

# 热力学熵及其普遍化表达式的动力学特征

韩光泽<sup>1</sup>, 郭平生<sup>2</sup>, 李绍新<sup>1</sup>, 华 贵<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学 物理科学与技术学院, 广东 广州 510640; 2. 广西师范大学 物理与电子工程学院, 广西 桂林 541004;

3. 华南理工大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 分析了功、热、能和熵的物理意义以及与热力学定律的关系, 做功和传热是能和熵传递与转换的两种途径, 从热力学第一定律定义的能量只有相对意义。熵是系统相对于环境所具有的做最大有用功的能力, 相对于选定的环境, 熵是系统的状态参量。常规的熵计算式是从热力学第一和第二定律导出的结果, 从动力学的角度讨论了熵及其普遍化表达式的物理含义。熵起源于系统与环境的平衡, 如果系统与外界之间存在着某种(或几种)强度量差, 在强度量差的推动下系统可能自动地变化到与环境相平衡的状态(寂态), 在这样的过程中系统可以对外做功, 这种做最大有用功的能力就是系统的熵。在能量公设的基础上, 熵的微分被普遍地表示为强度量差与其共轭的广延量微分的乘积。熵的普遍化表达式完整地反映了熵的物理含义及其动力学特征, 利用能量和熵的普遍化表达式导出了熵损失的普遍化表达式。

**关 键 词:** 能量公设; 热力学定律; 热力学有效能; 强度量; 熵普遍化表达式

中图分类号: TK123 文献标识码: A

## 引 言

热力学第一定律适用于任何系统的任何过程, 建立在热力学第一定律基础上的能量平衡法是热力学分析的重要方法, 它能够指出能量的分配和去向。但是, 要回答系统做最大有用功的能力以及这种能力被损失等问题, 就必须借助于热力学第二定律。建立在热力学第二定律基础上的热力学分析称为熵分析, 也称有效能分析。熵分析可以提供系统的最大工作能力以及熵损失发生的部位, 指出系统优化的潜力和方向, 是对热力学系统设计、优化、以及性能评估的有效方法。任何现实的能量利用过程都是在一定的环境条件下发生的, 必定受到环境的制约。研究在环境的约束下能量的利用以及传递与转换规律的学科称为寂态热动力学<sup>[1~4]</sup>, 它是伴随着熵概念的产生, 而形成并发展的一门热力学的分支学科。

目前寂态热动力学还处于发展阶段, 以熵为标志的理论和应用研究在国内外受到一定的关注<sup>[3~4]</sup>。

熵是寂态热动力学中的一个基本概念, 目前的科技文献中只是从概念上给出了熵的定义, 并从形式上导出了熵的计算式<sup>[5]</sup>。关于熵以及其计算式的物理含义不是很清楚, 甚至出现了一些模糊的认识。本文将从系统变化过程中做功和传热与能量关系的角度探讨在环境约束下的用能本质, 从动力学的角度给出熵及其普遍化表达式的物理含义。

## 1 功、热、能与热力学第一定律

力是系统(或物体)之间的机械相互作用。在力学中功被定义为力与位移的标量积, 即  $dW = F \cdot dr$ , 在经典力学中利用牛顿定律容易证明功就是机械能传递与转换的方式。在热力学中, 还将讨论许多力学以外的其它现象, 因此功的定义被推广为: 如果系统对外界作用的所有效果可以等价于提升一个重物, 即称系统对外界做了功。当系统与外界之间发生化学的、电的或其它非机械形式的作用时, 只要其总的效果可以等价于(通过其它装置转换)提升一个重物, 就称系统对外界做了功, 或者说系统与外界之间交换了能量。因此可以广义地说, 功是能量传递与转换的途径之一。

系统与外界之间的热相互作用由温度描述, 温度与熵的乘积就是热量  $Q = TdS$ 。当二者之间的温度不相等时, 比如系统的温度高于外界的温度, 就有能量以热量的形式从系统传向外界, 系统的温度随之降低。当二者的温度趋于相等时, 即称为达到热平衡状态, 热量传递也随之停止。因此热量是能量传递的另一种方式, 当系统与外界之间有热的相互作用时, 能量的传递就表现为热量。

