

中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集（下册）

二〇〇二

上海

中国工程热物理学会编



传热传质学学术会议论文集(下册) 目录

七. 生物换热

- 023005 激光热疗中生物组织热响应与热损伤研究.....朱光明 刘 伟 杨 昆 T.F. Zeng(601)
- 023007 脉动流对动脉中血液对流传热的影响.....杨 昆 刘 伟 朱光明(605)
- 023009 生物组织内含大血管时激光传输和热传递的数值模拟.....周建华 刘 静(609)
- 023020 黄原胶溶液流体力学和传热性能研究...马晓建 刘利平 李洪亮 陈俊英(613)
- 023060 注沸水型肿瘤热疗问题的传热模型.....桂 林 刘 静(617)
- 023068 激光诱导间质肿瘤热疗的模型改进与简化.....高 翔 马 宁 张学学(621)
- 023069 热水滴烫伤皮肤的传热分析...江世臣 马 宁 李和杰 金 浩 张学学(625)
- 023070 激光诱导间质热疗中的参数选择与优化.....马 宁 江世臣 李和杰 张学学(629)
- 023071 体表常热流法无损检测血液灌注率模拟实验验证.....李和杰 江世臣 张学学(633)
- 023128 NaCl 水溶液结晶过程的显微实验研究.....王文华 陶乐仁 华泽钊(637)
- 023129 兔主动脉低温杨式模量的实验研究.....周国燕 华泽钊(641)
- 023140 动物舌横剖断面温度场的实验研究与计算.....诸 凯 李 艳 邹 瑾 王 迅(645)
- 023141 舌体一维传热模型的解析解及舌温与血液灌注率的关系.....邹 瑾 诸 凯 李 艳 魏 璠(649)
- 023203 激光照射下不同生物质材料传热特性的实验研究.....淮秀兰 刘登瀛 周建华(653)

八. 数值模拟

- 023002 作物生长的土壤中氧气浓度场的稳态数值模拟...范爱武 刘 伟 刘炳成(657)
- 023004 存在湿分分层时土壤热湿传递的数值模拟.....刘炳成 刘 伟 范爱武(661)
- 023010 激光穿透焊中传热机制的研究.....陈 熙 叶晓虎(665)
- 023011 层流氩等离子体射流特性的数值模拟研究.....徐东艳 陈 熙(669)
- 023012 激光感生等离子体特性的三维数值模拟.....王海兴 陈 熙(673)
- 023036 焦炭填充床内非稳态传热和流动的研究.....刘华飞 张欣欣 吴懋林 徐 列 郑文华(677)
- 023037 一类具有自由边界广义扩散问题的解析解及传递行为分析.....郑连存 张欣欣 赫冀成(681)
- 023038 微观偏析对凝固传热传质数值模拟的影响.....冯妍卉 张欣欣(685)
- 023066 类前缘外形局部热防护问题的场协同分析.....袁湘江 桂业伟(689)
- 023067 单颗粒脱硫反应模型分析.....陈 兵 张学学(693)

- 023072 加热炉热过程动态操作数学模型.....董 伟 陈海耿(697)
- 023073 氢气干燥器吸附过程的数学模型及模拟.....李 军 贺志刚 朱冬生(701)
- 023074 用于粘性流场迭代计算的一种改进的模糊控制方法.....
.....刘训良 陶文铨 郑 平 王秋旺 何雅玲(705)
- 023088 用型线实现高价格近边界点与内点的统一及应用.....
.....李树民 朱国林 张树海 桂业伟(709)
- 023089 不锈钢在模拟冷却水中的钝化模型研究.....
.....李 宋 葛红花 吴文权 周国定 程云章(713)
- 023095 波形板汽水分离器的数值分析.....王晓墨 高彦栋 黄素逸(717)
- 023096 多级闪发式海水淡化装置研究.....姚 征 郭 淳(721)
- 023099 横掠管束非稳态周期性充分发展流动与换热的数值模拟.....
.....叶剑军 杨 荣 章立新 余 敏 卢 玫(725)
- 023112 砖坯干燥过程非稳态二维数值模拟.....
.....孙 恒 张 洁 肖尤明 邓东泉 徐 烈(729)
- 023113 铁路空调客车室内气流组织的数值模拟.....王 利 陆 震 黄兴华(733)
- 023115 超临界压力水在水平圆管中的变物性流动特性研究.....
.....薛珍岚 李 汛 安青松 李海龙(737)
- 023121 多重网格方法在三维导热问题计算中的应用.....葛永斌 吴文权 卢 曦(741)
- 023135 发动机缸盖传热的三维数值建模.....李隆键 刘家利 潘良明(745)
- 023137 用虚拟压缩方法计算低雷诺数传热问题时虚拟压缩因子的选择.....
.....张树海 李树民 朱国林 桂业伟(749)
- 023144 圆管层流入口段数值模拟的差分格式与出口边界条件研究.....
.....任德鹏 夏新林 谈和平(753)
- 023146 低温液体充填管路的数值计算.....丁鹏飞 任德鹏 夏新林 谈和平(757)
- 023148 激光切割石油筛管中的热应力问题研究.....
.....刘瑞芝 李 汛 苏 华 张 珊(761)
- 023163 二维轴对称流场的DSMC方法研究.....胡 古 董士奎 谈和平(765)
- 023165 楔形通道换热三维数值模拟.....凌长明 闵春华 卢聪明 肖逸先(769)
- 023166 针肋结构对换热的影响的三维数值研究.....凌长明 闵春华 赵冬梅(773)
- 023171 卫星密封舱内流动的地面模拟实验及数值计算.....
.....杨桂春 肖劲松 李劲东 马重芳(777)
- 023181 空气净化器位置对 VOCs 浓度分布影响的模拟研究.....
.....郭云枝 李晓锋 张寅平 金招芬 赵荣义(781)
- 023193 类前缘结构瞬态热响应和热应力计算研究.....王章健 桂业伟 耿湘人(785)
- 023198 传递过程的统一描述.....韩光泽 华 贲 陈清林 尹清华(789)
- 023200 空气横掠波纹管束流动与传热性能的数值模拟.....
.....吴 峰 王秋旺 罗来勤 陶文铨(793)

- 023201 稀薄气体二维外部柱体绕流特性研究.....王 娟 王秋旺 陶文铨(797)
- 023207 球体相变问题的双倒易边界元法求解.....白凤武 卢文强(801)
- 023208 金属熔滴快速凝固过程的双倒易边界元分析.....
.....郭 文 卢文强 马重芳 刘秋生(805)
- 023210 高能量光泵浦下板状复合介质的热特性.....
.....柳爱国 王军荣 闵敬春 宋耀祖(809)
- 023216 加装导流罩的厢式货车三维流场的数值模拟和试验研究.....
.....王德昌 杜广生 吴静怡(813)
- 023228 激光振荡介质温度场和应力场的数值模拟.....王军荣 闵敬春 宋耀祖(817)
- 023233 面向对象和组件技术在物性库中的应用.....徐向华 任建勋 梁新刚(821)
- 023248 管道内变物性流体在加速流时对流换热的数值模拟与实验验证.....
.....陈 雷 姜培学 E.P. 瓦卢耶娃(825)
- 023249 管道内变物性流体在加速流时换热与流动过程的数值模拟研究.....
.....陈 雷 姜培学 E.P. 瓦卢耶娃(829)
- 023250 流体在烧结多孔槽道中对流换热的数值模拟.....
.....李 勐 姜培学 马永昶 任泽需(833)
- 023251 竖直圆管中超临界 CO_2 对流换热数值模拟.....
.....徐铁君 姜培学 李 勐 任泽需(837)
- 023261 一种控制界面参数插值的新方法.....刘中良 马重芳(841)
- 023264 风能增速器的数值模拟.....陈泽敬 姜微微 胡桅林 任建勋(845)
- 023271 适用于电子冷却的新型冷却循环通道内水的热驱动数值研究.....
.....毛军逵 常海萍(849)
- 023283 带肋变截面 U 型通道内流动换热分析.....吴海玲 彭晓峰(853)
- 023294 多孔介质分形结构热方程的多重双尺度概率模型与数值模拟.....
.....曹礼群 罗剑兰(857)

