

# Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金动态压缩性能研究

陈娜<sup>1</sup>, 程焕武<sup>1,2</sup>, 孙驰<sup>1</sup>, 沈永华<sup>1</sup>, 王扬卫<sup>1,2,3</sup>,  
王迎春<sup>1</sup>, 李硕<sup>1</sup>, 刘娟<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 材料学院, 北京 100081)

(2. 冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)

(3. 北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 401120)

**摘要:** 通过铜模喷铸法制备了含有少量纳米晶的 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 大块非晶合金。利用分离式霍普金森杆 (SHPB) 分别对试样进行室温 (25 °C)、-80 °C 和液氮温度 (-196 °C) 3 种不同温度环境下的高应变率加载动态压缩实验, 结合带有能谱的场发射扫描电镜 (SEM) 观察材料压缩断口的形貌特征。对比分析发现: 材料在 -80 °C 下的动态最大抗压强度以及塑性变形最高, 最大抗压强度达到 2378 MPa, 塑性应变达到 12%, 强韧性配合优异, 在材料断口形貌中发现了独特的褶皱特征; 材料在室温以及液氮温度下的力学性能相近, 最大抗压强度在 1600 MPa 左右, 塑性应变达到 8% 左右, 断口中出现了大量的河流花样。材料在室温下表现为应变软化, 在低温下表现出一定程度的应变率强化效应。

**关键词:** Ti 基非晶合金; 纳米晶; 低温; 动态压缩

中图分类号: TG139<sup>+.8</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)11-4128-07

非晶合金 (Amorphous Alloy) 又被称为金属玻璃 (Metallic glass), 是近几十年来出现的最热门、最有发展前景的材料之一<sup>[1]</sup>。非晶合金具有高的屈服强度和断裂韧性, 耐腐蚀且加工性能良好<sup>[2]</sup>。其中, Ti 基非晶合金因具有高强度、高弹性模量以及低密度而被广泛应用于航空航天材料上。然而, Ti 基非晶合金具有室温脆性<sup>[3]</sup>和应变软化<sup>[4]</sup>的特点, 严重限制了其发展。有研究发现, 在非晶基体内原位生成第二相晶体能有效提高 Ti 基非晶合金的塑性, 这些第二相晶体包括纳米晶<sup>[5-7]</sup>、准晶相<sup>[8]</sup>和微米枝晶/颗粒<sup>[9]</sup>。在过去的几十年中, 由于实验条件的限制, 非晶合金力学性能的研究大多集中于室温和准静态条件下。近年来, 由于非晶合金在穿甲毁伤<sup>[10-13]</sup>和极端环境下的应用, 非晶合金在动态条件下以及低温环境下的力学性能引起了研究者的关注, 例如 2020 年美国宇航局就研制出了一种非晶合金齿轮, 该齿轮可承受登月和其他任务中的冲击和冰冻温度。姚健<sup>[14]</sup>等人研究了 Ti<sub>40</sub>Zr<sub>25</sub>Ni<sub>8</sub>Cu<sub>9</sub>Be<sub>18</sub> 块体非晶合金在液氮温度下的准静态压缩性能, 结果表明材料在低温下的抗压缩强度明显高于室温。Qiao<sup>[15]</sup>等人研究了几种不同合金系的非晶合金从 298 K 到 77 K 的最大抗压缩强度变化, 发现随着温度的降低, 最大抗压缩强度显著提高; Mohammad<sup>[16]</sup>研究了从高温到低温条件下不同应变率对

Ti 基块体非晶合金在弯曲下的锯齿状流变行为、应变率敏感性和有效活化体积的影响。另外, Zhou<sup>[17]</sup>和 Fan<sup>[18]</sup>等人发现非晶合金在动态载荷下具有很好的断裂强度和应变塑性。更重要的是, 现有的许多 Ti 基非晶合金都含有毒性元素 Be, 虽然添加 Be 元素可以显著提高非晶形成能力<sup>[19]</sup>, 但是在熔炼以及应用时产生的 Be 蒸气被吸入人体后, 会引起组织病变而致癌。为了避免 Be 元素对人体和环境产生危害, 本实验通过铜模喷铸法制备了 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 大块非晶合金, 对比不同应变率下, 该材料在室温以及 2 种低温环境的动态压缩性能, 并对材料的断裂机理进行分析。

