

等温节流过程积耗散最小化*

夏少军¹⁾²⁾³⁾ 陈林根^{1)2)3)†} 戈延林¹⁾²⁾³⁾ 孙丰瑞¹⁾²⁾³⁾

1) (海军工程大学热科学与动力工程研究室, 武汉 430033)

2) (海军工程大学舰船动力工程军队重点实验室, 武汉 430033)

3) (海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033)

(2013年5月4日收到; 2013年6月18日收到修改稿)

对一类普适传质规律等温节流过程进行了研究, 应用最优控制理论导出对应于过程质量积耗散最小时最优性条件, 然后基于普适优化结果导出了传质规律 $[g \propto (\Delta p)^m]$ 和线性传质规律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 等各种特例下的优化结果, 并与熵产生最小、压力之比为常数和压力之差为常数等各种传质策略下的结果进行了比较, 给出了 $[g \propto (\Delta p)^{1/2}]$, $[g \propto \Delta(p)]$ 和 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 等各种特例下的数值算例. 本文的研究结果对于实际节流过程和设备的最佳设计与运行具有一定的理论指导意义.

关键词: 等温节流, 质量积耗散, 最优控制, 有限时间热力学

PACS: 02.30.Yy, 05.70.Ce, 45.10.Db, 47.27.nf

DOI: 10.7498/aps.62.180202

1 引言

自 20 世纪 70 年代中期以来, 以寻求热力过程的性能界限、达到热力学优化为目标的有限时间热力学或“熵产生最小化”理论在物理学和工程学领域均取得了重要进展^[1-14]. Bejan^[15] 首先提出用熵产生最小原理对换热器流道长度等结构尺寸进行了热优化. 一些学者研究了牛顿传热定律下换热过程熵产生最优路径^[16-18], 并进一步研究了传热规律的影响^[19-22]. Tsirlin 等^[23] 研究了以熵产生最小为目标优化了单向等温传质过程. Gordon 等^[24] 以熵产生最小为目标导出了液-固相变过程的外界热源温度随时间的最优变化规律. Santoro 等^[25] 导出了对应于气-液相变过程最小耗时外界压力变化最优时间路径. Mironova^[26] 和 Bi 等^[27] 以熵产生最小为目标优化了结晶过程最优路径. 节流过程在热力设备中常用于压力调节、流量条件或测量等方面. Berry 等^[5], Tsirlin^[28-32] 和 Mironova 等^[33] 以熵产生最小为目标优化了节流过程最优路径.

基于导热过程与导电过程的相似性, Guo

等^[34,35] 从传热学角度提出了新的物理量“焓”, 并提出了传热优化的“焓耗散极值原理”和最小热阻原理. 自焓和焓耗散极值原理提出以来, 一些学者从不同角度阐述其物理机理^[36-41], 将其应用于热传导^[42-50]、热对流^[51-57]、热辐射^[58-61]、液固相变过程^[62]、换热器^[63-70]和热力循环^[71,72]等各种过程与装置的强化和优化, 结果表明熵产生极值适用于热功转换过程, 而对于不涉及热功转换的过程优化原则应取焓耗散极值. 有关焓理论研究的最新进展较为全面的介绍可参见最近发表的综述^[73,74].

基于质量传递与热量传递现象之间的类比性, 李志信和过增元^[57]、Chen 等^[75-77] 定义了描述混合物中组分传质能力的质量积, 并提出了传质优化的质量积耗散极值原理和最小质阻原理, 对光催化氧化反应器^[57,75]、空间站通风排污^[57,76,77]等过程进行了优化. 针对空调工程中的湿空气处理过程, 江亿等^[78,79] 类比湿热焓的定义, 从传湿能力的角度定义了湿焓, 并对主动式空调系统中的换热网络的匹配特性进行了分析^[80,81]. Chen 等^[82] 则提出了溶液除湿性能分析与优化的湿阻法. Chen 等

* 国家自然科学基金(批准号: 51176203, 10905093)和海军工程大学博士生创新基金(批准号: HGBSJJ-2011002)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lingenchen@hotmail.com; lgchenna@yahoo.com

[83,84]、Yuan 和 Chen^[85,86] 应用湿阻法对蒸发冷却除湿过程进行了优化. Xia 等^[87,88] 以积耗散最小为目标优化了单向等温传质过程的最优路径^[87], 并研究了传质规律的影响^[88]. 程雪涛等^[89,90] 提出了广义积和孤立系统广义积减原理, 并在只有一种广义流动和存在两种广义流动的系统, 研究了在该类系统中可以发展广义积原理的条件, 并在满足相应条件的系统中得到了广义积损失极值原理、广义积耗散极值原理和最小广义流阻原理. 有关质量积理论研究的最新进展较为全面的介绍可参见最近发表的综述^[91].

在文献 [5, 28—33, 58, 78—88] 的基础上, 本文对一类普适传质规律下的节流过程进行研究, 并将优化结果与熵产生最小、压比一定和压差一定的传质策略相比较.

2 物理模型

节流是指当气体在管道中流动时, 由于局部阻力, 如遇到缩口和调节阀门时, 其压力显著下降的一种特殊流动过程, 这种现象叫做节流或焦耳-汤姆孙效应^[88]. 绝热节流过程中, 在缩孔附近由于流速增加, 比焓下降, 流体在通过缩孔时动能增加, 压力下降, 产生强烈的扰动和摩擦, 使增加的动能转变为热能又为流体所吸收. 因此流体在绝热节流前的比焓等于绝热节流后的比焓. 但由于扰动和摩擦的不可逆性, 节流后的压力不能回到与节流前一样, 因此绝热节流是不可逆的过程. 流体在孔口附近发生强烈的扰动及涡流, 处于极度不平衡状态, 如图 1 所示, 故不能用平衡热力学方法分析孔口附近的状况. 但在距孔口较远的地方, 如图 1 中截面 1-1 和 2-2, 流体仍处于平衡状态, 可采用平衡热力学方法分析, 图中 v_1 和 v_2 为流体在相应截面上的速度. 绝热节流前后流体 (流体、气体) 的温度变化称为节流的温度效应, 可以用绝热节流系数或焦耳-汤姆孙系数 μ_J 表征, 其物理意义为下降单位压力时温度变化值, 具体如下:

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right] / c_p, \quad (1)$$

$\mu_J > 0$, 节流后流体的温度降低称为节流冷效应; $\mu_J < 0$, 节流后流体的温度升高称为节流热效应; $\mu_J = 0$, 节流后流体的温度相等称为节流零效应. 对于理想气体, 因 $T(\partial v / \partial T)_p = v$, 故绝热节流恒为

节流零效应. 考虑一个等温气体膨胀过程, 压力由 p_1 降低到 p_2 , 膨胀率与前后压力差有关.

