

# 基于动力学的大块金属玻璃形成能力研究

蔡安辉<sup>1</sup>, 潘冶<sup>1</sup>, 孙国雄<sup>1</sup>, 阮许平<sup>2</sup>

(1. 东南大学机械系, 南京 210096; 2. 娄底师专物理系, 湖南娄底 417000)

**[摘要]** 快速判定大块金属玻璃 (BMG) 的玻璃形成能力 (GFA) 是开发新型 BMG 的关键。基于加和性原则, 用动力学理论解释了约化玻璃转变温度  $T_{rg}$  作为合金玻璃形成能力的可行性和局限性, 为制备非晶合金提供了理论依据, 合金能形成 BMG 的最低  $T_{rg}$  为 0.406 6, 同时找到了玻璃形成能力最佳的两个理论约化玻璃温度, 即  $T_{rg}=1$  和  $T_{rg}=0$ ; 提出了判定 GFA 大小及其稳定性的两个新的参量摩尔熔化热  $\Delta H_{mg}$  和稳定性 CPS, 并用它计算了 BMG 合金系的 GFA 大小及其稳定性, BMG 的 GFA 大小顺序与井上明久 (Inoue) 的排列顺序吻合较好。同时, 按照 BMG 合金的  $Z_{max}$  和  $R_c$  的平均变化对其进行检验, 两者均吻合很好。参量  $\Delta H_{mg}$  的大小是一种快速评价 BMG 的 GFA 能力及其稳定性的好方法。

**[关键词]** 动力学; 大块金属玻璃; 玻璃形成能力; 加和原则; 稳定性

**[中图分类号]** TG139 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2004) 01-0068-06

大块金属玻璃 (BMG) 由于具有优异的物理、化学、光学、磁学和力学性能, 受到人们的普遍关注, 成为材料领域的研究热点之一。材料科学工作者从热力学、动力学<sup>[1]</sup>、物理结构<sup>[2]</sup>等方面对合金系的玻璃形成能力 (GFA) 以及添加元素的影响进行了很多有益的探讨<sup>[3-5]</sup>。最早用来衡量 GFA 的两个参数是过冷液相区  $\Delta T_x (T_x - T_g)$  和约化玻璃转变温度  $T_{rg} (T_g/T_m)$ , 随后 Lu 等人在约化玻璃转变温度  $T_{rg}$  的基础上提出了另外一种约化玻璃转变温度的表示形式, 即  $T_{rg} = T_g/T_L$  (其中  $T_L$  是熔化结束温度)<sup>[6]</sup>, 用来描述非晶 GFA 的参数以及临界冷却速度  $R_c$ ,  $T_x/T_m$ ,  $\Delta T_x = T_m - T_g$  或  $\Delta T_x = T_m - T_x$ ,  $\alpha\beta^{1/3}$  等<sup>[7]</sup>, 最近 Takeuchi 等人将  $\Delta H$  和  $S_o/k_B$  表示成多组元合金成分的函数<sup>[8]</sup>, 成功地计算出典型多组元金属玻璃的两个临界值分别为 15 kJ/mol 和 0.1, 并且  $\Delta H$  越负、 $S_o/k_B$  越大, 合金的非晶形成能力越强。井上明久 (Inoue) 提出了 BMG 合金配制的三大经验原则<sup>[9]</sup>。但是, 目前这些 GFA 判据需要测定的参数多, 甚至无法

获得, 实用性较差, 因此寻求一种快速判定合金乃至合金系的 GFA 方法, 是人们关心的问题。

笔者应用加和性原理计算了现有 BMG 合金的摩尔熔化热  $\Delta H_{mg}$  (见表 1), 用结晶动力学理论对合金系的 GFA 及其稳定性 (记为 CPS) 进行了判定, 结果与 Inoue 的分类<sup>[10]</sup> 吻合较好, 同时计算了大块金属玻璃的最大尺寸  $Z_{max}$  和临界冷却速度  $R_c$ <sup>[11-13]</sup> 的平均变化率 (见表 2), 并以它们作为合金 GFA 稳定性的目标参量, 结果也与 CPS 方法所得的结果吻合得很好, 同时用  $\Delta H_{mg}$  能够快速判判合金的 GFA 大小及其稳定性。

