



普通高等教育“十三五”规划教材

工程传热学

主 编 贾冯睿
副主编 陈东雨 肖红侠 潘颢丹 马丹竹
主 审 刘宝玉

非
外
借

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材

工 程 传 热 学

主 编 贾冯睿
副主编 陈东雨 肖红侠
潘颢丹 马丹竹
主 审 刘宝玉

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部指定的“高等学校工科本科传热学课程教学基本要求”，并总结近几年教学改革成果编写而成的，是省级资源共享课传热学课程主讲教材，省级跨校修读学分试点工作传热学课程建议教材。

本书根据我国“国家中长期科学和技术发展规划纲要”的精神以及当前世界范围内学科技术的飞速发展，在教材内容上力争反映最新科技成就，提倡节约能源，拓展教材适应性，以适应我国工业化进程的需要，尤其在石油化工领域进行了拓展和延伸。全书共 11 章，包括导热、对流换热、辐射换热、换热器和炼厂节能等内容，从第 5 章开始每章都有小结。全书典型题例剖析深刻，参考文献详尽，可供读者深入学习时参考。

本书可作为高等学校能源动力类、交通运输类、环境与安全类、机械类以及土建类等专业的教科书或者教学参考书，也可供其他专业选用和相关科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程传热学 / 贾冯睿主编. —北京: 中国石化出版社, 2017. 8
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5114-4576-6

I. ①工… II. ①贾… III. ①工程传热学-高等学校-教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 217610 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路 9 号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 539 千字
2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
定价:52.00 元

前 言

石油化工行业在国民经济发展中占有重要的地位，是我国重要的支柱型产业，同时也是主要的能源生产和高耗能产业。2015年，中国石油化工行业的能源消耗量约占全国工业能源消耗量的10%以上，且能源利用效率与国外先进国家相比还有差距。如何在保持国家经济快速发展的前提下，培养从事石油化工节能领域的能源与动力工程人才是我国经济可持续发展的重要人才发展战略。

传热学课程是能源与动力工程类专业最重要的专业基础课程之一，本教材详细讲述了热传导、对流换热、热辐射、换热器及换热网络等相关内容。通过本教材的学习，学生能快速掌握热量的传递规律及其计算方法，树立系统节能的观点，提高分析、研究、解决生产实际工程中传热问题的能力。本书主要以导热过程、对流换热过程、辐射换热过程热量传递规律以及设备和系统层面的传热过程中的热量计算方法为基础，注重与石油、化工工业生产中的传热问题相结合，旨在培养石油化工节能特色的工程应用型人才。

全书共分为11章，第1章为绪论，重点介绍了传热学的研究内容和方法、发展历程以及在石油、化工生产中的应用；第2章~第4章，着重讲述了热传导部分，主要有两条逻辑线索，其一为以时间为线索的稳态导热与非稳态导热，其二为以连续方程为线索的导热微分方程法和数值解法；第5章~第7章为对流换热部分，分别从对流换热理论、工程计算和相变对流换热角度进行了深入的探讨；第8章和第9章分别从热辐射的理论和计算两个方面进行了学习；第10章和第11章分别从设备层面和系统层面进行了传热和节能分析。

本教材由辽宁石油化工大学贾冯睿担任主编，副主编分别由沈阳农业大学陈东雨、沈阳工程学院肖红侠、辽宁石油化工大学潘颢丹、马丹竹担任，辽宁

石油化工大学赵磊、刘飞、建伟伟也参与此书的编写工作。其中，第1、2、5、8章由贾冯睿负责，第3章由潘颢丹负责，第4章由陈东雨、潘颢丹负责，第6章由马丹竹负责，第7章由马丹竹、肖红侠负责，第9章由赵磊负责，第10章由刘飞负责，第11章由建伟伟负责。在编写过程中博士研究生刘广鑫、硕士研究生孔令森、李洲等在资料收集、图表处理等方面付出了辛勤的劳动，在此表示感谢。

感谢中国石化出版社、辽宁石油化工有限公司教务处、石油天然气工程学院、能源工程系各位领导和老师的大力支持和帮助。

由于书中涉及的内容广，在编写过程中参考和引用了大量相关文献，在此谨向各位作者及其单位表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中不妥之处，恳请读者批评指正！

