

# Effect of Gd Concentration on Thermal Stability and Glass-Forming Ability of (Fe, Co)-Gd-Nb-B Glassy Alloys

Fei Jia<sup>1</sup>, Li-juan Wang<sup>1</sup>, Xing-guo Zhang<sup>1</sup>, Wei Zhang<sup>1,2</sup>, Inoue Akihisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024

<sup>2</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, Japan, 980-8577

Email: jiafei@dlut.edu.cn

**Abstract:** Addition of a small amount of Gd to the Fe-Co-B based glassy alloy in  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) increased the stabilization of supercooled liquid and glass-forming ability (GFA). The largest supercooled liquid region of 102K was obtained for the  $x = 3.5$  alloy. The best GFA with a diameter of over 5 mm was achieved for the  $x = 3.5$  alloy. The  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{67.5}\text{Gd}_{3.5}\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  glassy alloy exhibited good soft magnetic properties, *i.e.*, rather high saturation magnetization of 0.86T, low coercive force of 4.2A/m, and low saturated magnetostriction of  $6 \times 10^{-6}$ .

**Keywords:** bulk glassy alloys; thermal stability; glass-forming ability; magnetic properties

## Gd 含量对(Fe, Co)-Gd-Nb-B 金属玻璃的热稳定性及玻璃形成能力的影响

贾非<sup>1</sup>, 王丽娟<sup>1</sup>, 张兴国<sup>1</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 井上明久<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连, 中国, 116024

<sup>2</sup>东北大学 金属材料研究所, 仙台, 日本, 980-8577

Email: jiafei@dlut.edu.cn

**摘要:** 在(Fe, Co)-B基金属玻璃 $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5-4.5$ )合金中, 添加少量的Gd元素, 可以提高金属玻璃的过冷液相区稳定性和玻璃形成能力。在 $x = 3.5$ 的合金中获得了最大为102K的过冷液相区。 $x = 3.5$ 的合金同时具有较大的玻璃形成能力, 用铜模铸造法制备出直径超过5.0mm的玻璃棒材。 $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{67.5}\text{Gd}_{3.5}\text{Nb}_4\text{B}_{25}$ 合金具有良好的软磁性能, 例如, 饱和磁化强度为0.86T; 矫顽力为4.2A/m; 饱和磁致伸缩系数 $6 \times 10^{-6}$ 。

**关键词:** 块体金属玻璃; 热稳定性; 玻璃形成能力; 磁性能

### 1 引言

自从1995年发现了Fe-(Al, Ga)-(P, C, B, Si)系<sup>[1]</sup>块体金属玻璃以来, 由于Fe基和Co基块体金属玻璃具有优良的软磁特性、大的玻璃形成能力(GFA)、明显的过冷液相区及高断裂强度等特性<sup>[2]</sup>, 引起了研究者的广泛关注, 并开展了大量的研究工作。近20年来, 开发出了多个铁磁性块体金属玻璃, 代表性的合金系包括(Fe, Co)-(Al, Ga)-(P, C, B, Si)<sup>[1,3]</sup>、(Fe, Co)-TM(=Zr, Ti, Mo, Hf, Ta, W)-B<sup>[4,5]</sup>、(Fe, Co)-Ln-B<sup>[6]</sup>、(Fe, Co)-TM-(B, Si)<sup>[7,8]</sup>及Fe-(P, B, Si)<sup>[9]</sup>。其中,

本项目得到了国家自然科学基金(50875031)的支持。

$\text{Fe}_{62}\text{Co}_{9.5}\text{Ln}_{3.5}\text{B}_{25}$ 合金具有超过50K的宽过冷液相区( $\Delta T_x = T_x - T_g$ ,  $T_x$ 为金属玻璃的结晶化温度;  $T_g$ 为合金的玻璃转变温度。)及高饱和磁化强度等良好的软磁性能, 当Ln=Gd时, 合金具有最大为63K的 $\Delta T_x$ 及最佳的软磁特性<sup>[10]</sup>。

