

第6篇 传热及传热设备

主稿人 陈学俊 西安交通大学 教授 中国科学院院士

编写人 周芳德 西安交通大学 教授

郭烈锦 西安交通大学 教授

陈听宽 西安交通大学 教授

一般参考文献	6-3	2.3.4 非定态导热的数值解法	6-15
1 概论	6-4	2.3.5 有相变的导热	6-16
1.1 热量传递的基本方式	6-4	参考文献	6-16
1.2 换热器的类型和选取	6-4	3 对流传热	6-16
1.2.1 换热器以传递过程分类	6-4	3.1 概述	6-16
(1) 直接接触式换热器	6-4	3.2 对流传热膜系数	6-16
(2) 非直接接触式换热器	6-4	3.2.1 能量方程	6-16
1.2.2 换热器以传热表面紧凑度分类	6-4	3.2.2 传热膜系数	6-17
1.2.3 换热器以结构分类	6-4	3.2.3 总传热系数	6-17
(1) 管式换热器	6-4	3.2.4 传热膜系数求解法	6-17
(2) 板式换热器	6-5	3.2.5 相似原理和量纲分析	6-17
(3) 扩展表面式换热器	6-5	3.3 自然对流传热	6-18
(4) 蓄热式换热器	6-5	3.3.1 各种几何形状物体的 Nusselt 方程式	6-18
1.2.4 换热器以流动方式分类	6-6	3.3.2 简化的量纲分析式	6-18
1.2.5 传热设备的选取	6-6	3.3.3 伴有辐射热损失的自然对流	6-18
1.3 传热设备在化学工业中的应用	6-7	3.3.4 密闭空间内的自然对流	6-19
参考文献	6-7	3.4 强制对流传热	6-19
2 导热	6-8	3.4.1 动量传递与热量传递的类比理论	6-20
2.1 导热基本定律及导热系数	6-8	3.4.2 层流传热	6-20
2.1.1 傅立叶定律	6-8	3.4.3 过渡区域的传热	6-22
2.1.2 三维导热方程	6-8	3.4.4 湍流传热	6-22
2.1.3 导热系数	6-8	3.5 非牛顿流体的传热	6-25
2.2 定态导热	6-11	3.5.1 非牛顿流体的粘性	6-25
2.2.1 一维导热	6-12	3.5.2 非牛顿流体的导热系数	6-26
(1) 通过平壁和圆筒壁的导热	6-12	3.5.3 管内强制对流传热膜系数	6-26
(2) 通过翅片的导热	6-13	3.6 液态金属的传热	6-27
2.2.2 二维导热	6-13	3.6.1 管内流动	6-27
2.3 非定态导热	6-13	3.6.2 横掠管束	6-28
2.3.1 一维非定态导热	6-13	参考文献	6-28
2.3.2 二维及三维非定态导热的求解	6-15	4 有相变时的传热	6-29
2.3.3 导热问题数值计算原理	6-15	4.1 引言	6-29

4.2	冷凝换热	6-29	参考文献	6-50	
4.2.1	冷凝现象与机理	6-29	6 传热过程计算	6-50	
4.2.2	冷凝膜系数的计算公式	6-29	6.1	传热过程的分析	6-50
(1)	平表面上的膜状冷凝	6-29	6.2	平均温度差	6-51
(2)	管外壁面上的膜状冷凝	6-29	(1)	逆流或并流	6-51
(3)	管内壁面上的膜状冷凝	6-31	(2)	折流或错流	6-51
(4)	不冷凝气体及其他非理想因素的影响	6-31	(3)	平均温度差校正因子 F_T	6-52
4.3	沸腾换热	6-32	6.3	总传热系数	6-52
4.3.1	沸腾现象与机理	6-32	(1)	总传热系数 K 值的计算	6-52
4.3.2	池内沸腾	6-32	(2)	总传热系数 K 值的大致范围	6-54
(1)	沸腾曲线与影响因素	6-32	6.4	污垢	6-57
(2)	传热膜系数的计算	6-32	(1)	污垢的形成	6-57
4.3.3	流动沸腾	6-35	(2)	污垢的控制	6-57
(1)	管内沸腾传热	6-35	(3)	污垢性质和除垢时间	6-57
(2)	管内汽(气)液两相流摩擦阻力	6-38	(4)	污垢的清除和防垢剂	6-57
参考文献		6-39	(5)	污垢系数	6-58
5 辐射换热		6-40	6.5	有效因子及传热单元数	6-58
5.1	热辐射和辐射特性	6-40	(1)	有效因子	6-58
5.1.1	基本概念	6-40	(2)	有效因子和传热单元数	6-59
5.1.2	基本定律和辐射特性	6-41	(3)	ϵ -NTU 法的应用	6-59
(1)	黑体辐射的基本定律	6-41	6.6	从实验数据推求传热膜系数	6-61
(1.1)	Plank (普朗克) 定律	6-41	参考文献	6-62	
(1.2)	Stefan-Boltzman (斯蒂芬-波尔茨曼) 定律	6-41	7 传热强化和节能技术	6-62	
(1.3)	Lambert (兰贝特) 定律	6-41	7.1	传热强化	6-62
(2)	实际物体表面的辐射特性	6-41	7.1.1	概述	6-62
(2.1)	实际固体黑度与灰体	6-41	7.1.2	槽管	6-63
(2.2)	实际固体的吸收率与 Kirchhoff (克希霍夫) 定律	6-41	7.1.3	翅片	6-63
(2.3)	实际固体的反射率	6-45	7.1.4	多孔介质	6-65
(3)	气体的热辐射	6-45	7.1.5	旋流流动	6-66
(3.1)	气体黑度(半球总辐射黑度(辐射率))	6-45	7.1.6	螺旋管	6-66
(3.2)	粉尘的辐射	6-46	7.1.7	管内添加物	6-66
(3.3)	含尘气体的辐射	6-47	7.1.8	流体添加物	6-67
(4)	火焰的热辐射	6-47	7.1.9	冷凝传热强化	6-68
5.2	辐射换热	6-47	7.2	节能技术	6-68
5.2.1	角系数	6-47	7.2.1	概述	6-68
5.2.2	黑体表面间的辐射换热	6-48	7.2.2	燃料燃烧的合理化	6-69
(1)	两黑表面间的辐射换热	6-48	7.2.3	加热、冷却等传热过程的合理化	6-69
(2)	封闭体系中黑表面间的辐射换热	6-48	7.2.4	蒸汽的有效使用	6-69
5.2.3	灰体表面间的辐射换热	6-48	7.2.5	压缩空气的有效运行	6-69
(1)	两灰体表面间的辐射换热	6-48	7.2.6	废热回收	6-69
(2)	封闭体系中灰体表面间的辐射换热	6-49	参考文献	6-70	
5.2.4	遮热板	6-49	8 换热器	6-72	
5.2.5	气体与管壁间的辐射换热	6-50	8.1	管壳式换热器	6-72
			8.1.1	管壳式换热器的结构型式	6-72
			8.1.2	管程结构	6-72
			8.1.3	壳程结构	6-77
			8.1.4	管壳式换热器的设计计算	6-79

8.2	板式换热器	6-86	9.3.1	废热锅炉的作用、特点与分类	6-118
8.2.1	板式换热器	6-86	9.3.2	废热锅炉结构	6-119
8.2.2	螺旋板式换热器	6-89	9.3.3	废热锅炉设计特点	6-123
8.2.3	板翅式换热器	6-91	9.4	热管换热器	6-125
8.2.4	伞板式换热器	6-93	9.4.1	热管工作原理与特点	6-125
8.2.5	板壳式换热器	6-94	9.4.2	热管工作性能	6-126
8.3	其他换热器	6-94	9.4.3	热管换热器	6-128
8.3.1	套管式换热器	6-94	参考文献		6-129
8.3.2	蛇管式换热器	6-96	10 直接接触式换热器		6-129
8.3.3	刺刀管式换热器	6-97	10.1	工作特点和传热原理	6-129
8.3.4	降膜式换热器	6-97	10.2	直接接触式冷凝器	6-130
8.3.5	特种材料换热器	6-97	10.3	冷却塔	6-132
8.4	空冷器	6-98	10.4	蒸发冷却器	6-134
8.4.1	空冷器基本特点	6-98	10.5	泡沫接触式换热器	6-134
8.4.2	空冷器的型式与构造	6-99	参考文献		6-135
8.4.3	自然通风空冷器	6-100	11 保温与绝热材料		6-135
8.4.4	机械通风空冷器	6-101	11.1	绝热材料	6-135
8.4.5	增湿空冷器	6-101	11.1.1	绝热材料种类	6-135
8.4.6	空冷器设计计算	6-101	(1)	无机绝热材料	6-135
8.5	换热器的优化设计	6-105	(2)	有机绝热材料	6-135
8.5.1	换热器型式的选择	6-105	(3)	金属绝热材料	6-135
8.5.2	换热表面设计的优化	6-106	(4)	复合绝热材料	6-135
8.5.3	系统优化	6-107	11.1.2	绝热材料使用温度	6-135
8.5.4	计算机辅助优化设计	6-109	11.1.3	绝热材料的形态	6-135
参考文献		6-110	11.2	常用绝热材料	6-136
9 再沸器、冷凝器与废热锅炉		6-110	11.2.1	硅藻土	6-136
9.1	再沸器	6-110	11.2.2	蛭石	6-136
9.1.1	再沸器的分类和特性	6-110	11.2.3	膨胀珍珠岩	6-136
9.1.2	立式热虹吸再沸器	6-112	11.2.4	人造矿物纤维	6-137
9.1.3	卧式热虹吸再沸器	6-114	11.2.5	矿渣棉	6-137
9.1.4	强制循环再沸器	6-114	11.2.6	玻璃棉	6-137
9.1.5	釜式再沸器	6-114	11.2.7	石棉	6-137
9.2	冷凝器	6-115	11.2.8	硅酸钙	6-137
9.2.1	冷凝器的选型	6-115	11.2.9	泡沫玻璃	6-137
9.2.2	冷凝器结构	6-115	11.2.10	有机绝热材料	6-137
9.2.3	冷凝器传热	6-117	11.3	低温隔热	6-137
9.2.4	混合物的冷凝	6-117	11.4	保温层厚度	6-137
9.3	废热锅炉	6-118	参考文献		6-138

