



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

高等传热学 (第二版)

张靖周 编著



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

高等传热学

(第二版)

张靖周 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在第一版的基础上,结合近年来教学改革成果修订而成的。本书第一版是江苏省高等学校优秀研究生课程建设教材。

全书共 12 章。主要介绍导热的理论基础、导热问题的精确分析解、导热问题的近似分析解、对流换热的基本方程、层流对流换热、湍流对流换热、对流换热的实验研究、热辐射的理论基础、表面间的辐射换热和介质热辐射等基本内容,以及对流换热强化技术、高温燃气与涡轮叶片的换热、航空发动机热端部件典型强化冷却方式和红外抑制器技术 4 个专题。全书采用国际单位制,各章都附有思考题和习题。

本书可作为高等学校航空宇航科学与技术、动力工程及工程热物理等学科研究生的教材或参考书,也可供其他专业选用和有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等传热学/张靖周编著. —2 版. —北京:科学出版社,2015. 2
ISBN 978-7-03-043343-5

I. ①高… II. ①张… III. ①传热学-研究生-教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 026438 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:桂伟利

责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏志印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 2 月第 二 版 印张:22 1/4

2015 年 2 月第二次印刷 字数:570 000

定价:66.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是在第一版的基础上,结合近年来教学改革成果修订而成。

本书第一版被列为江苏省高等学校优秀研究生课程建设教材,是为了适应研究生高等传热学课程教学而编著的。在编著过程中,作者主要基于以下几点思考:

(1) 传热学作为一门系统的科学,在它的形成和发展的历史中,有许多值得我们思索的现象和方法论。有些问题在本科教学中尚无法展开,譬如傅里叶定律适用的条件与非傅里叶效应现象;扩展表面一维导热假定的充分必要条件;牛顿冷却定律中对流换热驱动温差方式定义;对流换热过程中黏性耗散的物理意义;相似流动与相似解;湍流对流换热;发射率与吸收率之间关系的一般表达式;角系数的适定性等。因此本书在内容上注意与本科阶段的传热学内容过渡衔接,循序渐进地深化传热基本理论,阐明一些比较深入的传热分析和计算方法,培养研究生用发展的观点来了解传热学理论体系的形成和发展过程以及趋势。

(2) 理论分析解法对解决很多工程问题发挥了极其重要的作用,在目前仍不失为解决传热问题的一个有效手段。分析解法(又称精确解法)是以数学分析为基础,通过求解微分方程以获得用函数形式表示的温度分布。但是,对于几何形状复杂,变物性或复杂边界条件等问题,分析解往往很烦琐甚至难以获得。随着计算传热学的发展,用数值模拟的方法来解决复杂的传热问题正起到越来越重要的作用,在这种趋势下,本书对高等传热学的教学内容进行了适当调整,尽量避免繁琐的数学分析解法的叙述,而关注物理模型和数学模型的有机结合,强调对传热过程物理模型和机理的阐述以及数学模型建立的思路。

(3) 为了体现航空航天科学技术特色,本书在绪论中扼要介绍了传热研究在航空宇航科学技术中的典型应用背景,在相关章节中充实了直流式对流冷却导向叶片的温度分布、气膜冷却的相似准则推导等内容,在第十二章中针对对流换热强化技术、高温燃气与涡轮叶片的换热、航空发动机热端部件典型强化冷却方式和红外抑制器技术等专题进行了简要叙述。

(4) 为了培养研究生研究性学习的能力以及创新意识,有意识地将国内外部分学者的一些研究成果以及作者在科学研究中取得的研究成果有机纳入本书的相关章节,并提供了一定量的思考题和相关文献,可供读者深入学习时参考。

本书在编著过程中,注重吸取国内外教材及专著的精华,对此在参考文献中均据实列出。

本书在修订中,作了以下几个方面的改进:

(1) 在第一版编著体系和改革创新的基础上,进一步结合专业航空航天科学技术的发展和特点,挖掘传热学基础问题应用的素材。譬如大飞机工程和民用航空发动机技术中,飞行器机翼前缘、发动机进气道的结冰和防冰技术涉及相变对流换热和强化传热基础问题;低污染、低耗油的间冷回热发动机中的关键部件(如间冷器、回热器)涉及换热器设计的基础理论。上述内容在本版教材中得到体现。

(2) 结合传热学理论和强化传热技术的发展,适当补充或完善相关的教学内容。譬如,在绪论“1-3 传热过程分析”中补充了带气膜冷却和热障涂层的火焰筒传热过程热阻分析;在第三章中,增加了“3-2 涡轮叶片尾缘温度分布的简化分析”;在第十一章中,新增了“11-5 被非透明介质隔开的两表面间辐射换热”;在第十二章“12-3 航空发动机热端部件典型强化冷却方

式”中补充了复合冷却。

本书的修订大纲和修订工作主要由张靖周教授完成。在本书的修订及定稿过程中,得到了南京航空航天大学刘德彰教授的热心指导,他对书稿提出了许多宝贵的修改意见,特此致谢。南京航空航天大学传热学教学组的各位同事,特别是谭晓茗副教授和单勇副教授,为本书的修订提供了很多帮助,在此一并表示感谢。

本书在修订过程中,得到了江苏省研究生教育教学改革研究课题和南京航空航天大学研究生教育教学改革研究项目的支持;在修订出版期间,得到了科学出版社的大力支持,使本书得以如期出版。在此表示衷心的感谢。

