

换热器 设计与理论源典

机械工业出版社

10987

换 热 器

设计 与 理 论 源 典

N. H. 1

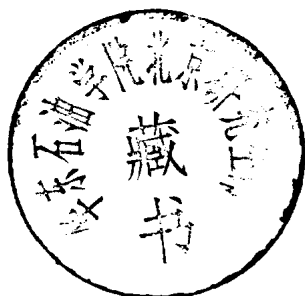


00320962

德尔 主编

马庆芳 王兴国 江经善 齐宗敏
华诚生 宋 政 张正纲 陆鸿钧

译



200405285

机 械 工 业 出 版 社

本书综合介绍了世界各国在各种类型换热器的设计、计算、性能预计和运行等方面所取得的新进展，以及与换热器有关的传热学基础理论（两相流、流态化、传热强化等）的最近研究成果。阐述了这些基本原理在工程技术问题中的应用。

本书不仅可供从事换热器设计与研究的工程技术人员使用，而且对传热学研究人员及高等学校有关专业的教师和研究生的参考价值。

**Heat exchangers;
Design and Theory Sourcebook**
N. H. Afgan and E. U. Schlünder, Editors
Scripta book Company 1974

* * *

换热器设计与理论源典

N. H. 艾夫根 E. U. 施林德尔 主编

马庆芳 王兴国 江经善 齐宗敏 译
华诚生 宋 政 张正纲 陆鸿钧

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $18 \frac{1}{4}$ · 字数 402 千字
1983 年 2 月北京第一版 · 1983 年 2 月北京第一次印刷
印数 0.001—6,200 · 定价 2.25 元

*

统一书号：15033 · 5289

译者序

换热器广泛地用于国民经济各个领域及国防工程中，如冶金、化工、石油、电力、轻工、动力机械、航空、航天等部门。提高能源利用率，对于国民经济的发展具有重大的现实意义。要挖掘这方面的潜力，必须合理地组织换热过程并利用和回收余热，这往往和正确地设计与使用换热器分不开。此外，减小换热器体积和重量，能够节省材料，降低成本。特别是在国防工程中，对换热器的紧凑性具有更严格的要求。为达到这样的目的，必须深入研究传热过程，探求强化传热的新方法。本书对解决这些问题将会有所帮助。

本书是由国际传热传质中心组织世界各国换热设备方面的著名专家撰写的。它全面反映了七十年代中期以前这一领域的新成果。内容有各类换热设备的设计、计算方法，其中包括适用于电子计算机进行辅助设计与计算的方法。以列表与图示方式介绍了各类换热设备的大量的计算与性能数据，对换热器的设计和计算有一定参考价值。本书还以较大篇幅综合介绍了与换热器有关的传热基础研究的新进展，如两相流、流态化技术、传热强化等。掌握这些知识，对于工程技术人员改进设计是十分重要的。本书强调了这些基本理论在换热器设计和操作运行方面的应用。在如何根据实践提出的问题进行理论研究，以及在工程中如何应用基本理论解决实际问题方面，本书作了有益的探索。因此，本书不仅对工程技术人员有用，而且对传热学研究人员也是有益的。

本书由中国空间技术研究院马庆芳（第十三、十六、十七章），王兴国（第一、二、三、四章），江经善（第十一、十二、二十二、二十六章），华诚生（第五、六、十四、十五章），张正纲（第十九、二十、二十一章），陆鸿钧（第七、八、九、十章）和中国科学院工程热物理研究所齐宗敏（第二十三、二十四、二十五章），宋政（第十八、二十七章）共同翻译。由张正纲、陆鸿钧、华诚生、马庆芳校对。

原书共有三十六章。有几章内容是提纲性的，有的有些重复。为了精减篇幅，在不影响原书内容完整性的情况下，我们选择了其中的二十七章，对原书中与技术无关的内容也作了删节。原书文句、数字、公式、图表均有错误之处，我们尽可能加以修正并加注释。

在本书翻译工作中，中国科学院工程热物理研究所葛绍岩教授提出不少指导意见；华南工学院邓颂九教授以及叶国兴等同志阅读了译稿并提出许多建议，对于他们的帮助，译者在此一并致谢。限于我们的水平，译文中必定还有欠妥及错误之处，希望读者批评指正。

译者

一九七九年十月

原 序

本书综合了传热学的最新发展与换热器的实际应用。这些论文中，既有各研究单位和大学在传热学基础研究中获得的进展，也包含了全世界各工业部门在换热器的设计、运行、规格和性能方面的工程成果，而重点放在实用的工业换热器系统上。