一般参考文献

1. Perry R. H., "Chemical Engineer's Handbook," 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1987.
2. 《化学工程手册》编辑委员会, 《化学工程手册》, 化学工业出版社, 1987.
3. Bell, K. J., Kakac, S. et al, Heat Exchangers, Thermal-Hy-

draulic Fundamentals and Design, Hemisphere Publishing Co., 1981.

4. 化学工学便览, 第三版, 1978年.
5. 杨世铭, 《传热学》第二版, 高等教育出版社, 1987.
6. 顾维藻等, 《强化传热》, 科学出版社, 1990年.
7. Collier J. G., "Convective Boiling and Condensation", McGraw-Hill, Inc., 1972.

第6篇 传热及传热设备

主稿人 陈学俊 西安交通大学 教授 中国科学院院士

编写人 周芳德 西安交通大学 教授

郭烈锦 西安交通大学 教授

陈听宽 西安交通大学 教授

一般参考文献	6-3	2.3.4 非定态导热的数值解法	6-15
1 概论	6-4	2.3.5 有相变的导热	6-16
1.1 热量传递的基本方式	6-4	参考文献	6-16
1.2 换热器的类型和选取	6-4	3 对流传热	6-16
1.2.1 换热器以传递过程分类	6-4	3.1 概述	6-16
(1) 直接接触式换热器	6-4	3.2 对流传热膜系数	6-16
(2) 非直接接触式换热器	6-4	3.2.1 能量方程	6-16
1.2.2 换热器以传热表面紧凑度分类	6-4	3.2.2 传热膜系数	6-17
1.2.3 换热器以结构分类	6-4	3.2.3 总传热系数	6-17
(1) 管式换热器	6-4	3.2.4 传热膜系数求解法	6-17
(2) 板式换热器	6-5	3.2.5 相似原理和量纲分析	6-17
(3) 扩展表面式换热器	6-5	3.3 自然对流传热	6-18
(4) 蓄热式换热器	6-5	3.3.1 各种几何形状物体的 Nusselt 方程式	6-18
1.2.4 换热器以流动方式分类	6-6	3.3.2 简化的量纲分析式	6-18
1.2.5 传热设备的选取	6-6	3.3.3 伴有辐射热损失的自然对流	6-18
1.3 传热设备在化学工业中的应用	6-7	3.3.4 密闭空间内的自然对流	6-19
参考文献	6-7	3.4 强制对流传热	6-19
2 导热	6-8	3.4.1 动量传递与热量传递的类比理论	6-20
2.1 导热基本定律及导热系数	6-8	3.4.2 层流传热	6-20
2.1.1 傅立叶定律	6-8	3.4.3 过渡区域的传热	6-22
2.1.2 三维导热方程	6-8	3.4.4 湍流传热	6-22
2.1.3 导热系数	6-8	3.5 非牛顿流体的传热	6-25
2.2 定态导热	6-11	3.5.1 非牛顿流体的粘性	6-25
2.2.1 一维导热	6-12	3.5.2 非牛顿流体的导热系数	6-26
(1) 通过平壁和圆筒壁的导热	6-12	3.5.3 管内强制对流传热膜系数	6-26
(2) 通过翅片的导热	6-13	3.6 液态金属的传热	6-27
2.2.2 二维导热	6-13	3.6.1 管内流动	6-27
2.3 非定态导热	6-13	3.6.2 横掠管束	6-28
2.3.1 一维非定态导热	6-13	参考文献	6-28
2.3.2 二维及三维非定态导热的求解	6-15	4 有相变时的传热	6-29
2.3.3 导热问题数值计算原理	6-15	4.1 引言	6-29

4.2	冷凝换热	6-29	参考文献	6-50	
4.2.1	冷凝现象与机理	6-29	6 传热过程计算	6-50	
4.2.2	冷凝膜系数的计算公式	6-29	6.1	传热过程的分析	6-50
(1)	平表面上的膜状冷凝	6-29	6.2	平均温度差	6-51
(2)	管外壁面上的膜状冷凝	6-29	(1)	逆流或并流	6-51
(3)	管内壁面上的膜状冷凝	6-31	(2)	折流或错流	6-51
(4)	不冷凝气体及其他非理想因素的影响	6-31	(3)	平均温度差校正因子 F_T	6-52
4.3	沸腾换热	6-32	6.3	总传热系数	6-52
4.3.1	沸腾现象与机理	6-32	(1)	总传热系数 K 值的计算	6-52
4.3.2	池内沸腾	6-32	(2)	总传热系数 K 值的大致范围	6-54
(1)	沸腾曲线与影响因素	6-32	6.4	污垢	6-57
(2)	传热膜系数的计算	6-32	(1)	污垢的形成	6-57
4.3.3	流动沸腾	6-35	(2)	污垢的控制	6-57
(1)	管内沸腾传热	6-35	(3)	污垢性质和除垢时间	6-57
(2)	管内汽(气)液两相流摩擦阻力	6-38	(4)	污垢的清除和防垢剂	6-57
参考文献		6-39	(5)	污垢系数	6-58
5 辐射换热		6-40	6.5	有效因子及传热单元数	6-58
5.1	热辐射和辐射特性	6-40	(1)	有效因子	6-58
5.1.1	基本概念	6-40	(2)	有效因子和传热单元数	6-59
5.1.2	基本定律和辐射特性	6-41	(3)	ϵ -NTU 法的应用	6-59
(1)	黑体辐射的基本定律	6-41	6.6	从实验数据推求传热膜系数	6-61
(1.1)	Plank (普朗克) 定律	6-41	参考文献	6-62	
(1.2)	Stefan-Boltzman (斯蒂芬-波尔茨曼) 定律	6-41	7 传热强化和节能技术	6-62	
(1.3)	Lambert (兰贝特) 定律	6-41	7.1	传热强化	6-62
(2)	实际物体表面的辐射特性	6-41	7.1.1	概述	6-62
(2.1)	实际固体黑度与灰体	6-41	7.1.2	槽管	6-63
(2.2)	实际固体的吸收率与 Kirchhoff (克希霍夫) 定律	6-41	7.1.3	翅片	6-63
(2.3)	实际固体的反射率	6-45	7.1.4	多孔介质	6-65
(3)	气体的热辐射	6-45	7.1.5	旋流流动	6-66
(3.1)	气体黑度(半球总辐射黑度(辐射率))	6-45	7.1.6	螺旋管	6-66
(3.2)	粉尘的辐射	6-46	7.1.7	管内添加物	6-66
(3.3)	含尘气体的辐射	6-47	7.1.8	流体添加物	6-67
(4)	火焰的热辐射	6-47	7.1.9	冷凝传热强化	6-68
5.2	辐射换热	6-47	7.2	节能技术	6-68
5.2.1	角系数	6-47	7.2.1	概述	6-68
5.2.2	黑体表面间的辐射换热	6-48	7.2.2	燃料燃烧的合理化	6-69
(1)	两黑表面间的辐射换热	6-48	7.2.3	加热、冷却等传热过程的合理化	6-69
(2)	封闭体系中黑表面间的辐射换热	6-48	7.2.4	蒸汽的有效使用	6-69
5.2.3	灰体表面间的辐射换热	6-48	7.2.5	压缩空气的有效运行	6-69
(1)	两灰体表面间的辐射换热	6-48	7.2.6	废热回收	6-69
(2)	封闭体系中灰体表面间的辐射换热	6-49	参考文献	6-70	
5.2.4	遮热板	6-49	8 换热器	6-72	
5.2.5	气体与管壁间的辐射换热	6-50	8.1	管壳式换热器	6-72
			8.1.1	管壳式换热器的结构型式	6-72
			8.1.2	管程结构	6-72
			8.1.3	壳程结构	6-77
			8.1.4	管壳式换热器的设计计算	6-79

