



序言

微波加热是在二十世纪六七十年代开始发展起来的一项新技术。微波加热通过增加材料分子运动的动能来使被加热物体升温，属体积加热，具有深度加热、热惯性小、控制容易的优点，目前已在家庭、工农业、橡胶、木材、医疗以及化学、新材料、微电子和公路等领域得到广泛应用，并拓展成为一门学科。

微波特别适合导热性能极差的沥青混合料的加热，将微波加热技术与沥青混合料热再生技术结合起来可很好地解决目前沥青混合料采用常规加热再生技术中存在的不足。在中国高等级通车道路中，沥青路面占90%以上，不可避免地会出现各种各样的损坏。因此，如何对沥青路面实行高质量保养以及对损坏的沥青路面进行快速维修是当今公路工程技术人员迫切需要解决的问题。

微波应用于公路养护，可提高修补效率、降低修补成本、保证修补质量。目前，国内外已开始采用微波加热修补维护方法——沥青路面微波现场热再生技术，使用效果很好。微波也被推广应用于道路除冰、病害无损检测等。

微波技术在公路养护设备应用的技术门槛高，需要同时掌握微波、磁控管及高压等技术才能实现微波养护设备的开发。随着中国对公路养护质量要求的提高，相信未来微波技术和设备在沥青道路养护方面将会有良好的应用前景。

微波加热原理、特性和技术优势

Principle, Characteristics and Technical Superiority of Microwave Heating

张天琦, 崔献奎 佛山市威特公路养护设备有限公司, 广东 佛山 528311
张兆镗 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054

0 引言

微波是一种频率极高(通常在300~300 000 MHz之间)、波长很短(通常在1~1 000 mm之间)的电磁波。中国目前用于工业加热的微波频率为915 MHz和2 450 MHz,具体频率可以根据加热材料的形状、大小、含水量来选择。

1 微波的特点

微波是一种高频波。与低频波相比,微波具有以下特点^[1-5]。

1.1 波长与尺寸的共度性

微波的波长与人们日常生活中的许多物体具有可相比拟的长度,如钢笔、手表、书本、碗筷等。这就是说,在微波的厘米波段,其微波波长约几厘米至几十厘米,在毫米波段的波长约为几毫米的数量级,这与普通无线电广播中的波长(为数百米)相

比要短得多,即使是与调频广播(超短波)的电磁波相比也要短一些。因此,这时微波的传输线已不再是低频时的2根金属导线,也不是传输电视节目的普通视频电缆了,而是一种被称为波导的空心金属导管(矩形或圆形截面),矩形截面的称为矩形波导或方波导,圆形截面的称为圆波导,见图1。

1.2 直线传播

与光波相似,微波以 3×10^8 km/s的速度沿直线传播,遇到金属物体时会产生反射或散射,遇到绝缘介质时会穿透进去并继续向前传播(透射),同时会产生部分反射,如图2所示。对于不同材料,微波的穿透和反射是不一样的。

1.3 可以穿透电离层

微波能很容易穿透电离层并沿着直线向前传播而不会产生强烈的反射(图3),因此有时也称微波为空间波。正是微波的这一特点,使人造卫星、宇宙飞船上的信号可以顺利地传到地球上来,从而实现人类与太空之间的通讯和互联网的控制。卫星定位系统(GPS, Global Positioning System)、卫星直播电视等都是利用微波的这一特点。

1.4 与物质相互作用时的选择性

微波与各种物质相互作用时作用效果视该物质的材料性能不同而不同。对像水这类强极性介质,微波的作用比较强烈,而对像陶瓷、玻璃、云母和一些非极性或弱极性介质作用要小得多。这种选择性就是目前微波加热的重要依据与原理。