在 $\text{Fe}_{62}\text{Co}_{9.5}\text{Nd}_3\text{Dy}_{0.5}\text{B}_{25}$ 合金中添加少量(2 at.%)的过渡族金属, 可以进一步提高合金的 $\Delta T_x$ 和GFA。过渡族元素为Nb时具有最大为87K的 $\Delta T_x$ <sup>[11]</sup>。但是, 与其它的Fe基块体金属玻璃相比, 合金的GFA还不够高, 形成玻璃单相的临界直径小于1.5mm<sup>[12]</sup>。最近, 通过调整稀土元素及Nb元素的含量, 获得了直径超过3mm的玻璃棒材<sup>[13]</sup>。本研究中, 为了开发具有高

GFA 和大  $\Delta T_x$  的新型铁磁性块体金属玻璃, 研究了  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 金属玻璃的热性能及玻璃形成能力, 分析了元素 Gd 含量对  $(\text{Fe}, \text{Co})\text{-Nb-B}$  金属玻璃过冷液相稳定性及 GFA 的影响。测试了具有最大玻璃形成能力合金试样的软磁特性及压缩条件下的力学性能。

## 2 实验过程

用真空电弧炉在氩气保护下熔炼实验用合金, 原材料为 Fe、Co、Gd 及 Nb 等纯金属和纯度超过 99.5% 的晶体 B。熔炼过程中, 采用金属 Ti 作为活性气体的吸收元素, 为保证合金的化学成分均匀性, 合金锭反复翻转 4 次以上。测量了熔炼前后合金的重量, 其重量损失在 0.1% 以下。用铜模铸造法制备了直径为 2-6mm 的圆柱试样, 用熔体快淬法制备了截面尺寸为  $0.02 \times 1.0\text{mm}^2$  的条带试样。用微分扫描量热器 (DSC) 测试了试样的玻璃转变温度和结晶化温度, 加热速率为 0.67K/s。用差热分析仪 (DTA) 测量了试样的熔点和液相线温度, 加热速率为 0.17K/s。用 X 射线衍射仪 (XRD,  $\text{Cu } K_\alpha$ ) 分析了试样的结构。用来测量磁性的试样在低于  $T_g$  温度 80K 下退火 600s, 用以去除试样的内应力。试样的退火处理是将条带试样封入石英管内, 抽真空至  $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$  以下, 将装有试样的石英玻璃管用电阻加热炉在设定的温度下进行等温后, 投入水中快速冷却。用振动样品磁强计 (VSM) 和  $B\text{-}H$  磁滞回线仪分别测量了试样的饱和磁化强度 ( $I_s$ ) 和矫顽力 ( $H_c$ )。用应变仪测量了试样的饱和磁致伸缩系数, 应变片的长度为 1mm, 施加的磁场强度为 398kA/m。用 5581 型 (Instron 公司) 材料力学试验机测试了试样的压缩力学性能, 试样为直径 2.0 mm、高 4.0 mm 的圆柱试样, 加载速率固定为  $5.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 。用长 1mm 的应变片测量了试样受压时的弹性应变。用显微硬度计测量了试样的维氏硬度 ( $H_v$ ), 载荷为 25gf, 加载时间为 15s。

## 3 结果及分析

### 3.1 合金的热稳定性

图 1 为  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 合金的 DSC 曲线。图中用箭头标注出了试样的玻璃转变温度和结晶化温度。由图可以看出, 合金都显示出明显的玻璃转变, 随后的过冷液相区及由于结晶化引起的放热反应。但是, 当  $x = 4-4.5$  时, 在试样的过冷液

相区内出现了类双玻璃转变所具有的附加的拐点 ( $T_{\text{inf}}$ )。这种异常的玻璃转变现象使得确定金属玻璃的  $\Delta T_x$  值变得困难。我们用 XRD、DSC 及透射电子显微镜 (TEM) 考察了  $(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_{67.5}\text{Gd}_{3.5}\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  合金的结晶化行为。结果表明, 当这种类双玻璃转变消失时, 热处理后的试样在玻璃相基体中析出了组成为  $(\text{Fe}, \text{Co})_{23}\text{B}_6$  的亚稳相, 说明类双玻璃转变源于  $(\text{Fe}, \text{Co})_{23}\text{B}_6$  相在金属玻璃过冷液相区内析出时发生的放热反应<sup>[14,15]</sup>。因此, 这种具有类双玻璃转变现象的金属玻璃的  $\Delta T_x$  值可由一次结晶温度 ( $T_{x1}$ ) 与  $T_g$  之间的温度差所确定。