## 1 计算公式及其推导过程

过冷熔体的吉布斯自由能是高于晶相的, 因而存在结晶的趋势。固、液两相的自由能差为负值, 就是促使结晶相变的驱动力。依照凝固理论, 这个驱动力是影响熔体中晶核形成及成核率、晶核的临界半径、晶核长大及长大速度的决定性因素, 驱动力的大小直接影响合金能否形成金属玻璃。

表 1 BMG 的摩尔熔化热  $\Delta H_{mg}$  及其 GFA 参数

Table 1 Mole melting enthalpy and GFA parameters of BMG

合金名称	$\Delta H_{mg}$ /kJ·mol <sup>-1</sup>	$T_{rg}$	CPS /kJ·mol <sup>-1</sup>	$R_c$ /K·s <sup>-1</sup>	$Z_{max}$ /mm
Mg <sub>75</sub> Ni <sub>15</sub> Nd <sub>10</sub>	10.143 7	0.57	3.080 8	46.1	2.8
Mg <sub>65</sub> Ni <sub>20</sub> Nd <sub>15</sub>	10.511 3	0.571	3.966 6	30	3.5
Mg <sub>70</sub> Ni <sub>15</sub> Nd <sub>15</sub>	10.053 0	0.553	3.435 9	178.2	1.5
Mg <sub>65</sub> Cu <sub>25</sub> Y <sub>10</sub>	10.893 0	0.551	3.679 2	50	7
Nd <sub>60</sub> Fe <sub>30</sub> Al <sub>10</sub>	9.925 0	0.617	4.599 9	12	15
Nd <sub>60</sub> Al <sub>15</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>10</sub> Fe <sub>5</sub>	9.788 6	0.552	3.325 9		5
Nd <sub>61</sub> Al <sub>11</sub> Ni <sub>8</sub> Co <sub>5</sub> Cu <sub>15</sub>	9.697 6	0.598	4.157 4		6
Pd <sub>77.5</sub> Cu <sub>6</sub> Si <sub>16.5</sub>	21.231 2	0.602	9.259 2	100	1.5
Pd <sub>77</sub> Cu <sub>6</sub> Si <sub>17</sub>	21.168 7	0.569	7.905 9	125	2
Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	12.068 2	0.69	7.092 6	0.1	72
Pd <sub>81.5</sub> Cu <sub>2</sub> Si <sub>16.5</sub>	21.047 7	0.577	8.187 3		2
Pd <sub>73.5</sub> Cu <sub>10</sub> Si <sub>16.5</sub>	20.918 7	0.568	7.771 7		2
Pd <sub>79.5</sub> Cu <sub>4</sub> Si <sub>16.5</sub>	21.018 8	0.585	8.497 6	500	0.75
Pd <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> P <sub>20</sub>	13.472 6	0.585	5.446 8	0.167	25
Pd <sub>71.5</sub> Cu <sub>12</sub> Si <sub>16.5</sub>	20.882 7	0.565	7.635 4		2
La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>10</sub>	13.151 9	0.56	4.678 9	22.5	5
La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>5</sub> Cu <sub>15</sub>	12.913 6	0.523	3.613 3	35.9	3.5
La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>20</sub>	13.615 7	0.521	3.751 8	67.5	3
La <sub>66</sub> Al <sub>14</sub> Cu <sub>20</sub>	12.972 4	0.54	4.090 8	37.5	2
La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>15</sub> Cu <sub>5</sub>	13.385 6	0.526	3.830 5	34.5	5.9
La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Ni <sub>5</sub> Cu <sub>10</sub> Co <sub>5</sub>	12.957 7	0.566	4.763 2	18.8	9
La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Cu <sub>20</sub>	12.680 1	0.509	3.165 7	72.3	3
Zr <sub>57</sub> Ti <sub>5</sub> Al <sub>10</sub> Cu <sub>20</sub> Ni <sub>8</sub>	19.300 9	0.591	8.021 9	10	20
Zr <sub>65</sub> Al <sub>7.5</sub> Cu <sub>17.5</sub> Ni <sub>10</sub>	19.849 5	0.566	7.296 7	1.5	16
Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>7</sub> Ni <sub>19</sub>	20.353 4	0.552	6.915 5	22.7	22.1
Zr <sub>41.2</sub> Ti <sub>13.8</sub> Cu <sub>12.5</sub> Ni <sub>10</sub> Be <sub>22.5</sub>	18.129 8	0.626	8.694 2	1.4	50
Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Ni <sub>26</sub>	20.678 7	0.537	6.393	66.6	
Zr <sub>38.5</sub> Ti <sub>16.5</sub> Ni <sub>9.75</sub> Cu <sub>15.25</sub> Be <sub>20</sub>	18.033 8	0.628	8.712 0	1.4	
Zr <sub>39.88</sub> Ti <sub>15.12</sub> Ni <sub>9.58</sub> Cu <sub>13.77</sub> Be <sub>21.25</sub>	17.966 9	0.625	8.584 1	1.4	
Zr <sub>42.63</sub> Ti <sub>12.37</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>11.25</sub> Be <sub>23.75</sub>	17.994 0	0.5489	6.001 2	5	
Zr <sub>44</sub> Ti <sub>11</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>10</sub> Be <sub>25</sub>	17.973 4	0.518	4.837 2	12.5	
Zr <sub>45.38</sub> Ti <sub>9.62</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>8.75</sub> Be <sub>26.25</sub>	17.962 8	0.503	4.247 9	17.5	
Zr <sub>66</sub> Al <sub>8</sub> Cu <sub>12</sub> Ni <sub>14</sub>	20.115 0	0.559	7.116 1	9.8	18.7
Zr <sub>66</sub> Al <sub>9</sub> Cu <sub>16</sub> Ni <sub>9</sub>	19.855 9	0.561	7.103 2	4.1	17.6
Zr <sub>46.25</sub> Ti <sub>8.25</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>7.5</sub> Be <sub>27.5</sub>	17.825 8	0.525	5.063 4	28	

