

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.007

# 微波辅助加热就地热再生在高速公路 养护中的应用研究

朱浩然<sup>1,2</sup>,张杨<sup>1,2</sup>,马辉<sup>3</sup>,符适<sup>4</sup>,王贵<sup>5</sup>

(1.苏交科集团股份有限公司,江苏南京 211112;2.新型道路材料国家工程实验室,江苏南京 211112;3.江苏高速公路工程养护技术有限公司,江苏南京 211100;4.江苏高速公路工程养护有限公司,江苏淮安 223005;5.江苏集萃道路工程技术与装备研究所有限公司,江苏徐州 220005)

**摘要:**微波加热是国内外新近研究的一种加热方式,具有深层加热、均匀性好、能量利用率高等优点。以往微波加热技术多应用于沥青路面日常养护,未见在沥青路面就地热再生的应用。该文基于微波加热的原理和特点,提出国内外独特的微波辅助加热就地热再生组合工艺流程,并开展微波辅助加热就地热再生在连霍高速养护工程应用。研究结果表明:微波加热机直接对原路面加热的方案是不合适的,确定了微波加热机二次提温的方案。连霍高速就地热再生工程实践表明:经微波加热后,铣刨料内部的加热温度可提升14℃,保证了后续混合料的拌和摊铺温度和施工质量。

**关键词:**微波辅助加热;就地热再生;组合工艺;连霍高速;加热温度

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

## 0 引言

公路作为中国的重要基础设施,给人们的生活带来了极大的便利,交通强国战略的实施,使得中国交通运输网日渐完整。作为高等级公路建设和养护的典型省份,截至2019年底,江苏省公路里程达16万km,其中高速公路4865km,“十三五”末江苏省内大部分高速公路的服役年限已超过10年,江苏省高速公路的建养模式由“建养并重”向“养护优先”转变<sup>[1]</sup>。

就地热再生技术可实现旧沥青路面铣刨料60%~100%的利用,基于资源节约型与环境友好型理念,就地热再生工艺在沥青路面养护与维修中得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。就地热再生通常有3种工艺形式:表面再生、复拌再生和复拌加铺<sup>[5-7]</sup>,中国多采用表面再生工艺。传统的沥青路面加热方式主要采用红外加热和热风加热,存在路表加热温度高,沥青老化严重,面层结构受热不均匀,环境污染严重等问题。而

微波加热是国内外新近研究的一种路面加热方式,具有加热深度大、加热均匀性好、整体性好、环保等优点,长安大学等科研院所长期致力于微波加热沥青路面的研究<sup>[8-11]</sup>。边晓伟等<sup>[12]</sup>通过对微波天线结构的优化,提高了微波加热的均匀性;杨伦磊等<sup>[13]</sup>通过研究对沥青道路微波养护车结构组成和技术参数进行了优化;张集海<sup>[14]</sup>、袁凯<sup>[15]</sup>、孙猛<sup>[16]</sup>采用先进的微波加热技术,研究了微波加热技术在沥青路面坑槽、裂缝、车辙等日常养护中的应用。

综上所述,国内外学者大多聚焦于将微波加热技术应用于沥青路面日常养护领域,未见微波加热技术在沥青路面就地热再生工程中的应用。本文基于微波加热的原理和特点,提出国内外独特的微波辅助加热就地热再生组合工艺流程,并依托2020年连霍高速公路就地热再生工程,从混合料设计、热再生工艺及施工质量检测等方面,开展了微波辅助加热就地热再生在江苏省高速公路养护工程中的应用研究。

收稿日期:2023-09-16(修改稿)

基金项目:江苏省交通运输科技与成果转化项目(编号:2018Y25,2019Y41)

作者简介:朱浩然,男,博士,高级工程师.E-mail:395377153@qq.com

## 1 微波加热原理和特点

微波加热原理:将电能通过磁控管转换成波长 12.24 cm、频率为 2.45 GHz 的微波,在微波覆盖范围内分子之间剧烈摩擦产生热能,温度随之升高。微波加热沥青混合料的作用机理:微波通过沥青混合料时,由于沥青不吸收微波,骨料特有的介电特性和磁滞特性吸收微波能,致使骨料温度升高,骨料再将热量传递给沥青,从而实现沥青混合料整体受热<sup>[17]</sup>。微波加热独有的特点如下:

