



兵器材料科学与工程
Ordnance Material Science and Engineering
ISSN 1004-244X, CN 33-1331/TJ

《兵器材料科学与工程》网络首发论文

题目: 铜基非晶合金的动态性能及杆式射流仿真研究
作者: 周秉文, 孟凡迪, 张全孝, 田开文, 黄伟明, 孟令刚, 亚斌, 张兴国
DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200612.001
网络首发日期: 2020-06-15
引用格式: 周秉文, 孟凡迪, 张全孝, 田开文, 黄伟明, 孟令刚, 亚斌, 张兴国. 铜基非晶合金的动态性能及杆式射流仿真研究. 兵器材料科学与工程. <https://doi.org/10.14024/j.cnki.1004-244x.20200612.001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

铜基非晶合金的动态性能及杆式射流仿真研究

周秉文¹, 孟凡迪¹, 张全孝², 田开文², 黄伟明², 孟令刚¹, 亚斌¹, 张兴国¹

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘要: 为探索具有高强度、高硬度和高非晶形成能力的铜基块体非晶合金用作药型罩材料的可能性, 通过铜模吸铸法制备 $\text{Cu}_{45}\text{Zr}_{43}\text{Al}_4\text{Ag}_8$ 块体非晶合金棒, 研究其静态压缩的断口形貌以及在不同高应变率下的动态压缩特性, 并采用 AUTODYN-2D 动力学仿真软件模拟铜基块体非晶合金药型罩的杆式射流过程。结果表明: $\text{Cu}_{45}\text{Zr}_{43}\text{Al}_4\text{Ag}_8$ 块体非晶合金静态压缩断面上均匀分布着脉络状花样, 随着应变率增大, 动态抗压强度总体呈现先升高后降低的趋势, 具有应变率敏感性; 通过仿真研究发现, 铜基块体非晶合金药型罩杆式射流成形能力好, 不容易出现颈缩, 用作药型罩材料可保证良好的侵彻性能。

关键词: 铜基块体非晶合金; 动态压缩; 应变率; 杆式射流仿真

中图分类号: TB383; TJ410 **文献标志码:** A

Dynamic properties and rod jet simulation of copper-based bulk metallic glasses

ZHOU Bingwen¹, MENG Fandi¹, ZHANG Quanyao², TIAN Kaiwen², HUANG Weiming², MENG Linggang¹,
YA Bin¹, ZHANG Xingguo¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

Abstract: In order to explore the applicability of copper-based bulk metallic glasses to shaped charge liner, which have high strength, high hardness and glass-forming ability, rods of $\text{Cu}_{45}\text{Zr}_{43}\text{Al}_4\text{Ag}_8$ alloys were prepared by water-cooled copper mold method. Static compressive properties and fracture morphology and dynamic compressive properties at different strain rates were studied. The formation process of shaped charge rod jet was simulated by using AUTODYN-2D. The results show that well-developed uniform distributional vein patterns exist on the static compressive fracture surface. The dynamic compressive strength firstly increases and then decreases with the strain rate increasing indicating the alloy has strain-rate sensitivity. The simulation analyze shows that shaped charge liners of copper-based bulk metallic glasses has good jet-forming abilities and analysis is hard to necking. These features endow the copper-based bulk metallic glasses with fine penetration ability when used as shaped charge liner.

Keywords: copper-based bulk metallic glasses; dynamic compressive; strain rate; rod jet simulation

随着高新攻坚技术的不断发展，攻坚武器的侵彻威力也面临着严峻挑战。药型罩作为聚能装药的载体，其材料的选择与性能的优劣直接影响射流的侵彻效果。传统药型罩通常选用紫铜、镍、钨、铋、贫铀及其合金材料，但受成型效率及工艺的限制，制得的药型罩在侵彻后容易出现杵堵现象，或因成分不均、气孔等缺陷造成射流过程中延展性不足、易断裂和易气化的现象，影响药型罩的侵彻威力^[1]。

