

Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀ 块体非晶合金的制备及其性能

张志纯¹, 龙志林², 李 峰², 彭 建², 危洪清², 唐 平¹, 邵 勇³

(1. 湘潭大学 能源工程学院, 湘潭 411100;
2. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湘潭 411105;
3. Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan)

摘要: 采用微合金化技术, 用铜模铸造法制备 Fe-Hf-Nb-B-Y 块体非晶合金。采用 X 射线衍射仪、差示量热扫描仪、扫描电镜、振动样品磁场仪和 Instron 万能材料试验机研究 Fe-Hf-Nb-B-Y 合金系的玻璃形成能力、软磁性能和力学性能。结果表明: Y 部分替代 Fe 能明显改善 Fe_{73-x}Nb₄-Hf₃Y_xB₂₀ 合金系的玻璃形成能力; x=0, 1, 2 和 3 时对应合金的最大玻璃形成直径分别为 2, 3, 4 和 3.5 mm; Fe-Hf-Nb-B-Y 块体非晶合金的饱和磁感应强度、矫顽力、弹性模量、弹性应变和压缩断裂强度分别为 1.10~1.25 T、3~6 A/m、184~206 GPa、1.6%~2.0% 和 3 227~3 484 MPa。结合实验数据, 初步讨论微合金化对 Fe-Hf-Nb-B-Y 合金系的玻璃形成能力、软磁性能和力学性能的影响。

关键词: Fe-Nb-Hf-Y-B 合金; 块体非晶合金; 微合金化技术; 玻璃形成能力; 软磁性能; 力学性能

中图分类号: TG 139.8 文献标识码: A

Preparation and properties of Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀ bulk amorphous alloys

ZHANG Zhi-chun¹, LONG Zhi-lin², LI Feng², PENG Jian², WEI Hong-qing², TANG Ping¹, SHAO Yong³

(1. College of Energy Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China;
2. Civil Engineering and Mechanics College, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
3. Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan)

Abstract: By micro-alloying technology, Fe-Hf-Nb-B-Y bulk amorphous alloys were prepared by copper mold casting method. The glass-forming ability (GFA), soft-magnetic and mechanical properties of these bulk amorphous alloys were characterized by X-ray diffractometry (XRD), differential scanning calorimeter (DSC), scanning electronic microscopy (SEM), vibrating sample magnetometry (VSM) and Instron type tester. The results show that a partial substitution of Fe by Y causes a significant improvement of the GFA of Fe-Hf-Nb-B-Y alloys. The maximal diameters for glass formation are 2 mm for Y-free alloy, 3 mm for 1%(molar fraction) Y alloy, 4 mm for 2% Y alloy and 3.5 mm for 3% Y alloy. The saturation magnetization, coercive force, elastic modulus, elastic strain and compressive fracture strength of Fe-Hf-Nb-B-Y bulk amorphous alloys are in the range of 1.10~1.25 T, 3~6 A/m, 184~206 GPa, 1.6%~2.0% and 3 227~3 484 MPa, respectively. Based on the experimental results, the effects of micro-alloying on GFA, soft-magnetic and mechanical properties of the alloy series were discussed.

Key words: Fe-Nb-Hf-Y-B alloy; bulk amorphous alloy; micro-alloying technology; glass-forming ability; soft-magnetic properties; mechanical properties

基金项目: 湖南省科技厅计划资助项目(2008FJ3095); 湖南省教育厅科学研究资助项目(08C880)