## 1 实验

本实验以纯度均大于 99.8% 的 Ti、Zr、Cu、Ni 为材料熔炼得到名义成分为 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 的母合金锭。熔炼前先去除氧化层, 然后在氩气气氛保护下使用 SKYY08K-102 真空电弧炉中熔炼 3 次到 4 次, 以保证成分的均匀性。将制得的合金铸锭采用线切割技术加工成小块后放入石英管内, 在铜模喷铸系统中进行真空感应熔炼。当合金完全融化后利用高纯氩气将熔体喷入正下方的铜模内, 同时用装有液氮的模具来增加冷却速率, 制备得到  $\Phi 5$  mm $\times$ 80 mm 的 Ti 非晶合金棒材。利用 X

收稿日期: 2021-04-08

作者简介: 陈娜, 女, 1998 年生, 硕士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, 电话: 010-68912709, E-mail: 1534409595@qq.com

射线衍射仪 (XRD) ( $Cu\ K\alpha$ ) 以及高分辨率透射电镜 (HRTEM) 分析样品结构; 采用带有能谱的 S4800 型场发射扫描电镜 (HRSEM) 观察材料压缩断口形貌特征。利用电火花切割技术将试样加工成  $\Phi 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  的圆柱形试样进行后续的动态压缩测试。采用分离式霍普金森杆 (SHPB) 分别对试样进行 3 种不同温度环境下的高应变率加载动态压缩实验, 即: 室温 ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )、 $-80\text{ }^\circ\text{C}$  和液氮温度 ( $-196\text{ }^\circ\text{C}$ )。当进行  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  实验时, 先将乙醇与液氮按一定的比例混合后, 放入试样保温 30 min; 进行液氮温度实验时, 先将试样放入纯液氮溶液中保温 30 min。采用 2 种不同的冲击压力进行实验, 每种冲击压力重复 3 次, 目的是减小实验误差, 得到的应变率范围在  $1500\sim 3000\text{ s}^{-1}$  之间。

## 2 结果与分析

### 2.1 $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$ 块体非晶合金微观组织结构特征

图 1a 是  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  块体非晶合金的 XRD 图谱, 可以看到谱线只有 1 个主峰, 没有尖锐的特征峰。图 1b 是  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  非晶合金 HRTEM 下的非晶环衍射照片, 可以看到除了非晶特有的衍射环之外, 还有少量的白色斑点 (如箭头所示), 说明该 Ti 基非晶合金中含有少量的晶体相。图 2a 为  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  块体非晶合金中的纳米级弥散相, 由图 2b 和 2c 均可以看到纳米晶区域。由于晶体相的体积分数较小, 所以在 XRD 图像中难以观察到,  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  块体非晶合金的结构组成为非晶基体上分布少量纳米晶。

### 2.2 $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$ 块体非晶合金室温条件下动态压缩性能

本实验制备的  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  块体非晶合金室温动态压缩实验的数据如表 1 所示, 图 3 为对应的应力应变曲线。可以看到, 在室温动态压缩条件下, 试样首先发生弹性变形, 当应变达到 6% 左右时试样出现明显的屈服现象, 最大屈服应变达到 9%, 总应变达到 15%; 随

着应变的进一步增大, 材料产生断裂或破碎而失效。当采用不同的冲击压力进行实验时, 随着冲击压力的增大, 平均应变率也随之增大, 最大动态抗压强度呈下降趋势。可见, 随着应变率的增大材料呈现软化趋势。

图 4 为  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  块体非晶合金室温动态压缩断口形貌 ( $\dot{\epsilon}=1698\text{ s}^{-1}$ ), 从图 4a 断口形貌中可以看到材料断裂方向为箭头所示方向, 与右下角的脉状花样开口方向一致, 材料的断口表面出现了大量的脉状花样区域。图 4b 中出现了胞状区域, 从右上至左下依次排列, 且胞状结构的尺寸由中心向边缘逐渐减小。胞状区域的形状类似于韧窝结构, 但相较于韧窝结构来说, 其四周较为圆润, 内表面光滑, 在断裂过程中可吸收大量的变形能, 塑性较好, 另外在胞状结构的内部还出现了如图 4b 所示的剪切带。图 4c 为脉状花样的放大图, 可以看到其开口方向均是竖直向下, 在脉状区域的上方出现了光滑的熔融状非晶合金。Deibler<sup>[20]</sup>等人认为脉状花样的形状类似于 2 个固体平面之间存在一层薄的粘性层, 其形成与剪切带的软化以及粘度降低密切相关。

