

# Zr 基块体非晶合金的成分设计及其性能研究

朱坤森, 陶平均<sup>✉</sup>, 张超汉, 陈育淦, 张维建, 杨元政

广东工业大学材料与能源学院, 广州 510006

根据二元共晶混合法设计 Zr-Cu-Ni-Al 非晶合金成分, 利用铜模吸铸法制备 Zr-Cu-Ni-Al 合金棒材。采用 XRD、DSC、SEM 及准静态压缩实验研究了所设计合金的非晶形成能力和力学性能。结果表明: 所设计的 Zr-Cu-Ni-Al 合金均为非晶态结构, 其过冷液相区 ( $\Delta T_x$ ) 均超过 65 K, 有较好的非晶形成能力, 其中  $Zr_{55.7}Cu_{22.4}Ni_{7.2}Al_{14.7}$  合金的  $\Delta T_x$  最宽, 达到 82 K; 合金的塑性变形能力由低到高依次为:  $Zr_{57}Cu_{18.67}Ni_{8}Al_{16.33}$ 、 $Zr_{56.36}Cu_{20.53}Ni_{7.6}Al_{15.51}$ 、 $Zr_{54.4}Cu_{26.13}Ni_{6.4}Al_{13.07}$  和  $Zr_{55.7}Cu_{22.4}Ni_{7.2}Al_{14.7}$ , 其中  $Zr_{55.7}Cu_{22.4}Ni_{7.2}Al_{14.7}$  的塑性达到 5.5%, 抗压强度达到 1 885 MPa, 其他三种合金的塑性均不足 2%。剪切带的增殖和交互作用与非晶合金的塑性和强度密切相关。合金试样断口中均有熔滴存在, 这表明在合金变形过程中, 断裂处的合金组织发生了粘性流动, 并伴有脉纹产生。合金在塑性变形中均发生了锯齿流变, 锯齿流变与自由体积的变化密切相关。

**关键词** 非晶合金 成分设计 塑性变形 剪切带 锯齿流变

**中图分类号:** TG146.1 **文献标识码:** A

## Composition Design and Properties of Zr-based Bulk Amorphous Alloys

ZHU Kunsen, TAO Pingjun<sup>✉</sup>, ZHANG Chaohan, CHEN Yugan, ZHANG Weijian, YANG Yuanzheng

School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Zr-Cu-Ni-Al amorphous alloy compositions are designed according to binary eutectic mixing method, and are prepared by copper mold suction casting method. XRD, DSC, SEM and quasi-static compression tests were utilized to research the amorphous forming ability and mechanical properties of Zr-Cu-Ni-Al alloys. The results show that the designed Zr-Cu-Ni-Al alloys are completely amorphous structure, and their supercooled liquid region ( $\Delta T_x$ ) exceeds 65 K, and they have good amorphous forming ability. Among them,  $Zr_{55.7}Cu_{22.4}Ni_{7.2}Al_{14.7}$  alloy has the widest  $\Delta T_x$ , reaching 82 K. The plastic deformation ability of the alloys from low to high is:  $Zr_{57}Cu_{18.67}Ni_{8}Al_{16.33}$ ,  $Zr_{56.36}Cu_{20.53}Ni_{7.6}Al_{15.51}$ ,  $Zr_{54.4}Cu_{26.13}Ni_{6.4}Al_{13.07}$  and  $Zr_{55.7}Cu_{22.4}Ni_{7.2}Al_{14.7}$ . The plasticity of  $Zr_{55.7}Cu_{22.4}Ni_{7.2}Al_{14.7}$  alloy reaches 5.5%, and the compressive strength reaches 1 885 MPa, while the plasticity of the other three alloys is less than 2%. The stronger the initiation and interaction of the shear bands, the higher the plasticity and strength of Zr-Cu-Ni-Al bulk amorphous alloys. There are droplets in the fracture of the alloy samples, which indicates that during the deformation of the alloys, the alloy structure at the fracture has viscous flow, accompanied by the generation of vein patterns. The serration rheology occurs in all alloys during plastic deformation, and the serration rheology is closely related to the change of free volume.

