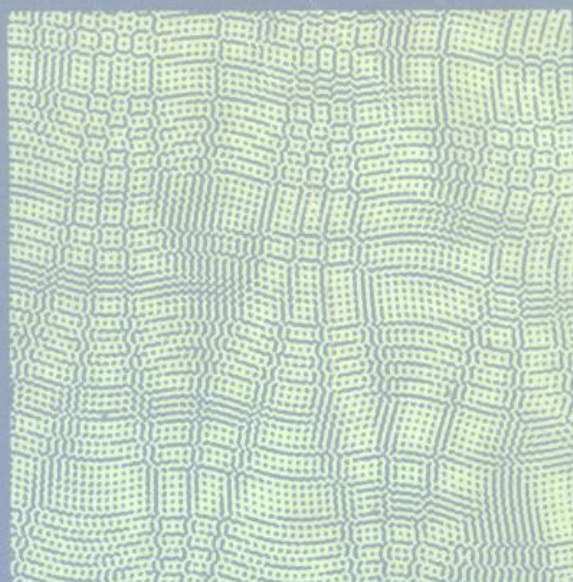
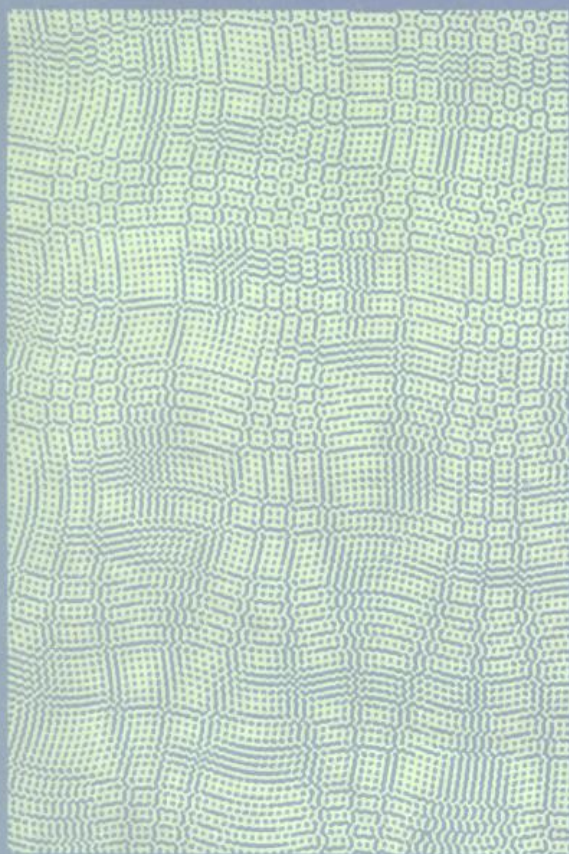


德意志联邦共和国
工 程 师 协 会
工艺与化学工程学会 编



传热手册



化 学 工 业 出 版 社

传热手册

德意志联邦共和国工程师协会工艺与化学工程学会 编

化学工业部第六设计院 译

化学工业出版社

译 序

传热过程是化工、石油、动力、食品、国防等各工业部门重要的单元操作之一。一般来说，换热设备在化工、炼油装置中占设备总重可高达40%。因此，无论从能源的利用，还是从工厂投资来看，合理地选择和设计换热器，都具有非常重要的意义。

为了适应化学工业和其它有关工业部门研究、设计和使用传热过程和设备的需要，我们翻译了德意志联邦共和国工程师协会一九七七年出版的《VDI热图集-传热计算分册》第三版，并定名为《传热手册》。

《手册》由张洋、邹光耀，苏正海、孙恪慎同志翻译，由孙恪慎、王抚华、潘素诚同志校对，梅宁远同志对其中的部分章节作了审阅。

由于我们水平所限，谬误之处，在所难免，谨请手册使用者批评指正。

译 者

第一版前言(摘译)

用本手册可对换热器进行快速计算。在形式上,本手册与其同类的理论著作和教科书以及实用性的手册有着根本的区别:其中所介绍的公式均是经过验证,并认为是目前最可靠的;方程式的适用范围,均规定在得到实验证明或经过理论判明而无显著误差的限度之内;由于作者在编纂本书时,对文献进行了筛选,鉴定,使用者则可不必再进行此类的繁琐工作,这对从事实际工作的工程技术人员,有着很重要的意义。

在换热器计算中,尽管对应用的公式全部进行了图解,但仍需对物理过程有深刻的理解,以便对基础理论的普遍应用提供更大的方便。因此,对数学模型和对原始几何形状的简单分析解法知识,与有关介质流动过程或物体内部热流设想的正确判断,具有重要的意义。