表 2 BMG 合金系  $Z_{max}$  和  $R_c$  的平均变化及其 GFA 稳定性平均值 ( $\overline{CPS}$ )

Table 2 Average variance of  $Z_{max}$  and  $R_c$  of BMG and average values of their smooth and steady of GFA ( $\overline{CPS}$ )

合金系名称	$\overline{\Delta Z}_{max}$	$\overline{\Delta R}_c$	$\overline{T}_{rg}$	$\overline{\Delta H}_{mg}$	$\overline{CPS}$
Pd 基	5.162 5	3.446 3	0.592 6	18 976.07	7 724.55
Zr 基	1.412 7	4.659 7	0.567 7	18 926.14	6 845.11
La 基	1.272 7	1.284 1	0.535	13 096.72	3 984.89
Mg 基	1.486 5	1.948 1	0.561 3	10 400.23	3 722.48
Nd 基	1.153 8	1.000	0.589	9 803.71	4 027.70

相变驱动力在数值上等于单位体积的相变所引起的系统自由能的降低。过冷熔体结晶时, 结晶的晶体体积为  $\Delta V$ , 系统自由能的变化为  $\Delta G$ , 则结晶的相变驱动力为

$$f = -\frac{\Delta G}{\Delta V}, \quad (1)$$

根据热力学公式, 系统的吉布斯自由能为

$$G = U - TS + PV = H - TS, \quad (2)$$

1 mol 的熔体结晶时, 导致吉布斯自由能变化  $\Delta G_g$ , 即系统化学势的变化为

$$\Delta G_g = \Delta H_g - T\Delta S_g, \quad (3)$$

式中  $\Delta G_g$ ,  $\Delta H_g$  和  $\Delta S_g$  分别表示 1 mol 熔体结晶时, 固、液两相的吉布斯自由能差、热焓差和熵差。在熔点  $T_m$  时, 熔体与晶体处于两相平衡, 故

$$\Delta G_{mg} = \Delta H_{mg} - T_m\Delta S_{mg} = 0,$$

因此  $\Delta S_{mg} = \Delta H_{mg}/T_m$ , (4)

