

中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集（中册）

二〇〇七

广州

中国工程热物理学会编



中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集（中册）



Chinese Society of Heat and Mass Transfer

2007 年 广州

传热传质学学术会议论文集(中册)目录

五. 辐射换热(续)

- 073333 灰渣的有效光学常数及辐射特性.....殷金英 刘林华(763)
- 073334 平面近场辐射的单色效应和偏振态研究.....
.....车志钊 张昊春 江 乐 谈和平(767)
- 073336 一种新型腔式吸热器的辐射性能研究...帅 永 王雁鸣 袁 远 谈和平(771)
- 073337 基于红外辐射特性的尾喷焰组分分析...王雁鸣 谈和平 帅 永 袁 远(775)
- 073338 复杂地表场景生成中太阳辐射模拟方法研究.....
.....卿恒新 帅 永 杜以强 谈和平(779)
- 073339 球形纳米粒子与半无限大介质间的近场辐射换热研究.....
.....江 乐 帅 永 车志钊 谈和平(784)
- 073392 小通道比下波瓣混合器红外辐射特性的数值研究.....
.....徐 亮 张靖周 单 勇(788)
- 073456 空间液滴辐射散热器传热研究综述.....
.....谈和平 甄 欠 易红亮 张昊春 罗剑峰(793)
- 073468 蛇红外视觉灵敏性的神经学机理.....肖 剑 刘 静(798)
- 073472 用神经网络方法计算辐射参数.....李卉荟 常海萍 金 峰(805)
- 073473 测量高温状态下难熔金属的复折射率.....
.....朱映山 P. Herve 常海萍 A. Sadou Julie Cedelle(811)

六. 微小尺度传热

- 073037 高热流作用下微通道内周期性射流研究.....刘国华 徐进良 张 伟(818)
- 073102 流体变物性对细矩形通道流动和传热的影响.....云和明 程 林 王立秋(824)
- 073130 粗糙微通道内流动与换热的 DSMC 模拟.....
.....王爱国 冯妍卉 林 林 张欣欣(828)
- 073189 高功率 LED 散热用微喷射流冷却系统的结构优化.....
.....罗小兵 杨江辉 甘志银 刘 胜(833)
- 073210 纳米颗粒对沸腾活化核心密度的影响.....帅美琴 施明恒(845)
- 073248 三角形微通道热沉的流动换热特性分析.....
.....肖春梅 陈永平 施明恒 吴嘉峰 张程宾(850)
- 073280 纳米通道内液体流动的分子动力学研究.....
.....向 恒 姜培学 刘其鑫 毛志方(854)
- 073291 热泳对微通道内颗粒分离运动影响的研究.....刘政显 陈振乾 施明恒(859)
- 073300 纳米碳管在强化 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 泡状吸收热质传递过程的作用.....
.....苏凤民 马学虎 陈嘉宾 王群昌 薄守石 陈红霞(864)
- 073309 光热反射技术测量表面下微尺度热结构.....布文峰 唐大伟 郑兴华(868)
- 073312 纳米碳管导热系数温度依存性的分子动力学模拟研究.....
.....李小波 唐大伟 张晓亮(872)
- 073314 应用飞秒激光泵浦--探测系统对金属纳米薄膜微尺度热输运过程的研究.....
.....韩 鹏 唐大伟 程光华 祝 捷 赵 卫(876)
- 073316 粗糙度对微细圆管内流动特性影响的摄动分析.....
.....张春平 唐大伟 韩 鹏 祝 捷(881)

- 073379 微纳气体流动中动量协调系数的分子动力学研究.....孙俊 李志信(887)
- 073381 纳米尺度气体滑动轴承的 DSMC 模拟.....兰旭东 李志信(892)
- 073385 纳米流体导热性能的研究进展及影响因素.....冯剑超 曲伟 李玉华(897)
- 073407 单壁碳纳米管热导率的分子动力学模拟.....侯泉文 曹炳阳(901)
- 073412 内置式微型电液动力泵的研究.....于翻 孙翠霞 俞坚(905)
- 073424 散热模块材料对 ATCA 主板散热性能影响研究.....
.....董志忠 孟勐 梁展鹏 彭晓峰(909)
- 073427 纳米流体振荡热管内部流动和传热特性.....李启明 彭晓峰 王补宣(913)
- 073429 内径为 19.6 μm 微石英管内部流动特征的实验研究.....
.....刘志刚 王照亮 管宁 张荣光(917)
- 073438 转轮除湿器微通道形状对除湿性能的影响.....蒋祚贤 代彦军 王如竹(921)
- 073440 变截面微石英管内流动特性研究.....张承武 管宁 刘志刚(925)
- 073443 微通道介电泳颗粒分离中的焦耳热分析.....申小中 陈振乾 施明恒(929)
- 073447 非结构化网格下自由分子微电热推力器数值模拟.....
.....孙志新 李增耀 王裕峰 韩先伟 陶文铨(934)
- 073457 HFC134a/TiO₂ 纳米颗粒工质换热性能实验台与单相对流换热.....
.....毕胜山 史琳(938)

七. 生物换热

- 073001 铁磁热籽热疗中温度场分布的三维数值研究.....
.....孟萃 唐劲天 程建平 夏启胜(944)
- 073019 低温保存动脉松弛行为实验研究.....赵刚 郑宇轩 高永
.....张保雷 冬李素萍 郭晓婕 刘忠 程曙霞(952)
- 073035 乳腺癌热诊断的测试条件分析.....张海峰 朱良 何立群(956)
- 073114 生物材料玻璃化保存液的热分析.....王海燕 周瑞君 吕树申(960)
- 073223 生物表面活性剂二元体系驱替水驱滞留油过程的热力学浅析.....
.....贾振歧 覃生高 成庆林(964)
- 073224 生物表面活性剂二元体系驱替水驱滞留油过程的流态演变研究.....
.....贾振歧 杨大刚 李友俊(969)
- 073266 人舌三维温度场的实验研究与数值模拟.....
.....诸凯 陈瑞球 侯晓飞 田金颖 王如愿 姜智浩 王怡(973)
- 073267 人舌动脉三维血管树建立方法研究.....张艳 诸凯 张于峰 解海卫(977)
- 073272 激光蚀除生物组织时的传热过程分析与数值模拟.....张纪庄 张学学(981)
- 073290 肿瘤冻融相变传热过程的数值模拟.....陈振乾 施明恒 陈宇(987)
- 073293 当归微波水提取物聚集态特征对传质的影响.....
.....邸倩倩 杨俊红 张恒春 刘艳(992)
- 073294 微波功率对黄芪有效成分提取的影响及其固化作用.....
.....杨俊红 张恒春 邸倩倩 赵阳(996)
- 073295 植物性材料内部微尺度流动及传质现象.....
.....杨俊红 邸倩倩 张恒春 赵阳(1000)
- 073304 考虑“动静脉对”换热效果的颈部温度场数值模拟.....
.....夏翔 程曙霞 赵刚(1004)

