

块体非晶合金 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 的形成与力学性能

杨元政, 董振江, 仇在宏, 陈小祝, 谢致薇, 白晓军

(广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006)

摘 要: 用铜模吸铸法获得直径 3 mm 的 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 块体非晶合金, 采用 X 射线衍射仪、示差扫描量热仪、压缩实验及扫描电镜等研究其结构、热稳定性、压缩性能及断口形貌。Mo 的引入有利于非晶的形成, 该非晶合金表现为两级晶化行为, 玻璃转变温度为 422.6 °C, 晶化起始温度为 453.4 °C; 其压缩应力—应变曲线呈近似线性关系, 不存在塑性变形阶段, 为脆性断裂, 断裂强度为 1 720 MPa, 变形量为 3.4%, 断口形貌为清晰的脉状河流花纹; 含少量晶态相的 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ 非晶合金仍为脆性断裂, 断裂强度为 1 546 MPa, 变形量为 3.3%, 断口形貌呈混乱的脉状河流花纹, 且有类似液滴的小球形貌。

关键词: CuZrTiMo 块体非晶合金; 热稳定性; 应力—应变曲线; 断口形貌

中图分类号: TG 139.8

文献标识码: A

Formation and mechanical properties of $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ bulk metallic glass

YANG Yuan-zheng, DONG Zheng-jiang, QIU Zai-hong, CHEN Xiao-zhu, XIE Zhi-wei, BAI Xiao-jun

(Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Bulk metallic glass (BMG) $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ rods with a diameter of 3 mm were prepared by using copper mould suction cast. The structure, thermal stability, compression strength and fracture morphology of this bulk metallic glass were investigated by X-ray diffractometry, differential scanning calorimetry, compression tester and scanning electronic microscopy. The results indicate that a small addition of molybdenum is beneficial for improving glass-forming ability in $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ system. This amorphous alloy shows a two-stage crystallization, the glass-transition temperature is about 422.6 °C and the onset of crystallization temperature is 453.4 °C. Moreover, this amorphous alloy exhibits a linear relation between the stress and strain and shows a brittle fracture mode. The compression strength is about 1 720 MPa and the elongation about 3.4%. The surface morphology of fracture shows a clear vein pattern. The characteristics of both compression behaviour and fracture of $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ alloy with a small amount of amorphous phase are similar to those of the above fully amorphous alloy, but the strength decreases to 1 546 MPa, the elongation is 3.4% and the vein pattern becomes a little disordered and some liquid drops can be observed in the fracture surface.

Key words: CuZrTiMo bulk amorphous alloy; thermal stability; stress—strain curve; fracture morphology

相对于 Zr-基块体非晶合金, Cu 基块体非晶合金具有更高的强度^[1-2], 特别是在断裂前存在较大的塑性变形^[3], 因此具有较大的潜在的工程应用价值。Cu 基块体非晶合金已成为当前非晶合金研究的重要体系之

一。相图计算分析表明^[4]: 合金 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 处于 Cu-Zr-Ti 系共晶点成分附近, 具有较强的非晶形成能力。但实验研究表明^[5]: $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 成分具有最强的非晶形成能力。因此合金 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 的非晶形成能力

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50371020); 广东省科技计划资助项目(2003B12106); 广东省自然科学基金资助项目(06021473, 04009459)

收稿日期: 2006-06-29; 修订日期: 2007-04-23

通讯作者: 杨元政, 教授; 电话: 020-39322575, 020-39322570; E-mail: yangyz@gdut.edu.cn

与结构性能研究已有大量的文献报道^[1, 5-7], 其最大非晶尺寸一般在 4 到 5 mm。而合金 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 仅能获得最大为 2 mm 的非晶合金棒^[8], 目前仅对其热稳定性及晶化特征开展了研究^[8], 尚没有对其强度、断裂方面的研究报道。由于用较低纯度的原材料难以制备出块体的 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 非晶合金, 因此, 期望通过引入合金元素来提高其非晶形成能力, 通常从合金元素的原子尺寸差、混合热等角度分析确定拟引入的元素, 但理论对实际的指导作用十分有限, 往往出现不一致的现象。所以本文作者选择能有效提高 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 块体非晶合金力学性能的 Nb 元素^[9], 以及使 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 合金玻璃形成能力降低的 Mo 元素^[10], 探讨 Mo 与 Nb 元素对 $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{M}_x$ ($\text{M}=\text{Mo}, \text{Nb}$) 合金的玻璃形成能力的影响, 以期更深入了解不同元素对非晶形成能力的影响规律, 并实现用较低纯度的原材料制备出较大尺寸的块体非晶合金。同时也报道形成的 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 块体非晶合金的热稳定性、压缩与断裂性能。