九. 测量及显示技术

- 023025 雾化喷射下的波动液膜的电测量.....
.....何玮菁 安珍彩 雷树业 陈建平 郝锦志 姚 瑶 郑可可(861)
- 023061 借助显微镜用普通偶丝制作微细热电偶.....周一欣 刘 静(865)
- 023086 水泥回转窑投影温度场检测系统.....章立新 王少林 茅忠明 伍贻文(869)
- 023090 明胶凝胶水份扩散系数的数值法估计.....许学勤 B.Broyart C.Bonazzi(873)
- 023169 光催化反应器性能参数及其简便测试方法.....杨 瑞 张寅平(877)
- 023186 用红外热成像技术测量 MEMS 器件的热特性.....
.....朱德忠 张荣海 顾毓沁 郝京阳(881)
- 023187 用交流光热法测量极薄膜热扩散率的原理探讨...顾毓沁 阮修林 郝京阳(885)
- 023195 准稳态法测量纳米颗粒悬浮液热物性的实验研究.....周乐平 王补宣(889)

十. 工业应用、换热器及其它

- 023008 温室及其蓄热层中传热与流动的研究.....陈 威 刘 伟 黄素逸(893)
- 023027 间歇性地温恢复增强传热试验研究.....
.....高 青 李 明 于 鸣 白金玉 方 英(897)
- 023030 铜/水振荡热管传热特性的实验研究.....崔晓钰 翁建华 M. Groll(901)
- 023032 固定床传热参数中的等价关系.....赵庆国 马重芳(905)
- 023042 微透平紧凑式换热器的设计.....邹 江 彭晓峰 朴 英(909)
- 023043 CaO 水合蒸发成孔结构特性实验.....傅国光 颜 岩 彭晓峰(913)
- 023053 空气取水用复合吸附剂的吸附速度研究.....刘业凤 王如竹 范宏武(917)
- 023054 交叉双尺度波纹板上溴化锂降膜吸收实验研究.....
.....陈亚平 李映斌 王海青 施明恒(921)
- 023076 片距对平直开缝翅片表面换热和阻力特性影响的三维数值研究.....
.....李光熙 周俊杰 屈治国 陶文铨(925)
- 023079 稠油热采注汽管接箍对散热的影响计算.....丁文静 邓 斌 陶文铨(929)
- 023084 土温对植物生长的影响及其机理分析.....范爱武 刘 伟 刘炳成(933)
- 023085 关于改善盾构工作区湿热环境的研究.....
.....章立新 杨 荣 陶方伟 梅静盛 缪海航(937)
- 023094 基于概率分析的污垢模型.....徐志明 郭淑青 杨善让 孙灵芳 董向元(941)
- 023100 水力旋流器水相流场的数值模拟.....
.....曹 玮 杨 荣 胡利光 邹 宽 林高平 章立新 林宗虎(945)
- 023101 稻草热裂解模型的研究.....赵吉哲 卢 玫 李美玲 徐之平(949)
- 023102 非线性结构传热元件换热动态特性的实验研究...程 林 田茂诚 曹炳阳(953)
- 023103 非线性结构传热元件换热动态特性的理论分析...程 林 田茂诚 曹炳阳(957)
- 023104 流体低速横掠振动圆管的传热特性研究.....冷学礼 程 林(961)
- 023106 一种复杂非线性传热元件的传热及污垢特征.....
.....程 林 田茂诚 张冠敏 邱 燕(965)
- 023107 基于降低污垢热阻的复合强化传热研究.....程 林 冷学礼(969)
- 023108 管壳式换热器自动化设计及三维结构模拟.....
.....张冠敏 田茂诚 杜文静 程 林(973)
- 023109 换热器内流体诱导振动的有效利用.....程 林 田茂诚 张冠敏(977)
- 023111 板式蒸发器非共沸工质换热与压降研究.....赵鹏程 赵 力 丁国良(981)
- 023114 传热与传质性能对余热吸附制冰机的影响.....
.....王丽伟 吴静怡 王如竹 许煜雄(985)
- 023116 太阳能干燥污泥的实验研究.....李惟毅 雷海燕 郑宗和(989)
- 023118 冷却与低温保存对小麦酯酶活性的影响.....
.....肖建军 华泽钊 陈儿同 王仲海(993)
- 023130 拉伸麦管实现玻璃化保存的热特性分析.....周国燕 华泽钊 匡延平(997)

- 023131 瓶装药液冻干过程中搁板预冻特性分析.....苏树强 肖洪海 华泽钊(1001)
- 023132 营养粥的冻干实验研究.....肖洪海 苏树强 华泽钊(1005)
- 023133 空间等效热沉与热泵蓄冷系统动态特性.....
.....王爱华 李明海 徐向华 梁新刚(1009)
- 023138 液体除湿空调再生性能的实验研究.....孙 健 施明恒 赵 云(1013)
- 023143 微波处理对植物种子的生物学效应研究.....
.....杨俊红 郭锦棠 江 莎 张仲柱(1017)
- 023151 多孔性固体内气体传递反应双阶段描述.....
.....颜 岩 彭晓峰 王补宣 李笃中(1021)
- 023152 板翅式机油冷却器的传热特性研究
.....徐之平 任禾盛 陈玉兵 薛文标 徐柏强(1025)
- 023153 场协同条件下的换热器恒热流换热研究.....崔国民 卢洪波 李美玲(1029)
- 023154 大空间室内空调制冷制热过程 DSMC 模拟.....
.....崔国民 赵永芹 刘 丹 黎宏程(1033)
- 023155 多股流换热器优化运行和控制研究...崔国民 卢洪波 李美玲 蔡祖恢(1037)
- 023156 换热器及其网络精确数学控制研究.....崔国民 马 晋 李美玲(1041)
- 023157 板翅式换热器的动态特性分析解.....关 欣 罗 行 李美玲 蔡祖恢(1045)
- 023158 多股流板翅式换热器翅片旁通分析.....卢洪波 崔国民 李美玲(1049)
- 023159 基于稳态的高效换热器前馈控制算法研究.....
.....马 晋 崔国民 卢洪波 李美玲(1053)
- 023161 Investigation of lateral heat conduction of fins in plate-fin heat exchangers.....
.....Xin Guan Xing Luo Meiling Li Wilfried Roetzel(1057)
- 023170 电站凝汽器胶球清洗装置最优运行工况的综合评价.....刘雪峰 刘金平(1061)
- 023185 微波辅助提取甘草酸的优化实验研究.....杨俊红 郭锦棠 邢志芹(1065)
- 023188 强化翅片适用性分析.....闵敬春(1069)
- 023191 用于除湿转轮的硅胶-氯化钙复合干燥剂材料动态除湿性能的实验研究...
.....张学军 代彦军 王如竹 陈振豪(1073)
- 023194 氙气透过钽管异常发热的实验研究.....
.....吴 伟 雷树业 杜建华 李兴中 马 斌 郝锦志 王补宣(1077)
- 023211 纳米 TiO_2 涂料在空气净化中的应用研究.....
.....瞿学红 肖劲松 姜 曙 尹雪云 王 超 马重芳(1081)
- 023212 建材挥发性有机化合物散发模型及应用.....许 瑛 张寅平(1085)
- 023215 列车客车用低温电地板辐射供暖传热模拟.....
.....孔祥强 李 瑛 胡松涛 王如竹(1089)
- 023232 脉动热管的接触角滞后和毛细滞后阻力.....曲 伟 范春利 马同泽(1093)
- 023234 飞机环境控制系统的焓参数匹配方法.....王安良 杨春信 胡创利(1097)