编者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 传热学的研究内容与方法	(1)
1.1.1 传热学的研究内容	(1)
1.1.2 传热学的研究方法	(1)
1.2 传热学的发展历程	(2)
1.2.1 热传导	(2)
1.2.2 热对流	(3)
1.2.3 热辐射	(3)
1.3 传热学在石油化工行业的应用	(4)
1.3.1 在石油行业中的应用	(4)
1.3.2 在石化行业中的应用	(7)
第 2 章 稳态热传导	(10)
2.1 导热基本概念及定律	(10)
2.1.1 导热基本概念	(10)
2.1.2 导热基本定律	(12)
2.1.3 热导率	(13)
2.2 导热微分方程	(16)
2.2.1 导入与导出微元体的净热量	(17)
2.2.2 微元体中内热源的发热量	(18)
2.2.3 圆柱坐标系(r, φ, z)	(18)
2.3 导热过程的初始条件与边界条件	(19)
2.4 典型一维稳态导热问题的分析解	(21)
2.4.1 通过平壁的导热	(21)
2.4.2 通过圆筒壁的导热	(25)
2.4.3 通过球壳的稳态导热	(28)
2.4.4 其他变面积或变热导率问题	(29)
2.4.5 通过肋片的稳态导热	(29)
2.5 二维稳态导热问题与形状因子	(34)
2.5.1 分析解法	(35)
2.5.2 导热形状因子法	(35)
参考文献	(38)
第 3 章 非稳态热传导	(39)
3.1 非稳态导热的基本概念	(39)

3.1.1	非稳态导热	(39)
3.1.2	毕渥数与傅里叶数	(41)
3.2	集中参数法	(42)
3.3	典型一维非稳态导热问题的分析解	(44)
3.3.1	第一类边界条件下一维非稳态导热的分析解	(44)
3.3.2	伴有相变边界一维非稳态导热的特例	(46)
3.3.3	第三类边界条件下一维非稳态导热	(47)
3.4	半无限大物体的非稳态导热	(55)
3.4.1	半无限大固体的温度分布	(55)
3.4.2	等热通量的半无限大固体	(56)
3.5	多维非稳态导热的分析解	(57)
	参考文献	(61)
第4章	热传导问题的数值解法	(62)
4.1	导热问题数值解的基本思想	(62)
4.1.1	数值解法的本质	(63)
4.1.2	数值解法的基本思路	(63)
4.2	稳态导热问题的数值解法	(63)
4.2.1	物理问题与数学描写	(63)
4.2.2	区域离散	(64)
4.2.3	节点方程离散	(64)
4.2.4	代数方程的最终形式及求解方法	(65)
4.2.5	数值计算流程图	(66)
4.3	非稳态导热问题的数值解法	(66)
4.3.1	物理问题及数学描写	(66)
4.3.2	时间和空间区域的离散	(67)
4.3.3	节点离散方程的建立	(67)
4.3.4	两种格式及其稳定性	(68)
4.3.5	二维及三维非稳态导热问题的求解简介	(68)
4.3.6	集中热源作用下的非稳态导热问题简介	(70)
	参考文献	(71)
第5章	对流换热的理论基础	(72)
5.1	对流换热基本问题	(72)
5.2	对流换热概述	(73)
5.2.1	牛顿冷却定律	(73)
5.2.2	对流换热的影响因素	(73)
5.2.3	对流换热系数	(74)
5.2.4	黏性与非黏性流动	(75)
5.3	对流换热过程的数学描写	(76)
5.3.1	质量守恒与连续性方程	(77)
5.3.2	动量守恒与动量方程	(77)

5.3.3	能量守恒与能量方程	(78)
5.3.4	对流换热问题的完整数学描写	(79)
5.4	对流换热的边界层	(80)
5.4.1	速度边界层	(80)
5.4.2	平板上的层流边界层	(82)
5.4.3	热边界层	(86)
5.4.4	边界层的重要意义	(91)
5.4.5	流体摩擦和换热之间的关系	(91)
5.5	本章小结	(92)
	参考文献	(93)
第 6 章	对流换热的工程计算	(94)
6.1	外部对流换热	(94)
6.1.1	外部自然对流换热关联式	(94)
6.1.2	外部强制对流的实验关联式	(103)
6.2	密闭空间对流换热	(109)
6.3	内部强制对流换热	(112)
6.3.1	流体力学的问题	(112)
6.3.2	热的问题	(116)
6.3.3	能量平衡的问题	(119)
6.3.4	圆管内层流的关联式	(122)
6.3.5	圆管内湍流的关联式	(125)
6.3.6	非圆形管和同心套管的关联式	(127)
6.3.7	单相对流换热的强化技术	(129)
6.4	本章小结	(131)
	参考文献	(132)
第 7 章	伴随相变的对流换热	(133)
7.1	相变对流换热中的无量纲参数	(133)
7.2	凝结换热	(134)
7.2.1	凝结换热模式	(134)
7.2.2	膜状凝结的分析解及计算	(135)
7.2.3	膜状凝结换热的影响因素	(138)
7.3	沸腾换热	(141)
7.3.1	沸腾换热模式	(141)
7.3.2	池内沸腾关系式	(144)
7.3.3	管内对流沸腾	(147)
7.3.4	沸腾传热的影响因素	(150)
7.4	本章小结	(152)
	参考文献	(152)