由于编写时间短促,加之作者对于传热学理论精髓的理解还存在一定的差距,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正。

作 者

2014年11月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1-1 传热研究的进展与展望	2
1-2 传热研究在航空宇航科学技术中的典型应用	4
1-3 传热过程分析	12
1-4 建立合理的能量方程	15
思考与习题	18
参考文献	18
第二章 导热的理论基础	19
2-1 导热的基本定律	19
2-2 导热系数和导热机理	23
2-3 导热问题的完整数学描述	29
2-4 处理导热问题的几个要点	30
2-5 导热问题的求解方法	31
思考与习题	32
参考文献	33
第三章 导热问题的精确分析解	34
3-1 肋片的稳定导热	34
3-2 涡轮叶片尾缘温度分布的简化分析	43
3-3 二维稳态导热	46
3-4 多孔壁导热	53
3-5 直流式对流冷却导向叶片的温度分布	54
3-6 非稳态导热	58
3-7 导热的波动学说	75
思考与习题	81
参考文献	82
第四章 导热问题的近似分析解	84
4-1 二维稳态导热的积分解	84
4-2 一维瞬态导热的积分解	88
4-3 等截面纵向直肋一维修正传热方程及近似解	92
思考与习题	94
参考文献	95
第五章 对流换热的基本方程	96
5-1 对流换热概述	96
5-2 对流换热过程的数学描写	98

5-3	对流换热的边界层微分方程组	105
5-4	外掠平板的边界层积分方程组	110
5-5	湍流时均微分方程组	115
	思考与习题	119
	参考文献	120
第六章	层流对流换热	121
6-1	无限大平行平板间的层流强迫对流换热	121
6-2	常物性流体管内层流强迫对流换热	124
6-3	两侧热流密度不等的平行平板间层流强迫对流换热	131
6-4	层流强迫对流换热的边界层定性分析	133
6-5	外掠平壁层流强迫对流换热的相似解	136
6-6	外掠楔状表面层流强迫对流换热的相似解	145
6-7	高速气流层流强迫对流换热的相似解	151
6-8	外掠平壁层流强迫对流换热的近似解	154
6-9	外掠平壁层流强迫对流换热的雷诺类比	156
6-10	流体在大空间的自然对流换热和蒸气的膜状凝结换热	158
	思考与习题	161
	参考文献	162
第七章	湍流对流换热	164
7-1	湍流的半经验理论与湍流模型	164
7-2	外掠平壁的湍流对流换热	169
7-3	管内湍流对流换热	175
7-4	湍流强迫对流换热的边界层定性分析	181
	思考与习题	183
	参考文献	184
第八章	对流换热的实验研究	185
8-1	相似理论及其应用	185
8-2	气膜冷却的相似准则推导	194
8-3	类比原理及其应用	197
	思考与习题	202
	参考文献	202
第九章	热辐射的理论基础	204
9-1	热辐射的基本概念	204
9-2	黑体辐射	209
9-3	非黑体辐射	213
	思考与习题	222
	参考文献	223
第十章	表面间的辐射换热	224
10-1	角系数	224
10-2	网络法	228

10-3 净热量法	231
10-4 非漫、灰表面辐射换热计算的特点	235
10-5 遮热板	236
思考与习题	238
参考文献	239
第十一章 介质热辐射	240
11-1 介质对辐射能量的吸收、发射和散射	240
11-2 辐射传递方程与辐射能量方程	247
11-3 介质热辐射的计算	250
11-4 介质热辐射的工程计算	255
11-5 被非透明介质隔开的两表面间辐射换热	260
思考与习题	261
参考文献	262
第十二章 传热应用专题	263
12-1 对流换热强化技术	263
12-2 高温燃气与涡轮叶片的换热	276
12-3 航空发动机热端部件典型强化冷却方式	286
12-4 红外抑制器技术	309
思考与习题	319
参考文献	319
附录	322
附录 1 常用单位换算表	322
附录 2 金属材料的密度、比热容和导热系数	323
附录 3 保温、非金属材料的密度和导热系数	324
附录 4 大气压力下几种气体的热物理性质	326
附录 5 空气在不同压力和温度下的热物理性质	330
附录 6 干饱和水蒸气的热物理性质	331
附录 7 大气压力下标准烟气的热物理性质	333
附录 8 大气压力下过热水蒸气的热物理性质	333
附录 9 饱和水的热物理性质	334
附录 10 几种饱和液体的热物理性质	336
附录 11 液态金属的热物理性质	339
附录 12 材料发射率	340
附录 13 双曲线函数表	342
附录 14 贝塞尔函数表	343
附录 15 误差函数或概率积分表	345
附录 16 拉普拉斯变换表	346

