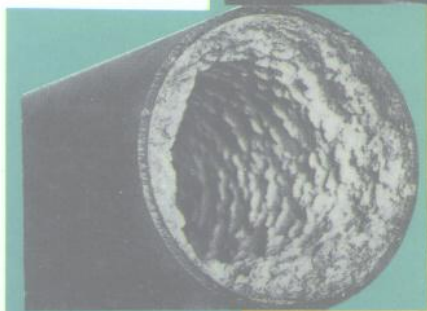
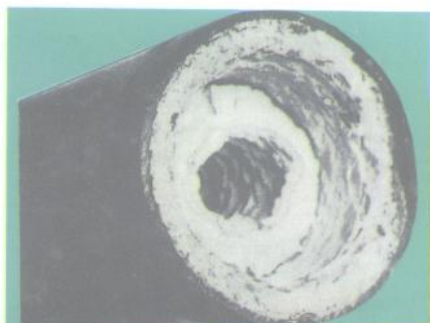


换热设备的 污垢与对策



杨善让 徐志明 著

科学出版社

(京)新登字 092 号

DUL46/ES

内 容 简 介

换热设备污垢的形成过程是一个极其复杂的能量、质量和动量传递的物理化学过程。污垢的存在给换热设备的设计和运行造成极大的经济损失,因而污垢问题成为 20 世纪传热学界十分关注而又没能解决的主要问题之一。

本书是国内阐述换热设备污垢的第一本专著。书中介绍了换热设备污垢的分类,分析了其危害;着重讨论了各类污垢的形成机制、污垢的预测模型,分析了影响污垢特性的主要因素;介绍了污垢检测技术及设备;推荐了一些行之有效的防垢、抑垢和除垢对策。书末附有美国管式换热器制造商协会最近推荐的污垢系数值,以供各种换热设备设计选用。在阐述这方面内容时,也溶进了作者从事换热设备污垢研究工作的一些心得和体会。本书内容丰富、新颖,坚持理论和应用相结合。理论部分力求简明、系统,应用部分则与工程实际紧密结合。

本书可供在动力、化工、冶金、交通、航空、石油、核能、食品等工业部门中从事换热设备的科研、设计、运行和管理人员参考,也可作为大专院校有关专业的选修课教材或教学参考书。

换热设备的污垢与对策

杨善让、徐志明 著

责任编辑:陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 9 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1995 年 9 月第一次印刷 印张:9 1/8 插页:2

印数:1—1200 字数:23 000

ISBN 7-03-004697-8/TK·16

定 价: 25.80 元

序

换热设备是工农业生产和日常生活中广为使用的设备之一。据调查,90%以上的换热设备都存在着不同程度的污垢问题。所谓污垢,是指在与不洁流体相接触的换热面上沉积的那层固态物质,它通常是热的不良导体。污垢的存在,使换热设备的传热能力降低、介质流动阻力增大,由此而造成了一系列的经济损失。因而受到各国传热学界的广泛关注,成为换热设备的设计、运行维护的一个主要研究方向。1979年召开了第一届换热设备污垢的国际学术会议,其后的各种传热学术会议的换热器部分也常有污垢问题的专题讨论。但由于换热设备结垢不仅是一个能量传递、动量传递和质量传递过程,而且往往涉及到化学反应等多种复杂因素的物理化学过程,这使得换热设备污垢的研究难度大,进展缓慢,是至今尚未很好解决的重要问题之一。

本书作者近年来一直致力于换热设备污垢形成机制和对策的研究,在混合污垢、污垢的在线监测和污垢清洗的理论和方法等方面都做了有益的工作,先后在《国际实验热流体科学》(Experimental Thermal and Fluid Science)等学术期刊与第九、十届国际传热大会等学术会议上发表了有关换热设备污垢研究的学术论文20余篇。这几年,作者将国内外有关换热设备污垢的著作、文献和自己的研究心得、成果整理为讲稿,为硕士生开设了专题讲座。在原讲稿的基础上,经过提炼、补充,撰写成本书。这是国内换热设备污垢方面的第一本专著,可供动力、化工、石油、冶金、核能、食品等工业部门的有关人员和大专院校有关专业师生参阅。

在本书即将问世之际,谨为之略书数语,算是简单的推荐介绍。自然,换热设备污垢的研究还在不断发展,书中存在某些问题或不足之处,势必难免,但总可以期望它能引起有关人员对污垢问

题的关注,并起到启发诱导的有益作用.

