

块体非晶合金的稳定性和力学性能研究进展

张 山¹ 张有昊² 张 朋² 王纪琛² 刘 悦¹ 张浩然³ 马明臻³

(1. 华北理工大学河北钢铁实验室, 唐山 063210; 2. 华北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063210; 3. 燕山大学材料科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要 非晶合金因其无位错和晶界等晶体缺陷而具有高强度、大弹性应变和低弹性模量等优良性能。然而, 非晶合金是一种亚稳态材料, 一旦转变为稳定的晶态, 其优异性能将急剧下降。另外, 非晶合金在室温下变形时, 变形局限于纳米尺度的剪切带内, 并很快转变成裂纹, 导致脆性断裂。亚稳结构特性和不均匀变形限制了非晶合金的应用。本研究重点介绍了非晶合金的稳定性和力学性能研究进展, 最后对非晶合金的发展进行了展望。

关键词 非晶合金; 稳定性; 力学性能; 进展

中图分类号 TG139⁺.8; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250280

Research Progress in Stability and Mechanical Properties of Bulk Amorphous Alloys

ZHANG Shan¹, ZHANG Youhao², ZHANG Peng², WANG Jichen², LIU Yue¹, ZHANG Haoran³,

MA Mingzhen³

(1. Hebei Iron and Steel Laboratory, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210; 2. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210; 3. College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Due to the absence of crystal defects including dislocations and grain boundaries, amorphous alloys exhibit excellent properties such as high strength, large elastic strain and low elastic modulus. However, as metastable materials, the excellent properties of amorphous alloys are declined sharply once transformed into a stable crystalline state. In addition, the deformation of amorphous alloy at room temperature is confined within nanoscale shear bands, which is quickly converted into cracks, leading to brittle fracture. The metastable structure characteristics and non-uniform deformation limit the wide application of amorphous alloys. The research progress in stability and mechanical properties of amorphous alloys was emphasized, and future development of amorphous alloys was prospected.

Key Words: Amorphous Alloys, Stability, Mechanical Properties, Progress

非晶合金是通过急冷、高压、强变形和先进制造等现代技术形成的一种内部原子排列短程有序、长程无序, 兼具金属、玻璃、液体、固体和软物质等物态特性的新型金属材料^[1-5], 其具有大弹性应变极限、低弹性模量和耐磨损等优良的理化性能, 在航空航天、信息、微电子、穿戴消费品以及医用植入材料等领域显示出重要的应用前景^[6-9]。

非晶到晶态的转变过程与非晶合金的稳定性密切相关, 稳定性是确定合金有效工作极限的重要参数^[10-12]。晶化是非晶合金在加热过程中的不可逆变化, 会导致其优异的性能消失。因此, 了解晶化过程的微

观机制及不同工艺和试验参数对晶化过程的影响, 设法控制或阻止晶化过程的发生具有积极意义。非晶合金中不存在类似晶态合金中的位错和晶界等产生变形的缺陷, 因此具有高强度和高弹性^[13-14]。非晶合金的塑性变形也通过原子的重排来实现, 但原子的重排需要更高的能量。在发生非均匀变形时, 弹性势能在断裂的瞬间释放, 造成多数非晶合金的宏观室温塑性变形能力较差, 断口形貌为脉络状花样和熔滴痕迹^[15-16]。针对非晶合金的稳定性与力学性能研究, 有助于新型高性能结构与功能材料的开发, 加深对金属材料微观结构与宏观性能关系的理解。因此, 本研究重点介绍非

收稿日期: 2025-07-19; 修订日期: 2025-08-09

基金项目: 河北省高等学校科学研究项目-青年拔尖人才资助项目(BJ2026307)

第一作者: 张山, 男, 1994年出生, 讲师, E-mail: zs523737256@163.com

通信作者: 张朋, 男, 1981年出生, 正高级工程师, E-mail: zhangpengysu@126.com

引用格式: 张山, 张有昊, 张朋, 等. 块体非晶合金的稳定性和力学性能研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 983-989.

ZHANG S, ZHANG Y H, ZHANG P, et al. Research progress in stability and mechanical properties of bulk amorphous alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 983-989.

晶合金的稳定性和力学性能研究进展,最后对非晶合金未来的发展进行展望,旨在为非晶合金的生产制备提供参考。

1 非晶合金的稳定性

1.1 结构弛豫

非晶合金在低于玻璃化转变温度(T_g)下退火,能观测其结构弛豫,且伴随着合金物理性能的变化。当冷却速率较快时,制得的非晶合金处于较高的能态;冷却速率较慢时,非晶合金所处的能态较低。能量状态不同的非晶合金可能会呈现出不同的性能。图1为处于不同能态的非晶合金^[17]。WANG J F等^[18]通过正电子湮没谱和DSC分析了Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀块体金属玻璃在长时间等温退火条件下的结构弛豫行为,发现非晶合金的弛豫行为分为两个阶段,并通过自由体积理论和渗流理论解释了两个不同阶段产生的原因。WU X L等^[19]通过同步DSC和小角中子衍射技术,探究了过冷液相区内等温退火对锆基非晶合金的原位结晶过程的影响。结果表明,非晶合金的结构演化可分为3个阶段:孕育期,非晶-有序晶体结构,连续的成分重新分布。