(1) 即时性:物料温度的改变源自微波辐射,其热量的得失来自微波与物料的作用,表现出对物料加热的无惰性。

(2) 整体性:微波特有的频率与波长,具有较强的穿透能力,使物体内部、外部几乎同时加热升温,节省了常规加热方式中热传导过程所需的时间,物料内外加热均匀性好。

(3) 选择性:物质吸收微波的能力,主要由其介质损耗因数和磁滞损耗因子所决定,不同物质吸收微波的能力差异性较大。

(4) 高效性:传统的加热方式存在较大能量损耗,而微波加热是微波通过介质内部,介质的损耗致使整体温度升高,绝大部分的微波能量最终被介质所吸收并转化为温度升高所需要的热量,表现出微波能量利用的高效性。

## 2 微波辅助加热就地热再生组合工艺研究

### 2.1 微波加热沥青混凝土深度

当微波从物质表面进入物质内部时,微波能被介质吸收转化为热能,这种微波通过表面到介质内

部的能力称为穿透深度,用  $D$  表示,计算公式如下:

$$D = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta} \quad (1)$$

式中: $D$ 为场强穿透深度(m); $\lambda$ 为波长(m); $\epsilon_r$ 为物料介电常数; $\tan \delta$ 为介电损耗系数。

由式(1)可知:对于同一种发射频率的微波,微波的穿透深度即加热深度取决于材料的吸波能力,吸波能力越大,则加热深度越小;对于同一种材料,微波的加热深度与微波的频率有关,微波的频率越高,则加热深度越小。由于大部分物料的  $\pi \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta$  约为 1,波长 12.24 cm、频率为 2.45 GHz 的微波加热沥青混凝土路面深度为 15~20 cm。

### 2.2 微波辅助加热就地热再生组合工艺

由上述计算结果可知,2.45 GHz 的微波加热沥青混凝土路面深度为 15~20 cm,而一般市场上就地热再生路面深度为 3~5 cm,微波加热应用于原路面的就地加热存在较多的能量耗散,深层热量无法利用,造成加热效率低,甚至中面层(非再生层)经微波加热影响路面性能。因此,不能采用微波加热机直接对路面加热的方案。

本文提出微波辅助加热就地热再生的工艺流程如图 1 所示。① 传统加热机:采用 2~3 台热风或红外加热机加热软化沥青路面(路表温度  $\leq 200$  °C);② 加热铤刨机:继续对原路面加热,铤刨翻松路面(铤刨底层温度  $\geq 110$  °C),喷洒再生剂、微波辅助加热材料并使其与旧沥青混合料充分搅拌均匀后,在路槽中间形成梯形料垄;③ 料垄微波加热机:采用微波加热机对形成的料垄直接就地加热,提温 10~15 °C,起到旧沥青混合料二次提温的作用,保证后续的拌和摊铺温度和施工质量;④ 复拌再生机:将新沥青混合料按比例精确添加到料垄,强制搅拌分料形成松散料带,继续加热保温后,收集形成梯料垄,进入长拌缸彻底拌和,加热提升路槽温度。

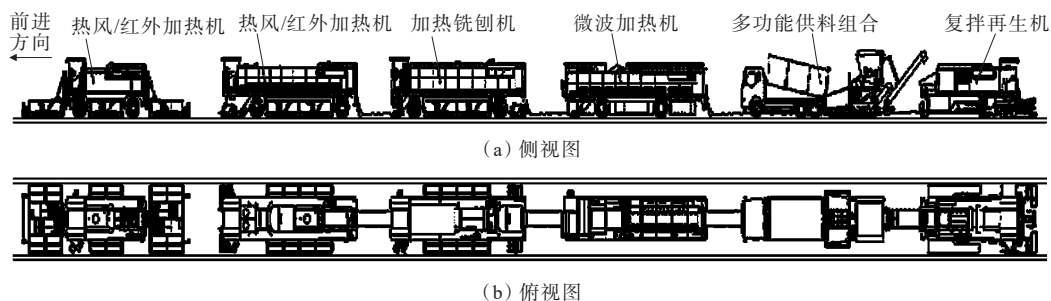


图 1 微波辅助加热就地热再生工艺流程示意图

### 3 微波辅助加热就地热再生工程应用

连霍(G30)高速公路作为江苏省高速公路的重要组成部分,其运营时间已经超过15年,为了改善路面使用性能,针对车辙深度处于8~15 mm且未再生养护过的段落,进行微波辅助加热就地热再生施工工艺研究及试验段的铺筑。

