

激光金属沉积 Ti-Zr-Ta 合金的制备及其冲击释能特性研究

刘泽人, 赵孔勋, 唐宇, 李顺, 张周然, 朱利安, 叶益聪, 白书欣

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 难熔金属型含能结构材料 (ESMs) 具有良好的力学性能和优异的冲击释能特性, 但由于组元熔点高, 利用传统的熔炼铸造法难以制备出大尺寸无缺陷铸件。本研究利用等离子旋转电极雾化制粉技术制备出 Ti-Zr-Ta 难熔合金粉末, 结合激光金属沉积 (LMD) 技术制备了 Ti-Zr-Ta 难熔金属型 ESMs, 并对其组织结构、力学性能和冲击释能特性进行研究。结果表明, 利用 LMD 技术可实现 Ti-Zr-Ta 难熔金属型 ESMs 的致密化成型, 合金致密度达到 98.75%, 具有良好的力学性能, 其准静态抗拉强度达到 1202 MPa。弹道枪试验结果表明, 在 1202 m/s 的冲击速度下, 激光金属沉积 Ti-Zr-Ta 合金在 27 L 密闭靶箱内可产生 0.144 MPa 的准静态压力, 释能特性优良。

关键词: 激光金属沉积; 难熔金属; 含能结构材料; 冲击释能特性

中图分类号: TG146.4^{†1}

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)06-2296-06

含能结构材料 (energetic structural materials, ESMs) 是一类兼具释能特性和结构强度的新型多功能材料^[1], 其在常规状态下保持稳定, 但在极端条件下会发生结构失稳, 诱发组元间或组元与环境间的化学反应, 产生爆燃甚至爆炸反应, 释放出大量热量^[2-4]。用含能结构材料代替现有战斗部的惰性部件如破片、药型罩和壳体结构等, 形成的含能毁伤元可实现对目标物理加化学的综合毁伤作用, 大幅提高战斗部的毁伤威力。

由 Ti、V、Zr、Nb、Hf 和 Ta 等难熔元素组成的难熔合金由于具有高密度、高强度和高燃烧热值等特点, 是当前金属型含能结构材料研究的热点。国防科技大学白书欣团队首次提出将难熔高熵合金用于含能结构材料中的设想, 并通过组元设计优化, 逐步形成了 TiZrHfTa、TiZrNbTa、TiZrNbV、TiZrTa 等多种体系难熔金属型 ESMs^[5-7]。TiZrHfTa_{0.53} 合金的准静态抗压强度和断裂变形率分别达到 1314 MPa 和 13.5%, 在弹道枪试验中展现出明显的爆燃释能现象^[5]。TiZrNbTa 合金则具备更为优异的力学性能, 其准静态抗压强度和断裂变形率分别达到 1361 MPa 和 18.5%, 以约 1200 m/s 冲击速度撞击 27 L 密闭靶箱时产生的准静态压力达到 0.18 MPa, 冲击释能特性优异^[6]。TiZrNbV 合金在高应变率加载下展现出明显的加工硬化现象, 应变率为 3340 s⁻¹ 时屈服强度提高至 1845 MPa, 以 1570 m/s 撞击靶箱时可产生 0.17 MPa 准静态压力^[7]。

除上述体系外, 侯先苇等^[8]尝试对 FeNiMoW 和 FeNiCoCr 2 种难熔合金的冲击释能特性进行研究, 结果证明受限于合金组元较低的燃烧热值, FeNiMoW 和 FeNiCoCr 合金分别以 1692 和 1707 m/s 撞击密闭靶箱时仅产生 0.014 和 0.08 MPa 的超压峰值, 释能潜力与高燃烧热值元素组成的体系相比具有较大差距。

