

21世纪纺织品新进展丛书

# 红外辐射与纺织品

姜 怀 胡守忠 孙 熊 林兰天 等编著



21 世纪中国纺织材料原创新技术推广佳作

21 世纪纺织品新进展丛书

# 红外辐射与纺织品

姜 怀 胡守忠 孙 熊 林兰天 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

全书系统介绍了红外辐射、红外技术在纺织科研、功能纺织材料开发、生产设备更新方面的实际应用。本书内容涉及基本原理、功能构成机制、生产工艺、性能评价等理论知识和技术探讨；关于材料介绍了远红外辐射材料、红外隐身涂料、单功能纺织材料和多功能复合纺织材料；产品涵盖常用产品、医疗用产品、产业用产品和军用产品；科研仪器包括红外光谱仪、红外辐射测试仪、红外图像仪和灰度测试仪、红外测试仪等。

本书可供纺织行业领导、企业主管以及从事纺织产品开发、生产、应用的工程技术人员和科研人员阅读参考；亦可作为纺织高等院校的教学参考书；还可供关心纺织行业发展、应用功能的研究人员、商贸人员和从事纺织品感兴趣的人员阅读参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

红外辐射与纺织品/姜怀等编著. —北京: 化学工业出版社, 2016. 4  
(21 世纪纺织品新进展丛书)  
ISBN 978-7-122-26277-6

I. ①红… II. ①姜… III. ①红外辐射-应用-纺织品  
IV. ①TS106

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 027851 号

责任编辑: 张彦  
责任校对: 王静

文字编辑: 陈雨  
装帧设计: 张辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 30 字数 767 千字 2016 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 138.00 元

版权所有 违者必究



当今世界科技发展突飞猛进，创新与创造日新月异，科技在综合国力竞争中的地位更加突出。我国是纺织大国，纺织工业已成为国民经济重要的支柱产业之一，并在全世界占有重要一席。但我国还不是纺织强国，所生产的纺织品主要集中在劳动密集型、较低附加值的服用类产品。近年来，各级政府越来越重视纺织新材料产业的发展，国家科技中长期发展纲要，国家“十三五”规划、纺织工业协会“十二五”科技发展纲要及上海市“推进高新产业化”规划中，均多次明确提出了大力发展我国纺织新材料产业的重要意义，并对发展我国纺织品的方向、目标、措施提出了具体要求。上海纺织科技人员决心与时俱进、继往开来，以更大的事业心和责任感，积极投入到纺织工业科技进步的宏伟事业中去，创先争优，勇做弄潮儿！

上海工程技术大学坚持走产学研三结合道路，组织有关教授专家撰写 21 世纪纺织品新进展丛书，2013 年 1 月由化学工业出版社出版发行了《功能纺织品开发与应用》和《智能纺织品开发与应用》，两书获得纺织界广泛好评。在此基础上，我校再牵头组织新的编委会，聚上海纺织界科技学术精英，集纺织开拓创新成果，撰写《红外辐射与纺织品》。

红外辐射 (infra-red radiation) 是一种不可见光，其本质是热辐射。一个炽热的物体向外辐射的能量大部分是通过红外线辐射。它的温度越高，辐射红外线越多，辐射的能量就越强。而且红外线被物体吸收时，也可以显著地转变为热能。红外辐射与所有电磁波一样，是以波的形式在空间以直线传播的。

人类对红外技术的研究在日益深入，并在各行各业中广泛应用。红外辐射与纺织材料密切相关。①红外辐射无处不在，人体表面温度大约 300K，辐射波长约为  $4.3\sim 41\mu\text{m}$ ，峰值约  $9.5\mu\text{m}$ ，人体与环境壁面的辐射换热遵循 Stefan-Boltzmann 定律。人体皮肤的辐射系数  $\epsilon\approx 1.0$ ，大多数服装的辐射系数  $\epsilon\approx 0.95$ ，着装人体外表面的辐射系数平均值为 0.97。当人体表面温度高于环境的温度时，热量会以辐射的形式从人体传给环境；反之，当环境温度高于人体表面温度时，热量将由环境辐射给人体；当两者温度相当时，辐射仍在进行，人体辐射失热与辐射得热平衡。由此可知，红外辐射与纺织服装的热湿舒适性密切相关。物理散热方式有传导、对流、蒸发和辐射四种。根据不同情况，着衣人体每天通过辐射散发的热量变化极大，除夏季以外，一般气候下人平均日辐射散发  $4184\sim 6276\text{J}$  的热，占人体总散热的  $40\%\sim 60\%$ 。丹麦学者 P. O. Fanger 教授提出的热舒适理论及热舒适方程是对热环境研究的重要贡献，获得国际的公认。这不仅在理论上获得了重大进展，在实践上形成了完善的热舒适环境的供热通风和空气调节技术。依据热舒适方程绘制的热舒适图，可为服装设计师提供服装设计的卫生学依据。②远红外保暖、保健纺织品的开发方兴未艾，它是在纤维中加入既能吸收又能辐射不同波长的远红外线的添加剂，而制得一种新功能材料。该材料制成的服装既能吸收又能辐射远红外热，除具有保暖功效，还具有活化人体细胞组织、促进血液循环及抑菌防臭的功效。远红外纤维经混纺、热黏合或针刺可制成各种规格的保暖和保健制品。