在  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 合金内, 随着元素 Gd 含量的增加,  $T_g$  没有发生明显变化, 保持在 855K 左右, 而合金的  $T_x$  则由  $x = 2.5$  时的 940K 显著增高, 在  $x = 4$  出达到最大值 969K。进一步增加 Gd 含量,  $T_x$  迅速降低到  $x = 4.5$  时的 949K。但是, 在  $x = 4-4.5$  合金中, 出现了类双玻璃转变, 可以标定出金属玻璃的  $T_{x1}$ 。合金的  $\Delta T_x$  值则需要按照具有类双玻璃转变现象的金属玻璃来确定。与合金的结晶化行为变化趋势相对应, 金属玻璃的  $\Delta T_x$  值由  $x = 2.5$  时的 82K 增加到  $x = 3.5$  时的 102K 后, 迅速降低至  $x = 4.5$  时的 45K, 在  $x = 3.5$  的合金中获得了超过 100K 的宽过冷液相区。

Gd 是一种重稀土元素, 具有较大的原子尺寸。在  $(\text{Fe}, \text{Co})\text{-Nb-B}$  合金中添加 Gd 元素, 改变了合金组成原子的尺寸分布 ( $\text{Gd } 0.180 \text{ nm} > \text{Nb } 0.147 \text{ nm} > \text{Fe } 0.127 \text{ nm} > \text{Co } 0.125 \text{ nm} > \text{B } 0.098 \text{ nm}$ )<sup>[16]</sup>。除化学性

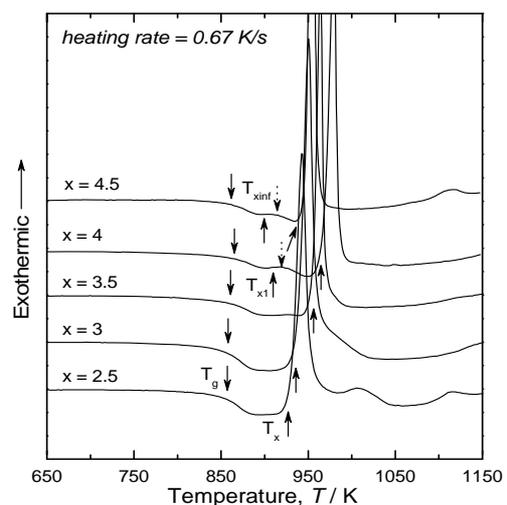


Fig. 1 DSC Curves of  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) Glassy alloys.

图 1  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 合金的 DSC 曲线。

质相近的 Fe 和 Co 元素外, 各组成原子间具有较大的原子尺寸差。而且, Gd 元素与主要组成原子间具有负的混合热, 这些原子对之间可以形成新的化学引力, 如 Gd-Fe (-1 kJ/mol)、Gd-Co (-22 kJ/mol)、Gd-B (-35 kJ/mol)<sup>[17]</sup>。合金主要组成元素间的大原子尺寸差和负的混合热, 使合金形成了具有高混乱堆积密度的三棱柱型局部有序结构, 增加晶体相析出的难度, 有利于玻璃相的形成, 并提高过冷液相区的热稳定性<sup>[18]</sup>。

### 3.2 合金的玻璃形成能力

图 2 为  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 合金的 DTA 曲线, 图中用箭头标注出合金的熔点 ( $T_m$ ) 和液相线温度 ( $T_l$ )。随着 Gd 含量的增加,  $T_m$  没有发生明显改变。而 Gd 含量由 2.5% 增加到 3.5% 时, 合金的  $T_l$  由 1526 显著降低至 1453K, Gd 含量继续增加至 4.5%,  $T_l$  升高到 1501K。合金  $T_l$  的变化, 使得约化玻璃转变温度 ( $T_{rg} = T_g / T_l$ ) 也发生了显著变化。Gd 含量低于 3.5% 时,  $T_{rg}$  随着 Gd 含量增加而增大, 含 3.5%Gd 合金的液相线温度最低, 合金成分接近多元深共晶成分, 此时合金具有最高为 0.589 的  $T_{rg}$  值; Gd 含量进一步提高, 则  $T_{rg}$  值减小。较高的  $T_{rg}$  值, 说明  $x = 3.5$  的合金具有较高的玻璃形成能力, 可以获得尺寸较大的玻璃单相材料。