目前，国内外研究者致力于开发缺陷更少（甚至零缺陷）、侵彻性能更好的新型药型罩材料，其中块体非晶合金（bulk metallic glasses, BMGs）这种兼有金属和玻璃特性的新型材料备受关注。特别是，块体非晶合金内部没有晶界、位错及空位等缺陷，具有优于传统金属材料的强度、硬度、耐磨性以及耐腐蚀性^[2]。因此，采用非晶合金制备药型罩有望获得更大的侵彻深度和更好的破甲效果。同时，块体非晶合金在一定温度区间内呈现很小的流变抗力，使其获得高延展性，且在变形过程中具有“自锐效应”，这是其成为破甲药型罩材料的重要依据之一。近年来，郑娜娜等通过非晶复合的工艺形式制备出高致密度、高强度、高塑性的 W-Cu-Zr 六元非晶合金，综合性能优越，预计可提高药型罩的侵彻威力，但合金中存在易挥发的低熔点、低密度元素，且尚未制备出该成分的药型罩^[3]。美国陆军研究实验室的 Walters 等^[4]已制备出 $Zr_{57}Nb_5Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}$ 块体非晶合金药型罩，并对其射流有效性进行了研究。但是，相比于铜基块体非晶合金，该 Zr 基块体非晶合金密度小、强度低、过冷液相区间范围窄、非晶形成能力小，且铜基块体非晶合金成本更低，因此铜基块体非晶合金作为药型罩材料具有很好的应用前景^[5-6]。

此外，在实际破甲过程中，药型罩在冲击波作用下会被压垮形成射流，并在极短时间内产生巨大变形，应变率高达 $10^4\sim 10^7\text{ s}^{-1}$ ，属于典型的材料动态变形过程，因此研究药型罩材料在高应变率下的动态力学性能具有重要意义^[7]。叶海燕等^[8]研究了 Zr 基和 Ti 基非晶复合材料在高速冲击载荷作用下的微观结构和力学性能；张云峰等^[9]通过平板冲击试验及理论计算，研究了 Zr 基非晶合金的冲击压缩响应及物态方程；顾兢^[10]对 Zr 基块体非晶合金进行动态三点弯曲力学行为测试，探讨其动态断裂机制以及应变率敏感性。然而，对铜基块体非晶合金动态力学性能的研究鲜有报道。同时，射流成形能力也是药型罩材料选取的重要考量之一，已有报道采用数值仿真技术评价细晶纯铜、双层金属复合以及金属与非金属双层复合等药型罩的射流成形能力，但未有

铜基块体非晶合金药型罩射流模拟研究的相关报道^[7,11-12]。本文选取高强度、高硬度且非晶形成能力较大的 $Cu_{45}Zr_{43}Al_4Ag_8$ 块体非晶合金，进行不同尺寸试样的静态压缩试验和不同应变率下的动态压缩力学试验，为多种规格药型罩的应用提供参考以及为非晶态药型罩高速射流过程提供衡量参数；通过模拟铜基块体非晶合金药型罩杆式射流的过程，为铜基块体非晶用作药型罩材料提供基础理论参考。

1 试验材料及方法

在纯氩气保护下利用电弧熔炼设备制备成分为 $Cu_{45}Zr_{43}Al_4Ag_8$ 的高纯母合金锭，原料纯度为 Cu99.99 wt.%、Zr99.95wt.%、Al99.999wt.%、Ag99.99wt.%。为保证成分均匀，在铜坩锅中反复翻转熔炼 4-5 次，然后采用铜模吸铸法在高真空下制备出尺寸为 $\Phi 2\text{mm}\times 4\text{ mm}$ 、 $\Phi 3\text{mm}\times 6\text{ mm}$ 、 $\Phi 7\text{mm}\times 11\text{ mm}$ 和 $\Phi 4\text{mm}\times 5\text{ mm}$ 的铜基块体非晶合金棒，整个制备过程中，合金的质量损失不超过 0.1%。采用万能试验机（CSS-44200）进行静态压缩实验，压缩应变率为 $5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 。采用分离式霍普金森压杆（SHPB）装置进行高应变率加载下的动态压缩试验，应变率范围为 $1260\sim 1770\text{ s}^{-1}$ 。采用扫描电镜（S-500，15 kV，10 mA）观察静态压缩试样的断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 静态压缩试验结果与分析

