

CN9201673

CNIC-00579

SMI-0004

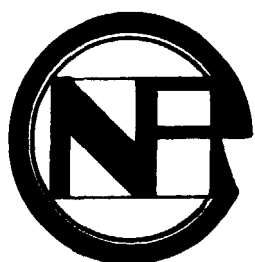
# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

$\delta$  相二元钚合金相变压力的热力学分析

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF TRANSITION  
PRESSURE OF  $\delta$ -STABILIZED BINARY  
PLUTONIUM ALLOYS

*(In Chinese)*



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre



王清辉：西南材料研究所高级工程师（教授级），1953年毕业于重庆大学冶金系钢铁冶金专业。

Wang Chinghui, Executive engineer of the Institute of Southwest Materials. Graduated from the Department of Metallurgy, Chongqing University in 1953, majoring in steel and iron metallurgy.

CNIC-00579

SMI-0004

## $\delta$ 相二元钷合金相变压力的热力学分析

王清辉

(西南材料研究所)

### 摘 要

对  $\delta$  相二元钷合金的  $\delta \rightarrow \alpha$  相变进行了热力学分析,推导出可以表征  $\delta \rightarrow \alpha$  高压相变特性的相平衡压力-成分方程。理论方程的计算值与文献报道的实验值的趋向一致,它可以恰当地解释:(1) $\delta \rightarrow \alpha$  相变压力随合金元素含量呈直线增加的关系;(2)相变压力-成分直线的斜率与常压下稳定  $\delta$  相至室温所需的最小溶质含量成反比的关系;(3)各种  $\delta$ -Pu 合金的相变压力-成分关系线在溶质含量为零时交于压力轴上同一点的实验结果。此外,利用修正的理论方程,对某些  $\delta$ -Pu 合金的  $\delta \rightarrow \alpha$  相变压力作了预测。

# THE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF TRANSITION PRESSURE OF $\delta$ -STABILIZED BINARY PLUTONIUM ALLOYS

*(In Chinese)*

Wang Chinghui

(INSTITUTE OF SOUTHWEST MATERIALS, SICHUAN)

## ABSTRACT

The transformation of  $\delta$ -stabilized binary plutonium alloys to  $\alpha$ -Pu was studied by thermodynamic analysis. A transition pressure-composition equation which can characterize the high pressure transformation from  $\delta$  to  $\alpha$  was derived. Values calculated by the equation and values measured by experiments of published references have the same tendency. The following facts can be explained properly by this equation. (1) The transformation pressure increases linearly with the amount of an alloying element. (2) The slope of the plot of transformation pressure versus composition of  $\delta$ -Pu alloys is inversely proportional to the minimum amount of solute required to retain  $\delta$ -phase at room temperature and pressure. (3) Curves showing the relationship between transformation pressure and composition of various  $\delta$ -stabilized binary alloys intersect at the same point of zero solute (transformation pressure axis). In addition, some transformation pressures from  $\delta$  to  $\alpha$  of  $\delta$ -stabilized alloys are predicted by using the modified theoretical equation.

## 前言

钷有六个同素异形体,存在于室温的单斜结构的 $\alpha$ 相是脆性的,工艺性能差,并且易氧化。在319~451°C之间稳定的面心结构的 $\delta$ 相具有良好的塑性和工艺性能,抗腐蚀能力优于 $\alpha$ 钷。为了利用 $\delta$ 钷的优点,可向钷中加入一定量的某些合金元素,使 $\delta$ 相稳定到室温。这些 $\delta$ 相稳定剂计有:Zn、Sc、Lu、Tm、Er、Dy、Ga、Al、In、Tl、Ce、Hf、Zr和Am等14个元素<sup>[1-5]</sup>。不过当合金冷至零下温度或遭受应力和塑性变形时, $\delta$ 相可能转变成 $\alpha$ 相或其它较高密度的相(如 $\gamma$ 、 $\beta$ 相)。Alfred Goldberg<sup>[6]</sup>曾经对 $\delta$ -Pu合金的 $\delta \rightarrow \alpha$ 相变进行热力学分析,定性地讨论了温度、应力、压力等因素对相变方向的影响。本文亦根据热力学原理,力图建立一个能够表征 $\delta$ -Pu高压相变特性的数学表达式,定量地计算 $\delta$ 相二元钷合金的室温相变压力和其它有关参量,并与实验数据进行比较。