8.2	板式换热器	6-86	9.3.1	废热锅炉的作用、特点与分类	6-118
8.2.1	板式换热器	6-86	9.3.2	废热锅炉结构	6-119
8.2.2	螺旋板式换热器	6-89	9.3.3	废热锅炉设计特点	6-123
8.2.3	板翅式换热器	6-91	9.4	热管换热器	6-125
8.2.4	伞板式换热器	6-93	9.4.1	热管工作原理与特点	6-125
8.2.5	板壳式换热器	6-94	9.4.2	热管工作性能	6-126
8.3	其他换热器	6-94	9.4.3	热管换热器	6-128
8.3.1	套管式换热器	6-94	参考文献		6-129
8.3.2	蛇管式换热器	6-96	10 直接接触式换热器		6-129
8.3.3	刺刀管式换热器	6-97	10.1	工作特点和传热原理	6-129
8.3.4	降膜式换热器	6-97	10.2	直接接触式冷凝器	6-130
8.3.5	特种材料换热器	6-97	10.3	冷却塔	6-132
8.4	空冷器	6-98	10.4	蒸发冷却器	6-134
8.4.1	空冷器基本特点	6-98	10.5	泡沫接触式换热器	6-134
8.4.2	空冷器的型式与构造	6-99	参考文献		6-135
8.4.3	自然通风空冷器	6-100	11 保温与绝热材料		6-135
8.4.4	机械通风空冷器	6-101	11.1	绝热材料	6-135
8.4.5	增湿空冷器	6-101	11.1.1	绝热材料种类	6-135
8.4.6	空冷器设计计算	6-101	(1)	无机绝热材料	6-135
8.5	换热器的优化设计	6-105	(2)	有机绝热材料	6-135
8.5.1	换热器型式的选择	6-105	(3)	金属绝热材料	6-135
8.5.2	换热表面设计的优化	6-106	(4)	复合绝热材料	6-135
8.5.3	系统优化	6-107	11.1.2	绝热材料使用温度	6-135
8.5.4	计算机辅助优化设计	6-109	11.1.3	绝热材料的形态	6-135
参考文献		6-110	11.2	常用绝热材料	6-136
9 再沸器、冷凝器与废热锅炉		6-110	11.2.1	硅藻土	6-136
9.1	再沸器	6-110	11.2.2	蛭石	6-136
9.1.1	再沸器的分类和特性	6-110	11.2.3	膨胀珍珠岩	6-136
9.1.2	立式热虹吸再沸器	6-112	11.2.4	人造矿物纤维	6-137
9.1.3	卧式热虹吸再沸器	6-114	11.2.5	矿渣棉	6-137
9.1.4	强制循环再沸器	6-114	11.2.6	玻璃棉	6-137
9.1.5	釜式再沸器	6-114	11.2.7	石棉	6-137
9.2	冷凝器	6-115	11.2.8	硅酸钙	6-137
9.2.1	冷凝器的选型	6-115	11.2.9	泡沫玻璃	6-137
9.2.2	冷凝器结构	6-115	11.2.10	有机绝热材料	6-137
9.2.3	冷凝器传热	6-117	11.3	低温隔热	6-137
9.2.4	混合物的冷凝	6-117	11.4	保温层厚度	6-137
9.3	废热锅炉	6-118	参考文献		6-138

一般参考文献

1. Perry R. H., "Chemical Engineer's Handbook," 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1987.
2. 《化学工程手册》编辑委员会, 《化学工程手册》, 化学工业出版社, 1987.
3. Bell, K. J., Kakac, S. et al, Heat Exchangers, Thermal-Hy-

draulic Fundamentals and Design, Hemisphere Publishing Co., 1981.

4. 化学工学便览, 第三版, 1978年.
5. 杨世铭, 《传热学》第二版, 高等教育出版社, 1987.
6. 顾维藻等, 《强化传热》, 科学出版社, 1990年.
7. Collier J. G., "Convective Boiling and Condensation", McGraw-Hill, Inc., 1972.

8. E. U. 施林德主编, 马庆芳等译, 《换热器设计手册》第三卷, 机械工业出版社, 1988。
9. Kern D. Q., "Process Heat Transfer", McGraw-Hill, 1950.
10. Tubular Exchanger Manufacturers Association Standards, 6th Ed, New York, 1978.
11. 戴维·阿泽贝尔著, 王子康等译, 《工业过程传热应用》, 中国石化出版社, 1992。
12. 朱聘冠编著, 《换热器原理及计算》, 清华大学出版社, 1987。
13. Knudson, J. G. and D. L. Katz, "Fluid Dynamics and Heat Transfer", McGraw-Hill, New York, 1958.
14. Kays, W. M. and London, A. L., "Compact Heat Exchangers", 2nd Ed, McGraw-Hill, New York, 1958.

1 概 论

1.1 热量传递的基本方式

传热在生产技术领域的许多部门应用十分广泛。在化工、能源、冶金、石油、电子、交通、动力机械等部门中广泛采用的换热器和专用换热设备都以传递热量为主要功能。它们的设计、制造、运行和提高经济效益都要大量地运用传热知识, 传热对于化工生产过程等起着十分关键的作用。

热量传递有三种基本方式: 导热、对流和辐射。

导热: 热量由于物体分子的相互传递从物体的一部分传递到物体的另一部分, 或者从一物体传递到与其接触的另一物体。在导热过程中, 物体内分子不产生可见的位移。

对流: 在液体、气体内, 流体各部分之间发生相对位移, 冷热流体相互渗混所引起的热量传递方式称为对流。对流只能发生在液体和气体内, 而且必然伴随有导热现象。由于流体冷、热各部分的密度不同而引起的对流称为自然对流。流体的流动由于泵、风机或其它机械作用而产生的对流称为强制对流。当强制对流速度很低时, 由密度差、温度差引起的自然对流会产生重要的影响。

热辐射: 物体通过电磁波运动来传递能量的方式称为辐射。因热的原因而发生辐射能的现象称为热辐射。辐射传热过程可以在真空中进行。

在实际生产中所遇到的传热过程很少是单一的传热方式, 往往是几种基本方式同时出现, 这就使实际的换热过程很复杂。例如一个冷凝器管子外壁的蒸汽是冷凝传热, 管子外壁与内壁间是导热, 管子内壁与管内流体之间是对流传热。

1.2 换热器的类型和选取

凡是能使热量从热流体传递到冷流体, 以满足规定

的生产要求的各种设备统称为换热器。流体之间的传热通过隔离流体的壁面进行, 流体之间并不混合, 如管壳式换热器。换热器被广泛用于化工、石油、动力等工业部门。换热器可以根据传递过程、表面紧凑度、结构特征、流动方式等进行分类。

1.2.1 换热器以传递过程分类

换热器根据传递过程的不同可分为直接接触式和非直接接触式二类。

(1) 直接接触式换热器

又称混合式换热器, 冷流体和热流体在换热器内直接接触传递热量, 要求冷热流体是互不相溶的。通常, 一种流体是气体, 另一种流体是饱和蒸汽压力很低的液体。在热量交换后, 两种流体很容易分离开。如冷水塔、液膜式冷凝器、喷射式冷凝器等。

(2) 非直接接触式换热器

温度不同的两种流体通过隔离流体的壁面进行热量传递, 两流体之间因有壁面分开, 故互不接触。这是化工生产中应用最广泛的类型。它又可分为间壁式换热器(直接传递式)、蓄热式换热器和流化床三种。

1.2.2 换热器以传热表面紧凑度分类

紧凑式换热器是具有高“面积密度”的换热器, 面积密度 β 为传热面积和换热器体积之比。根据这个定义, 一个换热器, 如果“面积密度”很低, 则说明这个换热器体积大, 重量重。

目前, 规定一个换热器的面积密度 β 超过 $700\text{m}^2/\text{m}^3$, 则这个换热器可称作紧凑式换热器, 而不论其实际体积大小和重量轻重^[1]。

通常, 管壳式换热器的 β 值均小于 $500\text{m}^2/\text{m}^3$, 气体透平机械中蓄热器的 β 值可达到 $6600\text{m}^2/\text{m}^3$ 。