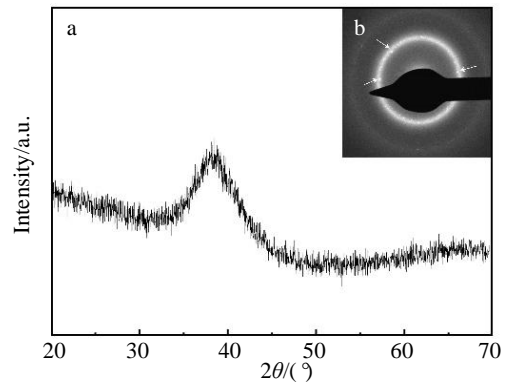


图 1  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  块体非晶合金的 XRD 图谱和 HRTEM-SAED 衍射花样

Fig.1 XRD pattern (a) and HRTEM-SAED pattern (b) of as cast  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  bulk amorphous alloy

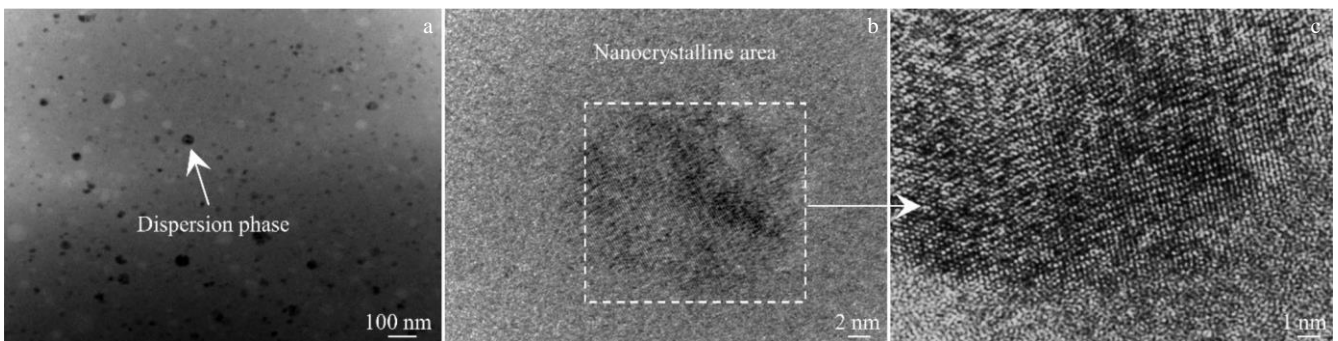


图 2  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  块体非晶合金中的弥散相和纳米晶

Fig.2 TEM (a) and HRTEM (b, c) images of dispersion phase and nanocrystalline of as-cast  $Ti_{45}Zr_{35}Cu_5Ni_{15}$  bulk amorphous alloy

表 1 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金室温动态压缩数据

Table 1 Dynamic compression test data of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at room temperature

| Size/<br>mm | Pressure/<br>MPa | $\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | Average<br>$\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | $\sigma_{db}/$<br>MPa |
|-------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Φ5×5        | 0.1              | 1640, 1679, 1698        | 1672                               | 1600                  |
| Φ5×5        | 0.3              | 1930, 1901, 2010        | 1947                               | 1550                  |

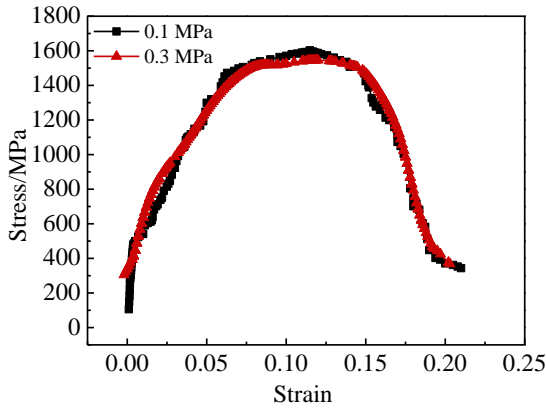


图 3 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金室温条件下动态压缩应力-应变曲线

Fig.3 Dynamic compression stress-strain curves of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at room temperature

Sun<sup>[21]</sup>等人研究发现引起软化的原因很大程度上可以归因于剪切带引起的自由体积的增加或局部绝热温升。对最终断裂前剪切带的实验研究表明，自由体积的

