

[Article]

www.whxb.pku.edu.cn

配合物 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 的低温热容和标准摩尔生成焓

邱友莹^{1,*} 高胜利² 谭志诚³¹聊城大学化学化工学院, 山东 聊城 252059; ²西北大学化学系, 西安 710069;³中国科学院大连化学物理研究所热化学实验室, 辽宁 大连 116023

摘要: 利用精密自动绝热热量计直接测定了配合物 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ (Phe: 苯丙氨酸)在 78–370 K 温区的摩尔热容. 通过热容曲线的解析得到该配合物的起始脱水温度为, $T_0=(324.27 \pm 0.37)$ K. 将该温区的摩尔热容实验值用最小二乘法拟合得到摩尔热容($C_{p,m}$)对温度(T)的多项式方程, 并且在此基础上计算出了它的舒平热容值和各种热力学函数值. 依据 Hess 定律, 通过设计热化学循环, 选择体积为 100 mL 浓度为 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸作为量热溶剂, 利用等温环境溶解-反应热量计分别测定混合物 $\{\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 2\text{NaNO}_3(\text{s}) + \text{L-Phe}(\text{s})\}$ 和 $\{\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s})\}$ 的溶解焓为, $\Delta_d H_{m,1}^0 = (69.42 \pm 0.05) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\Delta_d H_{m,2}^0 = (48.14 \pm 0.04) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 进而计算出该配合物的标准摩尔生成焓为, $\Delta_f H_m^0 = -(1363.10 \pm 3.52) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. 另外, 利用紫外-可见(UV-Vis)光谱和折光指数(refractive index)的测量结果检验了所设计的热化学循环的可靠性.

关键词: $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$; 绝热量热法; 低温热容; 溶解-反应量热法; 标准摩尔生成焓
中图分类号: O642

Low-temperature Heat Capacities and Standard Molar Enthalpy of Formation of the Complex $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$

DI You-Ying^{1,*} GAO Sheng-Li² TAN Zhi-Cheng³¹College of Chemistry and Chemical Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong Province, P. R. China;²Department of Chemistry, Northwest University, Xi'an 710069, P. R. China; ³Thermochemistry Laboratory, Dalian Institute of

Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning Province, P. R. China)

Abstract: Low-temperature heat capacities of the complex $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ (Phe: phenylalanine) have been precisely measured with a small sample precision automated adiabatic calorimeter over the temperature range from 78 to 370 K. The initial dehydration temperature of the complex ($T_0=(324.27 \pm 0.37)$ K) has been obtained by means of the analysis of the heat capacity curve. The experimental values of molar heat capacities have been fitted to a polynomial equation of heat capacities ($C_{p,m}$) vs the temperature (T) with the least square method. The smoothed heat capacities and the thermodynamic functions of the complex have been calculated on the basis of the equation. In accordance with Hess law, dissolution enthalpies of the mixtures $\{\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 2\text{NaNO}_3(\text{s}) + \text{L-Phe}(\text{s})\}$ and $\{\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s})\}$ in $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl were measured to be: $\Delta_d H_{m,1}^0 = (69.42 \pm 0.05) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ and $\Delta_d H_{m,2}^0 = (48.14 \pm 0.04) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, by using an isoperibol solution-reaction calorimeter. Furthermore, the standard molar enthalpy of formation for the complex was determined as, $\Delta_f H_m^0 = -(1363.10 \pm 3.52) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, by designing a thermochemical cycle. In addition, the reliability of the designed thermochemical cycle has been verified by UV-Vis spectroscopy and the data of the refractive indices.

Key Words: $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$; Adiabatic calorimetry; Low-temperature heat capacity; Solution-reaction calorimetry; Standard molar enthalpy of formation

Received: March 12, 2007; Revised: May 9, 2007; Published on Web: June 21, 2007.

*Corresponding author. Email: yydi@lcu.edu.cn.

国家自然科学基金(20673050)和聊城大学博士后启动基金(31805)资助项目

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

L- α -氨基酸与锌形成的配合物作为营养添加剂在药物、食品以及化妆品等方面的应用已引起人们的极大重视^[2]. 近几十年来, 这类新型化合物的合成、结构及性质表征的研究已取得很大进展. 然而, 为了进一步改进这些配合物的合成工艺以便使其适用于工业生产, 开发它们的新的应用领域, 并且进行相关的理论研究, 迫切需要该类配合物准确的热力学数据作为理论计算的依据.