现有研究证明难熔金属型 ESMs 具有优异的力学性能和能量释放特性, 目前主要采用熔炼铸造法成形^[5-8], 但由于不同难熔金属元素的熔点差异很大, 通过熔炼铸造的方法难以实现大尺寸成型, 容易产生偏析、缩孔等缺陷, 对合金的力学性能和释能影响较大^[9-11]。与传统的制造工艺不同, 激光金属沉积 (laser metal deposition, LMD) 技术是一种叠层制造工艺^[12], 其原理是利用高能激光将金属原料完全熔化并逐层粘合在一起, 可通过加工程序的设计实现复杂大尺寸几何形状构件的快速成型, LMD 技术近年来已被广泛应用于难熔合金的制备加工。Dobbelstein 等^[13-14]首次报道了利用 LMD 技术制备难熔合金, 并通过纯组元粉末原位合金化的方法制备出一系列应用于高温材料的 MoNbTaW 和 TiZrNbHfTa 等难熔合金。制备的 MoNbTaW 合金能在高温下保持较高的屈服应力, 但在成型冷却后产生了裂纹, 并且元素分布在建造方向上存在差异^[13]。为解决合金脆性大和元素分布不均匀的问题, Dobbelstein 等^[14]选取了室温下塑性较强的 TiZrNbHfTa 合金, 并采用沉积加重熔的 LMD 策略进

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金 (11972372, U20A20231)

作者简介: 刘泽人, 男, 1998 年生, 硕士生, 国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073, E-mail: 750525684@qq.com

行制备加工,即首先利用脉冲激光将粉末进行熔化沉积,然后在不送粉的情况下利用相同参数脉冲激光对同一沉积层进行均匀化重熔,最终制备出在建造方向上成分均匀且基本实现等原子比的 TiZrNbHfTa 合金。

Wang 等^[15]则借助高速同步 X 射线原位成像和红外成像技术,研究了 MoNbTiV 难熔合金在 LMD 建造过程中 4 种纯组元粉末的送粉速度对粉末原位合金化过程的影响,结果表明 Ti 和 Nb 粉末在 4 种粉末中的送粉速度分别为最大和最小,这与粉末的长径比、平均粒径和密度等物理性质有关,最终影响合金组成成分的均匀与否。Li 等^[16]分别采用真空电弧熔炼法和激光金属沉积技术制备 NbMoTa 难熔合金,并对组织结构进行对比,结果显示由于冷却凝固速度较快,LMD 制备的合金晶粒尺寸更小,组分微观偏析更明显,合金晶粒内呈现胞状和柱状亚组织,而真空电弧熔炼法制备的合金晶粒内呈现典型的树枝状亚组织。Ren 等^[17]采用 LMD 技术制备 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si 合金,观察到合金的宏观形貌由贯穿多个沉积层的大柱状晶组成,室温拉伸测试显示合金的强度已达到锻件强度水平,但塑性变形能力较差。

LMD 工艺过程中要求粉末原料具有合适的流动特性,以满足元素的均匀扩散和较高的填充密度^[18]。球形粉末具有较为理想的流动性和表观密度,但用于原位合金化的纯组元粉末往往是机械破碎的不规则形状,因此通常采用雾化法和等离子体球化法制备球形难熔合金粉末。Yang 等^[19]通过优化气雾化工艺参数制备出球形 Ni₆Cr₄WFe₉Ti 合金粉末,雾化介质为 3.5 MPa 的氩气,气体流速为 300~320 m/s,熔体流速为 1.0~1.2 kg/min。Park 等^[20]首先通过真空电弧熔炼、破碎和球磨法制备出机械破碎形貌的 WTaMoNbV 合金粉末,然后经过等离子体球化处理得到粒径 d_{50} 为 45.1 μm 的球形 WTaMoNbV 粉末。

相比于等离子体球化,雾化制粉工序较为简便,工艺周期较短。因此,本研究通过等离子旋转电极雾化法预先制备 Ti-Zr-Ta 合金粉末,随后采用 LMD 技术制备 Ti-Zr-Ta 合金,分析合金的组织结构和准静态力学性能,并对其冲击释能特性进行研究。

1 实验

通过电子束熔炼制得 Ti-Zr-Ta 合金棒材并作为自耗电电极,由西安欧中材料科技有限公司通过等离子旋转电极雾化法制备获得 Ti-Zr-Ta 合金粉末。采用中科煜宸 RC-LDM4030 型激光金属沉积系统完成合金的成型过程,激光脉冲功率 2000 W,光斑直径 0.4 mm,粉末通过同轴喷嘴输送,送粉速率为 5 g/min,成型全

