



非晶合金冲击韧性研究现状及展望

殷 更¹, 李方伟¹, 邓 磊¹, 金俊松¹, 龚 攀^{1,2}

- (1. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;
2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 非晶合金因其独特的内部结构, 具有优异的力学性能。例如: 高强度、高硬度、大弹性极限等, 是一种先进的结构工程材料。材料的冲击韧性能够反映材料内部的细微缺陷和抗冲击性能, 是材料强度和塑性的综合表征, 是一种重要的力学指标。本文对非晶合金冲击韧性研究现状进行综述, 介绍试样尺寸、服役温度、合金成分、热处理等因素对非晶合金冲击韧性的影响, 总结了改善非晶合金冲击韧性的措施, 并对今后非晶合金冲击韧性研究值得关注的问题进行展望。

关键词: 非晶合金; 冲击韧性; 韧脆转变; 尺寸效应; 非晶复合材料

文章编号: 1004-0609(2020)-03-0530-12

中图分类号: TG139⁺.8

文献标志码: A

材料本身的非晶态指的是材料内部结构在微观上呈现出来的一种长程无序的状态^[1]。1934 年, KRAMER 采用蒸发沉积方法首次制备出非晶态合金薄膜^[2]。现如今, 非晶态材料已经成为了一种非常重要的工程结构材料, 对于现代经济发展有很大的促进作用。非晶合金不同于传统的晶态材料, 有其独特的物理、化学和力学性能, 主要是因为非晶合金内部微观结构表现出长程无序、短程有序^[3]。非晶合金同时拥有高强度和大弹性极限的特点使其表现出了良好的力学性能, 这让非晶合金作为工程结构材料有巨大的应用前景, 值得我们的关注、重视和研究^[4]。

经过学者们多年的研究, 现在制备出的非晶合金最大临界尺寸已经达到了数十毫米^[5]。这对于研究非晶合金的力学性能有极大促进作用, 并且使非晶合金作为工程结构材料的应用范围更加广泛^[6]。非晶合金在许多领域有着应用, 例如: 非晶合金高强度低密度的特性使其有向轻量化发展的独特优势, 这也符合汽车、高速轨道交通工具以及飞机等轻型化发展的趋势; 非晶合金在压应力下发生断裂, 再加上其良好的强度、硬度, 使得块体非晶合金是良好的穿甲材料。现阶段, 对于非晶合金压缩/拉伸强度以及塑性^[7-14]、疲劳性能^[15-16]、断裂韧性^[17-18]等力学性能研究的较多, 而非晶合金冲击韧性作为一个重要的力学指标, 对其系

统研究相对较少。非晶合金优异的力学性能使其在航空航天等领域有着潜在的应用前景, 而这些领域对于非晶合金冲击韧性的要求较高, 所以对于非晶合金冲击韧性研究很有必要。

材料的韧性可以分为冲击韧性和断裂韧性, 冲击韧性在物理学中表示材料在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力^[19]。冲击韧性反映材料内部的细微缺陷和抗冲击性能, 有些地方也称冲击韧性为缺口韧性。影响材料冲击韧性的因素有材料的化学成分、热处理状态、内在缺陷、环境温度等。冲击韧性指标的实际意义在于揭示材料的变脆倾向, 是反映金属材料对外来冲击载荷的抵抗能力。如何改善非晶合金及其复合材料的冲击韧性是我们在以后的研究中需要解决的问题。

1 非晶合金冲击韧性的研究现状

1.1 非晶合金材料与晶态材料冲击韧性的比较

常见晶态材料(如铝合金、镁合金、钛合金、高分子材料、钢材等)的冲击韧性对材料的内部结构缺陷、显微组织的变化很敏感。材料的冲击韧性与材料及其状态、试样的缺口深度、尺寸有很大关系。在非晶态

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51601063, 51725504); 湖北省自然科学基金资助项目(2018CFA003, 2018CFB576); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金资助项目(31715005)

收稿日期: 2019-03-26; **修订日期:** 2019-09-02

通信作者: 龚 攀, 副教授, 博士; 电话: 027-87543491; E-mail: pangong@hust.edu.cn

合金中不存在晶态合金中所存在的晶界、位错、扭曲等缺陷, 使得其冲击韧性对内部结构的缺陷敏感性没有晶态材料明显。

常见晶态材料与非晶态材料室温冲击韧性和拉伸强度关系如图1所示^[20-44]。从图1中可以看出, 非晶合金的冲击韧性一般小于常见的钛合金、镁合金、铝合金的冲击韧性, 主要原因在于虽然非晶合金的强度远高于晶态材料的强度, 但是非晶合金的塑性太差, 所以导致其冲击韧性很差。例如: 典型Ti合金的强度小于1200 MPa, 而Ti基非晶合金的强度普遍大于1500 MPa, 甚至大于2000 MPa。但是Ti合金的塑性较大, 断面伸长率在50%左右, 伸长率在15%左右, 而Ti基非晶合金在拉伸过程中几乎不发生塑性变形。所以塑性和强度对冲击韧性的影响中, 塑性的作用可能更大。并且不同成分的非晶合金的冲击韧性相对差别也比较大。韧性的Zr基^[45-46]、Ti基^[47]非晶合金的冲击韧度远大于脆性的Mg基^[48]、La基^[49]、Fe基^[50]非晶合金的冲击韧度。主要原因是韧性非晶合金在变形过程中能发生明显的塑性变形, 并且是沿着剪切带发生断裂, 而脆性非晶合金在变形过程中是发生劈裂变形甚至破裂成块, 在其显微结构侧面无法看到明显的剪切带。

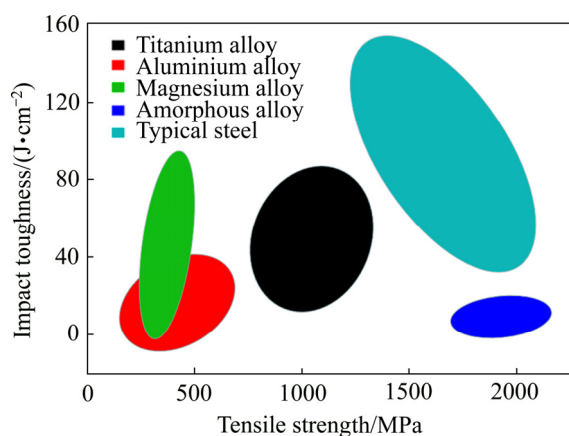


图1 常见晶态金属材料与非晶态材料冲击韧性与强度的关系^[20-44]

Fig. 1 Relationship between impact toughness and strength of common crystalline alloys and metallic glasses^[20-44]

1.2 样品尺寸对非晶合金冲击韧性的影响

在晶态材料中, 样品尺寸和缺口深度对其冲击韧性有很明显的影响。苏娟等^[35]研究了缺口深度对镁合金AZ31冲击韧性的影响, 发现随着缺口深度的降低, 冲击韧性明显增加, 缺口深度2 mm的冲击韧度约为7.44 J/cm², 缺口深度0.1 mm的材料的冲击韧度约为15.95 J/cm², 而未开口的材料的冲击韧度为50 J/cm²。

这说明材料的冲击韧性对缺口深度很敏感。主要原因是无缺口的材料在断裂前会发生很大的塑性变形, 有缺口的样品, 随着缺口深度的增加, 展现的塑性变形减少, 导致冲击韧性下降。在非晶合金中, 样品尺寸和缺口深度对其冲击韧性可能也有影响, 需要进一步考虑。

非晶合金作为一种新材料, 由于成形能力的限制, 很多非晶合金的尺寸达不到夏比冲击试验的尺寸要求, 导致研究不同非晶合金冲击韧性时选择的样品尺寸差别很大。目前对于非晶合金冲击韧性的研究没有统一的样品尺寸, 本文对现有的非晶合金冲击试验样品尺寸进行总结, 如表1所列。