## 1 相平衡压力-成分方程式推导

国外已对Pu-Zn<sup>[3]</sup>、Pu-Al<sup>[5]</sup>、Pu-Ce [5]和Pu-Ga<sup>[4,6]</sup>等 $\delta$ 相钷合金的高压相变行为进行了系统的研究,得出下面一些结果:

(1)Pu-Zn、Pu-Al和Pu-Ga在室温高压下发生 $\delta \rightarrow \alpha$ 相变,Pu-Ce发生 $\delta \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ 相变。1981年E. G. Zukas等人<sup>[7]</sup>研究了Pu-2%(原子)Al的高压相变,认为Pu-2Al也属 $\delta \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ 相变。

(2)所有研究者都得出相变压力随合金元素含量成直线增加的关系。

(3)许多研究者<sup>[4,8-11]</sup>一致公认 $\delta \rightarrow \alpha$ 属于马氏体型相变。

按照马氏体相变特征,新相与母相保持着相同的成分,就是说, $\delta$ 相固溶体转变成同一合金元素含量的 $\alpha$ 相过饱和固溶体。这样,可以用图1表示合金的 $\delta$ 相和 $\alpha$ 相的吉布斯自由能 $G_\delta$ 和 $G_\alpha$ 与压力 $p$ 的关系。若 $p_c$ 为二相平衡共存时的压力,则当 $p > p_c$ 时, $G_\alpha < G_\delta$ , $\delta \rightarrow \alpha$ 相变自由能的变化 $\Delta G = G_\alpha - G_\delta < 0$ ,将发生 $\delta \rightarrow \alpha$ 相变;当 $p < p_c$ 时, $\Delta G > 0$ ,则不会发生 $\delta \rightarrow \alpha$ 相变。

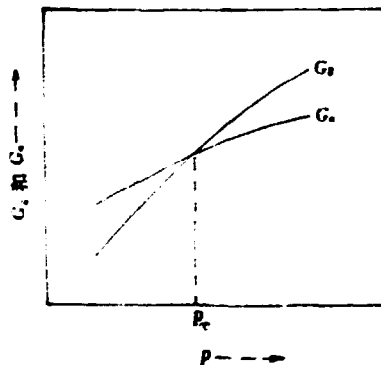


图1  $\delta$ 相自由能与 $\alpha$ 相自由能随压力的变化

为了获得两相自由能之差,先求各相的自由能。在文献[12]中,介绍了一个正规溶液模型的二元固溶合金的自由能方程:

$$G = N_A G_A + N_B G_B + \Omega N_A N_B + RT(N_A \ln N_A + N_B \ln N_B) \quad (1)$$

式中, $G_A$ 与 $G_B$ 分别为A、B金属在温度 $T$ 时的摩尔自由能, $N_A$ 和 $N_B$ 分别为组元A和B

的摩尔分数,  $R$  为气体常数,  $\Omega$  为 A、B 两种元素的原子的相互作用参数, 其值为:

$$\Omega = LZ(E_{AB} - \frac{E_{AA} + E_{BB}}{2}) \quad (2)$$

式中的  $E_{AA}$ 、 $E_{BB}$  和  $E_{AB}$  分别为 AA、BB、AB 每一原子对的结合能,  $L$  为阿伏加德罗常数,  $Z$  为固溶体晶体的配位数。

(1) 式右边的前两项是组元 A、B 混合之前的自由能; 第三项是形成固溶体时热函的变化; 最后一项是形成固溶合金时由于熵的变化引起的自由能变化。

(1) 式用于溶质含量低的铈合金时, 设若溶质元素对其与  $\alpha$  相铈及  $\delta$  相铈混合之前的自由能总和这一项中的贡献相同, 并考虑压力  $p$  对系统所作的功, 则富铈合金两个相的自由能方程可分别表示为:

$$G_{\delta} = (1 - N)G_{\delta}^0 + NG_{\delta}^1 + \Omega_{\delta}(1 - N)N + RT[(1 - N)\ln(1 - N) + N\ln N] + V_{\delta} \int_0^p d\rho \quad (3)$$

$$G_{\alpha} = (1 - N)G_{\alpha}^0 + NG_{\alpha}^1 + \Omega_{\alpha}(1 - N)N + RT[(1 - N)\ln(1 - N) + N\ln N] + V_{\alpha} \int_0^p d\rho \quad (4)$$