增加可能是软化的主要原因，而局部绝热温升是软化的结果。然而在断裂的最后阶段，绝热温升很显著，这是由于在剪切断裂时，样品中储存的弹性能以热的形式瞬间释放。所以脉状花样和熔敷状合金的出现，说明材料在室温动态压缩的过程中释放了大量的热量。

从图 4d 中可以看到裂纹和大量的熔滴，以及几条明显的河流花样（如箭头所指）。这些河流花样的主干方向基本一致，花样分支平滑且密集，类似于“鱼骨状”。Sun<sup>[22]</sup>首次在 Zr 基非晶合金的单轴压缩实验中发现了鱼骨状花样。他认为随着连续变形，剪切平面上形成的微裂纹由于约束而不能快速传播，沿着剪切方向以稳定和间歇的方式传播，从而在断口上留下不连续的剪切条纹，最终发展成鱼骨图案的分支。随着裂纹扩展速度的增加，这些分支最终形成了脉状花样。随着断裂的进行，断裂面积在剪切平面上逐渐增加，最后样品的两部分通过一些薄壁连接。材料突然断裂后，薄壁将成为鱼骨主干，连接周围的剪切分支，形成鱼骨状图案。

### 2.3 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金-80 °C 条件下动态压缩性能

表 2 为 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金-80 °C 下动态压缩实验数据，图 5 为对应的应力-应变曲线。可以看到当冲击压力为 0.3 MPa 时，平均应变率达到  $\dot{\epsilon}=2065 s^{-1}$ ，得到最大抗压强度 ( $\sigma_{db}$ ) 为 2378 MPa，此时最大的塑性应变为 12%，材料的强韧性配合优异。

Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金在-80 °C 条件下的动态压缩断口形貌如图 6 所示，可以看到，图 6a 中出现了

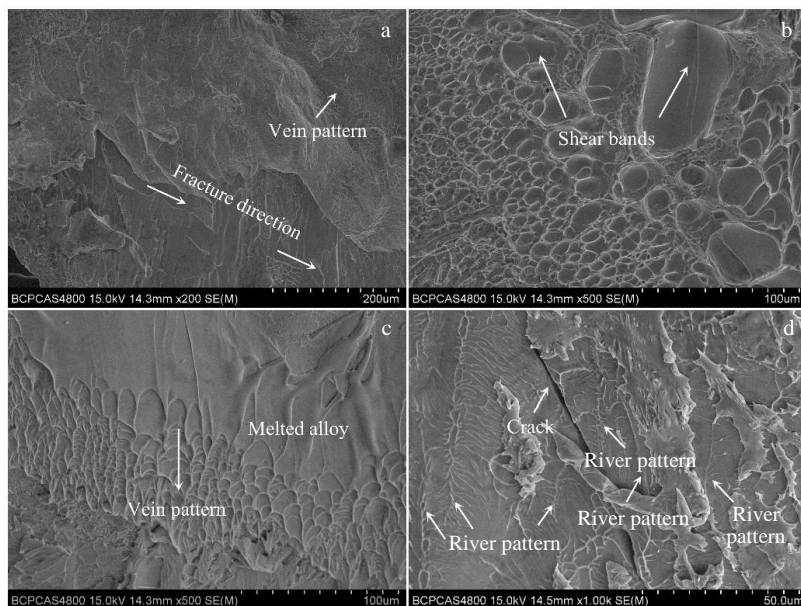


图 4 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金室温条件下动态压缩断口形貌

Fig.4 Dynamic compression fracture morphologies of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at room temperature ( $\dot{\epsilon}=1698 s^{-1}$ )

表 2 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金 -80 °C 条件下动态压缩数据

Table 2 Dynamic compression test data of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at -80 °C

| Size/<br>mm | Pressure/MPa | $\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | Average<br>$\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | $\sigma_{db}/$<br>MPa |
|-------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Φ5×5        | 0.1          | 1870, 1901, 1868        | 1879                               | 2290                  |
| Φ5×5        | 0.3          | 2010, 2100, 2085        | 2065                               | 2378                  |

