

微量元素对 Cu-Zr-Al 块体金属玻璃形成能力及力学性能的影响

潘 冶¹, 纪秀林^{1,2}, 皮锦红¹, 张 露¹

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏省先进金属材料高新技术研究重点实验室, 南京 211189;
2. 河海大学 机电工程学院, 常州 213022)

摘 要: 研究微量元素 Ag、Ti、Ga、Ni 和 Sn 对 Cu₅₅Zr₃₈Al₇ 铜基块体金属玻璃形成能力及力学性能的影响。结果表明: 添加 2%(摩尔分数)的 Ag、Ti 或 Ga 均可以提高 Cu₅₅Zr₃₈Al₇ 合金的玻璃形成能力; 用 6%的 Ag 替代 Cu, 玻璃棒的临界直径可从 2 mm 增加到 4 mm; 因此, 替代化学性质相似的元素或者扩大合金系的原子尺寸范围对提高玻璃形成能力具有显著的效果; 然而, 添加微量元素均不同程度地降低 Cu-Zr-Al 金属玻璃的硬度。断口表面形貌显示: 微量相似元素替代影响基体在压缩过程中剪切带的繁殖; 在微量元素替代的伪四元铜基块体金属玻璃中, 2% Ti 和 2%Ag 替代可分别获得最大压缩强度 2 163 MPa 和最大压缩应变 8.7%。因此, 通过添加微量元素可以调谐金属玻璃的玻璃形成能力和力学性能。

关键词: 块体金属玻璃; 玻璃形成能力; 微合金化; 力学性能

中图分类号: TG139.8

文献标志码: A

Effects of minor alloying additions on glass forming ability and mechanical properties of Cu-Zr-Al bulk metallic glasses

PAN Ye¹, JI Xiu-lin^{1,2}, PI Jing-hong¹, ZHANG Lu¹

(1. Jiangsu Key Laboratory for Advanced Metallic Materials, School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: The effects of minor additions of Ag, Ti, Ga, Ni and Sn on the glass forming ability (GFA) and mechanical properties of Cu₅₅Zr₃₈Al₇ bulk metallic glass were investigated. The results show that the GFA of Cu₅₅Zr₃₈Al₇ bulk metallic glass is enhanced by 2% (mole fraction) addition of Ag, Ti or Ga. The critical size of the cast metallic glass rod is enlarged from 2 to 4 mm by 6%Ag addition. Obviously, distinct effects on GFA are obtained by the substitution of chemically similar elements or the enlargement of atom dimension extension in the alloying system. However, Vickers hardness of Cu-Zr-Al BMG decreases with each element substitution. The fracture surface demonstrates the minor similar elements substitution contribution to the propagation behaviour of shear bands during the compressive deformation process. The highest compressive fracture strength of 2 163 MPa and the highest compressive strain of 8.7% are obtained in the pseudo-quaternary Cu-based BMGs with 2%Ti and 2%Ag substitution, respectively. Consequently, GFA and mechanical properties of the bulk metallic glasses can be coordinated by minor alloying additions.

Key words: bulk metallic glasses; glass forming ability; micro-alloying (GFA); mechanical properties

因金属玻璃的玻璃形成能力 (Glass forming ability, GFA) 和力学性能对其成分的变化非常敏感,

微合金化在金属玻璃中的作用引起广泛关注, 并获得了许多研究成果^[1-7]。添加微量元素可以有效地提高

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50971041)