- 073305 大血管的热稳定性对冷疗过程的影响.....
刘志峰 黄长进 赵刚 程曙霞(1008)
- 073306 可供采供血机构常规使用的红细胞深低温保存方法的初步筛选.....赵刚
刘志峰 郭晓婕 李素萍 舒志全 张晓光 方芹 吕蓉 刘忠(1012)
- 073321 一种微型热生物传感器的设计及实验研究.....
虞维静 晋义 徐裴 华泽钊(1016)
- 073422 激光治疗 PWS 制冷剂喷射冷却过程的数值模拟.....
李东 何雅玲 王国祥 刘迎文 肖杰(1020)
- 073455 胞内冰晶生长研究.....杨戈尔 张爱丽 徐学敏(1024)
- 073459 血管在疲劳循环下粘弹功率密度的数值计算.....
程曙霞 雷冬 赵刚 刘志峰 罗大为(1028)
- 073474 热泵种子干燥过程的研究.....王娟 杨昭 李思远 赵海波(1032)
- 073478 激光间质内热疗的深低温流体冷却方法.....邓中山 刘静(1038)

八. 数值模拟

- 073011 PDMS 微流控芯片中焦耳热效应的数值研究...曹军 洪芳军 郑平(1042)
- 073012 埋地热油管道正常运行的数值模拟研究.....
张争伟 凌霄 宇波 张劲军 戴兵 王凯 李伟(1050)
- 073013 新大线同沟敷设热力分析...王艺 凌霄 宇波 张劲军 王凯(1055)
- 073014 温差发电机工作特性的数值研究.....任德鹏 贾阳(1060)
- 073034 膜蒸馏组件中喷管形状对分离强化的数值模拟.....
杨晓宏 高虹 田瑞 齐晓娟 贾晨霞(1066)
- 073053 湍流空气射流引射特性的模拟研究.....王海兴 陈熙 潘文霞(1071)
- 073056 家用空调风冷冷凝器的数值分析.....王金锋 陶乐仁 王永红(1075)
- 073058 喷射式空调系统的喷射器 CFD 数值分析.....
王金锋 陶乐仁 王永红 郑志皋 季红军 陶宏(1080)
- 073077 换热器动态特性的识别方法研究.....王方方 关欣 崔国民 蔡康(1084)
- 073082 自激励旋进射流的流动及换热模拟.....耿丽萍 陶容 周静伟(1088)
- 073088 非均匀分布脉冲热源的冷却及数值模拟.....黄志锋 刘伟 舒水明(1092)
- 073091 太阳能热气流发电系统非稳态耦合数值分析.....
明廷臻 刘伟 潘垣 黄晓明 许国良(1097)
- 073095 管内核心流区域强化换热数值模拟.....吴国强 刘伟 杨昆(1102)
- 073106 端头结构热应力特性研究.....刘磊 耿湘人 贺立新 桂业伟(1107)
- 073107 二维热防护结构和流场耦合计算方法研究.....
贺立新 张来平 桂业伟 耿湘人(1114)
- 073109 具有点抗结构表面的传热与流动特性.....汪建生 邱宇 李亮谊(1120)
- 073110 波纹表面的湍流拟序结构与温度场...汪建生 孙建 李亮谊 刘志毅(1125)
- 073129 定向凝固宏微观热质传递及双扩散流作用.....冯妍卉 聂红 张欣欣(1129)
- 073131 热等离子体反应器内旋流效应的二维数值模拟研究.....
吴贵清 李和平 包成玉 陈熙(1137)
- 073145 熵格子 Boltzmann 方法模拟高 Reynolds 数流动.....徐辉 陶文铨(1141)
- 073148 二维小孔型脉管制冷机的数值模拟.....巩亮 何雅玲 陶文铨(1146)