无论滞流流动还是湍流流动方式,也不论是在自然流动或强制流动的所有运动过程中,均具有传热的特殊作用。在两区域(湍流与滞流)的边界区和临界流动状态中,物理概念和物理方程是有区别的。边界区域本身几乎难以用数学方法表示。

由于许多变数决定于流动过程及与传热、温度有关的物性数据,因而使实验法和计算法解决传热问题更为复杂。这就需要采用相似理论诱导出具有专门的和一般性应用范围的明确公式。每个传热问题的主要方程式,在本手册中均尽量以无因次数群(雷诺准数、普兰特准数、格拉斯霍夫准数、努塞尔准数等等)来表示。最常见的物质水和空气传热的主要方程式,则以专门章节阐述。其它物质请参见有关图表。

《导热》和《热辐射》两章中,除列有求解工程中大量问题的分析法与实验法的图示外,还列出有关导热系数和辐射系数的各类图表。

在传热系数特别高的冷凝和蒸发传热时,边界层和表面特性就具有特殊作用。为了便于理解和正确估计上述情况对工业装置的影响,正文中专门为此作了详细说明。

最常见的液体和气体的物性参数,另列一章。对图中曲线过于交叉和集中的气体和液体的物性参数,还专门用表格列出。

搅拌釜中的传热、填料层中的传热、周期性变化过程、翅片表面及其它类似的情况,均作特殊问题讨论。

为了便于计算,本手册中列有工业换热器不同材质、不同型式时应取的传热系数 k 的近似值。设备的结构也另作一章介绍。

传热学各章,是由下列诸位先生合作写成的:

Dr. -Ing. J. Blomert, Farbenfabriken Bayer, Leverkusen
Prof. Dr. -Ing. Fr. Bošnjakovic, Technische Hochschule, Braunschweig
Prof. Dr. -Ing. H. Brauer, Technische Universität, Berlin
Prof. Dr. -Ing. W. Fritz, Phys-Techn. Bundesanstalt, Braunschweig
Dr. -Ing. U. Grigull, Farbenfabriken Bayer, Leverkusen
Prof. Dr. -Ing. H. Hausen, Technische Hochschule, Hannover
Dr. -Ing. Gg. Kling, Badische Anilin- u. Sodafabrik, Ludwigshafen/Rh.
Dr. -Ing. H. Komsoß, Deutsche Worthington G. m. b. H., Hamburg
Dr. -Ing. H. Kraussold, C. H. Boehringer Sohn, Ingelheim
Dr. -Ing. C. A. Landfermann, Dr. Schmitz & Apelt, Wuppertal-Langerfeld
Dipl. -Ing. K. Lehmann, Chemische Werke Hiils, Marl/Westf.

Dr. -Ing. *G. Lück*, Badische Anilin-und Sodafabrik, Ludwigshafen/Rh.
Prof. Dr. *L. Schiller*, Weilburg/Lahn
Prof. Dr. -Ing. *E. Schmidt*, Technische Hochschule Karlsruhe
Dipl. -Ing. *R. Schumacher*, Rütgerswerke, Frankfurt
Dr. -Ing. *M. Schunck*, Badische Anilin-und Sodafabrik, Ludwigshafen
Dr. -Ing. *R. Söhngen*, Farbenfabriken Bayer, Leverkusen
Dr. -Ing. *Jos. Spangier*, Farbwerke Höchst, Frankfurt-Höchst
Priv. Doz. Dr. -Ing. *K. Stephan*, Mannesmann-Forschungsinstitut, Duisburg-Wanheim
Dipl. -Ing. *W. Wanninger*, Phys. -Techn. Bundesanstalt, Braunschweig

德意志联邦共和国工程师协会工艺过程专业小组
《换热器及蒸发器》工作委员会
H. Kraussold. Obmann

第二版前言(摘译)

由于改用国际单位制 (SI), 现已将原有的全部章节重新编写。同时, 由于现代计算技术的发展, 为使用者提供了日益增多的深入研究计算程序的可能性。从这个观点出发, 将方程式用算图与表格形式表示, 看来已经不能满足各种情况的要求, 为此必须增写新的章节。但对具有一定适用范围和规定参量变化范围的方程, 其图解表示法还不能弃之不用。如由特性系数构成图解坐标, 则上述情况一般均可清楚地表示出来。为此, 各章中还作了必要的说明。

正如第一版所述, 为了利用数值法通过纯物理途径求得传热系数和其它参数, 除图解法外, 唯一可以采用的是算图法。利用算图可从某些物理参数中求得特性系数。

VDI热图集的若干章节, 例如《不稳定导热》一节, 原稿编写时就考虑运用计算程序, 其它章节则不然, 因而不适用。该节中的分析近似解法, 具有采用小型电算机计算的优越性。