收稿日期: 2010-03-16; 修订日期: 2010-08-18

通信作者: 潘 冶, 教授, 博士; 电话: 025-52090681; E-mail: panye@seu.edu.cn

GFA, 如在 $\text{Fe}_{58}\text{Co}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Mo}_5\text{W}_2\text{B}_{15}$ 合金中添加 4%Ni (摩尔分数)^[2]、 $\text{Zr}_{56.2}\text{Cu}_{31.3}\text{Ni}_{4.0}\text{Al}_{8.5}$ 合金中添加 4.9% Ti^[3]以及 $\text{Ni}_{42}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{25}\text{Al}_8\text{Cu}_5$ 合金中添加 3.5% Si^[4]均可显著提高母合金的 GFA。此外, 添加微量元素还可以显著提高金属玻璃的塑性, 如在 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{9.6}\text{B}_{8.4}\text{P}_6$ 合金中添加 0.1%Cu^[5]、 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 合金中添加 5%Ni 或者 5%Ag^[6]以及 $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{43}\text{Al}_7$ 合金中添加 7%Ag 或者 Be^[7], 均可较大幅度地提高金属玻璃的压缩塑性。但是, 如何正确选择微量元素还不十分清楚, 使得添加微量元素有时候反而会降低母合金的 GFA 和力学性能^[8]。近年来有研究报道, 通过相似元素替代, Mg-Ni-(Y-Gd)^[9]和(La-Ce)-Al-Co^[10]合金系的 GFA 和力学性能均能获得提高。所以, 相似元素替代有可能成为在微合金化中选择微量元素的一种有效方法。

了解相似元素替代对 GFA 和力学性能的影响将有利于金属玻璃的成分设计, 也是本文作者的主要研究目的。为此, 以研制的 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7$ 金属玻璃为母合金^[11], Ag、Ti、Ga、Ni 和 Sn 为相似替代元素(选择 Ag、Ti 和 Ga 是因为它们分别与 Cu、Zr 和 Al 位于元素周期表的同一主族; 选择 Ni 和 Sn 是因为它们分别具有与 Cu 和 Zr 相近的原子半径), 分别研究微量元素 Ag、Ti、Ga、Ni 及 Sn 等对 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7$ 金属玻璃的 GFA 和力学性能的影响。

1 实验

将纯度为 99.9%的纯金属元素在纯氩气下电弧熔炼, 并用铜模吸铸方法制得 $\text{Cu}_{55-x}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7\text{Ag}_x$ ($x=0, 2, 6$ 和 10, 摩尔分数, %)、 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{36}\text{Al}_7\text{Ti}_2$ 、 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_5\text{Ga}_2$ 、 $\text{Cu}_{53}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7\text{Ni}_2$ 以及 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{36}\text{Al}_7\text{Sn}_2$ 等微合金化后的准四元合金。为保证合金成分的均匀性, 每个合金锭反复熔炼 4 次。然后, 在纯氩气氛下通过铜模吸铸分别制得不同直径的圆柱状试样。通过对圆柱状试样横断面的 X 射线衍射分析(Rigaku D/max 2500, 日本生产)以及差热分析(DSC, Perkin-Elmer DSC7, 美国生产)共同确认合金的非晶特性。用 DSC 在 0.33 K/s 的升温速率下测得金属玻璃的玻璃转变温度 T_g 和晶化温度 T_x 。显微硬度采用标准显微硬度测试仪(HY HV-10, 中国生产)在 100 g 载荷和 30 s 保压时间的条件下测得。压缩性能的测试用万能力学性能试验机(Suns CMT5105, 中国生产)在 $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率条件下进行。以高为 3 mm 及直径为 2 mm 的圆柱状铸态合金为压缩试样, 并通过仔细研磨保证试样的两个端面平行, 且圆柱四周光滑。

2 结果与讨论

2.1 玻璃形成能力

所有快速凝固的 Cu-Zr-Al-M (M=Ag、Ti、Ga、Ni、Sn)试样均采用 XRD 进行非晶结构确认, 其 XRD 谱如图 1 所示。 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7$ 可以获得非晶临界直径 $D_c=2 \text{ mm}$ ^[11], 但在直径为 3mm 的试样中存在少量晶化相。当用 2%或 6%Ag 替代 Cu、2%Ti 替代 Zr 或 2%Ga 替代 Al 时, 晶化相对应的衍射峰全部消失, 表明这些直径为 3 mm 的合金全部由非晶相构成, 也就是说, Ag、Ti 和 Ga 的替代提高了 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7$ 合金的玻璃形成能力。然而, 添加 2%Ni 或者 2%Sn, 以及添加 10%Ag, 在较宽的非晶衍射包上可以测得明显的晶化衍射峰, 表明 2%Ni 或 2%Sn 的替代不能提高 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7$ 合金的玻璃形成能力, 而添加过量的 Ag 则导致非晶相基体上出现了晶化相。