王朴宣

1995. 3. 26

前 言

污垢涉及领域之广无与伦比,从自然现象到日常生活,从一般换热设备到航天航海器械都难免受其害. 仅其给各国工业造成的损失就高达国民总值的 0.3%,然而更为令人遗憾的是很多工程技术人员对污垢重视不够,对其理论背景了解不多,选择对策几乎全凭经验. 国内目前又缺乏专门介绍污垢方面的书籍. 念及污垢为害之烈,作者深感有必要作点“鼓与呼”的工作,是以不揣简陋,鼓足勇气抛砖引玉,希图引起更多人的关注、抑制和减轻垢害.

作者近年来致力于换热设备污垢的检测和对策研究,在研读国内外有关著作,并消化理解,归纳分析的基础上,将偶有所得融入其中,汇聚成册. 书中部分内容曾作为研究生专题讲授过数届,从中吸取了不少好的意见和建议. 本书内容分为六章,其中前两章介绍污垢的基本概念,昭示其危害;阐明理论基础,旨在促使更深入理解污垢现象. 叙述中注意了系统性和由浅入深. 第三章罗列现有检测技术及其设备,注重原理,介绍特色,具体性能因资料所限,只好语焉不详. 后三章介绍散布于各个行业的防垢、抑垢和除垢措施,因为叙述这些措施的资料可说汗牛充栋,本书只能有所选择地加以介绍. 选择的标准是效果显著,简便易行.

目前,人们对污垢的认识正在不断深化,许多难题有待解决,有的模型也值得进一步推敲、检验,而各种对策往往又缺乏比较基础. 因此,尽管我们在介绍理论基础,展示现状,推荐行之有效的对策时作了很大努力,但限于水平和时间,本书中还可能存在这样或那样的缺点和不足,对此敬请读者鉴谅并不吝指正,以使本书能在不断修改、充实和提高中发挥作用.

本书在编写过程中,曾得到同事和同行的鼓励和支持. 中国科学院院士、中国工程热物理学会理事长王补宣教授为之作序;西

安交通大学陈钟颀教授对书稿作了详尽的评审,提出了很多有益的改进意见;东北电力学院应用化学系王颖全副教授审读了部分章节;科学出版社陈文芳副编审为本书的出版作了大量艰辛而卓有成效的工作.本书的出版还得到国家自然科学基金的支持和资助.东北电力学院有关领导、同事和研究生也给予作者以各种支持和帮助.作者愿意借此机会向上述同志和一切帮助、支持过我们的同仁表示衷心的感谢.

杨善让 徐志明

1994. 9. 4 于东北电力学院犀园

主要符号表

拉丁字母符号

A	传热面积, m^2
a	横向相对节距
a_p	颗粒的投影面积, m^2
b	纵向相对节距
C_b	结垢物质的平均浓度或离散生物量浓度, kg/m^3
C_{b_1}	氧气的平均浓度, kg/m^3
C_f	洁净系数
C_i	沉积层与流体界面处污垢物质的浓度, kg/m^3
c_p	流体比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_s	沉积层与换热面界面处污垢物质的浓度, kg/m^3
C_{s1}	氧气的 C_s 值, kg/m^3
C_{sat}	在 T , 下饱和时结垢物质的浓度, kg/m^3
C^*	平衡浓度, kg/m^3
D	质量扩散率, m^2/s
D_1	沉积层中氧气的质量扩散率, m^2/s
D'_1	水中氧气的质量扩散率, m^2/s
d	直径, m
d_h	水力直径, m
d_p	颗粒直径, m
E	活化能, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{mol})$; 弹性系数, N/m^2
f	范宁(Fanning)摩擦系数
G	流体的容积流量, m^3/s
Gz	Greatz 数
g	重力加速度, m/s^2
H	表面最短距离, m