1 实验

采用纯度为 99.0% 以上的金属 Cu、Zr、Ti、Mo 和 Nb 原料, 按所需摩尔比进行配料。在氩气保护下, 用非自耗式电弧对原料进行多次熔炼, 使合金成分均匀, 然后采用铜模吸铸法制备直径为 2~3 mm 的合金棒。采用日本理学 D/Max-III A 型 X 射线分析仪 (Cu K_α , $\lambda=0.154\ 184\ \text{nm}$) 检测试样的相结构与相组成, 并用 TA 热分析仪在 DSC-TGA 模式下研究样品的热稳定性, 用 WAW-500C 型微机控制的材料万能试验机测量样品的压缩应力—应变曲线。非晶合金的断口形貌在 XL30FEG 型扫描电镜 (SEM) 上进行观察。

2 结果与分析

图 1(a) 所示为直径 3 mm 的 $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ ($x=1, 2, 3, 4$) 合金的 XRD 谱。可以看出, 仅当 $x=2$ 时表现出较好的非晶性; 当 $x=3$ 时, 在漫射峰上已经出现了少量的晶态峰, 表明此时合金为非晶相与晶态相的复合组织; 当 $x=1$ 和 4 时, 即 $\text{Cu}_{59}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_1$ 和 $\text{Cu}_{56}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_4$ 合金为完全晶态合金, 主要的晶态相为 $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$ 和 Cu_2TiZr 。图 1(b) 所示为直径 2~3 mm 的 $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ ($x=1, 2$) 合金的 XRD 谱。可以看出,

$x=1$ 时, 直径 2 mm 和 3 mm 试样的 XRD 谱均出现尖锐的晶态峰, 表明该合金为晶态合金。当 $x=2$ 时, 则直径 2 mm 和 3 mm 试样都仅出现一个弥散的漫射峰, 表现出较好的非晶性。说明适量的 Mo 能提高该合金的非晶形成能力。

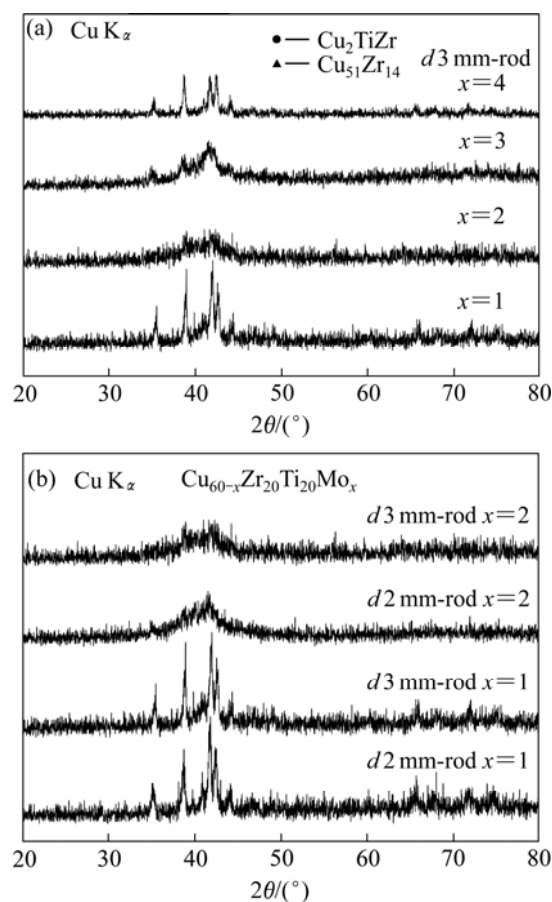


图 1 直径 3 mm $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ 合金及直径 2~3 mm 的 $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ 合金的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ alloy rods with diameter of 3 mm (a) and $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ alloy rods with diameter of 2 to 3 mm (b)