- 073149 球突翅片表面的数值模拟和特性分析.....樊菊芳 何雅玲 陶文铨(1151)
- 073150 一种求解对流扩散问题的高精度无网格方法.....
.....吴学红 李增耀 马良栋 陶文铨(1155)
- 073151 CLEAR 与 SIMPLE 系列的三种算法的收敛性和健壮性比较.....
.....张京兆 屈治国 何雅玲 陶文铨(1159)
- 073156 汽轮发电机转子三维温度场耦合计算.....
.....路义萍 阴文豪 谈和平 陈鹏飞(1165)
- 073158 基于表面温度场的电缆老化红外诊断研究.....
.....杨宝东 杨立 范春利 张健(1169)
- 073164 室内羽流对空调非等温射流的影响研究.....
.....富宇莹 罗行 王昕 黄晨(1174)
- 073170 矩形硅微通道环状冷凝的数值模拟.....
.....吴嘉峰 陈永平 施明恒 肖春梅 张程宾(1181)
- 073172 叶片折数不同对惯性级阻力特性影响的研究.....
.....杨俊东 吴国强 高怡秋 章扬(1185)
- 073173 疏水槽结构对惯性滤清器性能的影响.....
.....闫雪山 杨俊东 吴国强 高怡秋(1190)
- 073176 勾形磁场对硅单晶 CZ 生成过程影响的全局数值模拟分析.....
.....李友荣 魏东海 吴双应(1195)
- 073181 垂直 Bridgman 多组元化合物晶体生长过程的热质对流.....
.....陆军 白博峰 郭烈锦(1201)
- 073184 石墨泡沫内流动与传热的数值分析.....张新铭 刁磊朋 曾丹苓(1212)
- 073186 重力热管冷凝段携带极限的理论研究.....焦波 邱利民 张洋(1217)
- 073187 水平管外套丝网壁面液体升膜形成及特性研究.....
.....何明珠 梅宁 于海燕 李艳 司洪宇(1222)
- 073193 槽内热磁耦合流动换热数值模拟.....张晓晖 魏琪(1226)
- 073194 增压锅炉过热器的三维数值模拟及热偏差分析.....
.....曹民侠 孙信辉 李彦军(1230)
- 073195 叶片转角对旋风子阻力及效率特性的影响.....
.....章扬 王亮亮 王媛媛 闫雪山(1237)
- 073197 用 CFD 方法研究纳米流体强化发动机传热.....徐哲 白敏丽 吕继组(1242)
- 073203 基于欧拉-欧拉模型的气固鼓泡床数值模拟及分析.....
.....曹玉春 陈海艳 吴金星(1247)
- 073204 环模器温度调节过程的数字仿真.....付卫东(1254)
- 073216 幂律流体延伸表面温度边界层数值研究.....
.....张浩 张欣欣 郑连存 刘文静(1258)
- 073221 求解 N-S 方程的多边形网格与三角形网格对比.....王振兴 徐明海(1263)
- 073227 地铁隧道活塞风固定网格技术数值模拟.....杨立新 张祎伟(1267)
- 073232 质子交换膜燃料电池动态特性数值分析.....巴黎明 贾力 何海婷(1272)
- 073234 微流动的同伦分析法解析求解.....张田田 贾力 王志成(1276)
- 073237 单晶生长炉全局热分析(1)——三维模型建立.....敬成君 高辉 贾琛霞(1280)
- 073238 单晶生长炉全局热分析(2)——非定常三维流动的影响.....
.....高辉 敬成君 贾琛霞(1284)

- 073239 单晶生长炉全局热分析(3)——自由界面形状的影响.....
贾琛霞 敬成君 高 辉(1288)
- 073241 空间热控制系统部件箱的传热特性数值模拟.....
余凯伦 郭开华 何振辉 黄臻成 莫冬传 刁向红(1292)
- 073256 超音速分离管内部流动的二维数值模拟与分析.....
蒋文明 刘中良 刘恒伟 张 建 张新军 冯永训(1296)
- 073271 变截面主流加速对超音速气膜冷却的影响.....彭 威 姜培学(1300)
- 073273 列车运动对站台环境影响的数值模拟.....
杨 晖 贾 力 杨立新 黄 鹏(1305)
- 073277 水套炉内火筒传热数值模拟.....
李清方 张国忠 徐 栋 张 建 杨德伟(1310)
- 073281 冷却流初态对凹面圆斜孔气膜冷却的影响.....刘元清 王扬平 姜培学(1314)
- 073289 水平磁场对双层流体热毛细对流的影响.....周小明 黄护林(1318)
- 073308 人字板换热器波纹倾角对流型影响的数值模拟研究.....
贾志刚 蔡 毅 周文学 寿比南(1323)
- 073319 水蒸汽超音速流动过程中自发凝结现象的数值模拟.....
杨 勇 沈胜强 孔泰佑(1330)
- 073324 圆转矩形二元喷管的锯齿冠状喷口对射流掺混特性的影响.....
罗 昕 张靖周 单 勇(1336)
- 073335 多芯片组件的热模拟和优化分析.....徐龙潭 王雁鸣 帅 永 谈和平(1341)
- 073347 旋转对带有冲击孔的叶片前缘流动和换热的影响.....
章大海 曾 敏 罗来勤 王秋旺(1345)
- 073350 窄间隙矩形通道内纵向涡发生器间距的数值优化.....
王海刚 陈秋炀 曾 敏 王秋旺(1349)
- 073352 基于田口方法的波纹内翅片管参数优化研究.....林海 曾 敏 王秋旺(1353)
- 073355 凹槽通道中流动和换热的数值模拟.....
杨 茱 高旭亮 黄夫泉 李 凌 卢 玫(1357)
- 073356 两个流动和传热问题的分区迭代并行计算.....
李佳明 杨 茱 余 敏 卢 玫(1361)
- 073358 锅炉干排渣机内空气流动和换热的数值模拟.....
杨开敏 杨 茱 田立君 李 凌 赵 明(1365)
- 073359 三维长方体腔内 Benard 对流的研究.....
战乃岩 杨 茱 米丽娟 李 凌 郑臻轶(1369)
- 073360 方腔内竖直板混合对流换热的数值研究.....
张翠珍 杨 茱 单彦广 章立新(1373)
- 073364 高频感应等离子体炬内液体喷雾的运动与蒸发.....单彦广 杨 茱(1377)
- 073365 底部热流及入口高度对太阳能热烟肉流动换热的影响.....
孙佳明 杨 茱 单彦广 赵 明(1381)
- 073366 恒热流条件下锯齿型通道流动和换热的非稳态特性研究.....
董晶瑾 卢 玫 杨 茱 李 凌(1385)
- 073367 肋片间距对环形通道流动和换热的影响.....
周 骞 卢 玫 余 敏 杨 茱 李 凌(1389)
- 073369 膜换热特性影响因素的数值研究.....胡 腾 闵敬春 宋耀祖(1393)