**Key words** amorphous alloy, composition design, plastic deformation, shear band, serrated flow

## 0 引言

与晶态材料相比, 块体非晶合金具有更高的强度和硬度、良好的抗腐蚀性等, 在电子、汽车、军工等工业领域有广阔的应用前景。获得高非晶形成能力、良好热稳定性和大塑性的块体非晶合金一直是非晶合金材料领域的研究重点。目前, 非晶合金的成分设计没有一个量化且具普适性的方法或准则。非晶合金成分设计主要依据一些经验准则, 如混乱原则<sup>[1]</sup>、Inoue 三原则<sup>[2]</sup>、等电子浓度和等原子尺寸方法<sup>[3]</sup>、深共晶区成分钉扎法<sup>[4]</sup>、价电子法<sup>[5]</sup>、热力学方法<sup>[6-7]</sup>、“团簇加连接原子”模型<sup>[8]</sup>等, 实际上更多采用试差法<sup>[9-10]</sup>, 这严重限制了新非晶合金体系的开发及其在工业领域的应用。另外, 块体非晶合金的室温脆性较大, 塑性应变一般不超过 2%, 且非晶合金的室温塑性变形机理仍存在争议。因此, 开发出具有良好热稳定性、高非晶形成能力及大塑性的块体非晶合金制备方案迫在眉睫<sup>[11-13]</sup>, 并且其塑性变形机理有待进一步揭示。

本工作通过二元共晶混合法<sup>[14-15]</sup>设计 Zr-Cu-Ni-Al 非晶合金成分, 成功地制备出四种 Zr-Cu-Ni-Al 块体非晶合金, 研究不同成分之间热力学参数和力学性能的差异, 分析试样压

缩后的断口形貌, 探究其室温塑性变形行为及锯齿流变机理, 为块体非晶合金工业化应用提供参考。

## 1 实验

在真空高纯氩气保护下, Zr-Cu-Ni-Al 合金是由纯金属锆 (Zr 99.96% (质量分数, 下同))、铜 (Cu 99.98%)、镍 (Ni 99.9%) 和铝 (Al 99.97%) 混合后通过电弧熔炼制成的母合金锭, 为了保证合金化学成分均匀, 需反复翻转熔炼至少三次以上。将重熔后的熔融母合金吸入铜模中, 制成  $\Phi 3$  mm × 90 mm 的 Zr-Cu-Ni-Al 合金棒材。用电火花切割机将棒材切成  $\Phi 3$  mm × 4.7 mm 的试样, 然后用丙酮超声清洗试样, 以去除其表面的油污、杂质等, 最后用不同型号的砂纸打磨试样的两个端面, 制成  $\Phi 3$  mm × 4.5 mm 的压缩试样, 须确保压缩试样两个端面相互平行, 且端面与试样轴向垂直。

通过 X 射线衍射仪 (XRD, D/Max-Ultima IV, Cu-K $\alpha$ ) 对铸态试样进行物相分析, 扫描角度为 20 ~ 80°, 扫描速度为 10°/min。热力学分析通过差示扫描量热仪 (DSC, SDT Q600) 在高纯氮气的保护气氛下进行, 升温速率为 20 K/min, 采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚。室温准静态压缩试验采用日本株式会社的电子式万能试验机 (AG-X plus, 100 kN) 进行, 应变速率为

基金项目: 国家自然科学基金 (51201038); 广东省自然科学基金 (2015A030313488); 广州市科技计划项目 (201607010052)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51201038), Guangdong Natural Science Foundation (2015A030313488) and Guangzhou Science and Technology Plan Project (201607010052).