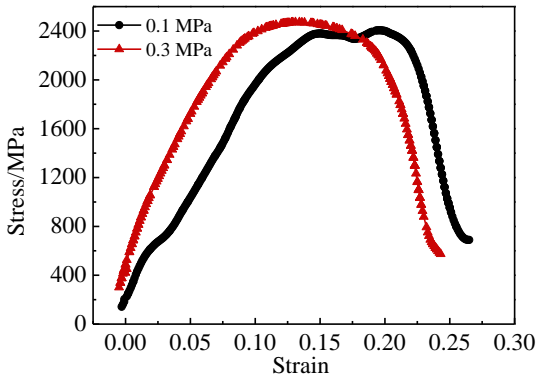


图 5 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金 -80 °C 条件下动态压缩应力-应变曲线

Fig.5 Dynamic compression stress-strain curves of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at -80 °C

一条宽度为 400 μm 左右的短裂纹, 在裂纹的下方出现了大量的脉状花样。裂纹内部光滑, 且出现了大量的多重剪切带, 这些剪切带在运动的过程中发生交互作用, 未出现单一剪切带沿剪切方向快速扩展而断裂, 从而在一定程度上提高材料的强度和塑性。值得注意的是, 断口表面出现了大量连续出现的褶皱区域, 如图虚线框所示。Fan<sup>[18]</sup>等人在 Ti<sub>43</sub>Zr<sub>27</sub>Mo<sub>5</sub>Cu<sub>10</sub>Be<sub>15</sub> 合金的动态压缩断口形貌中也观察到了类似的褶皱现象。断口表面的褶皱分布密集, 还出现了多重褶皱相互交织的情况, 说明该

区域出现了多种方向的力, 且受力较大。褶皱的出现说明在动态压缩过程中, 材料释放了大量的热量, 但是该热量被周围较低的温度环境吸收了一部分, 使得局部温度未达到材料的熔点, 故没有出现熔融的现象但是材料局部变软。软化的局部区域塑性增加, 在力的作用下, 该区域发生塑性变形产生褶皱, 褶皱的传播方向与受力方向相垂直。受到均布剪切力的褶皱较为平直, 受到集中剪切力的褶皱呈弯曲状。

图 6b 中出现了大面积的脉状花样, 一条长裂纹从这些脉状花样中穿过。箭头所示处的脉状花样顶部形成了薄片状的卷边, 较其他位置的脉状花样相对粗糙, 说明此区域的产生了较大的变形。图 6c 所示为韧窝结构, 右下方位置还出现了多重剪切带, 说明此区域的塑性较好。图 6d 中出现了少量的胞状结构和大量的脉状花样, 另外熔融区域的出现表明在动态压缩的过程中, 释放的热量可使材料熔化, 熔化的特征随着材料的断裂而留在断口上。图 6e 为脉状花样的放大图, 可以看到这些脉状花样的开口方向都是一致的, 花样开口方向即为材料剪切方向。

### 2.4 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金液氮温度条件下动态压缩性能

由表 3 和图 7 可以看到, 在液氮温度条件下, 随着冲击压力的增大, 即平均应变率增大, 在 0.3 MPa 冲击压力时, 最大抗压强度 ( $\sigma_{db}$ ) 增大到 1723 MPa, 塑性应变达 8%。另外, 材料还出现了一定程度的应变率硬化效应, 随着应变率的升高, 最大抗压强度提高了 11%。

图 8 所示为 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金在液氮条件下的动态断口形貌。其中, 图 8a 所示为解理台阶, 图中标示了 4 段解理台阶, 其台阶宽度从左至右依次约为  $d_1=120 \mu m$ 、 $d_2=100 \mu m$ 、 $d_3=80 \mu m$ 、 $d_4=60 \mu m$ , 台阶宽度依次减小。图 8b 中出现了河流花样与脉状花样的混合区域, 箭头所示位置为河流的主干。图 8c 所示为稀疏的脉状花样, 花样上面覆盖了几处小熔滴, 说明材料断裂