图 1 是尺寸为 $\Phi 2\text{mm}\times 4\text{ mm}$ 、 $\Phi 3\text{mm}\times 6\text{ mm}$ 和 $\Phi 7\text{mm}\times 11\text{ mm}$ 的 $Cu_{45}Zr_{43}Al_4Ag_8$ 块体非晶合金试样静态压缩应力-应变曲线以及 $\Phi 2\text{mm}\times 4\text{ mm}$ 试样压缩后的断口形貌。

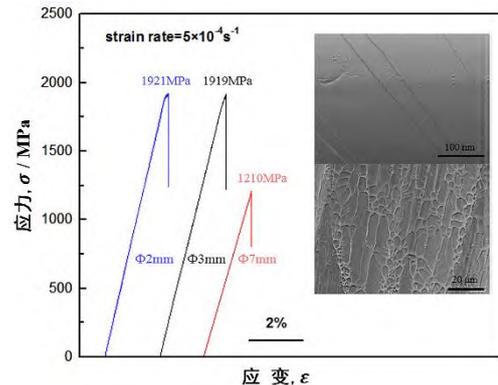


图 1 $Cu_{45}Zr_{43}Al_4Ag_8$ 块体非晶合金静态压缩应力-应变曲线及断口形貌

Fig.1 Static compressive stress-strain curve and fracture morphology of $Cu_{45}Zr_{43}Al_4Ag_8$ bulk metallic glasses

可以看出，三种尺寸下的试样都经历了约 2% 的弹性应变，尺寸为 $\Phi 2\text{ mm}$ 的试样在弹性变形后发生屈服变形，表现出 0.023% 的压缩塑性，断裂强度达到 1921 MPa，但尺寸为 $\Phi 3\text{ mm}$ 和 $\Phi 7\text{ mm}$ 的试样没有发生屈服变形，而是直接断裂，说明试样尺寸对铜基块体非晶合金塑性变形能力有一定影响。通过

观察压缩后试样的断口形貌，发现断口上呈现出块体非晶合金特有的脉络状花样，并均匀分布在断面上，且试样表面存在剪切带，说明该断裂为韧性断裂。

2.2 动态压缩试验结果与分析

表1为Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈块体非晶合金在不同冲击压缩气压下的SHPB试验数据，选取应变率为1260、1330、1420、1480、1670、1770 s⁻¹的试验数据原始波形曲线，利用三波法处理试验数据^[13]。图2为SHPB试验后Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈块体非晶合金残留在垫片上的试样形态，分别为不规则破碎状(图2a, 1260 s⁻¹)和融化后粘滞状(图2b, 1480 s⁻¹)。可以看出，随着应变率的增加(即冲击压缩气压的增加)，残留试样形态逐渐由破碎状变为粘滞状，主要原因是块体非晶合金在亚稳态下具有较高的能量，且能量处于激活状态，其体系内组元之间具有较大的负混合焓，在冲击气压加载下发生原子自蔓延运动，可瞬间激发化学放热反应，使合金出现融化现象。同时，这也符合铜基块体非晶合金“自锐性”的特点，即合金粘度在其过冷液相区内很低，受热过程中外层材料因达到过冷液相区温度而自动脱落，内部合金材料因没有达到过冷液相区温度从而粘度依然很高，使其适合作药型罩材料^[14]。

表1 Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈块体非晶合金不同冲击压缩气压下的动态压缩试验数据

试样尺寸/mm×mm	冲击压缩气压/MPa	最终状态
Φ4.00×5.08	0.1	破碎
Φ4.03×5.18	0.15	破碎
Φ4.00×4.97	0.2	粘滞
Φ4.02×4.96	0.25	粘滞
Φ4.02×5.17	0.3	粘滞
Φ4.04×5.26	0.35	粘滞

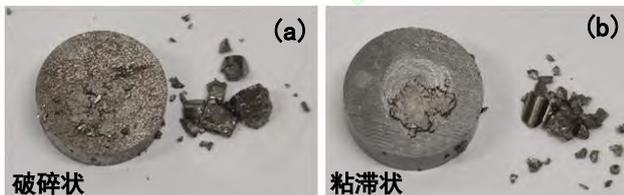


图2 SHPB试验后残留的Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈块体非晶合金
Fig.2 Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈ bulk metallic glasses remaining after SHPB experiment

