

# Ti-Cu 基非晶合金玻璃形成能力与力学性能

李培友

(陕西理工学院, 陕西 汉中 723000)

**摘要:** 基于“二元共晶混合”法设计 Ti-Cu-Ni-Zr 合金成分, 通过水冷铜模铸造法制备出不同直径 Ti-Cu-Ni-Zr 合金棒。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、差示扫描量热仪 (DSC)、万能材料试验机和扫描电镜 (SEM) 研究了 Ti-Cu-Ni-Zr 合金玻璃形成能力和力学性能。结果表明, Ti-Cu-Ni-Zr 合金具有较高玻璃形成能力, 其临界直径可达 4 mm; Ti-Cu-Ni-Zr 合金玻璃形成能力近似相等, 而表征玻璃形成能力的热力学参数过冷液相区  $\Delta T_x$ , 参数  $\gamma$ , 约化玻璃转变温度  $T_{rg}$  也近似相等。Ti<sub>32.3</sub>Cu<sub>47.6</sub>Ni<sub>7.9</sub>Zr<sub>12.2</sub> 和 Ti<sub>31.6</sub>Cu<sub>48.2</sub>Ni<sub>7.7</sub>Zr<sub>12.5</sub> 大块非晶合金分别具有 0.7% 和 0.2% 的塑性, 而 Ti<sub>30</sub>Cu<sub>49.5</sub>Ni<sub>7.2</sub>Zr<sub>13.3</sub> 和 Ti<sub>28.55</sub>Cu<sub>50.7</sub>Ni<sub>6.75</sub>Zr<sub>14</sub> 大块非晶合金断裂机制近似为脆性断裂。Ti-Cu-Ni-Zr 大块非晶合金塑性越大, 其剪切带数量越多且扩展深度越大, 反之亦然。另外, 对于塑性材料, 锯齿流变振幅越大, 对应样品表面剪切带扩展深度越明显; 锯齿流变振幅越小, 对应样品表面剪切带扩展深度越浅; 近似脆性材料的锯齿流变对应次剪切带萌生, 而对于完全脆性大块非晶合金, 在应力-应变曲线上并未发现锯齿流变现象, 相应的在样品外表面也并未发现次剪切带。

**关键词:** 大块非晶合金; 玻璃形成能力; 热力学; 力学性能; 锯齿流变

中图分类号: TG139<sup>+</sup>.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0509-06

非晶合金具有长程无序而短程有序的原子结构, 其独特的结构特征使其具有独特的优异性能, 比如高强度、高耐磨耐腐蚀性、生物相容性及高弹性模量等<sup>[1-4]</sup>。在非晶合金领域, 寻找新型非晶合金组分始终是研究者一个热门话题。在寻找合金组分的方法中, Inoue 等人<sup>[5]</sup>提出了设计非晶合金组分的 3 个经验规则: (1) 合金组分至少需要 3 种元素, (2) 主要元素之间原子尺寸差为 12% 以上, (3) 主要元素之间混合热为较大的负值; 另外, 一些研究者提出了微量元素添加法或“行代换”添加法<sup>[6,7]</sup>, 以及“二元共晶混合”法<sup>[8-11]</sup>。一些研究者发现, 多元非晶合金组分是由二元深共晶组分按照不同比例混合而成; 研究发现, 在设计合金组分方面, 可以根据二元合金相图找出二元深共晶组分, 然后根据非晶合金组分设计实际需求, 调整不同二元共晶组分的比例系数, 即可获得新型不同体系的非晶合金组分<sup>[8-11]</sup>。其中, “二元共晶混合”法既有合金设计理论方面依据<sup>[10]</sup>, 也有方便快捷高效性<sup>[8-11]</sup>。基于此法, 已发现几种非晶合金组分, 比如 Ti-Cu 基和 Zr 基非晶合金<sup>[8,11]</sup>。在已报道的非晶合金体系中, Ti 基或 Ti-Cu 基非晶合金由于具有较小密度、较高强度而一直备受材料研究者青睐<sup>[12-14]</sup>。然而到目前为止, 在已开发 Ti 基和 Ti-Cu 基大块非晶合金中普