令气体节流过程流率为 $g(p_1, p_2)$, 根据文献 [58, 78—91] 可得节流过程的积耗散 ΔE 为

$$\Delta E = \int_0^\tau g(p_1, p_2)(p_1 - p_2) dt, \quad (2)$$

这里忽略过程与环境换热造成的影响. 类比于传热中的热阻定义式 $R_E = \Delta E / Q^2$, 若通过节流阀的总时间 τ 和总传质量 G 均一定, 由 (2) 式可进一步得基于积耗散 ΔE 的质阻 R_E 为^[58,78—91]

$$R_E = \frac{\Delta E}{G^2} = \frac{\int_0^\tau g(p_1, p_2)(p_1 - p_2) dt}{G^2}. \quad (3)$$

由 (3) 式可见, 在传质量一定的条件下, 最小质阻优化等价于最小积耗散优化. 假定气体离开的腔室总体积 V_1 一定, 则有气体节流过程腔室压力变化的控制方程为

$$\dot{p}_1 = -\frac{RT}{V_1} g(p_1, p_2), \quad p_1(0) = p_{10}, \quad (4)$$

式中 R 为普适气体常数, T 为气体所处温度, 节流过程的总质量 G 一定, 可得

$$\int_0^\tau g(p_1, p_2) dt = G. \quad (5)$$

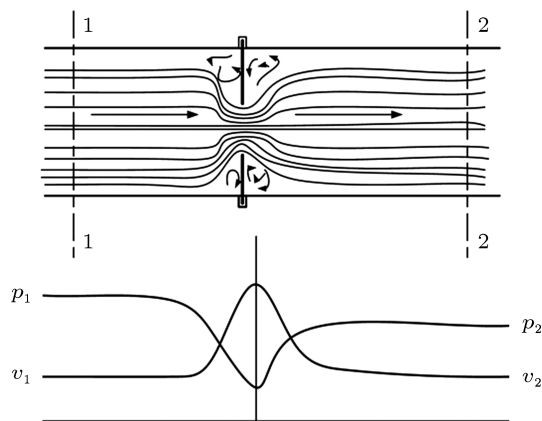


图 1 节流过程模型

3 优化过程

若 p_2 为优化问题的控制变量, 由 (4) 式可进一步得:

$$dt = -\frac{V_1}{RTg(p_1, p_2)} dp_1. \quad (6)$$

令 $p_{1\tau} = p_1(\tau)$, 将 (6) 式代入 (2), (4) 和 (5) 式可分别得:

$$\Delta E = -\frac{V_1}{RT} \int_{p_{10}}^{p_{1\tau}} (p_1 - p_2) dp_1, \quad (7)$$

$$-\int_{p_{10}}^{p_{1\tau}} \frac{V_1}{RTg(p_1, p_2)} dp_1 = \tau, \quad (8)$$

$$p_{1\tau} = p_{10} - \frac{GRT}{V_1}. \quad (9)$$

现在的问题为在 (8) 式的约束条件下求 (7) 式的最小值, 建立变更的拉格朗日函数 L 如下:

$$L = -\frac{V_1}{RT}(p_1 - p_2) - \lambda \frac{V_1}{RTg(p_1, p_2)}, \quad (10)$$

式中 λ 为待定拉格朗日常数. 由极值条件 $\partial L / \partial p_2 = 0$ 可得

$$1 + \frac{\lambda}{g^2(p_1, p_2)} \frac{\partial g}{\partial p_2} = 0. \quad (11)$$

4 其他传质策略

而除了积耗散最小 ($\Delta E = \min$) 的传质策略、熵产生最小 ($\Delta S = \min$) 的传质策略外, 实际传质过程还可能存在着压力之差 ($p_1 - p_2 = \text{const}$) 为常数和压力之比 ($p_1/p_2 = \text{const}$) 为常数的传质策略.

4.1 熵产生最小

由文献 [5, 28—33] 可知, 节流过程熵产生为

$$\Delta S = \int_0^\tau g(p_1, p_2) R \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) dt, \quad (12)$$

其对应的最优性条件为

$$\frac{\partial g(p_1, p_2)}{\partial p_2} = -a_1 \frac{g^2(p_1, p_2)}{p_2}, \quad (13)$$

式中 a_1 为积分常数.

4.2 压力之比为常数

当节流过程压力之比为常数, 则有

$$p_1/p_2 = a_2, \quad (14)$$

式中 a_2 为常数. 令 $p_2(0) = p_{20}$ 和 $p_2(\tau) = p_{2\tau}$, 将 (14) 式代入 (4) 式可得

$$\int_{p_{20}}^{p_{2\tau}} \frac{1}{g(p_2)} dp_2 = \frac{-RT\tau}{a_2 V_1}. \quad (15)$$

由 (15) 式可确定待定常数 a_2 和压力 $p_2(t)$ 随时间的变化路径.

4.3 压力之差为常数

当节流过程压力之差为常数, 则有

$$p_1 - p_2 = a_3, \quad (16)$$

式中 a_3 为常数. 将 (16) 式代入 (4) 式可得

$$\int_{p_{20}}^{p_{2\tau}} \frac{1}{g(p_2)} dp_2 = \frac{-RT\tau}{V_1}. \quad (17)$$

5 特例分析与讨论

以下将分传质规律 [$g \propto (\Delta p)^m$] 和线性传质规律 [$g \propto \Delta(\mu)$] 两种情形分别讨论. 对于传质规律 [$g \propto (\Delta p)^m$], 当 $m = 1/2$ 时, 主要是基于流体力学中的伯努利方程, 压力损失与六流率的平方成正比; 当 $m = 1$ 时, 主要是基于反映水在岩土孔隙中渗流规律的实验定律达西定律 (Darcy's law); 对于线性传质规律 [$g \propto \Delta(\mu)$], 主要是基于线性不可逆热力学中常常假定质流 g 是以化学势之差 $\Delta(\mu)$ 为驱动力 [93].

5.1 传质规律 [$g \propto (\Delta p)^m$] 下的优化结果

当结晶过程服从传质规律 [$g \propto (\Delta p)^m$] 时, 即有

$$g(p_1, p_2) = k(p_1 - p_2)^m, \quad (18)$$

式中 k 为传质系数, 将其代入 (11) 式可得:

$$p_1 - p_2 = \left(-\frac{kR}{m\lambda} \right)^{1/(m+1)}. \quad (19)$$

由 (19) 式可见, 对应于传质规律 [$g \propto (\Delta p)^m$] 下节流过程积耗散最小时压力差为常数, 也即过程的质量流率为常数. 由 (5) 式进一步得:

$$g(p_1, p_2) = G/\tau. \quad (20)$$

联立 (18) 式和 (20) 式可得:

$$p_1 - p_2 = \left(\frac{G}{k\tau} \right)^{1/m}. \quad (21)$$

由 (4) 式得压力 p_1 随时间 t 的最优变化规律为

$$p_1(t) = p_{10} - \frac{GRT}{V_1\tau} t. \quad (22)$$

将 (22) 式代入 (21) 式得

$$p_2(t) = p_{10} - \frac{GRT}{V_1\tau} t - \left(\frac{G}{k\tau} \right)^{1/m}. \quad (23)$$