上两式中的  $N$  为某一合金元素的摩尔分数, 则  $1 - N$  为铈的摩尔分数,  $G_{\delta}^0$ 、 $G_{\alpha}^0$ 、 $G_{\delta}^1$ 、 $G_{\alpha}^1$  分别为纯铈的  $\delta$  相、 $\alpha$  相及合金元素在室温时的摩尔自由能,  $V_{\delta}$  和  $V_{\alpha}$  分别为铈合金的  $\delta$  相和  $\alpha$  相的室温摩尔体积,  $T$  为温度 (298K),  $\Omega_{\delta}$  和  $\Omega_{\alpha}$  分别为  $\delta$ -Pu 和  $\alpha$ -Pu 原子与合金元素原子的相互作用参数, 它们分别为:

$$\Omega_{\delta} = LZ_{\delta}(E_{\delta} - \frac{E_{\delta} + E_{\alpha}}{2}) \quad (5)$$

$$\Omega_{\alpha} = (LZ_{\alpha} - \frac{E_{\delta} + E_{\alpha}}{2}) \quad (6)$$

上两式中的  $Z_{\delta}$  和  $Z_{\alpha}$  为  $\delta$ -Pu 和  $\alpha$ -Pu 晶体的配位数,  $E_{\delta}$ 、 $E_{\alpha}$  和  $E_{\alpha}$  分别为  $\delta$ -Pu 原子对、 $\alpha$ -Pu 原子对和合金元素的原子对的结合能,  $E_{\delta}$  和  $E_{\alpha}$  为  $\delta$ -Pu 原子、 $\alpha$ -Pu 原子分别与合金元素结成原子对的结合能。

$\Omega_{\delta}$  和  $\Omega_{\alpha}$  是随  $E_{\delta}$ 、 $E_{\alpha}$  和  $E_{\alpha}$  变化的, 当合金元素一定时,  $E_{\delta}$ 、 $E_{\alpha}$  和  $E_{\alpha}$  就有定值, 因此, 对于特定的合金来说,  $\Omega_{\delta}$  和  $\Omega_{\alpha}$  是常数。

两相自由能之差:

$$\begin{aligned} \Delta G &= G_{\delta} - G_{\alpha} \\ &= (1 - N)(G_{\delta}^0 - G_{\alpha}^0) + (\Omega_{\delta} - \Omega_{\alpha})(1 - N)N + (V_{\delta} - V_{\alpha})p \\ &= (1 - N)\Delta G^0 + (\Omega_{\delta} - \Omega_{\alpha})(1 - N)N + \Delta Vp \end{aligned} \quad (7)$$

我们所研究的合金的溶质在百分之几(原子)范围, 因此, 可以近似地假定合金的摩尔体积为组元体积之和, 并且溶质对于形成  $\delta$  相和  $\alpha$  相合金铁体积贡献相同, 亦即:

$$V_{\delta} = (1 - N)V_{\delta}^0 + NV^0 \quad (8)$$

$$V_{\alpha} = (1 - N)V_{\alpha}^0 + NV^0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{\delta} - V_{\alpha} \\ &= (1 - N)(V_{\delta}^0 - V_{\alpha}^0) \end{aligned}$$

$$= (1 - N)\Delta V^{\circ} \quad (10)$$

式中的  $V^{\circ}_{\delta}$ 、 $V^{\circ}_{\alpha}$  和  $V^{\circ}_{\text{合金}}$  分别为室温时纯体的  $\delta$  相、 $\alpha$  相和合金元素的摩尔体积

将(10)式代入(7)式中得到:

$$\Delta G = (1 - N)\Delta G^{\circ} + (\Omega_{\delta} - \Omega_{\alpha})(1 - N)N + (1 - N)\Delta V^{\circ}p \quad (11)$$

当  $p = p_{\alpha}$  时,  $\Delta G = 0$ , 于是得:

$$\Delta G^{\circ} + (\Omega_{\delta} - \Omega_{\alpha})N + \Delta V^{\circ}p_{\alpha} = 0 \quad (12)$$