023240	水分对质子交换膜燃料电池阴极传递过程的影响·····	
	·····	周圆圆 彭晓峰 王补宣(1101)
023241	板翅式换热器瞬态温度响应新模型···	朱 彤 关 欣 李美玲 罗 行(1105)
023242	多流股换热器及其网络的矩阵算法·····	
	·····	罗 行 W.Roetzel 魏关锋 姚平经(1109)
023244	聚光条件下太阳电池的热电特性分析·····	
	·····	吴玉庭 任建勋 梁新刚 过增元(1113)
023252	强化换热表面热力性能的评价·····	吕 静 王中铮(1117)
023256	变压器油圆形自由表面射流冲击换热特性的实验研究·····	
	·····	冷 浩 张西民 郭烈锦 马重芳(1121)
023268	CPC 集热器在太阳能吸附制冷系统中的应用·····	
	·····	司徒伟光 代彦军 王如竹(1125)
023269	套管型太阳能吸附集热器实验研究·····	代彦军 李春华 王如竹(1129)
023273	网格式内冷通道换热与流阻特性实验研究·····	
	·····	张 勃 张靖周 吉洪湖 高 潮(1133)
023275	离心力场作用下场协同理论的探讨 (1)理论分析·····	吉洪湖(1137)
023276	离心力场作用下场协同理论的探讨 (2)旋转盘腔传热特性的分析·····	
	·····	吉洪湖(1141)
023286	低温干燥机的最适宜设计技术开发·····	赵耀华 张春平 鹤田隆治(1145)
023287	电子器件在制造过程中的均匀化加热法的开发研究·····	
	·····	赵耀华 刘志刚 鹤田隆治(1149)
023292	光催化净化室内空气的实验研究·····	
	·····	尹雪云 夏国栋 鹿院卫 姜 曙 訾学红 马重芳 关雅贤(1153)
023293	空气净化器内部结构对其净化效率的影响·····	
	·····	鹿院卫 夏国栋 尹雪云 马重芳 关雅贤(1157)
023297	流化床谷物干燥模型的研究·····	杨 历 王永刚 尚德库(1161)
023302	流体振荡特性的实验研究及对换热的强化·····	
	·····	谢晓刚 黄 双 曾丹苓 刘 朝(1165)
023305	翅片管换热器结霜时霜密度和厚度的变化·····	姚 杨 姜益强 马最良(1169)
023306	新型热法磷酸燃磷塔的传热分析与计算·····	蒋家羚 刘宝庆(1173)
023309	高密度电子封装器件的传热过程研究·····	周子民 王锡范 黄学章
	·····	邓胜祥 杨 莺 Xitao Wang Liu Chen Johan Liu(1177)

激光热疗中生物组织热响应与热损伤研究*

朱光明 刘伟 杨昆 T. F. Zeng¹

华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉, 430074

Tel: 027-87549284 E-mail: zhu_gm@yahoo.com.cn

¹Department of Mechanical & Aerospace Engineering, North Carolina State University, USA

摘要: 充分考虑到生物组织的光学、热学特性参数以及血液灌注率与组织温度和热损伤的依赖关系, 模拟了激光热疗激光在生物组织中的传输、生物组织的动态热响应和热损伤, 以及血液灌注率的变化。通过分析激光功率对热疗效应的影响, 得出了一些有益于肿瘤热疗的结论。

关键词: 激光, 热疗, 温度场, 热损伤, 生物组织

1 引言

温热疗法是利用外加能量在含肿瘤组织中产生一定范围的高温, 达到杀死癌细胞而不伤害正常细胞的目的。常见的外加能源包括激光、微波、超声等。有效加热肿瘤患区使其处于治疗高温范围(41—45°C), 并尽量不损伤周围正常组织, 是提高疗效的关键^[1,2]。

利用光导纤维, 通过外科手术、内镜或者皮下通道将激光能量直接送到要治疗部位进行加热的方法称为激光热疗。以激光作热源, 势必涉及到激光在组织中的传输、与组织的热相互作用, 涉及到热在组织中的传递, 涉及到激光能量与加热时间对组织温度场的影响。本文以球形激光治疗头作热源发生器, 就上述问题给出了数学上的定量描述, 据模拟计算结果, 揭示了组织的动态温度场, 热损伤以及血液灌注率的变化。

2 激光在生物组织中的传播和热相互作用

由于生物组织的不均匀性, 在组织光学中常用扩散传输理论替代 Maxwell 方程来描述激光在生物组织中的行为。生物组织主要的光学特性参数包括吸收系数 μ_a , 散射系数 μ_s , 散射各向异性因子 g 以及有效衰减系数 μ_{eff} 。

激光在组织中的扩散传输, 即在组织中的光通量可通过求解光学扩散方程获得。

稳态光学扩散方程: $\nabla^2 \Phi_d - 3\mu_a \mu_{eff} \Phi_d = -\mu_s' / D \Phi_c$ (1)

球形治疗器表面的边界条件: $\partial \Phi_d / \partial r|_{r=r_0} = 0$ 。

求解以上方程和边界条件, 可得激光在组织中的球对称光通量分布^[3]:

$$\Phi_r = P_0 \exp(-\mu_{eff}(r-r_0)) / (4\pi r_0 r) \quad (r > r_0) \quad (2)$$

以上各式中, $\mu_s' = \mu_s(1-g)$ 称为约化散射系数, $D = 1/3\mu_{eff}$ 为扩散系数, $P_0(W)$ 为激光入射功率, r 为距离激光治疗头的径向距离, r_0 为球形激光头半径。

激光对组织的热作用包括三个过程^[2]: 光热转换, 热量传输以及组织反应。这三个

*国家自然科学基金重点基金(No.59836240)资助项目。

过程使被辐照组织产生变性。影响这种变性最重要的是两个参数：激光特性参数，如功率、波长、照射时间等；以及被照射组织的特性，包括光学特性参数如吸收和散射系数，以及热学特性参数如热导率等^[1]。激光照射期间，组织中的原子、分子吸收作用于其上的光子能量而被激活，其运动加剧，动能增加；分子、原子相互碰撞的频率也增加；碰撞使动能逐渐减弱并转化为热能。热在组织中的积聚是光子能量被组织吸收的缘故。