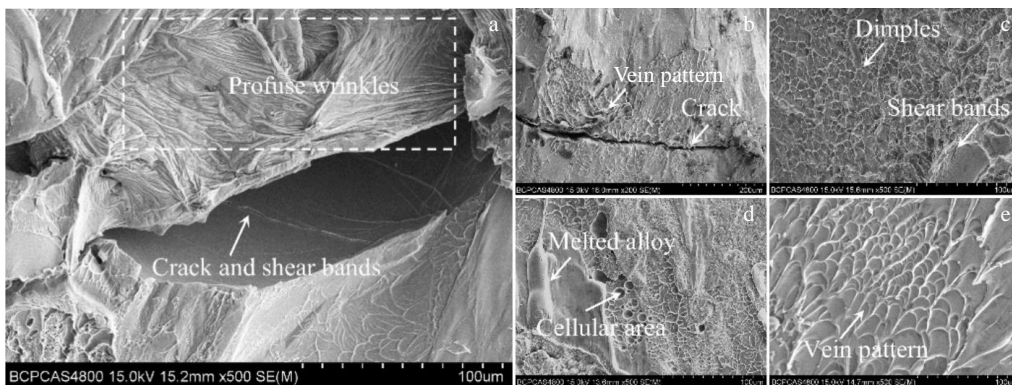


图 6 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金 -80 °C 条件下动态压缩断口形貌

Fig.6 Dynamic compression fracture morphologies of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at -80 °C ( $\dot{\epsilon}=2010 s^{-1}$ )



表 3 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金液氮条件下的动态压缩数据  
Table 3 Dynamic compression test data of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at liquid nitrogen temperature

| Size/mm | Pressure/MPa | $\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | Average $\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | $\sigma_{db}/MPa$ |
|---------|--------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Φ5×5    | 0.1          | 2113, 2200, 2250        | 2187                            | 1552              |
| Φ5×5    | 0.3          | 2700, 2860, 2698        | 2752                            | 1723              |

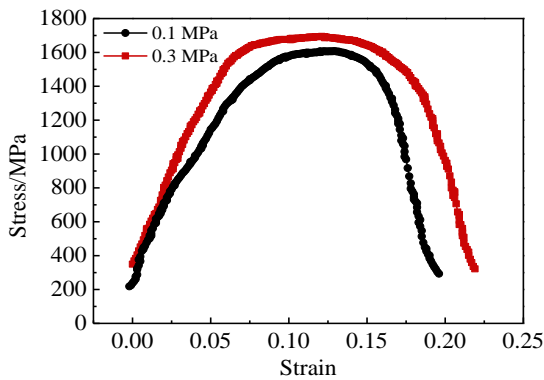


图 7 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金液氮温度下的动态压缩应力-应变曲线

Fig.7 Dynamic compression stress-strain curves of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at liquid nitrogen temperature

时释放的能量大部分被周围极低的温度环境所吸收，应变吸收能很小。

### 2.5 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金在 3 种温度条件下的动态压缩性能对比分析

由 HRTEM 像推断，Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金的组成为非晶基体上分布少量纳米晶。胡壮麒<sup>[23]</sup>等人在其研究中发现，对于均质的非晶基体，理论上不存在任何阻碍剪切带运动的结构，材料会因为单一剪切带的快速扩展而失效。若非晶基体中存在一定量的纳米晶，一方面，原位析出的纳米晶与非晶基体之间的界面结合程度良好，载荷能在两者之间进行良好的传递；另一方面，纳米晶的弹性变形远小于非晶基体，当材料受到载荷的作用产生弹性响应时，两者之间的弹性相互不匹配，使得两者的界面处产生应力集中，应力集中会诱发多重剪切带的形成。再者，纳米晶可以在一定程度上阻碍剪切带的拓展。这些纳米晶的存在使得材料在载荷作用下剪切带数量增加，塑性变形不再局限于极少数范围，材料变形方式发生改变。Inoue<sup>[24]</sup>等人在对 Zr-Al-Ni-Cu-(Ag 或 Pd) 大块非晶合金进行晶化时，发现当材料析出准晶相后，其延伸率从完全非晶时的 2.2% 增加到 3.1%，屈服强度由原来的 1510 MPa 增加到 1780 MPa。总的



图 8 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金液氮温度条件下动态压缩断口形貌

Fig.8 Dynamic compression fracture morphologies of Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> bulk amorphous alloy at liquid nitrogen temperature ( $\dot{\epsilon}=1698 s^{-1}$ )

来说，Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金在 3 种温度下的动态压缩实验均表现出一定的塑性变形，且塑性变形在 8% 左右，最高可达 12%，所以纳米晶的析出是材料强度和塑性提高的重要原因之一。