- 073374 并联换热系统中冷媒分配的优化研究.....
程雪涛 徐向华 任建勋 梁新刚(1397)
- 073382 平板微反应器中甲烷蒸汽重整的数值分析.....
漆波 李隆键 崔文智 陈清华(1401)
- 073388 分义管内单相流流量分配的数值模拟.....
熊永 吴晓敏 桂晓宏 胡南 王维城(1406)
- 073391 反旋进气共转盘腔流动的数值模拟.....黄爱霞 王锁芳(1410)
- 073393 不同喉部宽高比下球面收敛二元喷管流场数值研究.....
王宏亮 张靖周 单勇(1414)
- 073397 两种波纹板通道内的流动及换热比较.....李海朋 刘钊 丰镇平(1419)
- 073403 分离结晶过程中熔体热毛细对流的数值模拟...彭岚 范菊艳 李友荣(1424)
- 073404 环形双层液体内热毛细对流过程的数值模拟...李友荣 张文杰 王双成(1428)
- 073410 物性对电场下单气泡行为的影响.....彭耀 陈凤 宋耀祖 陈民(1433)
- 073411 扁平多分支管内两相流流量分配的数值模拟.....
吴晓敏 熊永 桂晓宏 宋寅 王维城 Koichi Tanimoto(1437)
- 073419 带有纵向涡发生器的椭圆管翅片换热器的数值研究.....
楚攀 何雅玲 李瑞 雷勇刚(1441)
- 073421 交变流动下金属丝网回热器中压降特性的数值研究.....
高凡 何雅玲 刘迎文(1445)
- 073423 纵向涡强化换热特性及机理分析.....田丽亭 雷勇刚 何雅玲(1449)
- 073433 地铁站挡烟垂壁对火灾烟气流动影响分析.....
樊洪明 李娟 赵耀华 杜修力(1453)
- 073434 北京环线岛式车站两种排烟模式对烟气流动规律的影响.....
胡家鹏 赵耀华 樊洪明 杜修力(1457)
- 073441 管内插入扭带的强化传热数值模拟.....唐志伟 闫桂兰 蒋章焰(1461)
- 073445 周期性非稳态条件下多孔砖、空心砖传热性能影响因素数值计算与研究
王晓璐 黄大宇 孙昆峰(1467)
- 073446 质子交换膜燃料电池单电池三维数值模拟.....
林鸿卫 星 闵春华 李增耀 何雅玲 陶文铨(1475)
- 073448 粘土空心砖结构优化的数值模拟(上).....
李临平 吴志根 李增耀 何雅玲 陶文铨(1480)
- 073449 粘土空心砖结构优化的数值模拟(下).....
李临平 何雅玲 吴志根 李增耀 陶文铨(1484)
- 073452 水平方管层流混合对流的三维数值模拟.....
种道彤 刘继平 徐焯 严俊杰(1488)
- 073454 入射角和射流比及射流孔间距对气膜冷却的影响.....
李少华 彭涛 刘利献 郭婷婷(1493)
- 073458 环形液层内热毛细对流的线性稳定性分析.....
石万元 李友荣 Michael K. Ermakov 今石宣之(1499)
- 073462 空调器微通道蒸发器传热特性数值模拟.....苏建民 王随林 李俊明(1504)
- 073470 旋转封闭腔体内水和钠钾合金热驱动换热数值分析.....
王宏人 常海萍 常国强 张镜洋(1510)
- 073475 叉流填料再生器中传热传质系数的实验研究...罗磊 张小松 殷勇高(1516)

灰渣的有效光学常数及辐射特性

殷金英 刘林华

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

电话: 0451-86402237, E-mail:lhliu@hit.edu.cn

摘要: 本文基于有效介质理论, 分别采用 Maxwell Garnet、Bruggeman 理论计算了灰渣的有效光学常数和辐射特性参数, 并与 Goodwin 所测量的实验值进行比较, 结果表明有效介质理论适合于计算灰渣的光学常数和辐射参数, 针对本文所计算的灰渣的成分和含量, Bruggeman 理论计算的数值与实验数据吻合的更好, 与理论上分析一致。

关键词: 辐射特性; 有效光学常数; 灰渣

1 引言

现代大型煤粉炉内, 存在着大量的颗粒介质。在煤颗粒燃烧过程中产生大量的粒子形态的燃烧产物(如焦炭、炭黑、飞灰等)将参与辐射换热, 且这些粒子的辐射能力远强于气体(CO₂、水蒸气等)。因此, 煤灰粒子的辐射特性是研究炉内辐射传热过程不可缺少的重要参数之一。针对煤灰粒子的辐射特性, 国内外^[1,2,3]已经作了大量的研究, 大体的研究方法有都是基于理论或实验。大部分研究者是利用反演理论得出粒子复折射率, 再基于 Mie 理论或其近似理论, 假定颗粒为理想均匀的球体, 由颗粒的光学常数和尺寸参数计算得到颗粒的辐射特性参数。众所周知, 实际微粒的结构和成分是复杂的, 存在多种成分。例如灰渣、飞灰就是多种成分组成的物质。探寻可行的考虑颗粒结构特征的工程计算模型, 对于正确理解和描述实际颗粒的辐射特性具有重要的意义。

本文基于有效介质理论, 计算出了灰渣的随波长变化的有效复折射率, 进而计算出散射因子、吸收因子辐射特性参数。

2 有效介质理论

有效介质理论中 Maxwell Garnet^[4](以下简称 MG)理论是使用最广泛的有效介质理论。记媒质主体的介电常数为 ϵ_e , 内部嵌有的 i 类杂质的介电常数为 ϵ_i , 其体积份额为 q_i , 若杂质为小的球形粒子, 则媒质的有效介电常数 ϵ_{eff} 可由 M-G 理论获得:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_e + 3\epsilon_e \frac{\sum_{i=1}^n q_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_e}{\epsilon_i + 2\epsilon_e}}{1 - \sum_{i=1}^n q_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_e}{\epsilon_i + 2\epsilon_e}} \quad (1)$$

式中 $q = \sum q_i$ 为掺杂物的总体积份额。

对于随机混合的几种媒质, 即个媒质边界无规则形状的情形, 常采用 Bruggeman

方程确定有效光学常数, Bruggeman^[4]理论即取(1)式中的 $\varepsilon_{eff} = \varepsilon_e$ 此时有:

$$\sum_i q_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_e}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} = 0 \quad (2)$$