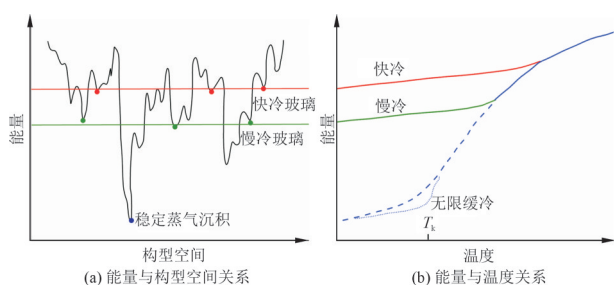


图1 不同冷却速率下得到不同结构构型和能态的非晶合金^[17]
Fig.1 Amorphous alloys with different structural configurations and energy states obtained at different cooling rates^[17]

1.2 回春

回春(Rejuvenation)是指非晶合金由低能态向高能态的转变过程,对应假想温度的升高^[20-22]。回春处理不仅能改善非晶合金的变形能力,也为研究非晶合金的原子结构、玻璃转变和变形机理提供了新思路。EBNER C等^[23]通过高压扭转手段使Zr₄₅Cu₄₅Al₅Ag₅非晶合金发生了回春。合金内部微观结构的不均匀性增强,原子的迁移率增加,促进了合金试样的塑性流动。SUN K等^[24]探究了离子辐照对非晶合金的回春和弛豫行为的影响。离子辐照的剂量为1、2和3 dpa(Displacements per atom)时,非晶合金发生回春并伴随着剪切转变区激活体积的增加;当离子辐照的剂量为4 dpa时,非晶合金发生弛豫且伴随着较高的硬度值。GONG P

等^[25]探究了深冷循环处理对Ti₂₀Zr₂₀Hf₂₀Be₂₀Cu₂₀高熵块状金属玻璃的回春及室温压缩力学性能的影响。经深冷循环处理后,非晶合金发生了回春,回春后的非晶合金的室温塑性增大,屈服强度变化不明显,因此将合金试样塑性的增大归因于经深冷循环处理后合金内部内应力的产生导致的微观结构的改变。此外还提出非晶合金较小的脆性是其发生回春和性能变化的关键因素。GUO W等^[26]探究了深冷循环处理对Pd_{42.5}Cu₃₀Ni_{7.5}P₂₀非晶合金回春行为的影响。与Zr基非晶合金具有明显的性能变化不同,回春后的Pd基非晶合金的弛豫焓、硬度和力学性能变化不大。推测这种现象产生的原因是Pd基非晶合金内部含有更稳定的自由体积。SAMAVATIAN M等^[27]探究了非晶合金的不同回春状态与压缩塑性变形之间的关系,发现随冷热循环次数增加,非晶合金试样的塑性变形能力增强。合金内部均匀局域结构的增多造成剪切带的潜在形核位点增多,进而提高了塑性。

影响非晶合金稳定性的另一个因素是激活能。根据Kissinger方法可确定非晶合金的激活能,Kissinger方程可表达为^[28]:

$$\ln\left(\frac{T^2}{\beta}\right) = \frac{E}{RT} + c$$

式中, T 为特征温度; β 为升温速率; E 为激活能; R 为摩尔气体常数; c 为常数。根据升温速率和温度的变化得出激活能。实现非晶合金高稳定性的条件为:①具有较高的玻璃化转变温度和结晶温度。②具有强的玻璃形成能力和较宽的过冷液相区。③合金体系应具有较大的扩散或者形核势垒。

1.3 超稳金属玻璃

超稳金属玻璃的出现引起了研究者的广泛关注^[29-31]。通过物理气相沉积形成的超稳定金属玻璃(SMG)是一种极具研究价值的新材料,表现出强稳定性,据推测与经过数千年自然老化形成的常规淬火金属玻璃相当。SUN Q J等^[32]探究了沉积层厚度对超稳金属玻璃性能的影响,发现通过控制沉积层的厚度,调控了金属玻璃的热物性和力学性能。发现随沉积层厚度增加,合金结构的不均匀性增强,致使玻璃在回春时性能发生变化。LUO P等^[33]通过扫描透射电镜和高能同步X射线衍射技术,发现以较高沉积速率沉积的Zr-Cu-Al金属玻璃具有不均匀结构,成分波动为几nm,随沉积速率降低,这些波动逐渐消失,最终形成了接近超稳定性的均匀结构。通过原子力显微镜观察了磁控溅射制备的Zr₅₀Cu₅₀、Zr₅₀Cu_{44.5}Al_{5.5}和Zr₅₀Cu_{41.5}Al_{5.5}Mo₃金属玻璃的微观结构^[34]。结果表明,超稳金属玻璃的

