

高校学术著作出版
CAPS

Entransy Theory for Heat Transfer
Analyses and Optimizations

传热熵理论及其应用

梁新刚 陈群 过增元 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

传热理论及其应用

Entransy Theory for Heat Transfer
Analyses and Optimizations

梁新刚 陈 群 过增元 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

焓这一概念是过增元院士等通过热电类比提出的一个新的概念,并且基于能量守恒方程推导了焓平衡方程,并提出焓耗散和焓耗散热阻等概念。通过焓平衡方程建立了系统内部传热引起的焓耗散与边界换热温差、热流之间的关系,为传热过程和热系统的优化提供了新的方法。

本书内容包括焓这一概念的提出及其物理意义,孤立系统的焓减少原理,导热、对流和辐射换热系统中的焓平衡方程和最小焓耗散热阻原理,焓分析在导热、对流、辐射、换热器和热系统优化中的应用,以及焓分析与熵分析的对比等。

本书可作为热工类和能源动力类等有关专业的研究生课程或本科生选修课的教学用书,也可作为从事传热和热系统设计与科学人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传热焓理论及其应用 = Entropy Theory for Heat Transfer Analyses and Optimizations / 梁新刚, 陈群, 过增元著. —北京: 科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-059421-1

I. ①传… II. ①梁… ②陈… ③过… III. ①传热—研究
IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第253728号

责任编辑: 范运年 王楠楠 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 铭轩堂

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>

河北鹏润印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年1月第一次印刷 印张: 22 3/4

字数: 453 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

世界性的能源短缺和气候变化是 21 世纪全人类所面临和迫切需要解决的难题。这不仅是一个科学和技术问题，还涉及经济、政治和外交等众多领域。提高能源利用效率(俗称节能)能够减少能源的使用量，并能够直接带来碳排放的减少，因此节能在化石能源以及可再生能源(太阳能、风能和生物质能等)利用中都非常重要，是实现低碳经济和低碳社会的关键因素之一。我国是世界上最大的发展中国家，存在能源资源短缺，尤其是优质能源短缺的问题，所以更应该走能源高效利用的可持续发展之路。因此，在未来的经济发展过程当中，提高能源利用效率(节能)将一直是我国经济可持续发展的基本国策。

在各种形式的能量利用过程中，80%需要经过热量的传递，因此提升热量传递的性能、减少传热过程的不可逆性是提高能源利用效率的重要途径之一。早在 20 世纪 70 年代，世界能源危机推动了传热强化理论和技术的高速发展。但是，传热强化常常需要通过提高流速或增加流体紊动度等方式实现，在传热强化的同时，流阻引起的泵功会显著增加，所以传统的传热强化技术并不一定能够节能。在 20 世纪末，出现了热力学优化的方法，即利用熵产理论，分析和优化传热过程的性能。然而，很多实例表明最小熵产优化理论并不总是适用于与热功转换无关的传热过程的优化。

更重要的是，在现有传热学理论中，只有传热速率的物理量，没有传热效率的物理量。在提高传热设备的性能时，只有传热强化的概念，没有传热优化的概念(熵产优化是热力学优化)。这对传热学理论提出了挑战：现在的传热学学科中是否还缺少某些基本的物理量并可用于传热优化？是否还缺乏某些基本规律而有待发现呢？

应对这些挑战需要从学科层面上进行深入思考。由于传热学的奠基人傅里叶曾经讲过“力学理论不能应用于热现象”，所以研究人员过去过分强调了传热学科的特殊性。例如，传热学与物理学中的其他分支学科(力学、声学、光学和电学等)相比，没有热的质量，没有热的速度和动量等物理量。然而，物理学家普朗克曾说过：“科学是内在的整体，它被分割为单独的部分，不是取决于事物的本质，而是取决于人类认识能力的局限性。”所以可以设想：传热学之所以如此与众不同，是因为传热学中还缺乏某些基本物理量以及某些基本原理。因此，本书通过研究传热学与其他学科的共性之处，即通过把导热过程与导电过程和多孔介质中的流动过程进行比拟，从而在传热学中引入新的物理量——焓。它是与导电过程中电荷的电势能和流动过程中流体的重力势能相对应的物理量，代表了物体传递热量的能力。在导热和对流换热过程中，本书还引入另一个物理量——焓耗散，并建立