相反, 适用于蒸发过程计算的是一种标准程序。采用标准程序对计算机的操作和维护, 具有重要意义。

混合物的冷凝, 是一个复杂的过程, 但又是一个完全采用数值计算的例子。本手册对蒸发和冷凝这两个过程的典型特性作了详细说明。这种特性正愈益得到工程技术人员的重视。

参加本手册修改和增编工作的有:

Dr. -Ing. J. Bandel
Dr. -Ing. J. Blomeert
Prof. em. Dr. -Ing. Fr. Bosnjakovic
Dr. -Ing. H. Börner
Prof. Dr. -Ing. F. Brandt
Prof. A. Buck
Priv. -Doz. Dr. -Ing. J. M. Chawla
Prof. Dr. -Ing. K. Elgeti
Dr. -Ing. V. Gnielinski
Prof. em. Dr. -Ing. Dr. -Ing. e. h. H. Hausen
Dr. -Ing. Fr. -W. Hennecke
Prof. Dr. -Ing. W. Kast
Dr. -Ing. H. Kilger
Dr. -Ing. Gg. Kling
Dr. -Ing. H. Komösa
Prof. Dr. -Ing. M. Körner
Dr. -Ing. E. Mach
Dr. -Ing. H. Martin

Prof. Dr. -Ing. A. Mersmann
Prof. Dr. -Ing. O. Molerus
Dr. -Ing. E. Muschelknautz
Dr. -Ing. M. Poppe
Prof. Dr. -Ing. R. Rautenbach
Dr. -Ing. W. Roetzel
Prof. Dr. rer. nat. H. Rögener
Dr. -Ing. E. Schellmann
Prof. Dr. -Ing. E. U. Schlünder
Dr. -Ing. M. Schunck
Dr. -Ing. K. Schwies
Prof. Dr. -Ing. K. Stephan
Dipl. -Ing. M. Thüer
Prof. Dr. -Ing. A. Vogelpohl
Prof. Dr. D. Vortmeyer
Dipl. -Ing. H. Wojahn
Dr. -Ing. P. Zchner
Dr. -Ing. H. Zemlin

德意志联邦共和国工程师
协会工艺与化学工程学会 (GVC)
E. U. Schlünder 1974年春
于Karlsruhe与Düsseldorf.

第三版前言(摘译)

第三版VDI热图集是在第二版的基础上经校正再版的。除勘正印刷错误外,还对各章节中不当之处作了修改。因此,第二版未能编入的7.6节“折流板列管式换热器的壳程传热”及12.1节“搅拌槽的传热”均已收入本版,但12.6节“流化床的传热”尚在编写之中,因为从实验室试验到工业装置生产,目前仍存在不少难题。

德意志联邦共和国工程师

协会工艺与化学工程学会

E. U. Schlünder 1977.春

于Karlsruhe与Düsseldorf

目 录

第一版前言 (摘译)

第二版前言 (摘译)

第三版前言 (摘译)

第一章 传热学导论

1.1 概念及基本定律..... 1	(4) 火焰辐射..... 32
1.1.1 热..... 1	(5) 辐射传热膜系数..... 33
1.1.2 传热..... 2	1.3 传热膜系数的精确度及其 应用..... 33
1.2 接触传热..... 3	1.4 传质..... 38
1.2.1 传热膜系数 α 的定义..... 3	1.4.1 基本概念..... 38
1.2.2 传热膜系数的实用计算..... 3	1.4.2 静止系统中二元混合 物的扩散传质..... 40
(1) 静止介质中的传热..... 4	1.4.3 流动系统中二元混合 物的扩散传质..... 41
(2) 流动介质中的传热..... 6	1.4.4 均匀场中传热与传质 同时进行..... 42
(3) 蒸汽冷凝时的传热..... 17	1.5 强化传热的可能性..... 44
(4) 液体沸腾时的传热..... 21	1.5.1 表面加翅片..... 44
(5) 混合物的蒸发与冷凝..... 26	1.5.2 壁面材质的影响..... 45
1.2.3 辐射传热..... 30	1.5.3 传热系数的强化..... 45
(1) 基本概念..... 30	
(2) 工业应用的表面 辐射..... 31	
(3) 气体辐射..... 32	