形成与结构的不均匀程度直接相关,结构越不均匀,金属玻璃的稳定性越高,而要获得结构均匀和能量状态低的金属玻璃,需要慢的沉积速率。LÜTTICH M等^[35]通过X射线光子关联谱技术,从原子层面研究了Cu₅₀Zr₅₀金属玻璃的稳定性。发现Cu₅₀Zr₅₀金属玻璃在原子层面上存在明显的超稳定性特征,在近玻璃化转变温度(T_g)的预退火条件下表现出显著的抗老化性能。超稳定玻璃具备普通制备方法无法得到的低能量状态。大多数研究通过物理气相沉积的表面控制过程来制备超稳定玻璃,物理气相沉积方法制备超稳定玻璃材料的示意图见图2。BU H T等^[36]在此基础上引入了一种新方法,能在几个小时内通过玻璃到玻璃的固态转变获得超稳玻璃,该发现有助于解决玻璃材料和器件的不稳定性问题,并增进对玻璃转变本质的了解。由于超稳定金属玻璃有望解决传统金属玻璃的稳定性问题,因此具有较高的研究价值^[37-38]。

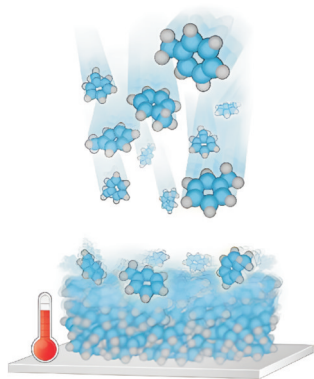


图2 物理气相沉积方法制备超稳定玻璃材料示意图^[39]

Fig.2 Schematic diagram of preparation of ultra-stable glass by physical vapor deposition method^[39]

2 非晶合金的力学性能

2.1 室温和高温变形

在常规应变速率的作用下,非晶合金的变形局限于纳米尺度的剪切带内,变形是非均匀且高度局域化的,并很快地转变成裂纹,导致脆性断裂。断口为明显的脉络状花样,在变形试样的侧面,可能会观察到一定数量的剪切带。剪切带在试样的侧面不均匀分布,表明试样只是在靠近断口的局部区域发生了变形。在高速载荷下,非晶合金的动态断裂韧性会随应变速率的增加迅速增加,使非晶合金成为新一代穿甲弹的候选材料。图3为不同成分的非晶合金和晶态金属的断裂强度及杨氏模量^[40]。可以看出,Co基非晶合金的断裂强度达5.2 GPa,实现了金属材料强度的突破^[41]。BI J Z等^[42]发现Os-Co-Ta-B系块体非晶合金的室温断裂

强度达到了6.0 GPa,温度升高到600 ℃,非晶合金的断裂强度仍能达到4.0 GPa。这对非晶合金在高温结构材料方面的应用具有重要意义。

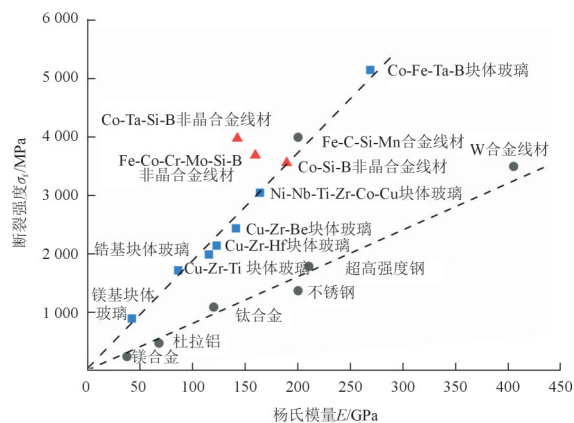


图3 非晶合金和晶态金属的断裂强度及杨氏模量^[40,43]

Fig.3 Fracture strength and Young's modulus of amorphous alloys and crystalline metals^[40,43]

非晶合金的高温变形通常是指温度高于 $0.7 T_g$ 时的压缩和拉伸变形。非晶合金在高温、低应力和低应变速率下,材料的每一部分均参与变形,在宏观上表现为均匀的黏滞性流动,称为均匀变形。均匀变形分为牛顿变形区和非牛顿变形区。牛顿变形区一般出现在 T_g 以上,应力和应变速率之间符合线性关系;非牛顿变形区的材料表现得更黏稠,应力和应变速率符合非线性关系。SHEN J等^[44]发现当温度为383 ℃、应变速率为 $7.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,非晶合金的最大伸长率可达1 625%。图4为非晶合金在过冷液相区的均匀变形行为。当温度升高到 T_g 点附近,非晶合金变成类似黏稠液体的过冷液态。具有稳定的过冷液态是非晶合金不同于传统金属材料的特性,可以在远低于熔点的温度实现超塑性成形,为铸造提供了新思路。超塑性成形是热塑性材料加热软化后在模具或者夹具的作用下进行塑性变形成形的一种加工方法,非晶合金作为一种特殊的热塑性材料也可使用这种工艺进行加工。非晶合金在凝固过程中的体积变化要比晶态合金小得多,在超塑性变形过程中体积没有突变,不易形成缩孔、缩