由光热转换机制我们可以发现激光产热功率与光通量间的关系，由式(2)可以得到：

$$Q(r) = \mu_a P_0 \exp(-\mu_{eff}(r-r_0)) / (4\pi r_0 r) \quad (3)$$

式中， μ_a 为组织对激光的吸收系数。

3 生物传热方程及组织热损伤模型

忽略组织光学和热学参数的各向异性和不均匀性，对球形激光头而言，激光及其热源在组织中的分布是球对称的，只需考察径向的光、热和损伤分布。激光被组织吸收产热，热在组织中的传播是一个动态过程。传热方程可用 Pennes 方程^[1,4]来描述：

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_b + Q_m + Q_r \quad (4)$$

其中， $Q_b = W_b C_b (T_a - T_v) \approx W_b C_b (T_a - T)$ 为血流项， Q_m 为代谢热产， Q_r 为激光外加热源。边界条件： $r = r_0$ ：绝热； $r \rightarrow \infty$ ： $T = 37^\circ\text{C}$ 。初始条件： $T(r, 0) = T_0 = 37^\circ\text{C}$ 。

Henriques^[5]认为，生物组织的热损伤机理有三种：(1)蛋白凝固；(2)代谢过程改变；(3)细胞正常化学结构发生改变。在激光作用下，组织产生温升，温升带来不可逆的热损伤或热凝固。根据 Arrhenius 方程，组织损伤程度可以用损伤累积 Ω 来定量。

$$\Omega = -\ln \frac{C(t)}{C(t_0)} = A \int_0^t \exp\left(-\frac{E}{RT(t)}\right) dt \quad (5)$$

式中， $C(t_0)$ 表示初始时刻 t_0 未损伤组织部分； $C(t)$ 为时刻 t 未损伤部分； $A(s^{-1})$ 是频率因子； $E(\text{J/mol})$ 是活化能； $R(\text{J/mol K})$ 为普适气体常数。 $\Omega=1$ 时组织将发生不可逆热损伤。

4 依赖于温度和热损伤的血液灌注率

对血液灌注热影响的研究是生物传热学中一个极为重要和关键的部分。一般的处理是将血液灌注率取为某一常数或者作为温度的某种函数。在本文中，考虑到组织受激光照射会产生可逆或不可逆热损伤，这种变性也会影响血液的流动，也即血液灌注率应是组织温度和组织损伤的函数。根据 Beop-Min^[5] 的假定，血液灌注率为 $W = W_0(1 + aT) \exp(-\Omega)$ 。式中， W_0 为不同温度下未出现损伤的血液灌注最大值， a 是比例系数，通常取 0.09， Ω 为热损伤累积。由上式可见，温度升高会使血液灌注率增大，但随着损伤的积累，血液灌注率又逐渐变小。

5 数值计算及讨论

方程(3)-(5)为生物传热能量方程和热损伤方程。数值计算结果见图 1-8。

图 1-6 反映激光输出功率 $p_0=1\text{W}$ ，激光头尺寸为 $r_0=0.8\text{mm}$ 时的热响应、热损伤、激光热源以及血液灌注率的动态变化。分析图 1 可以发现，在激光加热期间($\leq 600\text{s}$)，激

光产热的空间变化趋势基本相同，热在半径方向是迅速衰减的。加热初期，激光的热产主要集中在半径不大于 5mm 的狭小空间里。随着激光照射时间的推移，远离激光头的区域热产开始明显增大，在加热末期，有明显热产的区域半径大约为 8mm。这意味着激光的热效应引起了生物组织的热损伤，从而使相应区域的组织光学特性参数发生了变化，改变了光在组织中的分布。随着时间的推移，热损伤区域变大，激光的传输距离也就相应加大。图 2-4 表现组织温度随时间和空间的变化趋势。从图中可以发现，在整个热疗期间，半径 10mm 以内的区域能够处于 40℃ 以上的有效热疗温度范围，这与图 5 所反映出的 $r < 10\text{mm}$ 区域内热损伤 $\Omega \geq 1$ (组织发生了不可逆热损伤) 是一致的。近中心处组织最高温度出现在时间 $t=600\text{s}$ 处，而随半径的增大，最高温度存在明显时间滞后，这是组织热惯性的缘故。观察图 5 可见，热损伤的出现与时间、温度紧密相关，越靠近中心，不可逆损伤出现越早，损伤值越大。图 6 是血液灌注率的变化趋势，越靠近中心 W_b 越小，在时间方向有相同的变化趋势。

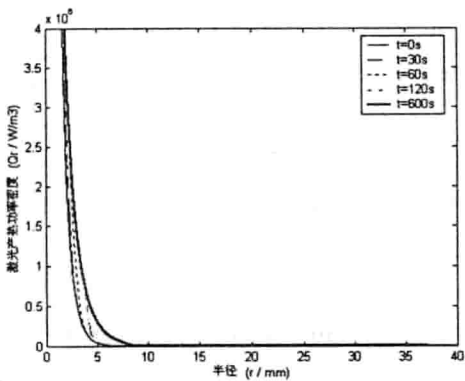


图 1. $p_0=1\text{W}$ 激光光热转换功率分布

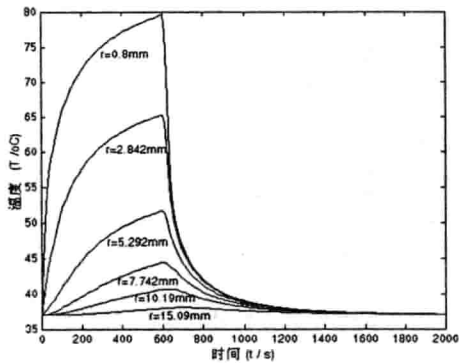


图 2. $p_0=1\text{W}$ 时组织各特征点的温度响应

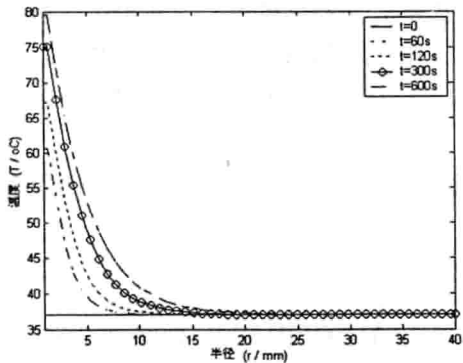


图 3 $p_0=1\text{W}$ 时组织温度随时间变化(加热区间)

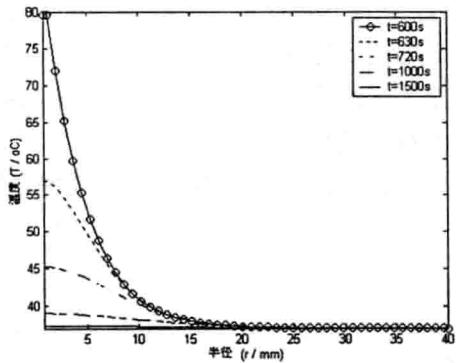


图 4. $p_0=1\text{W}$ 时组织温度随时间变化 (停止加热)