1.5 极限非量子性

微波的量子能级较低,尚不足以破坏化合物的化学键和分子结构,这是近年来微波在化学领域中被广泛用于催化、萃取、消解、合成等应用的根据。

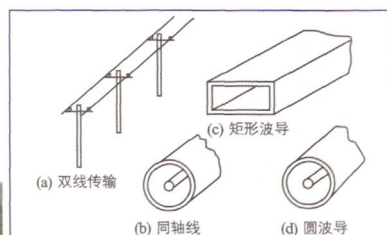


图1 微波波导

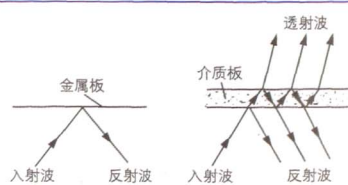


图2 微波射向金属板或介质板时产生反射及透射情况

2 产生微波能的器件

微波能常由直流电或50 Hz交流电通过特殊的器件来获得。可以产生微波的器件有许多，主要可以分为电真空器件和半导体器件两大类。

电真空器件是利用电子在真空中运动来完成能量变换的器件，称之为电子管。在电真空器件中，能产生大功率微波能量的有磁控管（图4）、多腔速调管、微波三极管、微波四极管、行波管等。

半导体器件在获得微波大功率方面与电真空器件相比至少相差3个数量级。例如，单支915 MHz磁控管可以获得30~60 kW的功率，而半导体雪崩二极管只能得到数十瓦或近百瓦的功率。2 450 MHz磁控管单管可以得到5 kW功率，2 450 MHz速调管可以得到30 kW的功率，而半导体器件只能得到几瓦。因此在目前或将来一定时期内，微波在加热领域特别是在工业中使用的主要是磁控管及速调管。

3 微波的用途

由于电磁波频谱资源的有限性，

自20世纪初人类发明了真空二极管和三极管后，从20世纪20、30年代开始，人们利用电磁波相继发明了无线电通讯、无线电广播、电视、雷达、卫星通讯、移动通讯、互联网等。个人电脑和移动通讯进入了空前高速发展的新时期。为了使这些应用互不干扰，世界无线电大会对每一种无线电应用技术所使用的电磁波的频率都规定了具体的范围，不得超越^{6]}。

微波在非通讯领域中的应用仅仅利用了微波功率和能量与物质的相互作用，使该物质产生物理或状态上的变化，如加热、脱水、干燥、发泡、膨化、煮白、固色、烧结、焊接、焙烧、熔融、改性、沉积、烧蚀、杀菌、消毒、冶炼、脱蜡、硫化、脱硫、萃取、消解等。

近年来，中国又在进行一种高效、节能又符合环保要求的修补公路沥青路面沟缝和坑洼的微波新方法，即微波再生沥青修补技术（图5）。当前，中国各地都在加快交通运输事业的发展，新公路特别是高速公路在大量修建，每年需要返修和养护的里程数量巨大，这使微波技术的使用范围将得到大大的扩展。

微波在工业中的应用还有很多，如皮革、木材、木板、家具等的烘干，塑料发泡、尼龙丝的热定形、铸造工业中的砂芯干燥、精密失蜡铸造中的快速熔蜡、石膏模型的干燥、矿石或混凝土的破碎、矿山开采等领域都有微波加热发挥巨大效能的应用场所和市场。

利用微波干燥砂芯可以大大缩短时间，减少固化剂的用量，改善劳动条件。对于复杂的砂型，可以采用分割制作的方法，然后用胶合剂粘接起来，并在加压条件下用微波在很短时间内加热接合。在精密失蜡铸造时，可以在蜡中掺入吸收微波性能较好的碳粉、铁磁粉、石墨粉等作为触媒剂，从而使得微波能够快速熔化石蜡。其优点是外壳破损率小、质量上乘、石蜡容易回收。

20世纪80年代中后期，美国内政部矿产业局根据微波快速加热矿物能急剧膨胀产生热应力的机理，对矿石进行破碎试验并取得明显效果。这种作业方法具有快速、节能、选择性加热、便于控制范围和加热速度快等优点。这种方法使破碎效率从一般火药破碎率的1%~5%、机械破碎率