图3为Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈块体非晶合金动态压缩应力-应变曲线。表2为不同应变率下的动态抗压强度。可以看出，在应变率为1260、1330、1420 s⁻¹时，压缩初始阶段会发生一定的弹性应变；试样在不同应变率加载下均未有明显的屈服现象；随着应变率的提高，动态抗压强度总体呈现先升高后降低的趋

势，最大动态抗压强度达到800 MPa左右，这一现象恰好与表1中不同冲击气压加载下的残留试样的不同形态相对应——随着冲击气压的增大，加载后的试样从破碎状变为粘滞状，而动态抗压强度随着应变率的增加而增大，达到一定程度后开始下降，此时加载后的试样呈现粘滞状，可见应变率的改变影响了试样在加载过程中的形态，也同时影响着动态抗压强度，因此在动态压缩过程中铜基块体非晶合金具有应变率敏感性。

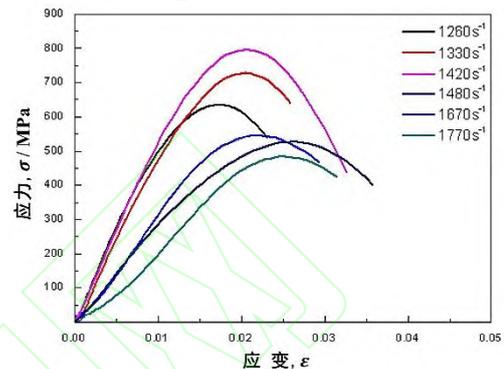


图3 Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈块体非晶合金不同应变率下动态压缩应力-应变曲线

Fig.3 Dynamic compressive stress-strain curve of Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈ bulk metallic glasses at different strain rates

表2 Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈块体非晶合金不同应变率下的动态抗压强度

Table 2 Dynamic compressive strength of Cu₄₅Zr₄₃Al₄Ag₈ bulk metallic glasses at different strain rates

序号	应变率ε/s ⁻¹	动态抗压强度σ _{db} /MPa
1	1260	640
2	1330	730
3	1420	800
4	1480	530
5	1670	550
6	1770	480

3 铜基块体非晶合金杆式射流仿真

本文采用AUTODYN-2D动力学仿真软件模拟药型罩杆式射流过程。模拟过程中选用JWL状态方程描述炸药材料模型，JWL状态方程表达式为

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V}$$

式中，P为爆轰产物的压力，V为爆轰产物的相对比容，E₀为单位体积的内能密度，A、B、R₁、R₂、ω为输入参数。表3为该炸药的基本参数。

表3 炸药参数

Table 3 The explosive parameters

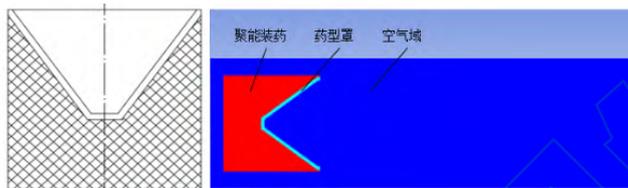
参数	ρ g·cm ⁻³	D km·cm ⁻³	A MPa	B MPa	R ₁	R ₂	ω	E ₀	P _{CJ} GPa
数值	1.82	8.70	8.26×10 ⁵	1.72×10 ⁴	4.55	1.32	0.381	1.02×10 ⁷	35.9

为了更好地表征铜基块体非晶合金的杆式射流特性，仿真采用传统药型罩使用的紫铜进行对比，基本参数，如表4所示。其中铜基块体非晶合金采

用 Linear 状态方程和 Drucker-Prager 本构模型；紫铜采用 Shock 状态方程和 Steinberg-Guinan 本构模型，该材料参数取自于 AUTODYN-2D 软件的材料库^[15-16]。建立由炸药、药型罩和空气域组成的有限元仿真模型，并均采用二维 Euler 单元算法^[17]。聚能装药结构为规则的轴对称结构，因此只需建立 1/2 模型。为消除边界效应，添加“Flow-out”边界条件^[18]，空气域模型采用理想气体状态方程描述。成型装药结构如图 4a 所示，有限元模型如图 4b 所示。