第一章 绪 论

传热学是研究由温度差引起的热量传递规律的一门科学。

几乎所有的工程领域都会遇到一些在特定条件下的传热问题,甚至伴随传质同时发生的复杂传热问题。例如,热工和化工技术人员在评价锅炉、制冷机、换热器和反应器等各类动力装置的设备大小、能力和技术经济指标时,就必须进行详细的传热分析;一些工作在高温环境中的部件,如燃气轮机的透平叶片和燃烧室火焰筒能否在设计工况下正常、长期地运行,将取决于保护金属结构材料的冷却措施性能是否可靠、合适,还必须重视热应力和由此引起的形变等问题;许多新兴技术装备,如原子反应堆的堆芯、大功率火箭的喷管、集成的电子器件,以及要求重返地面的航天飞行器等,成功的设计都必须严密控制传热情况,维持合理的预期工作温度;即便对于电机、变压器和轴承等普通装置,在连续工作中同样要防止因超温过热而损伤设备;在机械制造工艺方面,不仅热加工直接牵涉到温度分布和随时间变化速率的控制问题,精密机床在切削加工过程中的切削速度也会引起刀具和工件的发热,影响加工精度和刀具寿命;在航空技术领域,提高涡轮前燃气温度是增加航空发动机推重比、减少燃油消耗的重要措施,随之带来的发动机热端部件的强化冷却以及发动机排气系统的红外辐射抑制等关键技术需要不断研究和突破。所有这些列举的传热问题,归纳起来不外有两种类型:一类是着眼于传热速率的大小及其控制问题,或者增强传热、缩小设备尺寸以提高生产能力,或者削弱传热、避免散热损失以保持设备正常运行的温度控制;另一类则着眼于温度分布及其控制问题。要解决这些问题,都需要以传热学理论为支撑。

近些年来,能源、环境、材料、信息和空间等现代科学技术的进步给传热学学科提出了许多新的研究课题。诸如太阳能、地热能等新能源开发利用中的产热、蓄热和放热问题;空间技术中的微重力场下的传热问题;材料技术中的微尺度传热问题。这些现代科学技术的发展同时也推动了传热学学科的不断发展和完善,促进传热学的理论体系日趋完善,内容不断充实,研究手段也更加完备。可以说传热学是现代技术科学中充满活力的重要基础学科之一。

本书是为了适应研究生高等传热学课程教学而编著的。在编著本书时,主要基于以下几点思考:

(1) 在内容上注意与本科阶段传热学课程的过渡衔接,巩固并加深对传热学基本知识的理解和掌握,形成清晰的基本概念。

传热学是一门与工程实际结合紧密的学科,基本概念较多,分析问题时又常常灵活多变。在多年的教学和科研工作中发现,许多同学独立运用传热学基础知识解决工程实际问题的能力显得比较欠缺;而且很多同学在分析具体的传热现象时,往往暴露出基本概念模糊和基础知识不扎实的问题,甚至存在一些基本知识方面的错误概念。因此本教材在内容上注意与本科阶段传热学学习内容的过渡衔接,针对一些实际的传热问题,启迪学生运用传热学基本知识进行分析问题和解决问题的能力,并且在这种训练过程中巩固并加深学生对传热学基本知识的理解和掌握,形成清晰的基本概念。

(2) 尽量把握好教学内容的深度和广度,严格遵循过程的物理模型,着重启示工程应用和分析研究的基本观点和方法。

传热学作为一门系统的科学,在它的形成和发展的历史中,有许多值得我们思索的现象和方法论。有些问题在本科教学中尚无法展开,譬如导热理论中关于热流密度与温度梯度之间本构关系的发展与非傅里叶效应现象;扩展表面一维导热假定的充分必要条件;黏性耗散的物理意义;流动和对流换热的相似解;湍流对流换热;质量、动量和热量传递的类比律及其应用;发射率与吸收率之间内在联系的一般表达式;辐射换热角系数的适定性等。因此在本科阶段学习的基础上,循序渐进地深化传热基本理论,阐明一些比较深入的传热分析和计算方法,特别是培养分析问题的能力,即如何通过一些合理的假定,把一个较复杂的物理模型予以简化,从而得到数学模型,进而预测或判断趋向,分析影响传热过程的各种因素。

(3) 在特色上更强调对传热过程的物理模型和机理的认识,尽量避免烦琐的数学分析解法的叙述。

在传热学的发展过程中,理论分析解法对解决很多工程问题发挥了极其重要的作用,在目前仍不失为解决传热问题的一个有效手段。分析解法(又称精确解法)是以数学分析为基础,通过求解控制方程,获得用函数形式表示的温度分布。但是,分析解局限于求解比较简单的问题,对于几何形状复杂,变物性或复杂边界条件等问题,分析解往往很烦琐甚至难以获得。随着数值传热学的发展,用数值模拟的方法来解决复杂的传热问题正起到越来越重要的作用。在这种趋势下,我们对高等传热学的教学内容进行了调整,较大幅度地删减了一些烦琐的数学分析解法的叙述。在广泛借鉴国内外相关的高等传热学著作的基础上,特别遴选了清华大学罗棣庵教授编著的《传热应用与分析》的部分内容加以充实,以期使得本教材更强调对过程的物理模型和机理的阐述。

1-1 传热研究的进展与展望

王补宣院士是我国传热学科的奠基人。这里我们节选《面向二十一世纪热科学研究——庆贺王补宣院士七十五寿辰论文集》中王补宣院士撰写的我国传热研究的进展与展望一文,对传热学在我国的兴起与发展,特别是在 20 世纪后期的主要进展进行简要的综合回顾,将有助于展望未来,为迎接 21 世纪的传热学科的发展机遇做好准备。