第 8 章 热辐射基本定律和辐射特性	(153)
8.1 热辐射现象的基本概念	(154)
8.1.1 热辐射的定义及区别于导热对流的特点	(154)
8.1.2 从电磁波的角度描述热辐射的特性	(155)
8.1.3 黑体模型及其重要性	(157)
8.2 黑体热辐射的基本定律	(157)
8.2.1 斯忒藩-玻耳兹曼定律	(157)
8.2.2 普朗克定律	(158)
8.2.3 兰贝特定律	(161)
8.3 实际物体的辐射特性	(164)
8.3.1 实际物体的辐射力	(164)
8.3.2 实际物体的光谱辐射力	(165)
8.3.3 实际物体的定向辐射强度	(165)
8.3.4 气体辐射的特点	(168)
8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系	(170)
8.4.1 实际物体的吸收比	(170)
8.4.2 灰体的概念及其工程应用	(172)
8.4.3 吸收比与发射率的关系——基尔霍夫定律	(172)
8.4.4 温室效应	(173)
8.5 太阳与环境辐射	(174)
8.5.1 太阳常数	(175)
8.5.2 太阳能穿过大气层时的削弱	(175)
8.5.3 环境辐射	(176)
8.5.4 部分物体对太阳能的吸收比	(177)
8.6 本章小结	(177)
参考文献	(179)
第 9 章 辐射传热的计算	(182)
9.1 辐射传热的角系数	(182)
9.1.1 角系数的定义及计算假定	(182)
9.1.2 角系数的性质	(182)
9.1.3 角系数的计算方法	(184)
9.2 两表面封闭系统的辐射传热	(188)
9.2.1 封闭腔模型及两黑体表面组成的封闭腔	(188)
9.2.2 有效辐射	(188)
9.2.3 两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热	(189)
9.3 多表面系统的辐射传热	(193)
9.3.1 两表面换热系统的辐射网络	(193)
9.3.2 多表面封闭系统网络法求解的实施步骤	(194)
9.3.3 三表面封闭系统的两种特殊情形	(194)
9.3.4 多表面封闭系统辐射传热计算的几点说明	(195)

9.4	气体辐射的计算	(200)
9.4.1	光谱辐射能在气体层中的定向传递	(200)
9.4.2	平均射线路长的计算	(201)
9.4.3	水蒸汽、二氧化碳发射率、吸收比的经验确定图线	(202)
9.4.4	气体与黑体包壳间的辐射传热计算	(205)
9.5	辐射传热的控制	(206)
9.5.1	控制物体表面间辐射传热的方法	(206)
9.5.2	遮热板的原理及其应用	(208)
9.6	综合传热问题分析	(210)
9.6.1	测定炉膛辐射热流密度简易方法的原理分析	(210)
9.6.2	遮热罩抽气式热电偶为什么能减少气体温度的测量误差	(211)
9.6.3	辐射传热系数	(213)
9.7	计算热辐射方法简述	(213)
9.7.1	区域法	(213)
9.7.2	热通量法	(213)
9.7.3	蒙特卡洛法	(214)
9.7.4	离散坐标法	(214)
9.7.5	谱方法	(214)
9.8	本章小结	(214)
	参考文献	(216)
第10章	换热器概述及传热过程分析	(218)
10.1	换热器的分类及基本类型	(218)
10.1.1	换热器的分类	(218)
10.1.2	换热器的基本类型	(219)
10.2	各类换热器结构及特点	(220)
10.2.1	管壳式换热器	(221)
10.2.2	板式换热器	(226)
10.2.3	其他类型换热器	(230)
10.3	换热器的传热过程的计算及传热强化	(241)
10.3.1	换热器的传热过程的分析	(241)
10.3.2	换热器的传热过程的计算	(248)
10.3.3	换热器的热计算	(253)
10.3.4	换热器的污垢热阻	(255)
10.4	换热器传热过程的强化	(257)
10.4.1	强化传热的基本途径	(257)
10.4.2	对流换热强化的基本方法	(264)
10.4.3	凝结换热与沸腾换热的强化方法	(267)
10.5	本章小结	(268)