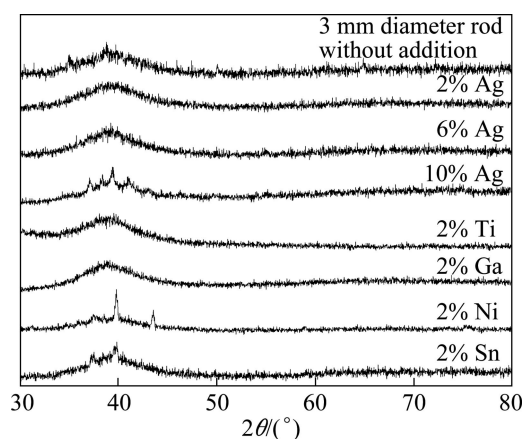


图1 直径为 3 mm Cu-Zr-Al-M (M=Ag、Ti、Ga、Ni、Sn) 合金的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of Cu-Zr-Al-M (M=Ag, Ti, Ga, Ni, Sn) alloys with diameter of 3 mm

图 2 所示为 Cu-Zr-Al-M (M=Ag、Ti、Ga、Sn)准四元合金的 DSC 曲线。玻璃转变温度 T_g 表示放热峰的起始温度; 晶化温度 T_x 表示晶化峰的起始温度, $\Delta T_x (= T_x - T_g)$ 表示过冷液相区的温度范围。本实验研究的准四元铜基合金的 T_g 、 T_x 和 ΔT_x 列于表 1, 由于未测到 $\text{Cu}_{53}\text{Zr}_{38}\text{Al}_7\text{Ni}_2$ 合金的 T_g 和 T_x , 其 DSC 曲线未在图 2 中标出。而 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{36}\text{Al}_7\text{Sn}_2$ 合金只能测到 T_x , 而且晶化热较小, 表明该合金是晶相和非晶相的混合物。可见, 2%Ni 或 2%Sn 的替代对基体合金玻璃形成能力的提高或者无益, 或者很有限, 这与图 1 的结果

相吻合。金属玻璃的热稳定性通常由 T_g 或 T_x 来表征, 且 T_g 和 T_x 值越大, 金属玻璃的热稳定性越好^[12]。Cu、Zr 和 Al 分别被 6%Ag、2%Ti 和 2%Ga 替代后, 准四元铜基合金的 T_g 和 T_x 值增高, 使合金具有较高的液相稳定性, 从而有利于 Cu-Zr-Al 系合金玻璃的形成。但当 Ag 含量增加到 10%时, T_g 和 T_x 值均降低, 在合金中出现晶相, 如图 1 所示, 表明添加过量 Ag 反而降低了合金的 GFA。

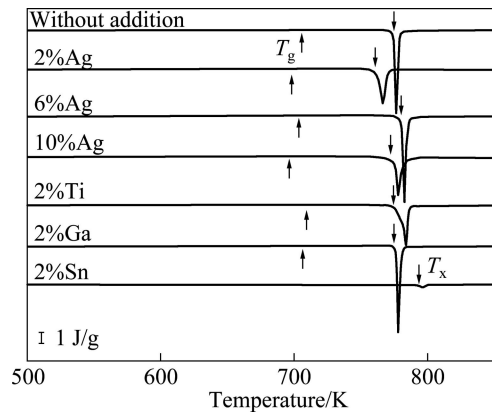


图 2 升温速率为 0.33 K/s 时铸态 Cu-Zr-Al-M (M=Ag、Ti、Ga、Sn)合金的 DSC 曲线

Fig.2 DSC curves of as-cast Cu-Zr-Al-M (M=Ag, Ti, Ga, Sn) alloys at heating rate of 0.33 K/s