收稿日期: 2008-07-23; 修订日期: 2009-02-04

通讯作者: 龙志林, 教授, 博士; 电话: 0732-8298287; E-mail: longzl@xtu.edu.cn

铁基软磁块体非晶合金具有材料廉价、软磁性能优异以及超高强度等优点，是具有潜在商业价值的新型结构功能材料^[1~8]。自1995年Inoue等^[4]首次报道Fe-(Al, Ga)-(P, C, B)铁基块体非晶合金以来，人们已经研制出许多种铁基块体非晶合金^[5~8]。其中，FeB基块体非晶合金因其具有好的软磁性能受到各国研究者的格外关注。Stoica等^[9]研究了Fe-Nb-B合金的玻璃形成能力，并发现在这个三元合金系Fe₆₆Nb₄B₃₀具有最大的玻璃形成能力，其临界直径达2mm；Lin等^[10]报道了用铜模铸造法获得了直径为2mm的Fe₇₂Y₆B₂₂软磁块体金属玻璃；陈伟荣等^[11~12]选取Fe-B-Y三元块体非晶合金为基础体系，根据团簇线判据设计出Fe-B-Y-Nb-M(M=Hf, Ti, Mo)五元块体非晶合金，其中(Fe_{71.8}B_{22.6}Y_{5.6})₉₆Nb₂Hf₂的临界直径达3mm。这些研究表明：添加适当的合金元素可以显著提高Fe-B非晶合金的玻璃形成能力^[13]。

本文作者基于文献研究和Inoue“三经验原则”，选取Fe₇₃B₂₀Hf₃Nb₄块体非晶为基础体系，添加适量Y元素，采用铜模铸造法制备了临界直径可达4mm的Fe₇₁Nb₄Hf₃Y₂B₂₀块体非晶合金；采用XRD、DSC、SEM、VSM和Instron万能材料试验机研究了Fe_{73-x}Nb₄Hf₃-Y_xB₂₀(x=0, 1, 2, 3)合金系的玻璃形成能力、软磁性能和力学性能；结合实验数据，初步讨论了微合金化对Fe-Hf-Nb-B-Y合金系的玻璃形成能力、软磁性能和力学性能的影响。

1 实验

目前非晶合金的制备方法很多，常见方法^[4, 14~16]主要有水淬法、悬浮熔炼法、单向区域熔炼法、静电悬浮熔炼法、高压模铸法、电弧熔炼铜模铸造法、压力铸造法和粉末冶金法等。归纳起来大致可分为原子沉积法和液体急冷法两大类。本实验采用液体急冷法中的单辊法和铜模铸造法制备样品。即在高纯Ar气氛中，将纯度为99.9%以上的Fe、Nb、Hf、Y和B原料，按Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀(x=0, 1, 2, 3)标称成分配制后，利用电弧炉反复熔炼5次使合金成分均匀，制成母合金锭；利用高速旋转的冷却辊将母合金锭熔体拉成液膜，依靠冷却辊的快速热传导急冷凝固成宽度约为1mm、厚度约为20μm的薄带。在高纯Ar气氛中，重炼相应成分母合金，母合金熔化后，利用熔化腔与铜模之间的不同气压所产生的吸力，将熔化的合金熔体吸入循环水冷却的铜模中，利用水冷铜模导热实现

快速冷却，以获得直径分别为2、3、3.5和4mm的块体非晶合金棒样品。利用日本理学Rigaku D/Max-A型XRD衍射仪(Cu K_α辐射)检测试样结构，在加热速率为0.067K/s下，用差热扫描仪测量合金的熔化行为；在升温速率为0.67K/s下，利用岛津DSC-50型DSC差热扫描量热仪测量DSC曲线，进而确定玻璃转变温度(*T_g*)和晶化开始温度(*T_x*)。在室温和最大外加磁场为400kA/m条件下，用振动样品磁强计(VSM, JDM-1314A)测量块体非晶合金棒试样的磁滞回线及饱和磁感应强度；用Instron型万能材料试验机测量块体非晶合金棒试样的力学性能(应变速率为5.0×10⁻⁴s⁻¹)。