激光功率加大，带来的必然结果是相对应处组织温度的升高。比较图 2 和图 7、图 5 和图 8 发现，当激光功率由 1W 提高到 2W 时，靠近中心处的组织最高温度超过了 120℃，此时激光的热效应已不再仅仅是热凝固，而是在组织中出现了汽化、热分解甚至炭化。此时有效热疗空间增大到半径 15mm，出现不可逆热损伤的区域也达到相应的 15mm。

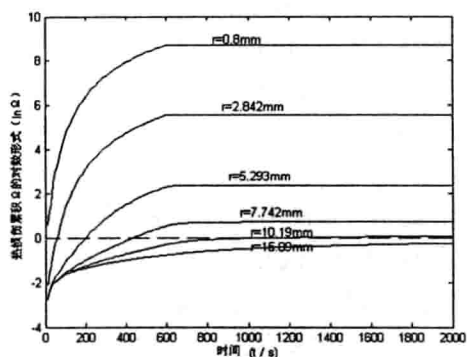


图 5. $p_0=1W$ 时的热损伤累积示意图

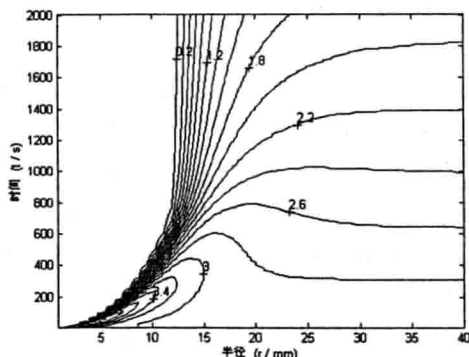


图 6. $p_0=1W$ 组织内部血液灌注率随时间和半径变化

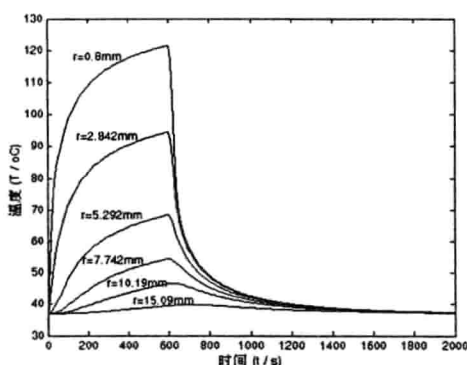


图 7. $p_0=2W$ 时各特征点组织的温度响应

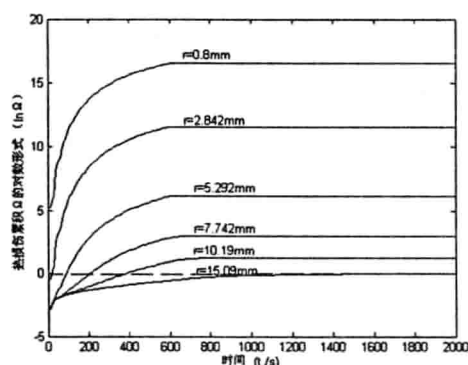


图 8. $p_0=2W$ 时的热损伤累积示意图

6 结 论

从以上的结果分析可以得到如下结论:

(1) 在激光热疗中, 越靠近激光头组织温度越高, 热损伤越大; 出现不可逆热损伤的区域与达到有效热疗温度范围的区域近似一致。在热疗过程中, 组织血液灌注率在大部分空间里都是随热疗时间而减小的, 这是组织出现热损伤时血液中某些成份也发生凝固的缘故, 这种减小有利于激光的热疗效果。

(2) 激光输入功率的加大会明显提高热疗效果, 但功率过大可能会使局部组织温度过高而产生组织液汽化甚至组织炭化。

参考文献

1. 王补宣, 蔡伟明, 吴郁龙, 组织间激光血卟啉治疗肿瘤的瞬态温度场的理论和动物实验研究, 工程热物理学报, Vol. 9, 147-152, 1988
2. Markfol Niemz, Laser-Tissue Interactions, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
3. Ashley J. Welch, Martin J. C. van Gement, optical-thermal response of laser-irradiated tissue, Plenum press, New York and London, 1995
4. J.C. Chato, Fundamentals of Bioheat Transfer, Springer-Verlag, 1989
5. Henriques F. C., Moritz A. R., Studies of thermal injury I, The conduction of heat to and through skin and the temperature attained therein, a theoretical and an experimental investigation, Am. J. Pathol., Vol. 23, 1947

脉动流对动脉中血液对流传热的影响¹

杨昆 刘伟 朱光明

华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉, 430074

Tel: (027)87542618 Email: weiliu@public.wh.hb.cn

摘要: 本文研究了动脉中脉动流的传热特性。根据完整的 NS 方程和能量方程建立了血管中非稳态流动和传热的模型。针对几种典型的动脉血管, 采用 SIMPLE 算法进行了数值求解, 获得了血流脉动时动脉中周期性的速度解及温度解。研究表明, 脉动的血流造成血管壁面处周期性的热流分布, 而一个脉动周期内的平均壁面热流与假设血液稳态无脉动流动时血管壁面处热流的差别最大不超过 4.7%, 平均不超过 3.2%。

关键词: 脉动流, 温度分布, 壁面热流, 生物传热

1 前言

血管中血液对流传热是生物体中热量传递的主要方式。由于心脏的周期性射血, 使得动脉中的血流呈脉动流方式。这种脉动流必然会对生物组织中的质量传递和能量传递造成影响。关于脉动流对血管中速度分布的影响, Womersley^[1]、Atabek^[2]等人的工作奠定了脉动流理论的基础。Siegel 和 Perlmutter^[3]分析了平板间的脉动流对对流传热的影响, 求得了温度分布的解析解, 证明了传热对脉动频率的依赖性。Cho 和 Hyun^[4]根据能量方程和边界层流动方程进行耦合计算, 数值求解了圆管中脉动流对流动和传热的影响。Craciunescu 和 Clegg^[5]根据完整的 Navier-Stokes 方程和能量方程, 在人体组织生理参数范围内, 采用有限元方法数值求解了血管中的脉动速度场及相应的温度场。该文重点研究了不同种类的动脉血管出口处的温度分布, 没有涉及整个血管长度上不同截面的温度分布, 也没有对血管壁面处换热进行研究。因此, 本文根据完整的 NS 方程和能量方程, 研究了生物组织中脉动流对几种典型动脉中的温度分布及对流传热的影响。

2 数学模型及其数值求解

2.1 基本假设

- a、血管可看做圆柱管, 血液的流动是轴对称的层流流动, 血管壁是刚性的;
- b、血液为不可压缩牛顿流体, 各物性参数均不随温度变化, 取常值;
- c、血管中脉动的周期是恒定的, 血管入口处的脉动速度取正弦函数的形式。

2.2 控制方程

取 x 坐标轴与管轴重合, 以 r 表示径向坐标, 血液流动和传热的控制方程如下:

- a、连续性方程:
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0$$
- b、动量方程:
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{v}{r^2} \right)$$
- c、能量方程:
$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