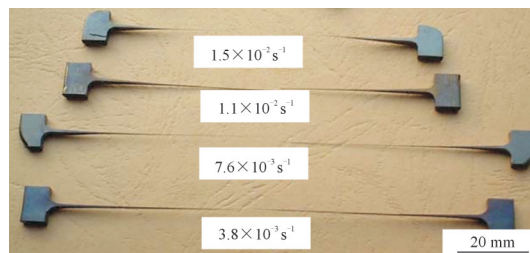


图4 非晶合金在较高温度下的变形行为^[44]

Fig.4 Deformation behavior of amorphous alloys at higher temperatures^[44]

松和气孔等铸造缺陷。由于非晶合金的玻璃特性,成形铸件表面的粗糙度极低,无需二次加工。SCHROERS J 等^[45]利用非晶合金具有的过冷液态特性,采用吹塑成形方法获得了其他金属加工技术都无法生产的复杂非晶合金结构件,且具有较高精度。非晶合金在过冷液相区的均匀变形行为引发广泛关注,源于非晶合金可以实现近净成形。

2.2 非晶合金变形模型

研究者提出了很多关于非晶合金变形的模型,其中两种微观模型被较广泛地接受:一是 SPAEPEN F^[46]提出的以单原子跃迁为基础的“自由体积”模型;二是 ARGON A S^[47]提出的以原子团簇协作剪切运动为基础的“剪切转变区”模型。自由体积模型认为非晶合金的塑性变形是通过局部单个原子的跃迁来实现的,类似于原子的扩散。这个过程易发生在非晶合金内部原子排列较松散的地方。该模型基于以下假设:①原子跃迁的速率和周围自由体积的数量有关。②无应力作用下,原子沿各个方向跃迁的几率相等。在外加应力的作用下,原子沿应力方向的跃迁所需能量低于其他方向。

剪切转变区模型认为非晶合金的塑性流动是由其基本的流动单元来承载的。这些基本单元是原子团簇或集团而不是单个原子或自由体积^[48-49]。剪切转变区模型假设:①非晶合金的变形发生在原子团簇中,这些团簇处在一个原子壳中,包围在原子壳中的团簇被定义为剪切转变区(Shear transformation zone, STZ)。STZ 中多个原子一起协同相对基体发生剪切运动。②STZ 内的多原子协作运动是一个激活的过程,协作变形的几率和团簇内部的自由体积相关。③这个激活过程是可逆的。STZ 模型有以下特点:①STZ 模型是一种“流动缺陷”的理论,用来描述固体如何通过缺陷的流动来表现出液态的行为。②STZ 模型是一种态转变理论。③STZ 既能够产生,也能够湮灭,其速率与环境有关^[43]。

2.3 力学性能调控

研究者通过退火、合金化、改变试样的直径进而调控冷却速率、改变泊松比及在试样的表面引入一些缺陷来提高非晶合金的压缩塑性变形能力^[50-52]。

2.3.1 等温退火

通过等温退火可以改变非晶合金的结构,进而改善非晶合金的性能。ZHOU M 等^[53]探究了在低于玻璃转变温度的等温退火对 $Zr_{65}Cu_{17.5}Fe_{10}Al_{7.5}$ 非晶合金的力学性能和腐蚀行为的影响。发现随等温退火时间的延长,非晶合金的塑性应变先增大后减小。等温退火 1 h

后的非晶合金的塑性应变达到最大的 7.1%,合金内部 5~12 nm 晶体相的产生是其塑性提高的主要原因。等温退火 0.5 和 1 h 后的合金的耐点蚀性也增强。LOUZGUINE-LUZGIN D V 等^[54]通过对非晶合金进行低温退火,使非晶合金的断裂强度和塑性均提高,将力学性能的提高归因于合金低温退火形成更加致密的微观结构。SHI H Q 等^[55]探究了低于 T_g 的等温退火对 $Zr_{70}Cu_{17.5}Fe_5Al_{7.5}$ 非晶合金力学性能的影响,发现等温退火 0.5 h 后的非晶合金的断裂强度和塑性变形分别达到 2 096 MPa 和 12.7%,合金试样力学性能的提高得益于非晶合金基体上纳米晶的产生。