第二章 符号、单位、无因次数群

2.1 通用符号一览表..... 49	2.2.4 国际单位制采用的十 进词冠..... 54
2.2 规定的单位..... 53	2.2.5 导出单位与基本单位 的换算..... 54
2.2.1 基本物理量规定为国 际单位制(SI)的基本单位..... 53	2.3 单位换算..... 55
2.2.2 原子物理单位..... 53	2.4 传热的无因次数群..... 64
2.2.3 导出单位..... 53	

第三章 换热器的计算

3.1 换热器的计算方法..... 77	3.2 通过间壁的传热..... 97
3.1.1 计算步骤..... 77	3.2.1 平壁的热传导..... 97
3.1.2 热流量 Q 的计算..... 77	3.2.2 曲面壁的热传导..... 98
3.1.3 平均温差的计算..... 78	3.2.3 若干种换热器传热系

数k值的大致范围·····	100
3.2.4 保护层和污垢对传热	

的影响·····	100
----------	-----

第四章 物性数据

4.1 物性数据的估算方法·····	105
4.1.1 引言·····	105
4.1.2 临界数据·····	105
(1) 对应状态理论·····	105
(2) 临界温度·····	106
(3) 临界压力·····	106
(4) 临界体积·····	107
(5) 临界参数和偏心因子·····	108
(6) 混合物的临界常数·····	109
4.1.3 比容与体膨胀系数·····	109
(1) 气体的比容·····	111
(2) 气体的体膨胀系数·····	112
(3) 液体的比容·····	112
(4) 液体的体膨胀系数·····	114
4.1.4 沸点·····	115
4.1.5 蒸汽压曲线·····	116
(1) $\lg p-1/T$ 图中的蒸 汽压曲线·····	116
(2) $1/T$ 坐标的变换·····	116
4.1.6 汽化热·····	117
(1) Trouton法·····	117
(2) 克-克 (Clausius- Clapeyron) 方程·····	117
(3) 汽化热与温度的关系·····	122
(4) 液体混合物的汽化热·····	122
4.1.7 热容·····	123
(1) 气体的热容·····	123
(2) 液体的热容·····	126
(3) 热容与压力、温度 的关系·····	128
4.1.8 粘度·····	128
(1) 气体的粘度·····	129
(2) 气体混合物的粘度·····	129
(3) 液体的粘度·····	131
(4) 液体粘度与温度的 关系·····	133

(5) 液体粘度与压力的 关系·····	135
(6) 液体混合物的粘度·····	135
4.1.9 导热系数·····	135
(1) 气体的导热系数·····	135
(2) 温度的影响·····	136
(3) 压力的影响·····	136
(4) 气体混合物的导热 系数·····	138
(5) 液体的导热系数·····	138
(6) 温度与压力的影响·····	140
(7) 液体混合物的导热 系数·····	140
4.1.10 表面张力·····	140
(1) 纯液体(单一组分) 的表面张力·····	140
(2) 混合物的表面张力·····	141
4.1.11 Pr数·····	141
(1) 气体的Pr数·····	141
(2) 液体的Pr数·····	141
4.2 水和空气的物性数据·····	143
4.2.1 水的物性数据·····	143
4.2.2 空气的物性数据·····	153
4.3 某些物质的气体和液体的 物性数据·····	162
4.3.1 临界常数和潜热·····	162
4.3.2 不同压力下的沸点和 熔融点·····	168
4.3.3 液体的密度·····	174
4.3.4 液体的定压热容·····	180
4.3.5 0~1bar范围内气体 的定压热容·····	186
4.3.6 液体的导热系数·····	192
4.3.7 气体的导热系数·····	198
4.3.8 液体的动力粘度·····	204
4.3.9 气体的动力粘度·····	210

第五章 导 热

5.1 导热系数的计算.....	218	5.2.2 可变导热系数.....	242
5.1.1 引言.....	218	5.3 器壁及管道的热损失.....	244
5.1.2 金属及合金的导热 系数.....	219	5.3.1 室内保温壁热损失的 估算.....	244
5.1.3 耐火砖的导热系数.....	219	5.3.2 保温管道的热损失.....	244
5.1.4 绝热材料的导热系数.....	225	5.3.3 计算静止空气中热、 冷量损失的图解法.....	245
(1) 保冷材料.....	225	5.3.4 流动空气中热损失的 计算.....	247
(2) 保温材料.....	226	5.3.5 墙内铺设管道的热 损失.....	247
5.1.5 湿度对导热系数的 影响.....	227	5.3.6 保温管道的附加热 损失.....	249
(1) 土壤.....	227	5.3.7 室内无保温的管道及 容器的热损失.....	250
(2) 砖砌体.....	228	5.4 静止物体中的不稳定导热.....	251
(3) 木材.....	229	5.4.1 基本方程式.....	251
5.1.6 建筑材料的导热系数 (常用值).....	232	5.4.2 初始条件和边界条件.....	252
5.1.7 填充物的有效导热 系数.....	232	5.4.3 分析解法.....	252
5.1.8 气体和液体的导热 系数.....	235	(1) 瞬变导热.....	252
5.2 物体中的稳定导热.....	238	(2) 周期导热.....	271
5.2.1 不同物体中的温度 分布.....	238	(3) 其他解题方法.....	279