式中, u 和 v 分别为血流速度在 x 和 r 方向上的分量, T 表示温度, ρ 为血液密度, α ($\alpha = k/\rho C_b$) 为血液热扩散率, k 为血液热导率, C_b 为血液比热, ν 为血液的运动粘度。

2.3 边界条件

¹国家自然科学基金重点基金资助项目 (No.59836240)

$$\begin{aligned}
\text{当 } x=0: & \quad u(0, r, t) = u_m(1 + A \sin(\omega t)) & \quad v(0, r, t) = 0 & \quad T(0, r, t) = T_m \\
\text{当 } r=0: & \quad \frac{\partial u}{\partial r}(x, 0, t) = 0 & \quad v(x, 0, t) = 0 & \quad \frac{\partial T}{\partial r}(x, 0, t) = 0 \\
\text{当 } r=R: & \quad u(x, R, t) = 0 & \quad v(x, R, t) = 0 & \quad T(x, R, t) = T_w \\
\text{当 } x=L: & \quad \frac{\partial v}{\partial x}(L, r, t) = 0 & \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0 & \quad \frac{\partial T}{\partial x}(L, r, t) = 0
\end{aligned}$$

我们采用 SIMPLE 算法求解上述方程。血管参数如表 1，其中 a 为 Womersley 数，

$$a = R \sqrt{\omega \nu}。$$

表 1、Chato 从 Mall(1887)的数据中推测得到的 13kg 重的狗的血管参数^[6]

3 结果和讨论

为了验证本文计算结果的可靠性，我们将本文计算结果与文献[3]进行了比较。文献[3]认为对于圆管中的脉动流，速度分布也存在着充分发展段，并且给出了充分发展段速度分布的精确解。本文的计算亦证实了这一点。图 1 是心率为 90beats/min 时，不同时刻末梢动脉不同轴向位置的轴向速度分布。可以看出，不同轴向位置 ($x/L=0.5, 0.7, 1$) 处的轴向速度分布几乎完全重合，这说明在末梢动脉的末端，血液速度场已经是充分发展了的。图 2 为心率为 90beats/min， $x/L=0.7$ 时末梢动脉不同径向位置处的轴向速度随时间的变化。由图 2 可见，本文的计算结果与文献给出的理论解是一致的。

血管	半径 R (mm)	长度 L (mm)	u_m (mm/s)	心率 (beats/min)	a
主动脉	5	400	500	60	7.21
				90	8.83
				120	10.20
大动脉	1.5	200	130	60	2.16
				90	2.65
				120	3.06
末梢动脉	0.3	10	60	60	0.43
				90	0.53
				120	0.61

不同轴向位置 ($x/L=0.5, 0.7, 1$) 处的轴向速度分布几乎完全重合，这说明在末梢动脉的末端，血液速度场已经是充分发展了的。图 2 为心率为 90beats/min， $x/L=0.7$ 时末梢动脉不同径向位置处的轴向速度随时间的变化。由图 2 可见，本文的计算结果与文献给出的理论解是一致的。

图 3 (a-c) 是主动脉、大动脉及末梢动脉中一个脉动周期内的平均温度分布。在每一种血管的不同轴截面上，不同的 Womersley 数对应的时均温度分布曲线基本上互相重合，这说明 Womersley 数对血管中时均温度分布的影响很小。在主动脉，血管中心区域 ($r/R<0.7$) 的时均温度分布剖面比较平坦，其数值上等于血管入口处的温度，时均温度变化剧烈的地方处于靠近血管壁面的狭窄区域；随着向血管下游的发展，中心时均温度分布平坦的区域变窄。在大动脉的下游截面，血管中心区域的时均温度分布已经不再平坦。在末梢动脉，除了靠近血管入口的一小段区域外，血管中不存在时均温度分布平坦的区域。

图 4-6 是主动脉、大动脉和末梢动脉中不同轴截面上的脉动温度 T_i 分布。有关参数定义如下： $T_i = T - T_m$ ， $T_m = \frac{\int_0^{2\pi/\omega} T \cdot dt}{2\pi/\omega}$ ， $(T_i^2)_m = \frac{\int_0^{2\pi/\omega} T_i^2 \cdot dt}{2\pi/\omega}$ 。 T_m 为一个周期内温度的平均值， $(T_i^2)_m$ 是一个脉动周期内脉动温度平方的平均值，它反映了温度脉动的幅度。在主动脉中，脉动温度主要分布在靠近管壁处，在血管径向的大部分区域 ($r/R<0.7$)，脉动温度接近等于 0。在同一径向位置，Womersley 数越大，温度脉动的幅度越小，非零的脉动温度所占宽度也越小。随着向血管的下游方向移动， $(T_i^2)_m$ 的峰值往轴心方向靠近，非零的脉动温度所占宽度也增加。在末梢动脉中，温度脉动的幅度比主动脉和大动脉要大，在末梢动脉的进口区域，血管中心处的脉动温度同样接近于 0，而在末梢动脉的下游， $(T_i^2)_m$ 的峰值已经发展到血管轴心处。大动脉的情形则介于主动脉和末梢动脉之间，在大动脉的下游，轴心处的脉动温度已经不等于 0。

图 7-9 为主动脉、大动脉及末梢动脉中不同轴向位置处的壁面热流分布。壁面热流 q_a 及一个脉动周期内壁面平均热流 q_{am} 的定义如下： $q_a = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R}$ ， $q_{am} = \frac{\int_0^{2\pi/\omega} q_a \cdot dt}{2\pi/\omega}$ 。可见，

血管壁面处热流随时间呈周期性变化，Womersley 数越大，其变化的幅度越小，越往血管的下游处，变化的幅度也越小。与血管入口处的脉动速度相比，壁面处热流在相位上存在滞后，这一趋势在主动脉中表现得尤为明显。

图 10 为主动脉、大动脉及末梢动脉中一个脉动周期内壁面平均热流 q_{am} 沿血管轴向

的分布, 为与之相比较, 图中还给出了相应的稳态流动时壁面热流 q_{as} 沿血管轴向的变化。可见, 对于不同的 Womersley 数, 各血管中脉动流对应的血管壁面时均热流分布与其相应的稳态时壁面热流分布差别不大。因此, 表 2 中进一步比较了二者的差别。表 2 中, $(q_{am} - q_{as})_m = \int_0^L (q_{am} - q_{as}) \cdot dx / L$ 。

由表 2 可知, 在本文的计算条件下, 脉动流对应的血管壁面时均热流与其相应的稳态壁面热流的差别最大不超过 4.7%, 两者在整个血管长度上的平均差别不超过 3.2%。在末梢动脉中, 两者的差别大于它们在主动脉和大动脉中的差别。在每一种血管中, 随着 Womersley 数的增加, 两者在整个管长上的平均差别变小。

表 2 q_a 稳态值与其一个脉动周期内的平均值的比较

血管	$Re = \frac{u_m R}{\nu}$	心率 (beats/min)	$\frac{(q_{am} - q_{as})_{max}}{q_{as}}$	$\frac{(q_{am} - q_{as})_m}{q_{as}}$
主动脉	828	60	2.55%	0.37%
		90	2.52%	0.27%
		120	2.47%	0.22%
大动脉	64.6	60	1.74%	0.25%
		90	1.75%	0.16%
		120	1.75%	0.13%
末梢动脉	5.96	60	4.67%	3.19%
		90	4.09%	3.02%
		120	3.37%	2.76%