2.3.2 冷却速率调控

在韧性非晶合金的制备过程中,冷却速率是重要的影响因素^[56]。LIU Y 等^[57]通过改变试样直径,探究了冷却速率对非晶合金结构及硬度的影响,发现大直径(冷却速率较低)的合金试样较易出现不均匀的结构。ZHONG C 等^[58]采用分子动力学模拟的方法探究了带材厚度对 $Cu_{50}Zr_{50}$ 非晶合金力学性能的影响。发现非晶合金具有明显的尺寸效应。随带材厚度的减小,非晶合金薄带发生了非均匀变形向均匀变形的转变。SHI Y F^[59]系统阐述了非晶合金的尺寸效应,总结了尺寸对非晶合金的弹性性能、疲劳、断裂和剪切带行为等的影响。WU F F 等^[60]发现随试样尺寸减小,Zr 基非晶合金呈现出亚稳态-稳态的塑性变形,非晶合金具有明显的尺寸效应。然而,WANG L 等^[61]分析了不同直径的 $(Mg_{0.585}Cu_{0.305}Y_{0.11})_{95}Be_5$ 非晶合金试样的单轴压缩力学性能,发现此非晶合金不具有尺寸效应。

2.3.3 合金化

改善和提高非晶合金的力学性能,合金化也是主要途径^[62]。QIAO J C 等^[63]在 Cu-Zr 基非晶合金中微量掺杂 Dy 元素,当 Dy 的摩尔分数为 0.5% 时,非晶合金的塑性应变达 6%,强度达到了 2 GPa。利用准点缺陷理论预测了非晶合金的性能,并认为金属玻璃中缺陷的集中程度在塑性方面扮演了重要的角色。DONG Y 等^[64]通过 Co 替换 $Zr_{64-x}Ni_{10}Al_7Cu_{19}Co_x$ 中的 Zr,使非晶合金试样的塑性应变达 4%,因此把力学性能的提高归因于 Co 加入后引起的合金内部相的分离。LIANG D D 等^[65]通过 W 元素的添加,使 Fe 基非晶合金的玻璃形成能力有所提高,原因是 W 的加入抑制了合金内部晶体相的形成。LONG Z Y 等^[66]通过 Nb 和 Ta 替换 Zr 基非晶合金中的 Cu,获得了塑性应变达 32.9% 的非晶合金试样,合金内部类二十面体团簇的形成,是其塑性提高的主要原因。

2.3.4 应变速率调控

非晶合金的力学行为还与应变速率和加载方式等密切相关。LI W Q 等^[67]探究了在较宽应变速率范围内 $\text{Zr}_{65.25}\text{Cu}_{21.75}\text{Al}_8\text{Ni}_4\text{Nb}_1$ 非晶合金的压缩变形和断裂行为。结果表明,非晶合金的屈服强度随应变速率的增大而减小,合金试样的断裂角增大。通过改进的协作剪切模型描述了非晶合金的屈服强度与应变速率的关系。JIAO Z M 等^[68]分析了应变速率对 Zr 基非晶合金拉伸和压缩变形的屈服强度及断口表面温度的影响,发现随应变速率的增大非晶合金的屈服强度先突然下降后缓慢变化。与准静态加载相比,动态加载使剪切带演化的时间缩短,试样断口表面的温度升高。ZHANG S 等^[69]探究了准静态加载条件下 Zr 基非晶合金的力学行为。发现 $\text{Zr}_{50}\text{Cu}_{34}\text{Al}_8\text{Ag}_8$ 非晶合金对加载速率的变化较敏感,非晶合金的断裂强度 σ_f 和极限应变 ϵ_f 随加载速率的升高呈现出先增大后减小的变化趋势。非晶合金压缩试样的断口形貌特征同样证明了其具有较好的力学性能。ZHOU D 等^[70]发现在准静态加载条件下,韧性非晶合金表现为沿滑移面的分级滑移面产生的稳定变形,而脆性非晶合金则表现为沿单一滑移面的迅速滑移面产生的不稳定变形。

3 结语与展望

主要对非晶合金的稳定性和力学性能研究进展进行了总结。结构弛豫和回春大大拓展了非晶合金的能量范围,造成非晶合金的原子分布、电子组态和化学键配位的改变,还会涉及缺陷运动及相变的发生,使非晶合金获得传统快速冷却方法无法达到的状态,对其性能有重要影响。研究者通过退火、调控冷却速率、合金化等,使非晶合金的塑性变形能力提高。过去较长一段时间,非晶合金在磁性材料、催化材料、耐蚀材料和生物医用材料等方面取得了较广泛的应用,尤其是磁性非晶材料的大规模使用,但对非晶合金在其他领域的应用仍需继续发掘。

非晶合金材料的快速发展和广泛应用要求对非晶合金基础研究中存在的基本科学问题进行深入研究,这些问题中最受关注的主要有:①玻璃转化机理,即合金液体在长程无序、亚稳定的非晶态下的转化过程。②非晶合金的形变机制,即结构无序合金体系是如何耗散外力而发生形变。③非晶合金的结构、性能、玻璃转变、形变之间的关系。只有在基础研究上取得突破性进展,才能有效地促进高性能无序合金材料的研发及性能优化。随着非晶合金的稳定性、力学性能和玻璃形成能力的提高,对于非晶合金微观组织结构演变