当  $p_{\alpha} = 0$  时,  $N = N_0$  (常压下将  $\delta$  相稳定至室温所需的某种合金元素的最少含量), 故得:

$$\Omega_{\delta} - \Omega_{\alpha} = \frac{-\Delta G^{\circ}}{N_0} \quad (13)$$

将此值代入(12)式得出:

$$p_{\alpha} = \left(\frac{\Delta G^{\circ}}{\Delta V^{\circ}N_0}\right)N - \frac{\Delta G^{\circ}}{\Delta V^{\circ}} \quad (14)$$

此式即为  $\delta \rightleftharpoons \alpha$  平衡压力与合金元素含量之间的关系。方程式中似乎只有  $\delta$  的参量而无合金元素的参量。实际上合金元素的参量包含在  $N_0$  中。因为不同的元素有不同的  $E_{\delta}$  和  $E_{\alpha}$  值, 因而有不同的  $\Omega_{\delta}$  和  $\Omega_{\alpha}$ , 从而由(13)式知有不同的  $N_0$  值。

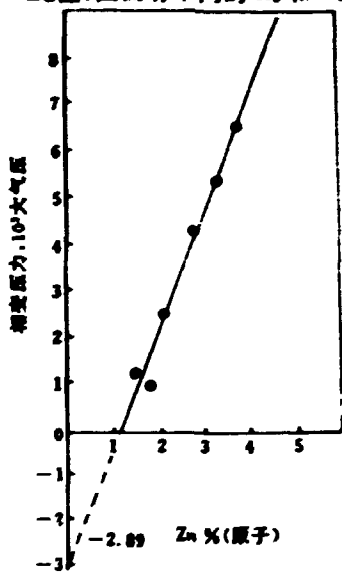


图2 Pu-Zn 合金的  $\delta \rightleftharpoons \alpha$  相变压力与 Zn 含量的关系<sup>(1)</sup>

$m = 2440 \text{atm}^{\circ} / \text{Zn}\% (\text{原子})$ ;  
 $N_0 = 1.2\% (\text{原子})$ ;  
 $p_{\alpha} = -2890 \text{atm}$ .

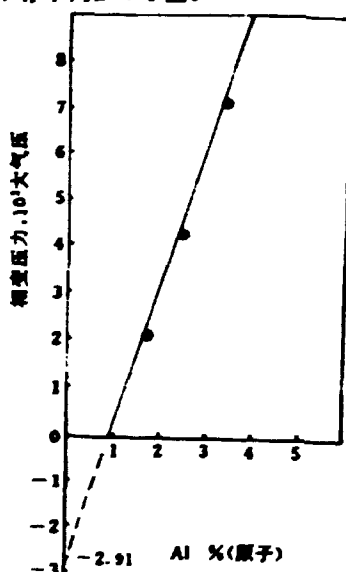


图3 Pu-Al 合金的  $\delta \rightleftharpoons \alpha$  相变压力与 Al 含量的关系<sup>(1)</sup>

$m = 2910 \text{atm}^{\circ} / \text{Al}\% (\text{原子})$ ;  
 $N_0 = 1\% (\text{原子})$ ;  
 $p_{\alpha} = -2910 \text{atm}$ .

## 2 $p_c$ - $N$ 理论方程对实验现象的解释

利用方程式(14), 可以解释下面一些实验结果:

•  $1 \text{atm} = 101325 \text{Pa} / \text{Zn}$

(1)  $\Delta G^\circ$  和  $\Delta V^\circ$  为纯铈的热力学参数,均为负值常数,因而  $\Delta G^\circ/\Delta V^\circ$  为正值常数。对于既定的合金元素来说,  $N_0$  为一定值,所以  $\Delta G^\circ/\Delta V^\circ N_0$  亦是正值常数,因此,(14)式恰当地表达了  $p_c$  随  $N$  呈直线增加的关系,符合各研究者<sup>[3-6]</sup>得出的实验规律(见图2~5)。