本书是约请世界各专业领域内的学者及专家撰写编辑而成的。全部论文经换热器领域内著名专家组成的专门委员会审查过。

委员会主任：

E. U. 施林德尔 (Schlünder) (西德)

副主任：

K. A. 加德纳 (Gardner) (美国)

T. 格雷戈里奇 (Gregorich) (南斯拉夫)

委员：

R. 格雷戈里格 (Gregorig) (西德)

D. F. 马塔罗洛 (Mattarolo) (意大利)

水品 (日本)

T. D. 帕顿 (Patten) (英国)

B. S. 佩图克霍夫 (Petukhov) (苏联)

R. 塞默利亚 (Semeria) (法国)

J. 塔博雷克 (Taborek) (美国)

A. A. 楚康斯卡斯 (Zukanskas) (苏联)

本书强调了稳态和瞬态性能方面的研究工作及其进展；

VI

介绍了在两相系统下工作的换热器、填充床、直接接触式换热器以及设计计算方面的新概念，文中常常用到、提到计算机方法。编者认为，本书很好地展示了换热器最近和将来发展的工艺水平，将对所有传热领域内的科学家和工程师有所裨益。

这些论文发表在国际传热传质中心的讨论会上，主要是第五届讨论会，该届会议专门讨论了换热器方面的进展。与以前主要讨论传热传质领域内基础科学研究的会议相比，这次讨论会强调了这些基本原理在工程技术问题中的应用。文章来自二十六个国家，故真正是国际性的。

国际传热传质中心的这项工作，得到了联合国教科文组织、南斯拉夫能源研究部、南斯拉夫科学合作基金会、美国国家科学基金会、苏联科学院及南斯拉夫鲍里斯·基德里克研究所的支持。

同时，对联合国教科文组织给予的财经资助，在此特别致以谢意。

N. H. 艾夫根
E. U. 施林德尔

目 录

译者序

原序

第一章	传热理论在换热器设计中的应用	1
第二章	换热装置设计中运行问题的预计	22
第三章	换热器的设计方法——对目前工艺水平的评述	47
第四章	高雷诺数下横向流过管束的换热	78
第五章	专门设计的超高容量换热器	102
第六章	换热器网络的最佳设计——现代方法的评述	117
第七章	双面强化换热的管式换热器以及不稳定运行条件下换热器的计算	144
第八章	回热器传热理论概述	167
第九章	管内变物性流体的湍流换热	179
第十章	两相气液流的换热	198
第十一章	流化床在受换热控制的化学过程中的应用	242
第十二章	冷却凝汽器和蒸发冷却器的设计	264
第十三章	强化换热元件的某些新进展	281
第十四章	对流换热设备热性能的数值模拟	313
第十五章	换热设备工作特性的预计	341
第十六章	横向流过叉排螺旋肋管管束的换热与流动阻力关联式	368
第十七章	湍流强化器对板式换热器性能的影响	387
第十八章	横向流过管束的换热过程的研究	398

第十九章	转向对管内湍流受迫对流换热影响的研究	417
第二十章	叉排与顺排管束内部和后部的稳定及不 稳定流动现象	434
第二十一章	移动床换热器和回热器——新的设计 思想概述	442
第二十二章	换热器中辐射换热的计算方法	450
第二十三章	沸腾的致冷剂在水平管内汽化所导致 的压降和换热	471
第二十四章	降膜式蒸发器内晶种作用的分析模型	488
第二十五章	填充床壁面的换热系数	496
第二十六章	直接接触冷凝器的研究:单相和两相系统	525
第二十七章	在各种彻体力作用下的紧凑管式换热 器内局部换热的预算	554

第一章 传热理论在换热器设计中的应用

E. U. 施林德尔

从本章题目的意思便可看出，我们将遇到评论工程和工程科学两者关系这种麻烦的事。在有些时候，讲究实际的工程师在解决他的一些实际问题时，似乎怀疑他所应用的科学理论；而在另一方面，科学家则往往会责备工程师，说他们缺乏理解能力。