实验发现, 在某一个过程中系统与外界交换的

功量和热量与具体的过程有关。系统从一个状态到达另一个状态可以经由许多的过程,对应每一个过程系统与外界交换的热量和做功都不相同。因此称热和功为过程量,因为它们决定于具体的过程。但实验又同时发现,在不同的过程中系统从外界吸收的热量  $Q$  与系统对外界所做功量  $W$  的差 ( $Q - W$ ) 都相同,也就说与过程无关。这说明 ( $Q - W$ ) 代表了某一个状态参量在系统两个状态之间的差值,这个状态量被定义为能量:

$$E_2 - E_1 = Q - W \quad (1)$$

这就是热力学第一定律<sup>[6]</sup>。它的物理意义是,系统能量的增量等于系统从外界吸收的热量  $Q$  加上外界对系统做的功 ( $-W$ )。式(1)说明:(1) 能量是系统的状态参量,在总量保持不变的全提下,能量可以从一个系统传递到另一个系统,也可以从一种形式转换成另一种形式,所有这些过程都是通过传热和做功来完成的。因此可以说,功就是通过力的作用来传递能量,热就是通过温度的作用来传递能量,做功和传热的过程也同时是传递能量的过程。(2) 热力学第一定律只定义了能量差值,式中的能量  $E$  可以加上任意常数,因此只有能量的差值才有意义。在工程热力学中,上式定义的系统总能量被认为由 3 部分构成,即动能  $E_k$ 、势能  $E_p$  和热力学能  $U$ ,系统总能量的变化等于这 3 部分变化之和  $E_2 - E_1 = (E_{k2} - E_{k1}) + (E_{p2} - E_{p1}) + (U_2 - U_1)$ 。经典力学已表明,速度和高度都只具有相对的意义,因此动能和势能也是相对的。(3) 能量守恒定律只适用于孤立系统,而热力学第一定律适用于任何系统的任何过程,因此热力学第一定律是能量守恒定律的推广。

热力学第一定律表明,做功和传热是改变系统能量的两种方式。因此,当系统具有了一定的能量时,系统就具有了对外做功或传热的能力,或者说系统具有举起一个重物或使外界温度上升的能力,这就是能量的物理意义。

## 2 能量公设与能量的普遍化表达式

从与状态和过程的关系来区分,热力学物理量(quantity)可分为状态量(property)和过程量(path-dependent quantity)两种。如果一个物理量在任意时刻都有一个与历史过程无关的取值,或者说其在任意两个状态之间的变化量与具体的过程无关,即是状态量。热力学状态量又可分为广延量(extensive)和强度量(intensive)两类。如果某状态量的总量等

于系统各部分的和,也就是与系统的大小有关,就是广延量。而强度量不具有可加性,往往是空间和时间的函数,也可称为场量。

能量公设表明<sup>[1~2,7]</sup>,热力学体系的状态实质上是一能位态,可以用一个总能位函数描述,总能位函数等于各部分能位函数的和;系统的能量等于能位函数的微分在两个状态之间的积分;任何形式能位函数的微分都可以表示成一个基本强度量乘以与之共轭的基本广延量的微分。若用  $X_i$  表示第  $i$  种形式的基本强度量,  $x_i$  表示与之共轭的第  $i$  种形式基本广延量,系统的总能量  $E$  及任意形式的能量  $E_i$  可以普遍地表示为:

$$E = \sum E_i, \quad E_i = \int dE_i, \quad dE_i = X_i dx_i \quad (2)$$

第一式的求和对体系内所有的运动形式,或者说求和数等于体系可能同外界交换能量方式的数目。由于能量是状态量,所以第二式的积分只决定于起、始两个状态,与具体的积分过程无关。根据物理量的张量性质,第三式的乘积可能是点积等。例如,动能  $E_k$  的微分可用速度(强度量)  $v$  与动量(广延量)  $p$  表示为  $dE_k = v \cdot dp$ ,利用关系式  $p = mv$  可积分得  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ; 化学能  $E_c$  的微分可用化学势  $\mu$  与物质的量  $n$  表示为  $dE_c = \mu dn$ ; 压能  $E_p$  的微分可用压强  $p$  的负值与体积  $V$  表示为  $dE_p = -p dV$ ; 热能  $E_h$  的微分可用温度  $T$  与  $S$  熵写为  $dE_h = T dS$ 。能量的普遍化表达式(2)将能量定义为能位函数在两个状态之间的差值,这与热力学第一定律式(1)定义能量的方式是一致的。