用铜模铸造法制备了直径为 2.0mm 到 6.0mm 的  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 金属玻璃的圆柱形试样。图 3 是直径为 2.0mm 到 5.0mm 的金属玻璃铸态试样的外观形貌照片。可以看出, 试样的表面

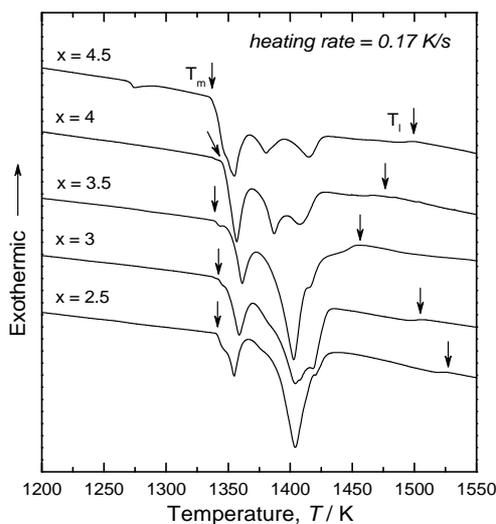


Fig. 2 DTA Curves of  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) Glassy alloys.

图 2  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 合金的 DTA 曲线。

非常光滑, 观察不到由于合金发生结晶相变时体积收缩所引起的表面凹坑或粗糙不平的现象。对于破坏后的试样, 在其断面处可以看到块体金属玻璃特有的光亮表面。预示着这些试样内部形成了玻璃相。

图 4 为试样的 XRD 图谱。由图可以看出, 直径为 5mm 的  $x = 3.5$  合金试样、直径为 4mm 的  $x = 3$  和  $x = 4$  合金试样的 XRD 图谱只包含一个宽的馒头峰, 没有观察到明显的由于晶体相析出形成的尖锐衍射峰, 说明试样内部形成了玻璃单相结构。对于直径 3mm 的  $x = 2.5$  合金试样, XRD 图谱为宽的馒头峰基础上分布少量的晶体相衍射峰, 说明其结构为玻璃相基体中分布少量的结晶相。

表 1 列出了  $(\text{Fe}, \text{Co})\text{-Gd-Nb-B}$  系块体金属玻璃的热性能参数及玻璃形成临界直径 ( $d_c$ )。如表 1 所示, 含 2.5%Gd 的合金, 其  $d_c$  为 2mm。Gd 含量增加, 可



Fig. 3 Photo of as-cast  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) alloy rods with diameters of 2 to 5 mm.

图 3 直径为 2-5mm  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 合金试样的外观照片。

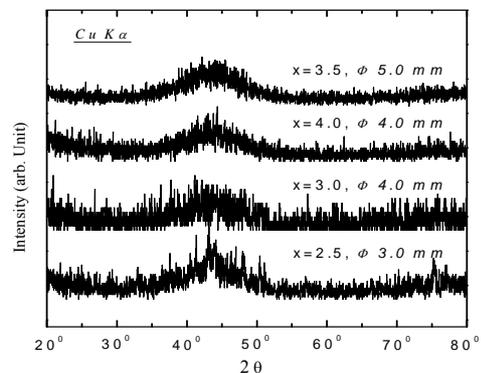


Fig. 4 XRD patterns of  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) alloy rods with diameters of 2 to 5 mm.