2010年, TANG等^[47]研究Ti_{32.8}Zr_{30.2}Ni_{5.3}Cu₉Be_{22.7}的冲击韧性, 选用尺寸为10 mm×10 mm×55 mm的标准冲击试样, 得到的冲击韧度为5 J/cm²。这是目前对于非晶合金冲击韧性研究中仅有的能够采用夏比冲击标准试样进行冲击试验的非晶合金。主要原因是该系列非晶合金有着很强的成形能力。(Ti_{36.1}Zr_{33.2}-Ni_{5.8}Be_{24.9})_{100-x}Cu_x (x=5, 7, 9, 11, 13, 15, 17(摩尔分数, %)), 记作ZT1~ZT7, 其中x=9时, 非晶合金最大可以形成直径50 mm的棒材^[45]。因此, 能够制备出10 mm×10 mm×55 mm的标准冲击试样。

对于大多数非晶合金而言, 其成形能力导致非晶合金不能够制备出夏比冲击试验标准尺寸试样。大部分研究采用的都是小于标准试样的尺寸。INOUE等^[51-52]对于非晶合金冲击试验研究较多, 都是采用的U型缺口, 1996年采用了尺寸为2.5 mm×10 mm×55 mm的非晶合金Zr₅₅Al₁₀Cu₃₀Ni₅进行冲击试验, 得到材料的冲击韧度为6.3 J/cm², 2005年采用了尺寸为5 mm×10 mm×55 mm非晶合金Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀进行了冲击试验, 得到材料的冲击韧度约为10 J/cm²。2012年, JOHNSON等^[53-54]研究Vit1(Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5})和Zr_{56.2}Ti_{13.8}Nb_{5.0}Cu_{6.9}Ni_{5.6}Be_{12.5}的冲击韧性。选用了尺寸为3 mm×3 mm×30 mm的Vit1和截面尺寸为5 mm×5 mm的Zr_{56.2}Ti_{13.8}Nb_{5.0}Cu_{6.9}Ni_{5.6}Be_{12.5}小尺寸试样进行冲击试验, 得到Vit1的冲击功在0.5~1 J之间, 冲击韧度约为7.6 J/cm², Zr_{56.2}Ti_{13.8}Nb_{5.0}Cu_{6.9}Ni_{5.6}Be_{12.5}的冲击功为20 J, 冲击韧度约为80 J/cm², 是相同尺寸非晶合金Vit1冲击韧度的2.5倍。2005~2009年RAMAMURTY等^[55-57]研究了Vit1的冲击韧性, 试样采用的尺寸均为低于国标尺寸的3 mm×5 mm×30 mm和3 mm×6 mm×30 mm; 其中, 尺寸为3 mm×5 mm×30 mm的样品得到的冲击功分别约为1.2 J, 冲击韧度为13.3 J/cm²; 尺寸为3 mm×6 mm×30 mm的样品的冲击功为0.8 J, 冲击韧度为13.3 J/cm²; 最后

表1 非晶合金冲击韧性实验结果

Table 1 Impact toughness of metallic glasses

Composition	Type and depth of notch	Sample size/mm	Impact energy/J	Impact toughness, $a_k/(J \cdot cm^{-2})$	Reference
Zr ₅₅ Al ₁₀ Cu ₃₀ Ni ₅	U, 3 mm	2.5×10×55	—	6.3	[46]
ZT(Ti _{32.8} Zr _{30.2} Ni _{5.3} Cu ₉ Be _{22.7})	U, 3 mm	10×10×55	—	5	[47]
Mg ₆₆ Zn ₃₀ Ca ₄	\	d2.4×40	—	0.16	[48]
La ₅₅ Al ₂₅ Cu ₁₀ Ni ₅ Co ₅	\, 0.3mm	d4×22	—	0.943	[49]
Zr ₅₀ Cu ₄₀ Al ₁₀	U, 2 mm	5×10×55	—	8.0	[52]
DH3(Zr ₃₅ Ti ₃₀ Cu _{8.25} Be _{26.75})	V, 1 mm	3×3×30	0.82	9.1	[53]
Vit1(Zr _{41.2} Ti _{13.8} Cu _{12.5} Ni ₁₀ Be _{22.5})	V, 1 mm	3×3×30	0.68	7.6	[53]
Vit1(Zr _{41.2} Ti _{13.8} Cu _{12.5} Ni ₁₀ Be _{22.5})	\, 2.5 mm	3×5×30	1.0	13.3	[55]
Vit1(Zr _{41.2} Ti _{13.8} Cu _{12.5} Ni ₁₀ Be _{22.5})	\, 3 mm	3×6×30	1.2	13.3	[56]
Vit1(Zr _{41.2} Ti _{13.8} Cu _{12.5} Ni ₁₀ Be _{22.5})	\, 3 mm	3×6×30	~1.17	~13.0	[57]
La ₆₂ Al ₁₄ Cu ₂₄ Ni ₂₄	\, 0.5 mm	d5×60	—	1.77	[74]

又做了尺寸为 3 mm×6 mm×30 mm 的冲击试验, 得到的冲击功在 0.8~1.2 J 之间, 冲击韧度约为 13.0 J/cm²。

由于标准冲击试验机冲击功的量程远大于实际所测得的非晶合金的冲击功, 导致无法检测到明显的变化, 所以 ZACHRISSON 等^[58]通过以下公式对标准冲击试验机进行改进:

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2}m(v_0^2 - v_f^2) \quad (2)$$

式中: v_0 为样品初试速度; h 为摆锤下落高度; m 为摆锤质量; v_f 为冲击后摆锤的速度; E 为冲击动能。

根据式(1)和(2)可计算出摆锤的质量为 2.7 kg(原始质量为 5.6 kg), 摆锤初始高度为 21 cm, 冲击功为 5.6 J, 初始速度大约为 2.0 m/s。而对于断裂功大于 5 J 的材料, 则可以设计出高度为 83 cm, 能量为 23 J 的初始值, 用于相应的非标准尺寸非晶合金试样的冲击试验。

在非晶合金及其复合材料的冲击试验, 目前还没有关于样品尺寸对非晶合金冲击韧性影响的系统研究。对于非晶合金而言, 其冲击功较小, 相对于近似成分的晶态合金而言, 冲击功会低很多, 这其中尺寸效应是一个很重要的原因。在现有的文献中, 对于研究最多的 Vit1, 尺寸分别为 3 mm×3 mm×30 mm、3 mm×5 mm×30 mm 和 3 mm×6 mm×30 mm 的样品。随着样品尺寸的增大, 冲击韧度增大, 但是具体机制和原理还不是很清楚, 而且其他系列的非晶合金是否有着同样的特性尚不清楚, 需要以后进一步研究。

另外, 对于采取缺口深度为 2.5 mm、尺寸为 3

mm×5 mm×30 mm 和缺口深度为 3 mm、尺寸为 3 mm×6 mm×30 mm 两种不同尺寸的 Vit1 合金, 冲击韧度几乎相同, 主要原因在于样品的缺口深度不一样, 所以缺口深度对非晶合金的冲击韧性也有较大的影响。至于样品采取的缺口类型是否对冲击韧性有影响目前还不是很清楚, V 型缺口比 U 型缺口更尖锐, 更能反应材料的缺陷。缺口类型的影响需要在以后进一步探究。非晶合金中对于材料尺寸的规定还不完整, 尺寸效应是今后研究的方向之一。