将 (22) 和 (23) 式代入 (2) 式可得过程最小积耗散 ΔE_{\min} 为

$$\Delta E_{\min} = G^{(m+1)/m} / (k\tau)^{1/m}. \quad (24)$$

特别地, 当 $m = 1/2$ 时, (23) 和 (24) 式分别变为

$$p_2(t) = p_{10} - \frac{GRT}{V_1\tau} t - \left(\frac{G}{k\tau} \right)^2, \quad (25)$$

$$\Delta E_{\min} = G^3 / (k\tau)^2;$$

当 $m = 1$ 时, (23) 和 (24) 式分别变为

$$p_2(t) = p_{10} - \frac{GRT}{V_1\tau}t - \frac{G}{k\tau},$$

$$\Delta E_{\min} = G^2/(k\tau). \quad (26)$$

此时对于熵产生最小传质策略, 将 (18) 式代入 (13) 式得

$$p_1 = \left(\frac{mp_2}{a_1k}\right)^{1/(m+1)} + p_2. \quad (27)$$

将 (27) 式代入 (4) 式得

$$\int_{p_{20}}^{p_{2\tau}} \left\{ \left[\frac{1}{m+1} \left(\frac{m}{a_1k}\right)^{1/(m+1)} p_2^{-m/(m+1)} + 1 \right] / \left(\frac{mp_2}{a_1k}\right)^{m/(m+1)} \right\} dp_2 = -\frac{kRT\tau}{V_1}. \quad (28)$$

特别地, 当 $m = 1/2$ 时, (28) 式进一步变为

$$\frac{2}{3} \left(\frac{1}{2a_1k}\right)^{2/3} (p_{20}^{1/3} - p_{2\tau}^{1/3}) + \frac{1}{2} (p_{20}^{2/3} - p_{2\tau}^{2/3}) = \frac{kRT\tau}{3V_1} \left(\frac{1}{2a_1k}\right)^{1/3}. \quad (29)$$

联立 (27) 和 (29) 式可解得传质规律 $[g \propto (\Delta p)^{1/2}]$ 下压力 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 随时间的最优变化规律. 当 $m = 1$ 时, (28) 式进一步变为

$$\frac{p_{20}^2 - p_{2\tau}^2}{4} + 2 \left(\frac{1}{a_1k}\right)^{1/2} (p_{20}^{1/2} - p_{2\tau}^{1/2}) = \frac{kRT\tau}{V_1}. \quad (30)$$

联立 (27) 和 (29) 式可解得传质规律 $[g \propto (\Delta p)]$ 下压力 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 随时间的最优变化规律.

对于压力之比为常数, 将 (18) 式代入 (15) 式中可得

$$p_{2\tau}^{1-m} - p_{20}^{1-m} = \frac{-kRT\tau(a_2-1)^m(1-m)}{a_2V_1}. \quad (31)$$

特别地, 当 $m = 1/2$ 时, 由 (31) 式可解得 a_2 为

$$a_2 = 1 / \left\{ 1 - \left[\frac{2(p_{20}^{1/2} - p_{2\tau}^{1/2})V_1}{kRT\tau} \right]^2 \right\}, \quad (32)$$

由此可得压力 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 随时间的变化规律分别为

$$p_1(t) = \frac{[p_{20}^{1/2} + (p_{2\tau}^{1/2} - p_{20}^{1/2})t/\tau]^2}{\left\{ 1 - \left[\frac{2(p_{20}^{1/2} - p_{2\tau}^{1/2})V_1}{kRT\tau} \right]^2 \right\}}, \quad (33)$$

$$p_2(t) = [p_{20}^{1/2} + (p_{2\tau}^{1/2} - p_{20}^{1/2})t/\tau]^2. \quad (34)$$

已知边界条件 $p_1(0) = p_{10}$ 和 $p_1(\tau) = p_{1\tau}$, 由 (33) 和 (34) 式可得 $p_1(t)$ 和 $p_2(\tau)$ 随时间的变化具体规律, 将其代入 (2) 和 (12) 式可得相应过程的积耗散 $\Delta E_{p_1/p_2=\text{const}}$ 和熵产生 $\Delta S_{p_1/p_2=\text{const}}$.

当 $m = 1$ 时, 由 (31) 式可解得 a_2 为

$$a_2 = 1 / [1 - V_1 \ln(p_{20}/p_{2\tau}) / (kRT\tau)]. \quad (35)$$

由此可得压力 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 随时间的变化规律分别为

$$p_1(t) = \frac{p_{20}(p_{2\tau}/p_{20})^{t/\tau}}{[1 - V_1 \ln(p_{20}/p_{2\tau}) / (kRT\tau)]}, \quad (36)$$

$$p_2(t) = p_{20}(p_{2\tau}/p_{20})^{t/\tau}. \quad (37)$$

同样地, 已知边界条件 $p_1(0) = p_{10}$ 和 $p_1(\tau) = p_{1\tau}$, 由 (36) 和 (37) 式可得 $p_1(t)$ 和 $p_2(\tau)$ 随时间的变化具体规律, 将其代入 (2) 和 (12) 式可得相应过程的积耗散 $\Delta E_{p_1/p_2=\text{const}}$ 和熵产生 $\Delta S_{p_1/p_2=\text{const}}$.

5.2 传质规律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下的优化结果

当结晶过程服从线性不可逆热力学中的线性传质规律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ [93] 时, 即有

$$g = k(\mu_1 - \mu_2) = kRT \ln(p_1/p_2). \quad (38)$$

将 (38) 式代入 (11) 式可得:

$$\frac{\lambda}{p_2 kRT [\ln(p_1/p_2)]^2} = 1. \quad (39)$$

由 (39) 式得:

$$p_1 = p_2 \exp \left(\sqrt{\frac{\lambda}{kRT p_2}} \right). \quad (40)$$

将 (40) 式代入 (4) 式可得

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{\frac{RT}{V_1} \sqrt{\frac{\lambda kRT}{p_2}}}{\left(1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{kRT p_2}} \right) \exp \left(\sqrt{\frac{\lambda}{kRT p_2}} \right)}, \quad (41)$$

(41) 式不存在解析解, 只能采用数值方法计算, 联立 (39) 和 (41) 式可解得 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 随时间 t 的最优路径, 将其代入 (2) 和 (12) 式进行数值积分可分别得最小积耗散 ΔE_{\min} 和熵产生 $\Delta S_{\Delta E=\min}$.

对于熵产生最小传质策略, 将 (38) 式代入 (13) 式得

$$g(p_1, p_2) = \sqrt{RT/a_1}, \quad (42)$$

由 (42) 式可见, 线性传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下熵产生最小时质流率 $g(p_1, p_2)$ 为常数, 与压力之比为常数的传质策略相一致. 由 (4) 式得压力 $p_1(t)$ 随时间 t 的最优变化规律为

$$p_1(t) = p_{10} + (p_{1\tau} - p_{10})t/\tau, \quad (43)$$

进一步可得积分常数 a_1 为

$$a_1 = (RT)^3 \tau^2 / [(p_{10} - p_{1\tau})^2 V_1^2]. \quad (44)$$

联立 (42)—(44) 式可得压力 $p_2(t)$ 随时间 t 的最优变化规律为

$$p_2(t) = [p_{10} + (p_{1\tau} - p_{10})t/\tau] \times \exp\{[(p_{1\tau} - p_{10})V_1]/kR^2T^2\tau\}. \quad (45)$$

将 (43) 和 (45) 式代入 (2) 式可得相应过程的积耗散 $\Delta E_{\Delta S=\min}$ 为

$$\Delta E_{\Delta S=\min} = \frac{(p_{10}^2 - p_{1\tau}^2)V_1}{2RT} \left\{ 1 - \exp\left[\frac{(p_{1\tau} - p_{10})V_1}{kR^2T^2\tau}\right] \right\}. \quad (46)$$

将 (43) 和 (45) 式代入 (12) 式可得相应过程的最小熵产生 ΔS_{\min} 为

$$\Delta S_{\min} = \frac{[(p_{10} - p_{1\tau})V_1]^2}{kR^3T^3\tau}. \quad (47)$$

对于压力之差为常数, 此时将 (38) 式代入 (17) 式得不到解析解, 只能采用数值方法计算.