参考文献

- [1]. 柳兆荣, 心血管流体力学, 复旦大学出版社, 1986, p213
- [2]. Atabek, H. B., Chang, C. C., Oscillatory Flow near the Entry of a Circular Tube, Z. Angew. Math. Phys., 1961,12, 185-201
- [3]. Siegel, R., Perlmutter, M., Heat Transfer for Pulsating Laminar Duct Flow, Trans. ASME J. Heat transfer, 1962, 111-123
- [4]. Cho, H. W., Hyun, J. M., Numerical solutions of pulsating flow and heat transfer characteristics in a pipe, Int. J. Heat and Fluid Flow, 1990, Vol. 11, NO. 4, 321-330
- [5]. Craciunescu, O. I., Clegg, S. T., Pulsatile Blood Flow Effects on Temperature Distribution and Heat Transfer in Rigid Vessels, Trans. of ASME, Journal of Biomechanical Engineering, 2001, Vol. 123, 500-505
- [6]. 刘静, 王存诚, 生物传热学, 科学出版社, 1997, p135

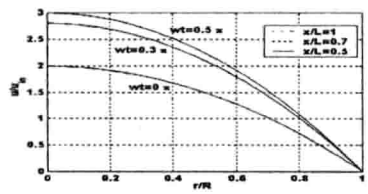


Figure 1 Profile of the axial velocity in the terminal arteries. Calculations for Womersley number corresponding to 90beats/min

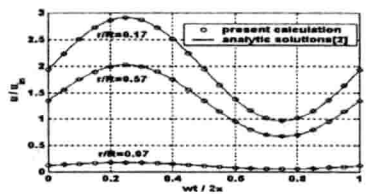


Figure 2 The temporal behavior of axial velocity in the terminal arteries, $x/L=0.7$, $a=0.53$

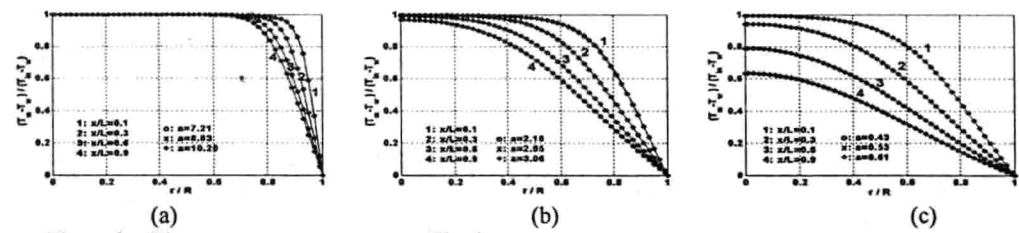
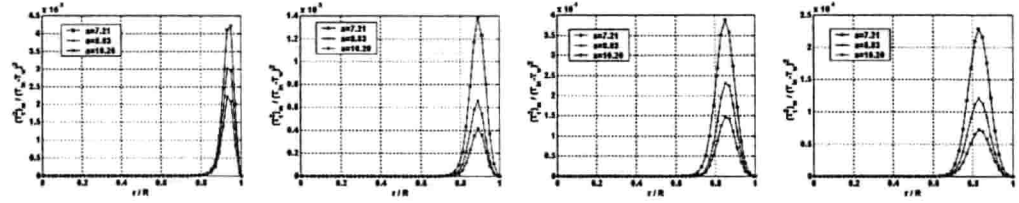


Figure 3 The average temperature profiles in: (a) the aorta, (b) the large arteries, (c) the terminal arteries