1.3 温度对非晶合金冲击韧性的影响

非晶合金是一种亚稳态材料, 其独特的微观结构导致其冲击韧性与晶态材料有很大的差异, 温度对其结构改变影响较大。2011 年, 王振明等^[59]研究了钨丝增强相的非晶复合材料在常温和-40 ℃的冲击性能, 研究结果表明低温对钨丝增强非晶复合材料冲击韧性影响不大, 在室温和低温试验条件下都为脆性断裂。2012 年, JOHNSON 等^[53]研究了从室温到液氮温度下非晶合金的冲击韧性, 结果如图 2 所示。随着温度的降低, 非晶合金的冲击韧性以大约 0.02 J/(cm²·K)的速率呈线性降低。RAMAMURTY 等^[56]研究了 Vit1 在 123~423 K 温度区间的冲击韧性, 结果如图 3 所示。研究结果表明, 在 223 K 以上, 冲击功在 1.15~1.35 J 之间, 而在 123~173 K 之间, 冲击功小于 0.85 J。但是维氏硬度几乎没有变化, 冲击韧性下降约 40%, 这意味着从韧性断裂模式向脆性断裂模式转变。

汪海峰^[60]研究表明, 在-20 ℃以下, 非晶复合材料的冲击断裂能基本保持不变; 在-20 ℃以上, 非晶复合材料的冲击断裂能随温度升高而增大。

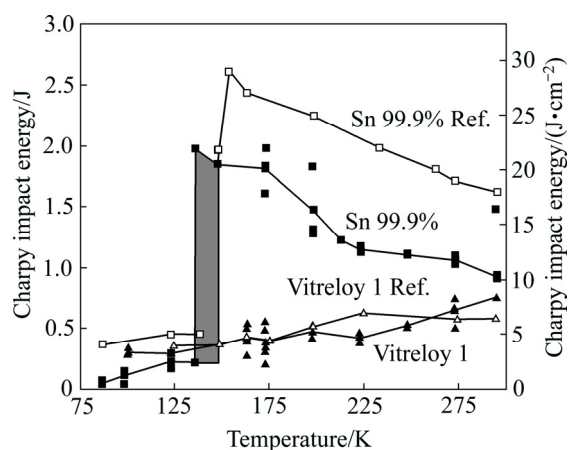


图2 对纯 Sn 和非晶合金 Vit1 的夏比冲击韧性与温度的关系进行了比较^[53]

Fig. 2 Charpy impact toughness versus temperature for pure Sn and Vit1 bulk metallic glasses^[53]

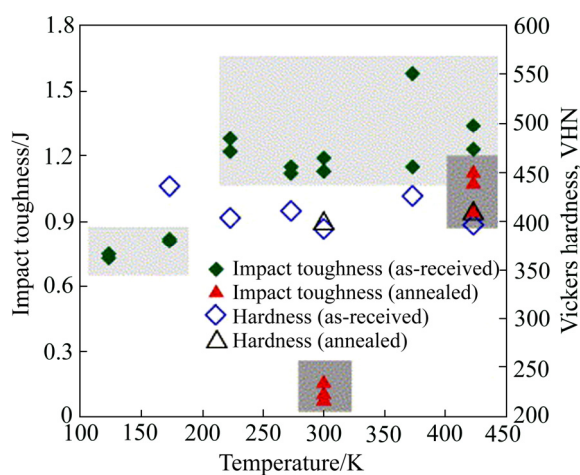


图3 热处理(563 K, 2.5 h)后 Vit1 的冲击韧性值和维氏硬度(VHN)随温度的变化^[56]

Fig. 3 Variation of impact toughness, and Vickers hardness (VHN) values of as-received and annealed (563 K, 2.5 h) Vit1 with temperature^[56]

RAMAMURTY 等^[56]研究了铸态和不同温度退火下 Vit1 的冲击韧性随温度变化的关系, 实验结果如图 4 所示。对于铸态非晶合金, 在 200 K 以上的冲击功大约是 1.2 J, 并在 200 K 时冲击功降至 0.8 J, 在测试温度范围内并没有观察到明显的韧脆转变区。主要原因是经过退火处理之后的非晶合金, 发生了结构弛豫, 导致其自由体积的湮灭, 因此使其塑性降低。

非晶合金在室温下有相对较好的强度和韧性, 而随着温度的降低, 部分非晶合金如 Vit1、DH3 及其复合材料没有表现出明显的脆化现象, 在很大温度范围

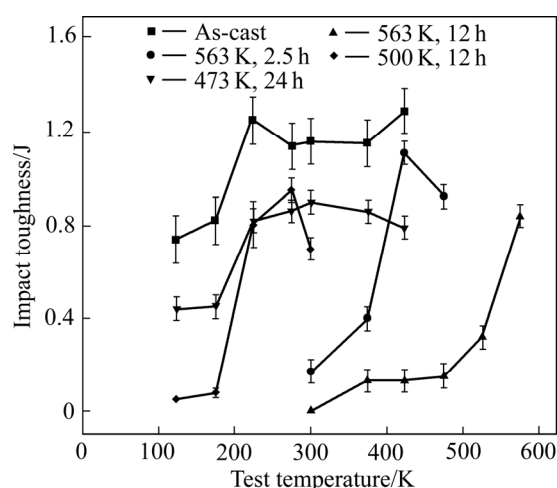


图4 Vit1 铸态和退火态冲击韧性与温度的关系^[57]

Fig. 4 Variation of impact toughness as a function of temperature for as-cast and annealed samples of Vit1^[57]

内没有发生韧脆转变。研究表明, 金属玻璃的大塑性(因而导致其有高韧性)所需的最小自由体积与温度密切相关。这充分说明非晶合金在很大的温度范围内有着良好的应用前景。例如航天航空中部分零件在服役时会经历较大的温度波动, 非晶合金在很大温度范围内不发生韧脆转变的特性, 能够满足空间环境下的服役性能要求。

1.4 热处理对非晶合金冲击韧性的影响

在晶态合金材料中, 热处理对于晶态合金冲击韧性有着明显的影响。例如: 王立民等^[61]研究了正火冷却速度、回火温度对钢材冲击韧性的影响。而在非晶合金中, 目前对于非晶合金热处理的研究只集中在退火处理。

RAMAMURTY 等^[55]研究了等温退火和等时退火下非晶合金 Vit1 的冲击韧性, 结果如图 5 所示。经过退火处理(500 K, 1 h)后的 Vit1 冲击韧性相比较于铸态的下降了两个数量级, 表现出了明显的脆化。主要是因为退火会导致非晶合金的结构弛豫, 在结构弛豫过程中自由体积的损失是造成材料脆化的主要原因。退火后的非晶合金能够观察到明显的韧脆转变现象, CHEN 等^[62]研究了 Fe 基和 Co 基非晶退火脆化问题, 结果表明退火使非晶合金明显脆化, 主要原因是 Fe、Co 原子不完全填充的壳导致其有更高的抗剪切变形力, 从而导致其脆化。RAMAMURTY 等^[56]研究了铸态和不同温度、不同时间退火下 Vit1 的冲击韧性的比较。结果表明, 退火后的非晶合金 Vit1 的冲击韧性都低于铸态 Vit1 的。退火时间相同时, 随着退火温度的

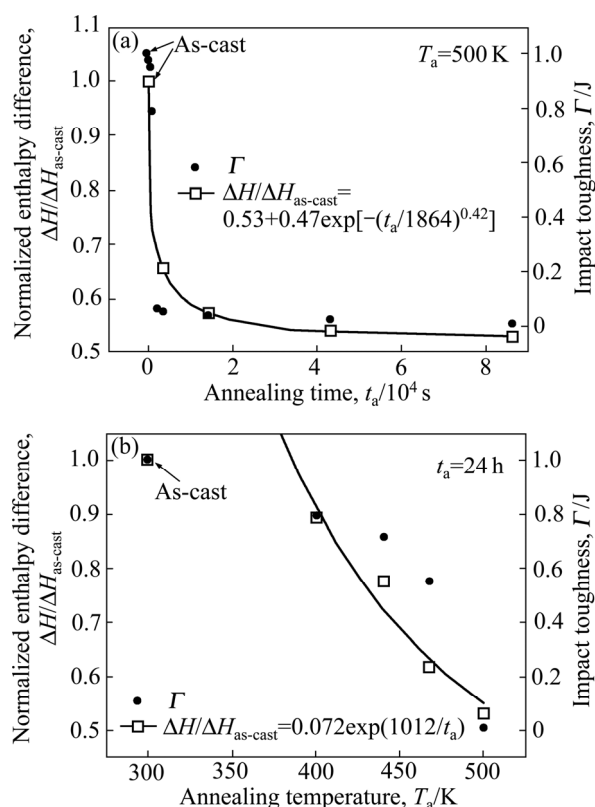


图5 Vit1 铸态和退火态冲击韧性与温度的关系^[55]