式中下角标  $m$  和  $mg$  分别表示对应于熔点时, 1 mol 熔体系统的有关物理量。

在通常情况下, 当熔体冷却温度  $T$  降低到略低于熔点  $T_m$  时, 即可发生结晶 (见图 1)。结晶时

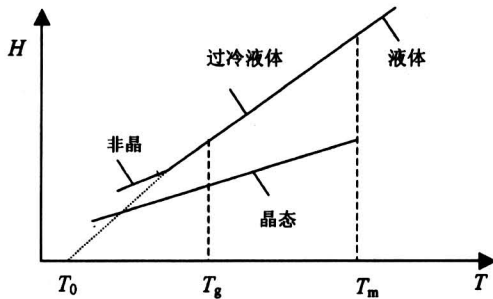


图 1 液相、晶相的热焓与温度的关系图

Fig.1 Relation between temperature and enthalpy of liquid and crystal

过冷度  $\Delta T = T_m - T$  较小。取  $\Delta H_g \approx \Delta H_{mg}$  和  $\Delta S_g \approx \Delta S_{mg}$  是足够好的近似。因此, 当温度为  $T$  时, 固、液两相摩尔自由能差为

$$\Delta G_g = \Delta H_{mg} - T\Delta S_{mg} = \Delta H_{mg}(T_m - T)/T_m. \quad (5)$$

当过冷度小时, 熔体在温度  $T$  下结晶, 则 1 mol 原子吉布斯自由能的变化用式 (5) 计算。

当过冷度大时, 考虑到固、液两相定压比热的差值对自由能变化的贡献, Jones 等指出<sup>[14]</sup>, 结晶时两相自由能变化的精确值表达式为

$$\Delta G_g = \Delta H_{mg}(T_m - T)/T_m - \Delta C_p \cdot$$

$$[(T_m - T) - T \ln(T_m/T)], \quad (6)$$

利用热力学公式, 加以近似, 可以把上式简化为

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p,$$

$$\text{故} \quad \Delta C_p = \left.\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right|_p.$$

固、液两相热焓之差随温度的变化在一级近似条件下, 可以用下式表示:

$$\Delta H = \Delta H_{mg}(T - T_0)/(T_m - T_0), \quad (7)$$

式中  $T_0$  为过冷液体的焓随温度变化直线与温度坐标交点所对应的温度值 (见图 1)。

所以, 固液两相的定压比热之差的计算式为

$$\Delta C_p = \frac{\partial \Delta H}{\partial T} = \frac{\Delta H_{mg}}{T_m - T_0},$$

故

$$\Delta G_g = [\Delta H_{mg}/T_m(T_m - T_0)] \cdot$$

$$[T_m T \ln(T_m/T) - T_0(T_m - T)]. \quad (8)$$

由于过冷液体的自由能  $G_L$  比晶态的自由能  $G_{Crs}$  要高, 并且过冷液体的熵  $S_L$  比晶态的熵  $S_{Crs}$  要高, 根据自由能  $G = H - TS$  可知, 过冷液体的焓  $H_L$  比晶态的焓  $H_{Crs}$  要高得多, 所以  $T_0/T_m$  是一个很小的量, 此时取  $T_0/T_m = 0.1$ , 则式 (8) 可以简化为

$$\Delta G_g = -(\Delta H_{mg}/9)[10(T_m/T) \cdot \ln(T/T_m) + 1 - T/T_m]. \quad (9)$$

而要使合金熔体形成金属玻璃, 合金熔体必须至少要过冷到它的玻璃转变温度  $T_g$ , 这时可取  $T = T_g$ , 因而式 (9) 就转化为

$$\Delta G_g = -(\Delta H_{mg}/9)(10T_{rg} \ln T_{rg} + 1 - T_{rg}). \quad (10)$$