为了满足本书的目的，我们将承担这种麻烦事，并试图在两者之间明显的鸿沟上架起桥梁，以有益于未来传热理论的研究和换热器的设计。

我想通过以批评的眼光来回顾支配和限制传热研究活动的制约条件来解决这问题。

我们可以列举出一组这样的制约条件，顺便说一句，这些不仅适用于传热研究，而且同样也适用于其它一些工程问题。

(1) 课题：传热研究的课题就是各种换热设备的设计、性能和发展。确认这一点，我们就不得不承认，传热研究若不与一些实际的工程问题相结合，其本身毫无价值。

(2) 目的：传热研究的目的是能够事先给出热交换设备的设计和性能的数据。

(3) 方法：传热研究所用的方法是研究一些在具有确切定义的条件下的工程问题，使我们能找出起主导作用的现

象和规律。

(4) 手段：事先给出设计方法和性能数据的手段就是理论。这种理论通常以一些假设为基础，再用数学方法将一些变量和常量结合起来，常量通常由一些实验决定，而变量允许在实验已知的范围以外预计。

(5) 精度：理论分析所得的精度与待预计的数据应当为同一数量级。对于工程问题，由实验确定的常量以及待预计的数据误差的数量级为百分之几。因此，对于面向工程的理论，其精度在百分之几的范围内，几乎在所有场合都已足够了。

(6) 有效性：理论的有效性在于它可以减少实验工作。但只有当对理论的改进能导致实验工作的减少时，这种改进才是有用的；而这一点只有在常量的数目能减少，或者这些常量的普遍适用性能得到扩大时才能做到。如果理论的改进使得实验工作增加的话，那只有在下面两种情况下，这种做法才是合理的。一种情况是增加的实验工作能导致得到新的物理知识，且最终会在许多方面能使得实验工作大为减少。另一种情况是可使精确度大为提高，而这种高精度正是一些特殊场合所追求的。

(7) 应用：如果实际情况中的条件与推导理论时所用的确切定义的条件可以相比拟的话，那末用这种理论解决工程问题才是正确的。

(8) 可靠性：一个理论的可靠性受两个方面的限制，一方面推导理论时所用的理想条件和实际条件应尽可能相接近。而另一方面，为了保证建立较为普遍适用的理论，又必须相当的超脱实际条件。

(9) 限制：建立一个理论所受到的限制，首先来自于

分析所有工程问题的可能性；其次，来自于建立合理假设的可能性。

(10) 好处：一个理论所得到的好处是矛盾的，有些工程问题，其真实状态是不能够完全用定量分析的，在这种情况下，我们最多是指望确立以物理学为基础的定性分析。另一方面，在有些工程问题中，起主导作用的物理规律尚不知道，此时，我们最多只能指望凭经验所得到的定量关系式。为了解决一些工程问题，定量分析和定性分析这两方面都是需要的。在少数情况下，两种分析方法能用一种单一的理论来表示。在大多数工程问题中，我们不得不满足于使用其中一种分析方法。但只要有可能的话，这两种分析方法都应当试试，即使此刻在表面上两者间仍保留着不可逾越的鸿沟，这样将会促进今后的研究。

下面我们通过一些例子来说明上面这些问题。

(1) 冷冻干燥机设计的最新发展是短接触真空干燥器的应用。该干燥器是由真空室里串联的水平加热板组成。冷冻过的颗粒状材料，如肉类、蔬菜等，由一搅拌装置驱动，在这些板上沿着圆形路线移动，并且在每次旋转后，冷冻物从一块板落到另一块板上去。

根据干燥过程的理论，在这种条件下的干燥速率完全由换热速率所控制。因此，加热板和移动的颗粒床两者间的换热系数，决定了干燥器的尺寸大小，因此，设计人员必须知道全部有关变量与换热系数的函数关系。

(2) 为了确定研究工作的目标，必须知道各种变量。而各种变量在某种程度上来说是随意决定的。显而易见，换热系数 α 可能取决于颗粒、空气及平板的热性能和机械性质 λ 、 ρ 、 C ，停留时间 t ，颗粒直径 d ，搅拌器速度 n ，床

层高 H ，搅拌器的形状，颗粒的形状等等。列举了这些变量后，如果其它一些变量明显地没有什么重要意义，我们通常就到此为止了。在这种情况下，因为热穿透系数之比：

$\sqrt{(\lambda \rho C)}_{\text{颗粒}} / \sqrt{(\lambda \rho C)}_{\text{金属}}$ 趋于零，我们可进一步知道板的热物性是不重要的。因此，板的局部温度在和每个颗粒的短暂的接触时间里保持不变。所以最终目的是确定函数：

$$\alpha = \alpha(\lambda_p, \rho_p, C_p, \lambda_c, \rho_c, C_c, t, n, d, H, \dots \text{形状})$$