遍含有毒元素 Be<sup>[12]</sup> 或贵金属元素 Pd<sup>[13]</sup>, 均不能满足“绿色”材料设计要求。另外, 较高含量 Zr 和 Pd 元素将导致合金原材料具有较高费用, 所以降低 Zr 含量以及不含有毒元素 Be 和贵金属 Pd 在设计 Ti-Cu 基大块非晶合金组分方面具有重要的实用价值。本研究基于“二元共晶混合”法设计富 Ti-Cu 基 Ti-Cu-Ni-Zr 合金组分, 研究其玻璃形成能力与热力学参数之间的关系, 研究不同组分合金的力学性能, 并对剪切带和锯齿流变进行讨论。

## 1 实验

Ti-Cu-Ni-Zr 铸锭由纯金属元素(纯度高于 99.9%) 混合经电弧熔化, 且在保护气氩气环境下进行制备。为保证合金元素在熔炼过程中达到化学均匀, 合金铸锭均反复熔炼 4 次以上, 最后将熔炼好的合金锭放入吸铸坩埚内用电弧熔化并充入铜模, 制成直径为 2~4 mm 长为 15 mm 的圆柱状样品。随后, 用慢速金钢锯将样品进一步切割成热分析和力学性能分析所需尺寸。

样品微结构采用 X 射线衍射仪(XRD)在 Cu K $\alpha$  辐射下进行表征, 且仪器运行电压为 30 kV。本实验采用差示扫描量热仪(Perkin-Elmer DSC 7)与差热分析仪(Perkin-Elmer DTA 7)测量 Ti-Cu-Ni-Zr 样品热力学参

收稿日期: 2017-02-19

基金项目: 陕西理工学院博士启动经费 (SLGKYQD2-22)

作者简介: 李培友, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 陕西理工学院材料科学与工程学院, 陕西 汉中 723000, 电话: 0916-2641711, E-mail: lipeiyou112@163.com

数。实验样品均为直径 3 mm 薄片状试样，其质量范围为 6~30 mg。实验中，采用流动高纯 Ar 气保护试样以防氧化，且升温速率为 0.33 K·s<sup>-1</sup>。

在室温下单轴压缩试验采用的仪器为 CMT5105 型电子万能材料试验机，所有试验均压缩 3 次，最后取平均值作为试验数据。圆柱棒样品直径为 2 mm，长为 4 mm，且应变率为 1.4×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>。采用 Hitachi SU 1510 型扫描电镜观察样品断口形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 成分设计

在文献[9]中，通过“二元共晶混合”法，设计出了富 Ti 基 Ti-Cu-Ni-Zr 非晶合金成分。事实上，富 Ti 基非晶合金组分是由 4 个 Cu<sub>73</sub>Ti<sub>27</sub>、Zr<sub>76</sub>Ni<sub>24</sub>、Ti<sub>76</sub>Ni<sub>24</sub> 和 Cu<sub>62</sub>Zr<sub>38</sub> 二元深共晶成分所组成，如图 1a 所示阴影区域，通过调整共晶单元 Ti<sub>76</sub>Ni<sub>24</sub> 和 Cu<sub>62</sub>Zr<sub>38</sub> 系数，可以设计富 Ti<sup>[9]</sup>基合金组分，如图 1b 所示阴影区域。在图 1b 阴影区域，数字 0.55 和 0.10 连接实线即为确定 Cu<sub>73</sub>Ti<sub>27</sub> 和 Zr<sub>76</sub>Ni<sub>24</sub> 二元共晶系数，数字 0.25 和 0.10 虚线即为变化的 Ti<sub>76</sub>Ni<sub>24</sub> 和 Cu<sub>62</sub>Zr<sub>38</sub> 二元共晶系数。在式(1)中，调整 x 变量，即可得到富 Ti-Cu 的 Ti-Cu-Ni-Zr 合金组分 C<sub>am</sub> 为：

$$C_{am} = 0.55(\text{Cu}_{73}\text{Ti}_{27}) + 0.1(\text{Zr}_{76}\text{Ni}_{24}) + (0.25 - x)(\text{Ti}_{76}\text{Ni}_{24}) + (0.1 + x)(\text{Cu}_{62}\text{Zr}_{38}) \quad (1)$$

当 x=0.02, 0.03, 0.05, 0.07 时，合金成分分别为 Ti<sub>32.3</sub>Cu<sub>47.6</sub>Ni<sub>7.9</sub>Zr<sub>12.2</sub>，Ti<sub>31.6</sub>Cu<sub>48.2</sub>Ni<sub>7.7</sub>Zr<sub>12.5</sub>，Ti<sub>30</sub>Cu<sub>49.5</sub>Ni<sub>7.2</sub>Zr<sub>13.3</sub> 和 Ti<sub>28.55</sub>Cu<sub>50.7</sub>Ni<sub>6.75</sub>Zr<sub>14</sub>。