高胜利等^[3]用半微量相平衡法研究了 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{Phe} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (其中 Phe 代表 L- α -苯丙氨酸)三元体系在 298.15 K 的溶解度图, 发现在相图上有两种新的物相生成, 将饱和溶液和湿固相组成点连线的延长线交点确定为该相区固相物质的组成. 他们在相图的指导下成功合成了未见文献报道的 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 等配合物, 并且对其结构和在氧气气氛下的热稳定性等进行了表征. 然而, 迄今为止, 文献中尚未见到配合物 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 的低温热容和标准摩尔生成焓等热力学性质的报道. 本文用自己合成的 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 样品, 通过精密自动绝热热量计直接测定了这个配合物在 78–370 K 的摩尔热容, 并且在此基础上计算出了它的各种热力学函数. 利用等温环境溶解-反应量热计, 通过设计热化学循环, 确定了该配合物的标准摩尔生成焓.

1 实验

1.1 样品的制备和表征

样品制备中所使用的锌盐 ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 为 AR 级, 西安化学试剂厂生产, 纯度大于 99.90%; L- α -苯丙氨酸 (phenylalanine) 为 BR 级, 上海康达氨基酸厂生产, 纯度大于 99.50%; 其它试剂均为 AR 级.

所使用的样品采用文献[3]的方法合成. 新制得的配合物 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 为白色沉淀. 抽滤, 用少量丙酮洗涤三次, 真空干燥至恒重得白色粉末. 它溶于水而不溶于醇、丙酮等有机溶剂. 化学分析表明, 该配合物的组成为 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$. 用意大利 1160 型元素分析仪和化学分析方法证实了该样品的纯度大于 99.90%, 符合精密绝热量法和等温环境溶解-反应量热法对测量样品的要求. 有关该样品的其它表征, 如在氧气气氛下的 TG、FTIR 以及 X 射线粉末衍射分析等, 请参考文献[3].

1.2 样品的低温热容测定

在中国科学院大连化学物理研究所材料热化学实验室建立的小样品精密自动绝热量热装置中进行

低温热容测定. 有关该装置的原理和结构细节参考文献[4,5].

$\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 的用量为 3.6409 g, 即 0.0098 mol (分子量为 372.609 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$). 以间歇式加热方式和交替式测温的程序进行热容测量, 测量温度范围为 78–370 K. 液氮作为冷冻剂. 样品池的加热速率控制在 $0.2\text{--}0.4 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$, 升温间隔控制在 2–4 K. 热容测量过程中, 内屏与样品容器之间的温差可以自动控制在 0.001 K 以内, 样品容器在平衡期的温度变化率可自动控制在 $10^{-3}\text{--}10^{-4} \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$. 量热实验中, 包括电能和温度在内的所有测试数据均由计算机自动采集和适时处理.

为了证实该绝热热量计测量结果的准确性, 预先测量了量热标准参考物质 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在 78–400 K 的摩尔热容, 实验数据与标准参考数据^[6]之间的相对偏差在 $\pm 0.20\%$ 以内.

1.3 样品标准摩尔生成焓的测定

先利用武汉大学制造的 SRC-100 型溶解-反应热量计通过测定所设计反应的反应物和产物在指定溶剂中的溶解焓, 计算出样品的标准摩尔生成焓. 该热量计的原理和结构细节参见文献[7,8].

该仪器控温和测温均由惠斯顿电桥完成, 用热敏电阻作温度传感器. 如文献[8]中所示, 在 295–310 K, 该仪器的测温热敏电阻的电势变化值与温度变化值呈线性关系, 因而可利用热敏电阻的电势变化来表示温度变化. 溶解实验和电标定实验产生的温差, 由装有精密热敏电阻的直流惠斯顿电桥和与之配用的自动数据采集和处理系统来测定. 热量计常数是利用每次溶解实验结束后的溶液, 通过电标定方法确定. 溶解实验和电标定实验的温差皆通过等面积法校正得到^[9]. 此热量计恒温水浴控温精度为 $\pm 0.001 \text{ K}$, 量热本体的测温灵敏度为 $\pm 0.0001 \text{ K}$. 实验温度一般控制在 $T=298.15 \text{ K}$. 在 298.15 K 下, 用原美国标准局提供的量热标准物质 THAM(NBS-742a) 在 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸中的反应焓, 和 KCl 在二次蒸馏水中的溶解焓的测量, 来验证仪器的准确度. 结果表明, 实验数据与文献标准参考数据^[10]之间的相对偏差在 $\pm 0.30\%$ 以内.