$5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , 压缩试样尺寸为  $\Phi 3 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 。通过扫描电子显微镜 (SEM, S-3400N) 观察压缩后试样的断口形貌。

## 2 结果与分析

### 2.1 成分设计

此前, Yang 等<sup>[14]</sup>提出“二元共晶混合法”来设计块体非晶合金成分, 主要思路是选取深共晶点或次深共晶点的二元共晶作为基本单元按不同比例混合获得不同非晶合金成分。目前, 已开发出的“二元共晶混合法”适用于许多非晶合金成分, 该方法计算方便, 具有一定的普适性。因此, 本工作在此基础上选取  $\text{Zr}_{44}\text{Cu}_{56}$ 、 $\text{Zr}_{76}\text{Ni}_{24}$  和  $\text{Zr}_{51}\text{Al}_{49}$  这三个共晶点作为二元共晶单元来设计 Zr-Cu-Ni-Al 合金成分, Zr-Cu-Ni-Al 合金名义成分表达如式(1)所示:

$$C_{\text{am}} = a(\text{Zr}_{44}\text{Cu}_{56}) + b(\text{Zr}_{76}\text{Ni}_{24}) + c(\text{Zr}_{51}\text{Al}_{49}) \quad (1)$$

式中:  $a$ 、 $b$  和  $c$  分别为  $\text{Zr}_{44}\text{Cu}_{56}$ 、 $\text{Zr}_{76}\text{Ni}_{24}$  和  $\text{Zr}_{51}\text{Al}_{49}$  三个共晶单元所占的比例系数, 且  $a+b+c=1$ 。

Ji 等<sup>[16]</sup>通过热力学方法来预测块体金属玻璃 (BMGs) 的最佳非晶形成能力, 发现 BMGs 主要构成元素的含量控制在 45% ~ 65% (原子分数, 下同) 时非晶形成能力最佳。Cu 含量的适当增加有利于 BMGs 液相线温度 ( $T_l$ ) 的降低; 适量添加 Ni 有利于抑制 BMGs 晶化、提高非晶形成能力。基于此, 本工作中系数  $a$ 、 $b$  和  $c$  的选择主要考虑满足如下条件: (1) Zr 的含量控制在 45% ~ 65% 之间; (2) 适当降低 Ni 含量以抑制 BMGs 晶化; (3) 增加 Cu 的含量有利于降低  $T_l$ 。所设计的合金成分分别为:  $\text{Zr}_{57}\text{Cu}_{18.67}\text{Ni}_{8}\text{Al}_{16.33}$ 、 $\text{Zr}_{56.36}\text{Cu}_{20.53}\text{Ni}_{7.6}\text{Al}_{15.51}$ 、 $\text{Zr}_{55.7}\text{Cu}_{22.4}\text{Ni}_{7.2}\text{Al}_{14.7}$  和  $\text{Zr}_{54.4}\text{Cu}_{26.13}\text{Ni}_{6.4}\text{Al}_{13.07}$ , 合金成分与简称如表 1 所示。

表 1 试样合金成分及简称

Table 1 Alloy compositions and abbreviations of samples

Composition	Abbreviation	$a$	$b$	$c$
$\text{Zr}_{57}\text{Cu}_{18.67}\text{Ni}_{8}\text{Al}_{16.33}$	Zr57	1/3	1/3	1/3
$\text{Zr}_{56.36}\text{Cu}_{20.53}\text{Ni}_{7.6}\text{Al}_{15.51}$	Zr56.36	11/30	19/60	19/60
$\text{Zr}_{55.7}\text{Cu}_{22.4}\text{Ni}_{7.2}\text{Al}_{14.7}$	Zr55.7	2/5	3/10	3/10
$\text{Zr}_{54.4}\text{Cu}_{26.13}\text{Ni}_{6.4}\text{Al}_{13.07}$	Zr54.4	7/15	4/15	4/15

