

传热过程中体系熵污染的组成机理*

陈曦¹, 胡升荣², 刘春梅³

(1. 重庆师范大学 化学学院, 重庆 400047; 2. 重庆市第二外国语学校, 重庆 400065;
3. 深圳晓清环境工程设备有限公司, 广东 深圳 518400)

摘要 经典热力学理论下很难对体系非平衡态下的熵产进行精确计算, 需要重新建立非平衡态下的熵污染的概念。本文根据热力学第二定律关于非平衡态的研究成果, 将其引入体系熵污染的研究中, 从理论上揭示了任意开系的熵污染是由体系的熵产项和熵流项构成, 熵流项是外部给予体系的熵变化, 熵产项是体系熵变的内部效应, 可以表征体系的熵污染强度, 因此可以推导出具有普遍实用性的熵污染量计算模型 $dS = d_e S + d_i S$ 。在此基础上, 对列管换热器单根圆管换热过程的熵污染源强度组成及产生机理进行了分析, 得出一般发展趋势。结果表明, 此模型为优化体系设计, 减少能源消耗, 以资源化的观点评价体系的污染状况和综合性能打下基础性。

关键词 熵污染; 熵产; 清洁生产工艺

中图分类号: O642.1; X131

文献标识码: A

文章编号: 1672-6693(2010)04-0044-07

体系熵变的精确计算是十分复杂的, 经典热力学关于体系平衡态下的熵增原理, 基本上反应了热力学第二定律平衡态体系熵产计算的途径^[1]。关于此典型的推论是绝热封闭体系的熵增加原理。对于非平衡的现象, 要计算非平衡体系的熵污染值, 简单移植平衡态下的算法则显然与实际不符, 主要的问题在于平衡态下研究的体系总是从一个平衡态到另一个平衡态下, 体系所处状态是稳定单一的, 熵是广延量状态函数, 具有准确的数值。而在非平衡态下, 体系大多不具有这样的性质, 即便在定态, 状态参数稳定的情况下, 也不满足平衡态所要求的无物质和能量流动的条件, 所以通过初终态函数的计算不能准确反应非平衡态下的熵变化。对体系性质的评价并不是单纯地计算出一个熵变化值, 重点关注的是这些熵变化的构成(或贡献), 以及这些构成的意义, 最大限度地优化体系热力学过程, 减少能源消耗。

通常的做法是将非平衡态分成线性区域和非线性区域来进行讨论, 简单来说, 热力学力与热力学流符合线性关系的区域称为线性区域, 在此区域内, 体系相对于平衡态的微小涨落有自发回复到平衡态的趋势, 所以又称为准平衡态或近平衡态。不符合线性关系的区域称为非线性区域, 一般都是远离平衡

态的区域。对近平衡区域的研究已经十分完备, 但关于非线性非平衡态的研究遇到的问题还比较多, 已不能够单一地依靠热力学的知识就能完全解决问题。根据以上分析可知, 要定量研究非均匀的、开放的、多相非平衡体系的熵变化值, 再在此基础上进一步评价体系的性质和效能显得十分困难。这个体系中包含有多种形式的力热力学力与热力学, 多种形式的化学反应, 要在此基础上统一熵表达方式是有难度的, 很难找到统一的模型。但总是可以将研究体系分散成相对而言较简单的均相(或各同性)的热力学力与热力学过程和单纯的化学反应过程, 在此基础上通过热力学第一、二定律和非平衡热力学的研究成果就能将此过程量化、模型化。在宏观上将体系的这些过程进行统计, 就能得到整个生产单位的性质和效能的总体评价依据。这便是研究生产资源化、清洁化生产的基本途径^[2]。

1 传热过程优化设计中的熵污染分析

熵产优化设计的研究推广, 使得对体系的热力学过程有了更深入的认识。其中比较典型的一类例子是关于传热过程熵产分析优化设计问题^[3-7], 包括有对流传热分析、强制流传热过程分析和其它一些特殊形式的传热过程分析(如绕楔形体流动过程)