式中 ε_e 即为有效介电常数。

在电磁理论中, 对于非铁磁性物质的介电常数与复折射率有如下的关系:

$$\varepsilon = m^2 \quad (3)$$

由 $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ 及 $m = n + ik$, 和介电函数与 n 、 k 的关系, 可得出 n , k :

$$n^2 - k^2 = \varepsilon' \quad (4)$$

$$2nk = \varepsilon'' \quad (5)$$

3 灰渣的有效光学常数

以上两种有效介质理论各有其适用条件: MG 理论认为一组分的颗粒嵌埋于另一组分的基体中, 掺杂物颗粒之间不能形成联通结构, 因而其适用于掺杂物所占的份额较小的情况; 而 Bruggeman 模型适合描述两种组分含量相近的复合体系的介电性质, 即物质间随机分布相互混合, 甚至形成聚集结构。

本文分别采用 MG 理论和 Bruggeman 理论分别计算了灰渣的随波长变化的有效折射率 n 和有效消光系数 k 。图 1 和 2 给出了计算结果和实验数据的对比, 图中的实验数据为 Goodwin^[2]所测量的人工合成的灰渣数据, 灰渣的种类为 SA01, 成分为 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , 各自百分含量为 55.37, 27.63, 16.15, 0.85。

从图 1 中可以看出有效介质理论基本上能模拟出多元组分灰渣的有效折射率, MG 和 Bruggeman 两种理论在趋势上都准确地和实验数据基本吻合, 在峰值附近还是 Bruggeman 理论的数值更接近实验数据。

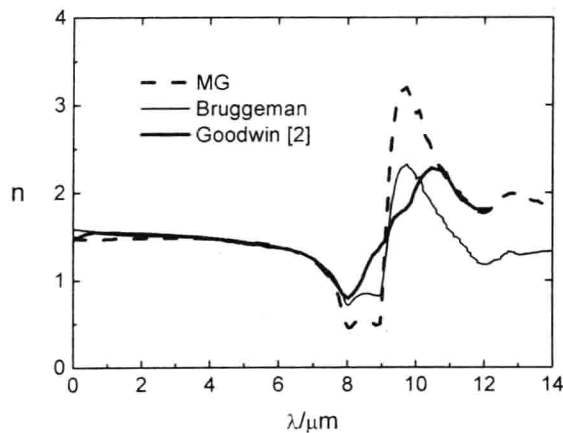


图 1 不同理论的有效折射率比较

图 2 中 MG 和 Bruggeman 理论分别模拟的消光系数, 在波长 5 至 9 微米段, 基本与实验数据重合, 在小于 5 微米时 Bruggeman 理论在趋势上较接近实验数据。

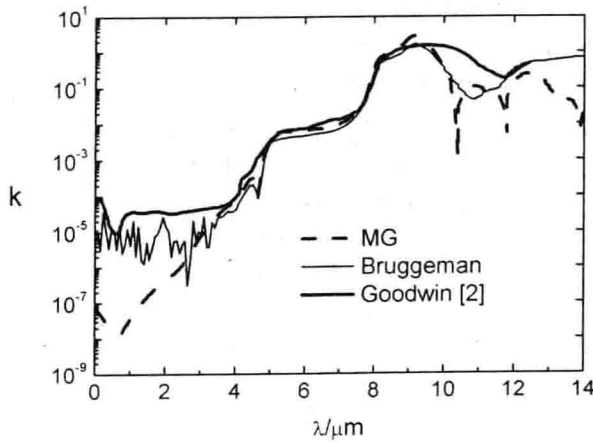


图 2 不同理论的有效消光系数的比较

4 灰渣的辐射特性

基于上述模拟的基础, 进一步利用 Lorentz-Mie^[5]电磁理论:

$$Q_{e\lambda}(m, x) = \frac{2}{x^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1) \operatorname{Re}\{a_j + b_j\} \quad (6)$$

$$Q_{s\lambda}(m, x) = \frac{2}{x^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1) (|a_j|^2 + |b_j|^2) \quad (7)$$

$$Q_{a\lambda} = Q_{e\lambda} - Q_{s\lambda} \quad (8)$$

式中 $Q_{e\lambda}$ 、 $Q_{s\lambda}$ 、 $Q_{a\lambda}$ 分别为粒子的单色衰减、散射、吸收因子; x 为尺度参数, Re 表示取复数的实部, a_j 、 b_j 为由 Ricatti-Bessel 函数组成的 Mie 氏散射系数。

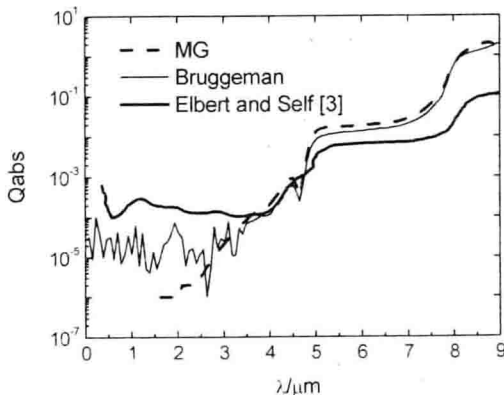


图 3 不同理论的吸收因子的比较

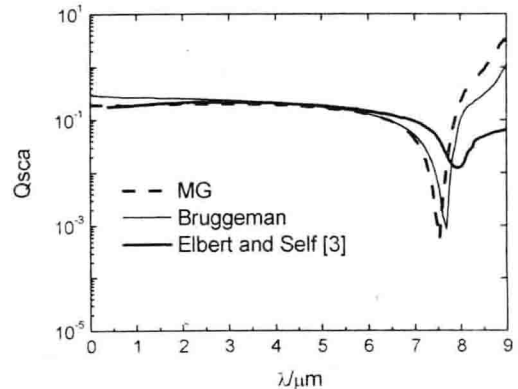


图 4 不同理论的散射因子的比较

图 3 和图 4 为取尺度参数 $x=1$ ，分别利用 MG 和 Bruggeman 有效介质理论计算出的有效复折射率，进而计算出的随波长变化灰渣的吸收因子、散射因子，并与 Elbert 和 Self^[3]计算的数据比较。其中 Elbert 和 Self^[3]的计算值是利用 Goodwin^[2]所测的人工合成灰渣 SA01 的折射率和消光系数计算得出。