(a) $x/L=0.1$ (b) $x/L=0.3$ (c) $x/L=0.6$ (d) $x/L=0.9$

Figure 4 The profiles of $(T^2)_m$ in the aorta

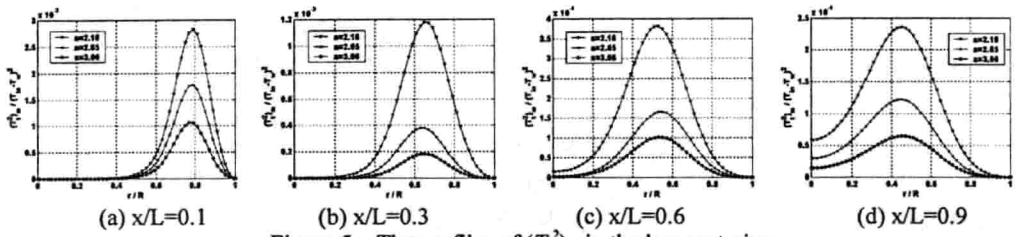


Figure 5 The profiles of $(T_i^2)_m$ in the large arteries

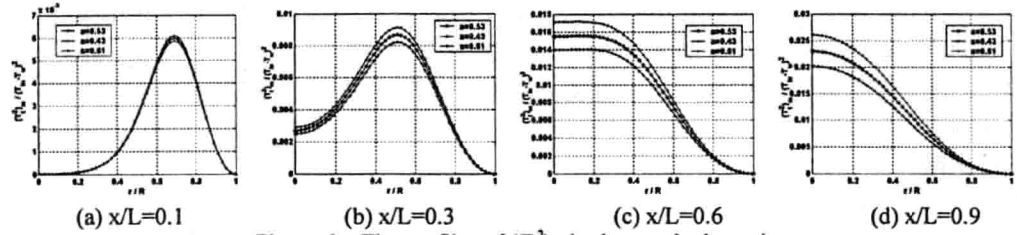


Figure 6 The profiles of $(T_i^2)_m$ in the terminal arteries

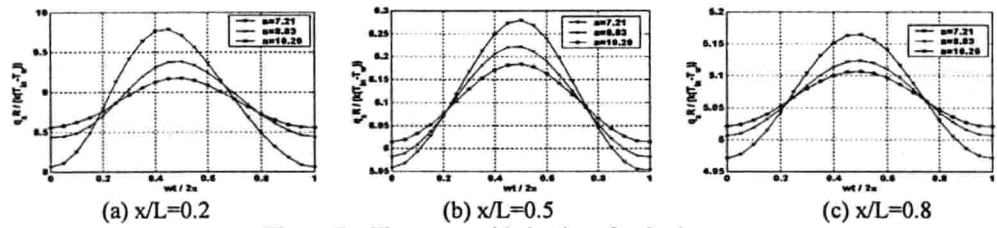


Figure 7 The temporal behavior of q_a in the aorta

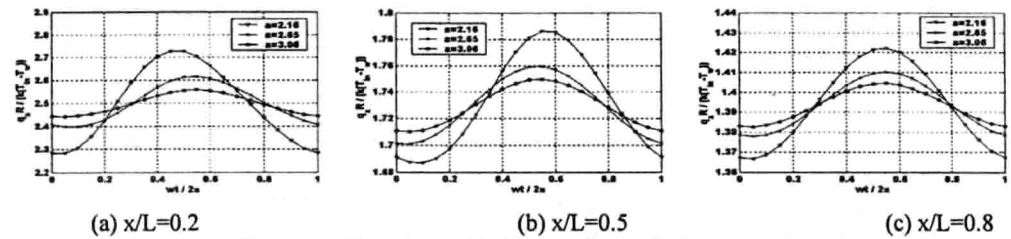


Figure 8 The temporal behavior of q_a in the large arteries

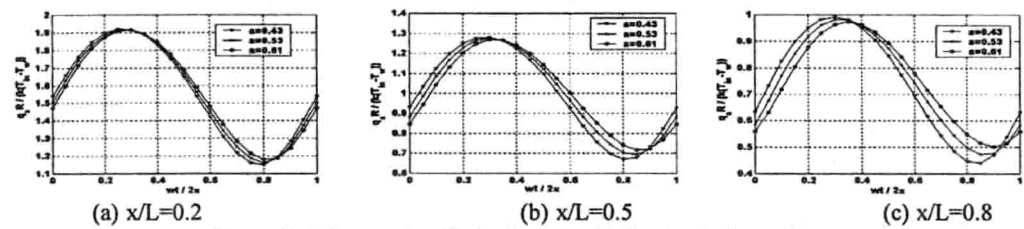


Figure 9 The temporal behavior of q_a in the terminal arteries

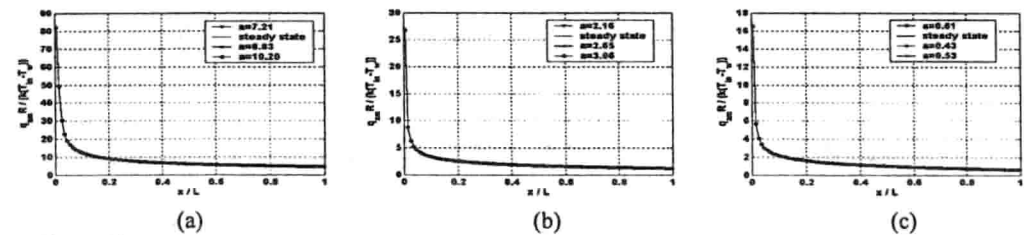


Figure 10 The profiles of the time-average heat flux q_{am} in: (a) the aorta, (b) the large arteries, (c) the terminal arteries

生物组织内含大血管时激光传输 和热传递的数值模拟

周建华 刘 静*

中国科学院理化技术研究所低温中心 北京 100080

(*联系电话: 010-62639266, E-mail: jliu@cl.cryo.ac.cn)

摘 要: 对生物组织内含大血管时的激光传输和热传递问题进行了数值模拟。首先, 考虑了血液流动所引起的光学性质的改变, 采用蒙特卡罗法模拟了光子在组织和血液中的传输。然后采用生物传热方程得到了当血液与组织达充分热平衡时, 激光照射下组织内的三维温度分布。计算结果表明, 大血管将对组织内的激光传输和热传递过程产生较大影响, 是必须着重加以考虑的因素。

一. 引言

自从 1980 年 Welch 等^[1]沿用 Pennes 生物传热模型将血液流动对传热的影响处理为体积热源, 讨论了激光照射下生物组织内的传热过程以后, 激光生物传热领域内的大部分研究工作基本都沿用了这一结论 (例如文献^[2])。这样的处理对于血流均匀分布的组织来说, 也许能得到令人较为满意的结果; 但对于含有大血管的组织来说, 这种处理方法就很不恰当。事实上, 来自传统生物传热领域的一系列卓有成效的研究 (例如文献^[3,4]) 表明, 单根血管、两平行逆流血管对整个组织的温度响应会产生非常重要的影响。然而迄今为止, 在激光生物传热领域内, 很少有研究者计及这种大血管对组织传热所带来的显著影响。

二. 模型描述

考虑如图 1 所示的含有单根大血管的圆柱体组织。它由两个不同半径的同心圆柱体组成, 里面的圆柱体表示大血管, 外面的圆柱体表示组织。无限细激光束沿圆柱体组织外表面的法线方向照射到组织表面。

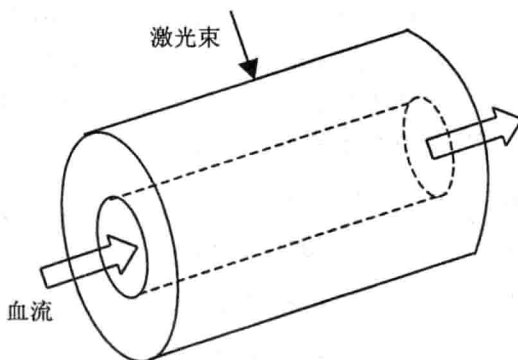


图 1 物理模型

1. 激光传输

血液和组织对同一波长激光的吸收和散射特性是不一样的。另外, 当激光束照射到流动着的血液时, 将引起激光传输频率的改变 (多普勒效应), 引起血液光学性质的进一步变化。因此在激光传输模拟中, 必须考虑血液和组织的光学性质的不同。

本文采用蒙特卡罗法^[5]模拟光在组织和血管内的传输。在这种方法中，光子在每个点处的散射步长和散射方向都是随机的。其中，散射步长由下式抽样得到：

$$s = \frac{-\ln \xi}{\mu_t} \quad (1)$$

式中， ξ 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数； μ_t 为衰减系数，等于吸收系数 μ_a 和散射系数 μ_s 之和。散射方向（由偏转角 θ 和方位角 ϕ 定义）则由下两式抽样得到：

$$\cos \theta = \begin{cases} \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left(\frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\xi} \right)^2 \right] & (g > 0) \\ 2\xi - 1 & (g = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi = 2\pi\xi \quad (3)$$

式中， g 为各向异性因子。它是 $\cos \theta$ 的平均值，能反映光子前向散射的程度。 $g=1$ 表示纯前向散射， $g=-1$ 表示纯后向散射， $g=0$ 表示各向同性散射。

光子在初始位置处赋予权值 1，在传播过程中由于组织的吸收从边界的逸出，此权值将持续减少。当光子权值小到一个预定的截止阈值时，则终止该光子的监测过程。

对大量光子进行重复跟踪后，得到每一空间位置 $[i, j, k]$ 处被吸收的光子权值的累加值 $Q[i, j, k]$ 。实际的体积内热源分布根据下式得到（以入射总功率为 1W 的情形为例）：

$$Q[i, j, k] \leftarrow \frac{Q[i, j, k](1Watt)}{NV(i, j, k)} \quad (4)$$

式中， $V(i, j, k)$ 为 $[i, j, k]$ 控制单元的体积， N 为模拟的总光子数。

2. 热传递

由于激光束是从一局部点照射到圆柱体组织外表面的，因此组织内的热传递具有三维效应。本文暂不考虑血液流动与组织的耦合传热，而认为组织与血液已达热平衡，此时可将组织内表面（即与血管壁的交界面）处理为等温边界条件。

圆柱坐标系下的三维常物性稳态导热方程为：

$$\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q + Q_m = 0 \quad (5)$$

式中， r ， φ ， z 分别为径向，圆周方向和轴向的坐标； T 为温度； k 为组织的导热系数； Q 为由于激光照射而产生的内热源，由（4）式得到； Q_m 为组织新陈代谢率。

组织外圆柱面与周围环境为自然对流边界条件。在计算中，由于圆柱体取得足够长，因此端部可考虑为绝热。

三. 结果和讨论

计算中用到的尺寸及物性是：组织半径 0.06cm，血管半径 0.03cm，长度 1cm（该