1-1-1 传热学的开拓是经济和社会发展的需要

自然界到处存在着温度差异和物质多样性与不均匀分布,这是地球生物圈内大气环流和能量自发传递的根本动力。传热学所研究的,是由温度差异引起的能量传递过程,包括有相变、物理或化学反应以及因组分浓度差异伴随发生物质迁移时的传热过程。随着生产的发展,现代工程设计和工艺过程中,经常遇到有关加热、冷却、蒸发、凝结、熔化、凝固、隔热保温等各种各样的实际问题,使传热学迅速发展为当今技术科学中了解各种热物理现象和创新相应技术的主要基础学科,高温部件保护性冷却和干燥的技术进展充实了有传质耦合的传热学内涵。物质存在是千姿百态的,物质世界是多样的,而热只是物质运动形态之一,归属于物质分子无序运动的低位能量,其特征量为宏观统计性的“温度”高低。在改造客观世界的生产斗争中,势必会遇到热量传递的同时出现能的形式之间转化的复杂过程。于是,广义的传热学科被看作“能量传递学”。这当然与能源、动力开发和节约利用密切相关。传热学还和材料的冶炼、熔铸与加工,核能利用与航天动力及热控制,信息器件的温控,生物技术与生物医学工程,环境净化与生态维护、农业工程化以及军事现代化等不同领域都有所关联。特别是当今高科技的迅猛

发展,面临着温度场、速度场、浓度场、电磁场、光场、声场、化学势场等各种场相互耦合下的传热过程和温度控制问题。而计算机的逐渐普及,计算方法和激光、红外等测试技术的持续改进,丰富了传热传质的研究手段,加快了研究进程。

研究传热传质的基本规律及其具体应用,计算给定条件下的传热传质的速率及其控制,寻求传热强化和削弱的技术途径,是传热学研究的主要任务。要求传热分析细微化和传热计算精确化,包括发现新的影响因素及其作用机理,不断完善学科体系,则是发展方向。日新月异的高科技开拓,使科学与技术的传统界线逐渐模糊,学科的人为分割和分化局面受到挑战,正在促进不同学科之间的交叉和趋于新的组合与重整,形成新的学科前沿。传热学必须迎接挑战,抓住机遇,为改造自然环境、造福人类社会和促进我国经济发展与建设做出新的贡献。

1-1-2 能源动力是推动传热学进取的传统领域

能源、材料和信息号称现代文明的三大支柱。材料,包括信息材料的制备与加工,需要能源供应的支撑,而材料与信息技术的发展又在改变着资源开发与利用的面貌。能源是为现代生产活动提供“粮食”。随着工农业规模的发展,传热学只是在 20 世纪初才从物理学的热学部分独立出来而形成专门的学科,开始自成体系地开拓与发展,以适应扩大能源供应量、提高能源利用效率和节约能源消耗的需要。

能源是我国经济和社会发展的战略重点。20 世纪 50 年代初我国就把电力和交通列为两大先行官。20 世纪 80 年代以来的 20 多年间,在动力设备的大型化、核动力开发与安全性研究、飞行器的发射与回收以及热设备的节能等多方面积极开展了导热、对流、辐射和复杂几何形状及复杂边界条件耦合的传热过程的基础和应用研究,开拓了诸如流动沸腾、热流体学、强化传热、热管、气膜冷却等的研究。但在粗放型经济增长方式下我国能源利用效率只是从 1980 年的 28% 提高到 1995 年的 32%, 仍然低于发达国家。强化传热传质和降低散热损失,可望在更高起点上考虑新材料、新工艺等高科技的已有进展,开发出高超紧凑式的多流体换热器,为中、低位工业余热利用、实施能源综合利用的“总能”系统以及多能互补的“泛能”系统开创新局面。

高温电离气体传热与流动特性的研究,对热等离子体的诊断、磁流体发电、电弧技术以及超细粉材料等离子体加工过程等的当今和未来发展是有意义的。核聚变在工业上的实现,有待于解决超高温等离子体在磁场或其他有效约束下脱离与壁面直接接触的特殊防护及其定量的控制。能源利用方式的任何更新,都会对传热分析带来新的具体问题。

1-1-3 环境和生态领域呼唤传热传质研究的渗透

资源、人口与环境是当前国际社会的三大问题。近年来,由于工业的兴起、城市的扩大、人口的增长,使环境污染严重、生态平衡恶化。我国正在执行社会可持续发展的战略,环境和生态领域已经为传热传质研究的应用渗透提供了广阔的新天地。

多孔介质中物质和能量输运是地球生物圈普遍存在的现象。除了致密的金属、岩石和一些塑料之外,几乎所有的固体和类固体材料都不同程度地具有空隙性。地下表层中的石油、天然气和水构成复杂的多元体系,是能源资源勘测和开发的“地热储工程”对象。土壤表层季节性的冻融过程将直接制约着土壤中的水、热迁移的规律,不仅给农业生产,而且给工程建设造成影响。多孔介质传热传质的基础研究是形成交叉和边缘学科的一个潜在出发点。

1-1-4 生命系统中的能量与物质传输的研究亟待开拓

生命系统是典型的开放系统,离不开与赖以生存的环境进行物质和能量的交换。生命活动实际反映出生物体,特别是人体的温度,在中枢神经控制下通过增减组织间血液流量以及汗腺的发汗、寒颤等生理反应而具有自适应的调控本能。生命体的热现象远比无生命“活力”时的复杂。对外界的感受和刺激还会造成心理因素的随机多样性,决定了活体输运过程本质的不定常性,使生化反应和迁移热物性数据测定的不确定性增大,只能具有概率统计性的意义。生物传热的基本方程所描述的是在体组织内的热传播,不涉及相变问题。生物传热的分析所必须面对的难题将是合理估计血流影响的物理数学模型问题。