h	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
h_{fg}	气化潜热, kJ/kg
$[I]$	$[I]$ 组分的浓度, kg/m^3
k	热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
k_b	Boltzman 常数, $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J}/\text{K}$
k_d	沉积系数, m/s
k_m	传质系数, m/s
k_r	附着率常数, 反应速度常数, $\text{kg}^{n-1} \cdot \text{m}^{3n-2}/\text{s}$
k_t	输运系数, m/s
k_t^+	无量纲输运系数, $=k_t/V^*$, m/s
L	特征长度, m
l	管道长度, m
m	质量, kg
M_1	氧的摩尔质量, $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{mol})$
M_g	污垢沉积层的摩尔质量, $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{mol})$
m_f	单位换热面上沉积污垢的质量, kg/m^2
m_d	沉积率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
m_r	剥蚀率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
N_s	流到换热面上颗粒的数量, $1/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Nu	Nuseelt 数
P	Beal 粘附概率, 累计产量
Pe	Peclet 数
Pr	Prandtl 数
Q	换热器的传热速率, W
q	热流密度, W/m^2
R	热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; 通用气体常数, $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
R_c	换热面上的对流热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
Re	Reynolds 数
R_f	污垢沉积层热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
R_f^*	渐近污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
R_p	总生产率
r	半径, m

r_o	圆柱面上污垢沉积层的外半径, m
r_i	圆柱面上污垢沉积层的内半径, m
S	Parkins 粘附概率, 无量纲
Sc	Schmidt 数
Sh	Sherwood 数
S_n	养分浓度, kg/m^3
St	传热 Stanton 数
$St_{m,0}$	在 $\theta=0$ 时, Stanton 数的值
T	温度, K
T_b	流体总体温度(按体积平均), K
T_i	污垢沉积层与流体界面处的温度, K 在圆柱表面上形成的污垢沉积层的内径温度, K
T_o	在圆柱表面上形成的污垢沉积层的外径温度, K
T_s	流体沉积层界面温度, K
T_w	管壁温度, K
t_b	两次湍流猝发之间的平均时间间隔, s
t_p	粒子的弛豫时间, s
t_p^+	无量纲粒子的弛豫时间 $= t_p (V^*)^2 / \nu$
U	总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
V	流体速度, m/s
V_p	粒子的容积, m^3
V_{pc}	粒子中心处流体的速度, m/s
V_s	系统容积, m^3
V_T	热泳速度, m/s
V^*	摩擦速度, $V \sqrt{f/2}$
$V_{\min}^*$	跳跃速度, m/s
v	粒子速度, m/s
v_n	垂直于壁面的粒子平均速度, m/s
W	质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
w	质量流量, kg/s
z	化合价

希腊字母符号

β	倾角
ΔG	自由能的变化
ΔP	压降, m
ΔT	换热面与流体间的温差, K
ΔT_m	对数平均温压, K
ΔT_{mc}	洁净换热器的对数平均温压, K
ΔT_{mf}	结垢换热器的对数平均温压, K
δ	沉积层厚度, m
ϵ	空隙率
ϵ_D	湍流质量扩散系数, m^2/s
Φ	作用势能
Φ_d	沉积率, $\text{m} \cdot \text{K}/\text{N}$
Φ_r	剥蚀率, $\text{m} \cdot \text{K}/\text{N}$
μ	动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
ν	运动粘度, m^2/s
ρ	密度, kg/m^3
ψ	电位差
ζ	局部阻力系数
τ_s	流体在固体表面的剪切应力, N/m^2
θ	时间, h 或 s; 接触角
θ_c	渐近污垢模型中的时间常数, h 或 s
θ_D	诱导期, h 或 s