Fig. 5 Various of impact toughness of Vit1 as a function of temperature in the as-cast and annealed states^[55]

增加, 室温冲击韧性升高, 而在相同的退火温度下, 退火时间越长, 室温冲击韧性越低。非晶合金退火后, 会出现明显的韧脆转变现象; 对于非晶合金韧脆转变的解释, 主要是针对临界自由体积^[63]、泊松比^[64-65]、黏塑性^[66-67]三个方面来解释的。其中, 随着自由体积的增加, 非晶合金的冲击韧性会相应增加, 但是由于影响非晶合金冲击韧性的因素很多, 韧脆转变温度无法只靠临界自由体积一个因素确定; PUGH^[64]和 KELLY 等^[65]指出: 低的泊松比会使得晶态材料有着相对较脆的特性, 而在非晶合金中还没有明确的研究; FALK^[66]和 LANGER 等^[67]利用分子动力学模拟, 发展了黏塑性变形理论。发现流动应力与脆性无关, 对脆性贡献最大的是应变速率敏感性, 但是该理论还需要更多的实验和模拟来验证。非晶合金韧脆转变是一个复杂的过程, 当前研究还不够深入, 需要进一步探索。

目前, 热处理对于非晶合金冲击韧性的研究仅限于退火处理对其影响, 而且研究较多的也是针对成形能力很强的 Vit1, 但是其他系列的非晶合金的冲击韧性以及热处理对其他系列非晶合金冲击韧性的影响几乎没有, 这也是今后的一个研究方向。

2 非晶合金冲击韧性的改进方法

由于对于非晶合金冲击韧性的研究较少, 目前对于非晶合金冲击韧性改进的方法也还比较少。对于晶态合金可以通过不同热处理制度、添加稀土元素、不同锻造、轧制方法等改善其冲击韧性。例如, 对于铝合金, 有固溶处理^[68-69]、细化晶粒^[15]、变质处理^[70]等很多处理工艺来提高 Al 合金的冲击韧性; 对于钛合金, 有退火处理^[71-72]、锻造方法^[22]、固溶处理后冷速控制^[23]。晶态材料可以通过细化晶粒提高其冲击性能, 而对于非晶合金, 由于其没有的晶粒和晶界, 该方法用来改进冲击韧性在非晶合金中无法得到应用。目前, 改善非晶合金冲击韧性的方法有改善制备方法、制备非晶合金复合材料、研究不同原子配比或者添加不同元素来改善冲击韧性。

2.1 添加合金元素

改进非晶合金力学性能的一个重要研究方向就是通过添加合金元素来提高非晶合金的综合力学性能。对于金属材料, 例如钢材, 通过添加钒、钛、铝、氮等元素, 能够提高其冲击韧性, 尤其是低温冲击韧性。因而通过合金化, 有望改善非晶合金的冲击性能。

2013 年, 徐冲^[73]研究了 Ta 元素添加对 Zr-Cu-Al 非晶合金冲击韧性的影响, 添加 Ta 元素的含量不同, 得到材料的冲击韧性在 $14.3 \sim 26.38 \text{ J/cm}^2$ 之间。在材料 $(\text{Zr}_{64}\text{Cu}_{26})_{90-x}\text{Ta}_x\text{Al}_{10}$ 中, $x=4$ 时冲击韧度值最大, 比未添加 Ta 元素时材料的冲击韧性大约提高了 84%。而添加 Ta 时没有提高材料的拉伸或者压缩塑性, 但使断裂强度提高了约 53.6%。在传统晶态材料中, 一般认为塑性对冲击韧性的影响较大, 而 Ta 添加在 $(\text{Zr}_{64}\text{Cu}_{26})_{90-x}\text{Ta}_x\text{Al}_{10}$ 材料中表明强度对冲击韧性的影响较大。在以后的实验中, 需要继续研究非晶合金的强度是否对冲击韧性的贡献大于塑性。LEE 等^[74]研究了 $\text{La}_{86-y}\text{Al}_{14}(\text{Cu}, \text{Ni})_y$ ($y=1 \sim 24$, 摩尔分数, %) 材料在添加不同原子配比情况下的冲击韧性, 随着 Cu、Ni 元素含量的减少, 该非晶合金冲击韧性大体上呈现递增的趋势。MA 等^[75]研究了添加 Fe 元素对 Mg 基非晶合金的影响, 添加 Fe 元素并没有影响到 Mg 基非晶合金的成形能力, 而且显著提高了 Mg 基非晶合金的强度, 达到了 1 GPa, 远高于其他的 Mg 基非晶合金的强度, 并且使脆性的 Mg 基非晶合金有了一定的塑性。主要原因就是用铜模铸造可以使尺寸为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的 $\alpha\text{-Fe}$ 相颗粒均匀地形成原位复合材料。镁基非晶合

金是一种良好的生物医学材料, 与人体有很好的生物相容性^[76]。通过添加其他合金元素改善镁基非晶合金的力学性能, 能够拓宽镁基非晶合金是医用范围。

2.2 改进制备工艺

非晶合金的制备方法不同, 得到的非晶合金的内部结构也有很大的差异, 导致其冲击韧性不同。非晶合金的制备方法主要有稀释气态凝聚法、快淬法、助溶剂水淬法、铜模喷铸法、铜模吸铸法、浇铸法、压铸法等。INOUE 等^[52]的研究表明: 压铸方法生产的块体 Zr 基非晶合金的冲击韧性比浇铸制造的非晶合金的冲击韧性有明显的提高。这主要是由于压铸方法制备的非晶合金致密性好于浇铸制备的样品。2011 年, ZACHRISSON 等^[58]对多种材料(分别为非晶合金 Vit1、非晶合金复合材料 LM2(Zr_{56.2}Ti_{13.8}-Nb_{5.0}Cu_{6.9}Ni_{5.6}Be_{12.5})、DV1(Ti₄₈Zr₂₀V₁₂Cu₅Be₁₅)、DH3(Zr_{39.9}Ti_{33.9}Nb_{7.6}Cu_{6.4}Be_{12.5})以及晶态材料 Ti-6Al-4V、Al-7075、Al-2024、SS304)进行夏比冲击试验研究, 通过对冲击韧性的对比, 得出了不同处理工艺的同种材料的冲击功不相同。通过吸铸方法(SC)制备的 DV1 的冲击韧性为 14.6 J/cm², 通过半固态锻造方法(SSF)工艺处理后的 DV1 的冲击韧性为 53.6 J/cm², 大约是 SC 制备 DV1 的 4 倍; 通过 SC 制备的 DH3 的冲击韧性约为 29.6J/cm², 通过 SSF 处理后的 DH3 的冲击韧性约为 58.6J/cm², 大约是 SC 制备 DH3 的 2 倍。主要原因是: SC 制备的 DV1 和 DH3 非晶合金复合材料的树枝晶分布不均匀, 而采用 SSF 制备的非晶合金复合材料中树枝晶分布相对均匀, 并且 SSF 制备的样品中树枝晶的尺寸比 SC 制备的样品中树枝晶的尺寸大 20 倍左右。不同方法制备的非晶合金的冲击韧性不同,