2 结果与讨论

2.1 Fe-Nb-Hf-Y-B合金的玻璃形成能力及热稳定性

图1所示为Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀(x=0, 1, 2, 3)合金带的XRD谱。由图1可知，各成分合金带的XRD谱中均没有锐利的衍射峰，而仅在2θ=42°附近有一个弥散的漫射峰，表明这些合金都为完全非晶态合金。图2所示为在0.67K/s的恒加热速率下测得的Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀(x=0, 1, 2, 3)非晶合金带的DSC曲线。图中箭头示意地标注了玻璃转变温度(*T_g*)和起始晶化温度(*T_x*)在DSC曲线上的位置。表1所列为Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀(x=0, 1, 2, 3)合金系的特征温度(*T_g*和*T_x*)和GFA参数(*T_{rg}*=*T_g*/*T₁*)、Δ*T_x*(=*T_x*-*T_g*)值。图3所示为Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀(x=0, 1, 2, 3)合金中Y含量与*T_g*、Δ*T_x*、*T_g*/*T₁*的关系。从图3和表1中可以看出：在0.67K/s的恒加热速率下所有的合金带试样都呈现明显的玻璃转变现象，并具有较大的过冷液相区(Δ*T_x*)和两个晶化峰；当Y含量由x=0逐渐增加到x=2的过程中，*T_g*由836K增加到852K，*T_x*从899K增加到926K，进一步增加Y含量(x=3)，*T_g*没有变化，而*T_x*稍有降低。Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀合金系的玻璃合金均具有较大的Δ*T_x*，其中x=2的合金有最大的Δ*T_x*(=74K)。基于DTA和DSC测试的*T₁*、*T_g*和*T_x*值，计算了Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀合金系的Δ*T_x*和*T_{rg}*两个GFA参数值(见表1)。图3显示Δ*T_x*和*T_{rg}*的大小变化趋势基本一致。依据文献[8]推测1%~2%的Y替代Fe可以增大Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀合金系的玻璃形成能力，而Y含量进一步增加到3%，该合金系的玻璃形成能力稍有下降。为了确定Fe_{73-x}Nb₄Hf₃Y_xB₂₀(x=0, 1, 2, 3)合金系的玻璃形成能力，对每一种成分的合金，用铜模铸造法制备了各种直径的棒。采用SEM、DSC和XRD分析

了实验制备的薄带和棒形试样的结构。下面仅列出一个代表性成分如 $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 合金的 SEM、DSC 和 XRD 的检测结果, 因为在 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ 合金系, $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 合金具有最大的玻璃形成能力。

图 4 显示直径分别为 2、3 和 4 mm 的 $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 玻璃合金棒外观形貌图。从图 4 可以看出, 所得到的不同直径的玻璃合金棒外表光亮, 这说明该合金具有较好的玻璃形成能力。图 5 所示为 $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 非晶薄带和直径分别为 2、3 和 4 mm 的非晶棒样品的 DSC 曲线。DSC 分析表明, 在实验允许误差范围内, $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 非晶薄带和非晶棒试样不仅具有相似形状的 DSC 曲线, 而且具有相近的 T_g 和 T_x 值。图 6 所示为 $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 非晶薄带和直径为 4 mm 的非晶棒样品的 XRD 谱。显然, $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 非晶薄

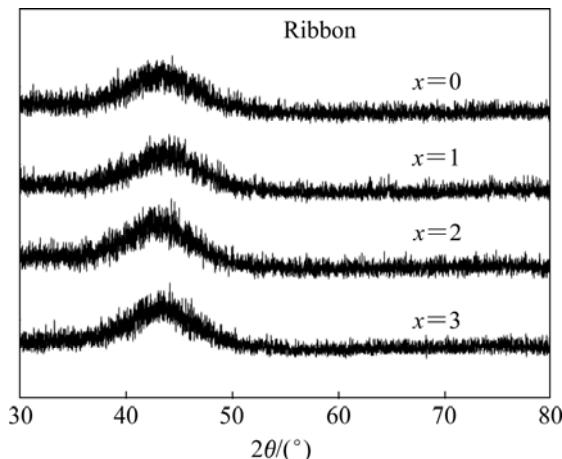


图 1 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 非晶合金带的 XRD 谱
Fig.1 XRD patterns of melt-spun $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) amorphous alloys ribbons