6 数值算例与讨论

假定高压气腔的封闭体积为 $V_1 = 1 \text{ m}^3$, 温度为 $T = 298.13 \text{ K}$, 普适气体常数为 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, 封闭腔初始压力为 $p_{10} = 1.5 \times 10^6 \text{ Pa}$, 末态压力为 $p_{1\tau} = 3 \times 10^5 \text{ Pa}$, 传质过程时间 $\tau = 30 \text{ s}$, 则有过程的传质量为 $G = (p_{10} - p_{1\tau})V_1/(RT) = 484.1 \text{ mol}$. 下面将分别给出 $[g \propto (\Delta p)^{1/2}]$, $[g \propto (\Delta p)]$ 和 $[g \propto (\Delta \mu)]$ 等三种特殊传质定律下的积耗散最小 ($\Delta E = \min$) 优化结果, 并分别与熵产生最小 ($\Delta S = \min$)、压力之差为常数 ($p_1 - p_2 = \text{const}$) 和压力之比为常数 ($p_1/p_2 = \text{const}$) 等传质策略相比较, 最后将各种传质规律下的优化结果进行比较.

表 1 各种传质策略下节流过程关键参数的计算结果

情形	传质规律 $[g \propto (\Delta p)^{1/2}]$ 下的优化结果			
	$p_{20}/10^5 \text{ Pa}$	$p_{2\tau}/10^5 \text{ Pa}$	$\Delta S/10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	$\Delta E/10^7 \text{ mol}\cdot\text{Pa}$
$\Delta E = \min$	13.002	1.0016	1.3349	9.6747
$\Delta S = \min$	11.832	2.0239	1.1657	10.4342
$p_1/p_2 = \text{const}$	11.179	2.2360	1.1841	11.1093
情形	传质规律 $[g \propto (\Delta p)]$ 下的优化结果			
	$p_{20}/10^5 \text{ Pa}$	$p_{2\tau}/10^5 \text{ Pa}$	$\Delta S/10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	$\Delta E/10^7 \text{ mol}\cdot\text{Pa}$
$\Delta E = \min$	12.998	0.9978	1.3383	9.6934
$\Delta S = \min$	12.092	1.8594	1.1966	10.3393
$p_1/p_2 = \text{const}$	10.971	2.1940	1.2596	11.7152
情形	传质规律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下的优化结果			
	$p_{20}/10^5 \text{ Pa}$	$p_{2\tau}/10^5 \text{ Pa}$	$\Delta S/10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	$\Delta E/10^7 \text{ mol}\cdot\text{Pa}$
$\Delta E = \min$	12.471	1.8598	1.0838	9.3165
$\Delta S = \min$	11.666	2.3332	1.0118	9.6849
$p_1 - p_2 = \text{const}$	12.999	0.9992	1.3504	9.7245

6.1 传质定律 $[g \propto (\Delta p)^{1/2}]$ 下的数值算例

此时令传质系数为 $k = 3.61 \times 10^{-2} \text{ Pa}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$. 图 2 和图 3 分别为该传质定律下入口侧压力 p_1 和出口侧压力 p_2 随时间 t 的变化规律, 图 4 为该传质定律下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的变化规律, 由于 $\Delta E = \min$ 传质策略与 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 的传质策略相一致, 所以在图 2—4 中给出了 $\Delta E = \min$, $\Delta S = \min$ 和 $p_1/p_2 = \text{const}$ 等 3 种不同传质策略. 表 1 给出了各种传质策略下节流过程关键参数的计算结果. 由

图 2 和图 3 可见, $\Delta E = \min$ 传质策略下压力 p_1 和 p_2 随时间 t 呈线性规律递减, $\Delta S = \min$ 和 $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下压力 p_1 和 p_2 随时间 t 呈非线性规律递减. 由图 4 可见, $\Delta E = \min$ 传质策略下过程积耗散率 dE/dt 随时间 t 保持为常数, $\Delta S = \min$ 和 $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的增加而减少. 由表 1 可见, 当以熵产生最小为优化目标时, $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下熵产要小于 $\Delta E = \min$ 传质策略下熵产, 即 $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略要优于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略, 由不可

逆热力学理论可知, 传质过程的质流 g 是以化学势之差 $\Delta(\mu)$ 为驱动力的, 特别是在线性不可逆热力学中常常假定等温传质过程服从线性传质定律 [$g \propto \Delta(\mu)$], 所以传质过程质流 g 与化学势之差 $\Delta\mu$ 等于传质过程的熵产 ΔS 乘以过程温度 T , 如 (12) 式所示, 同时计算结果表明 $\Delta\mu = \text{const}$ 传质策略的熵产要小于 $\Delta p = \text{const}$ 传质策略下的熵产, 这正反映了以熵表征的传质过程是以化学势之差为驱动力推动质流的这种本质特征; 当以积耗散最小为优化目标时, $\Delta E = \text{min}$ 传质策略下的积耗散要小于 $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下的积耗散, 这表明 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略要优于 $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略, 这充分反映了以积表征的传质过程是以压力之差为驱动力推动质流地这种本质特征.