参考文献	(268)
第 11 章 炼厂能量综合利用及节能技术	(269)
11.1 换热网络基本概念	(269)
11.1.1 换热网络	(269)
11.1.2 夹点分析	(269)
11.1.3 热交换的基本概念	(270)
11.2 夹点技术基本原理	(271)
11.2.1 第一定律分析	(271)
11.2.2 $T-H$ 图与组合曲线	(272)
11.2.3 夹点在 $T-H$ 图中的描述	(274)
11.2.4 最优传热温差 ΔT_{\min} 的确定	(275)
11.2.5 最小公用工程目标	(275)
11.2.6 夹点的意义	(278)
11.3 最大能量回收网络	(280)
11.4 常减压蒸馏工艺换热网络的优化与节能	(282)
11.4.1 常减压蒸馏工艺流程简介	(282)
11.4.2 换热网络的生成	(284)
11.4.3 夹点位置的确定	(287)
11.4.4 换热网络夹点分析	(291)
11.4.5 换热网络优化设计	(292)
11.4.6 网络优化节能效果	(298)
11.5 加氢精制工艺换热网络的优化与节能	(298)
11.5.1 加氢精制工艺流程简介	(298)
11.5.2 换热网络的生成	(299)
11.5.3 夹点位置的确定	(301)
11.5.4 换热网络夹点分析	(308)
11.5.5 换热网络夹点优化	(310)
11.5.6 网络优化节能效果	(313)
11.6 加氢脱硫工艺换热网络的优化与节能	(314)
11.6.1 加氢精制工艺流程简介	(314)
11.6.2 换热网络的生成	(315)
11.6.3 夹点位置的确定	(317)
11.6.4 换热网络夹点分析	(322)
11.6.5 换热网络夹点优化	(323)
11.6.6 网络优化节能效果	(330)
11.7 本章小结	(330)
参考文献	(330)
附录	(331)

第1章 绪 论

1.1 传热学的研究内容与方法

1.1.1 传热学的研究内容

传热学是一门研究热量传递规律的学科，这种传递过程可能是在不同温度的物体间，也可能是同一物体的不同部分。热力学第二定律指出：只要有温差的存在，热能(热量)就会自发地从高温物体向低温物体传递。温差广泛存在于自然界和各种生产技术领域中，例如，昼夜温差、不同季节室内外温差、石油开采过程中浅井与深井的温差及炼化厂余热锅炉换热器中循环水与炉膛之间的温差等，这种存在温度差的现象在我们生活中数不胜数，由于篇幅的原因，就不一一举例了。由此可见，热能(热量)的传递与我们人类生活密切相关，传热学这一门学科也因此得到广泛运用。

热能(热量)的传递主要是通过热传导、热对流和热辐射三种形式进行传递的，因此这三种传递方式也是传热学这门学科中的重中之重。热传导现象是指，物体各部分之间不发生相对位移或不同的物体直接接触时，依靠物质的分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递。热对流是流体流过固体表面时与固体表面之间进行热量传递的过程，该过程包括流体的宏观运动(热对流)和微观运动(热传导)。例如，反应器中固体物料或催化剂与流体之间的热量传递，间壁式换热器中的流体与间壁侧面之间的热量传递等过程。热辐射为物体向外界发射各种波长的电磁波进行能量传递的过程。

1.1.2 传热学的研究方法

1.1.2.1 实验研究

在传热学研究中，实验研究是最基本的方法，因为所有热传递过程基本规律的揭示，都是通过实验测定来完成，在传热学中引入的诸如导热系数这一类的热物性参数都要通过实验测定获得。

在传热学发展进程中，相似原理试验方法的形成与发展，极大地促进了对流传热的实验研究。实验研究是寻找客观规律最基本、最重要的方法。在实验过程中，可提出假设，建立模型，最后通过实验对假设的理论进行验证。

实际的传热设备往往非常庞大，而且其传热过程相当复杂，若要对其进行实验测定，根本不可能实现。因此，以相似理论为指导的实验方式发挥了重要的作用，它不仅可以节省人力、物力和时间，而且可行性非常高，实验结果应用也非常广泛，从而达到事半功倍的效果。所以在学习传热学这门课程时，除了掌握理论知识外，还应对实验技能予以充分重视。

1.1.2.2 理论分析

理论分析主要是指运用科学理论进行实际问题分析的方法。理论分析法解决传热学问题时，首先是在科学分析的基础上提出合理假设，然后对该现象进行物理建模，运用数学方法

进行转换，使其变成数学模型，最后带入已知的值进行求解。在传热学发展过程中，理论分析法在解决传热学问题中发挥了重要作用。分析解法是以数学分析为基础，通过求解微分方程获得用函数形式表示的温度分布，进而确定热量传递规律。但是，分析解具有局限性，因其求解只适用于较简单的传热问题，然而对于几何形状复杂、复杂边界条件等问题，利用分析解进行求解非常困难。因此，通过对实际物理模型进行假设，使描述传热现象的控制方程得以简化，求得近似分析解，这对于解决传热学中的问题发挥了重要作用。