规律和力学性能作用机理等认识得更加深入,以及块体非晶合金成形技术的不断完善,相信在不久的将来,其在航空航天、军事武器、电子消费及日常生活中会得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] RUI Y C, HAO D J, SHUO Q, et al. High strength bioinspired cellular metallic glasses with excellent energy absorption [J]. *Acta Materialia*, 2025, 285: 120 688.
- [2] LIU H L, NICOLAS J P, FERNANDO M, et al. Two-gigapascal-strong ductile soft magnets [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 10 119.
- [3] WANG Y H, LI B, CUI Y F, et al. Catalytic mechanism of nanocrystalline and amorphous matrix in Fe-based microwires for advanced oxidation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 36 (29): 2 425 912.
- [4] KUJI C, MIYAZAKI N, MIZUTANI M, et al. Clarification of shear deformation behavior in Fe-Si amorphous alloys by molecular dynamics [J]. *Materials & Design*, 2025, 249: 113 566.
- [5] YU M J, XI J, MIN Z, et al. Ion irradiation-induced hardening model in Ti-Zr-Hf-V-Mo-Ta refractory high-entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2025, 285: 120 617.
- [6] YAN Z Z, JUAN M, QI L H, et al. A stabilized martensitic nucleation mechanism in TRIP-reinforced metallic glass composites with fractal structures [J]. *Acta Materialia*, 2025, 289: 120 941.
- [7] YU Y S, WEN Z B, LIANG X M, et al. Designing Fe-based amorphous alloys with both ultra-high magnetization and ultra-low coercivity through artificial intelligence [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(30): 2 425 588.
- [8] LING F X, QING W J, ZHI Z, et al. Interfacial strain concentration and relaxation along crystalline-amorphous boundaries of B2-reinforced bulk-metallic-glass-composites during loading [J]. *Acta Materialia*, 2025, 287: 120 787.
- [9] BIN W R, LI J J, YOU W, et al. Magnetic properties of soft magnetic composites prepared by gasatomized glassy powders from a new Fe-based alloy with high glass-forming ability [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2024, 67(11): 116 111.
- [10] DMOWSKI W, YOKOYAMA Y, CHUANG A, et al. Structural rejuvenation in a bulk metallic glass induced by severe plastic deformation [J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(2): 429-438.
- [11] MENG F Q, TSUCHIYA K, YOKOYAMA Y. Pronounced structural rejuvenation in $\text{Zr}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Al}_{10}$ metallic glass strained by torsional straining at elevated temperature [J]. *Materials Transactions*, 2014, 55(1): 220-222.
- [12] SONG W L, MENG X H, WU Y, et al. Improving plasticity of the $\text{Zr}_{46}\text{Cu}_{46}\text{Al}_8$ bulk metallic glass via thermal rejuvenation [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63: 840-844.
- [13] ZHU Y H, ZHOU Y H, WANG A M, et al. Atomic-scale icosahedral short-range ordering in a rejuvenated Zr-based bulk metallic glass upon deep cryogenic treatment [J]. *Materials Science and Engineering*, 2022, A850: 143 565.
- [14] YU J B, WANG H, WU Y, et al. Combustion behavior and mechanism of $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{46}\text{Al}_8$ bulk metallic glass in oxygen-enriched