紧凑式换热器通常具有传热系数 K 相当高、体积小、重量轻的特点。

使传热表面紧凑化的技术有板间加装翅片, 圆管加装翅片等。

1.2.3 换热器以结构分类

换热器最普遍的分类是按其结构特征进行分类, 可以分为管式、板式、扩展表面式、蓄热式换热器等, 如表 1-1 所示。 ϵ -NTU 和对数平均温差等热效率分析方法, 均可用于管式、板式和蓄热式换热器。但还有其他一些因素必须同时考虑到, 如管式换热器中的泄漏和流体旁通, 板式换热器中的端头影响, 扩展表面换热器中翅片的温度影响。对蓄热器来说, ϵ -NTU 法必须修正使用, 每一种换热器的设计方法均有所不同。

(1) 管式换热器

管式换热器可用于高温、高压、高流体压力差场

合, 它又分为管壳式、套管式和螺旋盘管式换热器。

(1.1) 管壳式换热器 这一类换热器的特点是易于制造、选用材料的范围广、换热表面清洗比较方便、适应性强、处理能力大、能在高温高压下使用。管壳式换热器是在化工生产中所有换热器中使用最广、效率较高的一种传统的标准设备。

由于管束和壳体结构形式上的不同, 管壳式换热器还可以进一步分为固定管板式、U形管式、浮头式、填料函式、釜式等。这些管壳式换热器都有其各自的特点, 以适应不同的使用要求。

(1.2) 套管式换热器 主要有双套管换热器, 由二根同心圆管组成, 冷热流体分别在内管和内管与外管之间环形通道内逆流流动。这种换热器清洗容易, 适合于高温、高压工作条件。由于制造价格高, 主要用在总传热面积小于 20m^2 的场合。

(1.3) 螺旋盘管式换热器 由一个或多个盘绕成螺旋状的管子安装在壳体内组成。螺旋盘管的传热系数高于直管。在单位体积内, 螺旋盘管具有较大的传热面积, 热膨胀自由, 但不易清洗。

(2) 板式换热器

板式换热器由光滑平板或波纹板等制成, 换热器的传热单元有直平板或卷制成螺旋状板等种类。和管式换热器相比, 板式换热器不能承受较高的压力, 流体之间的温度差不能太大。板式换热器又可分为板式、螺旋板式、伞板式和板壳式换热器。

(3) 扩展表面式换热器

管板式换热器通常的设计热效率只有60%, 甚至更低, 面积密度小于 $300\text{m}^2/\text{m}^3$ 。扩展表面式换热器可以达到很高的热效率(甚至达到98%)。扩展表面式换热器中应用最广泛的是板翅式和管翅式换热器。

(4) 蓄热式换热器

又称蓄热器, 是一个充满蓄热体(如格子砖)的蓄热室, 热容量很大。不同温度的两种流体先后交替地通过蓄热室, 高温流体将热量传给蓄热体, 然后蓄热体又将这部分热量传给随后进入的低温流体, 这种传热是间接进行的。在蓄热体中的热量是交替地贮存和放出的。适用于气体-气体之间的换热, 其热效率可超过85%。常用于高温气体的冷却、空气预热和废热回收等。其主要缺点是当冷热流体周期性流进蓄热室时, 不可避免地会带走一小部分滞留在室内的另一流体。蓄热器可分为回转式蓄热器

表1-1 换热器以结构分类

管式	固定管板式	刚性结构	用于管壳温差较小的情况(一般 $\leq 50^\circ\text{C}$), 管间不能清洗
		带膨胀节	有一定的温度补偿能力, 壳程只能承受较低压力
	管壳式	浮头式	管内外均能承受高压, 可用于高温高压场合
		U型管式	管内外均能承受高压, 管内清洗及检修困难
		填料函式	外填料函	管间容易漏泄, 不宜处理易挥发、易爆易燃及压力较高的介质
	内填料函		密封性能差, 只能用于压差较小的场合
	釜式	釜式	壳体上都有个蒸发空间, 用于再沸、蒸发
		套管式	双套管式	结构比较复杂, 主要用于高温高压场合, 或固定床反应器中
	套管式		能逆流操作, 用于传热面较小的冷却器、冷凝器或预热器
	螺旋盘管式	浸没式	用于管内流体的冷却、冷凝, 或者管外流体的加热
喷淋式		只用于管内流体的冷却或冷凝	
板式	板式	拆洗方便, 传热面能调整, 主要用于粘性较大的液体间换热	
	螺旋板式	可进行严格的逆流操作, 有自洁作用, 可回收低温热能	
	伞板式	伞形传热板结构紧凑, 拆洗方便, 通道较小, 易堵, 要求流体干净	
	板壳式	板束类似于管束, 可抽出清洗检修, 压力不能太高	
扩展表面式	板翅式	结构十分紧凑, 传热效率高, 流体阻力大	
	管翅式	适用于气体和液体之间传热, 传热效率高, 用于化工、动力、空调、制冷工业	
蓄热式	回转式	盘式	传热效率高, 用于高温烟气冷却等
		鼓式	用于空气预热器等
	固定格子室式	紧凑型	适用于低温到高温的各种条件
		非紧凑型	可用于高温及腐蚀性气体场合

和固定格室蓄热器。

1.2.4 换热器以流动方式分类

换热器按流动方式可分为单程和多程换热器，对特殊的流动方式的选择取决于：换热器的热效率要求、流体流动的管程和壳程、壳体形状、允许热应力的的大小、温度和其他设计准则。

流体只一次流过换热器的全长度称为单程；若流体多次流过换热器的全程，则称为多程。一种流体从进口封头流进管子里，再经过出口封头流出，这条路径称为管程；另一种流体从外壳上的连接管进出换热器，这条路径称为壳程。

(1) 单程换热器

单程换热器可分为逆流式、并流式和错流式换热器。逆流式换热器如图1-1a.所示。在这种换热器中，两种流体以相反方向流动。从热力学角度考虑，这种流动方式优于其他任何一种。在并流换热器中，两种流体流动方向一致，如图1-1b.所示。从热力学角度考虑，这种流动方式最不理想。在进口处存在的大温度差，会引起高热应力。但这种流动方式可以产生均匀的壁面温度；换热器的热效率是低的，但在大流量范围内可保证效率不变。可以提

早产生核态沸腾。错流换热器中，两种流体流动方向相互垂直，如图1-1c.、1-1d.所示。错流换热器的效率介于逆流和并流之间。最大结构温度差存在于冷、热流体进口处“角落”。由于这种流动方式极大地简化了流体进口端头设计，在紧凑式换热器中被广泛应用。

在错流流动中，流体是否“混合”取决于设计。当流体通过单个流道或管子时，在相邻的流道内没有流体混合，则称为流体“不混合”。在其他参数不变情况下，混合程度越高，换热效率越低。

(2) 多程换热器

将逆流、并流和错流这三种单程流动方式组合在一起就成为多程。多程换热器的优点主要是可以增加总的热效率。它可分为错流-逆流；错流-并流；并流-逆流-壳侧流体混合，以及平行板多程。见图1-2。

1.2.5 传热设备的选取

传热设备的类型很多，每种形式都有特定的应用范围。在某一种场合下性能很好的换热器，如果换到另一种场合则可能传热效果和性能会有很大的改变。因此，针对具体情况正确地选择换热器的类型，是很重要和很复杂的工作^[3]。