2 结果与讨论

2.1 热容

热容实验值绘于图 1. 由图 1 的热容曲线可见, 在 78–324 K 温度区间, 热容曲线是连续平滑递增

的,说明这个配合物在此温区结构稳定,没有相变、分解和缔合等热异常现象发生.然而,在温度高于 324 K 时,热容曲线呈现明显快速上升趋势,以致图 1 中的整条曲线在 324 K 附近出现一个拐点,说明样品在 324 K 附近开始分解.将 78–324 K 以及 324–370 K 两段曲线按照其趋势作直线延伸,其交点被确定为实际起始分解温度.在脱水温区,经过三次重复热容测量,得到三次实验的起始脱水温度分别为, $T_{0,1}=324.55$ K, $T_{0,2}=323.20$ K, $T_{0,3}=325.05$ K,如图 1 中的插图所示,从而得到三次实验结果的平均值为, $T_0=(324.27 \pm 0.37)$ K.按照文献[3]的 TG 分析结果, 323.15–488.15 K 温度区间为该配合物脱水阶段,失重率为 5.00%,与水分子在该样品中的质量分数(4.83%)基本吻合.热容曲线在拐点处的温度 324.55 K 与文献[3]中 TG 曲线上的起始脱水温度(323.15 K)相差 1.40 K,基本吻合.两种方法产生一定偏差的主要原因可能是由于 TG 实验期间样品表面吸附了空气中的水,此表面吸附水的脱除发生在样品的结晶水脱除以前,从而使得 TG 曲线上第一步起始脱水温度降低,且第一步实际脱水时的失重率增加.但是,绝热量热测量中,样品容器在放入样品后,先将样品池抽真空至 100 Pa 以下,以防止表面吸附水的存在,然后给样品池中充入压力大约为 100 kPa 的高纯氮气以增加低温热容测量过程中样品池的导热速率和减少达到热平衡所需时间,最后用焊锡将样品池密封.相比较而言,低温热容测量所得结果是可靠的.

因为样品在约 324.27 K 处分解,所以,该配合物热容曲线有效段为 78–324 K 温区.将该温区的

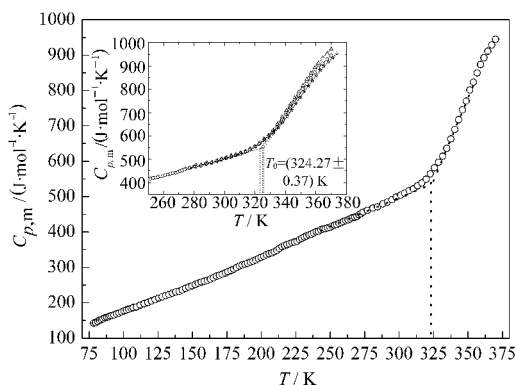


图 1 样品 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 的实验摩尔热容与温度的关系曲线

Fig.1 Plots of heat capacities ($C_{p,m}$) against temperature (T) of the complex $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$

insert: o) the first series, Δ) the second series,
☆) the third series of heat capacity measurements

118 个摩尔热容实验点用最小二乘法拟合,可以得到一个摩尔热容($C_{p,m}/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$)对温度(T)的多项式方程,即:

$$C_{p,m} = 332.636 + 203.243x + 5.015x^2 + 2.188x^3 + 14.232x^4$$

式中 x 为折合温度, $x = (T - 201.5)/123.5$, T 为绝对温度.该方程在 78–325 K 温度区间有效.除温度区间两边的几个实验温度点外,由此经验式所得到的舒平热容值与实验值的相对偏差在 $\pm 0.4\%$ 以内.

另外,配合物的热容曲线在 324 K 以后出现缓慢脱水现象,而不是出现一个明显的脱水峰.这可能是由于结晶水在此配合物中的百分含量较大,样品量也较大,在整个绝热量热实验中样品池是密封的,脱水开始后一方面由于温度升高使得脱水速度加快,另一方面由于样品池中水蒸气压力的迅速增大使得脱水的速度受到很大抑制.从图 1 中的插图看出,三次热容实验在温度低于 324 K 时,热容测量结果是很吻合的,但是在温度高于 324 K 时,同一个实验温度下每次热容测量结果有较大的偏差,这主要是由于重复热容测量时的样品量不同,样品热分解时水蒸气压力不同,对热容的实验值影响不同所致.由此可知,配合物在温度高于 324 K 时的实验摩尔热容值实际是无意义的.