### 2.2 不同合金成分的组织结构

不同成分的 Zr-Cu-Ni-Al 合金的 XRD 图如图 1 所示。由图 1 可知, 所有 XRD 曲线均只在  $30 \sim 45^\circ$  之间有一个宽而弥散的馒头峰, 无尖锐的晶化峰出现, 说明这四种不同成分的 Zr-Cu-Ni-Al 合金均为完全非晶结构。

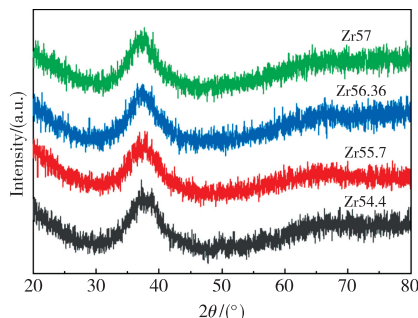


图 1 Zr-Cu-Ni-Al 合金的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of Zr-Cu-Ni-Al alloys

### 2.3 不同合金成分的热力学参数

不同成分的 Zr-Cu-Ni-Al 合金的 DSC 曲线如图 2 所示。根据 DSC 曲线所得的 Zr-Cu-Ni-Al 合金的热力学参数列于表 2, 这些参数包含玻璃转变温度  $T_g$ 、起始晶化温度  $T_x$  和过冷液相区  $\Delta T_x$  ( $\Delta T_x = T_x - T_g$ )。结合表 2 可知, 随 Zr 含量减小, 玻璃转变温度  $T_g$  先增大后减小再增大, 尤其在 Zr55.7 时  $T_g$  达到最小为 696 K; 起始晶化温度  $T_x$  变化不大, 导致过冷液相区  $\Delta T_x$  先增大后减小, 其中 Zr55.7 的  $\Delta T_x$  最大达到 82 K。XRD 图谱 (未显示) 表明:  $\Phi 5 \text{ mm}$  的这四种铸态合金棒材中, Zr55.7 为完全非晶结构, 而其他三种合金有轻微晶化, 这说明 Zr55.7 的临界尺寸至少为 5 mm, 因此在这四种合金中, Zr55.7 的非晶形成能力最好。

表 2 Zr-Cu-Ni-Al 合金的热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of Zr-Cu-Ni-Al alloys

Alloy	$T_g/\text{K}$	$T_x/\text{K}$	$\Delta T_x/\text{K}$
Zr57	707	777	70
Zr56.36	708	779	71
Zr55.7	696	778	82
Zr54.4	707	774	67

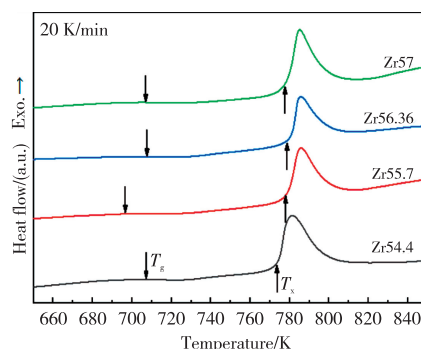


图 2 Zr-Cu-Ni-Al 合金的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curves of Zr-Cu-Ni-Al alloys

### 2.4 室温压缩性能

不同成分的 Zr-Cu-Ni-Al 合金的应力-应变曲线如图 3 所示。表 3 为不同成分的 Zr-Cu-Ni-Al 合金的力学参数, 包含塑性应变  $\varepsilon_p$ 、屈服强度  $\sigma_y$ 、抗压强度  $\sigma_b$  及断裂强度  $\sigma_c$ 。从图 3 可知, 四种合金的压缩过程包括弹性变形、屈服、塑性变形及断裂四个阶段, 其中塑性变形阶段伴随着加工硬化, 除了 Zr56.36 外, 其他成分的合金均在加工硬化后发生了软化, 且这四种合金均发生了锯齿流变行为, 其中 Zr55.7 最为明显。由表 3 可知, 随 Zr 含量降低, 塑性、屈服强度、抗压强度以及断裂强度均呈先增大后减小的趋势; 其中 Zr55.7 的塑性最好, 达到 5.5%, 对应的屈服强度、抗压强度及断裂强度分别为 1 609 MPa、1 885 MPa 和 1 828 MPa。