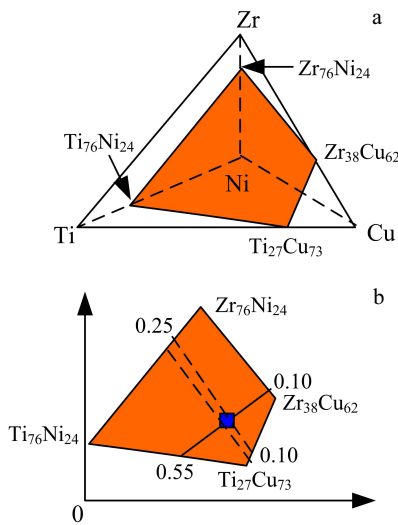


图 1 Ti-Cu-Ni-Zr 合金成分图

Fig.1 Component diagram of Ti-Cu-Ni-Zr alloys<sup>[4]</sup>: (a) eutectic diagram and (b) design schematic of component

### 2.2 相结构分析

图 2 所示为 Ti<sub>32.3</sub>Cu<sub>47.6</sub>Ni<sub>7.9</sub>Zr<sub>12.2</sub> (x=0.02)，Ti<sub>31.6</sub>-Cu<sub>48.2</sub>Ni<sub>7.7</sub>Zr<sub>12.5</sub> (x=0.03)，Ti<sub>30</sub>Cu<sub>49.5</sub>Ni<sub>7.2</sub>Zr<sub>13.3</sub> (x=0.05) 和 Ti<sub>28.55</sub>Cu<sub>50.7</sub>Ni<sub>6.75</sub>Zr<sub>14</sub> (x=0.07) 四元合金的 XRD 图谱。由图可知，直径为 4 mm 的 Ti-Cu-Ni-Zr 合金衍射图谱呈现宽的漫散峰并没有明显的晶体峰。结果表明，该合金玻璃形成能力的临界直径可达 4 mm。因此，通过调整 Ti<sub>76</sub>Ni<sub>24</sub> 和 Cu<sub>62</sub>Zr<sub>38</sub> 二元共晶系数，可以获得四元富 Cu 基 Ti-Cu-Ni-Zr 大块非晶合金。该结果近似等于富 Ti 基大块非晶合金的临界直径<sup>[9]</sup>。

### 2.3 热力学分析

为了探讨 Ti-Cu-Ni-Zr 合金玻璃形成能力，图 3 显示了 Ti<sub>32.3</sub>Cu<sub>47.6</sub>Ni<sub>7.9</sub>Zr<sub>12.2</sub>，Ti<sub>31.6</sub>Cu<sub>48.2</sub>Ni<sub>7.7</sub>Zr<sub>12.5</sub>，Ti<sub>30</sub>Cu<sub>49.5</sub>Ni<sub>7.2</sub>Zr<sub>13.3</sub> 和 Ti<sub>28.55</sub>Cu<sub>50.7</sub>Ni<sub>6.75</sub>Zr<sub>14</sub> 合金的 DSC 和 DTA 曲线。由 DSC 和 DTA 曲线所测热力学参数列入表 1 中，这些参数包括玻璃转变温度 T<sub>g</sub>、初始晶化温度 T<sub>x</sub>、熔化温度 T<sub>m</sub>、液相线温度 T<sub>l</sub>、ΔT<sub>x</sub>(=T<sub>x</sub>-T<sub>g</sub>)<sup>[15]</sup>、T<sub>rg</sub>(=T<sub>g</sub>/T<sub>l</sub>)<sup>[16]</sup>、参数 γ(=T<sub>x</sub>/(T<sub>g</sub>+T<sub>l</sub>))<sup>[17]</sup>等。由表 1 可知，T<sub>g</sub> 值随 x 值增加而增加，T<sub>m</sub> 和 T<sub>l</sub> 随 x 值增加先增加后减少，其中，4 个合金的 T<sub>rg</sub>、γ、和 ΔT<sub>x</sub> 值变化范围较小，可认为近似不变。结果表明，由于 4 个合金玻璃形成能力的临界直径均为 4 mm，可认为 4 个合金具有近似的玻璃形成能力；而表征玻璃形成能力的热力学参数 T<sub>rg</sub>、γ 和 ΔT<sub>x</sub> 值也近似相等，表明了具有近似玻璃形成能力的合金具有近似相等的热力学参数值。