表 4 材料模型参数

Cu-BMGs		Cu	
参数	数值	参数	数值
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	7.50	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	8.93
K/MPa	8.236×10^4	Gruneisen 参数	2.02
G/MPa	2.50×10^4	$C_r/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	3.94
σ_f/MPa	7.56×10^3	S_f	1.489
σ_c/MPa	1.24×10^3		



(a) 成型装药结构 (b) 有限元模型
(a) Structure (b) Finite element model

图 4 成型装药结构及有限元模型

Fig.4 Structure and finite element model of shaped charge liners
通过建立有限元模型，模拟铜基块体非晶合金

和紫铜药型罩杆式射流的形成过程以及监测杆式射流速度随时间的变化情况。图 5 为 0、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65 μs 时两种材料药型罩在等体积情况下形成的杆式射流形态。可以看出，在初始阶段铜基块体非晶合金杆式射流成形速度快于紫铜，而 15 μs 后紫铜杆式射流的成形速度超过铜基块体非晶合金。随着杆式射流逐渐成形，在 30 μs 时紫铜杆式射流初步出现颈缩，并随着时间的推移，颈缩现象越发明显，在 50 μs 时出现拉断迹象；与紫铜相比，在 50 μs 前，铜基块体非晶合金杆式射流未出现颈缩迹象，直到 60 μs 时才出现颈缩，并在 65 μs 时显现拉断迹象。因此，相比于紫铜，铜基块体非晶合金具有良好的杆式射流成形性，杆式射流在成形过程中不易出现颈缩现象，并且能够在较长时间内不被拉断。这是由于铜基块体非晶合金在一定的变形温度和应变速率下具有优异的延展性，呈现出很小的流变抗力，在射流过程中，杆式射流前端的温度不断变化，刚好达到其良好延展性所在的温度区间，使其变形容易，不易拉断。

表 5、表 6 分别为铜基块体非晶合金和紫铜等体积药型罩射流成形过程中不同时刻下的杆式射流的成形长度以及头部速度和尾部速度，图 6 为两种材料杆式射流的成形长度随时间的增长曲线，图 7 为两种材料杆式射流不同时刻下的头部速度对比情况以及头部速度与尾部速度的差值曲线。可以看出，铜基块体非晶合金杆式射流的成形速度慢于紫铜，

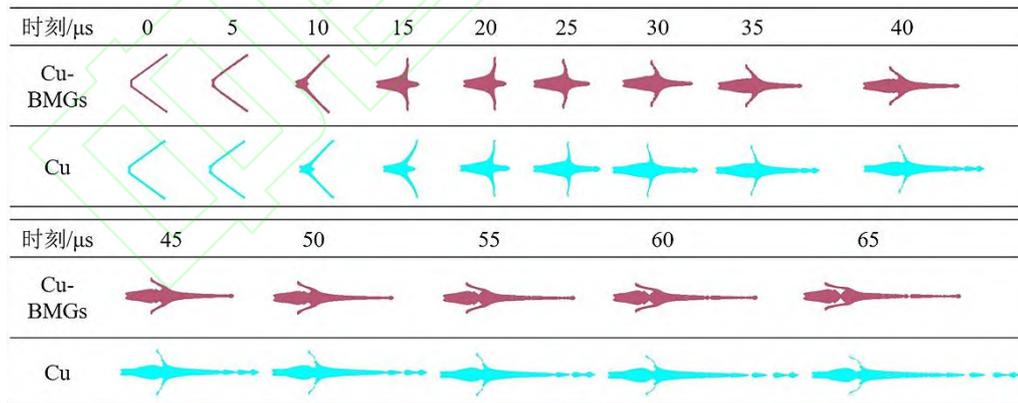


图 5 两种材料杆式射流不同时刻下的成形状态

Fig.5 Shape of rod jets about two materials at different times

表 5 铜基块体非晶合金杆式射流在不同时刻下的头尾速度及杆式射流长度

Table 5 Head and tail speeds and rod jet lengths of rod jets about Cu-based bulk metallic glasses at different times

