

RE-X 二元合金相图的热力学数据库

刘兴军¹, 张红玲¹, 王书亮¹, 王翠萍¹, 潘复生², 汤爱涛², 赵栋梁³

- (1. 厦门大学 材料学院, 厦门 361005;
2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;
3. 北京钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 利用 CALPHAD 方法, 采用亚正规溶液模型、亚点阵模型以及理想气体模型来描述 RE-X (Ag, Bi, Cr, Mn, Mo, V, Zn) 中二元系各相的 Gibbs 自由能, 并结合相平衡及热力学性质的实验结果, 对 Ag-RE (RE: Sc, Y, Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Er), Bi-RE (RE: Nd, Tm, Er, Ho, Pr, Gd), Cr-RE (RE: Ce, Nd, Sm, Lu), Mn-RE (RE: Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), Mo-RE (RE: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), V-RE (RE: La, Ce, Pr, Nd, Ho, Lu) 和 Zn-RE (RE: Y, Ce, Pr, Nd, Sm) 各二元系相图进行热力学优化与计算。计算结果与实验数据取得很好的一致性, 并结合其他相关稀土二元系相图热力学计算, 初步建立部分稀土二元合金相图的热力学数据库。该热力学数据库可以提供相平衡及热力学性质等多种信息, 为外推计算稀土多组元体系的相平衡提供理论基础, 并为高性能稀土合金材料的设计及制备提供重要的理论指导。

关键词: 稀土合金; 相图; 热力学计算

中图分类号: TG 113.14

文献标志码: A

Thermodynamic database of phase diagram in RE-X binary alloy systems

LIU Xing-jun¹, ZHANG Hong-ling¹, WANG Shu-liang¹, WANG Cui-ping¹, PAN Fu-sheng²,
TANG Ai-tao², ZHAO Dong-liang³

- (1. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Beijing General Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The thermodynamic assessments of phase diagrams in the Ag-RE (RE: Sc, Y, Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Er), Bi-RE (RE: Nd, Tm, Er, Ho, Pr, Gd), Cr-RE (RE: Ce, Nd, Sm, Lu), Mn-RE (RE: Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), Mo-RE (RE: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), V-RE (RE: La, Ce, Pr, Nd, Ho, Lu) and Zn-RE (RE: Y, Ce, Pr, Nd, Sm) binary alloy systems were carried out by using calculation of phase diagrams (CALPHAD) method on the basis of the experimental data including thermodynamic properties and phase equilibria. The Gibbs free energies of the solution phases were described by the subregular solution model with Redlich-Kister equation, and those of the intermetallic compounds and gas phase were, respectively, described by sublattice model and ideal gas model. A consistent set of thermodynamic parameters were derived to describe the Gibbs free energies of each solution phase and intermetallic compound. The calculated phase diagrams and thermodynamic properties are in good agreement with the experimental data. The primary thermodynamic database of rare earth alloys is developed, which will provide important information including phase diagrams and various thermodynamic properties for development of rare earth alloy materials.

Key words: rare earth alloys; phase diagrams; thermodynamic modeling

稀土元素由于其结构的特殊性而具有诸多其他元素所不具备的光、电、磁、热等性能, 从而可以制备

成许多能用于高新技术的新材料^[1]。中国是稀土资源大国, 稀土材料的开发具有重要的战略意义。相图作

为材料设计的“地图”，对稀土材料的开发具有重要的指导意义。因此，有效地利用稀土二元合金的实验相图及热力学性能等相关信息，开展相图的热力学计算并建立稀土合金的热力学设计系统，实现稀土合金的成分与组织的精确设计，将是一项具有重要理论价值的研究工作。

相图计算的 CALPHAD 技术^[2]是通过建立热力学模型来计算体系的相图和热力学性质，其特点是通过二元和三元等低组元系的实验数据为主建立的热力学模型和多元系的少量关键实验数据相结合，可以预测实用多元合金的相平衡、热力学性质、组元的活度和蒸汽压、相变驱动力等合金的性质等。CALPHAD 方法^[2]已经成为多元合金设计的有效手段。

本研究利用 CALPHAD 方法，结合各种实验数据对 Ag-RE (RE: Sc, Y, Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Er)、Bi-RE (RE: Nd, Tm, Er, Ho, Pr, Gd)、Cr-RE (RE: Ce, Nd, Sm, Lu)、Mn-RE (RE: Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)、Mo-RE (RE: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)、V-RE (RE: La, Ce, Pr, Nd, Ho, Lu)和 Zn-RE (RE: Y, Ce, Pr, Nd, Sm)各二元系相图进行热力学优化与计算，获得一组自洽合理的描述各相自由能的热力学参数，并结合其他相关稀土二元系相图热力学计算的文献报道^[3-12]，初步建立 RE-X 二元合金相图的热力学数据库。

1 热力学模型

1.1 液相和端际固溶体相

液相和端际固溶体相的 Gibbs 自由能都是采用亚正规溶体模型^[13]描述的，其摩尔 Gibbs 自由能表示为

$$G_m^\phi = \sum_i x_i G_i^\phi + RT \sum_i x_i \ln x_i + {}^E G_m^\phi + \Delta^{\text{mag}} G_m^\phi \quad (1)$$

式中： x_i 为 ϕ 相中组分 i 的摩尔分数； G_i^ϕ 为纯组分 i 的 ϕ 相摩尔 Gibbs 自由能； ${}^E G_m^\phi$ 为 ϕ 相的摩尔过剩自由能，用 Redlich-Kister 多项式描述：

$${}^E G_m^\phi = x_i x_j [{}^0 L_{i,j}^\phi + {}^1 L_{i,j}^\phi (x_i - x_j) + {}^2 L_{i,j}^\phi (x_i - x_j)^2 + \dots] \quad (2)$$

式中： ${}^n L_{i,j}^\phi$ 表示二元相互作用参数，可采用如下形式：

$${}^n L_{i,j}^\phi = a + bT + cT \ln T \quad (3)$$

式中： a 、 b 和 c 是待优化的热力学参数。

$\Delta^{\text{mag}} G_m^\phi$ 是磁性对 Gibbs 自由能的贡献，用如下等式描述：

$$\Delta^{\text{mag}} G_m^\phi = RT \ln(\beta + 1) f(\tau) \quad (4)$$

式中： $f(\tau)$ 是归一化温度 τ ($\tau = T/T_c^\phi$)的函数； T_c^ϕ 是

磁有序的临界温度； β 是与总磁熵有关的量。大多数情况下，设它等于每摩尔原子的玻尔(Bohr)磁矩。

本研究在计算 Mn-RE 各二元系相图时，考虑磁性自由能对相变的影响。

1.2 理想气体模型

在 RE-X 二元系中存在气相时，采用理想气体模型^[14]来描述气相的自由能。 G^{gas} 表示气相自由能，用如下等式描述：

$$G^{\text{gas}} = \sum_i x_i {}^0 G_i^{\text{gas}} + RT \sum_i x_i \ln x_i + RT \ln(P/P_0) \quad (5)$$