进展中的低温生物医学技术正在实现生物,包括人体器官和活体细胞与胚胎的长期存活。无论降温还是复温,这些组织都有耐变的适应问题。近年来,国际上也掀起了对食品原料的冷藏保鲜和生物制品的储备与储存问题的深化研究。

1-1-5 微尺度传热的研究是高技术发展中又一个新兴前沿热点

计算机的小型化和微型化带动了微米、纳米技术的兴起。由于半导体材料以及未来的光、声计算机和生物智能型计算机等所使用的材料对温度的高度敏感性,芯片层叠技术发展又加剧了散热的“热障”问题,促使高兆位计算机、超高集成电路和微电子与光电子器件、微机械系统和微电子机械系统的开发亟需空间微尺度管槽中的流动与传热特性的研究,以提供技术储备的可靠数据。计算机的高速化还使芯片受超高频率的冲击,大功率短脉冲激光加工技术同样遇到了时间尺度以纳秒、皮秒,甚至飞秒的超快速过程,并引起所传输光子流能束与物质之间的相互作用问题。在这超短促的高频下,芯片、薄膜材料中会出现波动导热,强化传播中的热量在固体内部的穿透深度。除了空间和时间的微尺度外,在航天技术中将遇到重力微尺度化而使自然对流严重削弱,以至消失的影响。

微尺度下的流动与传热现象与常规的现象将存在本质的区别。譬如黏性的影响在空间微尺度下将发生显著的改变。这方面的研究有待于更多的实验和理论工作。

1-2 传热研究在航空宇航科学技术中的典型应用

1-2-1 燃气涡轮发动机热端部件强化冷却

燃气涡轮发动机的经典理论建立在热力学和气体动力学这些基础科学原理的基础上。随着燃气涡轮发动机循环参数的提高和采用先进的冷却系统,传热研究对促进航空宇航推进理论与工程学科的进步与发展发挥了日益巨大的作用。

提高循环的最高温度是改善各种热动力机械性能最基本的技术途径。以燃气涡轮发动机为例,其理想循环为布莱顿循环,即由两个绝热过程和两个等压过程构成(见图 1-1)。

0—2 为绝热压缩过程,其中 0—1 为气流在进气道中的扩压,1—2 为气流在压气机中的增压过程;

2—3 为气流在燃烧室中的等压加热过程;

3—5 为绝热膨胀过程,其中 3—4 为气流在涡轮中的膨胀过程,4—5 为气流在尾喷管中的膨胀过程。

根据工程热力学理论,单位质量气体的理想循环功为

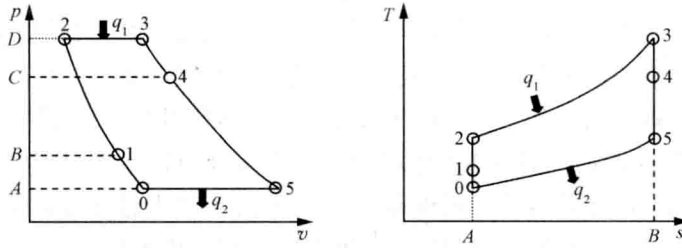


图 1-1 燃气涡轮发动机的理想循环

$$\omega_0 = c_p [(T_3^* - T_2^*) - (T_5^* - T_0^*)] \quad (1-1)$$

其理想循环热效率为

$$\eta_0 = 1 - \frac{1}{\pi_c^{*\frac{k-1}{k}}} \quad (1-2)$$

式中： $\pi_c^* = p_2^* / p_0^*$ ，为发动机的总增压比； k 为绝热比；上角标 * 表示气流的总参数。

可见，提高单位质量气体理想循环功的有效措施就是提高涡轮前燃气温度 T_3^* 。理想循环热效率随增压比 π_c^* 的提高而增加。

从表面上看，单位质量气体理想循环功似乎与总增压比 π_c^* 无关，但要注意，气流在压气机中进行的是绝热压缩，提高增压比的同时，压气机出口温度 T_2^* 也必然提高。

$$\left(\frac{T_2^*}{T_0^*}\right) = \left(\frac{p_2^*}{p_0^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-3)$$

可见，增压比的提高引起压气机出口温度的提高，必然带来气流在燃烧室中的等压加热过程 (2—3 过程) 加热量的下降，从而引起循环功的下降。因此在提高循环热效率的同时，要保持做功能力不下降，必须相应提高涡轮前燃气温度 T_3^* 。

以航空燃气涡轮动力装置为例，涡轮前燃气温度逐年都在提高，20 世纪 60 年代以后大约以每年 20K 的速度在增长，现代的燃气涡轮前燃气温度已高达 1900K，下一代的燃气涡轮还会要求更高的温度，美国高性能涡轮发动机技术 (IHPTET) 计划中提出在 2020 年实现涡轮前燃气温度达到 2273~2473K (见图 1-2)。