* 收稿日期 2009-10-18 修回日期 2010-01-25

资助项目: 重庆市教委项目(No. KJ070810)

作者简介: 陈曦, 男, 副教授, 博士, 研究方向为化工环保。

等。从热力学第一、二定律出发,计算体系熵产,通常采用的方法是选用无因次单位熵产数来表达体系熵变化与引起熵变化参数(因素)间的函数关系,在体系最小熵产的前提下,确定这些参数对体系的影响,这是熵产优化反应器设计的基本思路。这种思路重要的一个特点是用资源化的观点来评价优化工作体系,与资源化观点来评价环境污染体系的原理是相同的,可以这样来理解,优化反应器设计的实质就是要减少反应器体系的熵污染值。

在绕任意物体对流换热过程的熵产计算中得到如下公式

$$\Delta_i S = \frac{Q_w(T_w - T_m)}{T_m T_w} + \frac{F_i U_m}{T_m} \quad (1)$$

(1)式包含两项,所揭示的物理意义是,对流换热过程中体系的熵产是由传热引起的熵产率和流动阻力引起的熵产率构成。改变绕任意物体的基本对流换热过程的特征尺寸、 Re 及其它相关因素能降低对流换热过程的熵产率,找到最小熵产数,从而减小传热过程中的有效能损失,优化反应器设计,即要减少传热体系的无谓能耗,降低体系造成的熵污染。

在强化传热研究中,引入熵产分析方法的目的在于找到传热过程中性能参数与最小熵产的关系,从而有目的地减小过程的熵污染,优化传热反应设计。

微元段内熵变表达式为

$$dS = \frac{mC_p dT_f}{T_f} + m \left[\frac{1}{\rho_f} - T \frac{\alpha(1/\rho_f)}{\partial T} \Big|_p \right]_T \frac{dP}{T_f} + \frac{m}{T_f \rho_f} \left(- \frac{dP}{dx} \right) dx - \frac{kU(T_w - T_f)}{T_w} dx \quad (2)$$

(2)式由4项组成,第一、二项的物理意义是微元体内热量变化所引起的熵产

$$dQ = mC_p dT_f + m \{ 1/\rho_f - [T\alpha(1/\rho_f)/\partial T] \Big|_p \} (dP/T_f)$$

其中第一项与热传递有关,第二项表示温升引起粘性摩擦导致的熵产。第三项代表微元体阻力耗功 $dW = (m/\rho_f)(\chi - dP/dx)dx$ 导致熵产。第四项表示微元体对流传热 $dW_c = [kU(T_w - T_f)/T_w]dx$ 引起的熵产。进一步对上式进行归纳,可以得到各向同性的流体强化传热过程的熵产组成的更普遍结论,即此过程总是可以分解为温度场引起的不可逆传热熵产和各种阻力损失导致的熵产两部分。

2 熵污染的组成分析

根据对以上传热过程熵产的研究表明非平衡态

体系有用能损耗去向明确,对体系熵污染增加途径认识清楚,有利于优化反应器设计和系统的清洁化生产过程;另一方面简单的各向同性的流体传热熵产表达式都会十分复杂(实际上还忽略扩散引起的温升、温度梯度引起的扩散作用以及其它类型的阻力损失,如压强张量引起的粘滞阻力等所带来的熵产),在研究包括多相、非均匀、非定态和存在场影响的情况下熵产组成就更复杂了。然而通过上面的推论可知,传热过程熵产总是可以分解为温度场引起的不可逆传热熵产和各种阻力损失导致的熵产两部分。

尽管模型中每一个组成可能还包含类型各异的熵产项,但在此项中熵产的基本力和流是同性的。从热力学第二定律熵变计算重新对体系进行研究,根据 Prigogine 的研究工作^[81],体系熵变可分为两项贡献

$$dS = d_e S + d_i S$$

写成熵流平衡方程

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} \quad (3)$$

根据熵流产生的必要条件(3)式右边第一项只与体系吸热和物质流有关,所可改写为下式

$$\frac{d_e S}{dt} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{T_i} \frac{\delta Q_i}{dt} + \sum_{j=1}^r S_j \frac{dn_j}{dt}$$