## 3 环境、寂态、焯与热力学第二定律

### 3.1 环境、寂态与焯的定义

当两个系统之间存在着某种不平衡时,如果它们之间发生相互作用,从原理上讲,在它们达到平衡的过程中可以对外做功。若其中一个是我们研究的系统,另外一个就可称之为参考系统。如果研究的目的是普遍化的能量传递与转换关系,参考系统可以是任意选取的。但是对于以现实的用能为目的的研究,这个能量参考系统只能是环境,因为任何现实的能量利用过程都要在一定的环境中进行,也必定要受到环境的制约。焯就是在系统与环境达到平衡的过程中可以得到的最大理论功。因此焯的完准定义离不开环境这一重要概念,任何脱离了环境来讨论焯的做法都是毫无意义的。

系统(system)是选取的被研究的目标对象,除系

统以外的一切称为外界 (surroundings), 远离系统的大部分外界称为环境 (environment)。环境可以被看作是一个具有极大容量的简单可压缩系统, 具有均匀的温度  $T_0$  和压强  $p_0$  等强度量, 这些强度量不受系统与环境相互作用的影响。环境的强度量可能随地点、季节等因素发生变化, 但这不影响热力学的普遍规律。当环境与其它系统发生相互作用时, 环境的广延量会产生变化, 环境的热力学能  $U_e$ 、熵  $S_e$  和体积  $V_e$  在变化过程中满足热力学第一、二定律:

$$\Delta U_e = T_0 \Delta S_e - p_0 \Delta V_e \tag{3}$$

如果一个系统偏离了环境状态, 系统就具有了做功的能力。当系统的状态向环境状态靠近时, 这种做功能力就会减少。如果系统与环境达到平衡, 就没有了做功能力。系统与环境完全平衡的状态称为寂态 (dead state)。处于寂态时系统的温度和压强等强度量与环境的相等, 此时虽然系统和环境都具有能量, 但不能对外做功或传热, 因为在系统和环境之间或它们的内部都没有自动变化的可能。

定义了寂态以后, 就可以给出焓的完整定义。焓是系统从某一给定的状态达到寂态时, 理论上可以获得的最大有用功。也可以说, 焓是系统相对于寂态所具有的做最大有用功的能力。

3.2 传统意义上的焓计算式

如图 1 所示, 由一个封闭的热力学系统与其环境构成一个复合系统。选择该复合系统时要满足两个条件, 一是只有功 (没有热) 的作用通过复合系统的边界; 二是复合系统的总体积不变。将能量平衡方程和熵平衡方程应用于该复合系统, 利用热力学第二定律可以导出焓的计算式<sup>[3]</sup>。

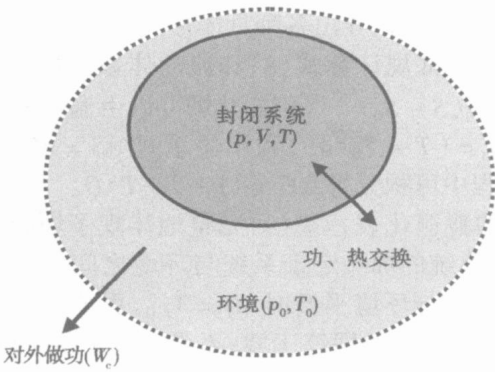


图 1 由封闭系统与其环境构成的复合系统

设封闭系统从任意给定状态变化到与环境平衡的寂态, 因为复合系统与外界只有功的交换, 将热力学第一定律应用于该复合系统:

$$\Delta E_c = -W_c \tag{4}$$

式中:  $W_c$ —在封闭系统到达寂态的过程中复合系统对外做的功;  $\Delta E_c$ —复合系统的能量变化。封闭系统在任意其它状态的能量  $E$  包括动能、势能和热力学能, 而在寂态时只有热力学能  $U_0$ 。复合系统的能量变化应该等于封闭系统的能量变化与环境能量变化的和  $\Delta E_c = (U_0 - E) + \Delta U_e$ 。将该式以及环境能量变化的表示式(3)代入式(4)可得:

$$W_c = (E - U_0) - (T_0 \Delta S_e - p_0 \Delta V_e) \tag{5}$$

由于所选定的复合系统的总体积不变, 所以有  $\Delta V_e = -(V_0 - V)$ 。进一步将熵平衡方程应用到复合系统, 由于复合系统与外界没有热的交换, 因此复合系统的熵增加等于封闭系统的熵增加与环境熵增加的和:

$$\Delta S_c = (S_0 - S) + \Delta S_e \tag{6}$$

将式(6)表示的环境熵变  $\Delta S_e$  和环境的体积变化量  $\Delta V_e$  代入式(5)得:

$$W_c = (E - U_0) + p_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) - T_0 \Delta S_e \tag{7}$$

由热力学第二定律, 复合系统的熵产生大于或等于零 ( $\Delta S_c \geq 0$ )。所以由式(7)可知, 当总熵不变时 (即可逆过程)  $\Delta S_c = 0$ ,  $W_c$  有最大值。按照定义, 系统的焓  $E$  就是当系统达到寂态时, 复合系统可能对外做的最大功:

$$E = (E - U_0) + p_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) \tag{8}$$

这就是目前通用的焓计算式, 其中下标 0 表示封闭系统的热力学参数在寂态的取值。

利用相同的方法可以导出控制容积系统的流动焓 (flow exergy) 和化学焓 (chemical exergy)。这是最经典的导出焓计算式的方法, 从原理上说, 现行有关文献中所采用的导出焓方法与此相同。式(5)清楚地反映出了这种方法的物理基础, 也就是, 封闭系统变化到寂态时对外界做的有用功 (焓) 等于封闭系统能量的减少量减去通过传热和做功传递给环境的能量。

3.3 热力学焓的基本特征

焓是系统偏离环境状态大小的量度, 为系统和环境共同拥有。一旦环境状态被选定, 系统的焓也就被唯一地确定下来, 此时焓可以被认为系统的状态参量。这完全类似于重力势能, 重力势能本质上属于重物 and 地球构成的相互作用系统, 但由于这种势能主要是转换为重物的动能, 因此在选定了地面参考系后, 可以认为是重物拥有了重力势能。

焓和能是能位函数 (差) 相对于不同参考态的差

值,不能说焓是能中可以被利用的部分。焓是相对于寂态,而能是相对于另一个约定的状态,例如热能  $E_h = mc_v T$  就是指相对于绝对零度。当这个约定的状态与寂态是同一个状态时,焓和能可能相同,例如通常约定的速度是相对于环境,所以动焓等于动能。也正是由于这种参考态的差别,使得有时系统的焓等于零,而能量不为零;或者系统的能量等于零,而焓不等于零。例如,系统在寂态时具有能量而没有焓。在化学热力学中,由于规定环境中的稳定物质(例如碳、氢气等)在标准状态下(25 °C和0.101 kPa)的焓和 Gibbs 函数等于零,如果标准状态不是寂态,这些物质就具有非零的焓。

系统的焓值不可能为负。当系统处于寂态时系统的焓值为零,只要系统的状态偏离了寂态(向任何方向!),系统就可能自动地回到寂态,这个过程不需要外界对系统做功,即不可能有负功。在制冷过程中,例如集中供冷中的冷却水,所谓的“冷量”是指将环境温度下的水冷却到一定的低温温度时,从冷却水中吸走的热量,单位质量的“冷量”是  $Q = c(T_0 - T)$ 。而此时冷却水所具有的热焓就是在这个过程中外界必须输入的最小功,易证明为  $E_h = (T_0/T - 1)Q$ 。

能量和焓可能具有相反的传递方向。在热焓的传递过程中,  $E_h = (1 - T_0/T)Q$ , 当系统的温度高于环境的温度时  $T > T_0$ , 热焓  $E_h$  和热量  $Q$  具有相同的符号,也就是说具有相同的传递方向。但是,当系统的温度低于环境的温度时  $T < T_0$ , 热焓  $E_h$  和热量  $Q$  具有相反的符号,也就是说热焓和热能具有相反的传递方向。在制冷过程中,随着系统温度的降低,热能从低温的系统被传递到高温的环境,但热焓却不断的传向系统,因为在这样的过程中系统不断地偏离寂态,从而具有了越来越多的做功本领。负压下的气体膨胀过程也与此类似。