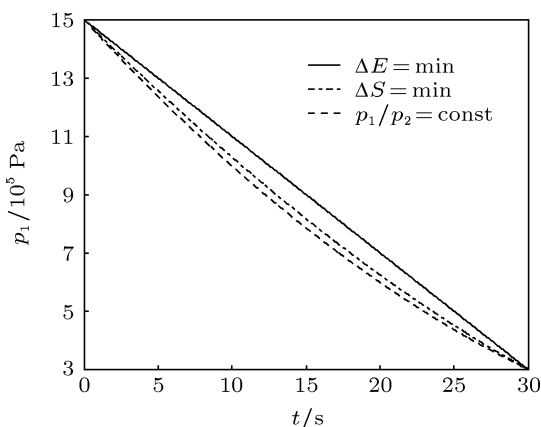


图2 传质定律 [$g \propto (\Delta p)^{1/2}$] 下入口侧压力 p_1 随时间 t 的变化规律

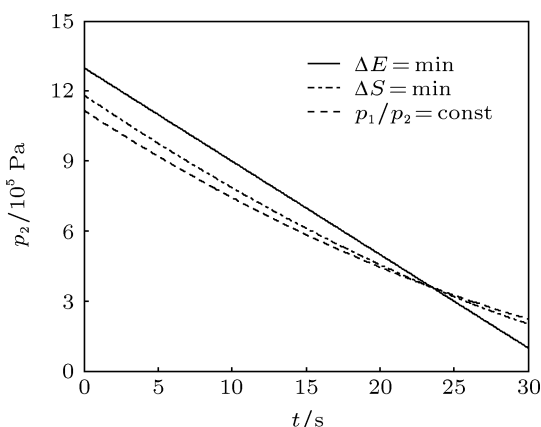


图3 传质定律 [$g \propto (\Delta p)^{1/2}$] 下出口侧压力 p_2 随时间 t 的变化规律

6.2 传质定律 [$g \propto \Delta(p)$] 下的数值算例

此时令传质系数为 $k = 8.07 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$. 图

5 和图 6 分别为该传质定律下入口侧压力 p_1 和出口侧压力 p_2 随时间 t 的变化规律, 图 7 为该传质定律下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的变化规律. 由图 5 和图 6 可见, $\Delta E = \text{min}$ 传质策略下压力 p_1 和 p_2 随时间 t 呈线性规律递减, $\Delta S = \text{min}$ 和 $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下压力 p_1 和 p_2 随时间 t 呈非线性规律递减. 由图 7 可见, $\Delta E = \text{min}$ 传质策略下过程积耗散率 dE/dt 随时间 t 保持为常数, $\Delta S = \text{min}$ 和 $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的增加而减少. 由表 1 可见, 当以熵产生最小为优化目标时, $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下熵产要小于 $\Delta E = \text{min}$ 传质策略下熵产, 即 $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略要优于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略; 当以积耗散最小为优化目标时, $\Delta E = \text{min}$ 传质策略下的积耗散要小于 $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下的积耗散, 这表明 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略要优于 $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略.

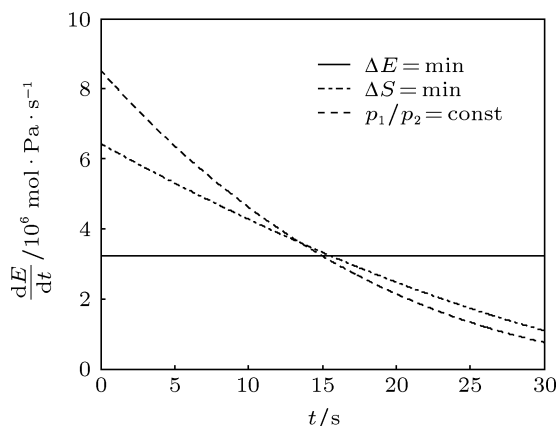


图4 传质定律 [$g \propto (\Delta p)^{1/2}$] 下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的变化规律

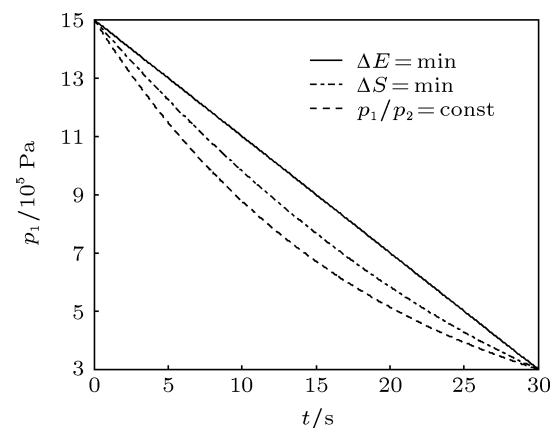


图5 传质定律 [$g \propto \Delta(p)$] 下入口侧压力 p_1 随时间 t 的变化规律

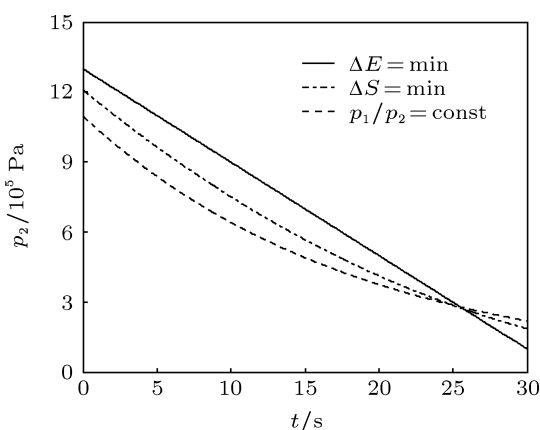


图6 传质定律 $[g \propto \Delta(p)]$ 下出口侧压力 p_2 随时间 t 的变化规律

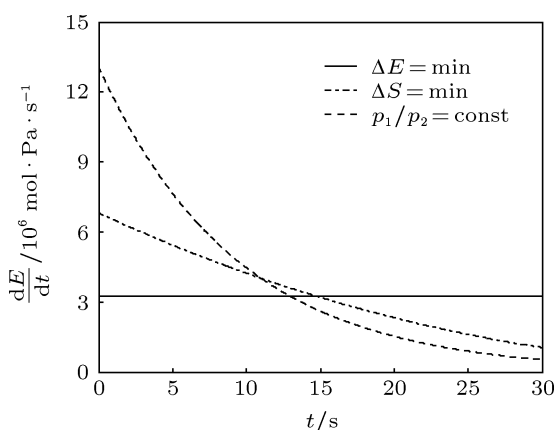


图7 传质定律 $[g \propto \Delta(p)]$ 下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的变化规律

6.3 传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下的数值算例

此时令传质系数为 $k = 2.59 \times 10^{-2} \text{ mol}^2/(\text{J}\cdot\text{s})$. 图8和图9分别为该传质定律下入口侧压力 p_1 和出口侧压力 p_2 随时间 t 的变化规律, 图10为该传质定律下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的变化规律. 由于 $\Delta S = \min$ 传质策略与 $p_1/p_2 = \text{const}$ 的传质策略相一致, 所以在图8—10中给出了 $\Delta E = \min$, $\Delta S = \min$ 和 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 等3种不同传质策略. 由图8和图9可见, $\Delta S = \min$ 传质策略下压力 p_1 和 p_2 随时间呈线性规律递减, $\Delta E = \min$ 和 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略下压力 p_1 和 p_2 随时间 t 呈非线性规律递减. 由图10可见, $\Delta S = \min$ 传质策略下过程积耗散率 dE/dt 随时间 t 的增加而减少; $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略下过程积耗散率

dE/dt 随着时间 t 的增加而增加; $\Delta E = \min$ 传质策略下过程积耗散率 dE/dt 随时间 t 的增加而略有增加, 相比前两种传质策略, $\Delta E = \min$ 传质策略下积耗散率 dE/dt 分布较为均匀, 其积耗散较小. 由表1可见, 当以熵产生最小为优化目标时, $\Delta S = \min$ 传质策略下熵产生要小于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略下熵产生, 也即 $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略要优于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略; 当以积耗散最小为优化目标时, $\Delta S = \min$ 传质策略下积耗散要小于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略下的积耗散, 也即 $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略要优于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略. 以上分析表明, 无论是以熵产生最小还是以积耗散最小为目标优化线性传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下节流过程, $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略均要优于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略, 也即等驱动力原则较为接近最优策略.