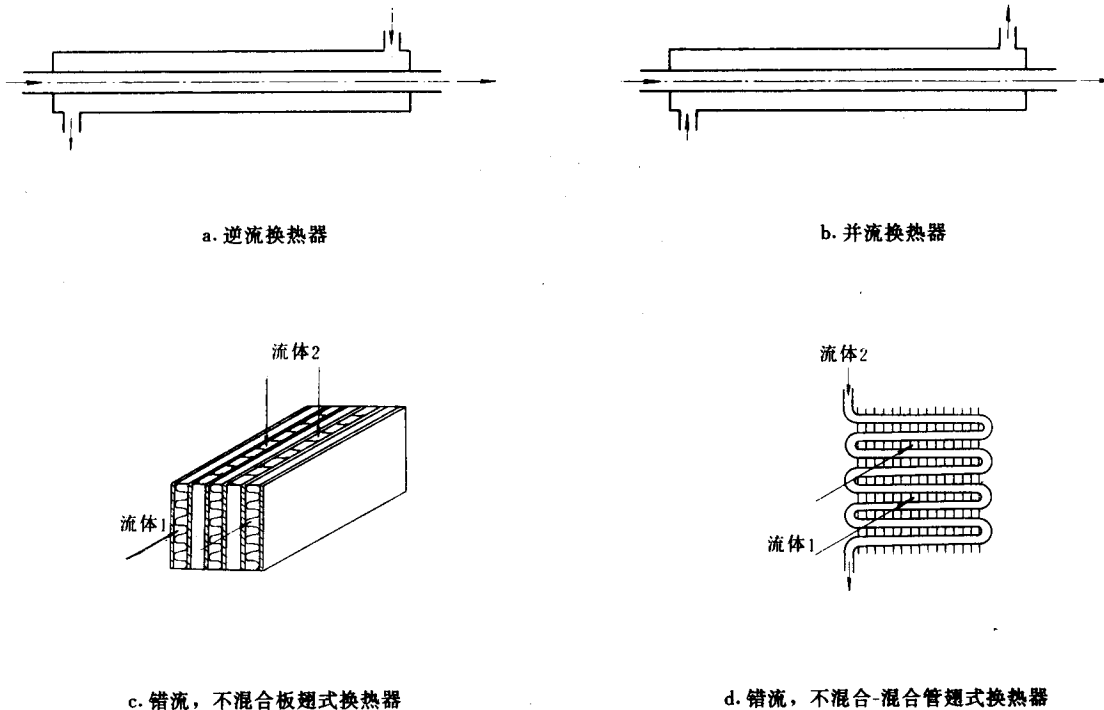


图1-1 单程换热器

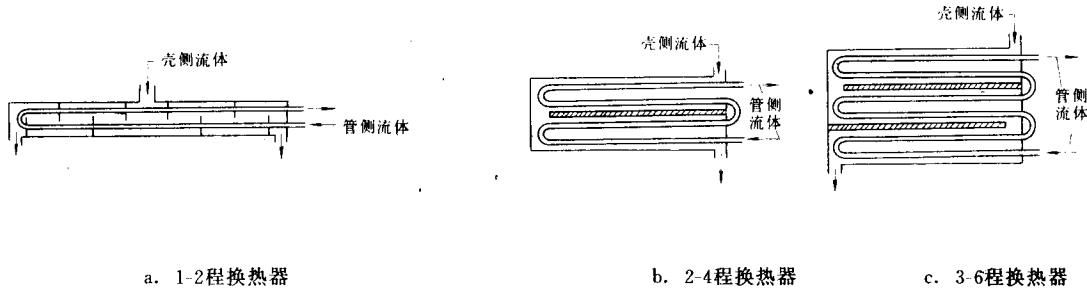


图1-2 多程换热器

传热设备选型时需要考虑的因素是多方面的，主要是：

- 热负荷及流量大小；
- 流体的性质；
- 温度、压力及允许压降的范围；
- 对清洗、维修的要求；
- 设备结构材料、尺寸、重量；
- 价格、使用安全性和寿命。

流体的性质对换热器类型的选择往往会产生重大影响，如流体的物理性质（如比热容、导热系数、粘度）、化学性质（如腐蚀性、热敏性）、结垢情况，以及是否有磨蚀性颗粒等因素，都对传热设备的选型有影响。例如硝酸的加热器，流体的强腐蚀性决定了设备的结构材料，限制了可能采用的结构范围。如对于热敏性大的液体，能否精确控制它在加热过程中的温度和停留时间，往往就成为选型的主要前提。流体的清净程度和易否结垢，有时在选型上也起决定性的作用，如对于需要经常清洗换热面的物料，就不能选用高效的板式或其他不可拆卸的结构。

同样，换热介质的流量、工作温度、压力等参数在选型时也很重要，例如板式换热器虽然高效紧凑、性能很好，但是由于受结构和垫片性能的限制，当压力或温度稍高，或者流量很大时就不适用了。

1.3 传热设备在化学工业中的应用

在化工生产工艺中，要实现各种化学反应和各种化工过程，都有一定的温度要求，因此需要进行如下各种传热过程^[2]：

- 反应物料的加热或冷却；
- 产品的冷凝或冷却；
- 反应热量的取出或供应；
- 液体的蒸馏、气化或稀溶液的蒸发、固体物体的干燥；
- 工业余热（废热）的回收和热能的综合利用。

在任何化工生产中，传热设备总是非常重要和广泛被应用的。例如在日产千吨的合成氨厂中，各种传热设备

约占全厂设备总台数的40%左右。在化工生产中，传热设备有时还作为其他设备的一个组成部分而出现，如蒸馏塔下面的再沸器、氨合成塔中的内部换热器等。

化工生产中所有的各种传热设备因其功用不同，也相应地有不同的名称，如冷却器、冷凝器、加热器、换热器、再沸器、蒸汽发生器、过热器及废热（余热）锅炉等，这些传热设备将在本篇中详细介绍。

现代的化学工业和石油化工往往要求在相当苛刻的操作条件下进行换热过程。如高压聚乙烯要求操作压力高达250MPa；新“德士古”制氢法要求操作温度在750~1500℃范围。又如以热裂解法制取烯烃的生产装置中，裂化气的温度高达800~900℃。工艺上要求对裂化气进行冷却，然后进行深冷分离。另外，化工产品或工艺介质种类繁多，有许多是强腐蚀性的。因此对传热设备的设计结构和材质要求也是非常高的。随着化学工厂的生产规模日益增大，换热设备也相应向大型化方向发展，单台换热器的传热面积已有高达6000~8000m²。

化学工业是和能源工业密切相关的。然而据报道，国内由原料能源转变为最终有效利用能的转化率目前只有27%，节能的潜力很大。近年来化工技术的开发研究正日益侧重于传热强化技术，以节省能源、扩大对能源的适应范围、加强环境保护等。一些新型高效能换热设备正在化工生产中应用，如高效能的热管换热器已应用于放热反应器、催化反应器、高温热解或离子化学反应中进行等温导热或等温冷却等；能够比较高效地利用低品位的热泵系统也在化工生产中开始应用。

参考文献

- [1] Bell K. J., Kakac S. et al., "Heat Exchangers, Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design," Hemisphere Publishing Co., 1981.
- [2] Perry, R. H., "Chemical Engineer's Handbook," 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1987.
- [3] 《化学工程手册》编辑委员会, 《化学工程手册》, 化学工业出版社, 1987.

2 导 热

2.1 导热基本定律及导热系数

2.1.1 傅立叶定律

傅立叶定律是导热的基本定律。该定律指出,热流量(单位时间内传递的热量)与温度梯度和传热面积成正比。其数学表达式为:

$$\frac{dQ}{d\tau} = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (2-1)$$

式中 Q ——传递的热量, kJ;

τ ——时间, s;

t ——温度, °C;

x ——在 x 方向等温面之间的垂直距离, m;

A ——垂直于热流方向的传热面积, m²;

λ ——导热系数, W/(m·°C)。

2.1.2 三维导热方程

傅立叶定律是导出固体或静止流体不稳定状态三维导热方程的基础, 三维导热方程为:

$$C\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q' \quad (2-2)$$

式中 x, y, z ——是直角坐标系中的距离, m;

C ——物体的比热, kJ/(kg·°C);

q' ——单位体积固体内的热量产生率(如由于化学反应、核反应或电流产生的热量), W/m³。

式(2-2)加上适当的边界条件和初始条件, 就可以得到物体内温度随时间和位置变化的分布函数。式(2-2)也可以变换成球坐标或圆柱坐标系, 以适合求解诸如圆筒和球体一类导热问题。

求解导热问题实质上归结为对导热微分方程式的求解。使上述导热微分方程获得特解, 即唯一解的条件称为定解条件, 导热问题的定解条件有二个方面: 给出初始时刻温度分布的条件, 这种条件称为初始条件; 给出物体边界上的温度或换热情况的条件, 称为边界条件。导热微分方程式连同初始条件和边界条件才能够完整地描写一个具体的导热问题。常见导热问题的边界条件有三类^[3]。

(1) 规定了边界上的温度值 这称为第一类边界条件。第一类边界条件最简单的例子就是规定边界温度保持常数, 即 $t_w = \text{常数}$ 。对不稳定导热, 这类边界条件要求给出以下关系式:

$$t > 0 \text{ 时, } t_w = f_1(\tau) \quad (2-2a)$$

(2) 规定了边界上的热流密度值 这称为第二类边界条件。此类边界条件最简单的典型例子就是规定边界

上的热流密度保持定值, 即 $q_w = \text{常数}$, 对不稳定导热, 这类边界条件要求给出以下关系式:

$$\tau > 0 \text{ 时, } -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = f_2(\tau) \quad (2-2b)$$

式中 n 为表面 W 的法线方向, 下标 W 表示边界。

(3) 规定了边界上物体与周围流体间的换热系数 α 及周围流体的温度 t_f 这称为第三类边界条件。第三类边界可表示为:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = \alpha(t_w - t_f) \quad (2-2c)$$