表 3 Zr-Cu-Ni-Al 合金的力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of Zr-Cu-Ni-Al alloys

Alloy	$\varepsilon_p/\%$	$\sigma_y/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_c/\text{MPa}$
Zr57	1.1	1 326	1 517	1 465
Zr56.36	1.5	1 396	1 669	1 625
Zr55.7	5.5	1 609	1 885	1 828
Zr54.4	1.8	1 329	1 600	1 549



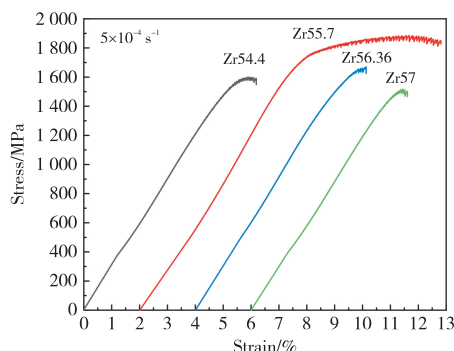


图3 Zr-Cu-Ni-Al 合金的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of Zr-Cu-Ni-Al alloys

## 2.5 断口形貌

不同成分的 Zr-Cu-Ni-Al 合金的断裂侧面形貌如图 4 所示。由图 4a 可知, Zr57 没有剪切带萌生及扩展, 因此塑性差且发生脆断。图 4b 显示, Zr56.36 只有少许相互平行的初级剪切带, 未观察到次生剪切带。Zr55.7 除有初级剪切带外还有少数次生剪切带, 初级剪切带相互平行, 且与次生剪切带之间相互交割并出现分叉, 抑制了初始剪切带沿单一剪切方向的扩展, 从而提高了该合金的塑性(图 4c)。Zr54.4 的断口处只有一些次生剪切带出现, 这些剪切带的扩展方向与加载轴呈  $45^\circ$ , 剪切带之间相互交割与分叉, 从而提高了该合金的塑性(图 4d)。虽然 Zr54.4 只有一些次剪切带, 但比 Zr56.36 初级剪切带的数量多, 且这些次生剪切带之间的交互作用使该试样的塑性比没有剪切带交割和分叉的 Zr56.36 好。可见, 材料的塑性与剪切带的增殖、交互作用密切相关, 剪切带的增殖和交互作用越强, 材料的塑性就越好<sup>[17-18]</sup>。因此, 这四种合金的塑性由低到高依次为: Zr57、Zr56.36、Zr54.4 和 Zr55.7, 与图 3 应力-应变曲线结果吻合。

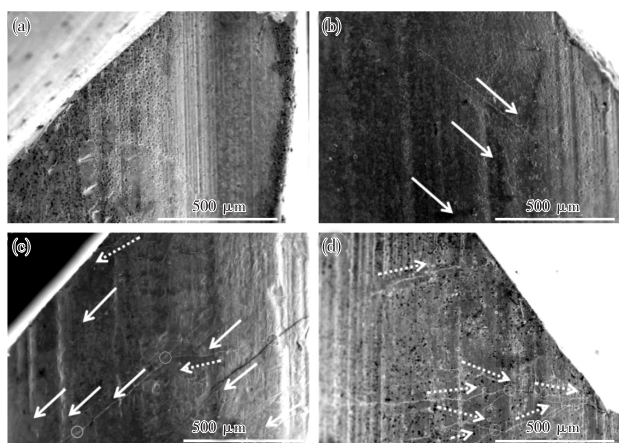


图4 Zr-Cu-Ni-Al 合金的压缩断裂侧表面形貌: (a) Zr57; (b) Zr56.36; (c) Zr55.7; (d) Zr54.4(→初级剪切带, ----→次生剪切带, ○交割)