图 2 所示为直径 3 mm 的 $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Nb}_x$ ($x=2, 5$) 合金的 XRD 谱。可以看出, 添加 2% 或 5% 的 Nb 元素后, 合金均出现了尖锐的晶态峰, 而且峰值的位置相当, 表明添加 Nb 元素, 不能提高 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 合金的玻璃形成能力。这与 Nb 在 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 中的作用完全不同, Nb 在 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 中不仅对提高非晶形成能力有利, 并使非晶合金的力学性能提高明显^[9]。可见, 添加的少量合金元素对体系非晶形成能力的影响难以简单地从原子的尺寸差、混合热及电负性等参数进行解释。

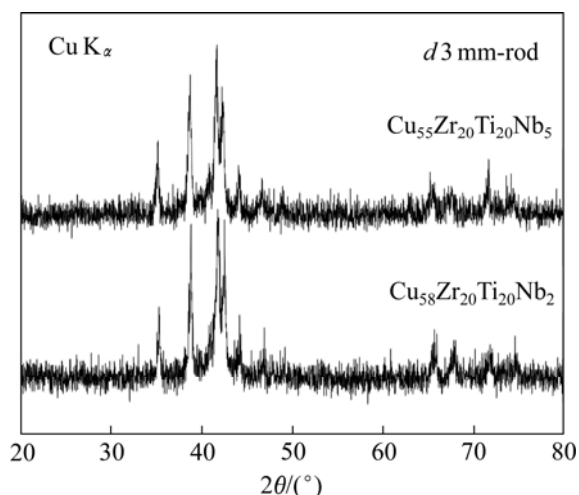


图2 直径 3 mm 的 $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Nb}_x$ ($x=2, 5$) 合金的 XRD 谱
Fig.2 XRD patterns of $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Nb}_x$ ($x=2, 5$) alloy rods with diameter of 3 mm

图 3 所示为 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 块体非晶合金在升温速率为 20 K/min 时的 DSC 曲线。可见, $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 块体非晶有 2 个明显的晶化放热峰, 表明其在连续加热升温过程中表现为两级晶化行为。图 3 所示块体非晶 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 的热力学参数列于表 1。

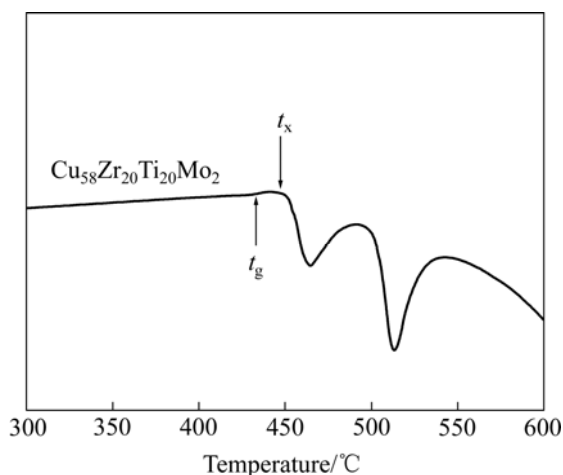


图3 块体非晶 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}\text{Mo}_2$ 在 20 °C/min 升温速率下的 DSC 曲线

Fig.3 DSC curve of $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}\text{Mo}_2$ bulk metallic glass alloys at heating rate of 20 °C/min

表 1 块体非晶 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}\text{Mo}_2$ 的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}\text{Mo}_2$ bulk metallic glass alloy (°C)