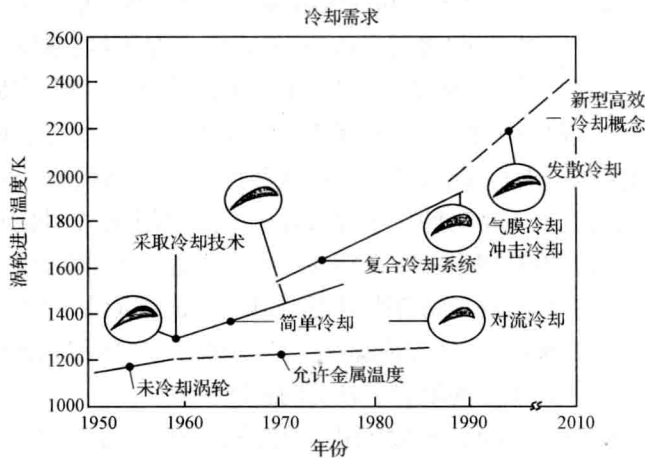


图 1-2 燃气涡轮发动机涡轮前温度变化趋势

日益提高的燃气温度使燃气涡轮动力装置高温零件的工作环境严重恶化,高效冷却是发展下一代燃气涡轮动力装置的紧迫需求(见图 1-3)。据统计,燃气涡轮中的故障 60%以上均出现在高温部件,并有不断上升的趋势,我国航空燃气涡轮发动机的一些高温零件的寿命只有几百小时,高温零件的材料和加工费用高昂,由此带来的经济损失十分严重。造成这种情况的原因,除材料和工艺的缺陷外,决定性的因素之一是目前还难以对高温零件的受热状态进行准确的预测,对复杂的高温零件传热的机理和规律认识不足,缺少进行分析的相关数据。目前许多燃气涡轮中的燃气温度已超过了耐热金属的熔点,冷却已成为必不可少的措施,在一些先进的燃气涡轮发动机中,用于冷却涡轮的空气量已高达 15%~20%,大量空气用于冷却造成动力装置性能的重大损失。在提高空气压缩比的同时,不可避免地会提高冷却空气的温度,降低其吸热能力,使得冷却的难度增大。因此研究冷却新概念和新的冷却方式,减少冷却的用量,已成为发展下一代燃气涡轮的紧迫需求。

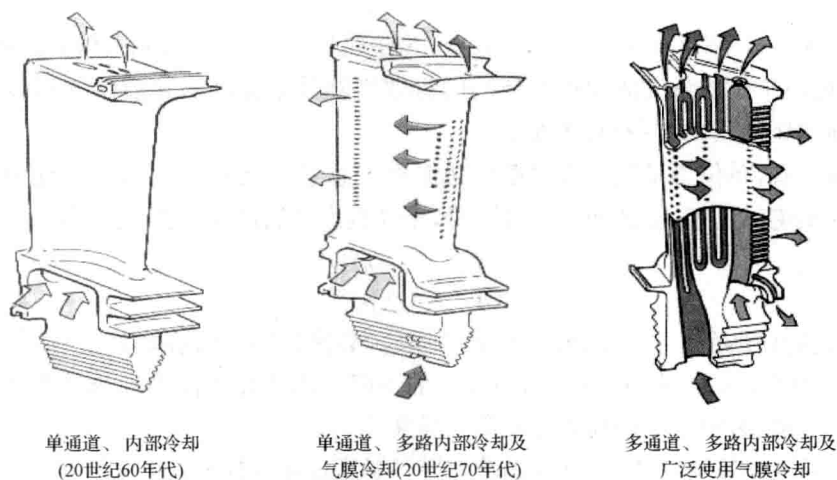


图 1-3 涡轮叶片冷却结构的变化示意图

美国在 20 世纪 80 年代中期,从大量的燃气涡轮动力装置的故障和寿命分析中意识到了高温零件的受热状态研究对提高可靠性和降低故障率的重要性,为此专门实施了热端技术研究计划(即 HOST 计划),历时 7 年,参与单位有 20 多个。在传热、燃烧、结构热分析、表面防护和高温测量技术等方面开展了系统研究,建立了一批理论分析模型、实验数据库和计算机软件。这些成果陆续被工业部门所采用,收到了明显的效果。已有研究表明,在高温下 15K 的温差可导致零件寿命降低一半,因此必须大力提高高温零件受热状况的分析精度。相应的研究工作的发展趋势是:建立更为精确的传热分析理论模型,开展在多种因素作用下的复杂环境中传热规律的研究,发展新冷却概念和高效冷却技术等。近几年,国外除了对常规的气冷方式(如冲击、粗糙肋、气膜、溢流等)进行特殊条件下(如旋转、高湍流度、强压力梯度)更深入细致的研究和优化组合外,对层板结构、气旋冷却、微尺度冷却、湿气冷却和表面处理等强化传热或冷却的新方法进行探索,在许多方面取得了较大的进展。

除了热端部件的强化冷却之外,在发动机空气系统中也存在大量的流动与传热问题,譬如,进气道防冰、旋转盘轴系间的流动与换热、封严和榫头等复杂结构中的流动与换热、机匣和转子之间的间隙控制。这些实际的传热问题往往具有复杂的结构参数、环境参数和流动参数。