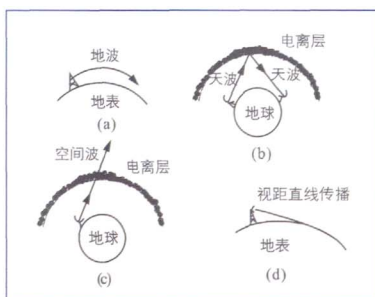


图3 各种无线电波传播途径

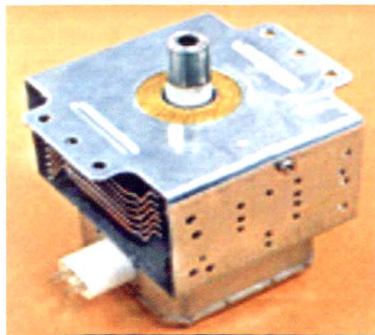


图4 微波炉用磁控管外形

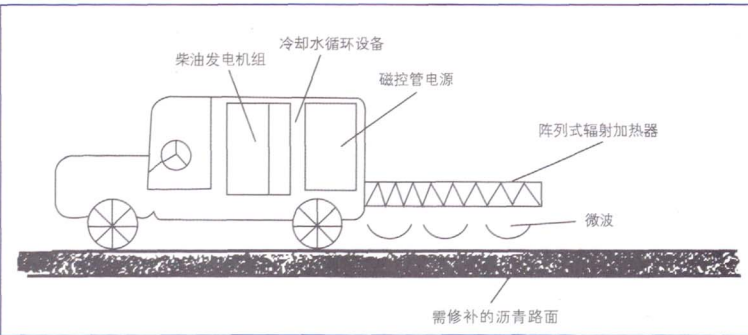


图5 修补沥青路面的微波专用车原型

15%~20% 提高到60%~70%，尤其适合于铁矿石的破碎。用微波法破碎岩石或混凝土还具有无声、无尘、无震的优点。

此外，在煤的脱硫、油田开采、原油输送、原油乳化、废橡胶脱硫和炼油、炭黑生产、粉末冶金以及化学工业中的催化、合成、萃取、消解等过程中也采用了微波方法并已投产，有的正在大力研发或进行工艺试验。

用微波处理化工产品，应用的范围极其广泛。在塑料制品的生产中，英国最早将微波用于泡沫塑料汽车坐垫的生产，近几年来利用微波生产传热率极差的发泡塑料的研究和发展更为迅速。日本东芝公司很早就将微波应用于尼龙绳的热定形生产中，上海缆绳厂也曾对降落伞绳——锦纶丝作热定形处理，从而解决了绳子延伸不均匀的技术难题，提高了产品的技术等级，并曾获得国防科委重大科研成果奖。

到目前为止，微波在工业中的应用领域正在不断拓宽，效益极为显著，这项新技术正在得到各行业的关注和认可。相信中国会成为微波功率应用的后起之秀，结合中国国情总结出国外没有的宝贵经验，为国民经济的现代化服务。

4 微波加热的基本原理

当把极性分子介质置于微波场中

时，在电磁场的作用下，介质材料中会形成偶极子，已有的偶极子会重新排列，并随着高频交变电磁场以每秒高达数次亿次的速度摆动。分子要随着不断变化的高频电磁场的方向重新排列，就必须克服分子原有的热运动和分子相互间作用的干扰和阻碍，产生激烈的摩擦。在这一微观过程中，微波能量转化为介质的热量，宏观的表现就是介质温度升高。

介质材料由极性分子和非极性分子组成，在电磁场作用下，这些极性分子从原来的随机分布状态转向依照电场的极性排列取向，见图6、图7。在高频电磁场的作用下，这些取向按交变电磁的频率不断变化，这一过程造成分子的相互运动和摩擦从而产生热量。此时交变电场的场能转化为介质内的热能，使其温度不断升高，这就是对微波加热最通俗的解释。

从电磁场理论知道，任何一种物质（电介质）在微波电场作用下，单位体积内的功率耗散（即损耗于物料中的功率密度）转变为热能，其吸收功率的大小为

$$P = 0.556 f \cdot \epsilon_i \cdot \tan \delta \cdot E^2 \times 10^{-12} \quad (1)$$

式中： P ——材料中的功率耗散；

E ——微波电场强度有效值；

f ——微波的工作频率；

δ ——介质损耗角；

ϵ_i ——物料的相对介电常数。

由式（1）可知，在输入微波功

率一定时，材料中的功率耗散与频率的乘积成正比。换言之，对同一物料而言，采用工作频率高的要比频率低的更为有效。例如，采用频率为2450 MHz要比频率为915 MHz时的效率要高2.68倍。

在微波工作频率确定后，通过寻求高介质损耗角的物料来提高对微波的吸波性能也是至关重要的。

5 微波加热的特性和优势

5.1 加热速度快

常规加热如火焰、热风、电热、蒸汽等，都是利用热传导的原理将热量从被加热物外部传入内部，逐步使物体中心温度升高，以上方法称为外部加热方式。

要使中心部位达到所需的温度需要一定的时间，导热性较差的物体所需的时间就更长。微波加热是使被加热物本身成为发热体，不需要热传导的过程，内外同时加热，因此能在短时间内达到加热效果，称作内部加热方式。