式中： x_i 为气相中组分 i 的摩尔分数； P_0 为标准大气压； P 为体系的实际压力； ${}^0 G_i^{\text{gas}}$ 为纯组分 i 的气相摩尔 Gibbs 自由能。

1.3 金属间化合物相

在 RE-X 体系中，线性化合物相采用通式 $A_m B_n$ 表示，该类化合物相的 Gibbs 自由能采用亚点阵模型^[15]来描述。其摩尔 Gibbs 自由能采用 $A_m B_n$ 的亚点阵模型，表达式如下：

$$\Delta G_f^{A_m B_n} = {}^0 G_f^{A_m B_n} - m {}^0 G_A^{\text{ref}} - n {}^0 G_B^{\text{ref}} - \Delta^{\text{mag}} G_m^{A_m B_n} = a' + b'T \quad (6)$$

式中： $\Delta G_f^{A_m B_n}$ 为该化合物标准形成自由能； ${}^0 G_A^{\text{ref}}$ 和 ${}^0 G_B^{\text{ref}}$ 分别为纯组元 A 和 B 的摩尔自由能；参数 a' 和 b' 是待优化的热力学参数； $\Delta^{\text{mag}} G_m^{A_m B_n}$ 是磁性自由能，也用式(4)描述。

2 RE-X 二元系相图热力学数据库的建立

本研究利用相图计算的 CALPHAD 方法^[2]，结合相平衡和热力学性质的相关实验数据，对 Ag-RE (RE: Sc^[16], Y^[17], Nd^[18], Sm, Gd^[18], Tb, Ho, Er)、Bi-RE (RE: Nd^[19], Tm^[19], Er, Ho, Pr, Gd)、Cr-RE (RE: Ce, Nd, Sm, Lu)、Mn-RE (RE: Pr^[20], Nd, Sm^[21], Eu, Tb, Dy^[20], Ho^[21], Er, Tm, Yb, Lu)、Mo-RE (RE: Sc, Y, La^[22], Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)、V-RE (RE: La, Ce, Pr, Nd, Ho, Lu)和 Zn-RE (RE: Y^[23], Ce^[24], Pr^[24], Nd^[25], Sm^[25])各二元系相图进行了热力学优化与计算，具体的工作是在 SUNDMAN 等^[2]开发的 Thermo-Calc 软件上完成的。其中，液相和端际固溶体相的 Gibbs 自由能采用亚正规溶体模型来描述，金属间化合物相的 Gibbs 自由能采用亚点阵模型来描述，而气相的 Gibbs 自由能采用理想气体模型来描述。计算结果与实验值取得了较好的一致性，得到一组合理的、用于描述

RE-X 各二元系中各相自由能的热力学参数。

本课题组的最终研究目标是建立稀土合金的热力学设计系统。目前已初步建立 RE-X 二元合金相图的热力学数据库。该数据库可以提供相平衡及热力学性质等多种信息, 例如稳定和亚稳相图的计算、热力学性质(生成焓、Gibbs 自由能、活度、熵等)的计算以及相分数与体积分数的计算等。同时, RE-X 二元系相图的热力学数据库将为稀土合金三元及多元系合金相