2.1.3 导热系数

导热系数是表征材料导热性能的一个参数, 其单位为 W/(m·°C)。导热系数的数值同材料的种类有关, 同一材料的导热系数会随温度变化而不同, 许多材料的导热系数是温度的函数, 图2-1示出了多种物质导热系数随温度的依变关系。金属内的杂质会引起金属导热系数明显变化, 变化范围可达50~70%。应当了解, 导热并不是唯一的传热方式, 尤其对于液体和气体, 辐射和对流传热更为主要。一般来说, 金属材料的导热系数最大, 液体次之, 气体最小。非金属固体的导热系数变化范围较大, 数值大的同液体相接近, 数值低的(如某些保温材料)则与空气的导热系数具有同一数量级。同一物质在相同温度下, 会由于表观密度、湿度等差别而具有不同的导热系数。例如表观密度为400kg/m³的石棉毛在0°C时导热系数为0.09W/(m·°C), 而表观密度为700kg/m³时导热系数为0.19。表2-1~表2-4提供了一部分常用物质的导热系

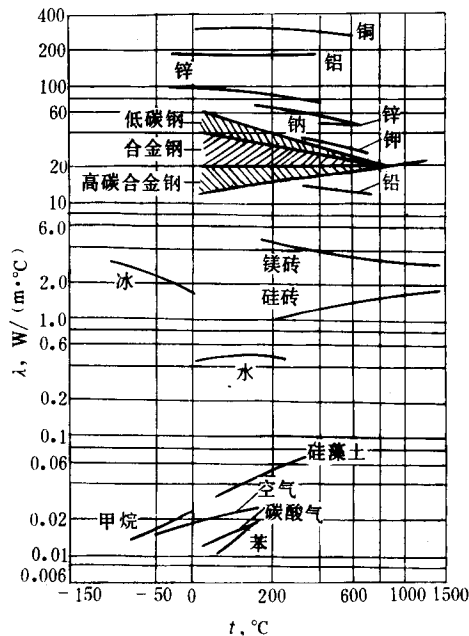


图2-1 导热系数对温度的依变关系

表2-1 气体的导热系数 $\lambda, \times 10^2 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

温度 K	物 质														
	Air	NH ₃	Ar	CCl ₄	CO ₂	C ₂ H ₅	He	H ₂	Kr	CH ₄	Ne	N ₂	O ₂	H ₂ O	Xe
100	0.93	...	0.66	...	...	...	7.2	6.7	...	1.08	2.19	0.96	0.93		
150	1.38	...	0.96	...	...	...	9.5	10.1	0.50	1.84	3.04	1.39	1.38		
200	1.80	1.53	1.25	...	0.94	...	11.5	13.1	0.68	2.17	3.62	1.83	1.83	...	0.38
250	2.21	1.96	1.52	...	1.30	...	13.4	15.7	0.80	2.75	4.29	2.22	2.26	...	0.48
300	2.62	2.47	1.77	0.69	1.66	2.15	15.1	18.3	1.00	3.42	4.89	2.59	2.66	61	0.58
350	3.00	3.04	2.00	0.85	2.04	2.84	16.6	20.4	1.13	4.00	5.46	2.93	2.98	67	0.66
400	3.38	3.70	2.22	1.01	2.43	3.56	18.4	22.5	1.26	4.93	6.01	3.27	3.30	2.66	0.74
450	3.73	4.40	2.44	1.16	2.83	4.36	20.1	24.7	1.38	5.79	6.53	3.59	3.63	3.10	0.82
500	4.07	5.25	2.66	1.30	3.25	...	21.8	26.6	1.51	6.68	7.03	3.89	4.12	3.58	0.90
600	4.69	6.70	3.07	1.44	4.07	...	25.0	30.5	1.75	8.52	7.97	4.46	4.73	4.63	1.05
700	5.24	...	3.41	1.58	4.81	...	27.8	34.2	1.98	10.46	8.86	4.98	5.28	5.81	1.20
800	5.73	...	3.74	...	5.51	...	30.4	37.8	2.21	...	9.71	5.48	5.89	7.08	1.35
900	6.20	...	4.06	...	6.18	...	33.0	41.2	2.42	...	10.53	5.97	6.49	8.41	1.49
1000	6.67	...	4.4	...	6.82	...	35.4	44.8	2.62	...	11.34	6.47	7.10	9.78	1.64
1200	7.63	...	4.9	...	8.0	...	40.5	52.8	2.98	...	12.16	7.6	8.2	...	1.95

表2-2 水和水蒸汽的导热系数 $\lambda, \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$

压力 MPa	温 度, C										
	0	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700
0.1	0.569	0.642	0.0248	0.0287	0.0332	0.0381	0.0434	0.0548	0.0673	0.0807	0.0942
5	0.572	0.647	0.683	0.690	0.668	0.618	0.0524	0.0601	0.0720	0.0849	0.0986
10	0.577	0.650	0.686	0.691	0.671	0.623	0.545	0.0685	0.0706	0.0887	0.103
15	0.581	0.655	0.691	0.697	0.676	0.632	0.557	0.0821	0.0842	0.0949	0.108
20	0.585	0.657	0.693	0.699	0.680	0.637	0.570	0.107	0.0924	0.101	0.112
25	0.588	0.662	0.697	0.702	0.684	0.646	0.582	0.157	0.103	0.107	0.117
30	0.591	0.665	0.700	0.705	0.687	0.651	0.591	0.264	0.116	0.114	0.124
35	0.596	0.668	0.702	0.708	0.692	0.656	0.600	0.350	0.137	0.122	0.129
40	0.598	0.671	0.706	0.712	0.697	0.662	0.608	0.390	0.153	0.130	0.135
45	0.601	0.675	0.709	0.715	0.700	0.666	0.615	0.416	0.180	0.138	0.142
50	0.605	0.677	0.712	0.719	0.702	0.670	0.621	0.435	0.206	0.149	0.147

表2-3 液体的导热系数 $\lambda, W/(m \cdot ^\circ C)$

液 体	$t, ^\circ C$	λ	液 体	$t, ^\circ C$	λ	液 体	$t, ^\circ C$	λ
醋酸,100%	20	0.171	对异丙基苯甲烷	-30	0.135	煤油	75	0.140
50%	20	0.346	(对缣花烃)	60	0.137	汞	28	8.36
丙酮	30	0.177	正癸烷	30	0.147	甲醇100%	20	0.215
	75	0.164		60	0.144	80%	20	0.267
烯丙醇	25~30	0.180	二氯二氟甲烷	-7	0.099	60%	20	0.329
氨	-15~30	0.502		16	0.092	40%	20	0.405
氨,26%水溶液	20	0.452		33	0.083	20%	20	0.492
	60	0.502		60	0.074	100%	50	0.197
醋酸戊酯	10	0.144		82	0.066	氯甲烷	-15	0.192
正戊醇	30	0.163	二氯乙烷	50	0.142		30	0.154
	100	0.154	二氯甲烷	-15	0.192	硝基苯	30	0.164
异戊醇	30	0.152		30	0.166		100	0.152
	75	0.151	醋酸乙酯	20	0.175	硝基甲烷	30	0.216
苯胺	0~20	0.173	乙醇,100%	20	0.182		60	0.208
苯	30	0.159	80%	20	0.237	正辛烷	30	0.144
	60	0.151	60%	20	0.305		60	0.140
溴苯	30	0.128	40%	20	0.388	油类	30	0.137
	100	0.121	20%	20	0.486	蓖麻油	20	0.180
醋酸丁酯(正)	25~30	0.147	100%	50	0.151		100	0.173
正丁醇	30	0.168	乙苯	30	0.149	橄榄油	20	0.168
	75	0.164		60	0.142		100	0.164
异丁醇	10	0.156	溴乙烷	20	0.121	三聚乙醛	30	0.145
氯化钙盐水,30%	30	0.554	乙醚	30	0.138		100	0.135
15%	30	0.589		75	0.135	正戊烷	30	0.135
二硫化碳	30	0.161	碘乙烷	40	0.111		75	0.128
	75	0.152		75	0.109	二氧化硫	-15	0.222
四氯化碳	0	0.185	乙二醇	0	0.265		30	0.192
	68	0.163	汽油	30	0.149	甲苯	30	0.149
甘油,100%	20	0.284	全氯乙烯	50	0.159		75	0.145
80%	20	0.327	石油醚	30	0.130	β -三氯乙烯	50	0.133
60%	20	0.381		75	0.126	三氯乙烯	50	0.138
40%	20	0.448	正丙醇	30	0.171	松节油	15	0.128
20%	20	0.481		75	0.164	凡士林	15	0.183
100%	100	0.284	异丙醇	30	0.158	水	0	0.594
正庚烷	30	0.140		60	0.156		38	0.628
	60	0.137	钠	100	84.8		93	0.680
正己烷	30	0.138		210	79.6		146	0.684
	60	0.135	氯化钠盐水,25%	30	0.571		216	0.651
	75	0.158	12.5%	30	0.589		327	0.476
正庚醇	30	0.161	硫酸,90%	30	0.364	邻二甲苯	20	0.156
	75	0.156	煤油	20	0.149	对二甲苯	20	0.156