了熵平衡方程。熵耗散能够度量传热过程的不可逆性，从而可定义多边界温度条件下传热过程的熵耗散热阻和传热过程的效率。随后，用变分方法推导建立传热过程的最小熵耗散热阻原理，并用于传热设备性能的优化。对于换热系统和热力系统，则可以用熵平衡方程等作为约束条件或利用等效电路的方法，结合拉格朗日乘法对它们进行优化，以提高能源利用效率。

本书共 8 章，以及附录 A 和附录 B。第 1 章从熵的发展历史入手，简要地介绍熵的物理概念及其与热力过程的关系，指出用熵产理论优化传热时存在的问题，从而引入熵这一新的物理量，并讨论其物理意义以及与传热过程的关系。第 2 章针对导热问题，推导熵平衡方程，建立熵与过程量之间的关系，获得导热过程的熵耗散极值原理和最小熵耗散热阻原理，展示了熵耗散极值原理在体点散热问题和其他一些导热优化问题中的应用。第 3 章建立了对流换热的熵平衡方程、熵耗散极值原理和最小熵耗散热阻原理，并以熵耗散极值原理对换热过程进行优化，导出层流和湍流情况下的场协同方程，可用于求解给定功耗情况下的最优速度场。第 4 章针对单个换热器进行熵耗散分析，建立了换热器的最小熵耗散热阻原理，给出了典型换热器的热阻表达式，并用最小热阻原理证明了换热器的温差场均匀性原则。第 5 章针对相变、变物性传热过程，扩展了熵平衡方程、熵耗散极值原理，并给出应用的例子。第 6 章针对换热系统，建立了热阻网络图，并介绍如何利用热阻网络图对换热系统进行优化。第 7 章主要是针对热力系统，建立熵分析优化的方法，并对一些典型热力系统进行设计和运行优化。第 8 章针对辐射换热，建立熵分析方法，包括辐射传热的熵平衡方程，以及辐射熵耗散极值原理与最小辐射热阻原理等。附录 A 介绍单原子气体的熵与微观状态数之间的关系。附录 B 分析了热功过程熵的变化，给出了熵损失的定义，探讨了熵损失与循环系统输出功之间的关系。

本书由过增元主笔撰写第 1 章(熵与熵)，梁新刚主笔撰写第 4 章(换热器的最小熵耗散热阻原理)、第 5 章(含有相变和物性变化的传热过程的熵分析)、第 8 章(辐射传热的熵分析)、附录 A(单原子气体熵的微观表述)和附录 B(热力学循环的熵分析)。陈群主笔撰写第 3 章(对流换热的最小熵耗散热阻原理及其应用)、第 6 章(熵在换热系统中的应用)和第 7 章(熵在热力系统中的应用)。梁新刚、陈群共同撰写第 2 章(导热过程的最小熵耗散热阻原理及其应用)。梁新刚负责全书的统稿。

最后，作者借此机会感谢国家自然科学基金变革性重大项目“热质理论的关键科学问题”(No. 51356001)，以及其他国家自然科学基金项目的支持，正是在国家自然科学基金项目的支持下，关于熵的理论才能够得以发展和完善。