2.2 热力学函数计算

用配合物在 78–325 K 温度区间热容随温度变化的多项式方程,可以计算出该温度区间内的舒平热容值.在此温度区间某一给定温度(T)下,摩尔热容与相对于 298.15 K 的热力学函数的关系式为,

$$H_T - H_{298.15 \text{ K}} = \int_{298.15}^T C_{p,m} dT$$

$$S_T - S_{298.15 \text{ K}} = \int_{298.15}^T C_{p,m} T^{-1} dT$$

$$G_T - G_{298.15 \text{ K}} = \int_{298.15}^T C_{p,m} dT - T \int_{298.15}^T C_{p,m} T^{-1} dT$$

通过上式,用摩尔热容多项式方程进行数值积分可以获得 298.15–325 K 温度区间内每隔 5 K 的热力学函数值,列于表 1 中.

2.3 配合物 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的标准摩尔生成焓

由于 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 在空气中易潮解,因此本文工作选用 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 和 $\text{NaNO}_3(\text{s})$ 作为所设计反应的反应物.目标配合物的标准摩尔生成焓的测定是在常压和 298.15 K 下,按下列化学反应方程式设计 Hess 热化学循环进行的:

表 4 确定配合物 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 标准摩尔生成焓的反应总汇Table 4 Reaction scheme used to determine the standard molar enthalpy of formation of $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$

No.	Reactions	Formed solution	$(\Delta_f H_m^\theta$ or $\Delta_f H_m^\theta \pm \sigma_x)^\circ / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
1	$\{\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 2\text{NaNO}_3(\text{s}) + \text{L-Phe}(\text{s})\} + \text{"S"} = \text{Solution A}$	A	$(69.42 \pm 0.05) (\Delta H_1)$
2	$\{\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s})\} + \text{"S"} = \text{Solution A}'$	A'	$(48.14 \pm 0.04) (\Delta H_2)$
3	$\text{Solution A}' + \{6\text{H}_2\text{O}(\text{l})\} = \text{Solution A}$	A	0 (ΔH_3)
4	$\text{Na}(\text{s}) + (1/2)\text{N}_2(\text{g}) + (3/2)\text{O}_2(\text{g}) = \text{NaNO}_3(\text{s})$		-466.24 (ΔH_4)
5	$\text{Zn}(\text{s}) + \text{S}(\text{s}) + (11/2)\text{O}_2(\text{g}) + 7\text{H}_2(\text{g}) = \text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})$		-3077.75 (ΔH_5)
6	$9\text{C}(\text{s}) + (11/2)\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) + (1/2)\text{N}_2(\text{g}) = \text{L-Phe}(\text{s})$		$-(476.21 \pm 3.51) (\Delta H_6)$
7	$2\text{Na}(\text{s}) + \text{S}(\text{s}) + 2\text{O}_2 = \text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s})$		-1387.08 (ΔH_7)
8	$\text{H}_2(\text{g}) + (1/2)\text{O}_2(\text{g}) = \text{H}_2\text{O}(\text{l})$		$-(285.83 \pm 0.04) (\Delta H_8)$
9	$\text{Zn}(\text{s}) + 27\text{C}(\text{s}) + (35/2)\text{H}_2(\text{g}) + (13/2)\text{O}_2(\text{g}) + (5/2)\text{N}_2(\text{g}) = \text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$		$-(1363.10 \pm 3.52) (\Delta H_9)$

$^* \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$, in which n is the experimental number; x_i is a single value in a set of dissolution measurements; \bar{x} is the mean value of a set of measurement results.

$\Delta_f H_m^\theta(\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s})) = -1387.08 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1[11]}$, $\Delta_f H_m^\theta(\text{NaNO}_3(\text{s})) = -466.24 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1[12]}$, $\Delta_f H_m^\theta(\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})) = -3077.75 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1[12]}$, $\Delta_f H_m^\theta(\text{L-Phe}(\text{s})) = -(476.21 \pm 3.51) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1[13]}$ 和 $\Delta_f H_m^\theta(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) = -(285.83 \pm 0.04) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1[14]}$ 等相结合, 可求出 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 的标准摩尔生成焓, 其反应总汇如表 4 所示.

$$\begin{aligned} \Delta_f H_m^\theta(\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})) &= \Delta H_9 \\ &= \Delta H_1 - (\Delta H_2 + \Delta H_3) + (2\Delta H_4 + \Delta H_5 + \Delta H_6 - \Delta H_7 - 6\Delta H_8) \\ &= \Delta_f H_{m,1} + 2\Delta_f H_m^\theta(\text{NaNO}_3(\text{s})) + \Delta_f H_m^\theta(\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})) + \\ &\quad \Delta_f H_m^\theta(\text{L-Phe}(\text{s})) - \Delta_f H_m^\theta(\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s})) - 6\Delta_f H_m^\theta(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) \\ &= -(1363.10 \pm 3.52) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \end{aligned}$$