把高温合金熔体看作理想溶液, 合金的摩尔熔化热 (即摩尔结晶潜热)  $\Delta H_{mg}$  采用的计算公式为

$$\Delta H_{mg} = \sum_{i=1}^n (x_i M_i \Delta H_i), \quad (11)$$

式中  $x_i$  为合金中各组元的摩尔分数,  $n$  为组元数,  $M_i$  为组元的摩尔量,  $\Delta H_i$  为组元的摩尔熔化热。

合金  $Z_{max}$  和  $R_c$  的平均变化 (即  $\Delta Z_{max}^p$  和  $\Delta R_c^p$ ) 的计算公式为

$$\Delta a^p = (a_{max} - a_{min})n / \sum_{i=1}^n a_i, \quad (12)$$

式中  $a_{max}$  和  $a_{min}$  分别表示最大值和最小值,  $n$  为所计算的合金系中包含的合金个数。

## 2 结果与分析

根据式 (10)，画出  $\Delta G_g$  与  $T_{rg}$ ， $\Delta H_{mg}$  的三维曲面示意图 (如图 2)，以及取  $\Delta H_{mg}$  为 9 kJ/mol 时画出  $\Delta G_g$  与  $T_{rg}$  的关系曲线示意图 (如图 3)。从式 (10)、图 2 和图 3 可知，当  $T_{rg}$  不变时， $\Delta G_g$  随  $\Delta H_{mg}$  的增大而增加；当  $\Delta H_{mg}$  不变时， $\Delta G_g$  随  $T_{rg}$  的增大先增加，然后在  $T_{rg} = 0.4066$  点发生转折，此时  $\Delta G_g$  随  $T_{rg}$  的增大而减小。据金属凝固理论可知， $\Delta G_g$  越大，合金熔体结晶动力越大，越容易结晶。金属熔体要形成金属玻璃，必须使  $\Delta G_g$  尽可能地小， $\Delta G_g$  的大小反映了合金的玻璃形成倾向大小。由图 2 和图 3 可知，当  $\Delta H_{mg}$  为常数，在  $0 \leq T_{rg} \leq 0.4066$  时， $\Delta G_g$  随  $T_{rg}$  的增加而增大，即合金的 GFA 减少，非晶薄膜、粉末以及薄带中的 GFA 规律可能与这一区间的规律有关；当  $0.4066 \leq T_{rg} \leq 1$  时， $\Delta G_g$  随  $T_{rg}$  的增加而减小，即合金的 GFA 增大，这是目前 BMG 的形成区。但是，由图 2 又可知，当  $\Delta H_{mg}$  不同时，曲面上总可以找到  $T_{rg}$  大所对应的  $\Delta G_g$  也大的点，即合金的 GFA 小的点，也就是说， $T_{rg}$  大，合金的 GFA 不一定大，这是  $T_{rg}$  作为非晶 GFA 判据的局限的原因。根据表 1 可知，当  $\Delta H_{mg}$  相差不大时，即合金的主要组元相同时， $T_{rg}$  判据是很好的；但是，当  $\Delta H_{mg}$  相差较大时，即合金的主要组元不不同时， $T_{rg}$  判据是不可用的。因此，当用  $T_{rg}$  作为合金熔体 GFA 的判据时，要将非晶区分为两大类，即  $0 \leq T_{rg} \leq 0.4066$  和  $0.4066 \leq T_{rg} \leq 1$ ，并同时考虑  $\Delta H_{mg}$  的差别。从图 2 和图 3 还可以得出理论上玻璃形成能力最好的两点即  $T_{rg} = 1$  和  $T_{rg} = 0$ ，同时也解释了目前 BMG 的  $T_{rg} > 0.4066$  的原因。