图的热力学计算提供重要的基础热力学参数。

3 热力学数据库的应用

3.1 RE-X 二元系相图

利用本研究建立的 RE-X 二元合金相图的热力学数据库, 计算的部分 RE-X 二元系相图如图 1 所示。

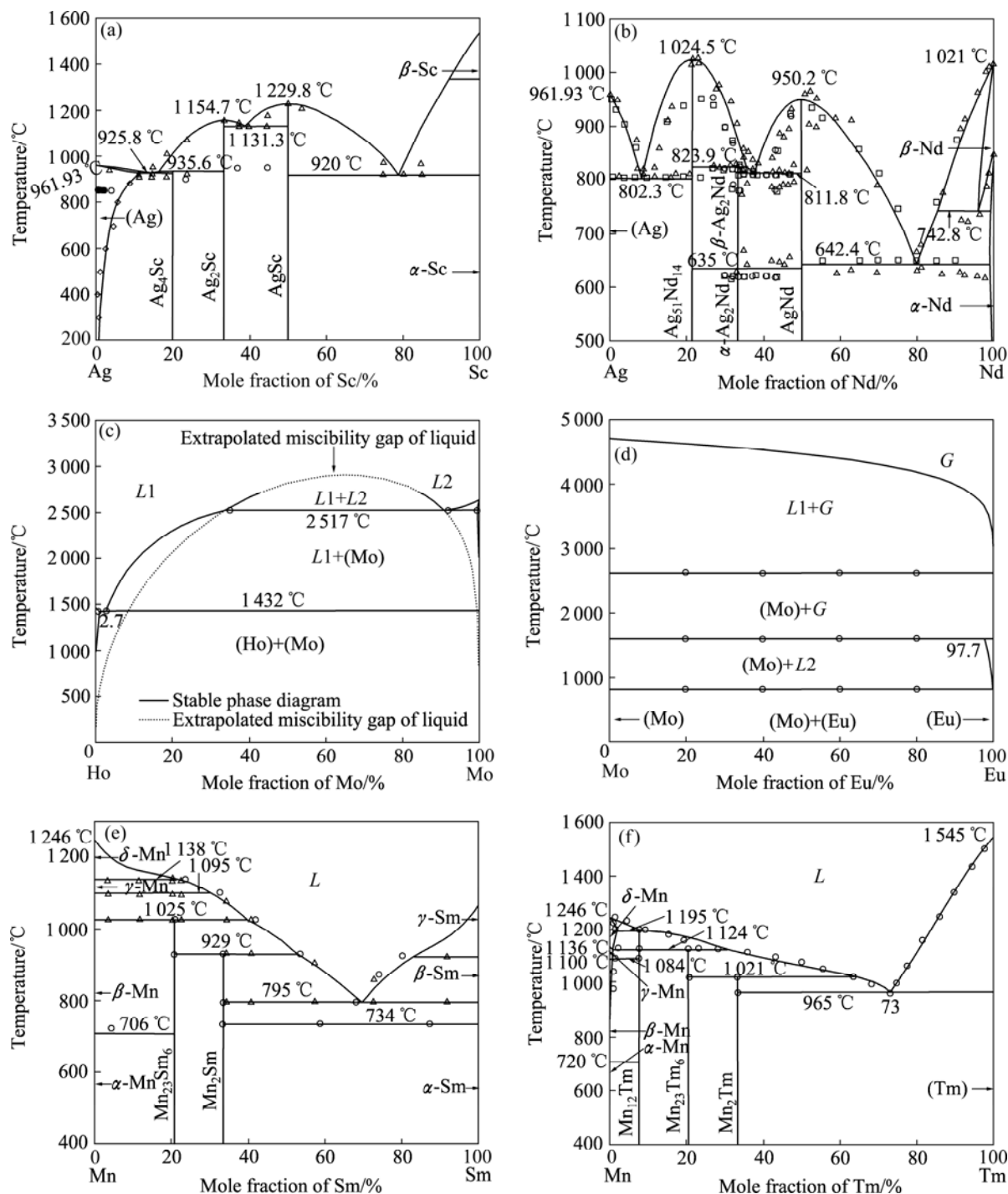


图 1 RE-X 二元系相图的计算结果

Fig.1 Calculated results of phase diagram in RE-X binary systems: (a) Ag-Sc system; (b) Ag-Nd system; (c) Mo-Ho system; (d) Mo-Eu system; (e) Mn-Sm system; (f) Mn-Tm system

图 1(a)和(b)所示分别为 Ag-Sc 和 Ag-Nd 二元系相图的计算结果与实验数据。在 Ag-Sc 和 Ag-Nd 二元系中都存在多个线性化合物相, 包含多个不变系反应, 都呈现出比较复杂的相平衡关系, 并利用该热力学数据库可以准确地计算出 Ag-Sc 和 Ag-Nd 二元系的相平衡, 本研究优化计算结果与实验值取得了较好的一致性。图 1(c)所示为 Mo-Ho 二元系的计算相图, 该体系中在高温存在稳定的液相两相分离, 并在 2 517 K 下发生偏晶反应 $L2 \leftrightarrow L1 + (\text{Mo})$, 图 1(c)中的虚线所示为计算的亚稳液相两相分离的相界限。图 1(d)所示为 Mo-Eu 二元系相图的计算结果, 在该体系中利用理想气体模型对气相的相界线进行了计算, 如图 1(d) 所示, 该体系的相平衡关系可以通过热力学计算得以准确地再现。图 1(e)和(f)所示分别为 Mn-Sm 和 Mn-Tm 二元系相图的计算结果, 在计算 Mn-Sm 和 Mn-Tm 二元系相图时, 考虑了磁性自由能的贡献, 如图 1(e)和(f)所示, 本研

究优化计算的结果与实验值取得了较好的一致性。

3.2 RE-X 热力学性质的计算

利用本研究得到的 RE-X 二元系的热力学参数计算的部分热力学性质如图 2(a)~(d)所示。图 2(a)所示为 Mn-Sm 二元系中化合物相在 1 024 K 的形成焓的计算结果(参考态为 α -Mn 和 α -Sm)。图 2(b)所示为 Ag-Nd 二元系中化合物相在 1 073 K 时形成的 Gibbs 自由能的计算结果(参考态为液相 Ag 和液相 Nd)。图 2(c)所示为 Ag-Nd 二元系中组元 Ag 和 Nd 在液相中的活度的计算结果(参考态为液相 Ag 和液相 Nd)。图 2(d)所示为 Zn-Y 二元系中线性化合物相在 500 K 时形成焓的计算结果(参考态为 α -Y 和液相 Zn)。由计算结果可见, 该热力学数据库不仅可以很好地再现各个二元系的相平衡关系, 也可以计算出各个体系中各相的不同的热力学性质。