由图 3 和 4 可知，利用 MG 和 Bruggeman 理论得出的有效折射率和有效消光系数计算出的吸收因子、散射因子，与用 Goodwin^[2]实验数据计算得出的吸收因子、散射因子吻合的很好。MG 理论得出的数值在峰值附近与 Elbert 和 Self^[3]的计算值有些偏离，其它波长基本完全吻合。Bruggeman 理论在峰值附近吻合的较好，在其它波长稍微偏离。总体上，Bruggeman 理论符合的较好，这与灰渣掺杂物的成分、微结构有很大的关系，Bruggeman 模型适合描述组分含量与基底相近的复合体系。

5 结论

本文利用有效介质理论对灰渣的光学常数和辐射参数计算表明，有效介质理论适合于计算灰渣的光学常数和辐射参数。由于各物质的组分不同，可选择不同的介质理论，针对本文所计算的灰渣的成分和含量，折射率 n 、消光系数 k 、散射 Q_s 、吸收 Q_a 因子计算结果总体表明，由 Bruggeman 理论计算的数值与实验数据吻合的更好，正与理论上分析一致。

参考文献

- [1] 柳朝晖, 刘迎晖, 周英彪, 郑楚光. 多孔炭粒的等效光学常数及辐射特性. 1997,18(2):251~255
- [2] D. G. Goodwin. Infrared Optical Constants of Coal Slags. Topical Report No. T-225, Stanford University, Stanford, CA, 1986
- [3] L. Ebert and S.A. Self. Radiation Heat Transfer in a Dispersion of Fly Ash, Mineral Matter and Ash Deposition. DOE Report. 1985, pp.599~61
- [4] 孙大明, 孙兆奇. 金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用. 科学出版社, 2004, pp.149~151
- [5] 谈和平, 夏兴林, 刘林华, 阮立明. 红外辐射特性与传输的数值计算. 哈尔滨工业大学出版社, 2006, pp.105~118

平面近场辐射的单色效应和偏振态研究

车志钊 张昊春 江乐 谈和平

(哈尔滨工业大学, 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

Tel: 0451-86412308 E-mail: chezhizhao@gmail.com

摘要 近场辐射是微纳米尺度辐射的重要问题, 本文计算了平面内涨落电磁场产生的电磁能密度和两平行平面间的微纳米尺度辐射热流, 分析了介电常数对近场辐射中单色效应的影响, 对于SiC, 单色效应极大地提高了电磁能密度和近场辐射换热量, 而对于Al则没有明显的单色效应。本文还分析了不同偏振态的影响, 对于SiC材料, 在微纳米尺度范围内, 电磁能密度和辐射换热量主要受p偏振的近场倏逝波的影响, 而s偏振电磁波和p偏振的远场传播波对微纳米尺度下的辐射总量贡献可以忽略。

关键词 热辐射 近场 单色效应 偏振

1 引言

纳米技术、微电子机械系统(MEMS)的发展, 给传热学领域带来了新的挑战。微纳米尺度热辐射传输关注在微纳米尺度下才能观察到的热辐射传输现象^[1], 同时也可以对宏观的辐射传热现象给出微观的解释, 而近场效应在微纳米尺度下作用显著。

热辐射的产生是由于物质内部产生涨落电流, 并以涨落电磁波的形式向外辐射能量。该涨落电磁波既包括波矢为实数的传播电磁波, 也包括波矢为虚数的倏逝波, 后者的电磁场幅值随传播距离的增加呈指数规律衰减, 在大约几个波长的范围内起作用。在物质界面处产生的倏逝波, 在垂直于界面方向上不传输能量, 而能量沿平行于界面的方向传播, 是一种表面波。

微纳米尺度辐射具有广阔的应用前景。在热光电(TPV)转换设备中, 它可以用来提高TPV转换设备的功率密度和转换效率^[2]。在扫描隧道显微镜、扫描热显微镜^[3]中, 探针与样品之间的近场辐射作用显著。在低温科学中, 光子的平均自由程比常温下大得多, 对应的产生尺度效应的特征尺寸要比常温下大得多。另外, 微纳米尺度辐射传输研究, 对发展新型光子器件、新型光学传感器和测量技术、纳米光刻、高密度磁光存储、近场探测具有重要意义。

在近场效应下, 辐射可能在某频率下呈现明显的峰值, 使辐射电磁能密度和热流密度提高几个数量级, 即单色效应。若采用掺杂、表面微观改型等技术改变辐射的峰值频率, 可以实现辐射换热的有效调控。同时, 不同偏振态对辐射的贡献可能差别很大, 分析其作用规律, 对开展微尺度辐射的理论研究与实际应用具有重要的指导意义。

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究项目(No.50620120442)资助

2 理论基础

微纳米尺度辐射较常规尺度下更复杂, 其机理研究多从简单几何形状入手, 如两平行平面、两纳米粒子、以及粒子与表面的辐射问题, 从电磁理论出发, 基于涨落耗散理论, 采用格林函数法, 给出辐射的分析解, 并采用数值方法对分析解进行辅助研究。

2.1 平面辐射电磁场的电磁能密度

单个平面(或称半无限厚物体)的辐射场, 文献[4]中根据涨落耗散理论和格林函数法, 给出了它的电磁能密度, 即

$$U(\omega, T) = \frac{\omega \Theta(\omega, T)}{2\pi^2 c^2} \left\{ \int_0^{\omega/c} \frac{1}{|\gamma_1|} \left(\frac{1 - |r_{12}^s|^2}{2} + \frac{1 - |r_{12}^p|^2}{2} \right) K dK + \int_{\omega/c}^{\infty} \left[\text{Im}(r_{12}^s) + \text{Im}(r_{12}^p) \right] e^{-2|\gamma_1|d} \frac{K^3 dK}{k_0^2 |\gamma_1|} \right\} \quad (1)$$

式中 $\Theta(\omega) = \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$, r_{12}^s 和 r_{12}^p 分别是 s 偏振和 p 偏振电磁波在界面处的反射系数, k_0 是电磁波在真空中的波矢量大小, K 是电磁场波矢量在平行于界面方向的分量, γ_1 是波矢量在真空中垂直界面方向的分量, d 是计算点到界面的距离。