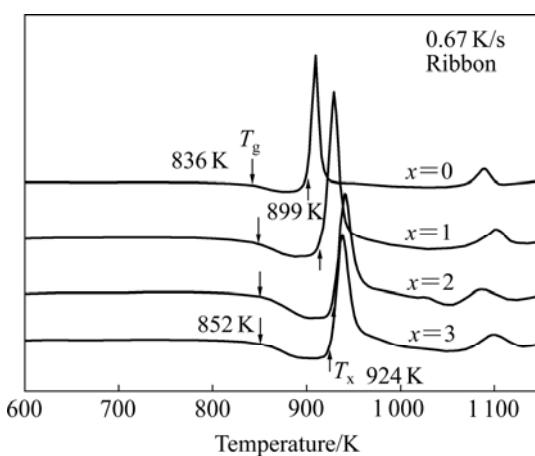


图 2 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 非晶合金带 DSC 曲线
Fig.2 DSC curves of $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) amorphous alloys ribbons

表 1 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 非晶合金的 T_g 、 ΔT_x 、 T_x 、 T_g/T_1 与 Y 摩尔分数的关系

Table 1 Changes in T_g , ΔT_x , T_x , T_g/T_1 of $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ amorphous alloys as function of Y molar fraction

x	T_g/K	T_x/K	$\Delta T_x/\text{K}$	T_g/T_1
0	836	899	63	0.582
1	842	917	75	0.596
2	852	926	74	0.602
3	852	924	72	0.600

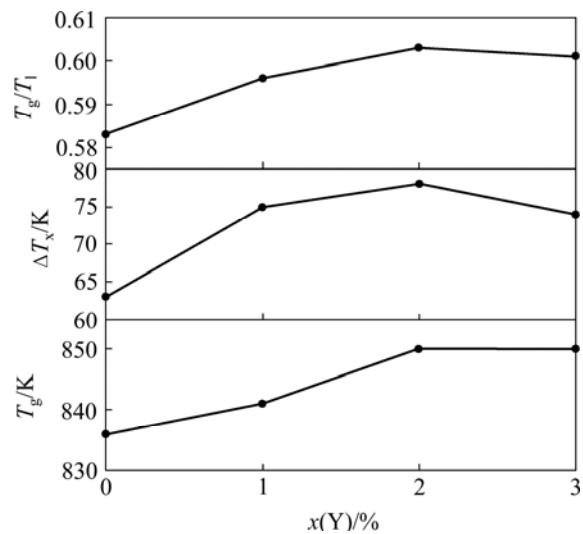


图 3 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 非晶合金的 T_g 、 ΔT_x 、 T_g/T_1 随 Y 摩尔分数的变化

Fig.3 Changes in T_g , ΔT_x , T_g/T_1 of $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) amorphous alloys as function of Y molar fraction



图 4 直径分别为 2、3 和 4 mm 的 $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 非晶合金棒外观形

Fig.4 Photos of as-cast $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ amorphous alloy rods with diameters of 2, 3 and 4 mm, respectively

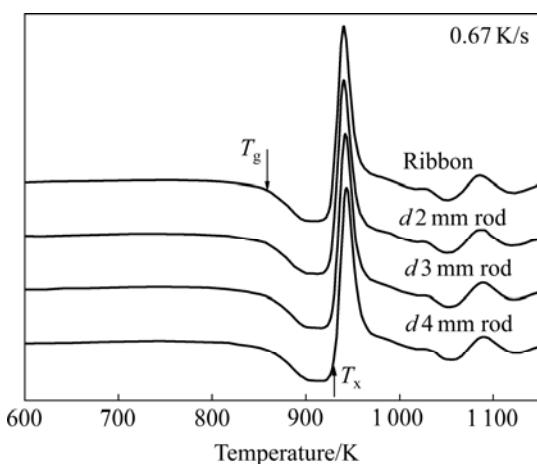


图 5 $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 非晶合金带和直径分别为 2、3 和 4 mm 的非晶棒的 DSC 曲线