以上结果表明: 添加 2%Ag、2%Ti 或 2%Ga 均可将 Cu-Zr-Al-M (M = Ag, Ti 和 Ga)金属玻璃的临界直径从 2 mm 增加到 3 mm, 但添加 2%Ni 或 2%Sn 却不能提高该基体合金的玻璃形成能力。Ag、Ti 和 Ga 的化学性质分别与 Cu、Zr 和 Al 的相似, 而 Ni 和 Sn 的原子尺寸分别与 Cu 和 Zr 的相似, 这是两类相似元素的重要差别所在。在合金系的组元替代中, 化学性质相似的元素比原子尺寸相似的元素对 GFA 的促进

作用更明显, 这个现象可以从金属玻璃原子结构的角度加以解释。在金属玻璃中存在的多元化学短程有序 (MCSRO), 与合金的 GFA 密切相关^[13-14]。在一些描述金属玻璃形成的原子拓扑结构中, 原子被简化成硬球。然而, 除了原子尺寸外, 不同原子之间的相互作用力是各种原子能够形成具有特定拓扑结构的另一重要因素。组成元素之间的作用力可以用混合热来表征, 而混合热是金属玻璃成分设计的 3 条经验原则之一^[15-16]。因此, 金属玻璃的形成必须建立在原子对(或原子组)之间具有适当的原子尺寸和作用力的搭配上, 对于某一种特定的金属玻璃而言, 原有的 MCSRO 将受到添加微量元素的影响。所以, 假如替代元素不具有被替代元素与周围原子相似的相互作用力, 那么, 即使两者具有相似的原子尺寸, 替代元素也不能占据原拓扑结构中被替代元素的位置。这种替代元素将有损于原 MCSRO, 不利于提高金属玻璃的 GFA, 如在 Cu-Zr-Al 合金系中添加微量 Ni 和 Sn 均不能提高基体合金的 GFA。另一方面, 尽管替代与被替代元素的原子尺寸不具有相似性, 但在它们原子尺寸差和添加量都有限的条件下, 替代元素可在周围原子的化学作用力条件下占据被替代元素在原子对(或原子组)中的位置, 这样, 原 MCSRO 被保留, 且有可能获得短程有序度更高的 MCSRO。所以, 这种替代有利于提高基体合金的 GFA, 如在 Cu-Zr-Al 合金系中添加微量 Ag、Ti 和 Ga。因此, 提高金属玻璃形成能力最有效的微合金化方法是选择原子尺寸和化学性质都相似的替代元素。比如, $Ce_{65}Al_{10}Co_{25}$ 和 $La_{65}Al_{10}Co_{25}$ 金属玻璃的临界直径均只有 2 mm, 而 La 与 Ce 相互替代的 $(La_xCe_{1-x})_{65}Al_{10}Co_{25}$ 金属玻璃的临界直径可达 25 mm^[10]。当化学性质相似和原子尺寸相似不能同时满足时, 选择化学性质相似元素作为微量元素替代是提高金属玻璃 GFA 的有效方法。

表 1 铸态 Cu-Zr-Al-M (M=Ag、Ti、Ga、Ni、Sn)合金的热性能

Table 1 Thermal properties of as-cast Cu-Zr-Al-M (M=Ag, Ti, Ga, Ni, Sn) alloys

Composition	T_g/K	T_x/K	$\Delta T_x/K$	D_c/mm	Comment
Cu ₅₅ Zr ₃₈ Al ₇	707	776	69	2	Amorphous + Crystalline
Cu ₅₃ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₂	696	762	66	3	Amorphous
Cu ₄₉ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₆	702	781	79	4	Amorphous
Cu ₄₅ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₁₀	691	775	84	2	Amorphous + Crystalline
Cu ₅₅ Zr ₃₆ Al ₇ Ti ₂	716	781	65	3	Amorphous
Cu ₅₅ Zr ₃₈ Al ₅ Ga ₂	713	777	64	3	Amorphous
Cu ₅₃ Zr ₃₈ Al ₇ Ni ₂	—	—	—	—	Crystalline
Cu ₅₅ Zr ₃₆ Al ₇ Sn ₂	—	792	—	—	Amorphous + Crystalline