③随着红外探测器的出现,视觉隐身纺织材料已失去原有作用,进而出现以减弱织物与周围环境红外辐射特征性为目的的红外隐身纺织材料。目前常用的红外隐身纺织品主要是通过防红外探测涂层制成的,也可以通过染色方法来获得红外隐身效果。红外隐身材料有红外隐身涂料、低发射率薄膜、宽频谱兼容热隐身材料、红外与激光复合隐身材料等。④红外烘干技术是通过燃气器的热能或电力器的电能转化为红外辐射能,利用红外的热效,采用红外照射方式去除织物中的水分,或用来烘干织物上的浸渍物(如整理剂、浆料等)。红外烘干设备小,辅助设备更少,且安全、卫生,还提高生产效率。⑤红外技术在纺织科技中有着广泛的应用前景。红外辐射计可用于辐射测量;热成像系统可产生整个目标红外辐射的分布图像;搜索跟踪系统可确定红外目标的空间位置并对它的运动进行跟踪;红外光谱仪用 $10000\sim 100\text{cm}^{-1}$ 范围内的红外辐射照射样,样品吸收能量并转化成分子振动能,这样通过样品的红外辐射在一定范围内发生吸收,产生吸收峰(又叫吸收谱带)而得到红外光谱。红外光谱中的吸收谱带都对应着分子和分子中各基团的振动形式,吸收谱带数目、位置及强度是判断每一个分子结构的最主要依据,有助于对混纺物进行详细分析;对纤维的结晶度、晶形、大分子链结构、取向等的研究;对纤维的化学改性、光降解、热降解与氧化、织物热解和燃烧等的研究。

本书吸收近年来国内外的研究成果,结合作者们从事教学、科研、实践中所积累的经验,以当前研究、生产和应用的功能纤维和制品、新工艺新技术为实例,在前人编著的红外技术与纺织材料等科普书的基础上进行拓展、深化、充实和提高。编撰成书,以飨读者。全书有如下特色。

1. 宣传贯彻“以人为本、全面协调可持续发展”的科学发展观,倡导科学、文明、健康的生活方式,传播节能、降耗、循环经济的观念和知识。详细介绍纺织品的卫生、环保、安全及防护性。

2. 写作中反映红外技术在纺织材料产品开发、新工艺新技术中的热点和前瞻性的课题,阐述红外线在纺织材料中的传输规律、功能(保暖、保健、隐身等)形成机理、加工方法和质量控制,推导单层或多层(薄层或纤维层)中的红外反射、吸收、散射和透射的计算公式,分析讨论纺织材料影响红外辐射的因素、在红外辐射中含水纺织材料的烘干规律,以及在不同工序中应用,红外检测仪器在纺织中实际应用。

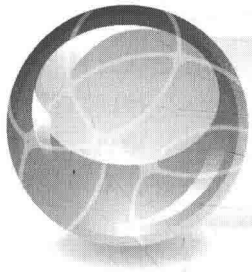
3. 写作符合图书编辑出版规范化的要求。努力在原创性上下功夫,力求有所创新,具有一定的创意和启迪性,能起到高新科技推广应用的效果。全书文字通顺流畅、图文并茂,理论分析严密正确,计算数据可靠无误。

4. 本书是原创性的纺织科技专著,充分反映了红外辐射在纺织科研、纺织材料和纺织品开发与应用上的新成果。系统阐述研究发展概况、基本原理、生产工艺和产品性能评价等理论知识和技术问题,纺织加工新技术中的热点和前瞻性问题,注重知识体系的科学性、系统性和实用性。对功能性纺织品的设计、开发生产、应用方面均有积极的推广作用,对国民经济建设具有一定的作用。

企盼本书的出版有助于高新纺织品材料在我国进一步的拓展和成熟!

上海工程技术大学老教授协会

2016年4月



# 前言

工程中经常遇到的温度范围内，热辐射能量主要集中在波长  $0.1\sim 1000\mu\text{m}$ ，可分为紫外、可见光和红外波段。真空中， $0.1\sim 0.38\mu\text{m}$  为紫外波段， $0.38\sim 0.76\mu\text{m}$  为可见光波段， $0.76\sim 1000\mu\text{m}$  为红外波段。上述分界，并没有严格统一的规定。热辐射涵盖的波段范围比红外辐射更广。

热辐射是热量传输三种方式（热传导、热对流、热辐射）之一，属于热学研究的范畴。而紫外、可见光、红外波段作为电磁波的一部分，具有相同的光学性能，广泛用于遥测和通信领域，属于光学研究的范畴。近年来，随着工业发展，尤其在国防科技中出现很多伴随传热过程的信息传输问题，如红外目标特性、红外探测与遥感、红外成像制导、红外隐身等，需要将辐射传热过程与红外传输过程结合起来。这两种传输过程的计算原理、方法基本一样。因此，在本书中，对“热辐射”“红外辐射”“光辐射”将不再严格区分。

人类对红外技术的研究日益深入，在各行各业中的应用日益广泛。红外辐射与纺织科研、纺织材料研发的高新技术加工等密切相关（见序中所述）。20世纪90年代以来我国研发的远红外纤维、远红外保健产品和功能复合化的产品，其质量已经处于国际先进水平。