作者

2018 年 7 月

主要符号表

A	面积, m^2
B	辐射吸收因子
c	光速, m/s
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C	热容, J/K ; 常数
c_f	沿程阻力系数
C_r	热容量流比
\dot{C}	热容量流, W/K
d_0	直径, m
\dot{E}	辐射力, W/m^2
\dot{E}_b	黑体辐射力, W/m^2
E_h	热质势能, J
E_{unx}	不可用能, J
E_x	可用能(焓), J
E_{xQ}	热量的可用能(焓), J
\dot{E}_λ	光谱辐射力, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
$\dot{E}_{\lambda b}$	黑体光谱辐射力, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
$f_{\Delta T}$	温差场均匀性因子
Fa	拟肋数 (Fin analogy number)
g	单位体积的焓, $(\text{J} \cdot \text{K})/\text{m}^3$; 重力加速度, m/s^2
\dot{g}_f	焓流密度, $(\text{W} \cdot \text{K})/\text{m}^2$
g_h	单位体积的焓焓, $(\text{J} \cdot \text{K})/\text{m}^3$

g_m	比焓, $(J \cdot K)/kg^3$
g_{mh}	比焓焓, $(J \cdot K)/kg^3$
\dot{g}_s	内热源输入的焓流, $(W \cdot K)/m^3$
G	焓, $J \cdot K$
G_f	焓交换量, $J \cdot K$
G_h	焓焓, $J \cdot K$
\dot{G}_f	焓流, $W \cdot K$
\dot{G}_{fr}	热辐射焓流, W^2/m^2
$\dot{G}_{fr-\lambda}$	单色辐射焓流, $(W \cdot K)/\mu m$
G_W	功焓, $J \cdot K$
\dot{G}_W	功焓率, $W \cdot K$
h	对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; 比焓, J/kg
\hbar	普朗克常数, $J \cdot s$
H	高度, m ; 总焓, J
j	热力学流; 有效辐射, W/m^2
k	热导率, $W/(m \cdot K)$
k_B	玻尔兹曼常数
K	传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
l	长度, m
L	线性唯象系数
\dot{m}	质量流量, kg/s
M	质量, kg
\dot{M}	体积流量
n	多变指数
\mathbf{n}	单位法相矢量
N_{ED}	焓耗散数
N_{RS}	改进的熵产数

N_s	熵产数
N_{ss}	实际熵产率和特征熵产率的比值
NTU	传热单元数
Nu	努塞尔数
p	压力, Pa
Pe	Peclet 数
Pr	普朗特数
\dot{q}	热流密度, W/m^2
\vec{q}	热流密度矢量, W/m^2
\dot{q}_s	单位体积内热源, W/m^3
Q	热量, J
Q_{vc}	电量, C
Q_{vh}	定容条件下物体中的热能, J
\dot{Q}	热流, W
\dot{Q}_λ	单色热辐射热流, $W/\mu m$
\dot{Q}_{net}	净换热速率(热流), W
\dot{q}_s	单位体积热源, W/m^3
r	热流与热容量流的比值
R	热阻, K/W
R^*	无量纲焓耗散热阻
Re	雷诺数
R_g	焓耗散热阻, K/W
R_h	传热电阻, K/W
s	比熵, $J/(K \cdot kg)$
S	熵, J/K
\dot{S}_f	熵流, W/K
S_g	熵产, J/K

\dot{S}_g	熵产率, W/K
t	时间, s
T	温度, K
u	比内能, J/kg; x 方向速度分量, m/s
U	内能 J; 速度, m/s
\mathbf{U}	速度矢量, m/s
U_e	电势, V
v	比容, m ³ /kg; y 方向速度分量, m/s
V	体积, m ³
w	z 方向速度分量, m/s
W	功, J
\dot{W}	功率, W
x, y, z	直角坐标三个分量, m