t_g	t_x	t_{p1}	t_{p2}	Δt_x
422.6	453.4	464.2	513.2	30.8

从表中可以看出, 该合金玻璃转变温度 t_g 为 422.6 °C, 晶化起始温度 t_x 为 453.4 °C, 过冷液相区 Δt_x 为 30.8 °C, 表现了较好的热稳定性。可见, 加合金元素 Mo 2% 后的 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 合金的玻璃形成能力能有较明显提高, 能够制得直径 3 mm 的块体非晶。文献 [8] 报道的 2 mm 棒状 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 非晶合金的 t_g 为 433 °C, t_x 为 463 °C, Δt_x 为 30 °C, 两者相应参数基本一致。而 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 薄带非晶合金^[11-13]的 t_g 在 408~443 °C 之间, t_x 在 445~464 °C 之间, Δt_x 在 21~38.2 °C 之间, 且 t_g 和 t_x 随冷却速率升高而增大, 而 Δt_x 随冷却速率升高而降低^[13]。可见, 不同工艺制备的 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 块体非晶与薄带非晶对应相关温度参数有一定的一致性。此外, $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 块体非晶的温度参数 t_g 为 426.5 °C, t_x 为 467.7 °C, Δt_x 为 41.2 °C。仅从 Δt_x 的数值上看, $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 合金的非晶形成能力比 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 和 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 合金的都高。

块体非晶 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 合金在同一次吸铸的棒状合金中截取了两个试样进行单轴压缩实验。两个试样的压缩应力—应变曲线极为相似, 如图 4 所示。可以看出, 试样断裂前应力—应变呈近似线性关系, 不存在塑性变形阶段, 为典型的脆性断裂。断裂强度为 1 720 MPa。图 5 所示为上述试样的断裂样品及其断口的 SEM 形貌。试样沿约 57° 断裂, 与常见的最大切应力的 45° 相差明显, 其主要原因尚不清楚。断口形貌则为典型的非晶合金断裂时出现的脉状河流花纹, 纹路清晰, 没有类似液滴的形貌出现。

图 6 所示为直径 3 mm 含有少量晶态相的 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ 非晶合金的压缩应力—应变曲线。可

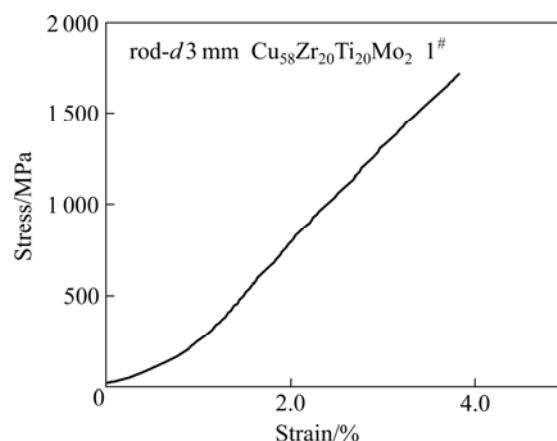


图4 块体非晶 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 的压缩应力—应变曲线

Fig.4 Compressive stress—strain curve of $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ bulk metallic glass alloy