本书共十章。第一章简要介绍了时变电磁电场与电磁波，电磁波波动方程与电磁波谱，与热辐射有关的物理量及有关术语，黑体辐射定理，物体在一定温度下的辐出度和辐照度，实际物体的辐射与吸收，分析了太阳热辐射与天文辐射等内容。第二章讨论了红外辐射在纺织材料中的传播，红外辐射在单层和多层织物及理想织物中的反射、透射和吸收行为，多层理论织物叠合时的反射、透射和吸收行为，并导出一系列红外辐射传播的计算公式，并对红外辐射在纺织材料中传播进行了实验研究。第三章讨论了纺织纤维在太阳光和红外线照射下的光学性质，纤维的折射率和高分子折射率估算，纤维对光的吸收、散射和不透明性；纤维中反射光、折射光与入射光振幅、相位和能量的关系，纤维的光吸收、光致发光、光降解和光老化，纤维分子结构及性能的红外光谱表征。第四章讨论了织物在太阳光和红外光照射下的光学性质，织物光泽的概念，影响织物光泽的因素，论述了织物光泽的测量和表示方法，织物变角光度曲线的测定与分析，织物的红外辐射特性，织物有效辐射系数的测定，并论述了织物在红外辐射下和撤去红外源时的升温 and 降温规律。第五章讨论了纳米远红外材料的开发与应用，介绍了冬服保暖材料现状与发展前景，讨论了远红外纺织材料开发的思路、途径和方法，探讨了远红外材料的选择、结构性能、粉体技术，介绍了纳米远红外纤维、织物和医用保健纺织物的制备与应用，并对远红外絮的服用性能按人体功效学理论进行了对比分析和评价。第六章讨论了辐射传热与服装穿着舒适性的关系，阐述了服装穿着舒适性的内涵与评价方法，人-服装-环境系统的热交换和热舒适性的概念，探讨了人体与环境的辐射热交换，举例说明坐姿人在室内与壁面间的辐射换热与计算方法，推导出人与环境的热平衡与舒适方程，论述了着装条件下的热舒适问题，并通过热舒适线圈结合实例进行计算分析论证。第七章介绍了高温防护服的概念、原理、性能、分类及国内外研究状况。还阐述了几种高温

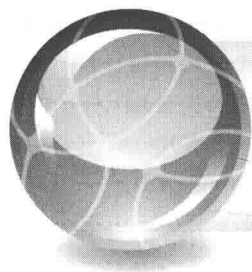
防护服的功能与分类，重点介绍五种高温防护材料、三种无机耐高温纤维及五种热防护材料的研究进展。评述了高温防护服装的加工技术。最后说明了热防护纺织品的性能测试与评价。第八章讨论了红外及微波在纺织工业加工中的应用，介绍了红外辐射器的构造与进展，分析了含水纤维在红外辐射中的干燥规律，介绍了红外加热技术在制丝、浆纱、染色、后整理加工、织物热定型、毛巾纱干燥以及红外反射隔热织物上的应用，分析了红外技术应用中存在的问题，最后介绍了微波技术在纺织工业中的具体应用实例。第九章介绍和讨论了红外辐射测试仪器的应用，包括红外光谱仪色散型红外光谱仪、傅里叶变换红外光谱仪的结构与性能，系统介绍了红外光谱法实验技术，红外吸收光谱的具体应用实例，分析了热释电型探测器、集成温度传感器的类型、结构和典型应用实例，红外测温仪在纺织工业和科研中的实际应用，并讨论分析了红外成像仪工作原理、结构和性能要求，介绍了通风服个体调温效果测试评价中的应用实例。第十章介绍了隐身技术的基本知识、可见光隐身的原理和方法、伪装材料和伪装遮蔽及红外隐身的原理与方法、各类目标的红外辐射特征、红外探测、跟踪目标的最大距离，红外隐身的理论依据；红外隐身用热隐身涂料、低发射率薄膜和红外隐身复合材料，讨论分析了激光隐身、红外/激光隐身原理和材料，并对微波雷达和激光雷达的工作原理、作用距离方程式推算，激光雷达测距，雷达隐身技术与反隐身技术等作了详细介绍，并对雷达隐身材料吸波的物理机制及影响其吸波性能的因素进行讨论，最后简单介绍了雷达隐身吸波材料的现状和未来。

本书第一章由姜怀、胡守忠和周详撰写，第二章由姜怀、胡守忠、丁颖撰写，第三章由姜怀、孙熊、白燕、许颖琦撰写，第四章由姜怀、孙熊、夏蕾撰写，第五章由姜怀、万九龙、翁晨曦撰写，第六章由孙熊、姜怀、许颖琦撰写，第七章由胡守忠、辛三法撰写，第八章由王爱兵、杜卫平撰写，第九章由刘晓霞、姜怀、孙熊撰写，第十章由姜怀、林兰天撰写。全书由姜怀、孙熊统稿审定，并得到刘晓霞、丁颖、白燕、夏蕾、翁晨曦的协助。本书编撰过程中多蒙《上海化工》杂志主编、原上海工程技术大学校长、二级教授徐子成的精心指导以及协会的大力支持，并荣获上海工程技术大学学术著作出版专项资助，我们谨表敬意和谢忱。