(3) 所选择的方法是研究大小相等的球形颗粒材料与一加热板接触时，它们之间的换热系数。供热速率保持比起始点大四倍，搅拌器每分钟的转速保持恒定，但也可以逐级改变。

(4) 为了建立一个理论，我们首先必须引入一个或多个假设，因为理论是普遍有效的。这就意味着，对所有可能的变量值，可用它来首先找到渐近规律。

我们选择搅拌器的速度是零和无穷大两种极限情况。在搅拌器速度为零的情况下，我们引入一个假设，即空隙中充满有高压或低压空气的颗粒材料，可以看成是一种均匀的介质，在等温线是平行的简化了的假设下，我们能够使用对通过气体和一个接一个排着的颗粒的所有局部热流路线积分的办法，计算出颗粒床的平均导热系数 λ_{so} ；注意到趋近球体和板的接触点时气体的导热系数近于零，并且考虑到辐射的影响，我们获得下面的公式：

$$\frac{\lambda_{so}}{\lambda} = \left(1 - \sqrt{1 - \Psi} \right) \left(\frac{1}{1 + Kn^* \Psi} + \Psi Nu_r \right) + \sqrt{1 - \Psi} \frac{\lambda'_{so}}{\lambda}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\lambda'_{so}}{\lambda} &= \frac{2}{N-M} \left\{ \frac{\left[N - (1 + Kn^*) \frac{\lambda}{\lambda_s} \right] B}{(N-M)^2} \ln \frac{N}{M} \right. \\
&\quad \left. - \frac{B-1}{N-M} (1 + Kn^*) - \frac{B+1}{2B} \frac{\lambda_s}{\lambda} \right. \\
&\quad \left. \times [1 - (N-M) - (B-1)Kn^*] \right\} \\
M &= B \left[\frac{\lambda}{\lambda_s} + Kn^* \left(1 + Nu_r \frac{\lambda}{\lambda_s} \right) \right] \\
N &= \left(1 + Nu_r \frac{\lambda}{\lambda_s} \right) (1 + Kn^*) \\
B &= 1.25 \left(\frac{1 - \Psi}{\Psi} \right)^{\frac{10}{9}} \\
Kn^* &= \frac{2\sigma}{d} \left(\frac{2}{\gamma} - 1 \right) \\
Nu_r &= \frac{0.04C_s}{\frac{2}{\epsilon} - 1} \left(\frac{T}{100} \right)^3 \frac{d}{\lambda}
\end{aligned}$$

式中 λ, λ_s ——分别是空气和固态颗粒的导热系数；

Ψ ——空隙百分比；

d ——颗粒直径；

σ ——空气分子的平均自由程；

C_s ——辐射系数；

ϵ ——发射率；

T ——绝对温度；

γ ——调节系数。

因此，如果知道颗粒床的热特性，换热系数作为停留时

间 t 的函数，就很容易计算出来。在对导热良好的板以恒定热通量加热的边界条件下，对长的和短的停留时间 t 有近似解：

$$\tau = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{(\lambda \rho C)_{so}}}{\sqrt{t}} \quad (1-1)$$

$$\alpha = 3 \frac{\lambda_{so}}{H} \quad (1-2)$$

实验结果表明，如果停留时间趋于零， α 存在一个有限的最大值。当停留时间非常短时，考虑整个热阻由颗粒和板间的空气间隙决定，我们就能计算出 α 的这一最大值，可得到公式 (1-3)。

$$\alpha_{\infty, x} = 4 \frac{\lambda}{d} \left\{ (2Kn^* + 1) \ln \left(\frac{1}{2Kn^*} + 1 \right) - 1 + \frac{1}{4} Nu_r \right\} \quad (1-3)$$

如果停留时间较长，但是由于搅拌器混合运动使得颗粒的接触时间趋于零，这个方程同样也给出了极限情形。这意味着公式 (1-3) 给出了最大的换热系数，即使搅拌器的速度趋于无穷大，也不可能超过这一值。

如果我们根据公式 (1-1)、(1-2)、(1-3)，把换热系数 α 画成停留时间 t 的曲线，在图 1-1 可以看到，在真空情况下，即使停留时间达到 1000 秒，对搅拌器的速度也没有什么影响， α 值总是等于最大值。这意味着，在真空条件下，不可能通过搅动颗粒床来增加换热。与此相反，在高压下的搅拌强度对传热影响很大。