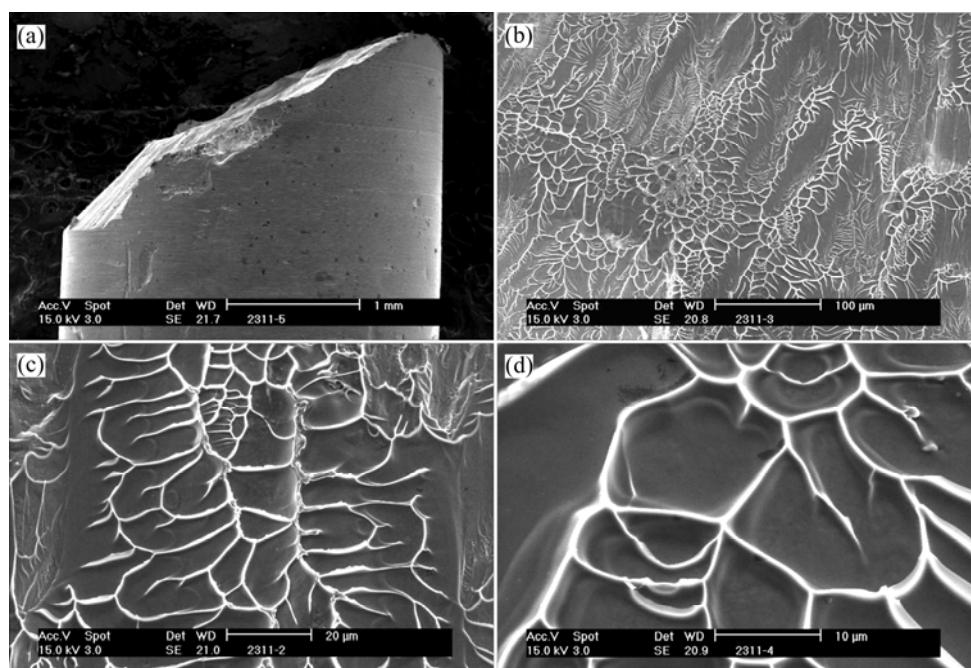


图 5 直径 3 mm 块体非晶 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 的压缩断口形貌

Fig.5 Compressive fracture surface morphologies of $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ bulk metallic glass rod with diameter of 3 mm: (a) Shear fracture of compressive specimen; (b), (c), (d) Compressive surface at different magnification

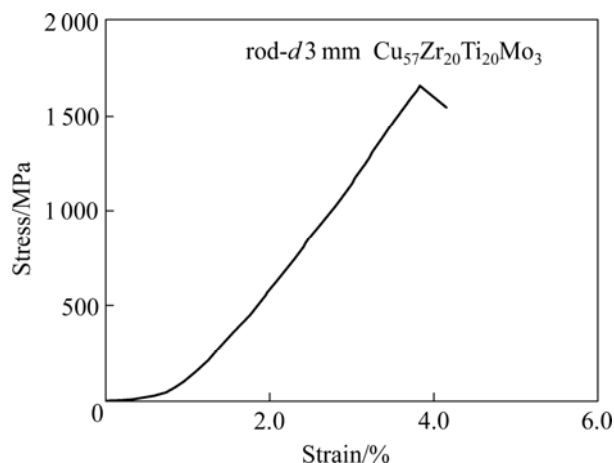


图 6 块体非晶 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ 压缩应力—应变的曲线

Fig.6 Compressive stress—strain curves of $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ bulk metallic glass alloy

以看出, 试样断裂前应力—应变曲线整体上也呈较好的线性关系, 该试样在断裂前, 存在一定的屈服现象, 仍为典型的脆性断裂。断裂强度为 1 546 MPa。图 7 所示为该试样的断裂样品及其断口的 SEM 形貌。试样沿约 50° 角度断裂, 断口形貌也为脉状河流花纹, 但纹路混乱, 高倍 SEM 形貌显示断口上存在较清晰的类液滴的花纹形貌(图 7(c)和(d))。

非晶合金在压缩时通常发生不均匀变形, 塑性变形集中发生在极少数窄的剪切带中^[14-16], 在应力达到一定程度时将萌生裂纹, 裂纹一旦形成, 迅速扩展并断裂, 在剪切带内形成河流脉状纹络^[15-16]。最大剪切变形区的局域塑性变形产生大量的热量, 使温度升高^[16], 特别是由于从裂纹萌生到断裂时间极短, 在这个过程中可能释放应变能, 从而造成局域温度急剧升高并熔化^[16]。因此在非晶合金的断口形貌中可能存在类液滴现象^[16]。

这种类液滴形貌与晶粒的形貌是有明显区别的, 一般晶粒的边界呈清晰的非圆弧状, 而类液滴的边界呈明显的圆弧状。由上面的 XRD 结果与断口形貌结果可以推测, 局域熔化可能主要发生在非晶基体中的细小晶粒表面或边界处。在完全非晶的 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 合金的断口形貌中未观察到类液滴现象, 而在含有少量晶态相的 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ 合金观察到类液滴现象, 说明有细小晶态相存在时, 变形更加局域化, 局域化加热现象更显著。

从表 2 可以看出, 完全非晶态 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 合金的强度高于含有晶态相的 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ 合金, 表现出较好的力学性能, 但与 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 块体非晶合金相比, 其强度更低^[1, 5]。