这样体系熵平衡公式为

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{T_i} \frac{\delta Q_i}{dt} + \sum_{j=1}^r S_j \frac{dn_j}{dt} + \frac{d_i S}{dt} \quad (4)$$

此公式反应了外界与体系交换的能量和物质引起的熵污染通量(即熵通量),但没有涉及体系自身的熵污染源强度(即熵产),而熵污染源强度关系到体系的综合特性,也是机制的内在关键因素,是最核心的部分。进一步研究体系自身的熵污染源强度是工作的重点。

根据(3)式,如果将熵流作为广延量为空间坐标的连续函数,则有如下公式

$$S = \int_{\theta} \rho s dV \quad (5)$$

$$\frac{d_e S}{dt} = - \int_{\Omega} J_{s, tot} d\Omega \quad (6)$$

$$\frac{d_i S}{dt} = \int_{\theta} \sigma dV \quad (7)$$

将(5)、(6)、(7)式代入(3)式,利用 Gauss 定理可得

$$\int_{\theta} \left(\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} + \text{div} J_{s, tot} - \sigma \right) dV = 0 \quad (8)$$

其中 $\sigma \geq 0$ 。根据重心实质微熵概念和质量守恒定理可以得到对任意一局部量 a 有下式成立

$$\rho \frac{da}{dt} = \frac{\partial(\rho a)}{\partial t} + \text{div}(\rho a V) \quad (9)$$

根据(8)式(9)式可简化为下式

$$\rho \frac{ds}{dt} = -\text{div}J_s + \sigma \quad (10)$$

其中 $J_s = J_{s, \text{tot}} - \rho s V_0$ (10)式是熵变局部表达式,其中 $-\text{div}J_s$ 表示外界流引入导致的熵变化,也称为熵污染通量 ρ 表示熵源强度,也称为体系熵污染源强度,其中熵产是研究体系性质,评价清洁生产的主要依据。

上面研究中用到了局部平衡假设原理^[9]。由热力学知识知道,当体系处于平衡态时单位质量的熵是完全表明体系宏观状态的确定函数,各参量分别为单位质量的内能 u 、体积度 $v = 1/\rho$ 和质量分数(浓度分数) C_k

$$s = s(u, v, C_k) \quad (11)$$

根据 Gibbs 关系有

$$T ds = du + p dv - \sum_{k=1}^n \mu_k dC_k \quad (12)$$

现假定整个体系虽然不处于平衡态,但微小质量元内体系处于“局部”平衡态,在局部范围内(11)、(12)式仍然有效,则局部熵流平衡式如下

$$T \frac{ds}{dt} = d + p d \frac{dv}{dt} - \sum_{k=1}^n \mu_k \frac{dC_k}{dt} \quad (13)$$

利用热力学第一定律关于能量守恒的微分方程

$$\frac{du}{dt} = \frac{dq}{dt} - p \frac{dv}{dt} - v \prod \text{grad}V + v \sum_k J_k \cdot F_k \quad (14)$$

和质量守恒方程

$$\rho \frac{dC_k}{dt} = -\text{div}J_k + \sum_{j=1}^r V_{kj} J_j \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (15)$$

将(14)、(15)式代入(13)式,两边同除 T 乘 ρ 整理后得

$$\rho \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dq}{dt} - \frac{1}{T} \prod \text{grad}V + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n J_k \cdot F_k + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n \mu_k \text{div}J_k - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^r J_j V_{kj} \mu_k$$

令 $A_j = \sum_{k=1}^n V_{kj} \mu_k$ ($j = 1, 2, 3, \dots, r$), 及

$$\rho \frac{dq}{dt} = -\text{div}J_q \quad (16)$$

这样熵平衡表达式如下

$$\rho \frac{ds}{dt} = -\frac{1}{T} \text{div}J_q - \frac{1}{T} \prod \text{grad}V +$$

$$\frac{1}{T} \sum_{k=1}^n J_k \cdot F_k + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n \mu_k \text{div}J_k - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^r J_j A_j$$