- environments [J]. Corrosion Science, 2022, 204: 110-115.
- [15] KHANOUKI A, TAGHI M. Temperature rise in shear bands and its effect on crystallization behavior in bulk metallic glasses [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 936: 168-198.
- [16] LEWANDOWSKI J J, GREER A L. Temperature rise at shear bands in metallic glasses [J]. Nature Materials, 2005, 5(1): 15-18.
- [17] PARISI G, SCIORTINO F. Structural glasses: Flying to the bottom [J]. Nature Materials, 2013, 12(2): 94-95.
- [18] WANG J F, LIU L, XIAO J Z, et al. Ageing behaviour of $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ bulk metallic glass during long-time isothermal annealing [J]. Journal of Physics, 2005, D38(6): 946-949.
- [19] WU X L, LAN S, LI X Y, et al. Continuous chemical redistribution following amorphous-to-crystalline structural ordering in a Zr-Cu-Al bulk metallic glass [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 101: 285-293.
- [20] MENG Y H, ZHANG S Y, ZHOU W H, et al. Rejuvenation by enthalpy relaxation in metallic glasses [J]. Acta Materialia, 2022, 241: 118-137.
- [21] KETKAEW J, YAMADA R, WANG H, et al. The effect of thermal cycling on the fracture toughness of metallic glasses [J]. Acta Materialia, 2020, 184: 100-108.
- [22] DI S Y, WANG Q Q, ZHOU J, et al. Enhancement of plasticity for FeCoBSiNb bulk metallic glass with superhigh strength through cryogenic thermal cycling [J]. Scripta Materialia, 2020, 187: 13-18.
- [23] EBNER C, PAULY S, ECKERT J, et al. Effect of mechanically induced structural rejuvenation on the deformation behaviour of CuZr based bulk metallic glass [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A773: 138-148.
- [24] SUN K, WANG G, WANG Y W, et al. Structural rejuvenation and relaxation of a metallic glass induced by ion irradiation [J]. Scripta Materialia, 2020, 180: 34-39.
- [25] GONG P, YIN G, JAMILI-SHIRVAN Z, et al. Influence of deep cryogenic cycling on the rejuvenation and plasticization of TiZrHfBeCu high-entropy bulk metallic glass [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A797: 140-148.
- [26] GUO W, SAIDA J, ZHAO M, et al. Unconspicuous rejuvenation of a Pd-based metallic glass upon deep cryogenic cycling treatment [J]. Materials Science & Engineering, 2019, A759: 59-64.
- [27] SAMAVATIAN M, GHOLAMIPOUR R, AMADEH A A, et al. Correlation between plasticity and atomic structure evolution of a rejuvenated bulk metallic glass [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, A50(10): 4743-4749.
- [28] KISSINGER H E. Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis [J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1956, 57(4): 217-221.
- [29] YANG Q, WANG B Y, ZHAO Z H, et al. Vapor-deposited high-entropy metallic glasses [J]. The Journal of Physical Chemistry, 2024, B129(1): 456-464.
- [30] ZHAO Y, SHANG B S, ZHANG B, et al. Ultrastable metallic glass by room temperature aging [J]. Science Advances, 2022, 8(33): 3623.
- [31] ZHANG L T, WANG Y J, YANG Y, et al. Training β relaxation to rejuvenate metallic glasses [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 158: 53-62.
- [32] SUN Q J, MISKOVIC D M, FERRY M. Film thickness effect on formation of ultrastable metallic glasses [J]. Materials Today Physics, 2021, 18: 100-107.
- [33] LUO P, ZHU F, LÜ Y M, et al. Microscopic structural evolution during ultrastable metallic glass formation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(33): 40098-40105.
- [34] SUN Q J, MISKOVIC D M, FERRY M. Probing the formation of ultrastable metallic glass from structural heterogeneity [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 104: 214-223.
- [35] LÜTTICH M, GIORDANO V M, LE FLOCH S, et al. Anti-Aging in ultrastable metallic glasses [J]. Physical Review Letters, 2018, 120(13): 135504.
- [36] BU H T, LUAN H W, KANG J Y, et al. Accessing ultrastable glass via a bulk transformation [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 562.
- [37] LUO Q, ZHANG Z G, LI D H, et al. Nanoscale-to-mesoscale heterogeneity and percolating favored clusters govern ultrastability of metallic glasses [J]. Nano Letters, 2022, 22(7): 2867-2873.
- [38] SUN Q J, MISKOVIC D M, KONG H, et al. Transition from relaxation to rejuvenation in ultrastable metallic glass driven by annealing [J]. Applied Surface Science, 2021, 546: 149048.
- [39] BERTHIER L, EDIGER M D. Facets of glass physics [J]. Physics Today, 2016, 69(1): 40-46.
- [40] INOUE A, SHEN B L, KOSHIBA H, et al. Ultra-high strength above 5000 MPa and soft magnetic properties of Co-Fe-Ta-B bulk glassy alloys [J]. Acta Materialia, 2004, 52(6): 1631-1637.
- [41] INOUE A, SHEN B L, KOSHIBA H, et al. Cobalt-based bulk glassy alloy with ultrahigh strength and soft magnetic properties [J]. Nature Materials, 2003, 2(10): 661-663.
- [42] BI J Z, WEI X Q, LIU X B, et al. OsCo-based high-temperature bulk metallic glasses with robust mechanical properties [J]. Scripta Materialia, 2023, 228: 115-136.
- [43] WANG W H. The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses [J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(3): 487-656.
- [44] SHEN J, WANG G, SUN J F, et al. Superplastic deformation behavior of $\text{Zr}_{41.25}\text{Ti}_{13.75}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{12.5}\text{Be}_{22.5}$ bulk metallic glass in the supercooled liquid region [J]. Intermetallics, 2005, 13(1): 79-85.
- [45] SCHROERS J, HODGES T M, KUMAR G, et al. Thermoplastic blow molding of metals [J]. Materials Today, 2011, 14(1-2): 14-19.
- [46] SPAEPEN F. A microscopic mechanism for steady state inhomogeneous flow in metallic glasses [J]. Acta Metallurgica, 1976, 25: 407-415.
- [47] ARGON A S. Plastic deformation in metallic glasses [J]. Acta Metallurgica, 1978, 27: 47-58.
- [48] NGAI K L. Universal Properties of Relaxation and Diffusion in Interacting Complex Systems [M]. Berlin, Germany: Relaxation and Diffusion in Complex Systems, 2011.
- [49] SCHUH C, HUFNAGEL T, RAMAMURTY U. Mechanical behavior of amorphous alloys [J]. Acta Materialia, 2007, 55(12): 4067-4109.
- [50] YU P, BAI H Y, ZHAO J G, et al. Pressure effects on mechanical