没有可靠的分析数据和理论,就不可能精确地进行零部件的结构设计,不可能正确计算冷却系统或循环工作过程。

1-2-2 飞行器红外辐射特征控制

红外成像探测系统、机载红外前视装置和红外制导武器的迅速发展,严重地威胁着作战飞机的生存力。高性能发动机涡轮前燃气温度的提高,使这种威胁更加严重。这样,无论对已有的作战飞机和新研制的飞机,都提出了降低飞机目标红外辐射信号的要求。因而形成了红外目标特性控制技术的专门项目,并把它列为一项重要的战术指标。特别是近年来,在海湾战争与伊拉克战争中,美国 B-2 隐身轰炸机、F-117A 隐身战斗机和具备红外隐身能力的阿帕奇 AH-64 武装直升机的出色表现,促进了红外隐身技术的全面发展和广泛应用。图 1-4 定性反映了影响飞机发动机红外信号的各项因素,它用数值表明了各自的影响程度,即各个影响因素(如涡轮叶片温度)变化 1% 所引起的红外辐射信号变化量。比较表明:飞行器的红外辐射,主要来自发动机外露的高温部件和排出的高温燃气。前者产生连续的高发射率的灰体辐射,后者产生不连续的选择性光谱辐射。它们都是红外制导武器的主要探测与跟踪的目标。以降低飞行器目标的红外辐射信号为目的的红外辐射抑制系统(简称红外抑制系统),它的主要任务,在于采用冷气掺混,壁面冷却或遮挡的方法,在发动机能量损失为最小的情况下,把上述两项红外辐射的强度降低到最低的程度。

红外辐射在大气中的透射能力与大气中水蒸气和二氧化碳的含量有关。对于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的红外辐射(这也是第二代红外导弹主要探测和跟踪的目标)而言,发动机排气系统热部件的固壁辐射和热喷流的气体尾焰辐射是最主要的。

(1) 发动机热部件。发动机热部件的红外辐射是全波长辐射,其辐射的能量大小与绝对温度的四次方成正比。发动机上的可视热部件包括涡轮盘、整流锥、喷管筒体,以及尾喷口。在这些热部件中,以尾喷口和喷管筒体内壁的热辐射为最大,其红外辐射将限制在喷管尾部后半球的探测视场之内。发动机尾喷口及其他热部件可看作灰体($\epsilon=0.9$),在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波长范围内,未采取红外抑制措施的发动机尾部红外辐射强度的数量级是 $1000\sim 1500\text{W/sr}$ 。

(2) 发动机热喷流。发动机热喷流的红外辐射属选择性光谱辐射,二氧化碳和水蒸气是主要辐射成分。水蒸气的辐射波长在 $2.7\mu\text{m}$ 附近,二氧化碳的最大辐射带为 $4.3\mu\text{m}$ 左右,二氧化碳的辐射比水蒸气大得多。所以热喷流的辐射可看成是喷流中的二氧化碳辐射,其辐射能量可以传输到喷管的前半球,形成全方位的被攻击目标。

对于发动机的高温排气,不论是采用风扇引入或者采用排气本身引射的方法掺混冷空气,都是抑制热金属壁面与排气尾焰辐射的有效方法。它所造成的作用是双重的:首先是使冷热流体直接混合,最大限度地降低排气温度与排气管温度,大幅度地减小金属壁面与尾焰的辐射

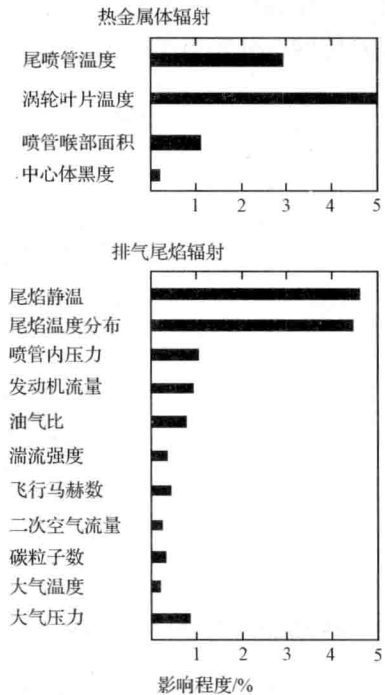


图 1-4 确定红外信号的主要因素

强度；其次是掺混的冷空气降低了原排气中 CO_2 的浓度与 CO_2 的分压力，使排气的发射率降低，减小了尾焰的辐射强度。

高涵道比的涡轮风扇发动机采用强制混合的方法把风扇冷气与核心热气相混合，降低峰值排气温度与速度，它不仅具有降温的作用，还有降低排气噪声的作用。但是在降低排气温度的同时，也降低了排气速度，对推力会带来一定的影响。单纯靠强制混合的方法达到降低红外辐射信号的战术技术指标要求，还存在一定的困难。

对以输出轴功率的直升机涡轮轴发动机而言，因为不需要利用排气速度来产生推力，所以它可以充分利用排气的动能来引射大量的环境冷空气与热排气充分掺混，达到战术指标要求的排气降温数值。因此在涡轮轴发动机中，利用发动机的排气，引射冷气充分混合，实现抑制排气系统的红外辐射是十分有效的技术途径(见图 1-5)。