Fig.5 DSC curves of $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ amorphous ribbons and rods with diameters of 2, 3 and 4 mm, respectively

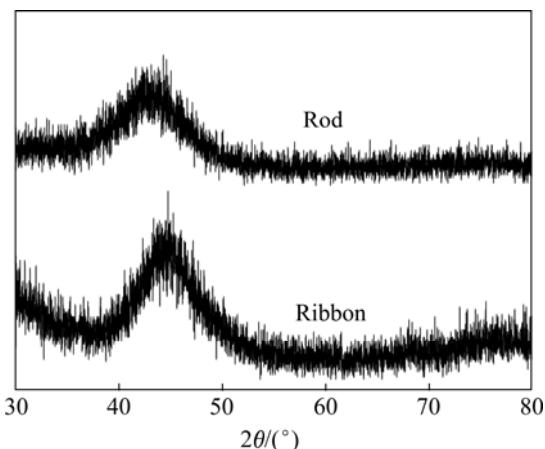


图 6 $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 非晶合金带和直径为 4 mm 棒样品的 XRD 谱

Fig.6 XRD patterns of $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ amorphous alloy ribbon and rod with diameter of 4 mm

带和直径为 4 mm 的非晶棒样品具有相似的 XRD 谱。由图 4~6 可知, $\text{Fe}_{71}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_2\text{B}_{20}$ 的临界玻璃直径为 4 mm。对本合金系其他成分的合金, 用铜模铸造法获得的临界玻璃直径分别为 2 mm($x=0$)、3 mm($x=1$)和 3.5 mm($x=3$)。上述实验结果也表明, $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$)合金系的玻璃形成能力符合 T_{rg} 和 ΔT_x 判据^[14]。

2.2 Fe-Nb-Hf-Y-B 合金的软磁性能

在稀土-Fe 基非晶态合金中, 用穆斯堡尔效应测出的 Fe 原子磁矩, 显著依赖玻璃成分^[17]。此外, 稀

土元素的添加使稀土-Fe 基非晶态合金中出现自旋玻璃状态^[18]。在 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$)合金系中, 由于钇元素的添加导致出现各向异性, Fe 元素的长程交换作用被破坏而出现电子自旋状态; 以钇原子为中心, Fe 原子周围的电子环境和结构发生了变化, 这些钇原子的磁矩与 Fe 原子的磁矩形成反铁磁耦合^[19~20]。因此, 该合金的饱和磁化强度降低。图 7 所示为 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$)合金的磁滞回线。从图中可以看出, 随着该合金成分中 Y 含量的增加, 饱和磁感应强度(B_s)由 Y 含量为零时的 1.25 T 略减小到 Y 含量为 3% 时的 1.1 T, 且矫顽力都很小, 均小于 6 A/m。因此, $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$)块体非晶合金是一种有较大应用前景的软磁非晶合金材料。

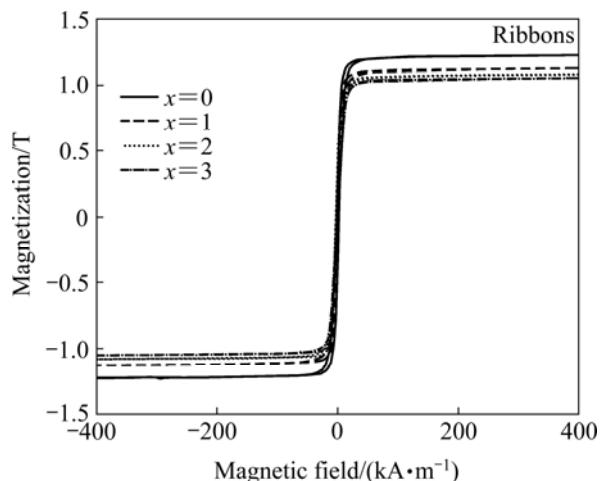


图 7 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 非晶合金的磁滞回线

Fig.7 Hysteresis loops of $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) amorphous alloys

