

浓差能的本质及浓差能理论转换效率

宁克信 张波 许群和
(西安冶金建筑学院)

提要 浓差能是一种新能源。本文报道了浓差能的本质及其理论转换效率。作者认为,浓差能与机械能本质是相同的,任何理想机器最大输出功率处的浓差能转换率都不会超过66.67%。

不同含盐量的水体界面蕴藏着一个巨大的未开发能源——浓差能。笔者认为,在对浓差能进行开发之前,研究并探讨浓差能的本质是有意义的。

按照物理化学观点,任何一种热力学体系的任何一个状态,都可以用一系列状态函数来表示,如温度(T)、压力(P)、体积(V)、内能(U)、焓(H)、熵(S)、自由能(G)等。确定单组份的单相体系的状态,只需确定两个状态参数,如温度 T 和压力 P 。而对一多组份单相体系,则还需指明各组份含量的多少,也即各组份的摩尔数: n_1, n_2, \dots, n_n 。其中,下脚标 n 代表体系中物质种类数。某物质的偏摩尔自由能是指在压力、温度及其它物质的浓度不发生变化的条件下,改变1摩尔该物质的量所引起的体系自由能的增加,记作 \bar{G}_i 。某物质在某条件下的偏摩尔自由能亦称该物质在该条件下的化学位,记作 μ_i 。

$$\mu_i = \bar{G}_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, P, n_j}$$

式中, n_j 表示除 n_i 外,其它组份的量固定。

热力学第二定律认为,在恒温恒压和无化学功的条件下,孤立体系朝着使自由能减少的方向自发变化,即:

$$dG \leq 0 \quad (1)$$

对于多种物质体系,自由能 G 同其它任何容量性质一样,是温度 T 、压力 P 和各种物质的

摩尔数 n_1, n_2, \dots, n_n 的函数:

$$G = f(T, P, n_1, n_2, \dots, n_n)$$

因此,

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P, n_i} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T, n_i} dP + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, P, n_j} dn_i \quad (2)$$

其中, $i \neq j$, 由于:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P, n_i} = -S$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T, n_i} = V$$

及

$$\left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, P, n_j} = \mu_i$$

因此,

$$dG = -SdT + VdP + \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (3)$$

考虑到恒温恒压条件,(3)式变为:

$$dG = \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (4)$$

与式(1)相比较,可知,

$$\sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \leq 0 \quad (5)$$

$\sum_{i=1}^n \mu_i dn_i < 0$ 的过程为自发过程; $\sum_{i=1}^n \mu_i dn_i = 0$ 时,过程即达平衡。所以说,物质的化学位是

决定物质传递方向和限度的强度因素。

物质的化学位可由下式表述:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i \quad (6)$$

式中, a_i 是物质的活度, 对于气体, $a_i = \gamma_i P_i$, a_i 亦称逸度, γ_i 称逸度系数, P_i 为气体分压; 对于溶液中物质, $a_i = \gamma_i c_i$, γ_i 为活度系数, c_i 是浓度, μ_i^0 为纯态物质在某标准条件下的化学位。

现在设想两种不同含盐量的溶液被一种只允许水分子通过的半透性薄膜隔开。显然, 在这个热力学体系中被传输的物质是水。根据(1)式, 两种溶液中水的化学位必须不相等, 才会自发地发生水的传输, 这种传输的方向必然是从化学位高的方面到化学位低的方面, 而且传输一直进行到双方水的化学位相等为止。

我们定义, 在两种不同浓度的水溶液之间, 推动水分子定向移动的能叫做浓差能; 传输 1 摩尔水所消耗的浓差能等于两种水溶液中水的偏摩尔自由能之差:

$$\begin{aligned} E &= \bar{G}_1 - \bar{G}_2 \\ &= \mu_1 - \mu_2 \\ &= (\mu^0 + RT \ln a_1) - (\mu^0 + RT \ln a_2) \\ &= RT \ln \frac{a_1}{a_2} \quad (7) \end{aligned}$$

众所周知, 能是有品位高低之分的。例如, 根据热力学第二定律, 热能不可能百分之百地转换为机械能, 任何理想热机都受着卡诺效率的限制。那么, 浓差能具备什么样的品位呢? 用理想机器转化浓差能的效率能达到多少呢? 下面试探讨一下这个问题。