1.1.2.3 数值模拟

随着计算技术的飞速发展，用数值计算的方法解决传热学问题得到了重大的发展，因此，传热学出现了一个新兴分支，即数值传热学。近年来，数值传热学得到了突飞猛进的发展，一些成熟的流动和传热计算软件，如 PHOENICS、FLUENT、CFX、ANSYS、STAR-CD、HJJENT 等，在解决实际传热问题中得到广泛应用。

1.2 传热学的发展历程

传热学这一门学科是在 18 世纪 30 年代发展起来的。传热学的发展史实际就是热传导、热对流和热辐射三种传热方式的发展历程。三种传热方式在不同时期被人们所发现，其中热传导和热对流较早为人们所认识，而热辐射是在 1803 年发现了红外线才确认的。

1.2.1 热传导

在 1761 年，布莱克引进潜热和比热的概念之后，热科学的另一个重大的进步是兰伯特对固体传热规律的研究，他认为在长金属杆一端加热，热量通过另一端散发到大气中。安农斯也做了类似的实验，他认为温度沿着杆线性变化。兰伯特重新验证了实验，结论于 1779 年发表，纠正了安农斯的假设，他发现温度沿着杆的分布呈对数降低。该公式在傅里叶公式中起到非常重要的作用。

在 1798 年，伦福特通过钻炮筒实验发现，炮筒产生大量的热量。另外，在 1799 年戴维将两块冰块进行了摩擦实验，在摩擦过程中产生了热量，然后冰块融化形成水。正是这两个实验，对于证实热是一种运动过程的结论起到了关键作用，确认了热源自于物体本身内部的运动，打开了探求导热规律的大门。在此基础上，19 世纪初，傅里叶、兰伯特和毕渥都从固体一维导热开始研究。随着研究的进行，毕渥的实验研究在 1804 年得出结果，并提出了相应的公式，该公式认为，在单位时间内，单位面积通过的导热热量与固体两表面的温差成正比，而与壁厚成反比，并且比例系数与材料的物理性质有关。该公式的提出使得对导热规律的认识得到提高，但是还不够完善。傅里叶在毕渥提出的公式中得到启发，并进行实验研究，而且将实验与数学计算相结合，将理论解与实验进行对比，使公式得到不断完善，得到了非常理想的研究结果。在 1807 年向巴黎科学院呈交“热的传播”论文中，他提出任一函数都可以展成三角函数的无穷级数，得到学术界的重视。在此之后，傅里叶继续进行研究，经过努力，于 1822 年发表了“热的解析理论”，导热理论得以创建。该理论正确概括了导热实验的结果，现称为傅里叶定律，为导热理论奠定了基础。

导热性在物理史上起着非常重要的作用。傅里叶挣扎了几年，给出了一个较完整的概念和数学描述，这是因为他大胆地摆脱了远距的动力学和行星力学，以建立连续的范式。傅里叶定律中的导热系数不单单只是表示导热过程中物质的物理性质，在定义其他重要的物

理系数中亦起到启发作用，如电阻率、分子扩散系数和流体的流动的阻力。这些系数在物理、生物和地质科学中被广泛使用。另外，他所提出的采用无穷级数表示理论解的方法为数学求解开辟了新途径。