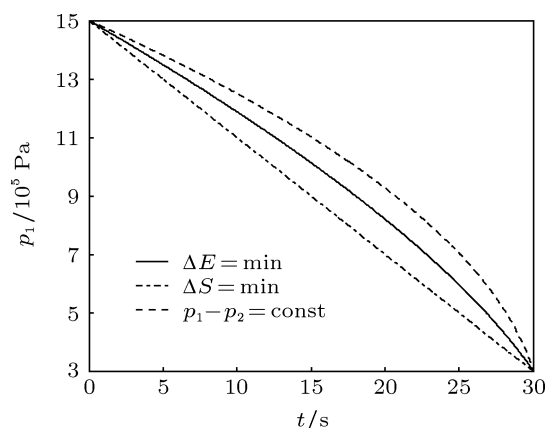


图8 传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下入口侧压力 p_1 随时间 t 的变化规律

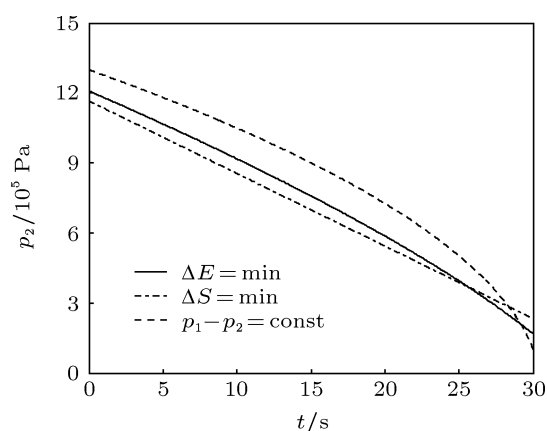


图9 传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下出口侧压力 p_2 随时间 t 的变化规律

6.4 各种传质规律下积耗散最小优化结果的比较

图 11 和 12 分别为各种传质规律下入口侧压力 p_1 与出口侧压力 p_2 随时间 t 的最优变化规律. 由图 11 和 12 可见, $g \propto (\Delta p)^{1/2}$ 和 $g \propto \Delta(p)$ 传质规律下压力 p_1 和 p_2 随时间 t 呈线性规律下降, $g \propto \Delta(\mu)$ 传质规律下压力 p_1 和 p_2 随时间 t 呈非线性规律下降. 由此可见, 不同传质定律下积耗散最小时压力 p_1 和 p_2 随时间 t 的最优变化规律明显不同. 差异产生的原因有两点: 一是两者的传质规律不同; 二是两者的传质系数的取值也不同. 这表明传质规律影响节流过程积耗散最小时传质过程压力随时间变化的最优路径.

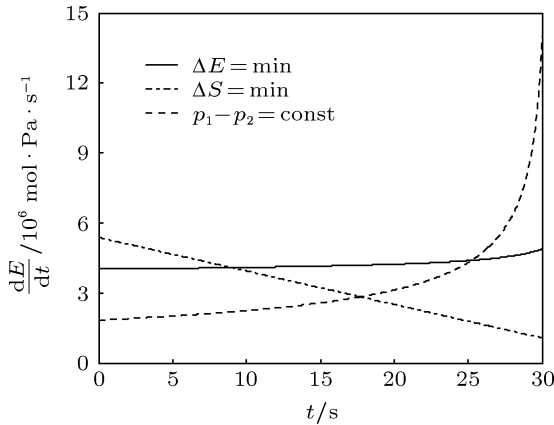


图 10 传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下积耗散率 dE/dt 随时间 t 的变化规律

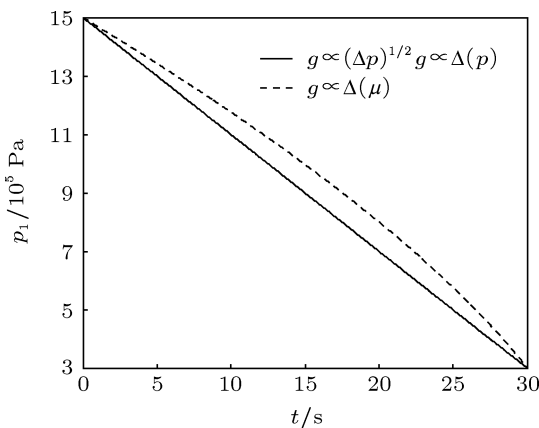


图 11 各种传质规律下入口侧压力 p_1 随时间 t 的最优变化规律

7 结论

在文献 [5, 28—33, 58, 78—91] 的基础上, 本文对一类普适传质规律等温节流过程进行了研究, 应

用最优化控制理论导出了对应于过程积耗散最小时最优性条件, 然后基于普适结果导出了传质规律 $[g \propto (\Delta p)^m]$ 和线性传质规律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 等各种特例下的优化结果. 给出了 $[g \propto (\Delta p)^{1/2}]$, $[g \propto \Delta(p)]$ 和 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 等各种特例下的数值算例, 并与熵产生最小、压力之比为常数和压力之差为常数等各种传质策略下的结果进行了比较.

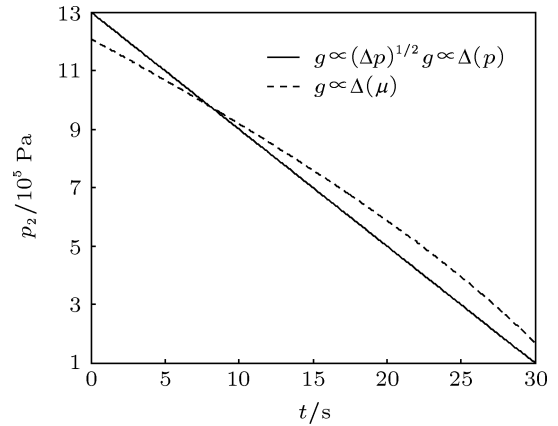


图 12 各种传质规律下出口侧压力 p_2 随时间 t 的最优变化规律

结果表明传质规律 $[g \propto (\Delta p)^m]$ 下节流过程积耗散最小时高、低压侧压力之差为常数, 熵产生最小优化结果与积耗散最小时优化结果存在显著不同, $\Delta\mu = \text{const}$ 传质策略的熵产要小于 $\Delta p = \text{const}$ 传质策略下的熵产, 这正反映了以熵表征的传质过程是以化学势之差为驱动力推动质流的这种本质特征; 当以积耗散最小为优化目标时, $\Delta E = \text{min}$ 传质策略下的积耗散要小于 $p_1/p_2 = \text{const}$ 传质策略下的积耗散, 这表明 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略要优于 $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略, 这充分反映了以积表征的传质过程是以压力之差为驱动力推动质流的这种本质特征; 线性传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下熵产生最小时高、低压侧压力之比为常数, 无论是以熵产生最小还是以积耗散最小为目标优化线性传质定律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下节流过程, $\mu_1 - \mu_2 = \text{const}$ 传质策略均要优于 $p_1 - p_2 = \text{const}$ 传质策略, 也即等驱动力原则较为接近最优策略; 传质规律影响节流过程的最小积耗散及相应的压力随时间变化的最优路径, 由于节流过程不涉及能量转换, 因此优化原则应为积耗散最小. 本文的研究结果对于实际节流过程最优设计与运行具有一定的理论指导意义.