由于笔者水平有限，科技发展日新月异，编撰中难免疏漏和不当，敬请读者和专家教授不吝指教。不胜感谢！

编著者

2016年4月



# 目 录

第一章 电磁波和热辐射 .....	1
第一节 时变电磁场与电磁波 .....	2
一、电磁波在自由空间传播的普遍特性 .....	3
二、电磁波的能量 .....	4
三、时变电磁场遵循的基本方程 .....	4
四、时变电磁波的波动方程 .....	6
五、电磁波谱 .....	7
第二节 热辐射 .....	11
一、与热辐射有关的几个物理量 .....	12
二、物体在一定温度 $T$ 下的辐出度和辐照度 .....	14
三、辐射能的反射吸收与透射 .....	15
四、基尔霍夫定律 .....	16
五、黑体辐射定律 .....	17
六、实际物体的辐射和吸收 .....	20
第三节 太阳热辐射 .....	21
一、太阳的辐射波谱 .....	22
二、天文辐射 .....	22
三、各种辐射能达到地球表面的量 .....	24
参考文献 .....	26
第二章 红外辐射在纺织材料中的传播 .....	27
第一节 光在两介质分界面上的反射和折射 .....	27
一、反射定律和折射定律 .....	28
二、反射光、折射光与入射光振幅的位相关系 .....	29
三、S波和P波的反射率和透射率 .....	30
四、入射光是自然光时的情形 .....	30
五、光波在两介质界面 ( $n_1$ 和 $n_2$ ) 上反射和折射的两种情况 .....	31
第二节 红外辐射在单层理想织物中的反射、透射和吸收行为 .....	33
一、单层理想织物上、下界面上各个作用点上入射、反射、透射强度计算 .....	35
二、单层理想织物的总反射、总透射和织物总吸收强度的计算 .....	36
三、单层理想织物总反射、总透射和总吸收率的计算 .....	36
第三节 红外辐射在多层理想层压织物中的反射、透射和吸收行为 .....	37
一、单层介质的光学行为 .....	37
二、层压织物总反射、总透射和总吸收率的计算问题 .....	39



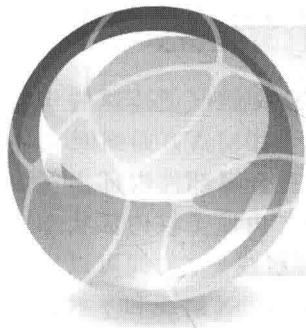
第四节 多层理想织物叠合时的反射、透射和吸收行为 .....	39
一、两层织物之间的空气薄层中的内反射现象 .....	40
二、 $m$ 层叠合织物中各层织物的简化模型的建立 .....	40
三、叠合织物的总反射, 总透射和总吸收率的计算问题 .....	41
第五节 红外辐射在纺材中的反射、透射和吸收的实验研究 .....	43
一、试样选择 .....	43
二、红外辐射测试原理 .....	43
三、红外辐射测试装置 .....	50
四、红外辐射在织物表面反射的测试分析 .....	51
五、红外辐射在织物透射的测试分析 .....	65
六、红外辐射被织物吸收的测试 .....	71
第六节 单涂层膜的反射与透射 .....	74
一、单涂层膜反射、透射的有关计算 .....	74
二、红外伪装涂料在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的红外发射率 .....	77
参考文献 .....	80
第三章 纺织纤维在太阳光红外线照射下的光学性质 .....	82
第一节 纺织纤维光学性质综述 .....	84
一、光路与纤维的相互关系 .....	85
二、纤维的折射率和高分子折射率估算 .....	86
三、纤维的反射率和光子与固体介质的相互作用 .....	88
四、纤维对光的吸收, 散射和不透明性 .....	91
第二节 纺织纤维中反射光、折射光与入射光振幅、相位和能量的关系 .....	94
一、 $s$ 波的反射系数和透射系数 .....	95
二、 $p$ 波的反射系数和透射系数 .....	95
三、相对折射率 $n$ 和入射角 $\theta_1$ 对 $r_s$ 、 $r_p$ 、 $t_s$ 、 $t_p$ 的影响 .....	96
四、辐射能 .....	97
五、入射波、反射波和折射波的能量关系 .....	98
第三节 纤维在太阳光照射下的光吸收、光致发光、光降解和光老化 .....	100
一、纤维对光的吸收 .....	100
二、纤维的光致发光现象 .....	106
三、纤维的光降解 .....	110
四、聚合物老化, 防老化和稳定 .....	115
第四节 纤维分子结构及性能的红外光谱表征 .....	120
一、红外光谱技术的一般概念 .....	120
二、纤维结晶性的红外表征 .....	121
三、纤维的二向色性及其红外表征 .....	127
四、纤维表面结构与性质的红外表征 .....	131
参考文献 .....	136
第四章 织物在太阳光和红外线照射下的光学性质 .....	138
第一节 织物光泽的综述 .....	139