(2) 对直线方程式(14)进一步分析可以看出,直线的斜率  $m = (\frac{\Delta G^\circ}{\Delta V^\circ}) (\frac{1}{N_0})$ ,亦即  $m \propto \frac{1}{N_0}$ 。就是说,在常压下稳定  $\delta$ -Pu 至室温所需的合金元素的最少含量( $N_0$ )愈小,则该种合金元素与铈组成的  $\delta$ -Pu 合金对压力的稳定性(相变压力增值与溶质含量增值的比率,即斜率  $m$ )愈高。将各研究者对 Pu-Zn, Pu-Al 和 Pu-Ga 合金测定的  $N_0$  和  $m$  作出如图6所示的  $m \sim \frac{1}{N_0}$  关系图,由于两个研究者测得的 Pu-Ga 合金的  $N_0$  和  $m$  值有差别,若采用文献[5]的数据,则各种合金的  $m$  与  $\frac{1}{N_0}$  构成线性增长关系,图中的虚线是理论计算值(计算方法将在后面叙述),它与实验值具相同趋势,但量值有系统误差。

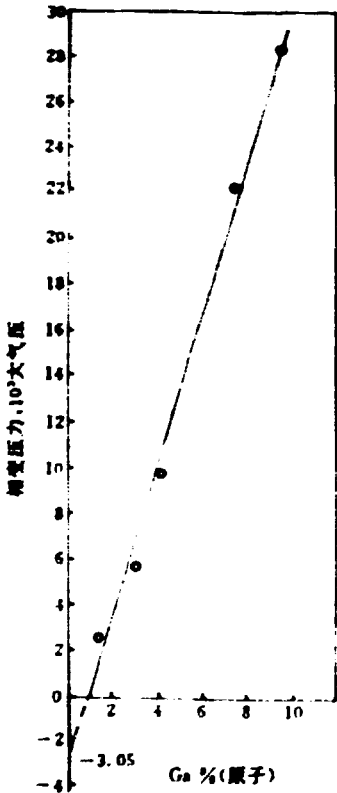


图4 Pu-Ga 合金的  $\delta \rightarrow \alpha$  相变压力与 Ga 含量的关系<sup>[3]</sup>

$$m = 3390 \text{ atm/Ga}\% (\text{原子});$$

$$N_0 = 0.9\% (\text{原子});$$

$$p_c = -3050 \text{ atm}.$$

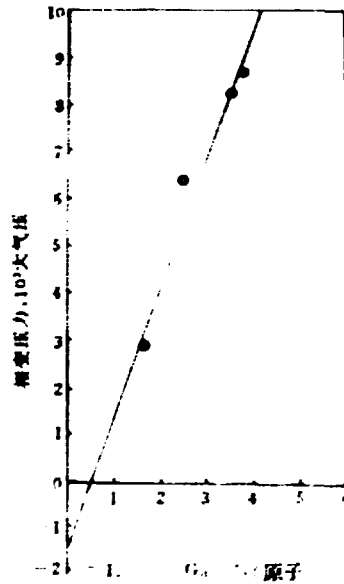


图5 Pu-Ga 合金的  $\delta \rightarrow \alpha$  相变压力与 Ga 含量的关系<sup>[5]</sup>

$$m = 2930 \text{ atm/Ga}\% (\text{原子});$$

$$N_0 = 0.6\% (\text{原子});$$

$$p_c = -1750 \text{ atm}.$$



(3) 当  $N_2=0$  时, 则成为纯铀的  $\delta \rightleftharpoons \alpha$  相变, 其室温时相平衡压力  $p_0$  等于  $p-N$  方程外推到  $N=0$  时在  $p$  轴上的截距  $p_0$ , 其值为  $-\Delta G^\circ/\Delta V^\circ$ , 是一负值常数, 表征了纯铀在室温发生  $\delta \rightleftharpoons \alpha$  反应的虚构性涵义. 不论任何  $\delta$ -Pu 合金, 其相变压力与成分的关系直线在  $p$  轴上的截距理应相等. 由图 2~4 可以看出, Pu-Zn, Pu-Al 和法国研究者<sup>(6)</sup> 的 Pu-Ga 在  $p$  轴上的截距分别为 -2890、-2910 和 -3050atm. 它们之间的差别在实验误差范围之内, 与理论分析符合. 文献[5]的 Pu-Ga 合金的  $p_0$  值为 -1760atm (见图 5), 与前三者的数据值相差较大.