首先让我们来设计一个用来转换浓差能的理想机器(见图 1)。

在这个装置中, 淡水水面和盐水浓度都是被保持不变的; H 是渗透压, 孔口下沿低于盐水水面, 其差距很小, 以致于水的传输几乎不引起盐水水面的下落现象。半透膜漏盐率为 0, 水轮机效率为 100%, 不计阻力。图中 $\rho_{\text{淡}}$ 、 $\rho_{\text{盐}}$ 分别表示淡水和盐水的密度。

用上述装置传输 1 摩尔水分子消耗的浓差

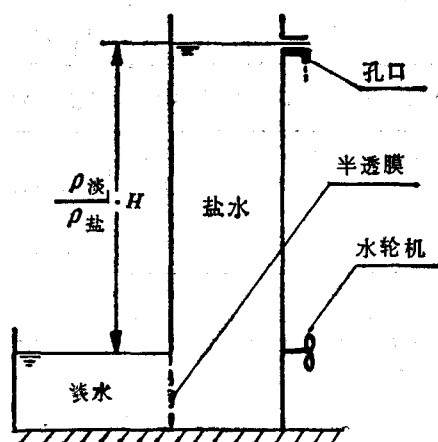


图 1 浓差能理想转换机器

Fig. 1 The perfect machinery of change in Concentration gradient energy

能为:

$$E = RT \ln \frac{a_{\text{淡水}}}{a_{\text{盐水}}} \quad (8)$$

从孔口落下冲动水轮机的水量应该等于淡水方面通过半透膜向盐水方面传输的水量。因此装置对外作出功:

$$\begin{aligned} W &= mg \cdot \frac{\rho_{\text{淡}}}{\rho_{\text{盐}}} H \\ &= \rho_{\text{盐}} V_M g \frac{\rho_{\text{淡}}}{\rho_{\text{盐}}} H \\ &= \rho_{\text{淡}} V_M g H \\ &= \frac{M_{\text{水}}}{1000} g H \\ &= 0.018 g H (J) \quad (9) \end{aligned}$$

式中, V_M 为水的摩尔体积, $M_{\text{水}}$ 为水的分子量, 取值 18, g 为重力加速度。

至此, 前面的问题归结至 E 与 W 的比较上。为了作进一步的分析, 我们引用了德国植物学家 W. 弗费尔 (Wilhelm Pfeffer) 于 1870—1880 年研究渗透压得到的实验数据, 如表 1 和表 2。其中渗透压 π , 浓度 C 及温度 T 都是原始数据, 其它几栏由原始数据计算得出。

由于德国纬度的缘故, 式(9)中重力加速度 g 取 9.812。因溶液很稀, 活度系数取 1.0。

表1 实验数据

Tab. 1 The experimental data

$\pi(\text{atm})$	$H(\text{mH}_2\text{O})$	$C(\text{mol/L})$	$X(\text{摩尔分数})$	$E(\text{J})$	$W(\text{J})$	$\frac{E-W}{E}(\%)$	附注
1.34	13.85	0.0588	0.00109	2.539	2.446	3.67	温度为 288K 的蔗糖水溶液
2.00	20.66	0.0809	0.00145	3.474	3.649	-5.04	
2.75	28.41	0.119	0.00214	5.130	5.018	2.18	
4.04	41.74	0.179	0.00321	7.698	7.372	4.23	
平均						1.26	

表2 实验数据

Tab. 2 The experimental data

$\pi(\text{atm})$	$H(\text{mH}_2\text{O})$	$T(\text{K})$	$X(\text{摩尔分数})$	$E(\text{J})$	$W(\text{J})$	$\frac{E-W}{E}(\%)$	附注
0.649	6.706	273	0.00053	1.203	1.184	1.58	浓度为 0.0294M 的蔗糖水溶液
0.664	6.861	280		1.234	1.212	1.78	
0.684	7.067	289		1.274	1.248	2.04	
0.721	7.450	295		1.300	1.316	-1.23	
0.746	7.708	309		1.362	1.361	0.07	
平均						0.55	