图 4 直径为 2-5mm  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{71-x}\text{Gd}_x\text{Nb}_4\text{B}_{25}$  ( $x = 2.5 - 4.5$ ) 合金试样的 XRD 图谱。

**Table 1 Thermal Parameters and Critical Sample Diameters of (Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>)<sub>71-x</sub>Gd<sub>x</sub>Nb<sub>4</sub>B<sub>25</sub> (x = 2.5 - 4.5) Glassy Alloys**

**表 1 (Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>)<sub>71-x</sub>Gd<sub>x</sub>Nb<sub>4</sub>B<sub>25</sub> (x = 2.5 - 4.5) 金属玻璃的热性能参数及临界试样直径**

Alloy (at. %)	T <sub>g</sub> (K)	ΔT <sub>x1</sub> (K)	T <sub>x</sub> (K)	ΔT <sub>x</sub> (K)	T <sub>i</sub> (K)	T <sub>rg</sub>	d <sub>c</sub> (mm)
x = 2.5	858	-	940	82	1526	0.562	2.0
x = 3	857	-	946	89	1506	0.569	4.0
x = 3.5	854	-	956	102	1453	0.589	5.0
x = 4	855	912	969	57	1473	0.580	4.0
x = 4.5	856	901	949	45	1501	0.570	<4.0

以制备出直径更大的金属玻璃试样, Gd 的添加量为 3.5% 时, GFA 达到最大, 玻璃形成临界直径达到 5mm。对于添加 Gd 的 (Fe, Co)-Gd-Nb-B 系块体金属玻璃, 其 d<sub>c</sub> 与 T<sub>rg</sub> 之间具有较好的对应关系。

### 3.3 块体金属玻璃的性能

测试了具有最大玻璃形成能力的 x = 3.5 合金的软磁特性和力学性能。(Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>)<sub>67.5</sub>Gd<sub>3.5</sub>Nb<sub>4</sub>B<sub>25</sub> 合金具有良好的软磁性能, 饱和磁化强度为 0.86T、矫顽力为 4.2A/m、饱和磁致伸缩系数 6 × 10<sup>-6</sup>。同时合金具有优异的力学性能, 压缩断裂强度 (σ<sub>cf</sub>) 为 3854MPa、弹性模量 (E) 为 1056GPa、维氏硬度 (H<sub>v</sub>) 为 1056。

### 4 结论

(1) 在 (Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>)<sub>71-x</sub>Gd<sub>x</sub>Nb<sub>4</sub>B<sub>25</sub> (x = 2.5 - 4.5) 合金系内, 合金的 T<sub>x</sub> 随着 Gd 含量的增加而显著增高, 当 Gd 含量大于 x = 4 时, 合金出现类双玻璃转变现象。与金属玻璃的结晶化行为变化趋势相对应, 合金的 ΔT<sub>x</sub> 值由 82K 增加到 102K 后降低至 45K, 在 x = 3.5 的合金中获得了超过 100K 的宽过冷液相区。

(2) Gd 含量小于 3.5% 时, Gd 含量增加, 合金的 T<sub>i</sub> 显著降低, 合金成分逐渐接近多元共晶成分点, 合金的 T<sub>rg</sub> 值明显增大。x = 3.5 的合金具有最大的 T<sub>rg</sub> 值和较高的玻璃形成能力, 用铜模铸造法获得了直径为 5mm 的玻璃单相棒材。

(3) (Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>)<sub>67.5</sub>Gd<sub>3.5</sub>Nb<sub>4</sub>B<sub>25</sub> 合金具有良好的软磁特性和优异的力学性能, 饱和磁化强度为 0.86T、矫顽力为 4.2A/m、饱和磁致伸缩系数 6 × 10<sup>-6</sup>、压缩断