希腊字符

α	热扩散率, m^2/s
Δ	差值
γ	比热比
γ_m	固液相变潜热, J/kg
γ_v	液气相变潜热
ε	换热器效能; 表面辐射率
η_g	焓传递效率
θ	无量纲过余温度
κ	气体的绝热指数
λ	波长, μm
μ	动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
π	压缩比
ρ	密度, kg/m^3
σ	斯忒藩-玻尔兹曼常数; 电导率, S/m
ϕ_g	单位体积焓耗散, $\text{J}\cdot\text{K}/\text{m}^3$
$\dot{\phi}_g$	单位体积焓耗散率, $(\text{W}\cdot\text{K})/\text{m}^3$
$\dot{\phi}_j$	耗散函数
$\dot{\phi}_\mu$	黏性耗散率, W/m^3
Φ_g	焓耗散, $\text{J}\cdot\text{K}$
$\dot{\Phi}_g$	焓耗散率, $\text{W}\cdot\text{K}$
$\dot{\Phi}_{gr}$	热辐射焓耗散率, $\text{W}\cdot\text{K}^4$
Ω	系统微观状态数
$\dot{\Psi}_{\text{loss}}$	焓损失率, $\text{W}\cdot\text{K}$

下 标 符 号

0	参考点或环境参数值
f	流体
g	气态
i, j, k	编号
in	进口
l	液态
max	最大值
min	最小值
out	出口
rev	可逆
t	湍流
λ	单色波长参数

目 录

前言

主要符号表

希腊字符

下标符号

第 1 章 熵与焓	1
1.1 熵	1
1.1.1 可用能(焓)	2
1.1.2 系统与环境的相互作用	4
1.1.3 熵的宏观物理意义	7
1.1.4 熵分析在传热问题中的应用	8
1.2 焓	9
1.2.1 引入新物理量——焓的原因	9
1.2.2 焓的引入	10
1.2.3 焓耗散与焓平衡方程	13
1.2.4 焓的宏观物理意义	14
1.2.5 焓耗散的物理意义	16
1.2.6 焓与热质势能	19
1.3 线性输运过程的最小作用量原理	20
1.3.1 最小作用量原理	20
1.3.2 昂萨格的最小能量耗散原理	21
1.3.3 线性输运过程的最小作用量原理	22
1.3.4 导热过程的最小作用量原理	22
1.4 小结	24
参考文献	25
第 2 章 导热过程的最小焓耗散热阻原理及其应用	27
2.1 含有内热源的导热过程的焓平衡方程	27
2.2 导热过程的最小焓耗散热阻原理	29
2.3 体点散热问题的优化	31
2.3.1 体点散热问题及其焓耗散优化准则	31
2.3.2 双出口温度、热导率连续变化的体点问题热导率的优化布局	33
2.3.3 高热导率材料为常数的体点导热优化	45

2.3.4	非均匀内热源区域的高热导率材料分布的优化	49
2.3.5	构型结构尺寸的焓耗散优化	51
2.3.6	构型方法与最小焓耗散原理比较	53
2.4	最小焓耗散热阻原理的应用	54
2.4.1	平板太阳能集热器的结构优化设计	54
2.4.2	多孔隔热材料的结构优化设计	63
2.5	小结	75
	参考文献	76
第3章	对流换热的最小焓耗散热阻原理及其应用	78
3.1	对流换热的最小熵产原理	78
3.2	对流换热的焓耗散极值原理和最小焓耗散热阻原理	81
3.3	对流换热优化的场协同方程	85
3.4	基于最小传热熵产的对流换热优化的欧拉方程	87
3.5	最小焓耗散热阻与最小传热熵产的优化结果对比	88
3.6	湍流换热优化的场协同方程	96
3.7	小结	101
	参考文献	101
第4章	换热器的最小焓耗散热阻原理	104
4.1	现有的换热器性能分析方法简介	104
4.1.1	对数平均温差法	104
4.1.2	效能-传热单元数法	105
4.1.3	效率分析法	106
4.1.4	熵产分析法	107
4.2	换热器的温差场均匀性原则	109
4.3	两股流换热器的焓耗散热阻分析	112
4.3.1	两股流换热器的焓耗散与熵产分析	112
4.3.2	换热器的最小焓耗散热阻原理与温差场均匀性原则	120
4.3.3	不同换热器的焓耗散热阻表达式	123
4.4	三股流换热器的焓分析	125
4.4.1	布局对换热热流、传热温差、焓耗散、焓耗散热阻和熵产的影响	125
4.4.2	三股流换热器的场协同分析	129
4.5	小结	132
	参考文献	132
第5章	含有相变和物性变化的传热过程的焓分析	134
5.1	含有相变的传热过程的焓平衡方程	134