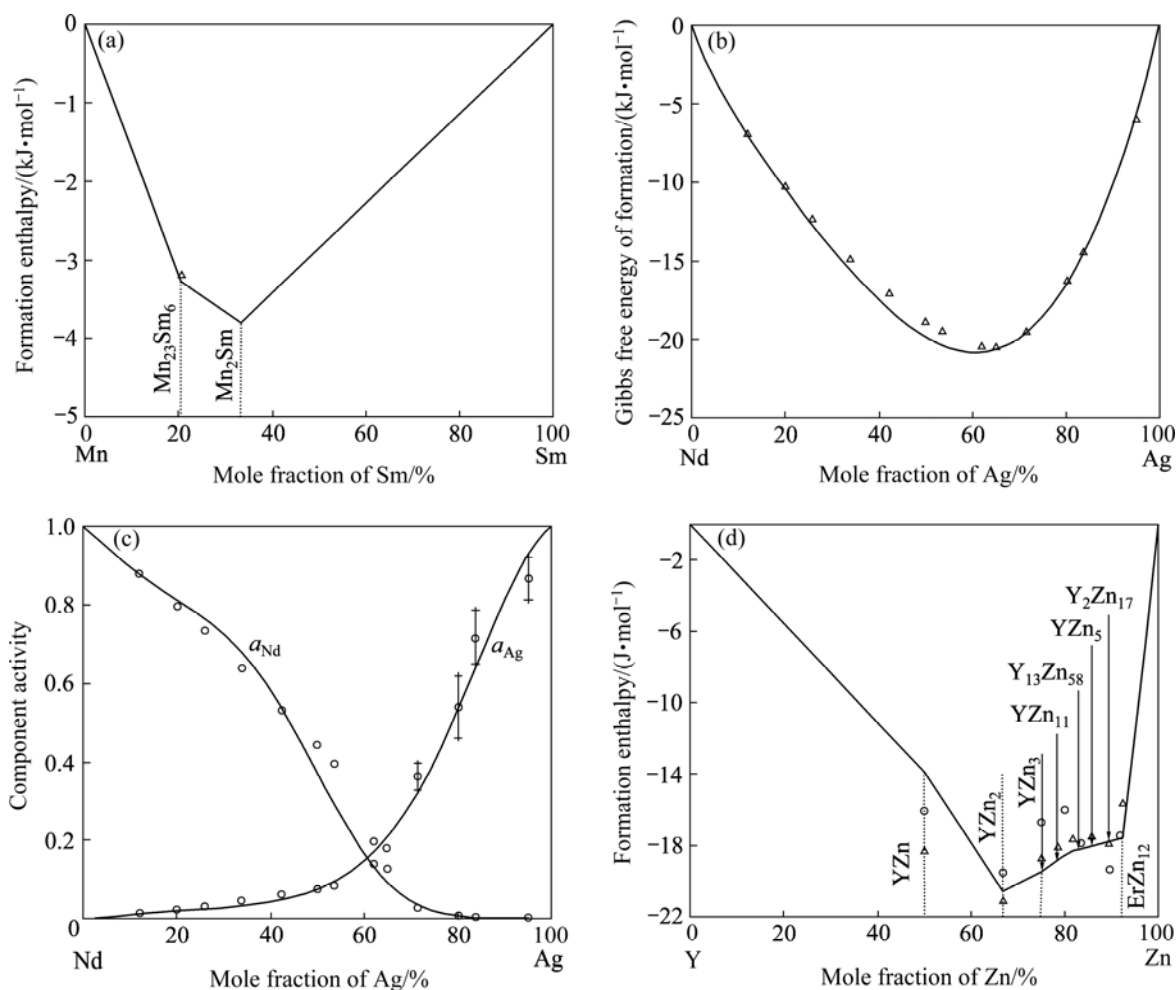


图 2 RE-X 二元系热力学性质的计算结果

Fig.2 Calculated results of thermodynamic properties in RE-X binary systems: (a) Calculated enthalpies of intermetallic compounds formation at 1 024 K in Mn-Sm system; (b) Calculated Gibbs free energies of formation at 1 073 K in Ag-Nd system; (c) Calculated activity of components at 1 073 K in Ag-Nd system; (d) Calculated entropy of formation at 500 K in Zn-Y system

3.3 稀土合金三元系相图的热力学计算

利用本研究建立的 RE-X 二元合金相图的热力学数据库, 可以为稀土多元系合金相图的热力学优化与计算提供重要的基础热力学参数。图 3 所示为计算的

Zn-Al-Ce^[26]三元系在 320 °C 时的等温截面相图, 计算结果与实验点基本吻合。图 4 所示为计算的 Zn-CeAl₂ 的垂直截面相图与实验数据。可见, 计算结果与大部分实验点吻合。

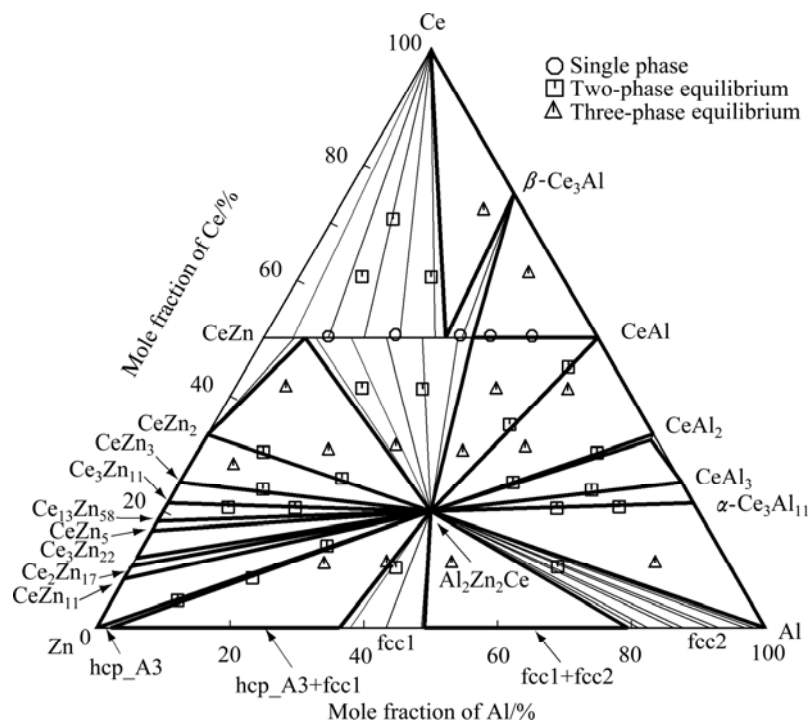


图 3 Zn-Al-Ce 三元系在 320 °C 等温截面的计算结果与实验数据的比较^[26]

Fig.3 Comparison of calculated data of isothermal section of Zn-Al-Ce system at 320 °C with experimental data^[26]

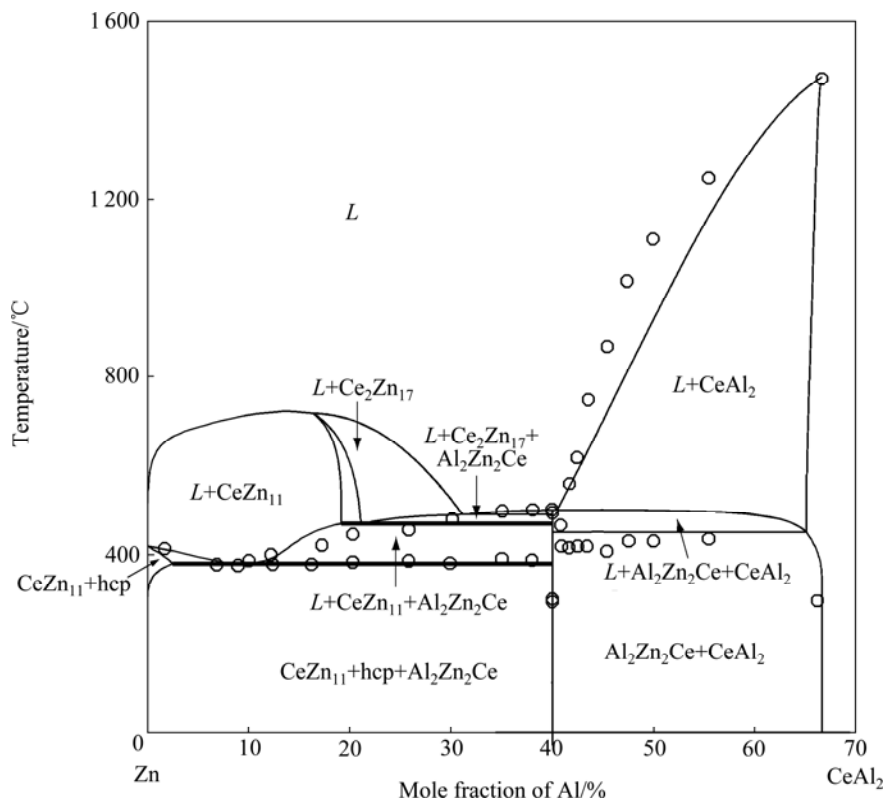


图 4 Zn-Al-Ce 三元系 Zn-CeAl₂ 垂直截面的计算结果与实验数据的比较

Fig.4 Comparison of calculated data of vertical section along Zn-CeAl₂ of Zn-Al-Ce system with experimental data