一、纺织品光泽的概念 .....	139
二、影响织物光泽的因素 .....	140
三、织物光泽的视觉评定 .....	142
第二节 织物光泽的测量和表示方法 .....	143
一、二次元（或称二维）变角光度测试法 .....	144
二、三次元（或称三维）变角光度测试法 .....	147
三、试样回转测试法 .....	149
四、偏振光测试法 .....	150
五、显微光泽度方法 .....	157
六、图像分析方法 .....	158
七、白度法 .....	159
第三节 织物变角光度曲线的测定和分析 .....	161
一、织物变角光度曲线的测定方法与选用试样 .....	161
二、颜色对变角光度曲线的影响 .....	161
三、测试条件对变角光度曲线形状的影响 .....	167
第四节 织物的红外辐射特性 .....	172
一、引言 .....	172
二、织物红外线透过率的测试与分析 .....	173
三、织物光谱发射率的测试与分析 .....	177
第五节 红外辐射下织物吸收升温规律 .....	180
一、引言 .....	180
二、织物有效辐射系数的测试 .....	181
三、织物在红外辐照下和撤去红外源时的升温和降温规律 .....	186
参考文献 .....	189
第五章 纳米远红外纺织材料的开发与应用 .....	192
第一节 冬服保暖材料的发展现状与前景 .....	192
一、保暖材料应具备的条件 .....	192
二、保暖材料发展的现状 .....	193
三、保暖材料的发展前景 .....	196
第二节 远红外纺织材料开发的思路、途径和方法 .....	197
一、人体-服装-环境系统各自的热辐射 .....	197
二、远红外辐照下“人体-服装-环境”系统间的相互作用 .....	200
第三节 远红外材料的选择、结构性能、粉体和配比 .....	210
一、红外材料的分类、特性与用途 .....	210
二、远红外陶瓷材料的选择依据 .....	213
三、常用远红外陶瓷材料的化学组成与性能 .....	214
四、远红外纳米化后的特性 .....	219
五、微纳米粉体技术 .....	223
六、影响远红外材料性能的因素 .....	225
七、纳米粉体应用中的问题与解决办法 .....	230
第四节 纳米远红外纤维制备 .....	232

一、纳米远红外天然纤维的制备 .....	232
二、纳米远红外合成纤维的制备 .....	234
三、纳米远红外纤维的产品性能和应用 .....	243
第五节 纳米远红外织物的制备 .....	244
一、纳米远红外织物的涂层法 .....	244
二、远红外织物的浸轧法 .....	245
第六节 医用保健纳米远红外纺织品的应用 .....	245
一、纳米远红外纺织品的功能 .....	245
二、纳米远红外纺织品在医用保健方面的应用 .....	246
第七节 远红外絮片的服用性能 .....	247
一、远红外纤维絮片与普通保暖材料的对比试验 .....	247
二、冬装舒适性人体功效学评价 .....	251
参考文献 .....	255
第六章 辐射传热与服装穿着热舒适性的关系 .....	257
第一节 引言 .....	257
一、服装穿着舒适性的内涵与评价方法 .....	257
二、人-服装-环境系统的热交换和热舒适性概念 .....	258
第二节 人体与环境间的辐射热交换 .....	260
一、人体与环境辐射热交换中的几个重要物理量 .....	260
二、人在室内与壁面间的辐射换热 .....	266
三、低温辐射时的环境平均温度的计算和估算 .....	279
四、高温辐射时的环境平均温度的计算 .....	281
第三节 人与环境的热平衡与舒适方程式 .....	281
一、描述人与环境间热交换的热平衡方程式 .....	281
二、着装条件下的热舒适性问题 .....	290
参考文献 .....	303
第七章 高温防护服开发与运用 .....	305
第一节 概述 .....	305
一、高温防护服的概念、性能要求和分类 .....	305
二、高温防护服的原理 .....	306
三、国内外研究状况 .....	308
第二节 高温防护服 .....	312
一、高温防护服基本要求 .....	312
二、几种高温防护服 .....	313
第三节 高温防护服的加工技术 .....	317
一、高温防护材料 .....	317
二、高温防护服的加工技术 .....	323
第四节 热防护纺织品性能的测试与评价 .....	327
一、热防护性能的测试与评价 .....	327
二、其他相关性能的测试与评价 .....	331

参考文献 .....	331
<b>第八章 红外及微波在纺织加工中的应用</b> .....	332
<b>第一节 红外辐射器的构造及进展</b> .....	333
一、燃气红外辐射器 .....	333
二、电力红外辐射器 .....	333
<b>第二节 含水纺材在红外辐射中的干燥规律</b> .....	335
一、含水纺材在红外辐射中的干燥实践 .....	335
二、含水纺材在红外辐射中的干燥规律 .....	336
三、含水纺材在红外中的温升规律 .....	338
<b>第三节 红外辐射在纺织工业中的应用</b> .....	340
一、红外加热技术的应用情况及原则 .....	340
二、红外干燥在制丝工业中的应用 .....	342
三、红外在浆纱干燥中的应用 .....	348
四、红外在染色工艺上的应用 .....	349
五、红外在后整理加工中的应用 .....	361
六、红外在织物热定型上的应用 .....	363
七、红外在毛巾纱干燥上的应用 .....	364
八、红外反射隔热织物的应用 .....	365
九、红外技术应用中存在的问题 .....	365
<b>第四节 微波在纺织加工中的应用</b> .....	366
一、微波在淀粉变性上的应用 .....	366
二、微波在筒子纱线中的应用 .....	367
三、微波在麻业生产中的应用 .....	368
四、微波在毛条工业中的应用 .....	370
五、微波在前处理工业中的应用 .....	371
六、微波在染色工业中的应用 .....	374
七、微波在印花工业中的应用 .....	375
八、微波在后整理加工中的应用 .....	375
参考文献 .....	377
<b>第九章 红外辐射在测试仪器中的应用</b> .....	379
<b>第一节 红外光谱仪</b> .....	379
一、红外光谱仪的发展 .....	379
二、色散型红外光谱仪 .....	379
三、傅里叶变换红外光谱仪 .....	382
<b>第二节 红外光谱法实验技术</b> .....	384
一、制样时要注意的问题 .....	384
二、固体样品的制样方法 .....	384
三、液体样品的制样方法 .....	385
四、气体样品的制样方法 .....	386
<b>第三节 红外光谱图的解析</b> .....	386