写成(10)式的形式

$$\rho \frac{ds}{dt} = -\text{div} \left(\frac{J_q - \sum_{k=1}^n \mu_k J_k}{T} \right) - \frac{1}{T^2} J_q \cdot \text{grad}T -$$

$$\frac{1}{T} \sum_{k=1}^n J_k \cdot (T \text{grad} \frac{\mu_k}{T} - F_k) - \frac{1}{T} \prod \text{grad}V - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^r J_j A_j$$

与(10)式比较,容易得出熵污染通量和熵污染源强度值

$$J_s = \frac{1}{T} (J_q - \sum_{k=1}^n \mu_k J_k) \quad (17)$$

$$\sigma = -\frac{1}{T^2} J_q \cdot \text{grad}T - \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n J_k \cdot (T \text{grad} \frac{\mu_k}{T} - F_k) -$$

$$\frac{1}{T} \prod \text{grad}V - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^r J_j A_j \geq 0 \quad (18)$$

(17)、(18)式再接合(3)、(6)、(7)式就能计算出体系的熵变化值。

进一步分析熵通量项,得到重要的提示,即开放体系熵污染通量由两部分构成,第一部分是热流项,第二部分与物质扩散流 J_k 有关,结合(4)式可以得

知项 $-\frac{1}{T} \text{div}J_q$ 与项 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{T_k} \frac{\delta Q_k}{dt}$ 是相同的,这是因为

$\frac{\delta Q_k}{dt} = \frac{dq_k}{dt}$ 根据(16)式两者完全相同,由物质扩散

流引起的熵污染通量项 $\frac{1}{T} \text{div} \sum_{k=1}^n \mu_k J_k$ 与(4)式中的

$\sum_{k=1}^n S_k \frac{dn_k}{dt}$ 也是相同的,物质的摩尔流量 $\frac{dn_k}{dt}$ 实质上

就是物质流的散度,相对应的热力势或化学势与温度之比也就是体系 K 物质的分比熵或偏摩尔熵。

根据(18)式可以知道体系熵污染源强度是由4部分组成,右边第一项表示是由热传导作出的贡献,主要是温度场存在造成的不可逆损失,第二项源于扩散,主要是温度、外力作用和体系内长程相互作用的贡献,第三项与引起粘滞流动的速度梯度有关;第四项是由化学反应造成。这就是普适体系的熵污染源强度的全部构成。进一步对(18)式进行分析发现式中右边每一项都包括两个因子的乘积,其中一个因子是“流因子”(如热流 J_q , 扩散流 J_k , 动量流或粘滞压强张量 Π 和化学反应率 J_j);另一个因子是“力因子”,与内涵性状态变量的梯度(温度、化学势

与速度梯度)有关,还包括外力 F_k 和化学亲和势 A_j ; 因而,熵污染源强度总可以写成是热力学力和热力学流之间的乘积(18)式可变为

$$\sigma = \sum_{i=1}^n J_i X_i \quad (19)$$

根据以上研究,不仅能够了解构成体系熵增长的各项,而且能分析出各项所代表的物理意义,更重要的是,根据(19)式的归纳,在不考虑外界熵通量对体系熵变的影响下,表征体系综合性质的体系自身的熵污染源强度(熵产)是由热力学的力和流的作用引起的。这样以资源化观点为基础的污染实质便可以理解为如下的表述:体系内自身的熵污染增加(即熵污染源强度)是由体系内的热力学力与流所造成的不可逆损失引起的。