第六章 自然对流传热

6.1 在垂直壁面和水平圆柱体 上的滞流和湍流.....	283	6.2.4 钢制板式加热器.....	292
6.1.1 基本原理.....	283	6.2.5 翅片式水加热器.....	292
6.1.2 用平均曲线统一表示 各种形状物体的传热.....	284	6.2.6 管子.....	293
6.1.3 例题.....	287	6.3 气体及液体层中的自然对 流传热.....	293
6.2 热水加热器的放热.....	290	6.3.1 水平层.....	294
6.2.1 铸造散热器.....	291	6.3.2 倾斜平面层.....	295
6.2.2 钢制散热器.....	291	6.3.3 水平同心圆环状夹层.....	295
6.2.3 钢管散热器.....	291	6.3.4 垂直平面层.....	295
		6.3.5 垂直环状夹层.....	297

第七章 强制对流传热

7.1 沿平壁流动时的传热.....	298	湍流边界层.....	298
7.1.1 流过平板时的滞流及		7.1.2 未受热段的影响.....	300

7.1.3 热流方向的影响·····	300	7.6 折流板列管式换热器的壳	
7.2 管内流动传热·····	304	程传热·····	325
7.2.1 临界雷诺准数、传热		7.6.1 计算方法的说明·····	325
膜系数的定义和管内		7.6.2 传热膜系数的定义·····	326
滞流传热·····	304	7.6.3 结构尺寸·····	326
7.2.2 管内湍流传热·····	307	7.6.4 平均努塞尔准数的	
7.2.3 热流方向和管入口形		计算·····	326
状的影响·····	308	7.6.5 圆缺形折流挡板列管	
7.2.4 非圆形管和蛇管的		式换热器校正系数 f_w	
传热·····	310	的计算·····	327
7.3 同心圆夹层内的传热·····	311	7.6.6 管排数和热流方向的	
7.3.1 滞流时的传热·····	311	影响·····	331
7.3.2 湍流时的传热·····	316	7.6.7 传热膜系数的计算·····	331
7.4 流体横向绕流流过单管、		7.6.8 例题·····	331
线材和异型圆柱体时的		7.7 填充管内的传热·····	334
传热·····	317	7.7.1 引言·····	334
7.4.1 热流方向的影响·····	318	7.7.2 管式反应器的热平衡·····	335
7.4.2 流体以一定投向角绕		7.7.3 填充层的有效导热	
流流过圆柱体时的		系数·····	337
传热·····	318	7.7.4 流体通过填充层时的径向	
7.5 流体横流流过管束时的		和轴向有效扩散系数·····	346
传热·····	322	7.7.5 流体通过填充管内的	
7.5.1 传热膜系数的定义·····	322	速度分布(速度侧	
7.5.2 流过单管排时传热膜		形图)·····	347
系数的计算·····	322	7.7.6 管壁和填充层之间的	
7.5.3 说明·····	323	传热膜系数·····	348
7.5.4 流过管束时传热膜系		7.7.7 填充管无热量产生时	
数的计算·····	323	的总传热系数·····	351
7.5.5 管排数的影响·····	325	7.7.8 例题·····	353
7.5.6 热流方向的影响·····	325		

第八章 蒸 发

8.1 泡核沸腾时的传热·····	359	8.2.2 膜状沸腾·····	363
8.1.1 泡核沸腾区的传热膜		8.3 混合物泡核沸腾时的传热·····	369
系数·····	359	8.3.1 二元混合物沸腾时传	
8.1.2 最大热流密度 q_{max} ·····	360	热的计算·····	369
8.2 蒸发器管内的传热·····	362	8.3.2 液体混合物沸腾时的	
8.2.1 蒸发器管内平均传热		最大热流密度·····	371
膜系数·····	363	8.3.3 例题·····	371