Fig. 4 Surface morphology of compression fracture side for Zr-Cu-Ni-Al alloys: (a) Zr57; (b) Zr56.36; (c) Zr55.7; (d) Zr54.4(→ initial shear bands, ----→ secondary shear bands, ○ intersect)

不同成分的 Zr-Cu-Ni-Al 合金的断口形貌如图 5 所示。Zr57 的断口形貌分为两个区域: I 区主要为根须状花纹, II 区主要是脉纹(图 5a)。Zr56.36 的断口形貌也分为两个部分: I 区主要是脉纹, II 区主要是花纹较浅的脉纹和根须状

花纹(图 5b)。Zr55.7 的断口形貌主要由脉纹组成, 花纹大小不一、形状各异, 且具有一定的规律性(图 5c)。Zr54.4 的断口形貌分为六个区域, 平滑区(含有根须状花纹)与脉纹区交替分布(图 5d)。这四种合金的断口均较平坦, 除 Zr55.7 外, 其他三种合金均出现平滑区, 都有熔化迹象, 尤其在 Zr57 中可以看见熔化层, 这表明合金塑性变形过程中引起的局部绝热温升超过了基体的熔点导致局部出现熔化, 进而造成基体的局部软化, 促进了剪切带的快速扩展, 最终导致合金断裂, 断裂后断口熔融区域的温度急剧下降从而导致熔化层的形成。在脉纹中均有熔滴存在, 这表明合金变形过程中, 断裂处的合金组织发生了粘性流动, 并伴有脉纹产生, 该现象与其他研究者观察到的结果一致<sup>[19-20]</sup>。脉纹是合金断口形貌的主要特征之一, 所以脉纹的数量越多、密度与合金的塑性和强度密切相关, 脉纹数量和密度越大, 合金的塑性和强度越高<sup>[21-22]</sup>。对比图 5a—d 可知, 脉纹数量由多到少依次为: Zr55.7、Zr54.4、Zr56.36 和 Zr57, 因此塑性由高到底依次为: Zr55.7、Zr54.4、Zr56.36 和 Zr57。

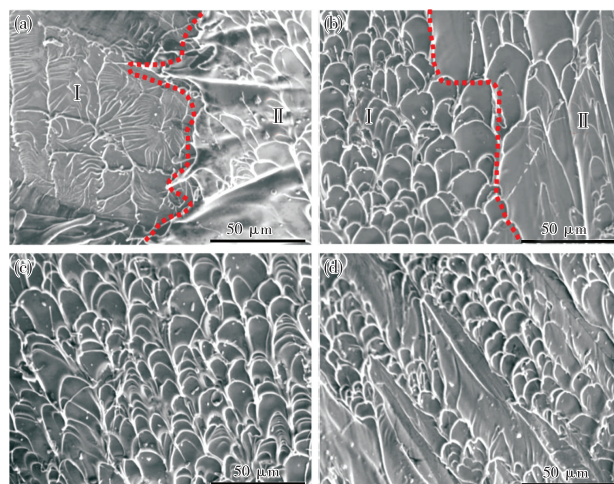


图5 Zr-Cu-Ni-Al 合金的压缩断口形貌: (a) Zr57; (b) Zr56.36; (c) Zr55.7; (d) Zr54.4

Fig. 5 Compressed fracture morphology of Zr-Cu-Ni-Al alloys: (a) Zr57; (b) Zr56.36; (c) Zr55.7; (d) Zr54.4