3 体系熵污染组成的物理意义

为了便于计算,还可以将(18)式完善为更接近实际应用的形式,由热力学关系

$$Td\left(\frac{\mu_k}{T}\right) = (d\mu_k)_T - \frac{h_k}{T}dT$$

引入新通量 $J'_q = J_q - \sum_{k=1}^n h_k J_k$

这样(17)式改写为

$$J_s = \frac{1}{T}J'_q + \sum_{k=1}^n S_k J_k \quad (20)$$

其中, $S_k = -(\mu_k - h_k)/T$ 称为分比熵。(20)式的物理意义是熵通量由热流 J'_q 和分比熵相对于重心速度 V 的输运。(24)式改写为

$$\sigma = -\frac{1}{T^2}J'_q \cdot \text{grad}T - \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n J_k \cdot \{(\text{grad} \mu_k)_T - F_k\} - \frac{1}{T} \prod \{\text{grad}V - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^r J_j A_j\} \geq 0 \quad (21)$$

如果扩散项考虑到组分 K 相对于体系整体质心运动速度之差引起的扩散流导致的熵增加,则(21)式可以写成以下最终形式

$$\sigma = -\frac{1}{T^2}J'_q \cdot \text{grad}T - \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n J_k \cdot \{(\text{grad} \mu_k)_T - F_k + \frac{d(V_k - V)}{dt}\} - \frac{1}{T} \prod \{\text{grad}V - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^r J_j A_j\} \quad (22)$$

其中 $\frac{d(V_k - V)}{dt}$ 表示组分 K 相对于质心速度的惯性项。

有了(22)式,再来解析体系熵污染源强度可以

得到更为实用的表达方式,很明显熵污染源强度第一项表示由于热流引起的热传递项现在由两部分组成,除了温度梯度引起的热传导贡献外还有扩散引起的热传递的贡献。第一部分可表示为 $\frac{1}{T}J_q \text{grad}T$,

后一部分为 $\frac{1}{T^2} \sum_{k=1}^n h_k J_k \cdot \text{grad}T$ 。关于第二项,由扩散流引起的熵污染源强度项现在的确切物理意义是指由 J_k 引起的相对于质心速度 V 的不可逆过程。将由扩散引起的热传导划归第一项后,与扩散流 J_k 相共轭的热力学力由下述3部分组成,第一部分是化学势,第二部分是外力或保守力所对应的势,第三部分就是组分 K 相对于质心速度所引起的惯性项。熵产的其它两项,粘滞流动项和化学反应项没有变化。

这就得到了体系熵变化的计算模型,解决了体系熵污染评价的最大困难,但是也要注意到的事实,以上推论都是建立在局部平衡假设的基础上的,公式的应用范围有一定的限制,上述公式在非平衡态的线性区域是严格准确的,在非平衡态的非线性区域应用是有局限性的,但这并不影响对体系的分析认识和评价,重要的是熵污染源强度的组成已经十分清楚,实际应用中甚至不计算出体系的熵污染源强度。即便要计算体系的熵污染源强度,在传递现象中(包括热传递、扩散等)非平衡态非线性区域上述计算任是合理的、适用的。

4 列管换热器单根圆管传热过程熵污染组成分析及原理

根据上述讨论,现在可以分析某一体系熵污染情况,选择列管换热器作为析研究的对象(或体系),建立模型(为了便于分析研究,只对单根换热管进行计算)图1所示。

假设在空间体系 Θ 内建立笛卡尔坐标系,管外流体1在沿 X 轴正向作强化对流,流体垂直流过圆管,在 Y, Z 方向忽略宏观的相对运动,平行于 Y 方向有一理想换热管,沿 Y 轴两端可无限延伸,流体2沿 Y 轴正向从换热管一端流进,管内流动充分发展,流体1进入 X_1 断面时温度为 $T_{1,1}$,出 X_2 断面时温度为 $T_{1,2}$,流体2进 Y_1 断面时温度为 $T_{2,1}$,出 Y_2 断面时温度为 $T_{2,2}$ 。 $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$ 所构成的闭合边界为 Ω ,边界内所包围的开放体系 Θ 作为研究对象。