一、红外光谱的特征区与指纹区 .....	386
二、红外解析的三要素 .....	386
三、红外光谱的解析步骤 .....	386
四、例题分析 .....	387
第四节 红外吸收光谱的应用 .....	390
一、定性分析 .....	390
二、定量分析 .....	394
三、红外光谱在纺织工业中的应用 .....	395
四、红外光谱在聚合物结构研究中的应用 .....	404
五、红外光谱在表面活性剂的分析中的应用 .....	407
第五节 红外探测器及其应用 .....	409
一、红外探测器简介 .....	409
二、热释电型红外探测器 .....	410
三、集成温度传感器 .....	413
四、红外测温仪在纺织中的应用 .....	415
第六节 红外成像仪及其应用 .....	422
一、红外成像仪简介 .....	422
二、红外成像仪被动式成像的原理与应用 .....	425
三、在通风服个体调温效果测试评价中的应用 .....	429
参考文献 .....	432
第十章 红外隐身等技术及其隐身材料 .....	433
第一节 隐身技术概述 .....	433
一、隐身技术定义 .....	433
二、隐身材料简介 .....	435
第二节 可见光隐身与隐身材料 .....	435
一、可见光隐身原理和方法 .....	435
二、伪装涂料 .....	436
三、伪装遮障 .....	437
第三节 红外隐身与隐身材料 .....	439
一、红外隐身原理和方法 .....	439
二、红外隐身材料 .....	443
第四节 激光隐身、红外/激光隐身与隐身材料 .....	448
一、激光与激光探测器 .....	448
二、红外/激光隐身材料 .....	451
第五节 雷达隐身与隐身材料 .....	454
一、微波雷达和激光雷达 .....	454
二、雷达隐身技术与反隐身技术 .....	457
三、雷达吸波隐身材料 .....	458
四、雷达隐身吸波材料的现状与展望 .....	464
参考文献 .....	467



# 第一章 电磁波和热辐射

由赫兹实验开始，无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 $\gamma$ 射线等都逐渐被统一在电磁波这个概念下，其共性是在真空中的传播速度  $c = 2.9979246 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，其值与光在真空中的传播速度正好相同。整个电磁波谱波长为  $10^{-12} \sim 10^6 \text{ cm}$ 。习惯上，电磁波按波长或频率顺序排列就形成了电磁波谱。电磁波谱是人类的重要资源，现在人们已经能够充分将电磁波谱的各个波段应用于科学技术及生产的很多领域。

电磁波在本质上虽然相同，但不同波长范围内的电磁波的产生方法以及与物质之间的相互作用却各不相同，因此具有不同的用途。

由炽热物体、气体放电或其他光源激发分子或原子等微观客体所产生的电磁辐射，按波长范围的不同，可分为红外线（ $0.75 \sim 1000 \mu\text{m}$ ）、可见光（ $760 \sim 400 \text{ nm}$ ）和紫外线（ $5 \sim 400 \text{ nm}$ ）。红外线包括三个波段：近红外区（ $0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ）、中红外区（ $2.5 \sim 25 \mu\text{m}$ ）和远红外区（ $25 \sim 1000 \mu\text{m}$ ）。红外线的量子能量只有  $1.5 \text{ eV}$  左右，不能对生物组织形成电离和光化学反应，它的主要作用是热效应。红外线是不可见光，可用于红外雷达、红外照相和夜视仪上。红外隐身材料是针对热像仪而研制的隐身材料，主要集中于红外涂层材料。随着红外和光电的探测及制导系统的迅速发展，既要求飞行器具有雷达波的隐身功能，同时也必须具有红外隐身效果。将具有良好的微波吸收特性的半导体材料与红外隐身涂料进行合理的复合就能获得宽频兼容的微波的雷达波、红外多功能的隐身材料。由于物质的红外吸收光谱与物质内部的分子结构及其运动密切相关，因此，利用红外吸收光谱仪测得物质的吸收光谱（峰的位置、强度和形状），提供物质中功能团或者化学键的特征振动频率，来研究高聚物的分子结构，确定高聚物的构型、构象、链结构、结晶等，此外还可以分析高聚物材料的添加剂、残留单体、填料、增塑剂。由于红外线具有显著的热效应，故可以用来保暖，红外辐射可以在纺织材料中吸收升温，可应用于对含水纺织材料的干燥和热定型以及红外烘干等。可见光可为人眼所感知，光的颜色取决于波长，而白光是各种颜色的光混合的结果。人们之所以能够认识和判断世界万物，除了利用触觉以外，主要是人们通过视觉器官看见大千世界中万物的形，一切物体的形都是由规定的界限具有不同色彩和不同明度的面积来表现的。紫外线的波长比可见光短，不能引起视觉反应，一般可分为四个波段：近紫外线（UV-A）、远紫外线（UV-B）、超短紫外线（UV-C）和真空紫外线。其波长范围为  $200 \sim 4000 \text{ \AA}$ ，量子能量  $3 \sim 130 \text{ eV}$ ，而短波端（波长  $< 1000 \text{ \AA}$ ）量子能量达到足以使生物组织产生电离程度，故属于电离辐射性质；而波长  $1000 \text{ \AA}$  以上部分则一般不能使细胞组织产生电离，真空部分（波长为  $1000 \sim 1900 \text{ \AA}$ ）可被空气和水吸收，远紫外部分（波长为  $1900 \sim 3000 \text{ \AA}$ ）大部分可被生物分子强烈吸收，近紫外部分（波长为  $3000 \sim 3800 \text{ \AA}$ ）可被某些生物分子所吸收。来自太阳的紫外线几乎被大气中的臭氧完全吸收，臭氧保护着地球上的生命，少量透过大气的紫外线会晒黑皮肤或使进行日光浴的人产生晒斑。紫外线对人体的伤害主要是伤害眼的眼角膜