表2-4 金属材料的导热系数 $\lambda, W/(m \cdot ^\circ C)$

材 料 名 称	温 度, $^\circ C$										
	-100	0	20	100	200	300	400	600	800	1000	1200
纯铝	243	236	236	240	238	234	228	215			
铝合金(92Al-8Mg)	86	102	107	123	148						
纯铜	421	401	398	393	389	384	379	366	352		
铝青铜(90Cu-10Al)		48	56	57	66						
青铜(39Cu-11Sn)		24	24.8	23.4	33.2						
黄铜(70Cu-30Zn)	90	106	109	131	143	145	148				
黄金	331	318	315	313	310	305	300	287			
纯铁	96.7	83.5	81.1	72.1	63.5	56.5	50.3	39.4	29.6	29.4	31.6
灰铸铁(C \approx 3%)		23.5	39.2	32.4	35.8	37.2	36.6	20.8	19.2		
碳钢(C \approx 1.0%)		43.0	43.2	42.8	42.2	41.5	40.6	36.7	32.2		
铬钢(Cr \approx 13%)		26.5	26.8	27.0	27.0	27.0	27.6	28.4	29.0	29.0	
铬镍钢(18-20Cr/8-12Ni)	12.2	14.7	15.2	16.6	18.0	19.4	20.8	23.5	26.3		
镍钢(Ni \approx 1%)	40.8	45.2	45.5	46.8	46.1	44.1	41.2	35.7			
镍钢(Ni \approx 25%)			13.0								
镍钢(Ni \approx 50%)	17.3	19.4	19.6	20.5	21.0	21.1	21.3	22.5			
锰钢(Mn \approx 0.4)			51.2	51.0	50.0	47.0	43.5	35.5	27		
钨钢(W \approx 5~6%)		18.4	18.7	19.7	21.0	22.3	23.6	24.9	26.3		
铅	37.2	35.5	35.3	34.3	32.8	31.5					
镁	160	157	156	154	152	150					
铝	146	139	138	135	131	127	123	116	109	103	93.7
镍	144	94	91.4	82.8	74.2	67.3	64.6	60.0	73.3	77.6	81.9
铂	73.3	71.5	71.4	71.6	72.0	72.8	73.6	76.6	80.0	84.2	88.9
银	431	428	427	422	415	407	399	384			
锡	75	68.2	67	63.2	60.9						
钛	23.3	22.4	22	20.7	19.9	19.5	19.4	19.9			
铀	24.3	27	27.4	29.1	31.1	33.4	35.7	40.6	45.6		
锌	123	122	121	117	112						
铅	26.5	23.2	22.9	21.8	21.2	20.9	21.4	22.3	24.5	26.4	28.0
钨	204	182	179	166	153	142	134	125	119	114	110

数^[1]。Griffiths^[1]发现固体颗粒内部有空气循环,在一定条件下,垂直放置时焦炭试样的导热系数比水平放置时大9%。在确定多孔、非均匀固体物质导热系数时,它的温度系数要比均匀的固体物质大得多。这是由于传热不仅仅是以导热方式,还有微小气室内的对流和单个固体颗粒表面间的辐射。如果内部辐射成为一个主要的因素,导热系数随温度依变关系图中是一条上凹曲线,这是因为辐射传热随绝对温度的四次方增加。液体的导热系数随压力变化不大,即使压力达到一千大气压,导热系数仅增加百分之几。

2.2 定态导热

对定态导热,式(2-1)中 dQ/dr 或者 q (热流率)为常数。同时,在式(2-2)中 α/α 为零,即传递的热量以及温度不随时间而变。因此对导热系数为常量的情况,式(2-2)可写成下列形式:

$$\nabla^2 t = (-q'/\lambda) \quad (2-3)$$

式中, ∇^2 为拉普拉斯算子,且有 $\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$ 。

2.2.1 一维导热

很多导热问题可以按一维或准一维导热问题来处理,这类问题中只考虑一个变量。其相应的直角坐标、圆柱坐标和球体坐标系统下的导热方程为:

$$\frac{\partial t}{\partial x^2} = -\frac{q'}{\lambda} \quad (2-4a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) = -\frac{q'}{\lambda} \quad (2-4b)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dt}{dr} \right) = -\frac{q'}{\lambda} \quad (2-4c)$$

这是二阶微分方程,经积分得到相应的解为^[2]:

$$t = -(q'x^2/2\lambda) + c_1x + c_2 \quad (2-5a)$$

$$t = -(q'r^2/4\lambda) + c_1 \ln r + c_2 \quad (2-5b)$$

$$t = -(q'r^2/6\lambda) - (c_1/r) + c_2 \quad (2-5c)$$

上面式中的常数 c_1 、 c_2 由边界条件来确定,即是系统内某一位置处的温度或温度梯度。

对被置于有着不同温度环境中的固体、且有着一定的表面系数这种情况,边界条件可表示为:

$$\alpha(t_w - t_f) = -\lambda(dt/dx)W \quad (2-6)$$

式中 α —— 固体表面至周围流体的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

t_w —— 固体表面温度, $^\circ C$;

t_f —— 周围流体温度, $^\circ C$ 。

对无热源的情况,一维定态导热可用下面积分方程表示:

$$q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A} = - \int_{t_1}^{t_2} \lambda dt \quad (2-7)$$

式中,面积 A 必须是 x 的已知函数,若 λ 是常数,式(2-7)可表示为:

$$q = \lambda A_m (t_1 - t_2) / (x_2 - x_1) \quad (2-8)$$

$$\text{式中, } A_m = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A} \quad (2-9)$$

对各种 x 函数的面积 A 的平均值例举如下:

面积 A 正比于	平均面积 A_m
常数	$A_1 = A_2$
x	$\frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)}$
x^2	$\sqrt{A_2/A_1}$

通常,导热系数 λ 并不是常数,而是温度的函数。在大多数情况下,在很宽的温度范围内,导热系数和温度呈线性关系。当 λ 是温度 t 的线性函数时,积分式(2-7)得到:

$$q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A} = \lambda_m (t_1 - t_2) \quad (2-10)$$

式中, λ_m 是温度 t_1 和 t_2 之间的算术平均导热系数。这个平均值在绝大多数情况下具有足够的精度。

(1) 通过平壁和圆筒壁的导热

图2-2表示了通过多层平壁稳态导热的温度梯度。通过多层平壁的每一层的热量是相同的。

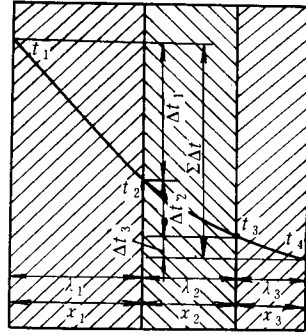


图2-2 多层平壁稳态导热的温度梯度

$$q = \lambda_1 A_1 \Delta t_1 / x_1 = \lambda_2 A_2 \Delta t_2 / x_2 = \lambda_3 A_3 \Delta t_3 / x_3 \quad (2-11)$$

根据定义,单层平壁的热阻为:

$$R = x / \lambda A \quad (2-12)$$

$$\text{由此得到 } \Delta t_1 = qR_1, \Delta t_2 = qR_2, \Delta t_3 = qR_3 \quad (2-13)$$

将各层温度差相加,得到:

$$q(R_1 + R_2 + R_3) = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = \sum \Delta t \quad (2-14)$$

$$\text{或者 } q = \sum \Delta t / R_i = (t_1 - t_4) / R_t \quad (2-15)$$

式中, R_t 是总热阻,为各层平壁热阻之和:

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2-16)$$

当一个壁面由多层平壁构成,平壁之间相接处可能不平整而存在空隙,这种附加的热阻是不能忽略的。

图2-3为多层圆筒壁,单层圆筒壁的热传导方程为:

$$q = -\lambda A \frac{dt}{dr} = -\lambda 2\pi r L \frac{dt}{dr} \quad (2-17)$$

式中, L 为圆筒高度, m 。

式(2-17)的边界条件为: $r=r_1$ 时 $t=t_1$, $r=r_2$ 时 $t=t_2$, 并积分得到:

$$q = \frac{2\pi\lambda L(t_1 - t_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2-18)$$

与分析多层平壁一样,运用串联热阻叠加的原则,多层圆

由傅立叶定律得到热流量 q 为:

$$q = -\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \frac{aU}{m} (t_0 - t_1) th(mh) \quad (2-22)$$