这说明非晶合金的冲击韧性可能与其制备的方法有一定的关联。但是目前对于不同制备方法来改进非晶合金冲击韧性的研究还不够充分, 这也是未来非晶合金的研究方向。

2.3 制备非晶合金复合材料

复合材料常见的制备方法主要有两种: 一种是外加法, 另一种是内生法。通过非晶合金基体中引入或硬或韧第二相颗粒的方法, 制备非晶合金复合材料, 以激活更多剪切带的萌生, 阻止剪切带扩展与促进剪切带增殖, 进而提高非晶合金塑性变形能力^[47]。对现有非晶合金复合材料冲击韧性的总结如表 2 所列, 从中可以知道, 非晶合金复合材料的冲击韧性一般都会高于其对应的非晶合金的冲击韧性。

在外加法制备非晶合金复合材料中, 2011 年王振明等^[59]研究了钨丝增强相的非晶复合材料的冲击性能, 得到的非晶合金复合材料的冲击韧度为 5 J/cm²。钨丝非晶合金复合材料在常温 and 低温下的冲击功变化很小, 而钨合金材料在常温 and 低温下的冲击功变化相对较大。研究表明, 钨丝是块体非晶合金的理想增强材料, 钨丝非晶合金是一种重要的穿甲材料, 提高其冲击韧性, 能够拓宽在军事上的用途, 相比较之前所用贫铀合金穿甲弹芯, 能够很好地避免材料带来的残留放射性等可怕后遗症。ROBERTS 等^[53]研究了复合材料的冲击韧性, 300 K 时 DH3 复合材料的冲击韧性是 DH3 非晶合金材料的 3.25 倍。KATO 等^[77]和 DELEDDA 等^[78]研究了 ZrC 颗粒增强 Zr₅₅Al₁₀-Cu₃₀Ni₅ 块体非晶合金复合材料的强度和塑性, 其强度和塑性都提高了, 说明添加了增强相的复合材料的综合力学性能得到了提升。在内生法制备非晶合金复合材料中,

表 2 非晶合金复合材料的冲击韧性

Table 2 Impact toughness of metallic glass composites

Method	Composition	Sample size/ mm	Reinforced phase	Impact energy/J	Impact toughness/ (J·cm ⁻²)	Reference
Ex-situ	ZrTiCuNiBe	10×10×55	W fiber	16.7	6.7	[59]
	Zr _{63.63} Cu _{14.52} Ni _{10.12} Al ₁₂	3×10×55	Fiber web	1.9–3.6	5.82–14.57	[73]
	DV1(Ti ₄₈ Zr ₂₀ V ₁₂ Cu ₅ Be ₁₅)	3×3×30	Crystallization40%	1.31	14.6	[53]
In-situ	DH3(Zr _{39.9} Ti _{33.9} Nb _{7.6} Cu _{6.4} Be ₁₅)	3×3×30	Crystallization67%	2.66	29.6	[53]
	Zr _{56.2} Ti _{13.8} Nb _{5.0} Cu _{6.9} Ni _{5.6} Be _{12.5}	5×5	BCC(Ti, Nb)	20	~80	[54]
	LM2(Zr _{56.2} Ti _{13.8} Nb _{5.0} Cu _{6.9} Ni _{5.6} Be _{12.5})	3×3×30	Crystallization40%	0.13	1.4	[58]
	DV1(Ti ₄₈ Zr ₂₀ V ₁₂ Cu ₅ Be ₁₅)	3×3×30	Crystallization40%	4.82	53.6	[58]
	DH3(Zr _{39.9} Ti _{33.9} Nb _{7.6} Cu _{6.4} Be ₁₅)	3×3×30	Crystallization67%	5.27	58.6	[58]
	La _{86-y} (Cu, Ni) _y Al ₁₄ (y=1–24, mole fraction, %)	d5×60	α-La	—	1.76–3.11	[74]

2001年, SZUECS等^[54]研究了不同材料的冲击韧性。通过对4种材料(Vit1、 $Zr_{56.2}Ti_{13.8}Nb_{5.0}Cu_{6.9}-Ni_{5.6}Be_{12.5}$ 、 $Zr_{47}Ti_{12.9}Nb_{2.8}Cu_{11}Ni_{9.6}$ 、 $Be_{16.7}-Zr_{71}Ti_{16.3}Nb_{10}-Cu_{1.8}Ni_{0.9}$)的冲击功对比, Zr基非晶合金复合材料的冲击韧性是Vit1的冲击韧性的2.5倍。复合材料增强的冲击韧性可以用 β 相枝晶主导的变形机制来解释,在冲击断裂过程中,随着塑性应变的增加,复合材料有较高的能量吸收,导致其冲击韧性较大。2011年, ZACHRISSON等^[58]对多种材料(Vit1、LM2、DV1、DH3、Ti-6Al-4V、Al-7075、Al-2024、SS304)进行了夏比冲击试验,结果如图6所示。通过对冲击功的对比,得出了不同材料的冲击功不相同,非晶合金复合材料的冲击韧性明显高于该复合材料非晶基体的冲击韧性。

通过非晶合金复合材料与非晶合金的冲击韧性对比可以知道,非晶合金复合材料的冲击韧性一般都会比非晶合金的冲击韧性要好,最主要的原因就是在复合材料中加入了增强相,其对塑性或者强度有一定改善,从而提高了其冲击性能。但是,复合材料的工艺很复杂,很难找到合适的复合相,复合相的组成成分多少、与非晶合金母相界面的亲和性、尺寸的大小等都与其塑性的关系很敏感,难以控制^[74]。

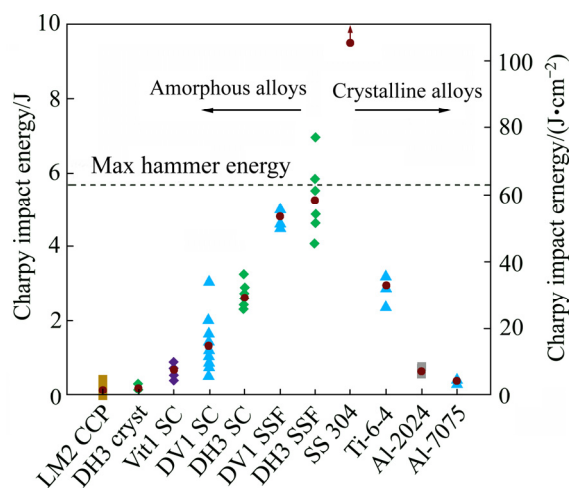


图6 典型非晶合金及其复合材料与常见金属结构材料的冲击韧性^[58]

Fig. 6 Impact toughness of common metallic glasses and their composites and crystalline structural materials^[58]

3 结论与展望

随着航天航空事业的迅速发展,对于材料性能的要求都是“更强、更韧、更耐磨”。非晶合金作为一种新材料,有着巨大的应用前景。但是,现阶段对于

非晶合金冲击韧性的系统研究还不够。尺寸、温度、热处理制度等不同因素都对其冲击韧性有一定的影响。从目前的研究结果来看,随着样品尺寸的减小,非晶合金的冲击韧性总体上呈现递减的趋势。随着温度的提高,非晶合金冲击韧性也相应提高。而对于退火处理之后的样品,其冲击韧性相对于铸态非晶合金的冲击韧性,都会出现明显的下降。现在所有非晶合金都面临着同样的问题,室温变形中高度局域化的剪切带形成导致非晶合金几乎没有宏观塑性变形便发生断裂,脆性很大。

非晶合金的冲击韧性一般小于相似成分金属合金的冲击韧性,并且随着温度的变化,含有BCC相和HCP相的金属或者合金会出现一个明显的韧脆转变区,而非晶合金材料一般不会出现明显的韧脆转变区。随着温度的增加,非晶合金Vit1的冲击韧性一般呈现出小幅度线性递增的趋势。这使得非晶合金在较宽的温度范围内服役有良好的应用前景。