5.1.1 含有气化相变传热的开口系焓平衡方程	134
5.1.2 含有相变过程的焓焓计算	137
5.1.3 非稳态固液相变换热的焓平衡方程	139
5.2 含有相变过程的换热器的焓分析	141
5.2.1 相变流体出口为两相	141
5.2.2 相变流体出口为气态	144
5.2.3 相变储热换热网络的焓优化	148
5.3 变物性传热过程的焓分析	153
5.3.1 变物性传热过程的焓平衡方程	154
5.3.2 变物性条件下物体的焓及焓变化的计算	157
5.3.3 两个变热物性物体在热平衡过程中焓的变化	158
5.3.4 变物性传热过程的焓优化分析	160
5.4 小结	165
参考文献	165
第 6 章 焓在换热系统中的应用	167
6.1 换热系统性能优化研究简介	167
6.1.1 夹点法	167
6.1.2 基于焓分析的优化方法	168
6.1.3 最小熵产优化方法	169
6.2 换热系统整体性能分析的焓平衡方程法	170
6.3 基于焓分析的典型换热系统的性能优化	175
6.3.1 航天器热管理系统的整体性能优化	175
6.3.2 中央空调冷冻水系统的整体性能优化	183
6.3.3 集中供热系统的整体性能优化	195
6.4 基于焓耗散热阻的换热器热路图	208
6.5 常物性换热系统的热路图	210
6.5.1 流体多回路换热系统的热路图	210
6.5.2 单侧流体并联的换热器网络的热路图	212
6.5.3 单侧流体串联的换热器网络的热路图	214
6.6 基于热路图的集中供热系统的性能整体优化	217
6.6.1 集中供热网络的热路图	217
6.6.2 集中供热系统的约束方程构建	218
6.6.3 优化结果与讨论	221
6.7 焓理论在换热系统与换热过程分析和优化中的联系与区别	223
6.8 小结	224
参考文献	224

第 7 章 焓在热力系统中的应用	226
7.1 气体压缩制冷系统的性能优化	226
7.1.1 气体压缩制冷循环优化的常规思路	227
7.1.2 气体压缩制冷系统的焓分析思路	229
7.1.3 可逆非等熵压缩/膨胀的气体压缩制冷循环	233
7.1.4 不可逆绝热压缩/膨胀的气体压缩制冷循环	237
7.2 回热式气体压缩制冷系统性能整体优化	239
7.2.1 传热过程分析	240
7.2.2 热力过程分析	241
7.2.3 优化问题的数学模型及求解	242
7.2.4 优化结果及分析	243
7.3 蒸汽压缩制冷系统的性能优化	245
7.3.1 冷凝器中的传热过程分析	246
7.3.2 蒸发器中的传热过程分析	249
7.3.3 热功转换过程分析	251
7.3.4 传热过程与热功转换过程整体分析	251
7.3.5 优化结果及讨论	252
7.4 小结	257
参考文献	258
第 8 章 辐射传热的焓分析	259
8.1 热辐射焓流的定义	259
8.2 辐射换热焓流平衡方程与辐射换热焓耗散函数	261
8.2.1 等温漫射灰体表面组成的封闭空腔辐射传热系统	261
8.2.2 非等温漫射灰体表面组成的封闭空腔内的辐射传热	265
8.2.3 非灰体漫射表面组成的封闭空腔的辐射传热	266
8.3 辐射焓函数极小值原理	267
8.3.1 热势表述的辐射焓函数极小值原理	268
8.3.2 热流表述的辐射焓函数极小值原理	270
8.3.3 两种表述之间的关系	273
8.4 辐射焓耗散极值原理与最小辐射热阻原理	274
8.4.1 辐射焓耗散极值原理	274
8.4.2 最小辐射热阻原理	277
8.5 辐射焓耗散极值原理与最小熵产原理的对比	277
8.6 辐射焓耗散极值原理的应用	280
8.6.1 三块无限大平行平板之间的辐射传热优化	281
8.6.2 辐射焓耗散极值与温度场均匀化设计	283