#### 3.1 配合比设计

##### 3.1.1 原路面混合料性状分析

选取具有代表性的原路面AC-13混合料进行抽取、筛分和回收并进行沥青三大指标试验,回收沥青掺加不同掺量再生剂后,其性能指标的检测结果见表1。

由表1可知:在回收沥青中掺加3%的再生剂后沥青的针入度、软化点和延度均可满足规范要求。因此拟定再生剂的掺量为原路面沥青混合料中沥青含量的3%。

##### 3.1.2 新料掺量确定及配合比初选

在不提高原路面标高的基础上,结合历年相关工程的施工经验,原路面预处理采用铣刨1 m宽、4 cm厚方案,根据计算,新料内掺比例为26%,旧料内掺比例为74%。根据设计指标要求,新料沥青的检测结果见表2,初选新料的级配如表3所示。两种试

级配混合料马歇尔试验结果如表4所示。

表1 回收沥青掺加再生剂三大指标试验结果

再生剂掺量/ %	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ °C	延度 (5 °C)/cm
0	23.6	83.3	1.3
1	30.2	81.7	7.4
2	36.7	78.2	13.2
3	43.5	74.8	21.8
规范要求	40~60	相比于老化沥青的软化点,添加再生剂后软化点下降不宜超过10 °C	>15

表2 新料沥青的检测结果

指标	单位	检测结果	技术要求
针入度(25 °C, 5 s, 100 g)	0.1 mm	67	40~70
软化点 $T_{R\&B}$	°C	83.0	≥70
延度(5 °C)	cm	38	≥25
运动黏度(135 °C)	Pa·s	2.885	≤3.0
弹性恢复(25 °C)	%	97	≥80
溶解度	%	99.82	≥99
闪点	°C	338	≥245
旋转薄膜加热 质量变化	%	-0.014	-0.5~+0.5
残留针入度比(25 °C)	%	76.1	≥65
残留延度(5 °C)	cm	23	≥15

表3 两种新料级配及合成级配明细

级配	通过下列筛孔(方孔筛: mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
新料级配1 (5#:4#:3#:2#:矿粉=45:31:0:20:4)	100	88.4	53.2	25.8	22.9	18.2	12.4	9.5	6.6	4.8
新料级配2 (5#:4#:3#:2#:矿粉=31:29:8:28:4)	100	92.0	66.8	40.5	30.6	23.7	15.5	11.5	7.5	5.2
再生合成级配1	100	93.2	69.5	39.1	31.1	22.9	17.3	11.3	8.1	6.6
再生合成级配2	100	94.1	72.7	42.6	33.0	22.2	18.0	11.8	8.3	6.7
再生合成目标级配	100	80~100	60~80	30~53	20~40	15~30	10~23	7~18	5~12	4~8

表4 两种试级配混合料马歇尔试验结果

级配	掺配后 油石 比/%	试件毛 体积相 对密度	理论最 大相对 密度	空隙 率/ %	矿料间 隙率/ %	饱和度/ %
级配1	5.08	2.516	2.630	4.3	15.9	72.9
级配2	5.08	2.511	2.628	4.5	16.1	72.2
技术要求				4~6	≥14.5	65~75

##### 3.1.3 最佳油石比确定

按照新料掺量26%(内掺)、再生剂添加量3%进行合成混合料的设计,对新料通过不同的油石比(4.2%、4.7%、5.2%、5.7%、6.2%)按照与原路面混合料比例26:74充分拌和均匀,成型马歇尔试件,测定合成混合料马歇尔试件的相关物理指标,相关检测结果见表5。

由表5中各项指标与油石比的关系,并根据往年施工经验和当地气候条件取5.2%作为新料最佳油石比,则合成混合料油石比为5.08%。

#### (4) 再生混合料性能验证

表5 不同油石比合成混合料体积指标检测结果

新料油石比/ %	掺配后 油石比/%	试件毛体积相 对密度	掺配后理论密 度/(g·cm <sup>-3</sup> )	空隙率/ %	矿料间隙率/ %	饱和度/ %	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)
4.2	4.84	2.495	2.638	5.4	14.9	63.5	15.86	30.6
4.7	4.96	2.501	2.633	5.0	14.8	66.0	15.44	32.8
5.2	5.08	2.511	2.628	4.5	16.1	72.2	14.55	33.2
5.7	5.20	2.521	2.624	3.9	14.3	72.6	13.48	34.8
6.2	5.32	2.533	2.619	3.3	14.0	76.5	13.22	36.4
技术要求				4~6	≥14.5	65~75	≥8	20~50