下角标

b	主体(平均)
c	洁净状态
f	污染状态或污垢物质
g	气体
H	传热
i	入口、种类或内侧

m	传质
o	出口或外侧
opt	最优
p	颗粒, 工艺流体
s	表面
tc	热电偶
w	冷却水
l	氧

上角标

+	无量纲
---	-----

目 录

序

前言

主要符号表

第一章 概论	1
§ 1-1 污垢对换热设备的影响	1
§ 1-2 工业污垢概述及污垢耗费	5
1-2-1 一般污垢与特种污垢	5
1-2-2 气侧污垢与液侧污垢	5
1-2-3 气侧污垢	6
1-2-4 液侧污垢	7
§ 1-3 污垢费用估计	8
1-3-1 投资增加	8
1-3-2 能量消耗增加	9
1-3-3 维护清洗费用增加	10
1-3-4 产品产量降低	10
1-3-5 污垢损失费用的估计	10
§ 1-4 污垢研究的回顾与展望	13
第二章 基本理论	17
§ 2-1 污垢的分类	17
§ 2-2 污垢的形成过程	20
2-2-1 概述	20
2-2-2 起始	22
2-2-3 输运	23
2-2-4 附着	24
2-2-5 剥蚀	29
2-2-6 老化	32

§ 2-3 污垢形成的输运机制	33
2-3-1 对流输运	34
2-3-2 外力输运	42
2-3-3 惯性输运	44
2-3-4 碰撞	50
§ 2-4 污垢形成的附着机制	52
2-4-1 胶体的稳定性	55
2-4-2 附着机制	71
2-4-3 附着时间	75
§ 2-5 污垢形成的剥蚀机制	77
2-5-1 近壁区的湍流结构	77
2-5-2 沉积在表面上的粒子受力分析	81
2-5-3 粒子剥蚀率	83
2-5-4 剥蚀对粒子沉积的影响	85
§ 2-6 污垢形成的诱导期	87
2-6-1 析晶污垢的诱导期	87
2-6-2 微粒污垢的诱导期	94
§ 2-7 污垢影响因素分析	98
2-7-1 运行参数	98
2-7-2 换热器参数	101
2-7-3 流体性质	102
§ 2-8 污垢的预测模型	106
2-8-1 经验模型	107
2-8-2 微粒污垢预测模型	111
2-8-3 化学反应污垢预测模型	113
2-8-4 析晶污垢预测模型	117
2-8-5 通用模型	118
第三章 污垢的监测	123
§ 3-1 概述	123
§ 3-2 污垢热阻监测的热学法	124
3-2-1 污垢热阻法	124
3-2-2 温差监测法	126

§ 3-3 非传热量测量的污垢监测技术	128
3-3-1 直接称重法	128
3-3-2 厚度测量法	129
3-3-3 压降测量法	130
3-3-4 放射性技术	130
3-3-5 时间推移电影法	130
§ 3-4 液体污垢监测技术	130
3-4-1 污垢的实验研究设备	131
3-4-2 污垢特性参数的测量	147
3-4-3 液体污垢的监测设备	152
§ 3-5 气侧污垢监测技术	154
3-5-1 垢量测管	156
3-5-2 酸沉积测管	158
3-5-3 热流计	161
3-5-4 气侧污垢监测设备的比较和评价	163
§ 3-6 污垢的在线监测技术	164
3-6-1 管侧污垢在线监测原理	165
3-6-2 壳侧污垢在线监测原理	167
3-6-3 在线监测的校正模型	173
第四章 防垢对策——设计阶段应采用的策略	176
§ 4-1 污垢对换热器设计的影响	176
4-1-1 污垢对传热的影响	176
4-1-2 污垢对流动压降的影响	178
§ 4-2 设计换热设备时污垢数据的来源	180
§ 4-3 考虑污垢影响的方式	184
4-3-1 污垢热阻(污垢系数)	184
4-3-2 洁净系数	186
4-3-3 冗余面积百分数	186
§ 4-4 换热器型式和材料的选择	192
4-4-1 换热器型式的选择	192
4-4-2 换热器材料的选择	194
§ 4-5 考虑污垢时换热器的设计	196