图 5(a)和(b)所示分别为计算的 Co-Mn-Pr^[27]三元系在 397 和 597 时的等温截面相图。由于该三元系中仅有 Co-Mn(597)及 Co-Pr(397)侧的部分实

验信息,本研究利用 3 个基础二元系的热力学参数,外推计算了整个成分范围内的相平衡。

图 6(a)和(b)所示分别为仅利用基础二元系的热力

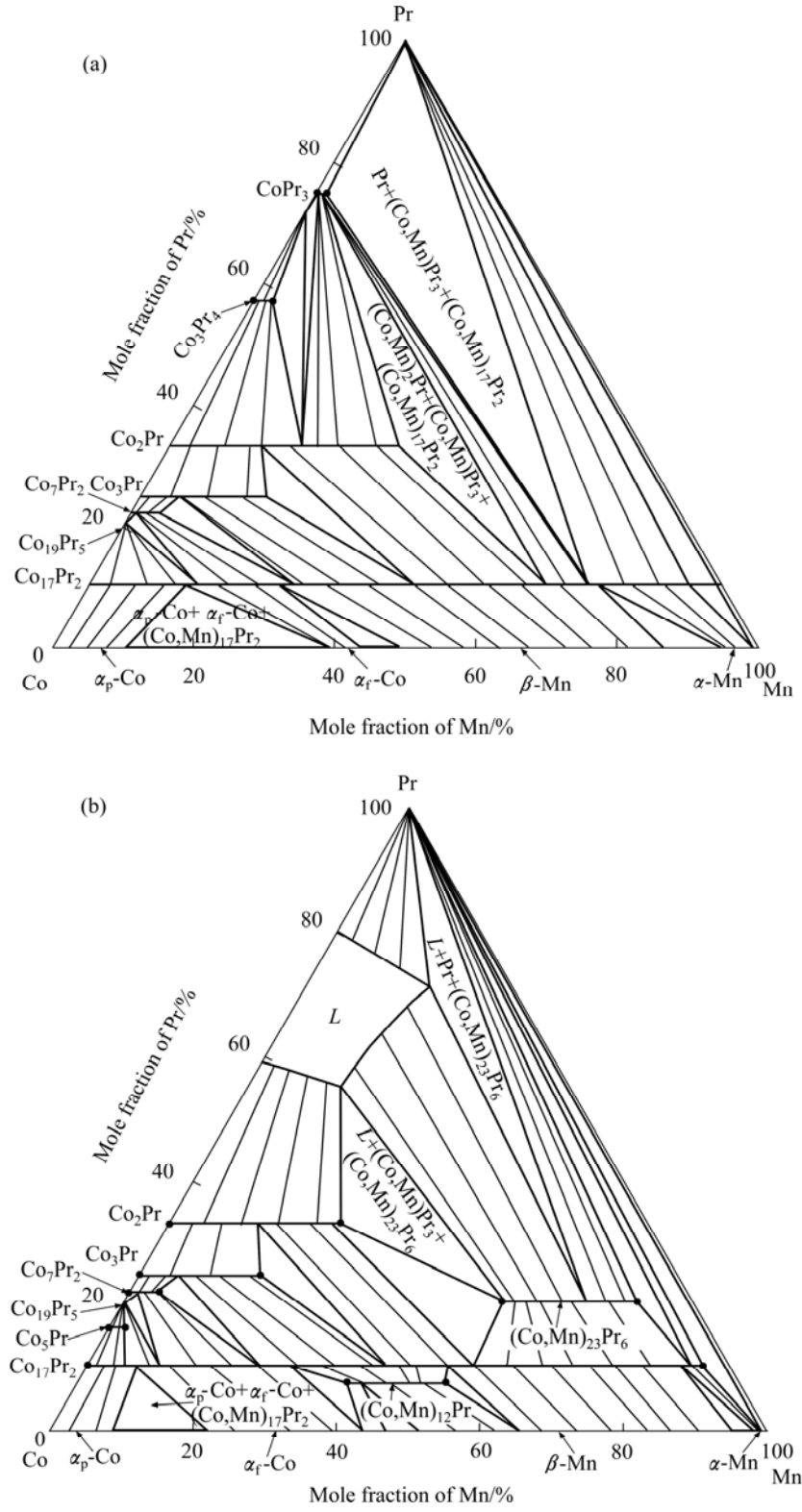


图 5 Co-Mn-Pr 三元系在不同温度时等温截面与实验数据的比较^[27]

Fig.5 Comparison of calculated data of isothermal section of Co-Mn-Pr ternary system at different temperatures with experimental data^[27]: (a) 397 ; (b) 597

学参数计算的 Co-Mn-Dy^[27]三元系在 600 和 800 时的等温截面相图。由于 Co-Dy 和 Mn-Dy 二元系中均存在多个线性化合物相, 因此 Co-Mn-Dy 三元系各等温截面相图较为复杂, 其中均出现多个三相平衡区域。在图 6(b)中出现了较大范围的液相区域, 这说

明 Dy 元素可明显降低 Co-Mn 基合金的熔点。上述外推计算的结果需要进一步的实验验证, 但这些计算结果可为稀土合金相图的进一步研究和稀土材料的合金设计提供一定的理论参考。