2.2 两平行平面间的辐射热流密度

两平行平面间辐射热流密度可以计算垂直于界面方向坡印廷矢量的时间平均值^[5]

$$S = \int_0^{\infty} (\Theta_1 - \Theta_2) M d\omega \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\omega/c} \frac{[1 - |r_1^p(\omega)|^2][1 - |r_2^p(\omega)|^2]}{|1 - e^{2i\gamma_1 d} r_1^p(\omega) r_2^p(\omega)|^2} K dK + \frac{1}{\pi^2} \int_{\omega/c}^{\infty} e^{-2kd} \frac{\text{Im} r_1^p(\omega) \text{Im} r_2^p(\omega)}{|1 - e^{2|\gamma_1|d} r_1^p(\omega) r_2^p(\omega)|^2} K dK$$

$$+ \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\omega/c} \frac{[1 - |r_1^s(\omega)|^2][1 - |r_2^s(\omega)|^2]}{|1 - e^{2i\gamma_1 d} r_1^s(\omega) r_2^s(\omega)|^2} K dK + \frac{1}{\pi^2} \int_{\omega/c}^{\infty} e^{-2kd} \frac{\text{Im} r_1^s(\omega) \text{Im} r_2^s(\omega)}{|1 - e^{2|\gamma_1|d} r_1^s(\omega) r_2^s(\omega)|^2} K dK \quad (3)$$

3 计算和分析

介电常数对微纳米尺度热辐射的影响极其重要, 本文中主要针对 SiC 和 Al 两种材料作为非金属和金属的典型, 前者用 Lorentz 模型, 后者用 Drude 模型描述介电常数^[6]。

3.1 单色效应

不同的物质因其介电常数随频率的变化规律不同, 表现出不同物质的光谱辐射特性

有很大差异。以两 SiC 平行平面为例，其温度分别为 350K 和 300K，如图 1 所示，当距离减小到几微米时，辐射热流密度在 $\omega_r = 1.826 \times 10^{14}$ rad/s 处出现了明显的峰值，并且随距离的减小峰值剧烈增强，使辐射换热总量增加几个数量级。300K 的 SiC 表面的电磁能密度在 ω_r 处也表现出明显的单色效应，如图 2。保持同样的温度和结构，Al 表面的电磁能密度和辐射热流密度则没有出现明显的峰值，如图 3。

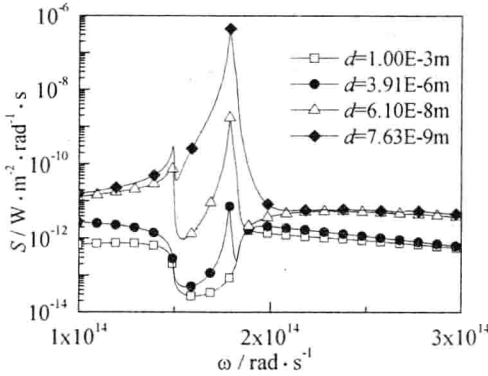


图 1 两 SiC 平行平面间辐射热流密度随角频率的变化关系

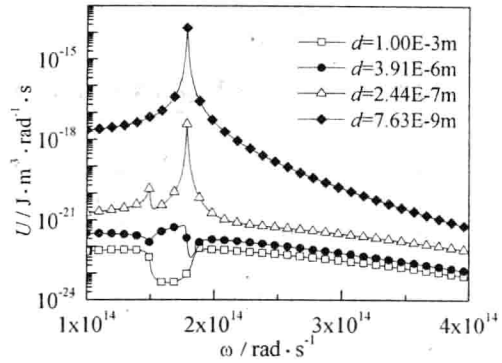


图 2 SiC 平面在真空中产生的电磁能密度随角频率变化关系

电磁波在边界处发生反射和透射时，对于 p 偏振电磁波，其平行于界面方向上的波矢分量 K ，如果 ϵ_2 实部接近 1 且虚部不大，此时倏逝波水平分量为 $K = \omega/c \sqrt{\epsilon_2 / (\epsilon_2 + 1)}$ ，必然产生 K 的值非常大，使波矢的垂直分量为虚数，导致表面波的激发，增大近场的贡献量。对于 SiC 材料，其表面波激发对应的频率正好在 300K 物体热辐射的特征频率附近，辐射出现表面声子共振，其计算得到的

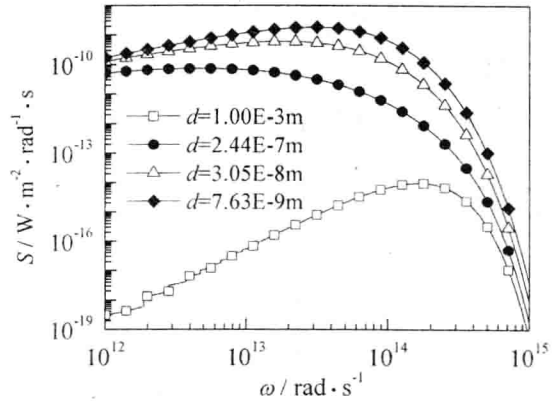


图 3 两 Al 平行平面间辐射热流密度随角频率的变化关系

的电磁能密度和辐射热流密度出现极大的峰值。对于材料 Al 或其他金属材料，其表面波激发对应的频率在可见光或紫外范围内，300K 的黑体辐射在该频率附近所占份额非常小，无法实现表面波的激发，也就没有强烈的峰值。

3.2 不同偏振态下远近场辐射的比重

辐射热流密度包括是 s、p 偏振下的近场和远场的贡献。但实际上，对于 SiC 而言，在微纳米尺度下，起主要作用的是 p 偏振下的近场辐射。以两个 SiC 半无限厚平行平面为例， $T_1 = 350\text{K}$ ， $T_2 = 300\text{K}$ ，两平面间的辐射热流密度随距离的变化关系如图 4 所示。从图中不仅可以看出辐射热流密度随距离的指数变化规律，而且可以发现，当距离小于