1.2.2 热对流

热对流是流动流体之间的换热过程，因此，对流换热理论的必要前提是流体流动的理论。在对流换热理论形成初期，贡献最大的是纳维，他在1823年提出了流动方程可适用于不可压缩性流体，这一理论的提出为热对流的研究打下一个良好的基础。但此方程并不够完善，斯托克斯与纳维于1845年将该方程改进为纳维-斯托克斯方程，完成了建立流体流动基本方程的任务。然而，该方程式十分复杂，只适用于求解少数简单流动，很难普遍推广，发展遇到了困难。直到1880年，雷诺观察了流体在圆管内的流动，指出了流体的流动形态除了与流速有关外，还与管径、流体的黏度、流体的密度这三个因素有关，在此之后，这种局面才得到改观。雷诺在1880~1883年间开展了大量的实验研究，发现管内流动层流向湍流的转变发生在雷诺数的数值为1800~2000之间，澄清了实验结果之间的混乱，对指导实验研究作出了重大贡献。在18世纪，在除单纯流动之外的复杂对流换热问题方面的理论求解没有太大进展。只有少数几位科学家做出了一定的贡献，如1881年洛仑兹提出的自然对流的理论解，1885年格雷茨和1910年努塞尔管内换热的理论解及1916年努塞尔凝结换热的理论解。具有突破意义的进展是努塞尔在1909年和1915年发表的两篇论文所做的贡献。在这两篇论文中，对强制对流和自然对流的基本微分方程及边界条件进行量纲分析，获得了有关无量纲数之间的原则关系，从而开辟了无量纲数原则关系正确指导下，通过实验研究求解对流换热问题的一种基本方法，对热对流研究的发展起到很大的促进作用。努塞尔的成果有其独创性，因为量纲分析法是由白金汉于1914年提出的，而相似理论则由基尔皮切夫在1931年才发表。努塞尔于是成为发展对流换热理论的杰出先驱。在微分方程的理论求解上，边界层概念提出和湍流计算模型发展发挥了重要作用。普朗特在1904年提出了边界层概念，即黏性低的流体只有在横向速度梯度很大的区域内才有必要考虑黏性的影响，这个区域主要在流体接触的壁面附近，而其外的主流则可以看作是无黏性流体的流动。边界层概念的提出，使得微分方程得到了合理的简化，使理论求解的发展得到有力的推动。波尔豪森在流动边界层概念的启发下于1921年又引进了热边界层的概念，他与施密特及贝克曼合作，数学家与传热学家合作，发挥各自的长处，于1930年成功地求解了竖壁附近空气的自然对流换热。此外，湍流计算模型得到很大的发展，1925年的普朗特比拟和1939年的卡门比拟，以及1947年马丁纳利的引伸记录着早期发展的轨迹。由于在实际应用中，湍流问题广泛存在，因此对其研究具有重要的意义。随着对湍流机理认识的不断深化，湍流计算模型的发展也越来越大。

1.2.3 热辐射

热辐射是物体由于具有温度而辐射电磁波的现象。热辐射的发现较热传导和对流换热晚，对于热辐射理论的形成具有重要作用的是，人们认识到黑体辐射的重要意义，并且用人工黑体进行实验研究。卢默等在1889年通过实验测得了黑体辐射光谱能量分布的实验数据。在19世纪末，斯忒藩通过实验研究法，研究了黑体辐射力与其绝对温度的关系，最后得出黑体辐射力正比于它的绝对温度的四次方的规律，后来该结果在理论上被玻耳兹曼所证实，

由于该规律的确认由二者共同完成，所以后来被称为斯忒藩-玻耳兹曼定律。热辐射基础理论研究中最重要就是确定黑体辐射的光谱能量，只有确定了光谱的能量，热辐射理论才变得有实际意义。维恩在 1896 年通过半理论半经验的方法进行推导，得出一个公式，但该公式只在短波段与实验符合，而在长波段实验明显不符。在这之后几年中，瑞利也从理论上推导出一个公式，金斯在 1905 年对该公式进行改进得出的公式，被称为瑞利-金斯公式，然而这个公式与瑞利提出的公式相反，即在长波段与实验结果比较符合而在短波段则与实验差距很大，并且随着频率的增高，辐射能量将增至无穷大，这显然是违背自然规律的。这一理论的出现使人们强烈地意识到，已经相当完美的经典物理学理论确实存在着问题，因此，若想要解决该问题，首先观念上就得有新的突破。在此种情况下，普朗克进行大量的实验与理论分析，最后在 1900 年提出了一个公式，该公式在后来得到实验证实，它在整个光谱段都符合。朗普克之所以能取得成功，是因为他大胆地提出了新假说，完全不同于经典物理学的连续性概念，即量子假说。普朗克提出的量子假说认为，辐射由物体发出或被吸收时，其能量不是连续地变化的，而是跳跃地变化的，即能量的发射和吸收是由许多很少的能量组成的，每一份能量都有一定的数值，这些能量单元称为“量子”。普朗克提出的公式并没有立刻被人们所接受，因为缺乏理论依据。直到爱因斯坦在 1905 年光量子的研究得到公认后，普朗克公式才被接受。普朗克公式的确认正确地揭示了黑体辐射能量光谱分布的规律，为热辐射理论的形成奠定了基础。在 1859 年和 1860 年，基尔霍夫的两篇论文阐述了物体的发射率与吸收比之间的关系，虽然该结论在他 1860 年论文中被证明只针对单色和偏振辐射，但它对全光谱辐射的推广具有深远的意义。另外，物体间辐射换热的计算方法也相应被提出，物体之间的辐射换热是一个复杂物理过程，计算方法的研究具有重要意义。有三种计算方法为辐射热的计算方法完善做出了很大的贡献，他们分别是：①1935 年波略克借鉴商务结算提出的净辐射法；②1954 年霍特尔提出，然后在 1967 年又加以改进的交换因子法；③1956 年奥本亥姆提出的模拟网络法。