另外，Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金在室温温度环境下均表现出应变率软化效应，相反在低温下表现出一定程度上的应变率强化效应。对于晶体合金而言，例如 Ti-Al-V 合金，在动态载荷下通常表现出比准静态条件下更高的屈服强度。但是对于原位生成的非晶复合材料，屈服强度对应变率的依赖性较弱<sup>[25,26]</sup>。姚健<sup>[14]</sup>等人研究了 Ti<sub>40</sub>Zr<sub>5</sub>Ni<sub>8</sub>Cu<sub>9</sub>Be<sub>18</sub> 非晶合金在液氮温度和室温条件下，以不同应变速率进行加载的准静态压缩实验，发现具有应变率强化效应，其原因是在因为液氮温度下进行压缩实验时，需要更大的载荷才能促使剪切带的形核与扩展，从而增加非晶合金强度。

从 Ti<sub>45</sub>Zr<sub>35</sub>Cu<sub>5</sub>Ni<sub>15</sub> 块体非晶合金材料在 3 种不同温度条件下的动态压缩数据可以看出，材料在 -80 °C 下的动态最大抗压强度以及塑性变形最高，在液氮温度下的力学性能次之，室温条件下的力学性能相对最差。通过仔细对比研究材料在 3 种温度下的力学性能可以发现，在室温条件以及液氮温度下，材料的最大抗压强度均在 1600 MPa 左右，塑性变均在 8% 左右。另外，在两者的断口形貌图中均出现了河流花样，而河流花样是脆性断裂的典型特征之一，其形成是由于解理沿着相互平行的平面

以不连续的方式开裂, 相邻的局域没有发生塑性变形。

当环境温度为 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 从图 6 中可以看到特有的褶皱特征以及韧窝区域, 说明试样在压缩载荷下, 局部产生了绝热温升以及自由体积增加带来的粘度降低, 变形吸收了大量的动能, 塑性和韧性较好。与室温条件相比,  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的材料断口中熔敷较少, 说明材料在压缩过程中产生的动能一部分转化为热能被周围较低的环境所吸收, 材料的应变软化程度降低, 所以材料的抗压强度提高。与液氮条件 ( $-196\text{ }^\circ\text{C}$ ) 相比, 液氮温度过低, 周围环境吸收了大部分的能量, 用于材料变形的能量减少, 材料塑性变差, 使得压缩过程中的脆性增加, 强度和塑性都有所降低。综上所述, 在 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 材料在动态压缩载荷下的强度和塑性均表现为最高值, 强韧性配合优异。

### 3 结 论

1)  $\text{Ti}_{45}\text{Zr}_{35}\text{Cu}_5\text{Ni}_{15}$  块体非晶合金的结构为非晶基体上分布少量纳米晶, 纳米晶存在提高了材料的强度和塑性。

2)  $\text{Ti}_{45}\text{Zr}_{35}\text{Cu}_5\text{Ni}_{15}$  块体非晶合金在室温条件下均表现出应变软化特征, 在低温下表现出一定程度上的应变率强化效应。

3) 材料在室温条件下和液氮温度条件下的动态压缩实验中, 其最大抗压强度和塑性应变值相近。断口均观察到了大量的河流花样, 液氮温度条件下的断口中还观察到了明显的解理台阶。

4) 材料在 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 温度条件下的动态压缩实验中, 当平均应变率达到 $\dot{\epsilon}=2065\text{ s}^{-1}$ 时, 与其他 2 种温度环境相比, 其最大抗压强度值 ( $\sigma_{\text{db}}=2378\text{ MPa}$ ) 最高, 同时塑性应变 ( $\epsilon_{\text{p}}=12\%$ ) 也最高, 材料表现为高强度和高塑性, 强韧性匹配最优。