2.2 力学性能

准四元 Cu-Zr-Al-M(M=Ag、Ti、Ga、Sn)铸态合金的显微硬度列于表 2。由表 2 可知, 各种微量元素的添加均不同程度地降低了 Cu₅₅Zr₃₈Al₇基体合金的显微硬度。由于快速冷却制得的铸态合金中晶化相比非晶相更软, 含有较多晶化相的 Cu₅₅Zr₃₆Al₇Ni₂合金的显微硬度在所有准四元铜基合金中最低。除了基体合金外, 添加 2%Ti 获得的 Cu₅₅Zr₃₆Al₇Ti₂合金的显微硬度最高。随着 Cu 被 Ag 替代, 显微硬度明显降低, 而且替代越多, 基体金属玻璃的显微硬度越低。所以, 铜基金属玻璃的显微硬度受添加元素和添加量的影响。

图 3 所示为铜基金属玻璃的压缩应力—应变曲线。由图 3 可知, 压缩断裂强度和压缩应变受到微合金化的显著影响, 其结果列于表 3。由表 3 可知: 将 2%和 6%的 Ag 替代 Cu, 基体合金的压缩断裂强度从

表 2 铸态 Cu-Zr-Al-M (M=Ag、Ti、Ga、Ni、Sn)合金的显微硬度

Table 2 Vickers hardness of as-cast Cu-Zr-Al-M (M=Ag, Ti, Ga, Ni, Sn) alloys

Alloy	Microhardness (HV)
Cu ₅₅ Zr ₃₈ Al ₇	625
Cu ₅₃ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₂	517
Cu ₄₉ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₆	486
Cu ₄₅ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₁₀	483
Cu ₅₅ Zr ₃₆ Al ₇ Ti ₂	613
Cu ₅₅ Zr ₃₈ Al ₅ Ga ₂	498
Cu ₅₅ Zr ₃₆ Al ₇ Ni ₂	475
Cu ₅₅ Zr ₃₆ Al ₇ Sn ₂	520

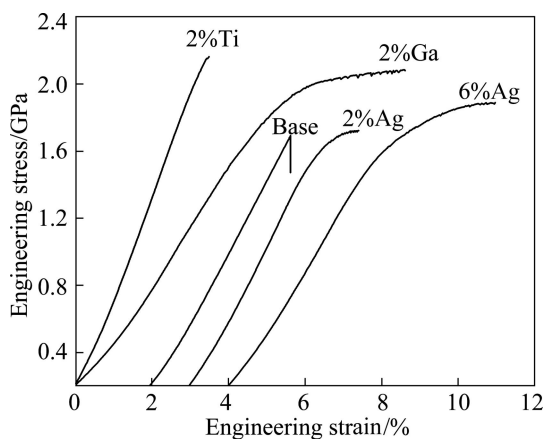


图 3 不同相似元素替代后铜基金属玻璃的压缩应力—应变曲线

Fig.3 Compressive stress—strain curves of Cu-based bulk amorphous alloys with different similar element substitutions

表 3 铜基块体金属玻璃的弹性应变极限、塑性应变及压缩强度

Table 3 Elastic strain limit, plastic strain and compressive fracture strength of Cu-based bulk amorphous alloys

Alloying Composition	Elastic strain limit/%	Plastic strain/%	Compressive fracture strength/MPa
Cu ₅₅ Zr ₃₈ Al ₇	3.8	0	1 673
Cu ₅₃ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₂	3.4	1.4	1 724
Cu ₄₉ Zr ₃₈ Al ₇ Ag ₆	4.2	3.1	1 891
Cu ₅₅ Zr ₃₆ Al ₇ Ti ₂	3.4	0.1	2 163
Cu ₅₅ Zr ₃₈ Al ₅ Ga ₂	4.8	3.9	2 087

1 673 MPa 分别提高到 1 724 MPa 和 1 891 MPa, Cu₅₅Zr₃₈Al₇金属玻璃的塑性应变几乎为零; 而用 6%Ag 替代 Cu, Cu₄₉Zr₃₈Al₇Ag₆金属玻璃在压缩断裂前呈现出 4.2%的弹性应变和 3.1%的塑性应变。可见, Ag 的替代同时提高了基体合金的压缩断裂强度和压缩塑性。在 2%Ag、2%Ti 和 2%Ga 的微量元素替代中, 最大压缩断裂强度为 2 163 MPa, 最大压缩应变为 8.7%。可见, 通过添加微量元素, Cu 基金属玻璃的力学性能可以得到明显提高。