随着科学技术的高速发展，在传热学实验研究方面产生许多新技术，特别是计算机的应用，对解决传热学中的一些计算复杂的问题非常有帮助，即利用数值计算解决传热问题，由此形成一门叫做数值传热的学科，其形成时期是在 20 世纪 70 年代，时至今日，人们对其研究已经取得重大的突破，其应用也越来越广泛。

1.3 传热学在石油化工行业的应用

前面介绍了在生活的各个角落及工程各个领域都有温差的存在，即都发生热量的传递。因此，传热学的研究与应用，对于提高人类生活质量以及促进社会发展具有重要作用。传热学的研究主要是研究热量的传递规律，其规律对于工业的节能减排以及如何高效、安全生产发挥着重要作用。因此传热学的应用也变得十分广泛，如石油、化工、冶金、建筑、建材、轻工纺织、医药、航空航天、农业工程等工程领域。下面以石油开采输送工程和石油炼化中的传热问题简要介绍。

1.3.1 在石油行业中的应用

1.3.1.1 油气开采过程中的应用

在石油开采过程中，钻井属于比较最重要的一个环节，在钻井过程中，钻井液起到至关

重要的作用；并被称作是石油钻井工程的血液，它一方面具有冷却和润滑钻头，降低钻头温度，减少钻具磨损，以延长钻头的使用寿命的作用；另一方面，它可以清洗井底，携带岩屑，保持井底清洁，避免钻头重复切削，减少磨损，提高效率。常规钻井液是溶胶状和悬浮体系，通常由黏土、水及各种化学药剂组成。常规钻井液对浅井和中等深度油井能够符合条件，但由于我国石油资源的分布不只是在浅井和中等深度油井，若要满足当前我国油气资源需求量，就必须对深井的油气资源进行开采。目前，对于深度为4~5km的深井已很普遍，这样一来，就使得油气开采比较困难，因为在这种深井井底的温度一般在能达到130~180℃，有的甚至超过了200℃，这就对钻井液的品质提出了更高的要求，即钻井液必须符合井底的温度和压力。除此之外，有的油田是低压、低产能、低渗、断块等形式，因此开发了低压低密度钻井流体技术。因此，在对深井、超深井、低压、低密度油田进行开采时，钻井液就得加一定量的气体及一些化学药剂，这使其能够更好的适应井底的压力和温度。显然，在上述情况中，温度已经成为影响钻井液性能的重要参数，因此对在温度对钻井液的影响的研究十分有必要。在研究过程中，除了运用实验的手段研究钻井液在高温高压下的性能外，还须运用数值计算方法对钻井液在井筒内的流动和传热规律进行模拟研究，从而确定钻井液井深范围内的温度变化规律，为实际工程设计提供理论依据。

石油开采过程中须进行固井，即向井内下入套管，并向井眼和套管之间的环形空间注入水泥，用以加固井眼，保持井眼稳定。在施工过程中，井下温度是非常重要的参数，因为水泥浆的稠化时间、流变性质、抗压强度及凝固时间等均受温度的影响。随着油气井深度的增加，温度的影响也十分明显。有研究指出，若井下温度有5℃左右的误差时，纤维素水泥浆的稠化时间就会有一个小时左右的误差，并且随温度、压力的增加，其流动特性将会发生根本性的变化。另外，井下温度还会影响井内压力平衡、井壁稳定、工作液体系的选择、套管强度等。因此，对固井过程中的温度变化规律的研究，对固井体系设计具有重要意义。

在石油工程中，除了上述两个工艺中存在的传热问题外，在采油工程中也存在着大量的热量传递问题。采油工程就是通过一系列的工艺技术措施，使油藏流体顺利流入井底，并高效地将其举升到地面进行分离和计量，其目标是经济有效地提高油井产油量和油气采收率。

(1)油层产液从井底举升至地面的传热问题。油层的温度随着油藏深度的增加，温度逐渐升高，其产液在从井底举升至地面的过程中，温度沿井筒是不断变化着的。并且这种温度的变化对产液的流动特性产生一定的影响，因此，这种温度变化规律是不能忽略的，准确地预测井筒内的温度分布规律，对设计深井或超深井举升工艺具有非常重要的意义。

(2)水力压裂就是利用地面高压泵，通过井筒向油层挤注具有较高黏度的压裂液，当注入压裂液的速度超过油层的吸收能力时，则在井底油层上形成很高的压力，当这种压力超过井底附近油层岩石的破裂压力时，油层将被压开并产生裂缝。这时，继续不停地向油层挤注压裂液，裂缝就会继续向油层内部扩张。该方法不仅用于低渗透油气藏，而且在中、高渗透油气藏的增产改造中也有很好的效果。目前，由于油井压裂深度的不断增加，地层温度也逐渐升高。那么，压裂液沿井筒和裂缝流动过程中，会与地层发生热交换，改变压裂液的温度。当压裂液温度发生变化时，其黏滞性、悬砂能力、造缝能力和滤失速度等都会受到不同程度的影响。因此，对压裂液沿井筒和裂缝内的复杂传热规律进行充分研究，才能保障深井压裂设计的合理性、可靠性。