紫外-可见(UV-Vis)光谱和折光指数结果是判别两种溶液的化学组成和物理性质是否相同的主要依据. 由反应(1)中反应物和产物的溶解所得到的溶液(溶液 A 和溶液 A')具有几乎相同的 UV-Vis 光谱图, 如图 2 所示. 溶液 A 的折光指数为 (1.6399 ± 0.0007) , 溶液 A' 为 (1.6396 ± 0.0006) . 由此可以看出, 溶液 A 和溶液 A' 处于等同的热力学状态. 这些结果表明两种溶液的结构和性质相同. 因此, 所设计的 Hess 热化学循环是合理的, 能够用来计算目标配合

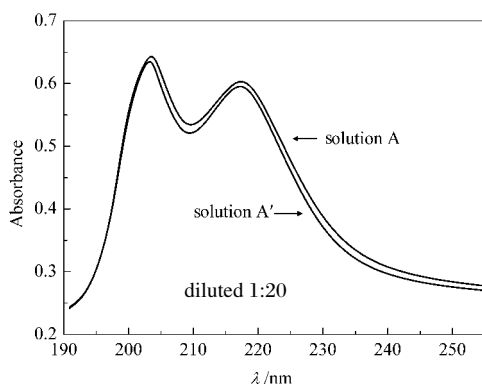


图 2 溶液 A 和溶液 A' 的紫外-可见光谱图

Fig.2 UV-Vis spectra of solution A and solution A'

物 $\text{Zn}(\text{Phe})(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 的标准摩尔生成焓.

References

- Mahmoud, M.; Abdel-monem, S.; Paul, M. Method of nutritional supplementation for zinc and methionine by ingesting 1:1 zinc methionine complex. US Patent, US 4039681. 1977 (*Chem. Abstr.*, **1977**, **87**: 15196)
- Taguchi, S.; Inokuchi, M.; Nakajima, N.; Inomata, M.; Natitoh, Y. Antipruritic drug and antipruritic composition. WO Patent, WO 10178. 1992 (*Chem. Abstr.*, **1992**, **117**: 258218)
- Gao, S. L.; Hou, Y. D.; Liu, J. R.; Ji, M.; Chen, S. P. *Acta Chim. Sin.*, **2000**, **58**(1): 65 [高胜利, 侯育冬, 刘建睿, 冀棉, 陈三平. *化学学报*, **2000**, **58**(1): 65]
- Tan, Z. C.; Sun, G. Y.; Sun, Y. J. *Therm. Anal.*, **1995**, **45**: 59
- Tan, Z. C.; Liu, B. P.; Yan, J. B.; Sun, L. X. *Journal of Computer and Applied Chemistry*, **2003**, **20**(3): 265 [谭志诚, 刘北平, 颜君彪, 孙立贤. *计算机与应用化学*, **2003**, **20**(3): 265]
- Ditmars, D. A.; Ishihara, S.; Chang, S. S.; Bernstein, G.; West, E. *D. J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **1982**, **87**: 159
- Di, Y. Y.; Gao, S. L.; Li, L. W.; Tan, Z. C. *J. Chem. Thermodynamics*, **2006**, **38**: 884
- Di, Y. Y.; Tan, Z. C.; Gao, S. L.; Wang, S. X. *J. Chem. Eng. Data*, **2004**, **49**: 965
- Dickinson, H. C. *Bull. Natl. Bur. Stand. (US)*, **1914**, **11**: 189
- Rychly, R.; Pekarek, V. *J. Chem. Thermodynamics*, **1977**, **9**: 391
- Wagman, D. D.; Evans, W. H.; Parker, V. B.; Schumm, R. H.; Halow, I.; Bailey, S. M.; Churney, K. L.; Nuttall, R. L. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **1982**, **11** (suppl. 2): 2-306
- Dean, J. A. *Lange's handbook of chemistry*. Trans. Shang, J. F.; Cao, S. J.; Xin, W. M.; Zheng, F. Y.; Lu, X. M. 13th ed. Beijing: Science Press, 1991: 4-126 [兰氏化学手册. 尚久方, 操时杰, 辛无名, 郑飞勇, 陆晓明, 林长青译. 北京: 科学出版社, 1991: 4-126]
- Sabbah, R.; Minadakis, C. *Thermochim. Acta*, **1981**, **43**: 269
- Pedley, J. B.; Muylor, R. D.; Kirby, S. P. *Thermochemical data of organic compounds*. 2nd ed. London: Chapman and Hall, 1992: 174