焓不遵守守恒定律,可以被过程的不可逆性耗散。比较式(7)和式(8),对于不可逆过程复合系统有净熵产生  $\Delta S_c > 0$ , 此时复合系统所能做的功小于系统的焓  $W_c < E$ 。一种极限情况是系统可以自动地回到寂态,不对外界做任何功,系统开始所具有的焓值被全部耗散掉。

系统的焓也可以等价地定义为,使处于寂态的系统偏离到另一个给定状态时外界必须输入的最小功。

#### 4 热力学焓及其普遍化表达式的物理意义

从上面关于能和焓的分析讨论中可以看出,系

统具有焓的原因是系统偏离了寂态。没有处在寂态的系统可以自动地变化到寂态,在这样的变化过程中系统就可以对外做功。当系统处于寂态时,就没有自发变化的可能,也不可能对外做功,系统也就没有焓。系统偏离寂态的程度越大,焓值也越大。

系统偏离寂态就是系统与环境不平衡。系统之间的平衡与否由强度量描述,不平衡就意味着存在强度量差。在热力学中系统与外界的不平衡体现在3个方面:一是力学不平衡,表现为压强差;二是热学不平衡,表现为温度差;三是化学不平衡,表现为化学势差<sup>[8]</sup>。因此我们认为,系统具有焓的根本原因是,系统与环境之间存在着强度量差。系统可以在强度量差的推动下自发地变化到寂态,在这样的过程中可以对外界做功。如果系统与环境之间存在着压强差,系统可以自发膨胀(或收缩)对外做体积功;如果系统与环境之间存在着温度差,系统可以自发地放热(或吸热)对外做热功;如果系统与环境之间存在着化学势差,系统可以自发地发生化学反应(或扩散)对外做化学功。

基于对焓物理本质的认识,在能量公设的基础上文献[9~12]提出,系统的总焓等于各种具体形式焓的和;系统在任意状态的焓等于焓的微分在该状态与寂态之间的积分;任何形式焓的微分都可以表示成基本强度量与其寂态值的差乘以与之共轭的基本广延量的微分。因此系统的总焓  $E$  及各种具体形式的焓  $E_i$  可以普遍地表示为:

$$E = \sum E_i, E_i = \int dE_i, dE_i = (X_i - X_{i,0})dx_i \quad (9)$$

这就是焓的普遍化表达式。与能量的普遍化表达式(2)相同,式(9)与具体的积分过程无关。利用普遍化表达式(9)可以导出各种具体形式的焓,以及封闭系统总焓的常规计算式(8)和流动体系的焓  $E_i = H - H_0 - T_0(S - S_0)$ <sup>[9]</sup>。例如热焓可以由温度和熵表示为  $dE_h = (T - T_0)dS$ , 利用关系式  $dS = Q/T$  在等温过程中可积分得  $\Delta E_h = (1 - T_0/T)Q$ 。

焓的普遍化表达式(9)完整地体现了焓的物理含义,即系统的焓决定于系统与环境之间的强度量差。当系统与环境平衡时  $X_i = X_{i,0}$ , 系统就没有变化的动力,系统的焓等于零;系统偏离环境的程度  $(X_i - X_{i,0})$  越大,动力也越大,系统的焓值也越大。利用焓的普遍化表达式(9)可以导出焓的所有基本特征<sup>[13]</sup>。

#### 5 热力学 损失的普遍化表达式

当系统与环境之间存在着强度量差时,系统与

环境之间就可能自发地发生热力学过程。尽管系统在这样的过程中具有对外做功的能力,但是当系统在毫无控制的情况下达到寂态时,这样的做功能力就会被浪费掉,也就是系统原来所具有的焓被损失掉。系统的焓损失与多种因素有关,利用能量和焓的普遍化表达式可以导出焓损失的普遍化表达式。