(3)目前，我国油气资源大多以稠油、高凝油为主，其分布广、储量大。但其高黏度导致的流动性差是开发稠油时所面临的主要问题。在其开采过程中，由于稠油渗流阻力大，难

于从油层流入井底，并且稠油在举升过程中由于脱气和降温会导致黏度继续增加，使油井生产困难，大大降低了生产效率。高凝油是指凝点高于 35℃，且含蜡量大于 30% 的原油，其特点是存在析蜡点和凝点。当高凝油的温度低于析蜡点时，原油中的重质组分开始析出，当原油温度进一步降至凝点时，原油将失去流动性。目前我国和世界其他国家的开采实践证明，热处理油层采油技术是开发稠油和高凝油的一种行之有效的方法。这种方法通过有计划地向油层注入热量，提高油层温度，从而降低油层流体的黏度，防止油层中的结蜡现象，增加油藏驱油能力，减小油层流动阻力，以达到增加开采量的目的。目前常用的热处理油层采油技术包括注热流体和火烧油层两类方法。

在注热流体工艺中，较常用的方法是注蒸汽，该方法是指注汽井连续注蒸汽，利用其携带的热量为稠油降黏，以保障油井连续生产的过程。当注入的蒸汽从注入井向生产井流动时，主要形成蒸汽带、热凝析液带、冷凝析液带和油藏流体带。热凝析带还可细分为溶剂墙和热水墙。同样，从注汽井的蒸汽温度到生产井的油藏温度，是一个渐变过程。蒸汽进入油藏，井筒周围形成饱和蒸汽带，该饱和蒸汽带随着蒸汽的不断注入而不断扩展，其温度基本为注入蒸汽的温度。在饱和蒸汽带的前沿，由于向地层的传热，蒸汽会凝析成热水并形成热凝析带，随着注入蒸汽的推进，热凝析带携带一些热量进入蒸汽前缘的较冷地带，并把所携热量传递给地层，使油的黏度下降，流动性变好。

火烧油层也是一种原油降黏效果不错的方法，它是将空气（或氧气、液氮）连续地注入到油层中，通过自燃或点火使油层中的部分原油燃烧，利用燃烧释放出的热量来加热油层，以提高油层温度、降低原油黏度、增强原油的流动性和地层能量的一种开采方式。按注入空气在油层内的流动方向与燃烧前缘的推进方向之间的关系，火烧油层可分为正向燃烧法和反向燃烧法。在正向燃烧中若在注入空气的同时注入水，则称为湿式正向燃烧法，否则称为干式正向燃烧方法。

由此可见，对稠油和高凝油的开发，加热降黏或通过加热维持温度是热处理油层技术和井筒热力降黏技术的目的，其中涉及到的传热问题的分析和解决是相关工艺设计与实施的关键所在。

1.3.1.2 在油气输送过程中的应用

在我国生产的原油中大部分都是含蜡原油，约占 80%，含蜡原油的主要特点是随着温度的降低，原油中的蜡晶会逐渐析出，使原油的黏度增加，使得流动性变差。因此，在油气输送过程中，必须对原油进行加热，以降低其黏度，使原油具有良好的流动性。这样一来，在油气输送过程中就涉及很多传热问题，这些问题大致可分为以下几种：

(1) 在新建埋地热油管线投产前，往往需要用热水对管线预热，这就可以防止原油在冷管中降温过快发生胶凝而导致流动性变差。那么在这个过程中，就会存在一些复杂的传热问题，例如管内热水与管壁、土壤、地面以及土壤深处的热量传递。

(2) 在运输过程中，各种不同的热油通过管线时，其温度随管长的变化情况。

(3) 在输油系统由于出现故障而抢修或输油设备定期保养维修时，输油管线就会停输，这就会使得管内原油温度下降，导致蜡晶的析出。若油温继续降低，可能会使原油凝固在管内造成凝管事故，使输送管线再启困难，为此必须进行传热计算，以确定安全的停输时间。

(4) 为了使输油管道合理设计和安全经济运行，必须对管内介质输量、介质类型、管线埋深、管线所处的地理环境、气候条件变化等因素对管线传热和介质温度变化所产生的影响，进行全面、详实、准确的了解和分析。