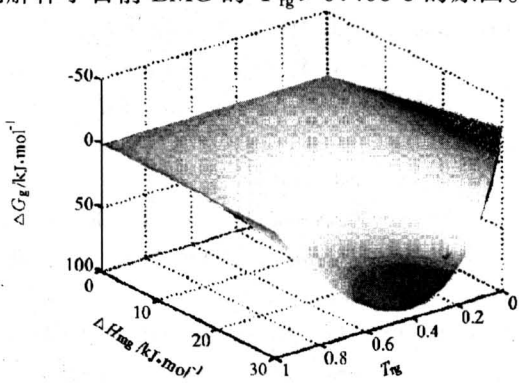


图 2  $\Delta G_g$  与  $\Delta H_{mg}$ ， $T_{rg}$  的关系

Fig.2 The relation between  $\Delta G_g$  and  $\Delta H_{mg}$  and  $T_{rg}$

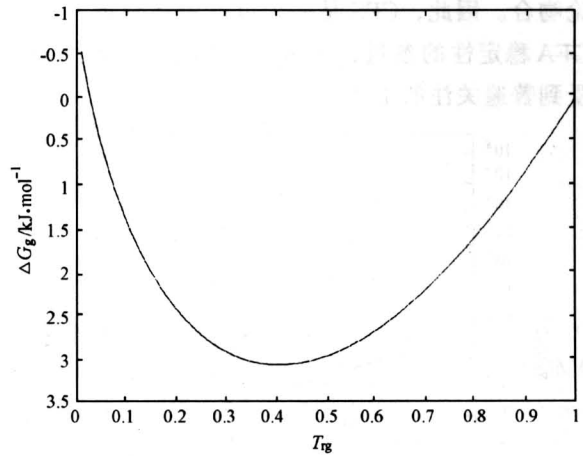


图 3  $\Delta H_{mg}$  为定值时  $\Delta G_g$  与  $T_{rg}$  的关系

Fig.3 The relation between  $\Delta G_g$  and  $T_{rg}$  on condition of the fixed  $\Delta H_{mg}$

从式 (10) 可知，曲面上任意一点的梯度的最大值为  $-(\Delta H_{mg}/9)(10 \ln T_{rg} + 9)$ ，此值越大， $\Delta G_g$  随  $T_{rg}$  的变化越大，表明这种 BMG 只要稍微调整有关参量就能形成非晶态，即 GFA 强或 GFA 易变化 (这里把非晶 GFA 变化的难易程度定义为 GFA 的稳定度)。因此，把  $-(\Delta H_{mg}/9)(10 \ln T_{rg} + 9)$  作为非晶稳定性的判据 (记作  $CPS = -(\Delta H_{mg}/9)(10 \ln T_{rg} + 9)$ )。合金的 CPS 数值越大，表明这种非晶越有提高玻璃尺寸的能力，越有工程应用前景。

根据式 (12) 分别计算了 Pd 基、Zr 基、Mg 基、Nd 基和 La 基等 5 种 BMG 的最大形成尺寸  $Z_{max}$  的平均变化值 ( $\overline{\Delta Z_{max}}$ ) 和临界冷却速度  $R_c$  的平均变化值 ( $\overline{\Delta R_c}$ ) (见表 2)；根据式 (11) 计算了 BMG 的  $\Delta H_{mg}$  值，同时按 CPS 式子计算了 CPS 值 (如表 1)，并且分别计算了 Pd 基、Zr 基、Mg 基、Nd 基和 La 基等 5 种 BMG 的 CPS 和  $\Delta H_{mg}$  的平均值 (如表 2)。从表 2 可知，合金系的 CPS 平均值按 Pd 基、Zr 基、Nd 基、La 基和 Mg 基的顺序递减，即非晶的 GFA 按 Pd 基、Zr 基、Nd 基、La 基和 Mg 基的顺序变小，也就是说，非晶的 GFA 的稳定性按 Pd 基、Zr 基、Nd 基、La 基和 Mg 基的顺序减少，这与图 4<sup>[10]</sup> 的顺序吻合。从  $\overline{\Delta Z_{max}}$  来看，按 Pd 基、Mg 基、Zr 基、La 基和 Nd 基的顺序降低；从临界冷却速度  $R_c$  的平均变化 ( $\overline{\Delta R_c}$ ) 可得出，按 Zr 基、Pd 基、Mg 基、La 基和 Nd 基的顺序变化减弱，基本与 CPS 参量得出的结