设图1所表示的复合系统是一个孤立系统,不对外做功  $W_c=0$ 。在任意变化过程中孤立系统的总能量守恒,对系统中各种形式的能量求和就是系统的总能量,利用能量的普遍化表达式(2),可以将能量守恒定律表示为:

$$\sum X_i dx_i = 0 \quad (10)$$

虽然系统的任意过程一定有能量守恒,但系统的焓不一定守恒。如果过程是不可逆的,系统中的总焓必定减少。在不对外做功的情况下,系统焓的减少量就是过程中的焓损失。对系统中各种形式的焓求和就是系统的总焓,将能量守恒定律式(10)代入焓的普遍化表达式(9)得:

$$E_d = -\Delta E = \sum X_{i,0} \Delta x_i \quad (11)$$

这就是焓损失的普遍化表达式,它的物理意义是系统额外对环境做的各种广义功,因这部分功不能被利用而造成焓的损失。式(11)中的  $X_{i,0}$  表示环境的温度、压强或化学势。例如过程中出现熵增时,由式(11)可得  $E_d = T_0 \Delta S$ , 这就是 Gouy-Stodola 方程。

## 6 结 论

功是在力的作用下传递的能量,在热力学中被推广到其它形式的广义功,热是在温度作用下传递的能量。做功和传热是能量传递和转换的两种方式,能量是系统具有的做功或传热的能力。从热力学第一定律的角度定义的能量只具有相对的意义,也就是说只有能量的差值才有物理意义。焓和能是能位函数相对于不同参考态的差值,不能说焓是能中可以被利用的部分。

任何现实的用能过程离不开环境的约束。系统与环境相平衡的状态称为系统的寂态,焓就是系统从某一给定的状态达到寂态时,理论上可以获得的最大有用功。传统的导出焓计算式的基本思想是,可以获得的最大有用功等于系统减少的能量减去系统对环境做的功和传的热。

从动力学角度分析,系统可能对外做功是因为

系统有自动变化的可能性。如果系统之间存在着某种形式的不平衡,当它们发生作用时就可能自动地达到平衡,在这样的自发过程中就可能对外界做功。当系统偏离寂态时,系统与环境之间就存在着强度量差,在强度量差的推动下系统可以自动地达到寂态并对外做功,焓就是这种做最大有用功的能力。这就是焓的物理本质,系统偏离环境的程度越大,作为推动力的强度量差也越大,系统的焓值也越大。焓的微分被普遍地定义为强度量差与广延量微分的乘积,焓的普遍化表达式既体现了能量公设的思想,又包括了焓的动力学特征。

利用能量和焓的普遍化表达式导出了焓损失的普遍化表达式,即焓损失等于环境的强度量与复合系统广延量增量的乘积。

## 参考文献:

- [1] 华 贵. 工艺过程用能分析与综合[M]. 北京: 中国石化出版社 1995.
- [2] 王松平, 华 贵. 寂态热力学发展的新趋势[J]. 自然杂志, 1998, 20(2): 79-81.
- [3] 项新耀(英文版). 热力学中的焓及焓传递[J]. 华北电力大学学报 2004, 31(6): 10-13.
- [4] 朱元海, 陈慧娟, 罗洪君 等. 焓概念与其表达式的热力学一致性研究[J]. 化学工程, 2006 34(7): 34-37.
- [5] MORAN M J, SHAPIRO H N. Fundamentals of engineering thermodynamics[M]. (5th Edition). New York: Wiley, 2004.
- [6] HALLIDAY D, RESNICK R, WALKER J. Fundamentals of physics [M]. (8th Edition). New York: Wiley, 2007.
- [7] 韩光泽, 华 贵, 陈清林, 等. 能量的普遍化表达式与能态公设[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(7): 48-50.
- [8] 李 琰, 韩光泽, 郭平生. 化学势的特征及其普遍化表达式[J]. 广西师范大学学报, 2006, 24(3): 17-21.
- [9] 韩光泽, 华 贵, 陈清林, 等. 热力学中焓的普遍化表达式[J]. 中国科学(A 辑), 2001, 31(10): 934-938.
- [10] HAN GUANGZE, HUA BEN, CHEN QINGLIN, et al. Generalized expression of exergy in the thermodynamics[J]. Science in China (Series A), 2002, 45(1): 70-75.
- [11] HAN GUANGZE, HUA BEN. Energy postulate and generalized expressions of energy and exergy // Edited by Rivero R. Energy-Efficient, Cost-Effective and Environmentally-Sustainable Systems and Processes (Proceedings of ECOS2004)[C]. Guarajato, 2004. 753-760.
- [12] HAN GUANGZE, HUA BEN. Transfer and conversion postulate and generalized transfer and conversion equations of energy and exergy // Edited by Alberto Mirandola. Proceedings of ECOS2007[C]. Padova, 2007. 389-396.
- [13] 韩光泽, 魏奇业, 郭平生, 等. 焓函数的几个重要特性[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(5): 43-46.