表6 再生合成混合料性能检测

项目	毛体积 相对 密度	理论最 大相对 密度	空隙 率/ %	稳定 度/ kN	马歇尔 残留稳 定度/%	冻融劈裂 试验残留 强度/%	动稳定度/ (次· mm <sup>-1</sup> )
检测 结果	2.511	2.628	4.5	14.55	90.7	85.6	5 246
技术 要求			4~6	≥8.0	≥85	≥80	≥4 000

### 3.2 施工控制要点

连霍高速微波辅助加热就地热再生工程的施工机组为:3台Ecoheater Kaph 8 sp加热机、1台徐工热风加热机、1台徐工热风加热铣刨机、1台徐工微波加热机、1辆沥青混合料运输车、1台徐工复拌再生机、1台沥青摊铺机、2台双钢轮压路机和1台胶轮压路机。

微波辅助加热就地热再生工艺施工流程如下:

(1) 路面预处理:为了不改变原路面标高,保证新料的掺加比例,就地热再生之前,先将原路面铣刨1 m宽。如图2所示。



图2 原路面预铣刨

(2) 路面加热保温:采用3台Ecoheater Kaph 8 sp加热机和1台徐工热风加热机加热软化沥青路面,

根据配合比设计结果,新料掺量26%(内掺),再生剂掺量3%,新料油石比5.2%,室内成型再生混合料,并进行性能验证,结果见表6。

确保路面的加热温度。如图3、4所示。



图3 Ecoheater Kaph 8 sp加热机



图4 徐工热风加热机

(3) 原路面加热铣刨:采用徐工加热铣刨机,继续对原路面加热,铣刨翻松路面(铣刨底层温度≥110℃),喷洒再生剂并使其与旧沥青混合料充分搅拌均匀后,在路槽中间形成梯形料垄。如图5、6所示。

(4) 微波辅助加热:利用徐工料垄微波加热机对精铣刨形成的料垄直接加热,提温10~15℃。如图7所示。

(5) 复拌摊铺碾压:用复拌再生机将新沥青混合



图5 加热铣刨



图6 喷洒再生剂

料按比例精确添加到料垄,强制搅拌分料形成松散料带,继续加热保温后,收集形成梯料垄,进入长拌缸彻底拌和,加热提升路槽温度。当料垄温度达到



图7 料垄微波加热

一定值后,完成后续的摊铺、碾压等工序。

(6) 开放交通:就地热再生加热机组的行驶速度控制为3.5 m/min,热再生完成后,待热拌沥青混合料自然冷却至表面温度小于50℃,即可开放交通。

## 4 微波辅助加热就地热再生施工质量检测

### 4.1 再生加热温度

采用红外热成像仪和数显式温度计对就地热再生施工过程各个环节的加热温度进行跟踪测试,测试结果见表7,实现了就地热再生各环节的温度控制。微波加热前后混合料表面和内部5 cm的温度提升情况对比结果见表8。

表7 就地热再生施工过程各环节的温度

桩号	加热后 80 cm 温度/℃				铣刨混合料温度/℃	微波加热机后料垄温度/℃	摊铺温度/℃	开始碾压温度/℃
	第1台	第2台	第3台	第4台				
K97+200	161	182	209	196	121	123	137	122
K97+400	140	182	194	183	119	115	134	124
K97+600	164	177	185	200	125	120	137	123
K97+800	152	191	216	195	122	116	136	122
K98+000	162	173	197	219	129	126	135	123

表8 微波加热机前后料垄表面和内部温度对比

桩号	铣刨料表面/℃		铣刨料内部5 cm/℃	
	微波加热机前	微波加热机后	微波加热机前	微波加热机后
K97+200	121	123	129	145
K97+400	119	115	122	135
K97+600	125	120	125	138
K97+800	122	116	119	132
K98+000	129	126	121	136
平均值	123.2	120	123.2	137.2

由表7、8可以看出:受表面温度散失、风等影响,微波加热机前料垄表面的温度并未升高,反而有所降低,而经微波加热后,料垄内部的加热温度提升14℃。分析原因可知:微波加热方式对混合料整体加热,均匀性好,且热量由混合料内部向表面进行,表面温度低于中心温度。