第九章 冷 凝

9.1 纯蒸汽的冷凝	374	9.2.4 混合蒸汽的冷凝	381
9.1.1 静止饱和蒸汽的膜状冷凝	374	9.2.5 例题	385
9.1.2 流动饱和蒸汽的膜状冷凝	377	9.2.6 混合蒸汽的冷凝 (液体中部分组分不互溶)	392
9.1.3 过热蒸汽的膜状冷凝	378	9.3 蒸汽-气体混合物的冷凝	392
9.1.4 滴状冷凝	378	9.3.1 概述	392
9.2 混合蒸汽的冷凝	380	9.3.2 基本原理	392
9.2.1 概述	380	9.3.3 例题	395
9.2.2 定义	380	9.4 管内冷凝传热	406
9.2.3 相律	380		

第十章 热 辐 射

10.1 工业热辐射表面	411	辐射交换时角系数 φ_{12} 的计算	421
10.1.1 引言	411	(1) 图解法	421
(1) 辐射能的分布	411	(2) 分析法	422
10.1.2 辐射热流量的计算	412	10.2.3 有限大表面辐射交换时角系数 φ_{12} 的求取	427
(1) 最简单的情况	412	10.2.4 列管的辐射	436
(2) 入射系数或角系数	416	10.3 气体辐射	438
10.1.3 多个表面之间辐射交换的计算	417	10.3.1 辐射强度	438
(1) 密闭空间法 (封闭法)	417	10.3.2 恒温气体中的辐射和吸收	439
(2) 填充物中的热辐射	419	10.3.3 气体与管壁之间的辐射交换	441
(3) 空穴的热辐射	419	10.3.4 气体混合物	443
10.1.4 补充采用的符号	419	10.3.5 粉尘的辐射	449
10.2 角系数的计算	421	10.3.6 含尘气体的辐射	450
10.2.1 角系数 φ_{ik} 的计算	421		
10.2.2 有限大表面和面积微元			

第十一章 压 降

11.1 计算压降的通式	454	(1) 湍流	465
11.2 流过管子时的压降	455	(2) 滞流	466
11.2.1 流过圆管时的压降	455	11.3 流过变断面管时的压降	466
(1) 滞流	456	11.3.1 突然缩小	466
(2) 湍流	456	(1) 突然缩小的管道	467
(3) 粗糙度的影响	456	(2) 流入管束内	467
(4) 弯管	461	(3) 由容器流出	467
11.2.2 流过非圆断面管时的压降	465	11.3.2 断面逐渐缩小	468
		11.3.3 突然扩大	468

11.3.4 断面逐渐扩大	469	的压降	497
11.3.5 标准孔板、标准喷嘴、 标准文丘里喷嘴	469	11.7.1 摩擦压降, $\Delta P_{\text{摩擦}}$	497
11.3.6 流过成直角和锐角的 T 形管	470	11.7.2 静压压降, $\Delta P_{\text{静压}}$	502
11.3.7 流体在转向流动时的 压降	473	11.7.3 加速时的压降 $\Delta P_{\text{加速}}$	503
(1) 弯管	473	11.7.4 弯管的影响	505
(2) 弯头	473	11.8 气流输送的压降	507
(3) 焊制弯头(虾米弯)	475	11.9 非牛顿流体流动时的压降	515
11.3.8 通过阀和闸阀时的压 降	477	11.9.1 引言	515
(1) 阀	477	11.9.2 宾汉流体	517
(2) 闸阀	477	11.9.3 粘弹性流体	521
(3) 阀和闸阀的节流	479	11.10 喷淋填料的压降和泛点	526
(4) 旋塞	479	11.10.1 填料塔的应用	526
(5) 节流阀和节流闸板	479	11.10.2 填料的种类	526
(6) 其它管道部件	479	11.10.3 塔的结构	526
11.4 横向流过管束时的压降	480	11.10.4 填料塔的操作范围	526
11.4.1 概述	480	11.10.5 干填料的压降	526
11.4.2 直列管束	482	(1) 干空心填料层的压降 计算	528
11.4.3 错列管束(有规 则的)	483	(2) 喷淋填料层的压降	528
11.4.4 十字交叉排列	485	11.10.6 泛点	528
11.4.5 有关其它特殊排列的 说明	485	(1) 计算泛点的算图	530
11.5 通过填料层的压降	485	11.11 有和无折流板的列管换热 器压降	535
11.5.1 概述	485	11.11.1 结构参数	535
11.5.2 球形填料	487	11.11.2 结构系数	535
(1) 乱堆球形填料	487	11.11.3 压降系数与雷诺准数 的关系	535
(2) 整齐堆放的球形 填料	487	11.11.4 定性温度	536
11.5.3 带棱角的填料	487	11.11.5 适用范围	536
11.6 流化床的压力损失	488	11.11.6 不同结构形式的特殊 结构参数	537
11.6.1 流态化	488	(1) 无折流板的管束	537
11.6.2 临界点	489	(2) 带折流板的列管换热 器	537
11.6.3 流化床层的膨胀	491	(2.1) 带弓形折流板的管 束	537
11.6.4 操作速度	492	(2.2) 环盘折流板的管束	537
11.6.5 流化床的压降	493	(2.3) 管孔折流板	538
11.7 流过冷凝器和蒸发器管内		11.12 管内气液混合物料的临界 质量速率	538