$1 \times 10^{-8} \text{ m}$ 时, p 偏振的近场倏逝波贡献要比其他部分总和至少大 3 个数量级。300K 的 SiC 平面在真空中产生的电磁能密度也表现出类似的规律, 如图 5。

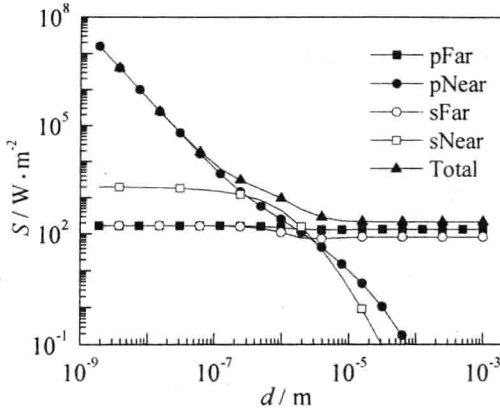


图 4 两 SiC 平行平面间不同偏振态下远近场辐射热流密度随距离变化关系

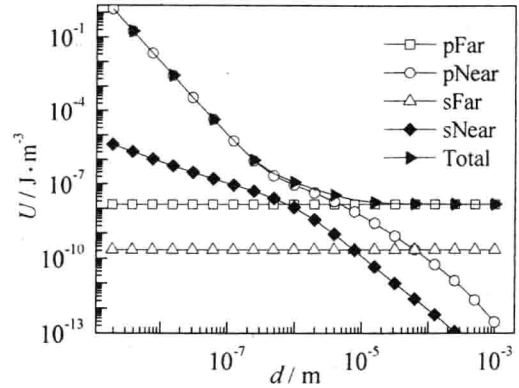


图 5 SiC 平面在真空中产生的电磁能密度不同偏振态远近场贡献随距离变化关系

在物体界面两侧产生的倏逝波, 根据其边界条件的要求, 若为 s 偏振, 即横电波 (TE), 要求有 $\mu_2 \gamma_1 + \mu_1 \gamma_2 = 0$, 但是对于非磁性材料, 即磁导率为常数, 上式一般不能成立, 即 s 偏振倏逝波的产生受到抑制。对物体界面两侧产生的 p 偏振倏逝波, 即横磁波(TM), 其边界条件为 $\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1 = 0$, 当介电常数实部为负数时, 该式可得到满足。由此可知, 微纳米尺度下, SiC 平行平面辐射换热起主要作用的是 p 偏振的近场倏逝波。

4 结论

本文通过计算平面内涨落电磁场产生的电磁能密度, 以及计算两平行平面间的微纳米尺度辐射换热, 讨论了在近场范围内辐射随距离的指数变化规律, 分析了其中存在的单色效应, 分析了不同偏振态远近场电磁波对辐射换热的贡献量, 对微纳米尺度辐射换热的理论研究与实际应用具有重要意义。

参考文献

- 1 过增元, 国际传热研究前沿——微细尺度传热力学进. 力学进展, 2000, 30(1)1-6
- 2 Whale M D, Cravalho E G. Modeling and performance of microscale thermophotovoltaic energy conversion devices. IEEE Transactions on Energy Conversion, 17(1): 130-142
- 3 Volokitin A I, Persson B N J. Radiative heat transfer between nanostructures. Physical Review B, 2001, 63(20): 205404/1-11
- 4 Volokitin A I, Persson B N J. Resonant photon tunneling enhancement of the radiative heat transfer. Physical Review B, 2004, 69(4): 045417/1-5
- 5 Joulain K, Mulet J P, Marquier F, Carminati R, Greffet J J. Surface electromagnetic waves thermally excited: radiative heat transfer, coherence properties and Casimir forces revisited in the near field. Surface Science Reports, 2005, 57(3-4): 59-112
- 6 Kittel C. Introduction to solid state physics, 7ed. John Wiley & Son Inc, New York, 1996

一种新型腔式吸热器的辐射性能研究

帅永, 王雁鸣, 袁远, 谈和平

(哈尔滨工业大学航空航天热物理研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

Tel: 0451-86412308, Email: shuaiyong@hit.edu.cn

摘要: 基于等热流密度的思想, 采用蒙特卡罗法研究了聚集太阳能吸收与高温热转换系统的热光学匹配设计方法, 初步建立了聚集太阳能腔式吸热器的等辐射热流的结构设计算法, 提出了一种新型的腔式吸热器——倒置截顶的泪珠形吸热器。与球形腔式吸热器性能比较分析, 结果表明了这种新型腔式吸热器具有较好的辐射热性能。

关键词: 太阳能; 腔式吸热器; 等热流密度; 蒙特卡罗法

0 引言

由于太阳能具有洁净、无污染等优点, 其应用方面的研究越来越受世界各国的关注。目前, 大规模、高效地利用太阳能的主要技术途径是通过聚集太阳能进行热力发电, 这也是世界上许多国家正在大力发展的一项重要的能源科技工程。但是, 太阳光空间方向性的动态变化、微小的不平行性及其相对较小的能流密度等固有特性, 一方面导致太阳能系统的热效率尤其是发电系统低, 另外一方面还给大规模高效聚集与热能转换技术带来了很大的困难, 需要攻克一系列的关键技术课题。

目前太阳能系统所使用高温集热器主要为腔式吸热器。由于太阳光的不平行性以及安装和制造误差都易导致焦面热流分布不均匀, 进一步使得腔式吸热器壁面的辐射热流分布不均匀, 造成局部高温, 对整个系统的热效率有较大影响, 直接影响系统与结构的可靠性, 严重还能引发事故。关于提高集热器的效率研究一般主要集中在腔体吸热器的热损失及太阳聚光器聚光后的辐射能流分布^[1-4]。

本文基于等热流密度的思想, 研究聚集太阳能吸收与高温热转换系统的热光学匹配设计方法, 吸收器表面的热流分布应在保证最大程度吸收太阳能的基础上力求均匀, 初步建立聚集太阳能吸热器的等热流密度与低反射损失结构设计的优化算法, 提出了一种具有优异辐射性能的新型腔式吸热器, 这对吸热系统和蓄热系统的设计具有理论指导意义。

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究项目 (No.50620120442) 资助