时间	10 μs	15 μs	20 μs	25 μs	30 μs	35 μs	40 μs	45 μs	50 μs	55 μs	60 μs	65 μs
头部速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3936	4346	4320	4189	4097	4042	3988	3973	3950	3947	3921	3914
尾部速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	530	688	789	852	900	940	977	1008	1040	1049	1050	1040

表 6 紫铜杆式射流在不同时刻下的头尾速度及杆式射流长度

Table 6 Head and tail speeds and rod jet lengths of rod jets about copper at different times

时间	10 μs	15 μs	20 μs	25 μs	30 μs	35 μs	40 μs	45 μs	50 μs	55 μs	60 μs	65 μs
头部速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4310	4633	4849	4968	5029	5013	4980	4946	4910	4902	4854	4835
尾部速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	387	408	490	535	574	606	637	651	655	680	757	760
射流长度/ mm	19	39	61	82	104	125	146	167	188	208	229	250

随着时间的推移,铜基块体非晶合金杆式射流长度增长速率变慢。在 60 μs 时,铜基块体非晶合金杆式射流长度为 175 mm,没有出现拉断现象;紫铜杆式射流在 60 μs 时长度为 229 mm,但此时已经拉断。随着药型罩被压垮形成射流,铜基块体非晶合金杆式射流头部速度不断增加,在 15 μs 左右达到最大值 4346 m/s,随后头部速度保持在 4000 m/s 左右,直至射流完全成形;紫铜杆式射流在 30 μs 左右到达最大值 5029 m/s,此后射流头部速度开始下降,直至发生颈缩、拉断。随着时间的推移,紫铜杆式射流的头尾速度差值呈现“增加-保持-缓慢下降”的趋势,最大可以达到 4500 m/s 左右,说明头尾速度差值是导致射流颈缩以及拉断的重要原因之一;铜基块体非晶合金杆式射流头尾速度差值在 15 μs 左右达到最大值 3700 m/s,此时杆式射流还处于成形阶段,相对较大的头尾速度差值有利于杆式射流快速成形,随后其射流头部速度保持在 4000 m/s 左右,尾部速度则快速上升,从而头尾速度差值出现明显的下降,保证了铜基块体非晶合金杆式射流在成形过程中的稳定性,避免因头尾速度差值过大而导致射流被拉断的问题,提高杆式射流的成形能力,确保铜基块体非晶合金杆式射流具有良好的侵彻性能。

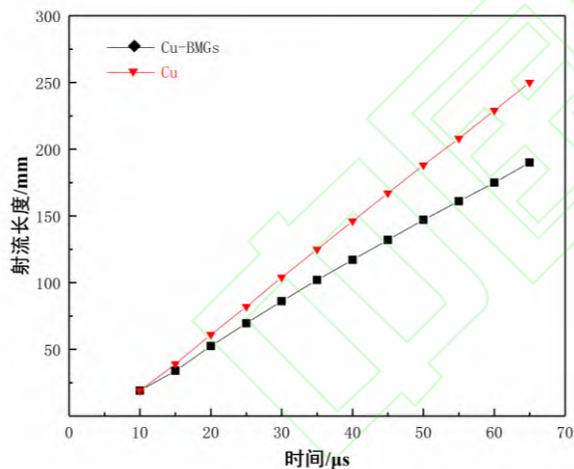


图 6 两种材料杆式射流的成形长度随时间的增长曲线
Fig.6 Variation of forming length with time for two different rod jets

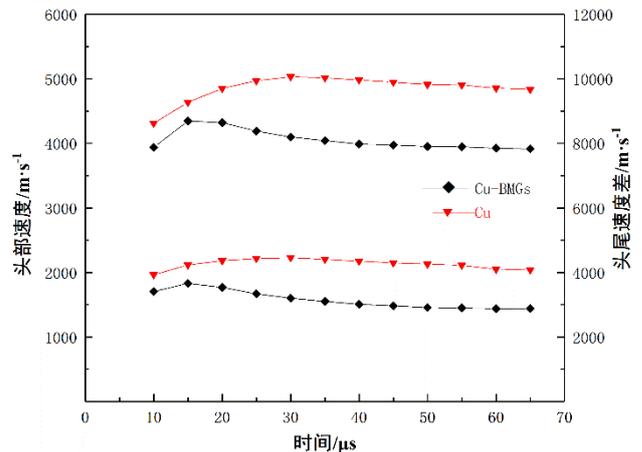


图 7 两种材料杆式射流在不同时刻下的头部速度及头尾速度差曲线
Fig.7 Variation of velocity difference between head and head-to-tail with time for two different rod jets