Cu₅₅Zr₃₆Al₇Ti₂ 和 Cu₅₅Zr₃₈Al₅Ga₂ 金属玻璃的 SEM 像显示其断口的表面形态, 如图 4 所示。由图 4 可知, 两者的断裂表面均由平滑区域和叶脉状花样组成。发展良好的剪切带表明: 在单向压缩载荷下发生了明显的塑性变形, 断裂行为受粘性剪切变形控制, 这是金

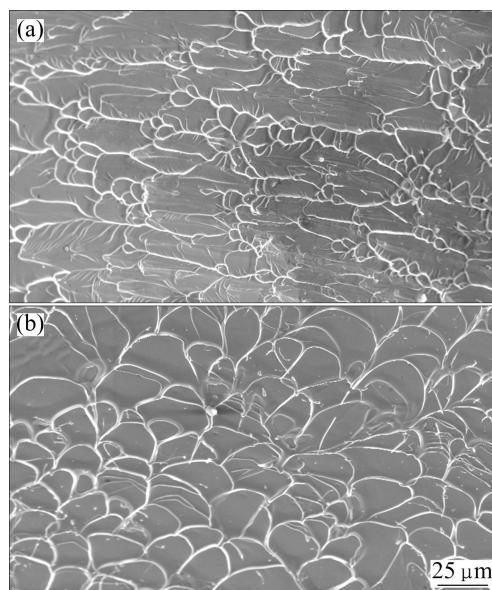


图 4 Cu₅₅Zr₃₆Al₇Ti₂ 与 Cu₅₅Zr₃₈Al₅Ga₂ 金属玻璃剪切带的断口形貌

Fig.4 Fracture morphologies of shear bands of metallic glasses Cu₅₅Zr₃₆Al₇Ti₂ (a) and Cu₅₅Zr₃₈Al₅Ga₂ (b)

属玻璃压缩的典型特征^[17]。比较其断口特征可知, $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_5\text{Ga}_2$ 金属玻璃呈现发展更好的剪切带, 更大的叶脉区域, 即更优良的压缩塑性。所以, 微量元素改变了剪切滑移面的结构非均匀性, 导致剪切面上剪切带繁殖的差异。

3 结论

1) 通过 2%Ag、2%Ti 和 2%Ga 的替代, Cu-Zr-Al 系金属玻璃的临界直径从 2 mm 增大到 3 mm; 当 Ag 的含量提高到 6%时, 临界直径增大到 4 mm。化学性质相似元素的替代可以提高该合金系的玻璃形成能力, 而原子尺寸相似元素的替代则无此效果。

2) 添加 Ag 可同时提高准四元 Cu-Zr-Al-M 金属玻璃的压缩强度和塑性, 而添加 2%Ti 和 2%Ga 可分别获得最高的压缩强度 2 163 MPa 和最大压缩应变 8.7%。通过比较 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{36}\text{Al}_7\text{Ti}_2$ 和 $\text{Cu}_{55}\text{Zr}_{38}\text{Al}_5\text{Ga}_2$ 金属玻璃的断口表面形貌发现, 断裂过程中剪切带的繁殖行为受到微量添加元素的明显影响, 导致压缩塑性的提高。