论吻合。因此, CPS 是一个可以用来判定 BMG 的 GFA 稳定性的参量, 同时也说明了 Zr 基和 Pd 基受到普遍关注的主要原因。

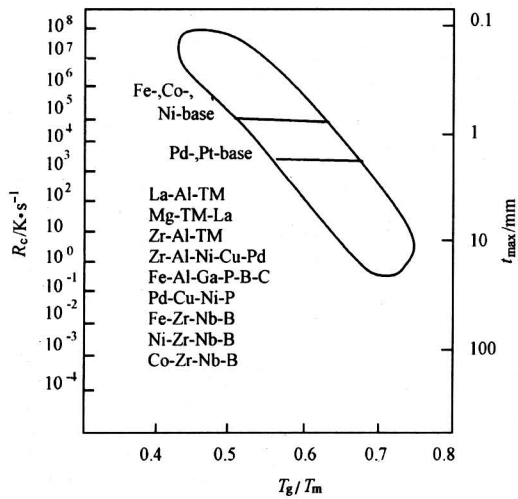


图4 大块非晶合金约化玻璃温度与临界冷却速度及最大尺寸的关系

Fig.4 Relationship between the critical cooling rate for glass formation ( $R_c$ ), maximum sample thickness for glass formation ( $t_{max}$ ) and reduced glass transition temperature ( $T_g/T_m$ ) for bulk amorphous alloys

又从 CPS 式子可知, CPS 的大小主要受  $\Delta H_{mg}$  的控制, 因此合金 GFA 稳定性可以由  $\Delta H_{mg}$  来判定。由表 2 可知,  $\overline{\Delta H_{mg}}$  的值由大到小的顺序是 Pd 基、Zr 基、La 基、Mg 基和 Nd 基, 此结果与用 CPS 判据所得的结果相吻合,  $\Delta H_{mg}$  也可以作为 BMG 的 GFA 大小或其稳定性的判据。

### 3 结语

1) 基于加和性原则计算了 BMG 合金的摩尔融化热, 用动力学理论解释了  $T_{rg}$  作为合金玻璃形成能力的可行性和局限性, 为制备非晶合金提供了理论依据, 以及解释了目前 BMG 合金的  $T_{rg}$  大于 0.406 6 的原因, 同时找到了玻璃形成能力最佳的两个理论约化玻璃温度, 即  $T_{rg} = 1$  和  $T_{rg} = 0$ 。

2) 提出了一个新的判定合金 GFA 大小及其稳定性的参量 CPS, 并用它计算了 BMG 合金系的 GFA 的大小、顺序与 Inoue 的排列顺序吻合较好。同时, 按照 BMG 合金的  $Z_{max}$  和  $R_c$  的平均变化对其进行了检验, 均吻合很好。

3) 用合金的  $\Delta H_{mg}$  能够快速评价 BMG 的 GFA 大小及其稳定性。

### 参考文献

- [1] Ding Xueyong, Fan Peng, Wang Wenzhong. Thermodynamic calculation for alloy systems [J]. Met Mater Trans, 1999, 30B: 271~277
- [2] Zhang Shouguo, Yu Yang. The rhomb unit structural model of amorphous alloys [J]. Mater Sci and Engineering, 1991, A134: 1004~1007
- [3] Inoue A, Shibata Tsutomu. Effect of additional elements on glass transition behavior and glass formation tendency of Zr-Al-Cu-Ni Alloys [J]. Mater Trans JIM, 1995, 36(12): 1420~1426
- [4] 王晓东, 齐民, 董闯. 铝元素的添加对锆基合金非晶形成能力影响的电子结构模型[J]. 金属学报, 2002, 38(12): 1241~1245
- [5] 邢大伟, 孙剑飞, 王刚, 等. Sn 对 ZrTiNiCuAl 非晶合金玻璃形成能力的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2002, (6): 12~14
- [6] Lu Z P, Li Y, Ng S C. Reduced glass transition temperature and glass forming ability of bulk glass forming alloys [J]. J Non-Cryst Solids, 2000, 270(1~3): 103
- [7] 王焕荣, 石志强, 藤新营, 等. 合金非晶形成能力的研究进展[J]. 功能材料, 2002, 33(4): 357~359
- [8] Takeuchi A, Inoue A. Calculation of mixing enthalpy and mismatch entropy for ternary amorphous alloys [J]. Mater Trans JIM, 2000, 41(11): 1372
- [9] Inoue A. High strength bulk amorphous alloys with low critical cooling rates [J]. Mater Trans JIM, 1995, 36(7): 866~875
- [10] Zhang Y, Zhao D Q, Pan M X, et al. Glass forming properties of Zr-based bulk metallic alloys [J]. J Non-Cryst Solids, 2003, 315(1-2): 206~210
- [11] Lu Z P, Tan H, Li Y, et al. The correlation between reduced glass transition temperature and glass forming ability of bulk metallic glasses [J]. Scripta Mater, 2000, 42(7): 667~673
- [12] Lu Z P, Liu C T. A new glass-forming ability criterion for bulk metallic glasses [J]. Acta Materialia, 2002, 50 (3): 3501~3512
- [13] Inoue A, Zhang Tao. Supercooled liquid and bulk glassy alloys in ferrous and non-ferrous systems [J]. J Non-Cryst Solids, 1999, 250~252(2): 552~559
- [14] 戴道生, 韩汝琪. 非晶态物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989. 14~56