4 结论

- 1) 在静态压缩下, $\text{Cu}_{45}\text{Zr}_{43}\text{Al}_4\text{Ag}_8$ 块体非晶合金断裂强度最大可达到 1921 MPa, 断口上显示脉络状花样, 并均匀分布在断面上, 且在试样表面有剪切带存在, 证实为韧性断裂。
- 2) 在动态压缩下, $\text{Cu}_{45}\text{Zr}_{43}\text{Al}_4\text{Ag}_8$ 块体非晶合金动态抗压强度随应变率增大呈现先升高后降低的趋势, 最大达到 800 MPa 左右, 具有应变率敏感性。
- 3) 通过仿真研究发现, 铜基块体非晶合金杆式射流成形能力好, 不容易出现颈缩, 在射流成形过程中的稳定性好, 确保铜基块体非晶合金药型罩具有良好的侵彻性能。

5 参考文献

- [1] 王毅, 姜炜, 刘宏英, 等. 聚能装药粉末药型罩材料技术的发展和现状[J]. 爆破器材, 2007, 36(5):33-36.
- [2] 惠希东, 陈国良. 块体非晶合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:1-4.
- [3] 郑娜娜, 董素荣, 郭强, 等. 高塑性 W-Cu-Zr 非晶合金药型罩材料[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(1):94-96.
- [4] WALTERS W P, KECSKES L J, PRITCHETT J E. Investigation of a bulk metallic glass as a shaped charge liner material[J]. America: Army Research Laboratory, 2006:1-32.
- [5] 陶平均, 杨元政, 李喜峰. 新型 $\text{Zr}_{57}\text{Nb}_5\text{Cu}_{15.4}\text{Ni}_{12.6}\text{Al}_{10}$ 大块非晶态合金的制备及其室温单轴压缩断裂行为[J]. 材料导报, 2006, 20(1):137-139.
- [6] QIAO Dongchun, PEKER A. Enhanced glass forming ability in Zr-based bulk metallic glasses with Hf addition[J]. Intermetallics, 2012, 24:115-119.
- [7] 闫超. 新型药型罩材料的动态力学性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017:7-8, 48-63.
- [8] 叶海燕. 非晶合金及其复合材料在高速率动态加载下的

- 力学行为[D]. 太原:太原理工大学, 2014:29-42.
- [9]张云峰, 罗兴柏,孙华刚,等. $Zr_{41}Ti_{14}Ni_{12.5}Cu_{10}Be_{22.5}$ 非晶合金冲击压缩行为理论与实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(5):94-99.
- [10] 顾兢. 块体非晶合金的动态断裂韧性研究[D].太原:太原理工大学, 2018:25-34.
- [11] 夏杰. 双层药型罩射流形成的理论与数值模拟[D]. 武汉:武汉科技大学, 2012.
- [12] 李文国,张健,李艳飞.金属与非金属双层药型罩射流形成及侵彻仿真[J]. 装备制造技术, 2019(7):129-133.
- [13] 侯兵. Zr-BMG 和 W/Zr-BMG 力学性能的试验研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [14] 李继承, 陈小伟. 块体金属玻璃及其复合材料的压缩剪切特性和侵彻/穿甲“自锐”行为[J]. 力学进展, 2011, 41(5):480-518.
- [15] 李小燕, 张娟, 阚前华. 块体金属玻璃基复合材料拉伸和压缩不对称行为的有限元模拟[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(S1):53-57.
- [16] 陈文刚, 张越. 不同材料模型的药型罩对仿真结果的影响[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(13):3226-3229.
- [17] 郭焕果. 非典型结构药型罩聚能装药侵彻性能研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [18] 孙加肖,尹建平,王志军,等. 起爆方式对变壁厚药型罩形成毁伤元影响的数值仿真[J]. 爆破器材, 2017, 46(2):16-20