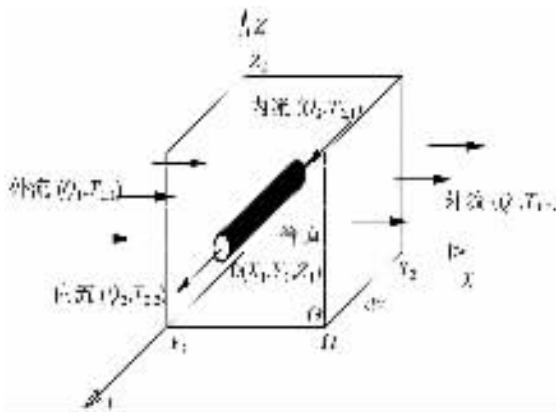


图 1 单根圆管透热模型

很明显,可将此系统细分成 3 部分来分析其熵变组成部分,此 3 部分为:流体 1 在管外作强制对流过程,流体 2 在管内作充分发展流过程,管壁的热传导过程,此 3 部分熵产组成见表 1。

其中 S_1, S_2 为管外和管内流体的偏摩尔熵值; dq_1 和 dq_2 分别表示外界环境通过管外和管内流体与体系的热通量,给热为正,吸热为负; V_1, V_2 表示管外流体和管内流体的流体积度; v_1, v_2 分别为管外各管内液体的体速度; T_1, T_w, T_2 表示管外流体、管壁和管内流体的平均温度; $gradT'_1, gradT'_w, gradT'_2$ 分别表示管外流体、管壁和管内流体的温度梯度; h_1, h_2 代表流体 1、2 的分比焓; J_1, J_2 代表扩散流。

表 1 单根圆管换热过程熵污染组成表

体系熵污染组成		外部流	管壁	内部流	
熵流 (J_s)	热流项		$dq_1/T_{1,1} + dq_2/T_{2,1}$		
	物流项		$S_1 Q_1 + S_2 Q_2$		
熵产 (σ)	热交换	热交换	$-(1/T_1)^2 J_{q,1} gradT'_1$	$-(1/T_w)^2 J'_{q,w} gradT'_w$	$-(1/T_2)^2 J'_{q,2} gradT'_2$
		扩散	$h_1 J_1$	0	$h_2 J_2$
		亲和力	neglect	neglect	neglect
	扩散	外力	neglect	neglect	neglect
		惯性	0	0	0
	滞流	内摩擦	$(-1/T_1) \prod_1^0 (gradV_1)^s$	0	$(-1/T_2) \prod_2^0 (gradV_2)^s$
		$gradv$	$(-1/T_1) \prod_1 divv_1$	0	$(-1/T_2) \prod_2 divv_2$
	化学反应	0	0	0	

对上表进一步分析,熵污染通量项主要难度在于找到物质 K 的偏摩尔熵,当为单一组分时可用物质的摩尔熵值。对熵污染源强度项而言,热传导所作的贡献主要是由管外强制对流、管壁传热和管内充分发展流动 3 部分的热传导所引起的,由扩散流引起的温度差 hJ_k 流很小可忽略不计;扩散项在此都没有考虑,主要原因是对纯粹的流体,不管是管外的强制对流还是管内的流动,没有引起扩散的势的存在或者说这种势还很弱,可以想象的是,不管在 X, Y 还是 Z 方向,局部区域内一定存在着这种扩散作用,但相对而言引起的熵产很小,所以忽略。粘滞流动项也可分解为两项,第一项是由内摩擦的作用引起的,第二项是由体速度(密度)所产生的,很明显,对上述假设模型体速度差 $gradv$ 引起的熵产在此也可忽略不计。这样体系的熵产为

$$\sigma = [-(1/T_1)^2 J'_{q,1} gradT'_1 - (1/T_1) \prod_1^0 (gradV_1)^s] + [-(1/T_w)^2 J'_{q,w} gradT'_w] + [-(1/T_2)^2 J'_{q,2} gradT'_2 -$$