和人体皮肤。紫外线能引起化学反应和荧光效应，医学上常用紫外线杀菌，农业上可用紫外线诱杀害虫。

X射线是一种波长为 $0.04\sim 5\text{nm}$ ，由原子内层轨道电子跃迁或高能电子减速时与物质的能量交换作用产生的电磁波。X射线的光量子能量约为 $0.01\sim 10\text{MeV}$ ，是可见光的5000倍。它的能量很大，具有很强的穿透能力，是医疗透视、检查金属部件内部损伤和分析物质晶体结构的有力工具。 $\gamma$ 射线是一种波长在 $0.04\text{nm}$ 以下，由原子核内部状态变化所产生的电磁辐射。 $\gamma$ 射线比X射线的能量高，穿透力也强于X射线。 $\gamma$ 射线可以用来进行放射性实验，产生高能粒子，还可以借助它研究天体，认识宇宙。X射线和 $\gamma$ 射线通过三种方式，即光电效应、康普顿效应、电子对效应与机体物质相互作用，转移其能量。利用电离辐射诱发材料物理、生物和化学变化从而达到加工改性的目的。与常规的加工方式相比，具有节能和无环境污染的优点，具有很好的经济和社会效益。辐射加工的范围很广，如食品辐射保鲜无菌、一次性医用器件的辐射消毒、工业三废的辐射净化、生物医学和生物工程应用的辐射技术等。但X射线和 $\gamma$ 射线在给人类带来好处的同时也会给人类带来危害，它们能够损害人体组织和器官，给人的生命带来严重威胁，为保护此类工作人员的健康，防止受到粒子辐射和电磁波的辐射，开发研制生产有效的防护纺织品是具有重要意义的。

本书着重讨论“红外技术与高分子复合材料”。首先，需要对时变电磁场、时变电磁场遵循的基本方程、连续方程、结构方程时变电磁波的波动方程、电磁波谱、电磁波传播特性等基本概念和基础知识有所了解。再进一步着重讨论电磁波谱中红外线频段（或波段），掌握、熟悉与辐射有关的物理量的意义、测量用语、物体在一定温度下的辐出度和辐照度、基尔霍夫定律、黑体辐射定律、维恩位移定律、兰贝特定律和实际物体的辐射和吸收等知识。最后再去讨论太阳辐射热，熟悉太阳的辐射波谱，天文辐射的日地距离、太阳高度、白昼温度，天气气候的不同季节每一天的太阳辐射量，不同纬度的太阳辐射变化，地球上的气候带划分等有关知识。

## 第一节 时变电磁场与电磁波

不随时间变化的电场和磁场称为恒定场，随着时间变化的电场和磁场称为时变场。在恒定场中，电场和磁场是相互独立、不互相转换能量的。在时变场中，电场和磁场不再像恒定场那样相互独立，而是相互依赖，互为其源，相互转换。在空间，一旦时变电流产生时变磁场，时变磁场就会产生时变电场，时变电场又会产生时变磁场……，这样时变电场和时变磁场相互激发，交替产生，闭合的电场线和磁场线就会像链条的环节一样一个个地套接下去，在空间中传播开来，从而形成了电磁波（electromagnetic wave）。

电磁波是一种典型的时变电磁场。按电磁波等相位和等振幅面的形状不同，可以区分为球面波、柱面波和平面电磁波。平面电磁波是指等相位面和等振幅面都是平面的电磁波。在实际中，在距离电磁波源很远的观察点附近的小范围，电磁波的等相位面就可以近似看成是平面。

平面电磁波具有一般电磁波的共性。它可分为均匀平面波（是指等相位平面和等振幅平面重合的平面波）和非均匀平面波（是指等相位平面和等振幅平面不重合的平面波）。前者在等相位面上不仅相位相同，振幅也相同，后者在等相位面上相位相同而振幅则不相同。

# 一、电磁波在自由空间传播的普遍特性

## 1. 电磁波在自由空间的传播速度

电磁波在真空中的传播速度等于真空中的光速  $c$  (m/s), 而  $c$  与真空介电常数  $\epsilon_0$  和真空磁导率  $\mu_0$  的关系为:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-1)$$

已知真空介电常数  $\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \approx 8.85 \times 10^{-12}$  F/m, 真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m, 那么, 真空中的光速为:

$$c = \frac{1}{\sqrt{8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \times 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

电磁波在自由空间的传播速度  $v$  (m/s), 就是该电磁波传播的相位速度 (简称相速  $v_p$ ), 即:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (1-2)$$

式中,  $v$  为电磁波在介质中的传播速度, m/s;  $\epsilon$  为介质中的介电常数, F/m;  $\mu$  为介质的磁导率, H/m。

电磁波在一般介质中的相速  $v_p$  和自由空间中的光速的关系式为:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1-3)$$