非晶合金的断裂一般表现为脆性断裂。这种失效对于非晶合金材料的应用来说是比较危险的,所以对于非晶合金冲击韧性的研究很有必要。因此,非晶合金冲击韧性试验样品尺寸统一标准是接下来急需解决的问题。而如何提高非晶合金冲击韧性,得到具有良好冲击韧性的非晶合金成分,需要在以后的工作中进一步完善。温度、热处理机制等对非晶合金冲击韧性的影响都需要再进行更加深入地研究。并且,对于非晶合金冲击韧性理论问题的研究,也不够深入。例如:合金元素添加对于非晶合金韧性的影响机理、样品尺寸导致的韧性变化的机理、制备非晶合金复合材料中第二相的引入带来的非晶合金韧性变化的机理等,目前尚未有系统研究,值得在今后的工作中重点关注。

REFERENCES

- [1] 惠希东, 陈国良. 块体非晶合金[M]. 北京: 化学工业出版社. 2007: 1-2.
HUI Xi-dong, CHEN Guo-liang. Bulk amorphous alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 1-2.
- [2] KRAMER J. Non-conductive transformation in metal[J]. Annals of Physics, 1934, 19: 37.
- [3] MARK T. The case for bulk metallic glass[J]. Materials Today, 2004, 7(3): 36-43.
- [4] WANG W H, DONG C, SHEK C H. Bulk metallic glasses[J]. Materials Science and Engineering Reports, 2004, 44(2/3): 45-89.
- [5] 孙 军, 张国君, 刘 刚. 大块非晶合金力学性能研究进

- 展[J]. 西安交通大学学报, 2001(6): 640–645.
- SUN Jun, ZHANG Guo-liang, LIU Gang. Progress in mechanical properties of bulk amorphous alloys[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001(6): 640–645.
- [6] INOUE A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. Acta Materialia, 2000(48): 279–306.
- [7] NAMAZI H, AKRAMI A, HAGHIGHI R, DELAVIZ A, KULISH V V. Analysis of the influence of element's entropy on the bulk metallic glass (BMG) entropy, complexity, and strength[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(2): 780–788.
- [8] LI M C, JIANG M Q, YANG S, JIANG F, HE L, SUN J. Effect of strain rate on yielding strength of a Zr-based bulk metallic glass[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 680: 21–26.
- [9] QU R T, LIU Z Q, WANG R F, ZHANG F Z. Yield strength and yield strain of metallic glasses and their correlations with glass transition temperature[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 637: 44–54.
- [10] JIANG J Z, HOFMANN D, JARVIS D J. Low-density high-strength bulk metallic glasses and their composites: A review[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(6): 761–780.
- [11] ZHOU J, YANG W M, YUAN C C, SUN B A, SHEN B L. Ductile FeNi-based bulk metallic glasses with high strength and excellent soft magnetic properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 742: 318–324.
- [12] 张 为, 寇生中, 艾亚军, 孙卫民, 赵燕春, 李春燕, 李 广. 铝含量对 $(\text{Zr}_{0.761}\text{Cu}_{0.147}\text{Ni}_{0.092})_{93-x}\text{Al}_{7+x}$ 非晶合金的热稳定性及其力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(12): 2527–2534.
- ZHANG Wei, KOU Sheng-zhong, AI Ya-jun, SUN Wei-ming, ZHAO Yan-chun, LI Chun-yan, LI Guang. Effects of Al content on thermal stability and mechanical properties of $(\text{Zr}_{0.761}\text{Cu}_{0.147}\text{Ni}_{0.092})_{93-x}\text{Al}_{7+x}$ amorphous alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(12): 2527–2534.
- [13] 张 丹, 邱克强, 任英磊, 李荣德, 胡壮麒. Nb 添加对 $\text{Zr}_{50.5-x}\text{Al}_9\text{Ni}_{4.05}\text{Cu}_{36.45}\text{Nb}_x$ 非晶合金热稳定性及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7): 1876–1881.
- ZHANG Dan, QIU Ke-qiang, REN Ying-lei, LI Rong-dei, HU Zhuang-qi. Effect of Nb addition on thermal stability and mechanical properties of $\text{Zr}_{50.5-x}\text{Al}_9\text{Ni}_{4.05}\text{Cu}_{36.45}\text{Nb}_x$ amorphous alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(7): 1876–1881.
- [14] GU J, ZHANG L X, WANG Y H, NI S, GUO S F, SONG M. Combined effect of isothermal annealing and pre-compression on mechanical properties of $\text{Cu}_{36}\text{Zr}_{48}\text{Al}_8\text{Ag}_8$ bulk metallic glass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(6): 1620–1628.
- [15] GUENNEC B, NOBORI T, KUWAHARA H, UENO A. Effect of the stress ratio on the fatigue behavior of $\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5\text{Cu}_{30}$ bulk metallic glass part I—Analysis of the fatigue resistance[J]. Intermetallics, 2018, 92: 72–78.
- [16] WANG G Y, LIAW P K, PETER W H, YANG B, YOKOYAMA Y, BENSON M L, GREEN B A, KIRKHAM M J, WHITE S A, SALEH T A, MCDANIELS R L, STEWARD R V, BUCHANAN R A, LIU C T, BROOKS C R. Fatigue behavior of bulk-metallic glasses[J]. Intermetallics, 2004, 12(7/9): 885–892.
- [17] RAUT D, NARAYAN R L, TANDAIYA P, RAMAMURTY U. Temperature-dependence of mode I fracture toughness of a bulk metallic glass[J]. Acta Materialia, 2018, 144: 325–336.
- [18] JIA H L, WANG G Y, CHEN S Y, GAO Y F, LI W D, LIAW P K. Fatigue and fracture behavior of bulk metallic glasses and their composites[J]. Progress in Materials Science, 2018, 98: 168–248.
- [19] KETKAEW J, CHEN W, WANG H, DATYE A, FAN M, PEREIRA G. Mechanical glass transition revealed by the fracture toughness of metallic glasses[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1–7.
- [20] 刘瑞堂, 刘锦云. 金属力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015: 50–51.
- LIU Rui-tang, LIU Jin-yun. Mechanical Properties of Metals[M]. Harbin: Harbin Industrial Publishing House, 2015: 50–51.
- [21] 麻西群, 孙巧艳, 曹伟产, 井晓天, 于振涛. α 钛合金在室温和低温的冲击韧性[J]. 稀有金属快报, 2006(5): 18–21.
- MA Xi-qun, SUN Qiao-yan, CAO Wei-chan, JING Xiao-tian, YU Zhen-tao. Research on α -titanium alloys under impact load at 293 K and cryogenics 77 K[J]. Rare Metals Letters, 2006(5): 18–21.
- [22] 张旺峰, 王玉会, 颜孟奇, 张庆玲. 锻造方法对 TA15 钛合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 15–19.
- ZHANG Wang-feng, WANG Yun-hui, YAN Meng-qi, ZHANG Qing-ling. Effect forging method on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 15–19.
- [23] 徐戊矫, 谭玉全, 龚利华, 章 磊. 退火温度和冷却速率