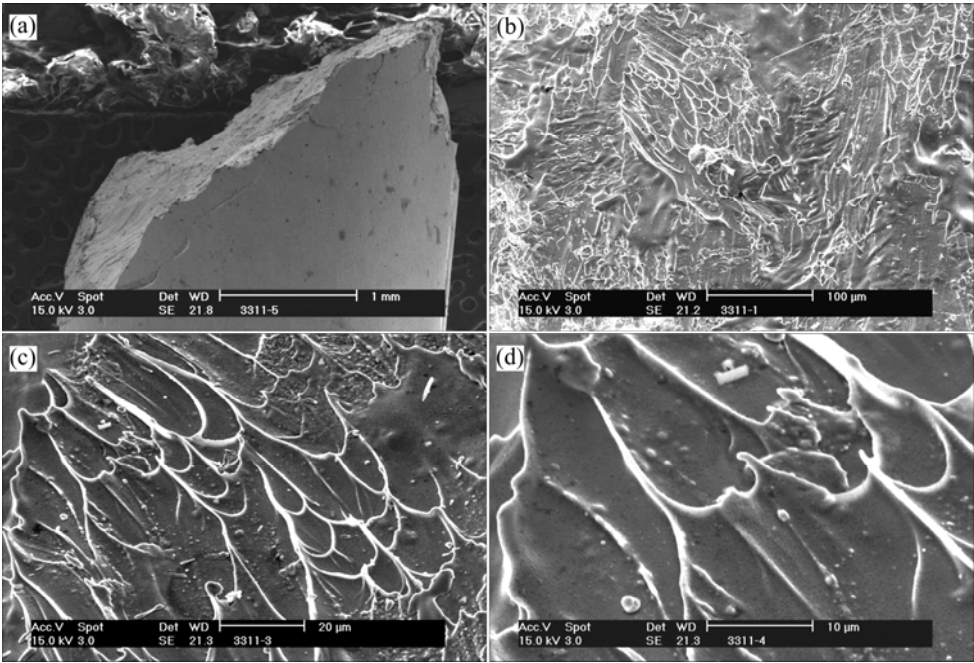


图 7 直径 3 mm 块体非晶 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ 的压缩断口形貌

Fig.7 Compressive fracture surface morphologies of $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ metallic glass alloy rod with diameter of 3 mm: (a) Shear fracture of compressive specimen; (b), (c), (d) Compressive surface at different magnification

表 2 $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ ($x=2, 3$) 合金的压缩性能参数

Table 2 Mechanical properties of $\text{Cu}_{60-x}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_x$ ($x=2, 3$) bulk metallic glass alloys

Alloy	$\sigma_{c.f.}/$ MPa	$\sigma_{max}/$ MPa	$\varepsilon_f/$ %	$\varepsilon_f/$ %
$\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$	1 720	1 720	3.4	3.4
$\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$	1 546	1 662	3.0	3.3

3 结论

1) 少量 Mo 的引入可以提高 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 合金的非晶形成能力, 从而用较低纯度原材料制备出直径达 3mm 的 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 块体非晶合金, 而 Nb 对提高该合金的非晶形成能力作用不明显。

2) 在升温速率为 20 K/min 时块体非晶合金 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 表现为两级晶化行为, 其玻璃转变温度为 422.6 $^{\circ}\text{C}$, 晶化起始温度为 453.4 $^{\circ}\text{C}$, 过冷液相区为 30.8 $^{\circ}\text{C}$, 表现出较好的热稳定性。

3) 块体非晶合金 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 在断裂前的应力—应变呈近似线性关系, 不存在塑性变形阶段, 为典型的脆性断裂, 断裂角为 57 $^{\circ}$, 断裂强度为 1 720 MPa, 变形量为 3.4%, 断口形貌则为典型的非晶合金

断裂时出现的脉状河流花纹, 纹路清晰, 没有类似液滴的形貌出现。

4) 含有少量晶态相的 $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_3$ 非晶合金的压缩应力—应变曲线呈近似线性关系, 仍为典型的脆性断裂, 断裂角约 50 $^{\circ}$, 强度比完全非晶态 $\text{Cu}_{58}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Mo}_2$ 合金的强度稍低, 为 1 546 MPa, 变形量为 3.3%, 断口形貌也为脉状河流花纹, 但纹路混乱, 且存在类似液滴的形貌。

REFERENCES

[1] Inoue A, Zhang W, Zhang T, et al. High-strength Cu-based bulk glassy alloys in Cu-Zr-Ti and Cu-Hf-Ti ternary systems[J]. Acta Materialia, 2001, 49: 2645–2652.