2.3 Fe-Nb-Hf-Y-B 合金的力学性能

将直径为 2 mm 的 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 非晶合金棒, 加工成长约 4 mm 的圆柱状压缩试样, 用 Instron 万能材料试验机对其进行室温准静态压缩实验。图 8 所示为 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 块体非晶合金(应变速率为 $\varepsilon=5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)的压缩应力—应变曲线。从图 8 可以看出, $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 非晶合金的压缩应力—应变曲线都呈现相似的特征, 即合金样品的压缩行为首先都表现为弹性变形, 应变量约 2%、几乎没有塑性变形。当 Y 的含量依次由 0% 增加到 2% 时, 压缩断裂强度(σ_f)、弹性模量分别依次为 3 227 MPa、3 445 MPa、3 484 MPa 和 184 GPa、185 GPa、206 GPa, 压缩断裂强度、弹性模量

随钇元素含量的增大而略有增加; 但当 Y 的含量继续增大到 3% 时, 压缩断裂强度由 3 484 MPa 减小到 3 445 MPa, 弹性模量也由 206 GPa 减小为 201 GPa(见表 2)。图 9 显示 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ 块体非晶合金的压缩断裂强度(σ_f)和弹性模量(E)与钇元素含量的关系。从图 9 中同样可以看出, 随着钇元素含量的增加, 相应成分合金的弹性模量(E)和压缩断裂强度(σ_f)都先增加后减小, 且当含量 $x=2\%$ 时分别达到最大值 206 GPa 和 3 484 MPa。

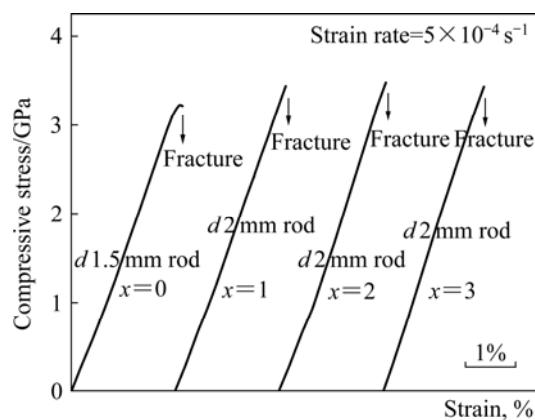


图 8 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ 块体非晶合金棒的准静态压缩应力—应变曲线

Fig.8 Compressive true stress—strain curves of cast glassy $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ bulk alloy rods with diameter of 2 mm

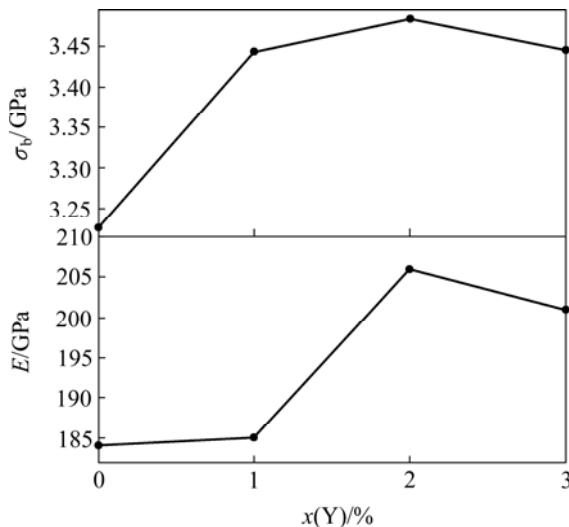


图 9 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ 非晶合金的弹性模量和断裂强度与 Y 的变化关系

Fig.9 Changes of elastic modulus and fracture strength of $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ amorphous alloys as function of Y content

表 2 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ 块体非晶合金的弹性模量和压缩断裂强度与 Y 含量的关系