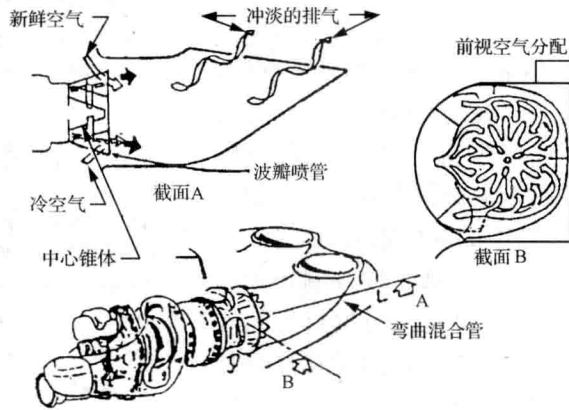


图 1-5 直升机用波瓣喷管引射红外抑制器

1-2-3 气动加热与热防护系统

高超声速飞行器在飞行过程中，由于物面对高速气流的阻滞作用和压缩作用，使大量的动能转变为热能，从而产生气动加热，造成飞行器表面温度升高，并形成结构内部的温度梯度和不均匀的热膨胀(见图 1-6)。由于这种热膨胀受到结构本身的约束和限制而产生热应力。

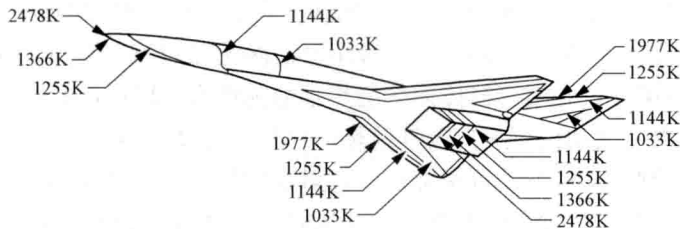


图 1-6 高超声速飞行器表面温度(飞行高度 27km, 飞行马赫数 8)

高超声速飞行器结构既要求承载，又要求承受巨大的气动加热热负荷，对于设计者来说，这是一项具有挑战性的任务。除了发展新型的材料，如碳-碳基复合材料，金属基复合材料等，使其制成的结构或部件能够在高温下仍具有足够的强度和重复使用性，当前的解决方法是在主要承力的结构外加热防护结构，或称热防护系统。

热防护系统的形式是多种多样的, 现有热防护系统的基本形式有: 吸热式热防护系统、传质换热热防护系统、烧蚀热防护系统、辐射热防护系统等。若以功能来划分有: 被动式、半被动式和主动式。

主动耐热技术是依靠另外一种流动介质来带走热量, 借以达到热防护的目的, 如采用发汗冷却、薄膜冷却和对流冷却等; 被动热防护技术则依靠防护结构的吸收和辐射特性来防热, 如热沉结构、辐射结构等; 至于半被动热防护技术则介于两者之间, 如烧蚀结构、热管等。美国 NASA 曾对机翼前缘热管结构开展了研究, 机翼前缘驻点区作为热管的蒸发段、机翼后部成为热管的冷凝段, 试验中热管的热流密度达到 $391\text{kW}/\text{m}^2$, 热管工作时蒸发段和冷凝段之间的温度差仅有 12°C , 起到了均温的作用(见图 1-7)。

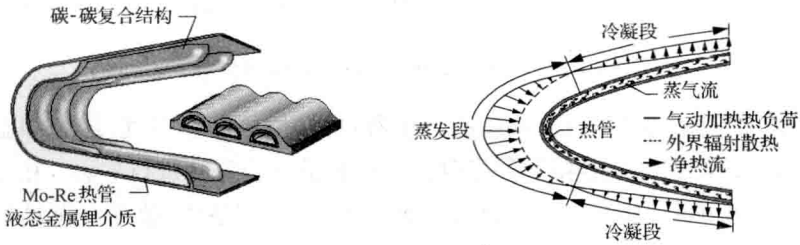


图 1-7 机翼前缘热管防护结构

图 1-8 是应用于高超声速飞行器中部的一种热防护结构, 由承力层、含水多孔层、狭小通道层和蒙皮组成。作用在蒙皮的气动热负荷, 一部分以辐射的方式向外部空间发射, 另一部分则通过蒙皮的导热向内部传递。含水的多孔层吸收向内辐射的热量后, 当达到沸腾温度后产生相变, 蒸气对于蒙皮可形成对流冷却, 然后过热蒸气沿蒙皮和多层之间的狭小通道流动并溢出。由于多孔层的温度不会大于液体的相变温度, 因此可以起到良好的热防护作用。

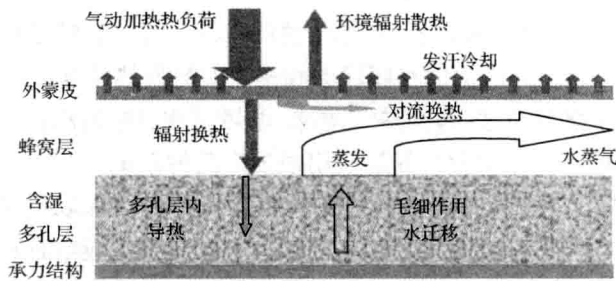


图 1-8 强化辐射冷却热防护系统

气动加热热防护系统设计中涉及大量的热分析问题, 往往是导热、对流换热和辐射换热高度耦合的复杂传热过程。

1-2-4 飞行器座舱空气调节系统

飞行器座舱空气调节方法主要采用两种循环方式, 即空气循环系统和蒸发循环系统, 两者可以独立使用, 也可以组合使用。

空气循环系统利用发动机或辅助动力装置的高压气源供给的空气来制冷。高压空气经过