为了用理论弥补极限规律间的空白，我们必须引进另一个假设，把接触时间看作混合强度的函数，这里涉及到有关湍流运动问题。我们从其它一些湍流运动的问题中知道，这

方面至今还没有令人满意的理论, 因此, 我们宁愿继续用实验方法进行研究。下面各图表示了这些实验的结果。

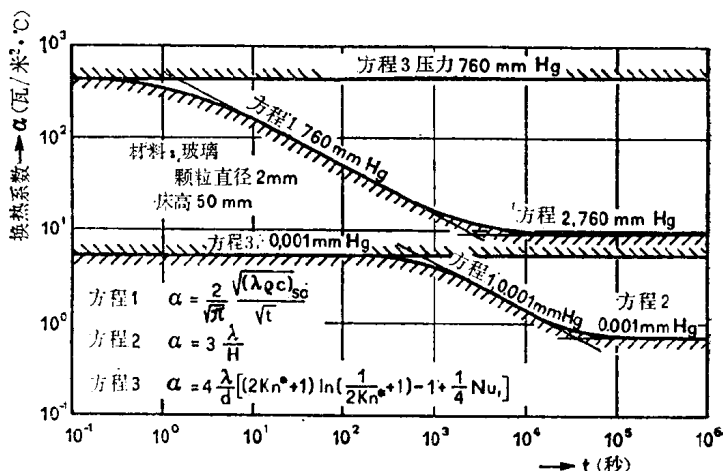


图1-1 控制搅拌颗粒床和加热板之间换热系数 α 的极限规律

这些图表证实了关于极限规律的理论, 这些数据证明了长停留时间下, 换热系数的近似值与搅拌速度有关。将公式(1-2)应用于这些近似值, 我们可以把假设的接触时间看作是搅拌器速度的函数并求取其数值。但是这样做不再叫理论, 而仅仅是一种相关。

(5) 公式(1-1)、(1-2)、(1-3)的精确度和这些变量、常量和实验数据具有同一数量级, 在公式(1-1)、(1-3)和公式(1-1)、(1-2)之间的中间范围内, 理论解可分别用图解内插法得到, 并具有足够的精度。因此在这种情况下就不必再做进一步的理论工作了。

(6) 上面得出的理论表明, 在真空条件下, 再开展进一步的实验工作既无必要也没有多大用处。因此, 可以节省

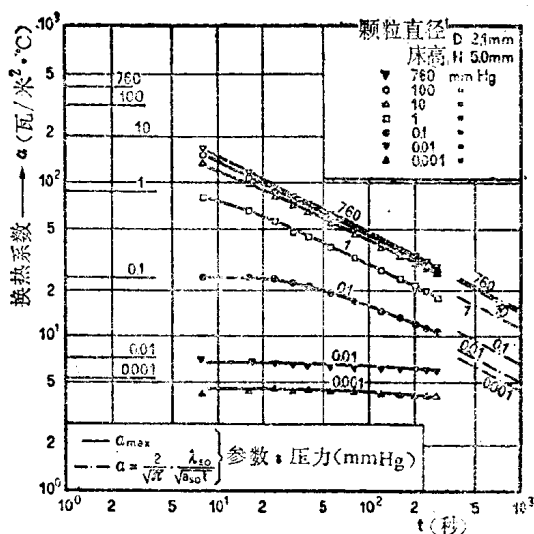


图1-2 搅拌器速度为零，在各种不同的压力下，换热系数的实验值（玻璃球直径为2.1毫米）

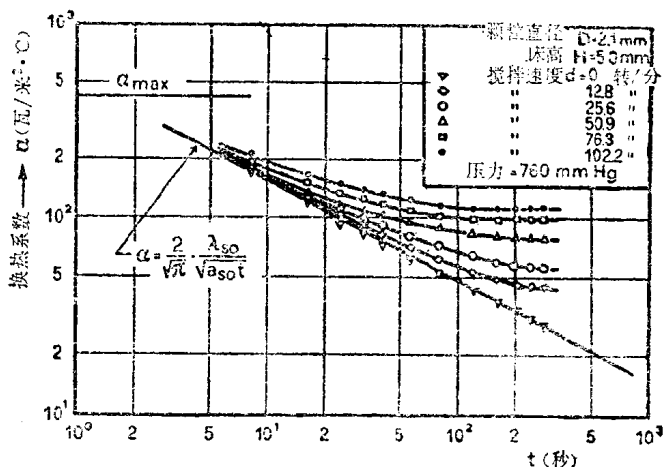


图1-3 压力为760毫米汞柱，搅拌器速度不同，玻璃球直径为2.1毫米时换热系数的实验值