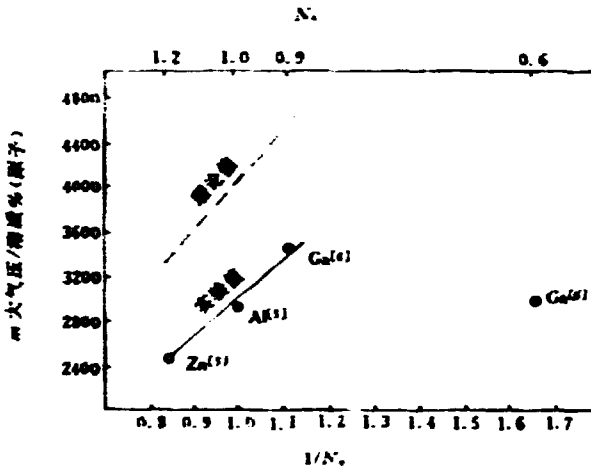


图 6  $\delta$ -Pu 合金的压力稳定性与稳定  $\delta$  相至室温所需的最小合金元素含量的关系

### 3 计算相平衡压力有关参量的求值法

由方程式(14)可以看出, 要计算  $p_0$ , 必须要有  $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta V^\circ$  和  $N_2$  的数据. 下面分别叙述各参量的求值方法.

#### 3.1 $\Delta G^\circ$ 的计算

$$\Delta G^\circ = G_2^\circ - G_1^\circ$$

根据热力学数据手册<sup>(1)</sup>,  $G_2^\circ = -3667\text{cal}^\circ/\text{mol}$ . 纯铀的  $\delta$  相在室温是不稳定的,  $G_1^\circ$  可根据  $\delta$  相区温度的自由能  $G_{\delta(T)}$ , 熵  $S_{\delta(T)}$  (或热函  $H_{\delta(T)}$ ) 和比热容  $c_p$  按下式计算:

$$\begin{aligned} G_{\delta(T)} - G_2^\circ &= (H_{\delta(T)} - H_2^\circ) - (TS_{\delta(T)} - 298S_2^\circ) \\ G_1^\circ &= G_{\delta(T)} - (H_{\delta(T)} - H_2^\circ) + TS_{\delta(T)} - 298S_2^\circ \\ &= G_{\delta(T)} - \int_{298}^T c_p dT + TS_{\delta(T)} - 298(S_{\delta(T)} - \int_{298}^T c_p \frac{dT}{T}) \\ &= G_{\delta(T)} - \int_{298}^T c_p dT + (T - 298)S_{\delta(T)} + 298 \int_{298}^T c_p \frac{dT}{T} \end{aligned} \quad (15)$$

文献[13]中给出 600K 时的  $G_{\delta(T)} = -8968\text{cal}/\text{mol}$ ;  $S_{\delta(T)} = 21.974\text{cal}/(\text{K}\cdot\text{mol})$ ;  $c_p$

• 1cal = 4.1868J

= 11.2 cal/(mol·K)。将这些数值代入(15)式,求得  $G_2 = -3379$  cal/mol。于是得到:

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= G_2 - G_1 \\ &= -3677 - (-3379) \text{ cal/mol} \\ &= -298 \text{ cal/mol} \\ &= -12307 \text{ cm}^3 \cdot \text{atm/mol} \end{aligned}$$

### 3.2 $\Delta V^\circ$ 的计算

$$\Delta V^\circ = V_2^\circ - V_1^\circ;$$

$$\text{而 } V_1^\circ = \frac{M}{\rho}$$

式中,  $M$  = 铀的原子量 = 239g;  $\rho$  = 室温时纯铀  $\delta$  相的密度 = 19.86g/cm<sup>3</sup>。  
由此得:

$$V_1^\circ = 239/19.86 = 12.034 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

纯铀  $\delta$  相室温密度  $\rho$ , 可根据  $\delta$ -Pu 合金的密度-成分数据, 外推至溶质含量为零时求得。文献上报道的某些  $\delta$ -Pu 合金的密度与其合金元素含量均构成直线关系(例如图 7 所示)由外推法得出的  $\rho$  值列于表 1。