### 2.4 力学分析

图 4 所示为 4 个铸态 Ti<sub>32.3</sub>Cu<sub>47.6</sub>Ni<sub>7.9</sub>Zr<sub>12.2</sub>，Ti<sub>31.6</sub>Cu<sub>48.2</sub>Ni<sub>7.7</sub>Zr<sub>12.5</sub>，Ti<sub>30</sub>Cu<sub>49.5</sub>Ni<sub>7.2</sub>Zr<sub>13.3</sub> 和 Ti<sub>28.55</sub>Cu<sub>50.7</sub>Ni<sub>6.75</sub>Zr<sub>14</sub> 试样在应变率为 4×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> 时室温压缩应力-应变曲线。结果表明，Ti<sub>32.3</sub>Cu<sub>47.6</sub>Ni<sub>7.9</sub>Zr<sub>12.2</sub> 合金的屈服强度 σ<sub>y</sub> 可达 1911 MPa，其塑性形变为 0.7%，在 4 个非晶合金中，该合金具有最好的塑性应变；Ti<sub>31.6</sub>Cu<sub>48.2</sub>Ni<sub>7.7</sub>Zr<sub>12.5</sub> 合金在 4 个合金中具有最大的屈服强度和断裂强度 σ<sub>k</sub>，其值分别为 1920 和 2020 MPa；然

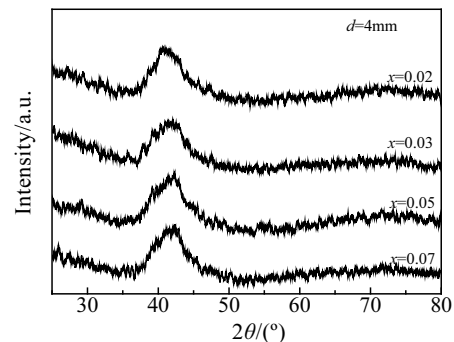


图 2 Ti-Cu-Ni-Zr 合金的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of Ti-Cu-Ni-Zr alloys

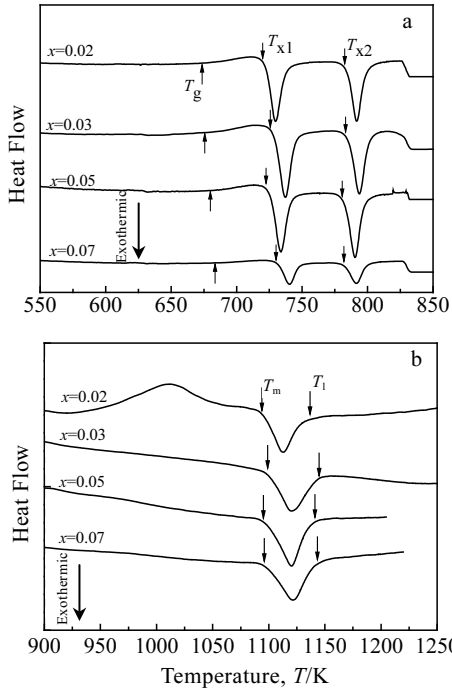


图 3 Ti-Cu-Ni-Zr 合金的 DSC 和 DTA 曲线  
Fig.3 DSC (a) and DTA (b) curves of Ti-Cu-Ni-Zr alloys

表 1 Ti-Cu-Ni-Zr 合金热力参数

Table 1 Thermal parameters of the Ti-Cu-Ni-Zr alloys

Alloy	$T_g/K$	$T_x/K$	$\Delta T_x/K$	$T_m/K$	$T_i/K$	$T_{rg}$	$\gamma$
$Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$	674	720	46	1094	1137	0.593	0.396
$Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$	677	723	46	1099	1145	0.591	0.397
$Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$	681	722	41	1095	1141	0.597	0.396
$Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$	683	728	45	1096	1142	0.598	0.399