### 4.2 现场检测

微波辅助加热就地热再生试验段完工后,对热再生路段进行了现场检测,结果如表9所示。从芯样

厚度及压实度结果来看,厚度单点值、代表值、路面压实度均满足技术要求。

表 9 再生路段压实度检测结果

厚度/ cm	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	标准密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	马氏压 实度/%	理论压实 度/%
5.7	2.539	马氏密度:	98.2	96.1
5.4	2.537	2.587	98.1	96.0
4.8	2.584	理论密度:	99.9	97.8
4.6	2.565	2.642	99.2	97.1
技术要求			$\geq 98.0$	94.0~96.5

## 5 结论

本文通过微波辅助加热就地热再生组合工艺研究以及微波辅助加热就地热再生在连霍高速公路养护工程中的应用,得出以下结论:

(1) 考虑到微波加热沥青混凝土路面深度为 15~20 cm,而一般就地热再生路面深度为 3~5 cm,微波直接对原路面加热存在较多的能量耗散,造成加热时间长、效率低,因此,不能采用微波加热机直接对路面加热的方案,提出了国内外独特的微波辅助加热就地热再生组合工艺流程。

(2) 基于连霍高速公路就地热再生混合料配合比设计,确定新料内掺比例约为 26%,新料油石比 5.2%,合成混合料油石比 5.08%,再生剂掺量 3%,再生混合料的路用性能均满足技术指标要求。

(3) 再生温度测试结果表明:经微波加热机后,料垄表面的温度并未升高,料垄内部的加热温度提升 14℃。验证了微波加热的原理是对混合料整体加热,均匀性好,且混合料内部的热量高于表面,避免了混合料表面老化。

### 参考文献:

[1] 许宏,李训东,李雪佼.四十年案卷助力江苏公路高质量

发展[J].档案与建设,2020(8):64-67.

- [2] POVETKIN V V, TURDALIEV A T, BAIZHUMAIHOV K D, et al. The research of heat processes on destruction of asphalt-concrete pavement by thermal method[J]. Bulletin of Kazakh National Technical University, 2013(5):48-54.
- [3] LIU S L, SHUKLA A, NANDRA T. Technological, environmental and economic aspects of asphalt recycling for road construction[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75: 879-893.
- [4] 徐蕾,裘秋波,陈慧亮,等.就地热再生老化沥青室内外再生效果差异试验研究[J].中外公路,2021,41(4):268-272.
- [5] 黄颂昌,彭明文,徐剑.国内外沥青路面再生技术应用[J].公路交通科技(应用技术版),2006(11):5-8.
- [6] 宋云连,高盼,蒋宇.盐冻条件下沥青混合料低温性能研究[J].中外公路,2023,43(4):230-235.
- [7] 徐芳媛.就地热再生技术在高速公路养护中的应用[J].交通世界,2021(16):77-78.
- [8] 焦生杰,任化杰.沥青路面微波养护技术研究综述[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(5):44-54,62.
- [9] 张富强,焦生杰,马小康,等.三种吸波材料对微波加热效率的影响[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(5):74-77.
- [10] 韩海红,林岩松.就地热再生技术的工程质量控制[J].建设机械技术与管理,2020,33(3):71-74.
- [11] 陶梦欣.基于组合赋权云模型的就地热再生绿色施工综合评价[D].重庆:重庆交通大学,2020,33(3):71-74.
- [12] 边晓伟,张帆,张译之,等.就地热再生设备微波天线结构的优化设计[J].建筑机械,2018(5):97-98.
- [13] 杨伦磊,郭柏甫,漆建平,等.沥青道路微波养护车结构组成及技术特点[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(5):63-65,69.
- [14] 张集海.微波加热技术在沥青路面养护维修中的应用研究[J].中国公路,2020(24):104-105.
- [15] 袁凯.微波加热技术在沥青路面养护工程中的应用[J].交通世界,2020(32):75-76.
- [16] 孙猛.微波技术用于沥青路面坑槽病害养护的研究[J].城市住宅,2020,27(9):224-225.
- [17] 张巍,李自光,魏先勋,等.微波加热沥青路面再生修复机温度模糊自适应整定 PID 控制[J].中国工程机械学报,2005,3(2):196-201.