裂强度 (σ<sub>cf</sub>) 为 3854MPa、弹性模量 (E) 为 1056GPa、维氏硬度 (H<sub>v</sub>) 为 1056。

### References (参考文献)

- [1] A. Inoue and J. S. Gook. Fe-based ferromagnetic glassy alloys with wide supercooled liquid region[J]. *Mater. Trans. JIM*, 1995, Vol. 36: 1180-1183.
- [2] A. Inoue, B. Shen and A. Takeuchi. Developments and applications of bulk glassy alloys in late transition metal base system [J]. *Mater. Trans. JIM*, 2006, Vol. 47: 1275-1278.
- [3] A. Inoue and A. Katsuya. Multicomponent Co-based Amorphous Alloys with Wide Supercooled Liquid Region [J]. *Mater. Trans. JIM*, 1996, Vol. 37: 1332-1336.
- [4] A. Inoue, T. Zhang, T. Itoi and A. Takeuchi. New Fe-Co-Ni-Zr-B Amorphous Alloys with Wide Supercooled Liquid Regions and Good Soft Magnetic Properties [J]. *Mater. Trans. JIM*, 1997, Vol. 38: 359-362.
- [5] P. Pawlik, H. A. Davies and M. R. J. Gibbs. Magnetic properties and glass formability of Fe<sub>61</sub>Co<sub>10</sub>Zr<sub>5</sub>W<sub>4</sub>B<sub>20</sub> bulk metallic glassy alloy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, Vol. 83: 2775-2777.
- [6] W. Zhang and A. Inoue. Formation and magnetic properties of bulk glassy Fe-Co-Nd-Dy-B alloys with high boron concentrations [J]. *Mater. Trans. JIM*, 2000, Vol. 41: 1679-1682.
- [7] A. Inoue and B. L. Shen. Soft Magnetic Bulk Glassy Fe-B-Si-Nb Alloys with High Saturation Magnetization above 1.5 T [J]. *Mater. Trans. JIM*, 2002, Vol. 43:766-769.
- [8] C. T. Chang, B. L. Shen and A. Inoue. Co-Fe-B-Si-Nb Bulk Glassy Alloys with Superhigh Strength and Extremely Low Magnetostriction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, Vol. 88: 011901-1-3.
- [9] A. Makino, T. Kubota, C. Chang, M. Makabe and A. Inoue. Fe-SiBP bulk metallic glasses with high magnetization and excellent magnetic softness [J]. *J. Mag. Mag. Mater.*, 2008, Vol. 320: 2499-2503.
- [10] W. Zhang and A. Inoue. Bulk nanocomposite permanent magnets produced by crystallization of (Fe,Co)-(Nd,Dy)-B bulk glassy alloy [J]. *Mater. Trans.*, 2001, Vol. 42: 1142-1146.
- [11] Y. Long, W. Zhang, X. Wang and A. Inoue. Effects of transition metal substitution on the glass-formation ability and magnetic properties of Fe<sub>62</sub>Co<sub>9.5</sub>Nd<sub>3</sub>Dy<sub>0.5</sub>B<sub>25</sub> glassy alloy [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, Vol. 98: 5227-5229.
- [12] W. Zhang, Y. Long, M. Imafuku, X. Wang and A. Inoue. Thermal Stability and Magnetic Properties of (Fe,Co)-RE-B Bulk Glassy Alloys [J]. *J. Met. Nanocryst. Mater.*, 2005, Vol. 24-25: 117-120.
- [13] W. Zhang, F. Jia, X. Zhang, G. Xie and A. Inoue. Effect of Co concentration on thermal stability and magnetic properties of (Fe, Co)-Nb-Gd-B glassy alloys [J]. *Metall. And Mater. Trans. A*, 2010, Vol. 41A: 1685-1690.
- [14] W. Zhang, F. Jia, X. Zhang, G. Xie, H. Kimura and A. Inoue. Two-stage-like glass transition and the glass-forming ability of a soft magnetic Fe-based glassy alloy [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, Vol. 105: 053518-1-053518-4.
- [15] F. Jia, W. Zhang, X. Zhang, G. Xie, H. Kimura, A. Makino and A. Inoue. Effect of Co concentration on thermal stability and magnetic properties of (Fe,Co)-Nb-Gd-B glassy alloys. *J. Alloys and Compounds*, 2010, Vol. 504S: S129-S131.
- [16] Japan Institute of Metals, eds. Glass formation in the Pd-Si-based alloys, [M]. *Metals Databook, Maruzen, Tokyo*, 2005: 8.
- [17] F. R. Niessen. Cohesion in Metals: Transition Metal Alloys. Vol. 1 [M]. *Cohesion in Metals, Elsevier Science Publishers, Amsterdam*, 1988: 219-258.
- [18] M. Imafuku, K. Yaoita, S. Sato, W. Zhang, A. Inoue and Y. Waseda. Local atomic structure of Fe-Co-Ln-B (Ln=Sm,Tb or Dy) amorphous alloys with supercooled liquid region [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 304-306: 660-664.