8.6.3 光谱辐射焓耗散极值原理的应用	287
8.7 对辐射传热焓原理的认识与讨论	289
8.7.1 理论分析	289
8.7.2 两种辐射焓流的定义在优化应用中的比较	292
8.8 小结	294
参考文献	295
附录 A 单原子气体焓的微观表述	296
A.1 焓的微观表达式	296
A.2 热平衡过程中系统微观状态数、熵和焓的变化	299
参考文献	303
附录 B 热力学循环的焓分析	304
B.1 热量焓与功焓的定义	304
B.2 卡诺循环的焓分析	305
B.2.1 卡诺循环的焓平衡问题	305
B.2.2 热功转换对焓的影响	308
B.3 热力学可逆循环的焓分析	308
B.3.1 一般的热力学循环的焓平衡方程	308
B.3.2 热量焓与功焓的不同点	309
B.3.3 多热源热功转换系统的焓分析	312
B.3.4 内可逆热力学循环的焓分析	314
B.4 焓损失及其在闭口系统中的应用	318
B.4.1 焓损失的定义及其构成分析	318
B.4.2 闭口系统的焓分析	320
B.5 最大焓损失原理的应用	323
B.5.1 高温烟气加热的热力循环做功系统	323
B.5.2 朗肯循环的焓优化分析	332
B.6 熵产与焓的对比	341
B.6.1 热力学系统的熵产分析	341
B.6.2 热功转换过程的熵产分析与焓分析对比	342
B.7 小结	344
参考文献	344

第1章 熵与焓

自从克劳修斯在 19 世纪提出熵这个物理量以来，目前它已被拓展应用到化学、生物、信息、材料等众多学科。其中，有些学者以熵产最小作为准则对流动与传热过程进行优化分析。但是，人们发现熵产最小并不能导出傅里叶导热定律，而且熵产最小也与换热器效能最优并不一定对应，这就引起了熵产最小是否能够用于传热优化的疑问。本章将简要地介绍熵的起源以及与此相关的焓的概念，以便更好地阐明熵的宏观物理意义，并讨论它们在传热学分析和优化中所存在的问题。然后，通过类比和演绎的方法引出一个能用于分析和优化传热问题的新物理量——焓。

1.1 熵

德国学者克劳修斯在研究可逆卡诺热机时发现，当可逆卡诺热机完成一个循环时，虽然循环工质从高温热源吸收的热量大于它向低温热源输出的热量，但是热量与所处热源的热力学温度之商相等，即热温比(热量与温度之比)相同：

$$\left(\frac{Q_1}{T_1}\right)_{\text{rev}} + \left(\frac{Q_2}{T_2}\right)_{\text{rev}} = 0 \quad (1.1)$$

式中， T_1 、 T_2 分别为高、低温热源的热力学温度；吸热量 Q_1 的符号为正；放热量 Q_2 的符号为负；下标“rev”表示可逆过程。

进一步研究发现，热温比在任意可逆循环中也总是相等的：

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\text{rev}} = 0 \quad (1.2)$$

式(1.2)称为克劳修斯等式。在此基础上，克劳修斯在 1865 年引入了一个新的状态量——熵“entropy”，以符号 $S=S(p,T)$ 表示，其微分表达式为

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\text{rev}} \quad (1.3)$$

当循环过程不可逆时，热温比总是小于零：