## Research of Glasses Forming Ability of Bulk Metallic Glasses Based on Kinetics

Cai Anhui<sup>1</sup>, Pan Ye<sup>1</sup>, Sun Guoxiong<sup>1</sup>, Ruan Xuping<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Department of Physics, Loudi Normal College, Loudi, Hunan 417000, China)

[Abstract] The key step of exploiting new type BMG is to judge quickly the glass forming ability (GFA) of bulk metallic glasses (BMG). The reliability and limitation that  $T_{rg}$  was suited for judging of the GFA of BMG was made clear by using dynamics based on the addition principle in this paper, and the theory basis was provided for making BMG. The minimum of  $T_{rg}$  for forming the BMG was 0.406 6, at the same time, two theory optimum  $T_{rg}$ , i. e.  $T_{rg} = 1$ ,  $T_{rg} = 0$ , were obtained. A new parameter (CPS) for judging the magnitude or the smooth and stability of GFA of BMG was put forward, the magnitude of GFA of BMG was calculated by using it. The result of sequence of GFA of BMG was unanimous to Inoue's. At one time, the results were examined according to the average variance of  $Z_{max}$  and  $R_c$  of BMG, and all results were measured with one another. The magnitude of  $\Delta H_{mg}$  was a feasible method for quickly appraising the capacity and stability of GFA of BMG.

[Key words] kinetics; bulk metal glasses; glass forming ability; addition principle; stability

(上接第 15 页)

- [15] 刘琦. 网络安全的脆弱性及常见攻击手段[J]. 公安大学学报, 2001, 22(22): 17~19
- [16] 金雷, 谢立. 网络安全综述[J]. 计算机工程与设计, 2003, 24(2): 19~22
- [17] Paulson L D. Wanted: more network-security graduates and research[J]. Computer, 2002, 35(2): 22~24
- [18] 嗅探原理与反嗅探技术详解[EB/OL]. [http://www.xfocus.net/articles/2001\\_10/279.html](http://www.xfocus.net/articles/2001_10/279.html), 2001-10-16
- [19] 解读特洛伊木马[EB/OL]. [http://tech.tyfo.com/tech/block/html/2001070\\_400248.html](http://tech.tyfo.com/tech/block/html/2001070_400248.html), 2001-07-04
- [20] 电子邮件炸弹攻防[EB/OL]. <http://elvishua.myetang.com/wlsafe/aqcl/03.htm>, 2003-06-05
- [21] Burnett S, Paine A. CRYPTOGRAPHY 密码工程[M]. 冯登国. 北京:清华大学出版社, 2001
- [22] 安全标准与体系[EB/OL]. <http://www.ihep.ac.cn/security/lanmu/biaozhun>, 2003-08-20
- [23] 赵战生, 冯登国, 戴英侠, 等. 信息安全技术浅谈[M]. 北京:科学出版社, 1999

## Summarization of Network Security

Li Ying, Shan Xiuming, Ren Yong

(Department of Electronics Engineering of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] The content of computer network security is discussed in this article. Firstly, the concept, system and structure and model of computer network security are given. Then the main content and correlative researching aspect are included. In the end, the main product is introduced.

[Key words] computer; network; system; security