[2] 孔 见, 陈 光, 王志华, 等. $\text{Cu}_{47}\text{Ti}_{34}\text{Zr}_{11}\text{Ni}_8$ 块体非晶合金的热稳定性和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(9): 1585–1589.

KONG Jian, CHEN Guang, WANG Zhi-hua, et al. Thermal stability and mechanical properties of $\text{Cu}_{47}\text{Ti}_{34}\text{Zr}_{11}\text{Ni}_8$ bulk amorphous alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(9): 1585–1589.

[3] Jayanta D, Mei B T, Ki B K, et al. Work-hardenable ductile bulk metallic glass[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94: 205501–1/4.

[4] Kim D, Lee B J, Kim N J, Thermodynamic approach for predicting the glass forming ability of amorphous alloys[J].

- Intermetallics, 2004, 12: 1103–1107.
- [5] Inoue A, Zhang W, Zhang T, et al. Thermal and mechanical properties of Cu-based Cu-Zr-Ti bulk glassy alloys[J]. Mater Trans, 2001, 42(6): 1149–1151.
- [6] Kasai M, Matsubara E, Saida J, et al. Crystallization behavior of $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ bulk glassy alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2004, A375/377: 744–748.
- [7] 杨英俊, 孙剑飞, 李永泽, 等. 二元共晶比例法制备铜基大块非晶合金[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(8): 1179–1183.
- YANG Ying-jun, SUN Jian-fei, LI Yong-ze, et al. Fabrication of Cu-based bulk metallic glasses by binary deep eutectic method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(8): 1179–1183.
- [8] Cao P Q, Zhou Y H, Horsewell A, et al. Amorphous to $\text{Cu}_{61}\text{Zr}_{14}$ phase transformation in $\text{Cu}_{60}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$ alloy[J]. J Phys: Condens Mater, 2003, 15: 8703–8712.
- [9] Zhang T, Inoue A. Thermal stability and mechanical properties of bulk glassy Cu-Zr-Ti-(Nb,Ta) alloys[J]. Mater Trans, 2002, 43(6): 1367–1370.
- [10] 杨元政, 仇在宏, 谢致薇, 等. 合金元素对 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 合金的非晶形成能力与显微硬度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(7): 1155–1160.
- YANG Yuan-zheng, QIU Zai-hong, XIE Zhi-wei, et al. Effects of alloying elements on glass forming ability and microhardness of $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(7): 1155–1160.
- [11] Concustell A, Revesz A, Surinach S, et al. Microstructure evolution during decomposition and crystallization of the $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ amorphous alloy[J]. J Mater Res, 2004, 19(2): 505.
- [12] Concustell A, Zielinska M, Revesz A. Thermal characterization of $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_x\text{Ti}_{40-x}$ metallic glasses ($x=15, 20, 22, 25, 30$)[J]. Intermetallics, 2004, 12(10/11): 1063–1067.
- [13] Revesz A, Concustell A, Varga L K, et al. Influence of the wheel speed on the thermal behavior of $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2004, A375/377: 776–780.
- [14] 郭秀丽, 李德俊, 王英敏, 等. 块体非晶态合金 $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{7.5}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{17.5}$ 的室温单轴压缩断裂行为[J]. 金属学报, 2003, 39(10): 1089–1093.
- GUO Xiu-li, LI De-jun, WANG Yin-min, et al. Fracture behavior of bulk metallic glass under monaxial compression at room temperature[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2003, 39(10): 1089–1093.
- [15] Zhang Z F, Eckert J, Schultz L. Difference in compressive and tensile fracture mechanisms of $\text{Zr}_{59}\text{Cu}_{20}\text{Al}_{10}\text{Ni}_8\text{Ti}_3$ bulk metallic glass[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 1167.
- [16] Wright W J, Schwarz R.B, Nix W D. Localized heating during serrated plastic flow in bulk metallic glasses[J]. Mater Sci Eng A, 2001, A319/321: 229–232.

(编辑 陈爱华)