(编辑 辉)

increase of inlet temperature ratio  $\alpha$ . The increase of preheat temperature ratio  $\beta$  to a value greater than a critical one can decrease the value  $N_s$ . The number of heat transfer units NTU should be greater than 1. On account of cost-effectiveness, this value should not be excessively large. The non-equilibrium flow representing water equivalent ratio  $W$  being less than 1 is a major cause leading to a loss of effective energy, therefore efforts shall be made to enable  $W$  tend to be 1. The value  $\epsilon$  should be greater than 0.5 and tend to be 1, thus reducing the irreversibility and enhancing the heat exchange rate. Through an analysis of the entropy production, the cause of energy consumption in a heat exchanger can be revealed and an optimized matching of thermodynamic parameters identified, thereby attaining the energy-saving objective. **Key words:** heat exchanger, thermodynamic parameters, entropy production analysis, thermodynamic performance evaluation

椭圆形封头大开孔结构强度分析= **Structural Strength Analysis of an Elliptic Head with a Large Opening** [刊, 汉] / XU Yan, LIANG Hai-dong, ZHANG Zhong-lian (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), ZHENG Hong-tao (College of Power and Energy Source under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 404 ~ 408

In the light of the structural features and operating conditions of elliptic heads, by employing a finite-element analysis method, a calculation and analysis has been performed of the stress distribution on an elliptic head structure with a large opening. Measurements of static stress and experimental verification analyses have also been undertaken on a reduced-scale simulation test piece. The calculation and test results show that the dangerous part of the structure is located at the inner top side of the connected portion between the thin-walled large nozzle and the head, which can be taken as the design main control point. The stresses in the external-side high stress zone calculated by using the finite element method correspond with the actually measured stress results with an error of only 0.7% being recorded. A slightly bigger error exists between the calculated and actually measured values in the welding seams and the inner surface but it does not exceed 11.3%. This shows that the use of the three-dimensional finite-element analytic method to resolve the structural design of heads with a large opening is feasible and reliable. The analysis of causes leading to a relatively great error can serve as a helpful reference for the design, manufacture and tests of real products. **Key words:** finite element, large opening, head, stress distribution, stress evaluation

热力学焓及其普遍化表达式的动力学特征= **Thermodynamic Exergy and Dynamic Characteristics of its Generalized Expressions** [刊, 汉] / HAN Guang-ze, LI Shao-xin (College of Physical Science and Technology under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640), GUO Ping-sheng (College of Physics and Electronics Engineering under the Guangxi Normal University, Guilin, China, Post Code: 541004), HUA Ben (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy-saving of the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 409 ~ 413

Analyzed were the physical meaning of work, heat, energy and exergy as well as their relations with thermodynamic laws. Doing work and transferring heat are the two ways for transferring and converting energy and exergy. The energy defined from the first law of thermodynamics has only a relative meaning. Exergy represents the ability of a system to do maximal useful work with respect to an environment. Relative to a specified environment, exergy is the status parameter of a system. The conventional calculation formula of exergy is derived from the first and second law of thermodynamics. From the viewpoint of dynamics discussed was the physical meaning of exergy and its generalized expression. The exergy originates from the non-equilibrium of a system with its environment. If any (or several kinds of) intensive property difference exists between a system and its environment, then under the driving force of such an intensive property difference, the system may automatically change to a state featuring a balance with its environment (dead state). During this process, the system can do work to the outside world and such an ability to do maximal useful work is defined as the exergy of the system. On the basis of energy postulation, the differential of exergy is generally expressed as a product of the intensive property difference and the differential of its conjugated extensive variables. The generalized expressions of exergy can fully reflect the physical meaning and dynamic characteristics of exergy. By employing the generalized expressions of energy and exergy, derived was the generalized expression of exergy losses. **Key words:** energy postulation, thermodynamic law, thermodynamic effective energy, intensive property, generalized expression of exergy