## 2.6 锯齿流变分析

合金的锯齿流变行为的产生机理尚存在争议。目前锯齿流变行为产生机理的理论一般分为两种: 一种是变形过程中新剪切带的萌生<sup>[23-25]</sup>; 另一种是局部自由体积的变化<sup>[19]</sup>。图 6 是图 3 中 Zr55.7 的应力-应变曲线锯齿流变部分。从图 6 可知, 该合金的锯齿流变分为三个阶段: 第 I 阶段, 锯齿流变刚开始出现, 这些锯齿形对应的应力起伏较小, 且呈现准周期性变化; 第 II 阶段, 锯齿形对应的应力起伏变大直至达到最大, 且呈现非周期性变化; 第 III 阶段, 锯齿形对应的应力起伏达到最大, 又呈现周期性变化, 最终该合金在周期性的应力起伏中断裂。从自由体积变化的角度分析, 塑性变形过程中, 随着外载荷的增加, 自由体积开始产生并逐渐长大, 又因自由体积的长大及增殖不是自发过程, 需要外载荷的作用才能发生, 所以出现了锯齿中应力上升的过程; 然而自由体积的长大同时伴随着局部内能的增大, 当自由体积中的局部内能达到一定程度后就会发生自由体积湮没, 从而出现锯

齿形中应力突然下降的现象;随着外载荷的进一步加大,又有新的自由体积产生并长大,对应地又出现应力上升现象,此现象周而复始地进行,最终累积的内能全部释放导致材料断裂。

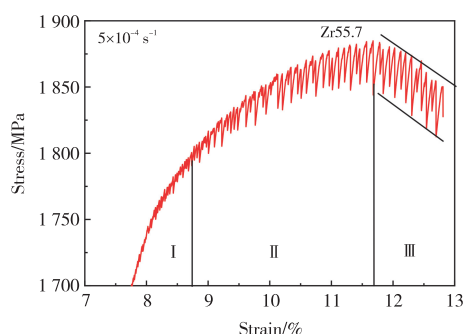


图6  $\text{Zr}_{55.7}\text{Cu}_{22.4}\text{Ni}_{7.2}\text{Al}_{14.7}$  合金的应力-应变曲线锯齿部分

Fig. 6 Serrated flow of stress-strain curves for  $\text{Zr}_{55.7}\text{Cu}_{22.4}\text{Ni}_{7.2}\text{Al}_{14.7}$  alloy

### 3 结论

(1) 利用二元共晶混合法设计的 Zr-Cu-Ni-Al 合金均是非晶态结构,都有较好的非晶形成能力,其中  $\text{Zr}_{55.7}\text{Cu}_{22.4}\text{Ni}_{7.2}\text{Al}_{14.7}$  非晶合金的过冷液相区  $\Delta T_x$  最宽,达到 82 K。

(2) 四种块体非晶合金的室温塑性由低到高依次为:  $\text{Zr}_{57}\text{Cu}_{18.67}\text{Ni}_{8}\text{Al}_{16.33}$ 、 $\text{Zr}_{56.36}\text{Cu}_{20.53}\text{Ni}_{7.6}\text{Al}_{15.51}$ 、 $\text{Zr}_{54.4}\text{Cu}_{26.13}\text{Ni}_{6.4}\text{Al}_{13.07}$  和  $\text{Zr}_{55.7}\text{Cu}_{22.4}\text{Ni}_{7.2}\text{Al}_{14.7}$ 。其中  $\text{Zr}_{55.7}\text{Cu}_{22.4}\text{Ni}_{7.2}\text{Al}_{14.7}$  合金的塑性达到 5.5%,其抗压强度达到 1 885 MPa。剪切带的增殖与交互作用越强,非晶合金的塑性和强度越高。

(3) 设计制备的非晶试样在塑性变形阶段均发生了锯齿流变,锯齿流变与自由体积的变化密切相关。

### 参考文献

- Greer A L. *Nature*, 1994, 368(6473), 688.
- Inoue A. *Acta Materialia*, 2000, 48(1), 279.
- Chen W R, Wang Y M, Qiang J B, et al. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002

(4), 421 (in Chinese).

陈伟荣, 王英敏, 姜建兵, 等. *金属学报*, 2002(4), 421.