图 7(a)~(c)所示分别为计算的 Dy 含量为 0.1%、

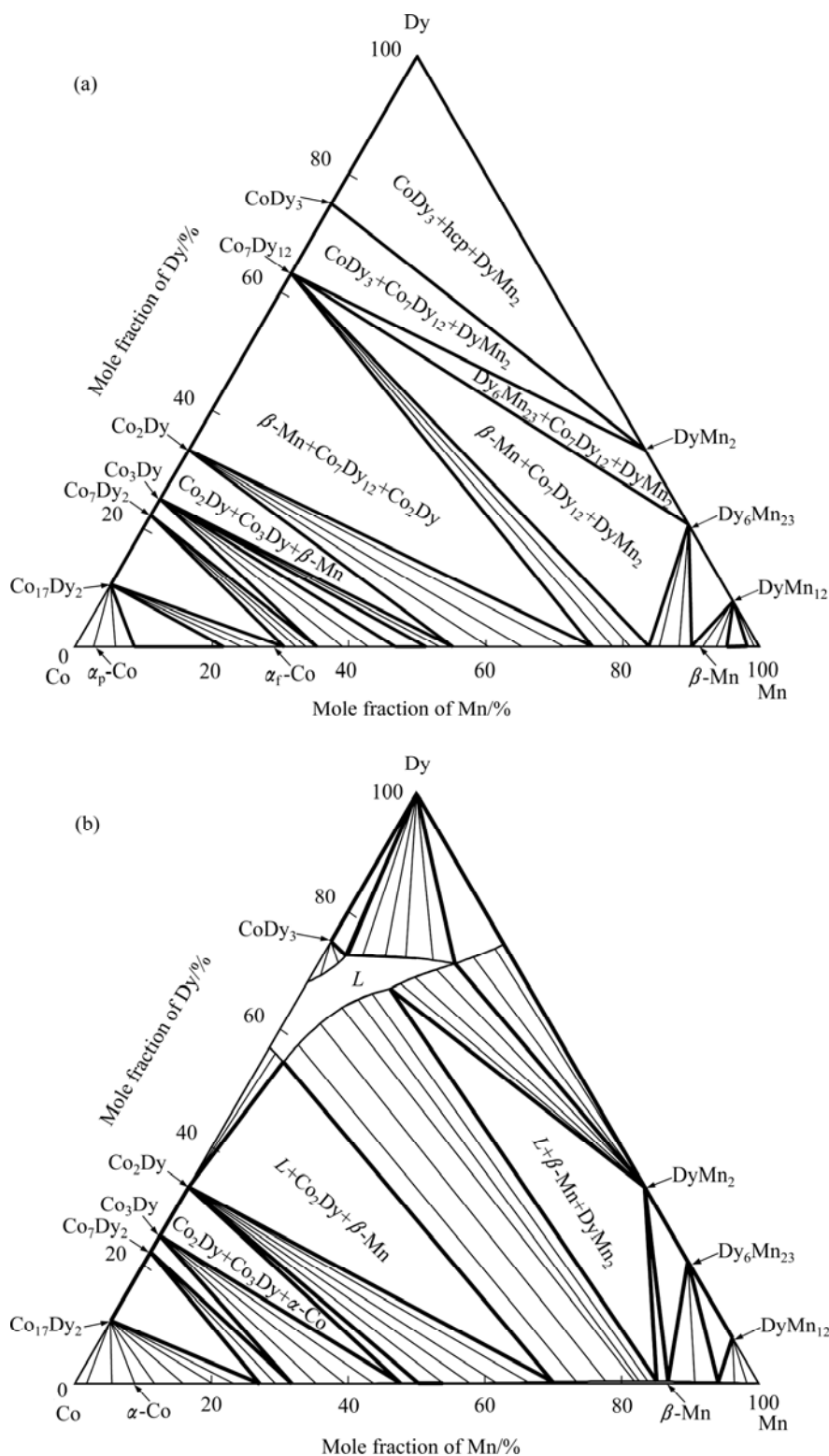


图 6 计算的 Co-Mn-Dy 三元系在不同温度时等温截面^[27]

Fig.6 Calculated isothermal section of Co-Mn-Dy ternary system at different temperatures^[27]: (a) 600 ; (b) 800