$$(1/T_2) \prod_2^0 (gradV_2)^s] \quad (23)$$

(23) 式就表示列管式换热器单根圆管传热过程的熵污染源强度计算。表明了体系以资源化观点来作为评价依据的污染状况,同时也表征了体系自身的综合性质,对此根据(23)式进行分析,体系熵污染均来自热传导和粘滞流动两方面的作用,因而可以十分清楚地去分析体系中这两方面影响的因素。很容易就能发现,不论是管内还是管外,热传导和粘滞运动的作用主要与管壁面接触的一层液体的作用造成的,不管流体运动状况如何这层液体总是存在的,例如以管内流动为例,如图 2,这样的边界层又可以分为两层:一是与管壁面紧贴的 δ_1 层,近似静止,另一层是 δ_2 ,为层流层,热传导就主要发生在 δ_1, δ_2 层内,在湍流区域内,可认为引起传导的温度梯度较小,主要传热方式为对流。在层流区内,热传导和对流换热同时起着主要作用,而在静止层内主要以热传导为主。对于粘滞流动项,如果忽略由体积

度引起的粘滞流动摩擦损失,那么由粘滞流动引起的内摩擦也主要发生在 $\delta_1\delta_2$ 层内,其中湍流区与层流层之间,层流层与静止层之间,以及静止层与管壁之间而共同组成了摩擦阻力损失。这些便是管内流动熵污染源强度的主要来源,也是引起有效能损失的理论来源。可以这样来理解管内流动随 $\delta_1\delta_2$ 层的变化而发生的变化。

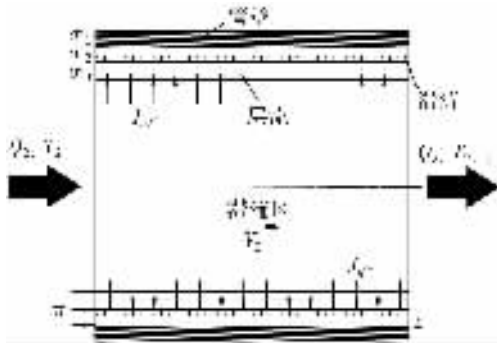


图2 管内流动熵变化分布图

1) 当管内流体静止时,此时 $\delta_1\delta_2$ 层等于圆管半径,此时只有静止层,热传导是熵产引起的主要因素,由于没有流动,粘滞运动项为零,当然此时的熵产项还包括了扩散作用,这是因为静止层较厚,此项不能忽略,同时由温度梯度产生的密度差也会导致一部分由体积度产生的粘滞运动损失,这时体系的熵污染源强度由3部分组成

$$\sigma = [-(1/T_1)^2 J'_{q,1} gradT'_1] + [-(1/T_w)^2 J'_w gradT'_w] + [-(1/T_2)^2 J'_{q,2} gradT'_2]$$

2) 随着流体流速增加,出现层流层、湍流层,这时 $\delta_1\delta_2$ 层逐渐变薄,在其内发生的传导项逐渐减弱,而随着层流层和静止层逐渐变薄,由短程分子碰撞作用所形成的摩擦损失逐渐增加,这时体系的熵污染源强度由以下几部分组成

$$\sigma = [-(1/T_1)^2 \prod_1 (gradV_1)^s] + [-(1/T_w)^2 J'_w gradT'_w] + [-(1/T_2)^2 \prod_2 (gradV_2)^s]$$

3) 当静止层为零时,热传导项消失,此时体系的熵污染源强度主要由流体与管壁间的摩擦阻力损失所造成,湍流层与层流层,层流层与静止层之间摩擦损失也消失,熵污染源强度仅有内摩擦项。

根据管内流体流动熵污染源强度的组成及产生机理分析可以得出如下结论:在管内流动的流体的熵污染源强度是受 Re 及管内壁面的特性影响,总体趋势是随着 Re 的增大,传导项引起的熵产减小,粘