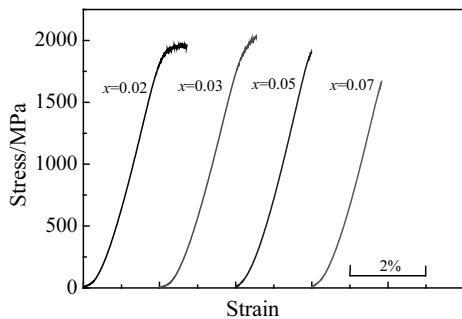


图 4 Ti-Cu-Ni-Zr 试样应力-应变曲线  
Fig. 4 Stress-strain curves of Ti-Cu-Ni-Zr samples

而,  $Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$  和  $Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$  合金近似为脆性断裂, 其断裂强度分别为 1904 和 1669 MPa;

表 2 Ti-Cu-Ni-Zr 合金的力学数据

Table 2 Mechanical data of Ti-Cu-Ni-Zr alloys

Alloy	$\sigma_e/MPa$	$\sigma_y/MPa$	$\sigma_k/MPa$
$Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$	1813	1911	1962
$Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$	1697	1920	2020
$Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$	1814	1904	1904
$Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$	—	—	1669

另外, 表 2 中  $\sigma_e$  为弹性极限值。所以, 随着二元共晶单元  $Ti_{76}Ni_{24}$  和  $Cu_{62}Zr_{38}$  系数  $x$  的变化, 其塑性明显降低, 而屈服强度和断裂强度先增加后减小。其中, 4 个大块非晶合金强度可满足工程材料使用需求。

### 2.5 断口外表面剪切带

剪切带数量, 多个剪切带之间的相互作用, 以及剪切带扩展均对非晶合金的塑性变形有显著影响<sup>[18-20]</sup>, 4 个合金随着  $x$  值变化其不同塑性应变可以从剪切带数量及扩展进行分析。图 5a 所示为  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$  大块非晶合金断裂外表面图, 5 条近似平行的剪切带呈现在断口外表面, 这与图 4 所呈现出的塑性形变相吻合; 而  $Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$  大块非晶合金在图 5b 和图 5c 所呈现的交叉剪切带扩展深度明显小于图 5a 中  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$  大块非晶合金剪切带扩展深度, 这与图 4 中  $Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$  大块非晶合金的塑性小于  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$  大块非晶合金塑性相吻合。另外, 近似为脆性断裂的  $Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$  和  $Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$  合金的压缩断口外表面如图 5d、5e 和 5f 所示。结果表明, 近似为脆性断裂的  $Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$  大块非晶合金在对图 5d 中间部位进行放大, 可以发现仅有一条平行于主剪切面的微小剪切带, 如图 5e 所示; 然而脆性断裂的  $Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$  大块非晶合金在其外表面却无剪切带, 如图 5f 所示。因此, 从剪切带数量和扩展深度能够很好地解释 Ti-Cu-Ni-Zr 大块非晶合金的塑性特征。

### 2.6 锯齿流变分析

非晶合金塑性变形总伴随锯齿流变现象, 从应力-应变曲线上锯齿流变变化可判断剪切带形成过程<sup>[18-20]</sup>。图 6 所示为塑性材料锯齿流变曲线。由图可知, 具有较好塑性的  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$  非晶合金锯齿流变分为 3 个阶段, 第 1 阶段锯齿流变振幅较小, 且振幅呈近似周期性, 对应多个剪切带萌生或形核; 第 2 阶段锯齿流变振幅增大, 且振幅呈非周期性, 对应部分剪切带扩展或新剪切带形核和萌生; 第 3 阶段锯齿流变振幅最大, 且振幅呈现非周期性, 对应多个剪切带快速扩展或相互作用<sup>[18]</sup>, 这与图 5a 所示多个平行或交叉剪切带相吻合。图 6b 所示为塑性材料  $Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$  非晶合金的锯齿流变分为 2