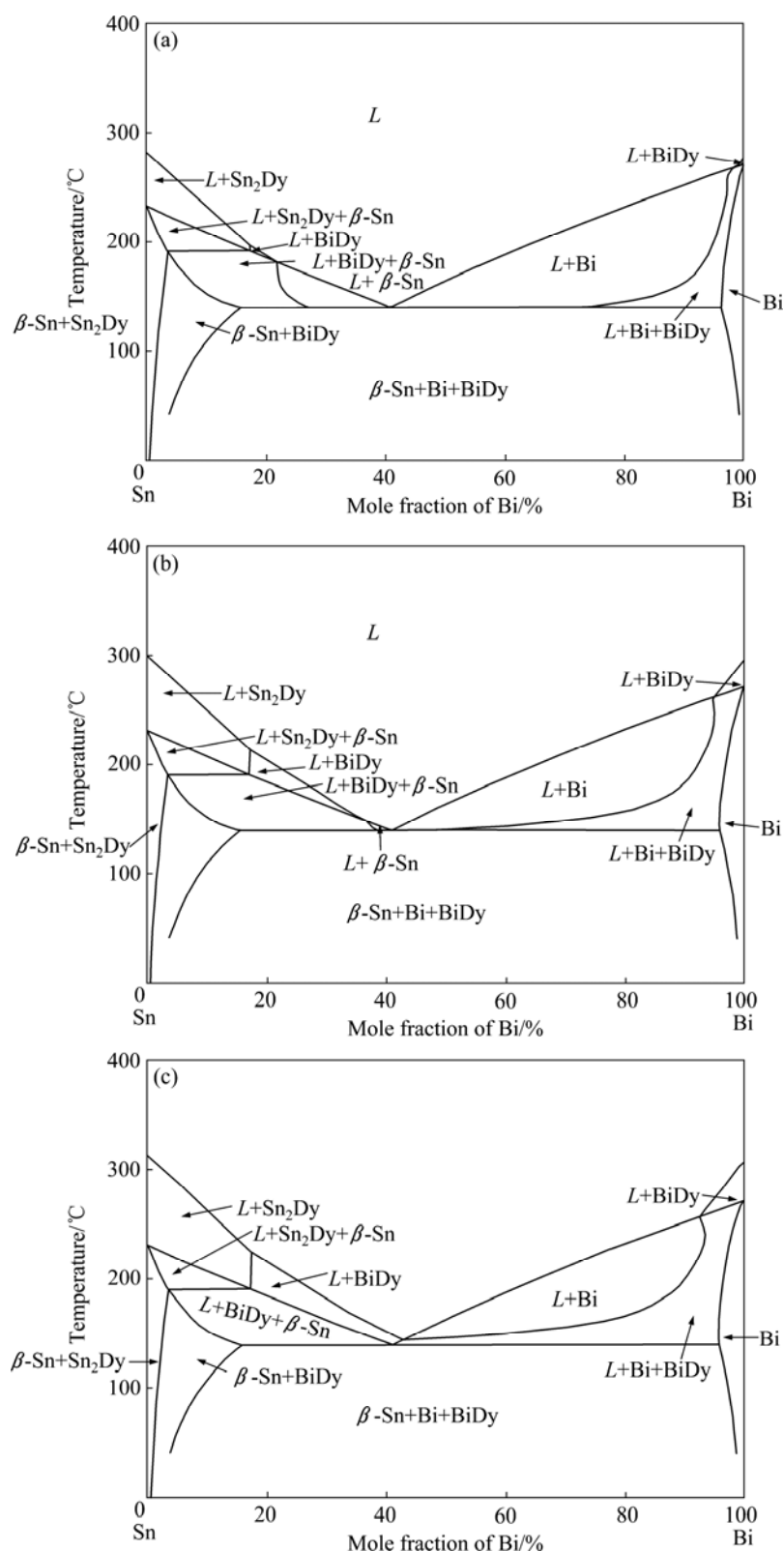


图 7 计算的 Sn-Bi-Dy 三元系在不同 Dy 含量时的垂直截面相图

Fig.7 Calculated vertical section diagrams at different Dy contents in Sn-Bi-Dy system: (a) $x(\text{Dy})=0.1\%$; (b) $x(\text{Dy})=0.2\%$; (c) $x(\text{Dy})=0.3\%$

0.2%和 0.3%(摩尔分数)时 Sn-Bi-Dy 三元系的垂直截面相图。从计算结果可以看出,当微量稀土元素 Dy 加到 0.3%时,液相先析出初晶相 BiDy,然后再发生

共晶反应,即由液相生成固溶体相 $\beta\text{-Sn}$ 和(Bi)。

图 8 所示为计算的 Sn-Bi-Dy 三元系的液相面和各个液相等温线。从图中发现两个共晶反应,一个是(E_1

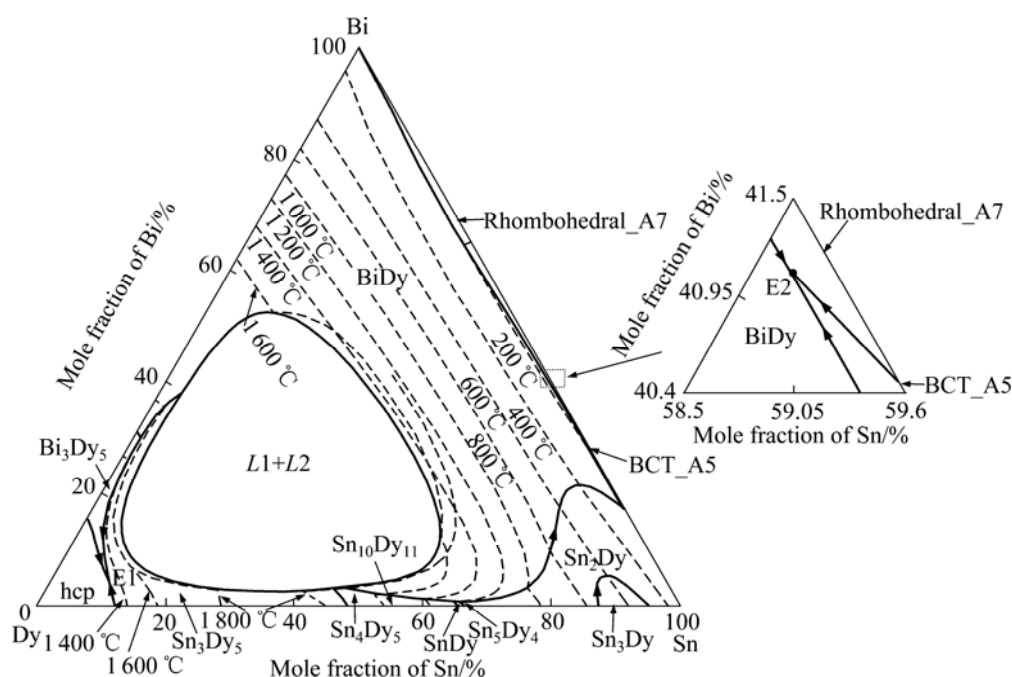


图 8 计算的 Sn-Bi-Dy 三元系的液相面

Fig.8 Calculated liquidus project of Sn-Bi-Dy system

点)在 1 177.58 K 时发生的 $L \leftrightarrow \alpha\text{-Dy} + \text{Sn}_3\text{Dy}_5 + \text{Bi}_3\text{Dy}_5$, 其中反应成分是 $x(\text{Sn})=9.1\%$, $x(\text{Bi})=3.9\%$; 另一个是(E_2 点)在 140.22 K 时发生的 $L \leftrightarrow \text{BiDy} + \beta\text{-Sn} + (\text{Bi})$, 其中反应成分是 $x(\text{Sn})=58.7\%$, $x(\text{Bi})=41.1\%$ 。把计算的 Sn-Bi-Dy 三元系低温共晶反应 E_2 的反应温度(140.22 K)和计算的 Sn-Bi 二元系的共晶反应温度(140.6 K)比较,发现加入微量的稀土 Dy(0.2%)基本没有对共晶点处的反应温度产生影响。但是,从图 7(a)~(c)可看出,当微量稀土元素 Dy 加到 0.3%时,液相先析出初晶相 BiDy,然后再发生共晶反应,即由液相生成固溶体相 $\beta\text{-Sn}$ 和(Bi),这将对焊料组织形态产生一定的影响。有研究结果显示^[28-30]:加入稀土可以细化焊料的组织,也将对焊料的铺展面积和润湿性产生影响,这些有待于以后的实验研究中解决。

4 结论

1) 本研究利用 CALPHAD 法,对 Ag-RE (RE: Sc, Y, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er), Bi-RE (RE: Nd, Tm, Er, Ho, Pr, Gd), Cr-RE (RE: Ce, Nd, Sm, Lu), Mn-RE (RE: Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), Mo-RE (RE: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), V-RE (RE: La, Ce, Pr, Nd, Ho, Lu)和 Zn-RE (RE: Y, Ce, Pr, Nd, Sm)各二元系的相图进行热力学优

化与计算,计算结果与实验值取得了较好的一致性,并初步建立 RE-X 二元合金相图的热力学数据库。

2) 该热力学数据库将为稀土多元合金相图的热力学计算提供重要的基础热力学参数,同时为稀土合金设计提供重要的理论指导。

REFERENCES

- [1] 刘光华. 稀土材料与应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LIU Guang-hua. Rare earth materials and applied technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] SUNDMAN B, JANSSON B, ANDERSON J O. The Thermo-Calc databank system [J]. CALPHAD, 1985, 9: 153-190.
- [3] LI Z, SU X P, YIN F C, CHEN C T. On the thermodynamic assessment of the Ag-La system[J]. J Alloys and Compounds, 2000, 299: 195-198.
- [4] YIN F C, HUANG M, SU X P, ZHANG P, LI Z, SHI Y. Thermodynamic assessment of the Ag-Ce (silver-cerium) system[J]. J Alloys and Compounds, 2002, 334: 154-158.
- [5] YIN F C, SU X P, LI Z, ZHANG P, HUANG M, SHI Y. On thermodynamic assessment of the Ag-Pr system[J]. J Alloys and Compounds, 2000, 307: 202-206.
- [6] ZHANG L G, LIU H S, LIU L B, JIN Z P. Thermodynamic modeling of Ag-Eu system[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14: 123-126.