3) 添加化学性质相似的微量元素, 不但可以提高基体合金的玻璃形成能力, 而且也可以提高基体合金的力学性能, 添加量合适时可使二者获得协同调节作用。

REFERENCES

- [1] ZHANG T, YAMAMOTO T, INOUE A. Formation, thermal stability and mechanical properties $(\text{Cu}_{0.6}\text{Zr}_{0.3}\text{Ti}_{0.1})(100-x)\text{M}_x$ (M=Fe, Co, Ni) bulk glassy alloys [J]. *Mater Trans JIM*, 2002, 43(12): 3222–3226.
- [2] CHEN Q J, FAN H B, YE L, RINGER S, SUN J F, SHEN J, MCCARTNEY D G. Enhanced glass forming ability of Fe-Co-Zr-Mo-W-B alloys with Ni addition[J]. *Mater Sci Eng A*, 2005, 402(1/2): 188–192.
- [3] MA D, CAO H, DING L, CHANG Y A, HSIEH K C, PAN Y. Bulkier glass formability enhanced by minor alloying additions[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(17): 171914.
- [4] LIANG W Z, SHEN J, SUN J F. Effect of Si addition on the glass-forming ability of a NiTiZrAlCu alloy[J]. *J Alloys Compd*, 2006, 420(1/2): 94–97.
- [5] MAKINO A, LI X, YUBUTA K, CHANGA C, KUBOTA T, INOUE A. The effect of Cu on the plasticity of Fe-Si-B-P-based bulk metallic glass[J]. *Scripta Mater*, 2009, 60(5): 277–280.
- [6] PARK E S, CHANG H J, KIM D H, OHKUBO T, HONO K. Effect of the substitution of Ag and Ni for Cu on the glass forming ability and plasticity of $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ alloy[J]. *Scripta Mater*, 2006, 54(9): 1569–1573.
- [7] KIM Y C, LEE J C, CHA P R, AHN J P, FLEURY E. Enhanced glass forming ability and mechanical properties of new Cu-based bulk metallic glasses[J]. *Mater Sci Eng A*, 2006, 437(2): 248–253.
- [8] WANG W H. Roles of minor additions in formation and properties of bulk metallic glasses[J]. *Prog Mater Sci*, 2007, 52(4): 540–596.
- [9] HSIEH P J, LIN S C, SU H C, JANG J S C. Glass forming ability and mechanical properties characterization on $\text{Mg}_{58}\text{Cu}_{31}\text{Y}_{11-x}\text{Gd}_x$ bulk metallic glasses[J]. *J Alloys Compd*, 2009, 483(1/2): 40–43.
- [10] LI R, PANG S J, MA C L, ZHANG T. Influence of similar atom substitution on glass formation in (La-Ce)-Al-Co bulk metallic glasses[J]. *Acta Mater*, 2007, 55(11): 3719–3726.
- [11] JI X L, PAN Y. Predicting alloy compositions of bulk metallic glasses with high glass-forming ability[J]. *Mater Sci Eng A*, 2008, 485(1/2): 154–159.
- [12] WANG Q, QIANG J B, WANG Y M, XIA J H, DONG C. Bulk metallic glass formation in Cu-Zr-Ti ternary system[J]. *J Non-Crystal Solids*, 2007, 353: 3425–3428.
- [13] CHEN G L, HUI X D, FAN S W, KOU H C, YAO K F. Concept of chemical short range order domain and the glass forming ability in multicomponent liquid[J]. *Intermetallics*, 2002, 10(11/12): 1221–1232.
- [14] LIU Xiong-jun, HUI Xi-dong, JIAO Jian-ting, CHEN Guo-liang. Formation and crystallization of Zr-Ni-Ti metallic glass[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2004, 14(5): 858–863.
- [15] INOUE A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. *Acta Mater*, 2000, 48(1): 279–306.
- [16] 吴春姬, 张亚南, 王文全, 张金宝, 苏峰. 添加元素对 Mg-基非晶合金非晶形成能力和热稳定性的影响[J]. *吉林大学学报: 理学版*, 2009, 47(5): 1042–1046.
- WU Chun-ji, ZHANG Ya-nan, WANG Wen-quan, ZHANG Jin-bao, SU Feng. Effects of addition elements on glass forming ability and thermostability of Mg-based amorphous alloys[J]. *Journal of Jilin University: Science Edition*, 2009, 47(5): 1042–1046.
- [17] 刘龙飞, 张厚安, 胡义伟. 大块金属玻璃剪切带形成的“原位”压缩实验研究[J]. *湖南科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 24(1): 23–27.
- LIU Long-fei, ZHANG Hou-an, HU Yi-wei. Study on the formation of shear bands in BMGs by in-situ compression tests[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 24(1): 23–27.

(编辑 陈卫萍)