#### 参考文献 References

- [1] Wang Weihua(汪卫华). *Progress in Physics*(物理学进展)[J], 2013, 33(5): 177
- [2] Huang Jinsong(黄劲松), Liu Yong(刘咏), Chen Shiqi(陈仕奇) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(6): 1321
- [3] Jeong-Jung O, Louzguine-Luzgin D V, Inoue A. *Materials Science and Engineering C*[J], 2009, 29(1): 322
- [4] Ma Weifen, Kou Hongchao, Li Jinshan et al. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2009, 472(1-2): 214
- [5] Yin Enhuai, Zhang Ming, Pang Shujie et al. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2010, 504(S1): 10
- [6] Mei J N, Soubeyroux J L, Blandin J J et al. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2011, 509(5): 1626
- [7] Shibazaki Y, Yamada R, Saida J et al. *Communications Materials* [J], 2020, 53(1): 1
- [8] Kim Y C, Na J H, Park J M et al. *Applied Physics Letters*[J], 2003, 83(15): 3093
- [9] Qiao J W, Sun A C, Huang E W et al. *Acta Materialia*[J], 2011, 59 (10): 4126
- [10] Chen G, Hao Y F, Chen X W et al. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2017, 106: 110
- [11] Du Chengxin(杜成鑫), Du Zhonghua(杜忠华), Zhu Zhengwang(朱正旺). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(4): 1080
- [12] Du Chengxin(杜成鑫), Du Zhonghua(杜忠华), Zhu Zhengwang(朱正旺). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(6): 1632
- [13] Ma Yunfei(马云飞), Gong Pan(龚攀), Li Fangwei(李方伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(4): 1445
- [14] Yao Jian(姚健), Li Jinshan(李金山), Ma Weifeng(马卫锋) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(8): 1443
- [15] Qiao J W, Liaw P K, Zhang Y. *Scripta Materialia*[J], 2011, 64(5): 462
- [16] Mohammad T A K, Rouhollah T, Hossein A. *Journal of Non-Crystalline Solids*[J], 2021, 553: 120 497
- [17] Zhou J, Wu H H, Wu Y et al. *Scripta Materialia*[J], 2020, 186: 346
- [18] Fan Jitang, Wu Fufa, Li Dongfen. *Materials Science & Engineering A*[J], 2018, 720: 140
- [19] Johnson W L. *1998 Mrs Medal Award Lecture, Presented at Symposium Mm*[J], 1998, 554: 42
- [20] Deibler L A, Lewandowski J J. *Materials Science & Engineering A*[J], 2010, 527(9): 2207
- [21] Sun B A, Wang W H. *Progress in Materials Science*[J], 2015, 74: 211
- [22] Sun B A, Tan J, Pauly S et al. *Journal of Applied Physics*[J], 2012, 112(103533): 1
- [23] Hu Zhuangqi(胡壮麒), Zhang Haifeng(张海峰). *Acta Metall Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(11): 1391
- [24] Inoue A, Zhang T, Ishihara S et al. *Scripta Materialia*[J], 2001, 44(8-9): 1615
- [25] Qiao J W, Feng P, Zhang Y et al. *Journal of Materials Research* [J], 2010, 25(12): 2264
- [26] Qiao J W. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2013, 29(8): 685

## Dynamic Compression Properties of $\text{Ti}_{45}\text{Zr}_{35}\text{Cu}_5\text{Ni}_{15}$ Bulk Metallic Glass

Chen Na<sup>1</sup>, Cheng Huanwu<sup>1,2</sup>, Sun Chi<sup>1</sup>, Shen Yonghua<sup>1</sup>, Wang Yangwei<sup>1,2,3</sup>,  
Wang Yingchun<sup>1</sup>, Li Shuo<sup>1</sup>, Liu Juan<sup>1</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing 100081, China)

(3. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** The  $\text{Ti}_{45}\text{Zr}_{35}\text{Cu}_5\text{Ni}_{15}$  bulk metallic glass with a small amount of nanocrystalline was prepared by copper mould injection casting. The dynamic compression properties of the alloy was investigated with the split Hopkinson pressure bar (SHPB) under high strain rates at room temperature (25 °C), -80 °C and liquid nitrogen temperature (-196 °C). The morphology characteristics of the compression fracture were observed by field emission scanning electron microscope (SEM) with energy spectrum. Comparative analysis shows that the material exhibits maximum dynamic compressive strength and plastic deformation at -80 °C, and the maximum compressive strength reaches 2378 MPa when the plastic strain reaches 12%, which exhibits excellent mechanical strength and toughness. Furthermore, uncommon profuse wrinkles are also found on the fracture surface. The mechanical properties of the materials are similar at room temperature and liquid nitrogen temperature. The maximum compressive strength is around 1600 MPa while the plastic strain reaches about 8%, and the river pattern on the fracture surface of the material could also be observed. In addition, the material shows strain softening at room temperature and strain rate strengthening to a certain extent at low temperature.

**Key words:** Ti-based bulk metallic glass; nanocrystalline; low temperature; dynamic compression

---

Corresponding author: Cheng Huanwu, Ph. D., Associate Professor, School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68912709, E-mail: chenghuanwu@bit.edu.cn