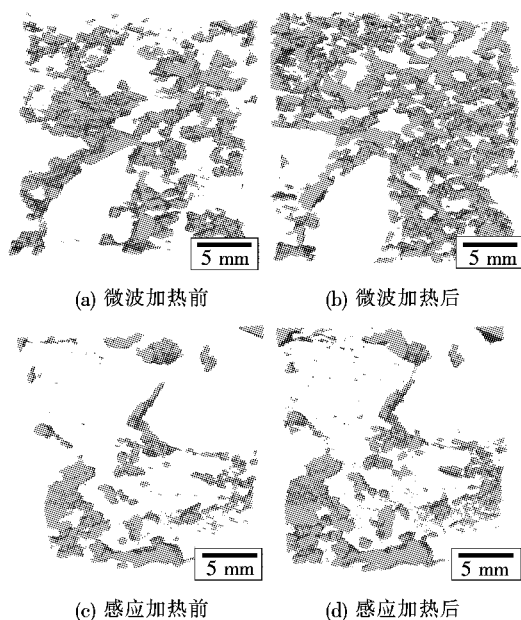
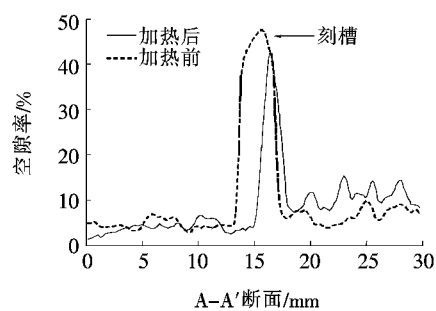


图 11 4% 掺量空隙分布

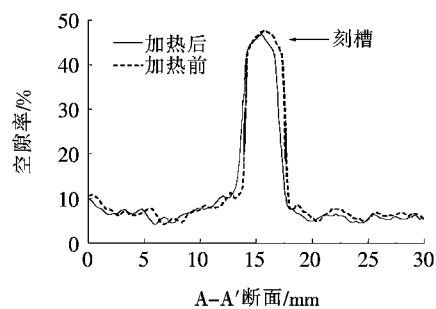
由图 11、12 可知:① 微波加热后空隙发生重分布,混合料自愈使得平均空隙率由 9.95% 减小至 8.82%,此时各断面位置空隙率变化幅度较大,同时刻槽位置也发生一定偏移。空隙形状改变并向材料内部移动发生重组,自愈过程中也改变了原有试件的致密结构,导致了混合料在每次裂一愈循环后愈合率的降低;② 感应加热前后试样平均空隙率分别为 7.13%、7.16%,未发生较大变化,但图 11(c)、(d) 显示试样空隙仍发生改变,这是每次裂一愈循环后愈合率降低的内在原因。

为表征不同加热方式对沥青分解的影响,对每次裂一愈循环后试样质量记录结果如图 13 所示。

由图 13 可知:① 微波加热下试样质量损失明显,4% 掺量试样第 10 次循环后质量损失达到 0.76%,表

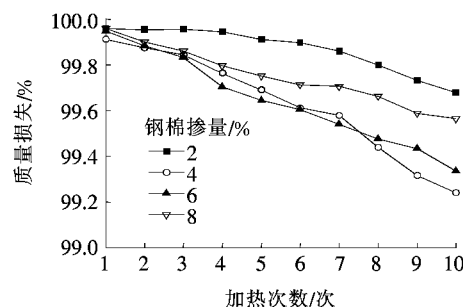


(a) 微波加热前后

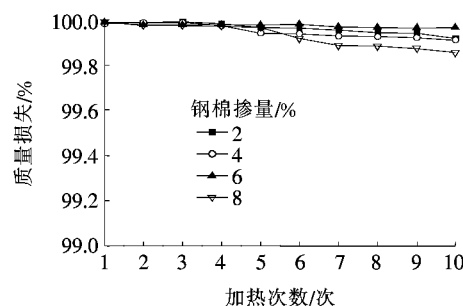


(b) 感应加热前后

图 12 4% 掺量试样空隙率



(a) 微波加热



(b) 感应加热

图 13 不同裂一愈循环次数质量损失

明此时沥青质量损失已达 14%。因此利用微波加热提高沥青混合料自愈性能的同时,也存在造成沥青严重损伤的风险;② 相较微波加热,感应加热下质量损失相对较小,最大损失量不及微波加热的 1/3,表明感应加热不会对沥青造成较大损伤。