式中, $m = \sqrt{\frac{aU}{\lambda A}}$ 。

2.2.2 二维导热

如果物料的温度是二维空间的函数, 当导热系数 λ 为常数时, 二维导热方程为:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = -\frac{q'}{\lambda} \quad (2-23)$$

当 q' 为零时, 式 (2-23) 就简化为人们所熟悉的拉普拉斯方程。式 (2-23) 以及拉普拉斯方程只有少数的边界条件和几何形状才可能得到分析解。Carslaw 等人^[9] 对应用于导热问题的大量微分方程给出了分析解。通常, 使用最多的是图解法和有限差分数值解。其他数值解法和松弛法也有应用, 可参阅文献^[4,5], 这些方法也可以推广到三维导热问题中。

2.3 非定态导热

2.3.1 一维非定态导热

常物性物体的一维非定态导热为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \frac{q'}{C\rho} \quad \text{直角坐标} \quad (2-24a)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{q'}{C\rho} \quad \text{圆柱坐标} \quad (2-24b)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{q'}{C\rho} \quad \text{球坐标} \quad (2-24c)$$

式中, $a = \lambda / C\rho$, 称为热扩散系数, 又称导温系数。单位为 m^2/s , 热扩散系数之值越大, 物质内部温度的传播速度也越大。

对具有简单几何形状的物体, 如平板、圆柱和圆球等, 可以直接求解上述方程, 其解的形式为无穷级数。Gurney-Lurie 以四个无量纲数将解以图形式表示出来^[1], 当内热源 $q' = 0$ 时, 有:

$$\text{时间比} \quad x = \frac{\lambda \tau}{\rho C \rho r_m^2} = \frac{a \tau}{r_m^2} \quad (2-25a)$$

$$\text{温度比} \quad y = \frac{t_\infty - t}{t_\infty - t_b} \quad (2-25b)$$

$$\text{热阻比} \quad m = \frac{\lambda}{r_m \alpha} \quad (2-25c)$$

$$\text{距离比} \quad n = \frac{r}{r_m} \quad (2-25d)$$

式中 t_∞ ——环境温度, $^\circ\text{C}$;

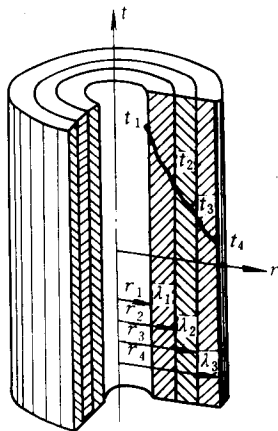


图2-3 多层圆筒壁

筒壁的总热阻为:

$$R_t = \sum \frac{\Delta t}{q} = \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda_1 L} + \frac{\ln(d_3/d_2)}{2\pi\lambda_2 L} + \frac{\ln(d_4/d_3)}{2\pi\lambda_3 L} \quad (2-19)$$

其导热总热量为:

$$q = \frac{2\pi L(t_1 - t_4)}{\ln(d_2/d_1)/\lambda_1 + \ln(d_3/d_2)/\lambda_2 + \ln(d_4/d_3)/\lambda_3} \quad (2-20)$$

(2) 通过翅片的导热

为了强化传热或满足其它要求, 传热面往往采用翅片(见图2-4)这种扩展传热表面的形式。通过翅片导热的一个特点, 就是在与翅片长度相垂直的方向上, 同时还

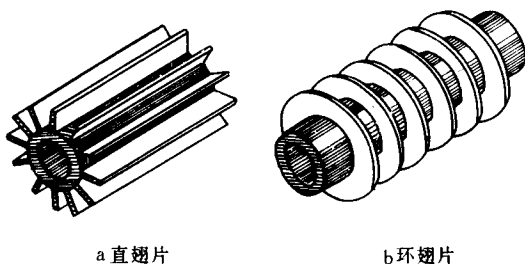


图2-4 翅片。

有表面对流散热作用。假定导热系数 λ 和翅片表面的对流换热系数 α 在翅片的整个长度上都是常量, A 为翅片横截面积, U 为截面周边长度, 则翅片的热传导方程为:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{aU}{\lambda A} (t - t_1) \quad (2-21)$$

式中, t_1 为未受翅片散热影响的流体温度。

由翅片散入外界的全部热量都必须通过 $x=0$ 的翅根截面, 若 $x=0$ 时, $t=t_0$, 在翅片 $x=h$ 处:

- t_b —— 物体初始温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t —— 物体内某一点在物体开始被加热或冷却时间 τ 时的温度, $^{\circ}\text{C}$;
- α —— 物体表面和周围环境之间的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;
- r —— 物体中心点或中心平面到一点的距离, m ;
- r_m —— 球、圆柱体的半径, 或是两面均加热的平板厚度的一半, m 。

Gurney-Lurie 以对数-线性坐标系和不同的 m 、 n 值做出 X 对 Y 线算图 (图2-5~图2-8)。图中曲线示出了长

圆柱体、球体、无限大平板及半无限物体的非定态导热的解。这些线算图中都约定 C_p 、 λ 、 α 、 r 、 r_m 、 t_{∞} 、 x 和 ρ 为常数。图2-8可用来求解一个有一定厚度物体非定态导热的近似解。图中曲线为 dY/dX 作为 X 函数的曲线。McAdams^[6]给出了类似的但范围大得多的曲线。对一个 $m=0$ 、无限厚的物体, 有:

$$Y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-z^2) dz \quad (2-26)$$

式中, $z = 1/\sqrt{2} x$, 而误差函数可从数学手册中查到其解。

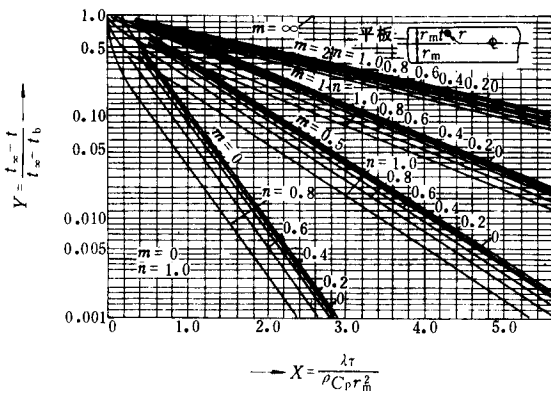


图2-5 平板 Gurney-Lurie 线算图

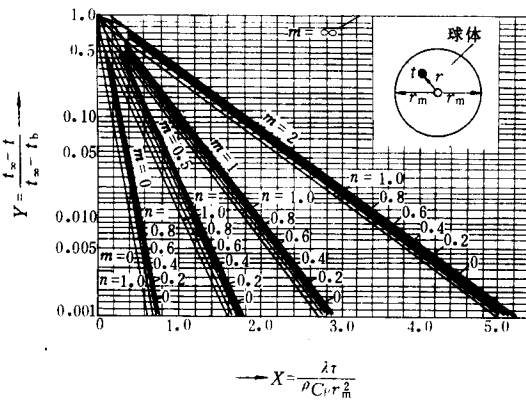


图2-7 球体的 Gurney-Lurie 线算图

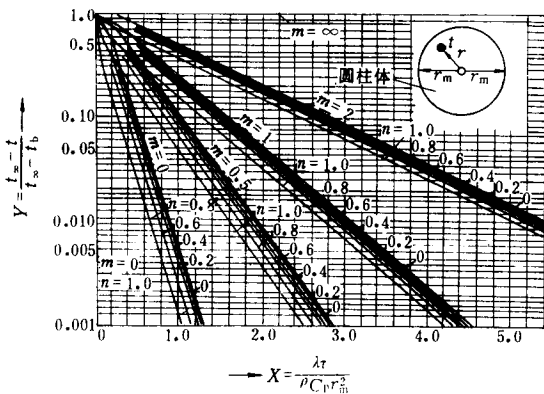


图2-6 圆柱体的 Gurney-Lurie 线算图

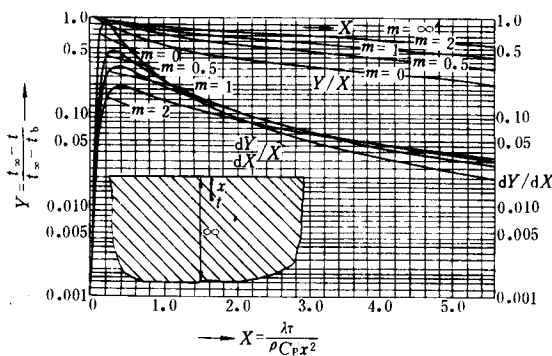


图2-8 无限厚物体的 Gurney-Lurie 线算图