- [7] ZHANG L G, MENG F G, LIU H S, LIU L B, JIN Z P. Thermodynamic assessment of the Ag-Yb system[J]. *J Alloys and Compounds*, 2008, 452: 304–306.
- [8] LONG Z H, YANG Y J, JIN S, LIU H S, JIN Z P. Thermodynamic assessment of Ag-Dy and Ag-Er binary systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2010, 489: 146–151.
- [9] GRÖBNER J, PISCH A, SCHMID-FETZER R. Thermodynamic optimization of the systems Mn-Gd and Mn-Y using new experimental results[J]. *J Alloys and Compounds*, 2001, 317/318: 433–437.
- [10] PISCH A, SCHMID-FETZER R. Experimental study and thermodynamic assessment of phase equilibria in the Mn-Sc system[J]. *Zeitschrift für Metallkunde*, 1998, 89 (10): 700–703.
- [11] TANG C Y, DU Y, ZHANG L J, XU H H, ZHU Z J. Thermodynamic assessment of the Ce-Mn system[J]. *J Alloys and Compounds*, 2007, 437(1/2): 102–106.
- [12] QI H Y, HUANG G X, LIU R D, ZHANG K, LIU L B, JIN Z P. Thermodynamic optimization of La-Zn and La-Mg-Zn systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2010, 497(1/2): 336–343.
- [13] REDLICH O, KISTER A T. Algebraic representation of thermodynamic properties and the classification of solutions[J]. *Ind Eng Chem*, 1948, 40: 345–348.
- [14] ZINKEVICH M, GEUPEL S, ALDINGER F. Thermodynamic assessment of the ternary systems Ga-Mg-O, Ga-Ni-O, Mg-Ni-O and extrapolation to the Ga-Mg-Ni-O phase diagram[J]. *J Alloys and Compounds*, 2005, 393: 154–166.
- [15] HILLERT M, STAFANSSON L I. The regular solution model for stoichiometric phase and ionic melts[J]. *Acta Chem Scand*, 1970, 24: 3618–3626.
- [16] LIU X J, WANG S L, WANG C P. Thermodynamic assessments of the Sc-M (M Ag B and Th) systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2009, 469: 186–192.
- [17] WANG S L, WANG C P, LIU X J, ISHIDA K. Thermodynamic assessments of the Ag-Y and Sc-Y systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2009, 476: 187–192.
- [18] WANG S L, WANG C P, LIU X J, ISHIDA K. Thermodynamic assessments of the Ag-Gd and Ag-Nd systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2009, 476: 245–252.
- [19] WANG C P, ZHANG H L, TANG A T, PAN F S, LIU X J. Thermodynamic assessments of the Bi-Nd and Bi-Tm systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2010, 502: 43–48.
- [20] WANG C P, LIN Z, LIU X J. Thermodynamic assessments of the Dy-Mn and Mn-Pr systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2009, 469: 123–128.
- [21] WANG C P, ZHANG H L, WANG S L, LIN Z, LIU X J, TANG A T, PAN F S. Thermodynamic assessments of the Mn-Sm and Mn-Ho systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2009, 481: 291–295.
- [22] WANG C P, WANG J, LIU X J, OHNUMA I, KAINUMA R, ISHIDA K. Thermodynamic assessment of the Co-La and Mo-La systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2008, 453: 174–179.
- [23] LIU X J, WEN M Z, WANG C P, PAN F S. Thermodynamic assessments of the Zn-Y and Al-Zn-Y systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2008, 452: 283–290.
- [24] WANG C P, CHEN X, LIU X J, PAN F S, ISHIDA K. Thermodynamic modeling of the Ce-Zn and Pr-Zn systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2008, 458: 166–173.
- [25] LIU X J, CHEN X, WANG C P. Thermodynamic assessments of the Sm-Zn and Nd-Zn systems[J]. *J Alloys and Compounds*, 2009, 468: 115–121.
- [26] 陈 星. 部分锌-稀土合金相平衡的热力学计算[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- CHEN Xing. Thermodynamic assessments of phase equilibria in some Zn-rare earth system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [27] 林 众. Co-Mn-X (X: Ta, Pt, B, Dy, Pr)三元系相平衡的热力学优化与计算[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- LIN Zhong. Thermodynamic optimization and calculation of phase equilibria in the Co-Mn-X (X: Ta, Pt, B, Dy, Pr) ternary system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [28] 袁宜耀. 稀土 Ce 对 Sn 基无铅焊料的组织、性能及界面影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- YUAN Yi-yao. Effect of Ce on microstructure, properties and interface of Sn-based lead-free solder[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.
- [29] 袁宜耀, 孙 勇, 张秀兰, 许 磊. 微量稀土元素对 Sn-Ag-Sb 系合金组织及焊料/Cu 界面组织的影响[J]. *金属功能材料*, 2008, 15(2): 33–36.
- YUAN Yi-yao, SUN Yong, ZHANG Xiu-lan, XU Lei. Effect of rare earth elements on microstructure and solder/Cu interfacial microstructure of Sn-Ag-Sb system[J]. *Metallic Functional Materials*, 2008, 15(2): 33–36.
- [30] 任志远, 范永苹, 马双彦. 富镧稀土对 AZ91 微观组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2007, 36(8): 37–43.
- REN Zhi-yuan, FAN Yong-ge, MA Shuang-yan. Effect of La-rich RE on microstructure and properties of AZ91 magnesium alloy[J]. *Material & Heat Treatment*, 2007, 36(8): 37–43.

(编辑 李艳红)