5.2 加热均匀

常规加热为提高加热速度，就需要升高加热温度，容易产生外焦内生的现象。

微波加热时，物体各部位通常都能均匀渗透电磁波，产生热量，因此均匀性大大改善。

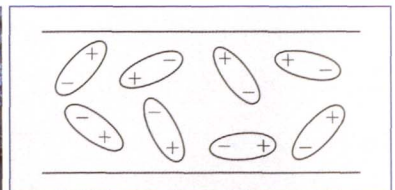


图6 无外场时的偶极子分布

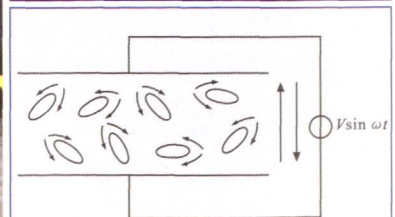


图7 存在交变电场时偶极子的旋转运动



5.3 节能高效

在加热过程中，只有被加热物体吸收微波而生热，加热室内的空气与相应的容器都不会发热，所以热效率极高，生产环境也明显改善。

5.4 易于控制

微波加热的热惯性极小，若配以微机进行控制，则特别适宜于加热过程和加热工艺的自动化控制。

5.5 低温杀菌、无污染

微波能自身不会污染食品，微波的热效应双重杀菌作用还能在较低的温度下杀死细菌，这就提供了一种能够较多地保持食品营养成分的加热杀菌方法。

5.6 选择性加热

微波对不同性质的物料有不同的作用，这一点对于干燥作业尤为有利。因为水分子对微波的吸收最好，所以含水量高的部位吸收微波功率多于含水量较低的部位，这就是选择性加热的特点。烘干木材、纸张等产品时，利用这一特点可以做到均匀加热和均匀干燥。值得注意的是，有些物质温度越高、对微波的吸收性越好，形成

恶性循环，使局部温度急剧上升造成过干甚至碳化。对这类物质进行微波加热时，要注意制定合理的工艺。

5.7 安全无害

在微波的加热、干燥过程中，无废水、废气、废物产生，无辐射遗留物存在，微波泄漏也大大低于国家制定的安全标准，是一种安全无害的高新技术。

6 沥青混合料的组成及加热原理

6.1 沥青混合料的组成

沥青混合料通常由4%~6%的沥青、50%~70%的粗集料和20%~40%的细集料和10%以下的矿粉组成。

表1中列出了沥青及沥青混合料在频率为2450 MHz时的复介电常数。纯沥青的损耗因子为0.001，而沥青混

合料的损耗因子则为0.006~0.034。所以，纯沥青利用微波是无法加热的，因为粗集料和细集料、矿粉是极性材料，能够吸收微波。

6.2 微波加热沥青混合料原理

沥青为非极性材料，基本不吸收微波；集料和矿粉为极性材料，吸收微波，温度升高，并将热量传给周围包裹的沥青。

在微波的厘米波段，微波能较好地穿入沥青路面底下几十厘米的深处，这就充分体现了微波加热的优点，促使被加热的路层中温度梯度变小，能使混合料被快速均匀地加热。相反，其他加热方法都只能由表及里地由热传导传递热量。由于沥青混合料的导热率较低，因此在路层中产生的温度梯度较大，这就导致了加热的不均匀性，而且时间过长，更有可能使表层焦化。

表1 沥青混合料的介电常数和损耗因子

材料	t/°C	f/MHz	ϵ_r	$\tan \delta$
纯沥青	20	3 000	2.5~2.8	0.001
闪长岩	20	2 450	5.6~7.0	0.018~0.036
含闪长岩	20	2 450	5.8	0.034
含石灰石	20	2 450	6.7	0.015
含石英岩	20	2 450	4.0	0.006