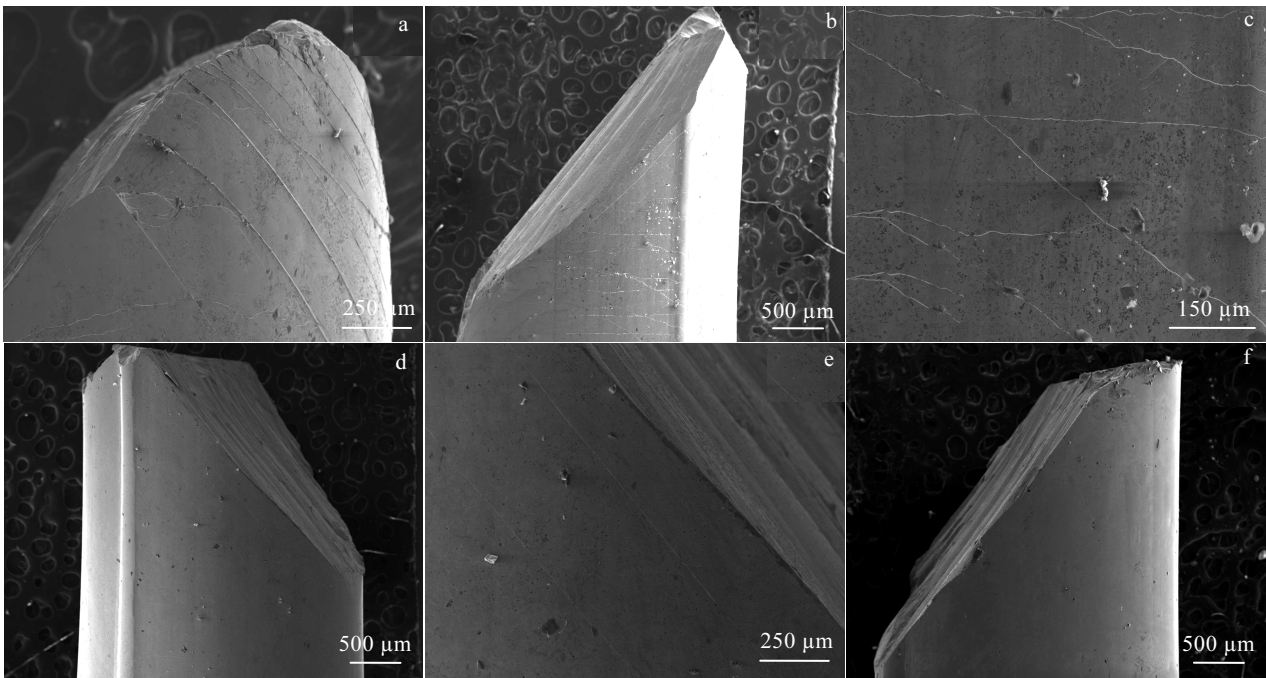


图 5 Ti-Cu-Ni-Zr 大块非晶合金的压缩断口形貌

Fig.5 Compression fracture morphologies of Ti-Cu-Ni-Zr BMGs: (a)  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$ ; (b, c)  $Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$ ; (d, e)  $Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$ ; (f)  $Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$

个阶段，第 1 阶段与  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$  非晶合金锯齿流变第 1 阶段相同，同样对应着剪切带萌生或形核；然而，第 2 阶段仅有 2 个锯齿流变振幅较大，对应着部分剪切带缓慢扩展，这与图 5b 和 5c 所示多个剪切带相吻合。从塑性材料锯齿流变可以发现，锯齿流变振幅越大，对应样品表面剪切带扩展深度越明显，锯齿流变振幅越小，对应样品表面剪切带扩展深度越浅。

图 7 所示为脆性材料锯齿流变曲线。在图 7a 中，虚线为弹性变化，在偏离最大弹性应变的应力-应变曲线上，仅有 2 个较小锯齿流变振幅，对应剪切带萌生，这与图 5e 外表面 2 条微弱剪切带相吻合，从而也说明了  $Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$  大块非晶合金断裂类型近似为脆性断裂。对于完全脆性断裂的  $Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$  大块非晶合金，在图 7b 中，并无锯齿流变呈现在应力-应变曲线上，样品在线弹性形变阶段即发生断裂。所以，对于近似脆性断裂材料，锯齿流变对应次剪切带萌生，而对于完全脆性材料，在线弹性应力-应变曲线上并未发现锯齿流变现象，在样品外表面也未发现次剪切带。