分析前人的实验数据可以看出, 传输 1 摩尔水分子消耗的浓差能 E 与获得的最大理论机械能 W 在量值上十分接近, 平均相对误差只有 $(1.26\% + 0.55\%)/2 = 0.91\%$ 。考虑到实验误差, 应该允许认为 E 与 W 是完全相等的。这就是说, 在理论上浓差能可以百分之百地转换为机械能, 二者本质上是等同的。

基于上述结论, 下面分析利用理想机器转换浓差能的功率 N 和效率 η 。

假设理想机器中, 盐水水面与淡水水面的高度差等于 $\frac{\rho_{\text{糖}}}{\rho_{\text{盐}}}h$, $h < H$, 半透膜阻力系数为 ξ , 水的传输流量为 Q (它等于冲击水轮机的流量), 水的过流面积为 A , 那么有:

$$H - h = (1 + \xi) \frac{(Q/A)^2}{2g} \quad (10)$$

或者,

$$Q = \sqrt{\frac{2gA^2}{1 + \xi}} (H - h) \quad (11)$$

于是,

$$N = \rho_{\text{糖}} Q g \frac{\rho_{\text{糖}}}{\rho_{\text{盐}}} h \quad (12)$$

$$= \rho_{\text{糖}} Q g h$$

$$= \rho_{\text{糖}} g h \sqrt{\frac{2gA^2}{1 + \xi}} (H - h) \quad (13)$$

$$\eta = \frac{\text{机械功}}{\text{浓差能}}$$

$$= \frac{\rho_{\text{糖}} Q g h}{\rho_{\text{糖}} Q g H}$$

$$= \frac{h}{H} \quad (14)$$

图 2 集中形象地表示了输出功率 N 、效率 η 与盐、淡水水面差 h 之间的函数关系。

对式 (12) 应用极值方法容易得出: 当 $h = \frac{2}{3}H$ 时, N 达到最大值, 此时效率 $\eta = 66.67\%$ 。该结论并同式 (13) 指出: 随着盐水水面与淡水水面的高差 h 的增加, 功率 N 不断提高, 转换效率 η 也不断上升; 当 h 增加至渗透压 H 的三分之二时, N 达到最大值; 此后随着 h 继续增加, 输出功率 N 反而降低, 而 η 依然上

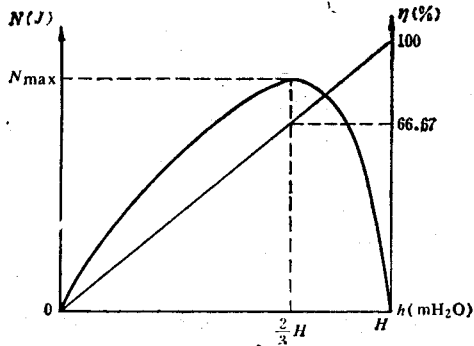


图2 系统内部压力 h 与功率 N 及效率 η 的关系
 Fig. 2 Relation of between power N , efficiency η , and pressure h of inside of system.

升;当 h 无限接近 H 时,水通过半透膜的速度无限小, N 无限趋近于 0, η 则达到 100%。

由于浓差能是一种取之不尽、用之不竭的可再生能源,人们在开发利用它时,最关心的是怎样提高输出功率,而不是效率问题。所以,尽管理论上说在足够长时间内,浓差能可以百分之百地转换为机械能,但从实用方面考虑,任何利用渗透压差法提取浓差能的机器转换效率,都不会超过 66.67%。

主要参考文献

- [1] 宁克信, 1986。浓差能动力装置原理初论。西安冶金建筑学院学报 2:73—79。
 [2] Jellinek, H. H. G. and H. Masude, 1981. Osmo-Power Theory and Performance of an Osmo-Power Pilot Plant. *Ocean Energy* 8 (2): 103—128.

A STUDY ON THE ESSENCE OF CONCENTRATION GRADIENT ENERGY AND ITS THEORETICAL EFFICIENCY IN CONVERSION

Ning Kexin, Zhang Bo, Xu Qunhe

(Xian Institute of metallurgy and Construction Engineering)

Abstract

Concentration gradient energy (CGE) is a new source of energy brought to be noticed by people recently. This paper studies the essence of CGE and its theoretical efficiency of its conversion. It is esteemed that CGE is same as mechanical energy in quality and the efficiency conversion of CGE of any ideal machinery won't be able to exceed 66.67% at their maximum power-output points.