Table 2 Changes of elastic modulus and fracture strength of $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ amorphous alloys as function of Y content

x	E/GPa	σ_f/MPa
0	184	3 227
1	185	3 445
2	206	3 484
3	201	3 445

3 结论

1) 采用铜模铸造法制备了不同 Y 含量的 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}$ 非晶棒, 该合金系能形成最大直径为 4 m 的块体非晶。

2) 块体非晶合金 $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ 的玻璃转变温度 T_g 随着 x 的增加而增大, 当 $x=2$ 时达到最大值 852 K; 过冷液相区宽度 ΔT_x 随着 Y 含量的增加先增后减, 当 $x=2$ 同时达到最大值 74 K; 约化玻璃转变温度 T_g/T_1 也是随着 x 的增加先增后减, $x=2$ 同时达到最大值 0.603。

3) $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ 块体非晶合金具有高的饱和磁感应强度(1.1~1.25 T)和低的矫顽力(均低于 6 A/m); 随着 x 的增加, 合金带的磁饱和感应强度变化不是很大, 只是依次略有减小, 但均在 1.1 T 以上, 且当 $x=0$ 时达最大磁饱和感应强度 $B_s=1.25$ T。

4) $\text{Fe}_{73-x}\text{Nb}_4\text{Hf}_3\text{Y}_x\text{B}_{20}(x=0, 1, 2, 3)$ 块体非晶合金在压缩过程中呈现脆性断裂; 随着 x 的增加, 其各自的弹性模量和压缩断裂强度先增加后减小, 且当 $x=2$ 时均达到最大值($E=206$ GPa, $\sigma_f=3 484$ MPa)。

REFERENCES

- [1] INOUE A, ZHANG T, ITOI T, TAKEUCHI A. New Fe-Co-Ni-Zr-B amorphous alloys with wide supercooled liquid regions and good soft magnetic properties[J]. Materials Transactions, JIM, 1997, 38(4): 359~362.
- [2] INOUE A, SHEN B L. Formationg and soft-magnetic properties of Fe-B-Si-Zr bulk glassy with high saturation magnetization above 1.5 T[J]. Materials Transactions, JIM, 2002, 43(9): 2350~2353.
- [3] 陈庆军, 范洪波, 孙剑飞, 沈军, 钱坤明, 线恒泽. Fe-Co-Ni-Zr-Mo-W-B 块体非晶合金的玻璃形成能力与热稳定