表 1 根据  $\delta$ -Pu 合金的密度-成分关系得出的  $\rho$  值

研究的合金成分范围 %(原子)	数据来源	外推求得的 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Pu-(1.7~12.5)Al	[5]	15.86
Pu-(3.4~10)Ce	[5]	16.00
Pu-(1.7~10)Ga	[5]	15.94
Pu-(1.24~4.22)Ge	[15]	15.88

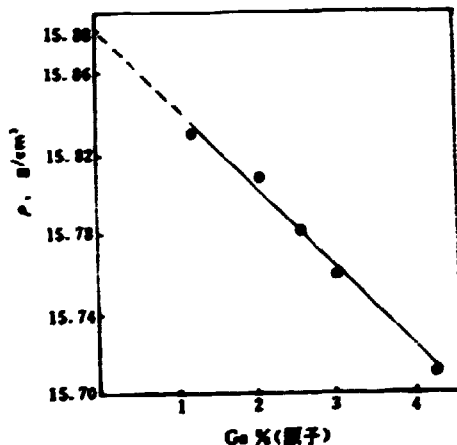


图 7 Ga 含量对  $\delta$  相 Pu-Ga 合金密度的影响<sup>[15]</sup>

$$\Delta V^\circ = V_2^\circ - V_1^\circ = 12.034 - 15.06 = -3.026 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

由文献[5]的 Pu-Ce 和 Pu-Ga 合金数据求得的  $\rho$  大于纯的  $\delta$ -Pu 在 320°C 时的密度

15.92g/cm<sup>3</sup>。众所周知,δ-Pu 具有负的膨胀系数,其室温密度应低于 15.92g/cm<sup>3</sup> 才合理。因此,这两个数据不可取。其余两个数据符合逻辑,且数值十分接近,故取两者的平均值 15.87g/cm<sup>3</sup> 进行计算。于是可得:

$$V_0 = 239/15.87 = 15.06\text{cm}^3/\text{mol}$$

### 3.3 关于 $N_0$ 值

由(13)式知  $N_0 = \frac{-\Delta G}{\Omega_1 - \Omega_2}$ , 因缺乏  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  数据,难以计算,只能利用实验值。

$N_0$  值的确定一般应用两种方法,其一是根据相变压力与合金成分的直线关系,外推至零压时的合金含量,即为稳定 δ-Pu 至室温所需的最小合金元素含量<sup>[5-6]</sup>;另一种方法是测定合金的成分和密度(或其它物理量、力学性能等)的关系,从关系曲线的极大值或极小值,或斜率的变化而得出  $N_0$  值<sup>[1]</sup>。

## 4 计算值实验值的比较

将上面计算出的  $\Delta G$  和  $\Delta V$  代入(14)式,得到:

$$p_0 = \left(\frac{4070}{N_0}\right)N - 4070 \quad (16)$$

其  $p_0$  值恒等于 -4070atm, 利用各研究者确定的各种钚合金的  $N_0$ , 于(16)式,即可计算出该种合金系不同浓度含量时的相平衡压力,δ 相钚合金对压力的稳定性,可以用它们的  $m$  值来衡量。表 2 列出了各种合金的  $m$  和  $p_0$  的计算值和实验值,以资比较。

表 2 相变压力值的计算值与实验值

合金系	实验数据来源	$N_0$ , % (原子) (实验确定)	$m$ , 大气压/浓度/% (原子)		$p_0$ , (atm)	
			实验值	计算值	实验值	计算值
Pu-Zn	[5]	1.2	2400	3390	-2890	-4070
Pu-Al	[5]	1.0	2910	4070	-2910	-4070
Pu-Ga	[6]	0.9	3390	4520	-3050	-4070
Pu-Ga	[5]	0.6	2930	6700	-1760	-4070

由表中的数据可以看出, Pu-Al, Pu-Zn 和文献[6]的 Pu-Ga 合金的计算值与实验值比较接近,相差 25~29%。文献[5]的 Pu-Ga 合金的实验值与计算值差别较大,达 57%。

计算所得的压为 δ 相平衡时的压力,实际上,固态相变很少在接近热力学平衡条件下发生,一般都要滞后。按理,实验测得的相变压力应高于计算获得的平衡压力。然而,表 2 的计算值反而比实验值高,其原因可能是:

(1) 计算中,应用的  $N_0$  值是根据实际相变压力而不是相平衡压力外推求得的;

(2) 计算公式是基于某些近似假设的前提下建立起来的;

(3) 合金样品不可避免地存在宏观或微观偏析,在合金元素含量偏低的区域,必然提前发生相变。

取计算值与实验值符合较好的 Pu-Zn, Pu-Al 和文献[6]中 Pu-Ga 的  $p_0$  值的实验平均值 -2950atm 代替(16)式的 -4070atm, 则可以得到实际相变压力  $p_0$  与  $N$  的关系式:

$$p_0 = \left(\frac{2950}{N_0}\right)N - 2950 \quad (17)$$

## 5 对某些二元 $\delta$ -Pu 合金相变压力的预测

除了上面所述的三个  $\delta$  个钚合金系之外,文献[1]还发表了其它一些可稳定  $\delta$  相钚的合金元素的最小含量数据。这些数据大多是用密度-成分方法测定的。这些合金的高压相变行为尚无资料报道。如果它们在高压下均发生  $\delta \rightarrow \alpha$  相变的话,则可应用各种合金的  $N_c$  值于(17)式计算相变压力或相变压力线的斜率  $m$ 。表3是计算的结果。这种预测是否正确,有待于实践验证。

表3 某些  $\delta$ -Pu 合金相变压力预测  
(假定相变为  $\delta \rightarrow \alpha$  反应)

合 金	$N_c, \%$ (原子) <sup>[1]</sup>	$m$ , 大气压/溶质 $\%$ (原子)
Pu-Sc	2.75 ± 0.25	980~1180
Pu-Lu	4.1 ± 0.3	670~780
Pu-Tm	<5.0	>590
Pu-Er	4.1 ± 0.3	670~780
Pu-Dy	4.1 ± 0.3	670~780
Pu-In	3.6 ± 0.5	950~720
	<3.4 <sup>a</sup>	>870
Pu-Tl	4.4 ± 0.6	590~780
Pu-Hi	4.6 ± 0.5	580~720
Pu-Zr	7.0 ± 0.5	400~450

<sup>a</sup> 文献[5]报道 Pu-3.4%(原子)In 的相变压力为 1520atm,表明其  $N_c$  值 < 3.4%(原子)In。

### 参 考 文 献

- [1] K. A. Gschneidner, et al. In: Plutonium 1960, E. Grosse, et al. eds. Cleaver-Hume Press, London, 1961. 134~142
- [2] F. H. Ellinger, et al. J. Nucl. Mat. 1964 (12), 226~236
- [3] F. H. Ellinger, et al. J. Nucl. Mat. 1966 (20), 83
- [4] Alfred Goldberg. J. Nucl. Mat. 1967 (60), 137~144
- [5] R. O. Elliott and K. A. Gschneidner. LA-2312, 1959
- [6] M. C. Roux, et al. In Plutonium 1965, A. E. Kay and M. B. Waldon, eds. London, 1967.
- [7] E. G. Zukas et al. LA-UR-81-2456, 1981
- [8] P. H. Adler, G. B. Olson and D. S. Margolies, Acta Metall, 1986 (34) 2053~2064
- [9] B. R. Spicer and J. S. White. J. Nucl. Mat. 1967 (22)
- [10] Alfred Goldberg, Robert L. Rose and John C. Shyne, J. Nucl. Mat. 1975 (55), 33~52
- [11] M. A. Choudhry and A. G. Crocker. J. Nucl. Mat. 1985 (27), 119~124.
- [12] 胡庚祥、钱苗根主编。金属学。上海科学技术出版社, 1983. 151~154
- [13] I. Barin and O. Knacke. Thermochemical Properties of Inorganic Substances, New York, 1973.
- [14] O. J. Wick 主编。钚手册。核科学技术情报所图书馆, 1972 3~2
- [15] H. R. Gardner BNWL-13, 1965

**8 相二元钒合金相变压力的热力学分析**

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

中国核情报中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 7 千字

1992 年 1 月北京第一版 · 1992 年 1 月北京第一次印刷

ISBN7-5022-0635-3

TL · 379

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN7-5022-0635-3

TL • 379

P.O.Box 2103

Beijing, China