第十二章 传热的特殊问题

12.1 搅拌槽(釜)的传热	542	膜	564
12.1.1 引言	542	(3) 水膜的传热	564
12.1.2 牛顿流体的传热	542	12.4.4 冷却表面的传热	567
(1) 槽内壁的传热	542	12.5 非牛顿流体的传热	568
(1.1) 叶片式搅拌器	543	12.5.1 概述	568
(1.2) 螺旋桨式搅拌器	543	12.5.2 滞流	569
(1.3) 板式搅拌器	543	(1) 宾汉流体	569
(1.4) 锚式搅拌器	544	(2) 粘弹性流体	574
(1.5) 螺旋式搅拌器	544	12.5.3 湍流	576
(1.6) 刮板式冷却器	544	(1) 宾汉流体	576
(2) 蛇管传热	545	(2) 粘弹性流体	581
(2.1) 蛇管内的传热	545	12.6 流化床的传热(本节原文缺, 见第三版前言说明)	
(2.2) 蛇管外的传热	546	12.7 凉水塔的计算	586
(2.3) 垂直排列的蛇管	546	12.7.1 封闭式冷却系统	587
(3) 槽外壁的传热	547	(1) 强制通风(“干式冷却 器”)	587
12.1.3 非牛顿流体的传热	548	(2) 自然通风冷却塔	587
12.1.4 搅拌釜的加热和冷却	550	12.7.2 蒸发式冷却器(“湿式 冷却器”)	591
12.2 翅片表面的传热	551	(1) 湿空气的计算公式	594
12.2.1 几何尺寸	551	(2) 逆流冷却系统	595
12.2.2 符号	553	(3) 错流冷却系统	600
12.2.3 计算	554	(4) 淋水装置(填料)的 特性曲线	601
12.3 焊接蛇管的壁面传热	557	(5) 操作条件变化时的逆 流冷却系统冷却性能 的计算	602
12.4 垂直淋洒表面的传热	563	(6) 自然通风冷却塔	603
12.4.1 概述	563		
12.4.2 液膜厚度	563		
12.4.3 加热表面上的传热	564		
(1) 滑动长度大的液膜	564		
(1.1) 液体汽化的影响	564		
(2) 滑动长度较短的液			

第十三章 换热器的操作特性

13.1 补充符号	610	13.2.2 平均温差 Δt_m	612
13.2 操作特性 ϕ 的应用及通用 关联式	610	13.2.3 交流式换热器	612
13.2.1 热效率或换热效率 ϵ	612	13.3 组合式换热器	613
		13.4 例题计算	615

第十四章 交流换热器的周期性传热

14.1 交流换热器的工作原理	632	14.2 蓄热器填充物的结构	633
-----------------------	-----	----------------------	-----

14.3 交流换热器的温度分布	635	计算	640
14.4 交流换热器的传热系数	637	14.6 例题	642
14.5 交流换热器温度分布的			

第十五章 换 热 器

15.1 换热器的传热方式	646	15.2.1 列管式换热器	647
15.1.1 传热方式和换热器的一 般结构形式	646	15.2.2 其它结构型式的换热 器	656
15.2 换热器结构设计的说明	647		

第一章 传热学导论

1.1 概念及基本定律

1.1.1 热

热的概念，是由热力学第一定律来定义的。该定律说明物体的焓值随输入的热和功相互间转换而改变。现以液体流过理想混合的搅拌釜为例加以说明，如图 1。

搅拌釜内液体温度为 ϑ 、物料量为 V 、将温度为 ϑ_1 的液流 $\dot{V}$ 从 1 输入搅拌釜，而从 2 以温度 ϑ_2 排出。加热管输入的热量为 $\dot{Q}$ ，搅拌器电机供给的功为 $\dot{L}$ 。液体物料总焓为：

$$H_2 = \rho_{Cp} V \vartheta_2 \quad (1)$$

搅拌釜进、出口处物料焓值为：

$$\dot{H}_1 = \rho_{Cp} \dot{V} \vartheta_1 \quad (2)$$

$$\dot{H}_2 = \rho_{Cp} \dot{V} \vartheta_2 \quad (3)$$

根据热力学第一定律，则：

$$\dot{Q} + \dot{L} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + \frac{\partial H_2}{\partial t} \quad (4)$$