- 性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(10): 1555–1559.
- CHEN Qing-jun, FAN Hong-bo, SUN Jian-fei, SHENG Jun, QIAN Kun-ming, XIAN Heng-ze. Glass-forming ability and thermal stability of Fe-Co-Ni-Zr-Mo-B bulk amorphous alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(10): 1555–1559.
- [4] INOUE A, SHINOHARA Y, GOOK S J. Thermal and magnetic properties of bulk Fe-based glassy alloys prepared by copper mold casting[J]. Materials Transactions, JIM, 1995, 36(12): 1427–1433.
- [5] MAKINO A, HATANAI T, INOUE A, MASUMOTO T. Nanocrystalline soft magnetic Fe-M-B-(Zr, Hf, Nb)alloys and their applications[J]. Mater Sci Eng A, 1997, 226/228: 594–602.
- [6] ITOI T, INOUE A. Thermal stability and soft magnetic properties of Fe-Nb-B amorphous alloys with high boron concentrations[J]. Materials Transactions, JIM, 1999, 40(7): 643–647.
- [7] PANG S J, ZHANG T, INOUE A. Bulk glassy Fe-Cr-Mo-C-B alloys with high corrosion resistance[J]. Corrosion Science, 2002, 44: 1847–1856.
- [8] LONG Z L, SHAO Y, DENG X H, JIANG Y, ZHANG P, SHEN B L, INOUE A. Cr effects on magnetic and corrosion properties of Fe-Co-Si-B-Nb-Cr bulk glassy alloys with high glass-forming ability[J]. Intermetallics, 2007, 15: 1453–1458..
- [9] STOICA M, HAJLAOUI K, LEMOULEC A , YAVARI A R. New ternary Fe-based bulk metallic glass with high boron content[J]. Philosophical Magazine Letters, 2006, 86: 267–275.
- [10] LIN C Y, TIEN H Y, CHIN T S. Soft magnetic ternary iron-boron-based bulk metallic glasses[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 162501-1–162501-3
- [11] 陈伟荣, 王清, 程旭, 张庆瑜, 董闯. 基于团簇线的Fe-B-Y基五元块体非晶合金[J]. 金属学报, 2007, 43(8): 797–802.
CHEN Wei-rong, WANG Qing, CHENG Xu, ZHANG Qing-yu, DONG Chuang. (Fe-B-Y)-based quinary bulk metallic glasses designed using cluster line criterion[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(8): 797–802.
- [12] 赵文君, 徐晖, 王智平, 谭晓华, 白琴. $\text{Fe}_{68}\text{Nd}_5\text{Zr}_2\text{Y}_4\text{B}_{21}$ 大块非晶合金磁性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(1): 139–142.
- ZHAO Wen-jun, XU Hui, WANG Zhi-ping, TAN Xiao-hua, BAI Qin. Study on magnetic properties of $\text{Fe}_{68}\text{Nd}_5\text{Zr}_2\text{Y}_4\text{B}_{21}$ bulk amorphous alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(1): 139–142.
- [13] 危洪清, 龙志林, 张志纯, 李乡安, 彭建. 基于特征温度的玻璃形成能力判据[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 1–7.
WEI Hong-qing, LONG Zhi-lin, ZHANG Zhi-chun, LI Xiang-an, PENG Jian. Criteria of glass-forming ability based on characteristic temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 1–7.
- [14] LONG Z L, SHAO Y, XIE G Q, ZHANG P, INOUE A. Enhanced soft-magnetic and corrosion properties of Fe-based bulk glassy alloys with improved plasticity through the addition of Cr[J]. J Alloys Compd, 2008, 462: 52–59.
- [15] LONG Z L, SHEN B L, SHAO Y, CHANG C T, ZENG Y Q, INOUE A. Corrosion behaviour of $[(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{0.75}\text{B}_{0.2}\text{Si}_{0.05}]_{96}\text{Nb}_4$ bulk glassy alloy in sulphuric acid solutions[J]. Mater Trans, 2006, 47(10): 2566–2570.
- [16] LONG Z L, CHANG C T, DING Y H, SHAO Y, ZHANG P, SHEN B L, INOUE A. Corrosion behaviour of Fe-based ferromagnetic (Fe, Ni)-B-Si-Nb bulk glassy alloys in aqueous electrolytes[J]. J Non-cryst Solids, 2008, 354: 4609–4613.
- [17] CHAUDHARI P, CUOMO J J, GAMBINO R J. Amorphous metallic films for magneto-optic applications[J]. Applied Physics Letters, 1973, 22: 337–339.
- [18] PELCOVITS R A, PYTTE E, RUDNICK J. Spin-glass and ferromagnetic behavior induced by random uniaxial anisotropy[J]. Physical Review Letters, 1978, 40: 476–479.
- [19] WANG F, ZHANG J, CHEN Y F, WANG G J, SUN J R, ZHANG S Y, SHEN B G. Spin-glass behavior in $\text{La}_{87}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_{11.4}\text{Si}_{1.6}$ compounds[J]. Physical Review B, 2004, 69: 094424–094428.
- [20] RYAN D H, BEATH A D, MCCALLA E, VAN LIEROP J, CADOGAN J M. Transverse spin freezing in $\alpha-(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_{78}\text{Si}_{18}\text{B}_{14}$: A site-frustrated metallic glass[J]. Physical Review B, 2003, 67: 104404–104409.

(编辑 龙怀中)