- 对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(11): 2932–2936.
- XU Wu-jiao, TAN Yu-quan, GONG Li-hua, ZHANG Lei. Effect of annealing temperature and cooling rate on microstructure and properties of TC4 Titanium alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering A, 2016, 45(11): 2932–2936.
- [24] 文志刚, 李献军, 吴月茜, 王丽瑛, 杨蓉, 杨慧丽. 一种新型高冲击韧性钛合金 Ti-64S[J]. 世界有色金属, 2018(6): 278–279.
- WEN Zhi-gang, LI Xian-jun, WU Yue-Xi, WANG Li-ying, YANG Rong, YANG Hui-li. A new titanium alloy Ti-64S with high impact toughness[J]. World Nonferrous Metals, 2018(6): 278–279.
- [25] 尹雁飞, 李思兰, 侯智敏, 张鹏省, 毛小南, 赵永庆. 热处理对 Ti12LC 低成本钛合金组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 32(4): 13–16.
- YIN Yan-fei, LI Si-lan, HOU Zhi-min, ZHANG Peng-sheng, MAO Xiao-nan, ZHAO Yong-qing. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti12LC low-cost titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(4): 13–16.
- [26] 刘扭参, 刘忠侠. 复合变质对 Al-20Si 合金冲击性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(12): 975–977.
- LIU Niu-can, LIU Zhong-xia. Influences of complex modifications on impact toughness of hypereutectic Al-20%Si alloy[J]. Special Casting and Non-ferrous Alloys, 2008, 28(12): 975–977.
- [27] 杨留栓. 铁元素对铝硅活塞合金机械性能的影响[J]. 铸造技术, 1986(2): 59–62.
- YANG Liu-shuan. Effect of Iron on the mechanical properties of Al-Si piston alloy[J]. Casting Technology, 1986(2): 59–62.
- [28] 王庆良, 王大庆. 稀土钇对 AlZnMgCu 合金组织及性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999(4): 82–85.
- WANG Qing-liang, WANG Da-qing. Effects of yttrium on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999(4): 82–85.
- [29] MA A, SUZUKI K, NISHIDA Y, SAITO N, SHIGEMATSU I, TAKAGI M, IWATA H, WATAZU A, IMURA T. Impact toughness of an ultrafine-grained Al-11mass%Si alloy processed by rotary-die equal-channel angular pressing[J]. Acta Materialia, 2005, 53(1): 211–220.
- [30] 刘赛, 杨涤心, 张金雨, 法瑞. 高铝锌合金低温冲击韧性研究[J]. 矿山机械, 2011, 39(7): 124–127.
- LIU Sai, YANG Di-xin, ZHANG Jin-yu, FA Rui. Study on low-temperature impact toughness of high-contented Al-Zn alloy[J]. Mining Machinery, 2011, 39(7): 124–127.
- [31] JIANG J H, YUAN T, SHI J, ZHANG L L, MA A B, SONG D. Enhanced impact toughness at ambient temperatures of ultrafine-grained Al-26wt.% Si alloy produced by equal-channel angular pressing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(5): 2131–2137.
- [32] 许良红, 田志凌, 彭云. 微观组织对高强铝合金接头冲击韧度的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 108–113.
- XU Liang-hong, TIAN Zhi-ling, PENG Yun. Effect of microstructure on impact toughness of high strength Aluminum alloy welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 108–113.
- [33] 胡茂良, 朱瑶, 王渠东, 吉泽升, 许红雨, 王晔. Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金冲击断裂机理研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(2): 304–308.
- HU Mao-liang, ZHU Yao, WANG Qu-dong, JI Ze-sheng, XU Hong-yu, WANG Ye. Impact fracture mechanical of Mg-Gd-Y-Zn-Zr magnesium alloy[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(2): 304–308.
- [34] 李娟, 王文先, 张兰, 苏娟, 张红霞. AZ31 镁合金的缺口冲击韧性及其断裂机理[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(2): 246–251.
- LI Juan, WANG Wen-xian, ZHANG Lan, SU Juan, ZHANG Hong-xian. Notch impact toughness and fracture mechanism of AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2011, 29(2): 246–251.
- [35] 苏娟, 李香平, 刘金华, 王文先. AZ31 镁合金板材缺口敏感性的研究[J]. 机械工程与自动化, 2007(5): 80–82.
- SU Juan, LI Xiang-ping, LIU Jin-hua, WANG Wen-xian. Study on notch sensitivity of AZ31 magnesium alloy plate[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007(5): 80–82.
- [36] 张星, 张治民, 李保成. 时效处理对 AZ80 镁合金冲击韧度的影响[J]. 金属热处理, 2007(10): 69–70.
- ZHANG Xing, ZHANG Zhi-min, LI Bao-cheng. Influence of aging on impact toughness of AZ80 Magnesium alloy[J]. Metal Heat Treatment, 2007(10): 69–70.
- [37] 刘子利, 潘青林, 陈照峰, 陶杰. Sb 对 AE41 镁合金组织和性能的影响[J]. 航空材料学报, 2005(6): 4–7.
- LIU Zi-li, PAN Qing-lin, CHEN Zhao-feng, TAO Jie. Effects of surface defects on the rolling contact fatigue behaviors of Cr4Mo4V steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005(6): 4–7.
- [38] GAO G H, AN B F, ZHANG H, GUO H R, GUI X L, BAI B Z. Concurrent enhancement of ductility and toughness in an

- ultrahigh strength lean alloy steel treated by bainite-based quenching-partitioning-tempering process[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, 702: 104–112.
- [39] JO M C, PARK J, SOHN S S, KIM S, OH J, LEE S. Effects of untransformed ferrite on Charpy impact toughness in 1.8-GPa grade hot-press-forming steel sheets[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 707: 65–72.
- [40] ELAHI M A, SHABESTRAI S G. Effect of various melt and heat treatment conditions on impact toughness of A356 aluminum alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(4): 956–965.
- [41] GOKHAN O, KARAASLAN A. Properties of AA7075 aluminum alloy in aging and retrogression and reaging process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(11): 2357–2362.
- [42] ZOU Y, XU B Y, HU Z P, CHEN S Q, HAN D T, MISRA R D K, WANG G Z. High strength-toughness combination of a low-carbon medium-manganese steel plate with laminated microstructure and retained austenite[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 707: 270–279.
- [43] LAN H F, DU L X, LI Q, QIU C L, LI P J, MISRA R S K. Improvement of strength-toughness combination in austempered low carbon bainitic steel: The key role of refining prior austenite grain size[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 710: 702–710.
- [44] ZHANG Y P, ZHAN D P, QI X W, JIANG Z H, ZHANG H S. Microstructure and mechanical properties of Cr14 ultra-high-strength steel at different tempering temperatures around 773 K[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 698: 152–161.
- [45] XI X K, ZHAO D Q, PAN M X, WANG W H, WU Y, LEWANDOWSKI J J. Fracture of brittle metallic glasses: Brittleness or plasticity[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(12): 125510.
- [46] ZHANG Y, ZHOU M, ZHAO X Y, MA L Q. Co substituted Zr-Cu-Al-Ni metallic glasses with enhanced glass-forming ability and high plasticity[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, 473: 120–124.
- [47] TANG M Q, ZHANG H F, ZHU Z W, FU H M, WANG A M, LI H, HU Z Q. TiZr-base bulk metallic glass with over 50 mm in Diameter[J]. *Journal of Materials Science and Technology (English Edition)*, 2010, 26(6): 481–486.
- [48] ZHAO Y Y, ZHAO X. Structural relaxation and its influence on the elastic properties and notch toughness of Mg-Zn-Ca bulk metallic glass[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 515: 154–160.
- [49] NAGERNDRA N, RAMAMURTY U, GOH T T, LI Y. Effect of crystallinity on the impact toughness of a La-based bulk metallic glass[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(10): 2603–2615.
- [50] GUO F S, LIU L, LI N, LI Y. Fe-based bulk metallic glass matrix composite with large plasticity[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(6): 329–332.
- [51] INOUE A, ZHANG T. Impact fracture energy of bulk amorphous Zr₅₅Al₁₀Cu₃₀Ni₅[J]. *Materials Transactions*, 1996, 37(11): 1726–1729.
- [52] YOSHIHIKO Y, YASUTAKE A, TOTU Y, PETER K, L, RAYOMND A, BUCHANAN, INOUE A. Evolution of mechanical properties of cast Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀ glassy alloys by structural relaxation[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(12): 2755–2761.
- [53] ROBERTS S, ZACHRISSON C, KOZACHKOV H, ULLAH A, SHAPIRO A A, JOHNSON L W, HOFMANN C D. Cryogenic Charpy impact testing of metallic glass matrix composites[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 66(5): 284–287.
- [54] SZUECS F, KIM C P, JOHNSON L W. Mechanical properties of Zr_{56.2}Ti_{13.8}Nb_{5.0}Cu_{6.9}Ni_{5.6}Be_{12.5} ductile phase reinforced bulk metallic glass composite[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49: 1507–1513.
- [55] MURIAL P, RAMAMURTY U. Embrittlement of a bulk metallic glass due to sub-annealing[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(5): 1467–1478.
- [56] RAGHAVAN R, MURALI P, RAMAMURTY U. Ductile to brittle transition in the Zr_{41.2}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5} bulk metallic glass[J]. *Intermetallics*, 2006, 14(8/9): 1051–1054.
- [57] RAGHAVAN R, MERALI P, RAMAMURTY U. On factors influencing the ductile-to-brittle transition in a bulk metallic glass[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(11): 3332–3340.
- [58] ZACHRISSON C, KOZACHKOV H, ROBERTS S, KALTENBOECK G, CONNER R D. Effect of processing on Charpy impact toughness of metallic glass matrix composites[J]. *Journal of Materials Research*, 2011, 26(10): 1260–1268.
- [59] 王振明, 史洪刚, 冯宏伟, 尚福军, 祝理君, 苏继红. 钨丝/非晶复合材料的冲击性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2011, 34(2): 77–79.
- WANG Zhen-ming, SHI Hong-gang, FENG Hong-wei, SHANG Fu-jun, ZHU Li-jun, SU Ji-hong. Impact property of W fiber reinforced amorphous composite material[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(2): 77–79.