式中,  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$  称为相对介电常数;  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$  称为相对磁导率。当  $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$  时, 即在自由空间 (真空) 中,  $v_p = c$ ; 对于  $\epsilon_r \geq 1$ ,  $\mu_r \approx 1$  的一般介质,  $v_p \leq c$ 。

## 2. 电磁辐射是一种波, 而且是横波

电磁辐射由电场分量  $E$  和电磁场分量  $H$  组成。这两个分量彼此互相垂直, 且都垂直于波的传播方向  $v$ , 所以电磁波是横波 (如图 1-1 所示),  $E$ 、 $H$ 、 $v$  三者互相垂直, 构成右手螺旋系。

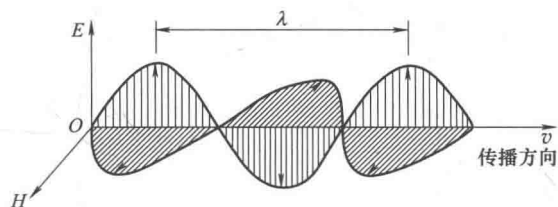


图 1-1 平面电磁波

$E$  和  $H$  只在各自所处的平面  $XOZ$ ,  $YOZ$  内振动的这一特性, 称为横波偏振性, 所以, 电磁波具有偏振性 (polarization)。

实验证明, 电磁波也有反射和折射的特性。所以电磁波在真空中的传播速度  $c$  与在介质中的传播速度  $v$  之比就是介质的折射率 (refractive index), 即:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1-4)$$

这就把介质的折射率  $n$  与介质的电磁学常量 ( $\epsilon_r$ 、 $\mu_r$ ) 联系起来。

$E$  和  $H$  同相位, 任何时候、任何场点电场强度  $E$  和磁场强度  $H$  都是同步变化的, 即同时达到极大值、极小值和零。

同一场点  $E$  值和  $H$  值成比例, 即:





$$\frac{E}{H} = \frac{\sqrt{\mu_0 \mu_r}}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1-5)$$

上述电磁波的性质都可以根据麦克斯韦方程推导出来。

## 二、电磁波的能量

电场和磁场都具有能量，凡有电磁波的传播，就有能量的传播，这种以电磁波形式传播出去的能量叫做辐射能。显然，辐射能的传播速度和方向就是电磁波的传播速度和方向。

人们采用能流密度  $S$  来表示波的强弱。电磁波的能量密度  $S$  是指在介质不吸收电磁能量的条件下单位时间内通过与波的传播方向垂直的单位截面的能量，即：

$$S = wv \quad (1-6)$$

式中， $v$  为电磁波在介质中的传播速度，m/s； $w$  为电磁波的能量密度，W/m<sup>2</sup>。

在时变电磁场中，电场和磁场同时存在，因此时变电磁场的能量密度  $w$  应同时包括电场能量密度  $w_e$  和磁场能量密度  $w_m$  两个部分，即：

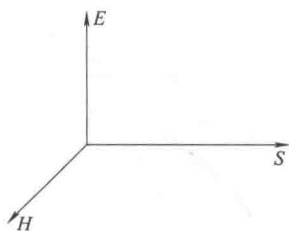
$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2}\epsilon E^2 + \frac{1}{2}\mu H^2 \quad (1-7)$$

式中， $E$  为电场强度，V/m； $H$  为磁场强度，A/m； $\epsilon$  为介质的介电常数，F/m； $\mu$  为介质的磁导率，H/m。于是，时变电磁场的能量密度为：

$$S = \frac{v}{2}(\epsilon E^2 + \mu H^2) \quad (1-8)$$

将式 (1-5) 的  $\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$  和式 (1-2) 的  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$  代入式 (1-8) 化简：

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} [(\sqrt{\epsilon}E)^2 + (\sqrt{\mu}H)^2] = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} (\sqrt{\epsilon}E\sqrt{\mu}H + \sqrt{\epsilon}E\sqrt{\mu}H) \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \times 2\sqrt{\epsilon\mu}EH \\ &= EH \end{aligned} \quad (1-9)$$



辐射能的传播方向就是电磁波的传播方向，由图 1-1 可知  $E$ 、 $H$  和  $S$  构成右手螺旋系，如图 1-2 所示，故式 (1-9) 可用矢量表示为：

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1-10)$$

式中， $\mathbf{S}$  为电磁波的能量密度矢量，也叫做坡印亭 (Poynting) 矢量或功率流矢量，它表示了能流密度的大小

图 1-2  $E$ 、 $H$ 、 $S$  组成右手螺旋系 和方向。

## 三、时变电磁场遵循的基本方程

在发现电磁波的过程中，英国人麦克斯韦 (Maxwell) 的理论研究和德国人赫兹 (Hertz) 的实验工作发挥了决定性的作用。麦克斯韦从英国人法拉第 (Faraday) 的力线思想中提炼出了电磁现象中最本质的电场和磁场概念，并用这两个概念改写了库仑定律、安培定律和法拉第电磁感应定律，引入了位移电流，最终完成了电磁理论的构建。

在时变电磁场中，场矢量随时间变化，电场与磁场不可分割地联系在一起，并服从麦克斯韦方程组 (Maxwell's equations)，其积分和微分的形式如下：