审稿人对本文提出了细心、无私和充满建设性的意见, 在此致以诚挚的谢意!

- [1] Andresen B, Salamon P, Berry R S 1977 *J. Chem. Phys.* **66** 1571
- [2] Bejan A 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 1191
- [3] Bejan A 1996 *Entropy Generation Minimization* (Boca Raton FL: CRC Press)
- [4] Chen L, Wu C, Sun F 1999 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **22** 327
- [5] Berry R S, Kazakov V A, Sieniutycz S, Szwasz Z, Tsirlin A M 1999 *Thermodynamic Optimization of Finite Time Processes* (Chichester: Wiley)
- [6] Chen L G 2005 *Finite-Time Thermodynamic Analysis of Irreversible Processes and Cycles* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [陈林根 2005 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析 (北京: 高等教育出版社)]
- [7] He J Z, Wang L, Li J B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 24 (in Chinese) [何济洲, 王磊, 李俊彬 2005 物理学报 **54** 24]
- [8] Wu F, Chen L G, Sun F R, Yu J Y 2008 *Finite Time Thermodynamic Optimization for Stirling Machines* (Beijing: Chemical Industry Press) (in Chinese) [吴锋, 陈林根, 孙丰瑞, 喻九阳 2008 斯特林机的有限时间热力学优化 (北京: 化学工业出版社)]
- [9] Andresen B 2011 *Angew. Chem. Int. Ed.* **50** 2690
- [10] Lin G X, Chen J C 2011 *J. Xiamen University (Natural Science)* **50** 227 (in Chinese) [林国星, 陈金灿 2011 厦门大学学报 (自然科学版) **50** 227]
- [11] He B X, He J Z, Miao G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 040509 (in Chinese) [贺兵香, 何济洲, 缪贵玲 2011 物理学报 **60** 040509]
- [12] Tu Z C 2012 *Chin. Phys. B* **21** 020513
- [13] Cheng H T, He J Z, Xiao Y L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 010502 (in Chinese) [程海涛, 何济洲, 肖宇玲 2012 物理学报 **61** 010502]
- [14] Li J, Chen L G, Ge Y L, Sun F R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 130501 (in Chinese) [李俊, 陈林根, 戈延林, 孙丰瑞 2013 物理学报 **62** 130501]
- [15] Bejan A 1977 *Trans. ASME J. Heat Transf.* **99** 374
- [16] Badescu V 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 2298
- [17] Andresen B, Gordon J M 1992 *J. Appl. Phys.* **71** 76
- [18] Tsirlin A M, Kazakov V, Kolinko N 2003 *Eur. Phys. J. B* **35** 565
- [19] Badescu V 2004 *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **29** 53
- [20] Andresen B, Gordon J M 1992 *Int. J. Heat Fluid Flow* **13** 294
- [21] Chen L G, Xia S J, Sun F R 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 044907
- [22] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2009 *Brazilian J. Phys.* **39** 98
- [23] Tsirlin A M, Kazakov V A, Berry R S 1994 *J. Phys. Chem.* **98** 3330
- [24] Gordon J M, Rubinstein I, Zarmi Y 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 81
- [25] Santoro M, Schon J C, Jansen M 2007 *Phys. Rev. E* **76** 061120
- [26] Mironova V A 1994 *Chimicheskaja Promis Hlennost* **4** 51
- [27] Bi Y H, Chen L G, Sun F R 2012 *Int. J. Energy Res.* **36** 269
- [28] Tsirlin A M 1997 *Methods of Averaging Optimization and Their Application* (Moscow: Physical and Mathematical Literature Publishing Company) (in Russian)
- [29] Tsirlin A M 2002 *Optimization Methods in Thermodynamics and Microeconomics* (Moscow: Nauka) (in Russian)
- [30] Tsirlin A M 2003 *Irreversible Estimates of Limiting Possibilities of Thermodynamic and Microeconomic Systems* (Moscow: Nauka) (in Russian)
- [31] Tsirlin A M 2011 *Optimization for Thermodynamic and Economic Systems* (Moscow: Nauka) (in Russian)
- [32] Tsirlin A M, Mironova V A, Amelkin S A, Kazakov V A 1998 *Phys. Rev. E* **58** 215
- [33] Mironova V A, Amelkin S A, Tsirlin A M 2000 *Mathematical Methods of Finite Time Thermodynamics* (Moscow: Khimia) (in Russian)
- [34] Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G 2007 *Int. J. Heat Mass Transf.* **50** 2545
- [35] Guo Z Y 2008 *J. Eng. Thermophys.* **29** 112 (in Chinese) [过增元 2008 工程热物理学报 **29** 112]
- [36] Guo Z Y, Liang X G, Zhu H Y 2006 *Prog. Nat. Sci.* **16** 1288 (in Chinese) [过增元, 梁新刚, 朱宏晔 2006 自然科学进展 **16** 1288]
- [37] Zhu H Y, Chen Z J, Guo Z Y 2007 *Prog. Nat. Sci.* **17** 1692 (in Chinese) [朱宏晔, 陈泽敬, 过增元 2007 自然科学进展 **17** 1692]
- [38] Hu G J, Guo Z Y 2011 *J. Eng. Thermophys.* **32** 1005 (in Chinese) [胡帼杰, 过增元 2011 工程热物理学报 **32** 1005]
- [39] Cheng X T, Liang X G, Xu X H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 060512 (in Chinese) [程雪涛, 梁新刚, 徐向华 2011 物理学报 **60** 060512]
- [40] Hu G J, Cao B Y, Guo Z Y 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 2974
- [41] Xu M T 2012 *Energy* **44** 973
- [42] Guo Z Y, Cheng X G, Xia Z Z 2003 *Chin. Sci. Bull.* **48** 406
- [43] Han G Z, Guo Z Y 2006 *J. Eng. Thermophys.* **27** 811 (in Chinese) [韩光泽, 过增元 2006 工程热物理学报 **27** 811]
- [44] Chen L G, Wei S H, Sun F R 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 195506
- [45] Chen L G, Wei S H, Sun F R 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 94906
- [46] Xie Z H, Chen L G, Sun F R 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 4418
- [47] Ge L, Xu M T, Cheng L 2011 *J. Eng. Thermophys.* **32** 993 (in Chinese) [葛亮, 许明田, 程林 2011 工程热物理学报 **32** 993]
- [48] Chen L G 2012 *Sci. China: Tech. Sci.* **55** 802
- [49] Chen L G, Feng H J, Xie Z H, Sun F R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134401 (in Chinese) [陈林根, 冯辉君, 谢志辉, 孙丰瑞 2013 物理学报 **62** 134401]
- [50] Feng H J, Chen L G, Xie Z H, Sun F R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134703 (in Chinese) [冯辉君, 陈林根, 谢志辉, 孙丰瑞 2013 物理学报 **62** 134703]
- [51] Chen Q, Ren J X 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 3753
- [52] Wang S P, Chen Q L, Zhang B J 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 3572
- [53] Xu M T, Guo J F, Cheng L 2009 *Front. Energy Power Eng. China* **3** 402
- [54] Liu W, Liu Z C, Jia H, Fan A W, Nakayama A 2011 *Int. J. Heat Mass Transf.* **53** 3049
- [55] Cheng X T, Zhang Q Z, Xu X H, Liang X G 2013 *Chin. Phys. B* **22** 02503
- [56] Li Z X, Guo Z Y 2011 *Advances Transp. Phenom.* **2** 1
- [57] Li Z X, Guo Z Y 2010 *Field Synergy Theory for Convective Heat Transfer Optimization* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [李志信, 过增元 2010 对流传热优化的场协同理论 (北京: 科学出版社)]
- [58] Wu J, Liang X G 2008 *Sci. China E: Tech. Sci.* **51** 1306
- [59] Cheng X T, Xu X H, Liang X G 2010 *J. Eng. Thermophys.* **31** 1031 (in Chinese) [程雪涛, 徐向华, 梁新刚 2010 工程热物理学报 **31** 1031]
- [60] Cheng X T, Liang X G 2012 *J. Eng. Thermophys.* **33** 311 (in Chinese) [程雪涛, 梁新刚 2012 工程热物理学报 **33** 311]
- [61] Wu J, Cheng X T 2013 *Int. J. Heat Mass Transf.* **58** 374
- [62] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2010 *Sci. China E: Tech. Sci.* **53** 960
- [63] Liu X B, Guo Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4766 (in Chinese) [柳雄斌, 过增元 2009 物理学报 **58** 4766]
- [64] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 3587
- [65] Guo J F, Xu M T, Cheng L 2010 *Sci. China E: Tech. Sci.* **53** 1309
- [66] Guo Z Y, Liu X B, Tao W Q, Shah R K 2010 *Int. J. Heat Mass Transf.* **53** 2877
- [67] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2010 *Appl. Math. Model.* **34** 2242
- [68] Guo J F, Xu M T 2012 *Appl. Thermal Eng.* **36** 227
- [69] Guo J F, Huai X L 2012 *Energy* **41** 335
- [70] Wang W H, Cheng X T, Liang X G 2013 *Sci. China E: Tech. Sci.* **56** 529
- [71] Cheng X T, Liang X G 2012 *Energy* **44** 964
- [72] Zhou B, Cheng X T, Liang X G 2013 *Sci. China E: Tech. Sci.* **56** 228
- [73] Chen L G 2012 *Chin. Sci. Bull.* **57** 4404
- [74] Chen Q, Liang X G, Guo Z Y 2013 *Int. J. Heat Mass Transf.* **63** 65
- [75] Chen Q, Meng J A 2008 *Int. J. Heat Mass Transf.* **51** 2863
- [76] Chen Q, Ren J X, Guo Z Y 2008 *Int. J. Heat Mass Transf.* **51** 873
- [77] Chen Q, Ren J, Guo Z 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 2862