7 微波加热沥青混合料的优势和性能

7.1 微波加热沥青混合料的优势

在交通载荷与气候影响等多重因素作用下,随着时间的推移,高等级公路的路面状况和服务能力会逐渐地恶化。为了保持公路良好的使用性能并延长其使用寿命,需要在公路寿命周期的各个阶段分别采用不同的养护措施对其进行养护。目前市场上的沥青路面养护设备,其路面加热方式基本以红外或热风加热方式为主,它们在不同程度上都存在着不足。加热过程由路面表面向内部进行,由于温度梯度的缘故,会造成路面严重的烘烤损伤(表层沥青温度过高,易导致沥青焦化)、加热深度不足。作业过程中伴有大量有害气体产生,在很大程度上影响了路面的养护质量,制约了这项技术的进一步发展。

微波加热沥青混合料是一种全新的加热方式。沥青本身并不能吸收微波而产生热量,因此微波对沥青混合料的加热实质上是对集料的加热。集料温度上升后通过热传导的方式对沥青进行加热,从而达到整体加热沥青混合料的目的。这种加热方式不仅可以避免沥青由于被过度加热而出现的老化和加热不均的现象,还可以有效避免由于沥青组分挥发而造成的环境污染问题。

7.2 微波加热沥青混合料的性能

采用微波加热技术可以有效避免传统的红外与热风加热方式的不足。经过长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室的试验研究^[7-8],从沥青老化后的三大指标(延度、软化点、针入度)来看,微波加热方式导致沥青老化的程度明显低于红外加热方式。车辙试验的数据也表明,沥青混合料经微波加热后,抗高温变形能力增强。此外,采用微波方式加热的沥青混合料,其残留稳定度与冻融试验数据均优于采用红外方式加热的沥青混合料,可见在沥青混合料抗水损害方面微波加热方式优于红外加热方式。从低温劈裂试验结果来看,微波加热后的数据同样高于红外加热后的数据,说明采用微波方式加热的沥青混合料,其低温路用性能优于采用红外方式加热的沥青混合料。综合上述得出的结论是:微波加热后沥青混合料老化程度低,路用性能下降少,各项路用性能的指标都明显优于红外加热方式。

美的集团佛山市威特公路养护设备有限公司开发的微波路面养护设备首次将微波加热技术应用于高等级公路的沥青路面快速养护中,避免了传统红外与热风加热方式的不足,具有加热深度大、加热均匀、温度梯度小的特点,能够一次性加热路面至维修所需深度,沥青无老化、焦化现象,

不排除有毒气体,可以高效、快速地修复坑槽、松散、车辙等路面病害,并有效解决纵向弱接缝和横向弱界面等严重影响养护质量的技术问题,开创了公路养护的新纪元。

微波加热技术在公路筑养领域中的应用并不仅限于微波路面养护设备一项。事实上,这项技术在该领域中的应用还有很多,诸如旧沥青回收料的厂拌热再生、北方高寒地区冬季道路除雪除冰、常年冻土地区土石方施工、水泥路面“白改黑”等等。

8 结语

微波作为非通信能源,其应用领域是十分广泛的。应该说每一个应用领域都有可能形成一项产业,而且是更新传统技术的新产业。但是,几十年来除了家用微波炉、橡胶微波硫化、微波等离子体快速制备光纤等屈指可数的领域外,很少有像微波通信产品那样巨大的产业。

微波在中国的公路养护领域的技术应用和发展前景广阔。随着微波加热技术的优点被越来越多的公路养护单位所接受和认可,微波应用于路面养护在中国公路路面养护机械市场的前景将不可限量。

参考文献:

- [1] 张兆镗.微波电子管原理[M].北京:国防工业出版社,1981.
- [2] 张兆镗,钟若青.微波加热技术基础[M].北京:电子工业出版社,1988.
- [3] 杨祥林,张兆镗,张祖舜.微波器件原理[M].北京:电子工业出版社,1995.
- [4] 张兆镗,季天仁.微波炉中西餐制作大全[M].成都:四川科技出版社,1999.
- [5] 刘岐山.微波能应用[M].北京:电子工业出版社,1990.
- [6] 马如宏.微波加热技术在沥青路面现场维修中的应用[J].盐城工学院学报,2002,15(4):38-40.
- [7] 张青哲,贾国华,王亚兵.微波加热技术在沥青加热系统中的应用初探[J].筑路机械与施工机械化,2006,23(1):5-7.
- [8] 高子渝,焦生杰.微波加热旧沥青混合料的应用研究[J].筑路机械与施工机械化,2006,23(10):29-31.