# 高速公路改扩建工程高模量沥青混合料路用性能研究

卞海洋<sup>1</sup>, 黄毅<sup>2</sup>, 郑炳锋<sup>2</sup>, 朱富万<sup>2</sup>

(1.江苏省高速公路经营管理中心, 江苏 南京 210000; 2.苏交科集团股份有限公司)

**摘要:** 基于某高速公路改扩建工程,分别选取车辙和弯沉盆参数为指标,对拓宽路面高模量沥青混合料结构(4 cmSMA-13+8 cmEME-14+8 cmEME-14)路用性能进行研究。车辙检测结果表明:高模量 EME-14 路面结构车辙深度仅为 $(2.7 \pm 2.0)$  mm,相较于临近对比段降低 28.9%。和常规路面结构(SMA-13+SUP-20+SUP-25)相比,高模量 EME-14 路面结构可以有效减少沥青分层永久变形量,同时可以有效降低沥青层内剪应力、剪应变,从而减少压密型和流动性车辙的产生。通过对弯沉盆参数分析,高模量 EME-14 面层弯沉盆参数  $D_0-D_{20}$  为 $(6.8 \pm 4.7)$   $\mu\text{m}$ ,远低于临近对比段,表明高模量 EME-14 路面结构具有较好承载力。通过对运营一段时间的拓宽车道路用性能的检测评估,表明高模量沥青混合料能够满足改扩建工程拓宽车道重载交通的需求。

**关键词:** 改扩建; 高模量沥青混合料; 车辙; 弯沉盆参数

## 1 引言

中国早期建设的高速公路多为四车道,随着区域经济水平的发展、交通量增加,已经无法满足交通运输的需求。改扩建工程通常将四车道拓宽为八车道,有效提升了道路服务水平。基于“分车道设计”理念,拓

宽的第三、四车道将按行驶货车进行管理,这势必给拓宽车道路面结构的抗车辙能力和承载能力提出了更高的要求。车辙及弯沉盆参数作为反映路面结构强度的指标,能够有效评价路面承载力。

多项研究表明:提高沥青混合料的模量能够减小沥青混合料内产生的应变和不可恢复的残余变形,提高路面的抗车辙能力。高模量沥青混合料EME的概

## 4 结论

(1) 钢棉可以提高沥青混合料抗松散性能,掺量越高抗松散性能越好,但掺量过高会导致钢棉出现相互“缠绕”现象,影响钢棉性能的发挥;钢棉沥青混合料配合比设计时应考虑钢棉使混合料空隙率增大进而引起体积指标、力学性能变化的影响。

(2) 微波加热可以直接对沥青进行加热,而感应加热则需掺入钢棉进行诱导加热。相同功率下微波加热具有较感应加热更高的加热速率,在使混合料达到相同温度条件下,微波加热具有较感应加热更高的愈合率。

(3) 沥青混合料内部空隙发生重组是混合料自愈

的内在机理,同时空隙的改变会导致混合料力学性能的降低,这也是导致愈合率随裂一愈循环次数增加而下降的原因。

(4) 微波加热时间过长使得沥青温度高于闪点温度,导致沥青分解,进而引起沥青理化性质的改变,建议微波加热时间小于 40 s。考虑微波加热温度不易控制,容易引起沥青损伤,从沥青路面耐久性考虑建议优先使用感应加热技术。

——编译自: Norambuena-Contreras J., Garcia A. Self-Healing of Asphalt Mixture by Microwave and Induction Heating[J]. Materials & Design, 2016, 106: 404-414.

收稿日期:2019-05-16

基金项目:江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(编号:BK20151069);江苏省交通运输科技项目(编号:2016Y01,2017T19,2018Y27);吉林省交通运输科技项目(编号:2016-1-14)

作者简介:卞海洋,男,高级工程师,E-mail:736841877@qq.com