- [60] 汪海峰. W 丝/Zr 基非晶复合材料的力学性能[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2010: 48–54.
- WANG Hai-feng. Mechanical behavior of tungsten fiber reinforced Zr-based bulk metallic glass composite[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2010: 48–54.
- [61] 王立民, 彭梦都, 刘正东, 雷玖芳. 热处理对 45CrMoV 钢组织和冲击韧性的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(2): 166–170.
- WANG Li-min, PENG Meng-du, LIU Zheng-dong, LEI Jiu-fang. Effects of heat treatment on microstructure and impact toughness of 45CrMoV steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(2): 166–170.
- [62] CHEN H S. Structural relaxation in amorphous alloys-compositional short range ordering[J]. Materials Research Bulletin, 1978, 13(6): 557–562.
- [63] WU T W, SPAEPEN F. The relation between embrittlement and structural relaxation of an amorphous metal[J]. Philosophical Magazine B, 1990, 61(4): 739–750.
- [64] PUGH S F. XCII. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1954, 45(367): 823–843.
- [65] KELLY A, TYSON W R, COTTRELL A H. Ductile and brittle crystals[J]. The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics, 1967, 15(135): 567–586.
- [66] FALK M L. Molecular-dynamics study of ductile and brittle fracture in model noncrystalline solids[J]. Physical Review B, 1999, 60(10): 7062.
- [67] FALK M L, LANGER S J. Dynamics of viscoplastic deformation in amorphous solids[J]. Physical Review E, 1998, 56(6): 7192.
- [68] ELSHARKAWI E A, ABDELAZIZ M H, DOTY H W, VALTIERRA S, SAMUEL F H. Effect of β -Al₃FeSi and π -Al₈Mg₃FeSi₆ phases on the impact toughness and fractography of Al-Si-Mg-based alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2018, 12(1): 148–163.
- [69] KAISER M S. Solution treatment effect on tensile, impact and fracture behaviour of trace Zr added Al-12Si-1Mg-1Cu piston alloy[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 2018, 99(1): 109–114.
- [70] 许春香, 张金山. REAlTiBP 多元复合变质 ZL117 铝硅合金[J]. 中国稀土学报, 2002(4): 331–333.
- XU Chun-xiang, ZHANG Jin-shan. Modification of cast 117 aluminum-silicon alloy with REAlTiBP multicomponent composite modifier[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2002(4): 331–333.
- [71] 李 婷, 杜 宇, 赵 亮, 常 江. 热处理制度对大直径钛合金管材组织与性能的影响[J]. 中国材料进展, 2017, 36(10): 765–768.
- LI Ting, DU Yu, ZHAO Liang, CHANG Jiang. Effect of heat treatment processes on microstructure and property of big-diameter Titanium alloy tube[J]. Materials China, 2017, 36(10): 765–768.
- [72] 都海刚, 檀 雯, 岳 旭, 王永强, 刘继雄, 郭建华, 石卫民, 尹胜利. 退火温度对 TC4 钛合金薄壁环材冲击韧性的影响[J]. 科技创新与应用, 2017(20): 62–63.
- DOU Hai-gang, TAN Wen, QIU Yue, WANG Yong-qiang, LIU Ji-xiong, GUO Jian-hua, SHI Wei-min. Effect of annealing temperature on impact toughness of TC4 Titanium alloy thin-walled ring[J]. Technology Innovation and Application, 2017(20): 62–63.
- [73] 徐 冲. 块体非晶合金及其复合材料的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013: 56–61.
- XU Chong. Preparation and properties of bulk amorphous and its composite materials[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013: 56–61.
- [74] LEE M L, LI Y, SCHUH C A. Effect of a controlled volume fraction of dendritic phases on tensile and compressive ductility in La-based metallic glass matrix composites[J]. Acta Materialia, 2004, 52(14): 4121–4131.
- [75] MA H, XU J, MA E. Mg-based bulk metallic glass composites with plasticity and high strength[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(14): 2793–2795.
- [76] 谈正中, 戚孝群, 赵一鹤. 镁基非晶合金作为生物材料的应用现状[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(3): 53–58.
- TAN Zheng-zhong, QI Xiao-qi, ZHAO Yi-he. Present situation of amorphous Mg-based alloy as biological materials[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2018, 39(3): 53–58.
- [77] KATO H, HIRANO T, MATSUO A, KAWANURA Y, INOUE A. High strength and good ductility of Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀ bulk glass containing ZrC particles[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(6): 503–507.
- [78] DELEDDA S, ECKERT J, SCHULTZ L. Thermal stability of mechanically alloyed Zr-Cu-Al-Ni glass composites containing ZrC particles as a second phase[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(1): 31–35.

Research status and prospect of impact toughness of bulk metallic glasses

YIN Geng¹, LI Fang-wei¹, DENG Lei¹, JIN Jun-song¹, GONG Pan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Materials Progress and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Due to their unique amorphous structure, the metallic glasses possess excellent mechanical properties (e.g. high strength, high hardness, large elastic limit, etc.), which make them potential candidates as advanced structural engineering materials. The impact toughness, which is one of the most important mechanical property indexes and reflects the impact resistance of materials, should be paid attention to during the service process. In this article, the research progress of impact toughness of metallic glasses was reviewed. The effects of sample size, service temperature, alloy composition and heat treatment on impact toughness of metallic glasses were introduced. The strategies to improve the impact toughness of metallic glasses were also presented. Finally the future research issues of impact toughness of metallic glasses were prospected.

Key words: metallic glasses; impact toughness; ductile to brittle transition; size effect; metallic glasses composites

Foundation item: Projects(51601063, 51725504) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects(2018CFA003, 2018CFB576) supported by the Hubei Provincial Natural Science Foundation of China; Project(31715005) supported by the Open Foundation of State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body of Hunan University, China

Received date: 2019-03-26; **Accepted date:** 2019-09-02

Corresponding author: GONG Pan; Tel: +86-27-87543491; E-mail: pangong@hust.edu.cn

(编辑 王 超)