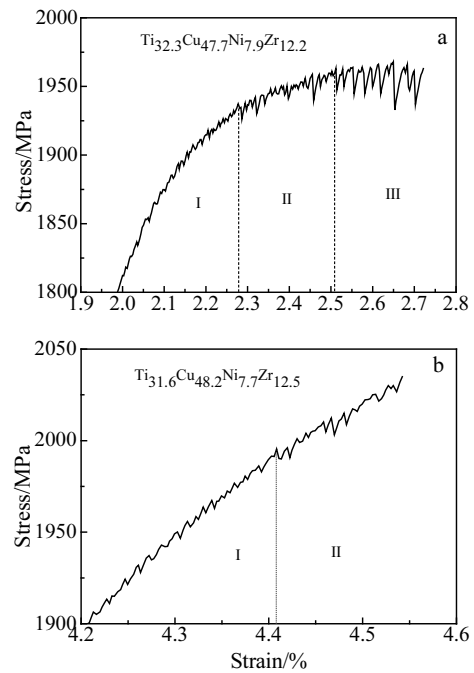


图 6 塑性材料 Ti-Cu-Ni-Zr 大块非晶合金锯齿流变  
Fig.6 Serrated flow of plastic material Ti-Cu-Ni-Zr BMGs: (a)  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$  and (b)  $Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$

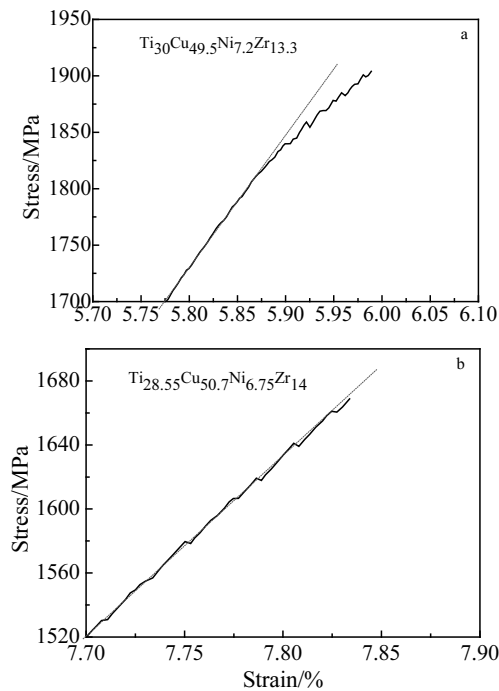


图 7 脆性 Ti-Cu-Ni-Zr 大块非晶合金的锯齿流变

Fig.7 Serrated flow of brittle Ti-Cu-Ni-Zr BMGs:

(a)  $\text{Ti}_{30}\text{Cu}_{49.5}\text{Ni}_{7.2}\text{Zr}_{13.3}$  and (b)  $\text{Ti}_{28.55}\text{Cu}_{50.7}\text{Ni}_{6.75}\text{Zr}_{14}$

### 3 结 论

1) Ti-Cu-Ni-Zr 非晶合金具有较高玻璃形成能力, 其临界直径可达 4 mm; Ti-Cu-Ni-Zr 合金玻璃形成能力近似相等, 而表征玻璃形成能力的热力学参数过冷液态区  $\Delta T_x$ , 参数  $\gamma$ , 约化玻璃转变温度  $T_{rg}$  也近似相等。

2)  $\text{Ti}_{32.3}\text{Cu}_{47.6}\text{Ni}_{7.9}\text{Zr}_{12.2}$  和  $\text{Ti}_{31.6}\text{Cu}_{48.2}\text{Ni}_{7.7}\text{Zr}_{12.5}$  大块非晶合金分别具有 0.7% 和 0.2% 塑性, 而  $\text{Ti}_{30}\text{Cu}_{49.5}\text{Ni}_{7.2}\text{Zr}_{13.3}$  和  $\text{Ti}_{28.55}\text{Cu}_{50.7}\text{Ni}_{6.75}\text{Zr}_{14}$  大块非晶合金断裂机制近似为脆性断裂。Ti-Cu-Ni-Zr 大块非晶合金塑性越大, 其剪切带数量越多且扩展深度越大, 反之亦然。

3) 对于塑性材料, 锯齿流变振幅越大, 样品外表面剪切带扩展深度越明显, 锯齿流变振幅越小, 样品外表面剪切带扩展深度越浅; 对于近似脆性材料, 锯齿流变对应次剪切带萌生; 而对于完全脆性材料, 在应力-应变曲线上并未发现锯齿流变现象, 在样品外表面也未发现次剪切带。