- [78] Jiang Y, Liu X H, Xie X Y 2011 *Heating Ventilating & Air Conditioning* **41** 1 (in Chinese) [江亿, 刘晓华, 谢晓云 2011 暖通空调 **41** 1]
- [79] Jiang Y, Xie X Y, Liu X H 2011 *Heating Ventilating & Air Conditioning* **41** 51 (in Chinese) [江亿, 谢晓云, 刘晓华 2011 暖通空调 **41** 51]
- [80] Liu X H, Jiang Y, Zhang T, Zhang L 2011 *Heating Ventilating & Air Conditioning* **41** 29 (in Chinese) [刘晓华, 江亿, 张涛, 张伦 2011 暖通空调 **41** 29]
- [81] Zhang T, Liu X H, Zhang L, Jiang Y 2012 *Energy Convers. Manage.* **59** 103
- [82] Chen L, Chen Q, Li Z, Guo Z Y 2010 *Chin. Sci. Bull.* **55** 1445
- [83] Chen Q, Yang K, Wang M R, Pan N, Guo Z Y 2010 *Energy* **35** 2448
- [84] Chen Q, Pan N, Guo Z Y 2011 *Energy* **36** 2890
- [85] Yuan F, Chen Q 2012 *Chin. Sci. Bull.* **57** 687
- [86] Yuan F, Chen Q 2012 *Energy* **42** 181
- [87] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2011 *Sci. China E: Tech. Sci.* **53** 352
- [88] Xia S J, Chen L G, Sun F R 2012 *Scientia Iranica, Trans. C: Chem. Eng.* **19** 1616
- [89] Cheng X T, Xu X H, Liang X G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 118103 (in Chinese) [程雪涛, 徐向华, 梁新刚 2011 物理学报 **60** 118103]
- [90] Cheng X T, Dong Y, Liang X G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114402 (in Chinese) [程雪涛, 董源, 梁新刚 2011 物理学报 **60** 114402]
- [91] Chen L G 2013 *J. Naval Univ. Engin.* **25** 1 (in Chinese) [陈林根 2013 海军工程大学学报 **25** 1]
- [92] Shen W D, Tong J G 2007 *Engineering Thermodynamics* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [沈维道, 童均耕 2007 工程热力学 (北京: 高等教育出版社)]
- [93] Zeng D L 1991 *Engineering Non-equilibrium Thermodynamics* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [曾丹苓 1991 工程非平衡热力学 (北京: 科学出版社)]

Entransy dissipation minimization for isothermal throttling process*

Xia Shao-Jun¹⁾²⁾³⁾ Chen Lin-Gen^{1)2)3)†} Ge Yan-Lin¹⁾²⁾³⁾ Sun Feng-Rui¹⁾²⁾³⁾

1) (Institute of Thermal Science and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

2) (Military Key Laboratory for Naval Ship Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

3) (College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

(Received 4 May 2013; revised manuscript received 18 June 2013)

Abstract

A class of isothermal throttling process with generalized mass transfer law is investigated, and the optimality condition for the minimum mass entransy dissipation of the process is obtained by applying optimal control theory. The results for special cases with mass transfer laws $[g \propto (\Delta p)^m]$ and $[g \propto \Delta(\mu)]$ are further obtained based on the general optimization result, and the obtained results are also compared with other mass transfer strategies of the minimum entropy generation, constant pressure ratio and constant pressure difference. Numerical examples for the cases with the mass transfer laws $[g \propto (\Delta p)^{1/2}]$, $[g \propto \Delta(p)]$ and $[g \propto \Delta(\mu)]$ are also provided. The results obtained herein can provide some theoretical guidelines for the optimal design and operation of real throttling processes and devices.

Keywords: isothermal throttling, mass entransy dissipation, optimal control, finite time thermodynamics

PACS: 02.30.Yy, 05.70.Ce, 45.10.Db, 47.27.nf

DOI: 10.7498/aps.62.180202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51176203, 10905093) and the Innovation Foundation for the Doctor of Naval University of Engineering, China (Grant No. HGDBSJJ201102).

† Corresponding author. E-mail: lingenchen@hotmail.com;lgchenna@yahoo.com