这里，系统限于搅拌釜本身。

$H_2 - H_1 = \Delta H$ 为对流焓变， $\partial H_2 / \partial t$ 为局部焓变，两者之和为实际焓变。

在稳态操作中， $\partial H_2 / \partial t = 0$ 。输入的热量 $\dot{Q}$ 和功率 $\dot{L}$ 与对流焓差 $H_2 - H_1$ 相等。

如关闭 1 与 2 处的阀门，则 $\dot{H}_1 = 0$ ， $\dot{H}_2 = 0$ ，输入的热和功等于局部焓变 $\partial H_2 / \partial t$ 。

如使经冷却管排出的热量刚好与搅拌器电机输入的功相等，则 $\dot{Q} + \dot{L} = 0$ ，对流焓差 ΔH 与局部焓变 $\partial H_2 / \partial t$ 在数值上相等。

如设想将搅拌釜不断缩小到其大小与 $dV = dx \, dy \, dz$ 的微元体积相等（如图 2），则摩

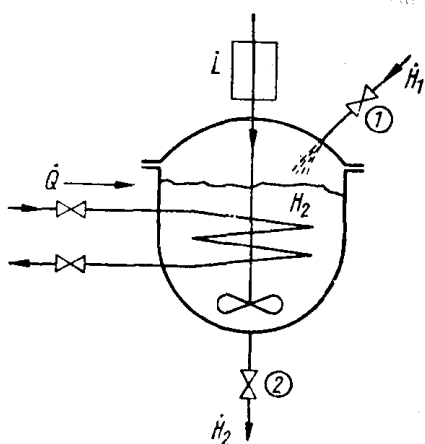


图 1 搅拌釜

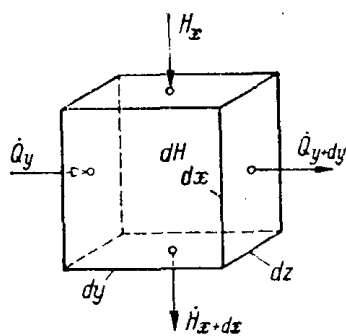


图 2 微元体积

注：本章由 E. U. Schlünder 编写。其中 1.2.3 小节与 1.5 节引自前一版的相应章节（E. Schmidt 编写）。

擦功可忽略不计, 且既可向微元体输入热量, 又可从中导出热量时, 按热力学第一定律求得下式:

$$\dot{Q}_y - \dot{Q}_{y+dy} = \dot{H}_{x+dx} - \dot{H}_x + \frac{\partial(dH)}{\partial t} \quad (5)$$

现设:

$$\dot{Q} = \dot{q} dx dz \quad (6)$$

$$\dot{H} = \dot{h} dy dz \quad (7)$$

$$dH = h dx dy dz \quad (8)$$

将上列各式代入式(5)可得:

$$-\frac{\partial \dot{q}}{\partial y} = \frac{\partial \dot{h}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{h}}{\partial t} \quad (9)$$

一般情况下, 微元体积 dV 的三个坐标方向既包括热流, 又包括焓流。因此, 热力学第一定律的通式是:

$$-\left\{ \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right\} = \frac{\partial \dot{h}}{\partial t} + \frac{\partial \dot{h}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{h}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{h}_z}{\partial z} \quad (10)$$

比焓 h 和比焓率 $\dot{h}$ 还可以用下列形式表示:

$$h = \rho c_p \vartheta \quad (11)$$

$$\dot{h}_i = \rho c_p w_i \vartheta \quad (12)$$

因此, 热力学第一定律最终可得下式:

$$-\left\{ \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right\} = \rho c_p \left\{ \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + w_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + w_z \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right\} \quad (13)$$

或应用导数 $D\vartheta/D$ 和Nabla算子 ∇ 简化为:

$$-\nabla \dot{q} = \rho c_p \frac{D\vartheta}{Dt} \quad (14)$$

热力学第一定律说明了, 热流密度的局部变化率等于焓随时间的实际变化率。

1.1.2 传热

尽管式(4)根据热力学第一定律说明了热与焓变换之间的关系, 但尚不能说明热是如何传给物体从而改变其焓值的。

从原则上讲, 热主要以两种形式传递:

接触传递;

辐射传递。

按照傅立叶(Fourier)分子传热基本定律可进行接触传热计算[1]:

$$\dot{q}_n = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \quad (15)$$

式中 λ ——有关物料的导热系数;

n ——坐标位置。

利用斯蒂芬-波尔茨曼定律(见M. Planck[2])可进行灰体辐射的传热计算:

① 即为哈密顿算子——译者注。