- Wang D, Li Y, Sun B B, et al. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(20), 4029.
- Huang Y J, Shen J, Sun J F. *Science in China*, 2008(4), 372.
- Cao H B, Ma D, Hsieh K C, et al. *Acta Materialia*, 2006, 54(11), 2975.
- Wu J L, Pan Y, Li X Z, et al. *Materials & Design*, 2014, 61, 199.
- Han K, Wang Y, Qiang J, et al. *Materials & Design*, 2019, 183, 108142.
- Tan Z, Xue Y F, Chen X W, et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015(10), 3348.
- Idury K S N S, Murty B S, Bhatt J. *Intermetallics*, 2015, 65, 42.
- Tao P J, Yang Y Z, Bai X J, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2008(3), 465.
- Wu J L, Pan Y, Li X Z, et al. *Materials & Design*, 2014, 57(5), 175.
- Zhang C Y, Yuan G, Zhang Y X, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2020, 794, 139904.
- Yang Y J, Sun J F, Li Y Z, et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005(8), 1179 (in Chinese).
- 杨英俊, 孙剑飞, 李永泽, 等. *中国有色金属学报*, 2005(8), 1179.
- Shen J, Zou J, Ye L, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2005, 351, 2519.
- Ji X L, Pan Y. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 485(1), 154.
- Sun B A, Wang W H. *Progress in Materials Science*, 2015, 74, 211.
- Zhou D, Li B J, Zhang S Y, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 730, 270.
- Fan Z J, Zheng Z Y, Jiao Z B. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2010, 53(5), 823.
- Cao G H, Liu K, Liu G P, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 513, 105.
- Li C Y, Kou S Z, Liu G Q. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(10), 1790 (in Chinese).
- 李春燕, 寇生中, 刘广桥. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(10), 1790.
- Jin Z S, Yang Y J, Zhang Z P, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 806, 668.
- Wang W H, Wei Q, Friedrich S, et al. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(8), 1053.
- Wu J L, Pan Y, Li X Z, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 608, 16.
- Yao Z F, Qiao J C, Liu Y, et al. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(1), 138.

(责任编辑 汪芸竹)



**Kunsen Zhu**, master of engineering at School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, graduated from Zhengzhou University of Aeronautics in June 2018 with a bachelor's degree in engineering. His research direction is advanced metal materials.

朱坤森, 广东工业大学材料与能源学院, 硕士研究生。2018年6月毕业于郑州航空工业管理学院, 获得工学学士学位。研究方向为先进金属材料。



**Pingjun Tao** is a professor of Guangdong University of Technology and a supervisor of master's degree. He is the training object of Thousand Hundred and Ten Project of Guangdong Higher Education Institutions, the member of the China Society for Materials Research, and the member of the Guangdong Materials Research Society and the Guangzhou Doctoral Club. He engaged in the research of new nano-amorphous functional materials, advanced metal materials, magnetic functional

materials and devices. He has successively presided over more than ten projects, including the National Natural Science Foundation of China, the Doctoral Program Fund of the Ministry of Education, the Natural Science Foundation of Guangdong Province, and the Science and Technology Plan of Guangdong Province and Guangzhou City. He won a second prize of Guangdong Science and Technology Award. More than 60 scientific and technological papers have been published, including 30 papers included in SCI; 3 national invention patents and 4 utility model patents have been authorized.

陶平均, 广东工业大学教授, 硕士生导师, 广东省高等学校“千百十工程”培养对象, 中国材料研究学会会员, 广东省材料研究学会会员, 广东博士俱乐部会员。从事新型纳米与非晶功能材料、先进金属材料、磁功能材料及器件等研究工作。先后主持国家自然科学基金、教育部博士学科点基金、广东省自然科学基金、广东省及广州市科技计划专项等项目十余项。获广东省科技奖励二等奖一项。发表科技论文 60 余篇, 其中 SCI 收录论文 30 篇; 授权国家发明专利 3 项, 实用新型专利 4 项。