### 参考文献 References

- [1] Zhang Xiaoyun(张香云), Yuan Zizhou(袁子洲), Feng Xuelei(冯雪磊) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(8): 2034
- [2] Qiu Chunlong(邱春龙), Huang Lu(黄璐), Lu Xuyang(卢旭阳) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(5): 975
- [3] Suo Zhongyuan(索忠源), Song Yanling(宋艳玲), Qiu Keqiang(邱克强). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(9): 2289
- [4] Li Peiyu(李培友). *Dissertation for Doctor*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 28
- [5] Inoue A. *Bulk Amorphous Alloys-Prepared and Fundamental Characteristics*[M]. Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 1998: 3
- [6] Li Peiyu, Meng Fanyang, Wang Yongshan *et al.* *J Rare Earth*[J], 2015, 33(9): 972
- [7] Li R, Pang S J, Ma C L *et al.* *Acta Mater*[J], 2007, 55: 3719
- [8] Li Peiyu, Wang Gang, Ding Ding *et al.* *Mater Des*[J], 2014, 53: 145
- [9] Li Peiyu, Wang Gang, Ding Ding *et al.* *J Non-Cryst Solids*[J], 2012, 358: 3200
- [10] Lu Z P, Shen J, Xing D W *et al.* *Appl Phys Lett*[J], 2006, 89: 71910
- [11] Shen J, Zou J, Ye L *et al.* *J Non-Cryst Solids*[J], 2005, 351: 2519
- [12] Park J M, Chang H J, Han K H *et al.* *Scripta Mater*[J], 2005, 53(1): 1
- [13] Zhu S, Wang X, Qin F *et al.* *Mater Trans JIM*[J], 2007, 48(9): 2445
- [14] Park E S, Chang H J, Kim D H. *J Alloy Compd*[J], 2010, 504: 27
- [15] Inoue A. *Acta Mater*[J], 2000, 48: 279
- [16] Turnbull D. *Contemporary Physics*[J], 1969, 10: 473
- [17] Lu Z P, Liu C T. *Acta Mater*[J], 2002, 50: 3501
- [18] Sun B A, Pauly S, Tan J *et al.* *Acta Mater*[J], 2012, 60: 1160
- [19] Wang G, Chan K C, Xia L *et al.* *Acta Mater*[J], 2009, 57: 6146
- [20] Wang C, Sun B A, Wang W H *et al.* *J Appl Phys*[J], 2016, 119: 54 902

## Glass Forming Ability and Mechanical Properties of Ti-Cu-based Bulk Metallic Glasses

Li Peiyou

(Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

**Abstract:** The composition of the Ti-Cu-Ni-Zr bulk metallic glasses (BMGs) was designed based on “binary eutectic mixture” method. The Ti-Cu-Ni-Zr alloy rods with different diameters were prepared by water-cooled copper mold casting. The thermodynamic parameters were tested and the mechanical properties were investigated by differential scanning calorimeter (DSC), X-ray diffraction (XRD), universal testing machine and scanning electron microscope (SEM). The results show that the Ti-Cu-Ni-Zr BMGs have the high glass forming ability, and the critical diameter can reach 4 mm. The glass forming ability of Ti-Cu-Ni-Zr BMGs are approximately equal, and the thermodynamic parameters of characterizing glass formation ability, such as supercooled liquid region  $\Delta T_x$ ,  $\gamma$  parameter, reduced glass transition temperature  $T_{rg}$ , are also approximately equal. The  $Ti_{32.3}Cu_{47.6}Ni_{7.9}Zr_{12.2}$  and  $Ti_{31.6}Cu_{48.2}Ni_{7.7}Zr_{12.5}$  BMGs have the plasticity of 0.7% and 0.2%; however, the fracture mechanisms of  $Ti_{30}Cu_{49.5}Ni_{7.2}Zr_{13.3}$  and  $Ti_{28.55}Cu_{50.7}Ni_{6.75}Zr_{14}$  BMGs are the similar brittle fracture. For the Ti-Cu-Ni-Zr BMGs, the greater the plastic deformation is, the more the number of the shear bands are, the greater the depth are, and vice versa. In addition, for the plastic materials, the large the amplitude of the serrated flow is, the deeper the surface shear bands are, and vice versa. For the approximate brittle materials, the serrated flow corresponds to the initiation of the second shear band; and for the completely brittle materials, the phenomenon of serrated flow is not found in the stress-strain curves; however, the second shear bands are not found on the surface of the sample.

**Key words:** bulk metallic glasses; glass forming ability; thermodynamics; mechanical properties; serrated flow

---

Corresponding author: Li Peiyou, Ph. D., Lecturer, School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, P. R. China, Tel: 0086-916-2641711, E-mail: lipeiyou112@163.com