- properties of bulk metallic glass [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90: 051 906.
- [51] YU P, LIU Y H, WANG G, et al. Enhance plasticity of bulk metallic glasses by geometric confinement [J]. Journal of Materials Research, 2011, 22(9): 2 384-2 388.
- [52] HUANG Y J, ZHENG W, FAN H B, et al. The effects of annealing on the microstructure and the dynamic mechanical strength of a ZrCuNiAl bulk metallic glass [J]. Intermetallics, 2013, 42: 192-197.
- [53] ZHOU M, HAGOS K, HUANG H Z, et al. Improved mechanical properties and pitting corrosion resistance of $Zr_{65}Cu_{17.5}Fe_{10}Al_{7.5}$ bulk metallic glass by isothermal annealing [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2016, 452: 50-56.
- [54] LOUZGUINE-LUZGIN D V, JIANG J. Low-temperature relaxation behavior of a bulk metallic glass leading to improvement of both strength and plasticity [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A839: 142 841.
- [55] SHI H Q, LI Z D, HU Z, et al. Enhancing strength and plasticity of Zr-based bulk metallic glasses by Zr partially substituted Fe and isothermal annealing [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2020, 543: 120 163.
- [56] XIE S, GEORGE E P. Size-dependent plasticity and fracture of a metallic glass in compression [J]. Intermetallics, 2008, 16 (3): 485-489.
- [57] LIU Y, BLANDIN J J, SUERY M, et al. Effect of cooling rate on the microstructure and microhardness of the CuZrAgAl alloy [J]. Materials Characterization, 2012, 70: 8-13.
- [58] ZHONG C, ZHANG H, CAO Q P, et al. The size-dependent non-localized deformation in a metallic alloy [J]. Scripta Materialia, 2015, 101: 48-51.
- [59] SHI Y F. Size-dependent mechanical responses of metallic glasses [J]. International Materials Reviews, 2018, 64(3): 163-180.
- [60] WU F F, JIANG S S, ZHAO R D, et al. Size-dependent plastic stability of Zr-based metallic glass [J]. Materials Science and Engineering, 2015, A646: 272-278.
- [61] WANG L, QIU K Q, YOU J H, et al. Phase separation and sample size independence of fracture strength for $(Mg_{0.585}Cu_{0.305}Y_{0.11})_{95}Be_5$ bulk metallic glass [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2013, 370: 1-5.
- [62] LI B, SUN W C, QI H N, et al. Effects of Ag substitution for Fe on glass-forming ability, crystallization kinetics, and mechanical properties of Ni-free Zr-Cu-Al-Fe bulk metallic glasses [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154 385.
- [63] QIAO J C, YAO Y, PELLETIER J M, et al. Understanding of micro-alloying on plasticity in $Cu_{46}Zr_{47-x}Al_7Dy_x$ ($0 \leq x \leq 8$) bulk metallic glasses under compression: Based on mechanical relaxations and theoretical analysis [J]. International Journal of Plasticity, 2016, 82: 62-75.
- [64] DONG Y, WUNDERLICH R, BISKUPEK J, et al. Co content effect on elastic strain limit in ZrCuNiAlCo bulk metallic glasses [J]. Scripta Materialia, 2017, 137: 94-99.
- [65] LIANG D D, WEI X S, CHANG C T, et al. Effect of W addition on the glass forming ability and mechanical properties of Fe-based metallic glass [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 731: 1 146-1 150.
- [66] LONG Z Y, TAO P J, WANG G, et al. Effect of Nb and Ta addition on mechanical properties of Zr-based bulk metallic glasses and composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 912: 165 071.
- [67] LI W Q, GENG T Q, GE S F, et al. Effect of strain rate on compressive behavior of a Zr-based metallic glass under a wide range of strain rates [J]. Materials, 2020, 13(12): 2 861.
- [68] JIAO Z M, LI K, WANG Z, et al. Strain rate effects on the yielding strength and maximum temperature at shear bands in a Zr-based bulk metallic glass [J]. Journal of Applied Physics, 2022, 131(17): 175 101.
- [69] ZHANG S, WANG J C, WANG Z Y, et al. Mechanical behavior of Zr-based amorphous alloy under quasi-static loading conditions [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(3): 239-244.
- [70] ZHOU D, HOU B, LI B J, et al. A comparative study of the rate effect on deformation mode in ductile and brittle bulk metallic glasses [J]. Intermetallics, 2018, 96: 94-103.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