§ 4-6 考虑污垢时换热器网络系统的设计	201
4-6-1 换热器网络中的污垢问题	201
4-6-2 换热器网络设计的夹点技术	202
第五章 抑垢对策——运行阶段应采取的策略	203
§ 5-1 运行前的检查与试验	203
5-1-1 检查	203
5-1-2 水压试验	204
§ 5-2 抑垢运行	204
5-2-1 析晶污垢和凝固污垢	205
5-2-2 微生物污垢	206
5-2-3 化学反应污垢	206
5-2-4 腐蚀污垢	208
5-2-5 锅炉水处理	209
§ 5-3 冷却水中污垢的抑制策略	209
5-3-1 生物污垢	210
5-3-2 水垢	212
5-3-3 腐蚀污垢	214
5-3-4 微粒污垢	215
5-3-5 混合污垢	215
§ 5-4 气侧污垢的抑制策略	216
5-4-1 燃料清洗技术	216
5-4-2 运行工况控制	216
5-4-3 燃料添加剂	217
5-4-4 表面清洗技术	219
5-4-5 急冷	219
5-4-6 气体净化	219
§ 5-5 污垢最小化起停程序	219
第六章 除垢对策	221
§ 6-1 概述	221
§ 6-2 换热器的最佳清洗周期	222
6-2-1 蒸发器离线清洗的最佳周期	222
6-2-2 凝汽器在线管理的优化模型	227

§ 6-3 机械清洗技术	231
6-3-1 机制研究	231
6-3-2 机械清洗的特点	232
6-3-3 机械清洗的方法	232
§ 6-4 化学清洗技术	237
6-4-1 化学清洗的机制及影响因素	237
6-4-2 化学清洗的优缺点	240
6-4-3 化学清洗方法	241
6-4-4 化学清洗常用药剂	243
6-4-5 化学清洗的适应性	244
§ 6-5 污垢在线清洗技术	244
6-5-1 在线机械清洗技术	245
6-5-2 在线化学清洗技术	248
参考文献	251
附录 I 一些物质的热导率	265
附录 II 再沸器污垢系数的推荐值	267
附录 III 板式换热器的污垢系数	268
附录 IV 美国管式换热器制造商协会(TEMA)推荐的污垢系数	269

第一章 概 论

§ 1-1 污垢对换热设备的影响

所谓污垢是指在与不洁净流体相接触的固体表面上逐渐积聚起来的那层固态物质,它通常以混合物的形态存在.固体表面从洁净状态到被污垢覆盖的过程,也就是污垢的积聚过程,人们常称之为积垢或污染.污染是一种极为普遍的现象,它存在于自然界、日常生活和各种工业生产过程,特别是各种传热过程中.根据 Steinhagen 等人对新西兰 1 100 家企业的 3 000 台各种类型换热器的通信调查表明,90%以上的换热器都存在不同程度的污垢问题^[1],如图 1-1 所示.换热面的污染,虽然和自然界、日常生活中的一般污染有着共同的形成机制,但是,由于温度梯度的存在,无疑使换热面的污染更为复杂.而且,换热面的污染所带来的危害,也远较其它污染为烈,因此受到人们的格外关注.

污垢通常是热的不良导体,其热导率一般只有换热面主要用材碳钢的数十分之一(见附录 I),和铜等热的良导体相比,差别就更大了.一旦换热面上有了污垢,流体与换热面之间的传热热阻(为简单计,假定换热面为平面时)便增加为

$$R = (1/h) + R_f \quad (1-1)$$

式中, R_f 为污垢层形成的附加热阻,称之为污垢热阻.在换热器设计中常将污垢热阻称为污垢系数,但是,不能将污垢系数仅仅理解为换热器设计中采用的污垢热阻值,而应该认为污垢热阻还指换热器运行中任一时刻污垢热阻的实际数值,这样就能更好地体现污垢热阻的时变性.这样一区别,会给我们叙述问题以方便,也更加严密.

式(1-1)的传热过程,也可以用总传热系数表示为