滞流动引起的熵污染增加,在低 Re 区域热传导是熵污染源强度的主要来源,在高 Re 区情况刚好相反。管内壁面的粗糙度对熵污染源强度量的影响是随着粗糙度增加,将同时加大热传导项和粘滞阻力项所引起的熵产。对于管外强制流的情况要比管内情况复杂一点,主要的原因是管外强制绕流的阻力损失还包括了流体与管壁的碰撞,如果也将此部分作为短程作用导致的损失,那么与管内熵污染源强度的产生的基本原理完全相同,具体表达式略有不同。这样在管外,熵污染源强度量与 Re 及单根圆管特征尺寸有关,管外壁面的粗糙度影响就较小了,圆管直径越小,热传导和内摩擦阻力引起的熵产生就越小,所以减小圆直径在理论上是可以优化传热效能的。在管壁内的情况较简单,是较单纯的热传导过程,受传热系数影响很大,这与选择材质关系密切。

5 结论

1) 通过非平衡态熵产组成的分析推导出对普适体系的熵污染量的计算模型,模型中熵污染是由热力学力和热力学流组成的,为优化反应器设计,以资源化观点改善清洁生产工艺打下了基础。

2) 分析了列管换热器单根圆管换热过程的熵污染组成,以此为基础对体系熵污染源强度的产生的机理进行了解释和影响熵污染源强度量的因素和影响趋势分析,分析认为在管内流动的流体的熵污染源强度是受 Re 及管内壁面的特性影响,此关系是优化体系设计,改善清洁生产工艺的重要技术途径。

参考文献:

- [1] 李如生. 平衡态热力学和耗散结构[M]. 清华大学出版社, 1986: 5-28.
- [2] 陈曦. 温度场熵在矩形散热翅片中的应用[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 59-62.
- [3] 吴双应, 李友荣. 绕楔形流动与传热过程的热力学分析与优化[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1997, 20(1): 70-72.
- [4] 高翔, 骆仲决. 单位熵产分析法在强化传热研究中的应用[J]. 化工学报, 1998, 49(5): 639-643.
- [5] 李大鹏, 孙丰瑞. 传热与流动系统熵产生的研究与进展[J]. 能源研究与信息, 2000, 22(6): 42-48.
- [6] 杨波涛. 利用熵产分析指导热交换器的设计[J]. 化工装备技术, 1998, 19(1): 6-9.
- [7] 张旭, 陈沛霖. 直接蒸发冷却过程不可逆热力学分析[J]. 同济大学学报, 1995, 23(6): 638-643.

- [8] Glansdorff P ,Prigogine I. Structure ,stability and fluctuations [M]. Wiley Interscience :London ,1971 30-37.
- [9] Groot S R D ,Mazur P. Non-equilibrium thermodynamics [M]. North Holland :Amsterdam ,1962 2-10.

Parts of System Entropy Pollution of Heat Transfer Process

CHEN Xi¹ ,HU Shen-rong² ,LIU Chun-mei³

(1. School of Chemistry ,Chongqing Normal University ,Chongqing 400047 ;2. Verakin High School of Chongqing ,Chongqing 400065 ;
3. Xiaoqing Enviroment Equipment Ltd. Company of Shenzhen ,Shenzhen Guangdong 518400 ,China)

Abstract : It is difficult to accurately calculate the system entropy generation of non – equilibrium state of open system by classic thermodynamics. A new definiton of entropy production pollution(EPP) is needed to be rebuilt about non – equilibrium state. By studing entropy production pollution definiton of whole system , It is very important to know the sources and parts of the system entropy pollution , which we can estimate the clean production position and optimize the system reaction design with environmental protection opinions. Based on the second law of thermodynamics about non – equilibrium state of open system , we open out that any open system contaminated by system entropy production and entropy flow items. Entropy flow is external to system entropy , and entropy production is system of internal entropy effect , which could indicate the system entropy of pollution intensity. It can derive the universal relevance of the entropy of the pollution load calculation model $dS = deS + diS$. According to analyze system entropy pollution production forms and produce mechanism about single pipe diathermanous force heat transformation process a common development about entropy production can be put forward by these. All these researches is the basic researches for optimizing system design , reducing energy consuming and estimating system pollution state. This method is also useful to evaluate integrative characters with resource opinions.

Key words : system entropy pollution ; entropy pollution production ; clean producing mechanism

(责任编辑 欧红叶)