程在氩气氛围下进行。

采用 Rigaku SmartLab 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析材料的物相组成。采用 TESCAN MAIA4 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察粉末及合金的形貌和组织结构,并利用能谱仪分析合金粉末的元素组成。采用 WDW-100 型电子万能试验机测试合金的准静态拉伸性能,拉伸试样为标准棒材,加载速率为 0.5 mm/min。此外,合金的冲击释能特性通过 12.7 mm 口径弹道枪试验进行测试,实验装置原理图如图 1 所示。合金弹丸尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,在弹道枪驱动下,弹丸高速撞击靶板并释放能量。靶箱前方设置测速网靶以测量弹丸着靶速度,利用靶箱内的压力传感器监测靶箱内的压力数值,并对合金的释能特性进行评价。

2 结果与讨论

2.1 Ti-Zr-Ta 合金粉末表征

采用等离子旋转电极雾化法制备了 Ti-Zr-Ta 合金粉末,粉末成分(原子分数)为:Ti 69.34%,Zr 20.95%,Ta 9.70%。图 2 为 Ti-Zr-Ta 合金粉末的形貌及 EDS 元素面分布情况。可以看到,等离子旋转电极雾化法制备的粉末球形度高,卫星粉少,平均粒度在 100 μm 左右,合金粉末元素分布均匀,元素组成与设计组分基本一致。粉末的高球形度和较窄的粒度分布范围共同保证了建造过程中粉末良好的流动性能和堆积密度^[21-22]。

2.2 Ti-Zr-Ta 合金的物相及组织结构分析

图 3a 为采用 LMD 制备的 Ti-Zr-Ta 合金照片,经喷砂处理及表面打磨后,采用阿基米德排水法测得合金密度为 6.12 g/cm³,致密度达到 98.75%,基本实现致密化成型。图 3b 为合金截面的 BSE 照片及 EDS 分析结果。可以看出合金中有明显的层状堆叠痕迹,图中矩形方框所示为激光在熔化粉末时留下的加工痕迹^[13],合金组织致密无明显缺陷。EDS 结果显示,合金组成成分与原料粉末基本一致。图 3c 为合金的 XRD 图谱,衍射峰匹配结果显示合金为 bcc+hcp 的双相结构。Ti、Zr 和 Ta 元素之间,Ti、Zr 之间的混合焓为 0,低于 Ta、Zr 和 Ta、Ti 之间的混合焓值^[6]。另外由于 Ti 和 Zr 的室温结构为 hcp,不同于 Ta 的 bcc 结构,

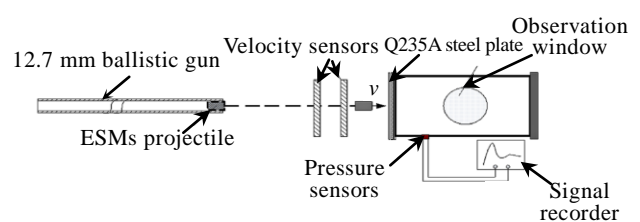


图 1 弹道实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of setups for the ballistic experiment

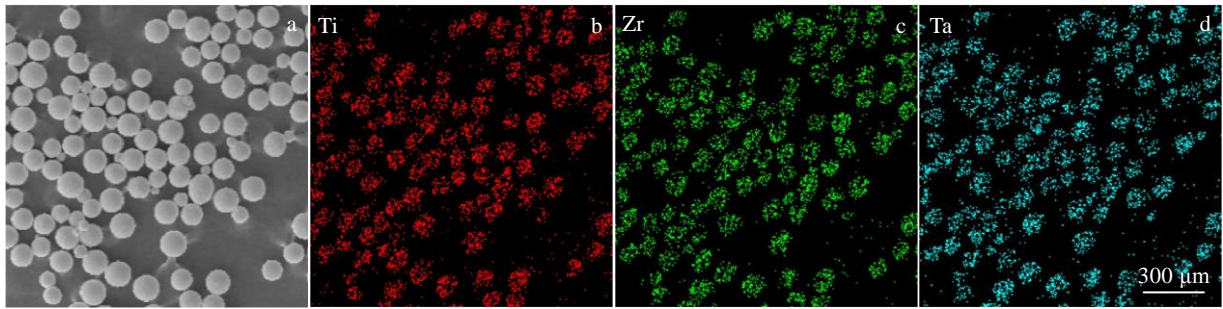


图 2 Ti-Zr-Ta 合金粉末的 SEM 形貌及 EDS 元素面分布

Fig.2 SEM morphology (a) and EDS element mappings (b-d) of Ti-Zr-Ta alloy powders

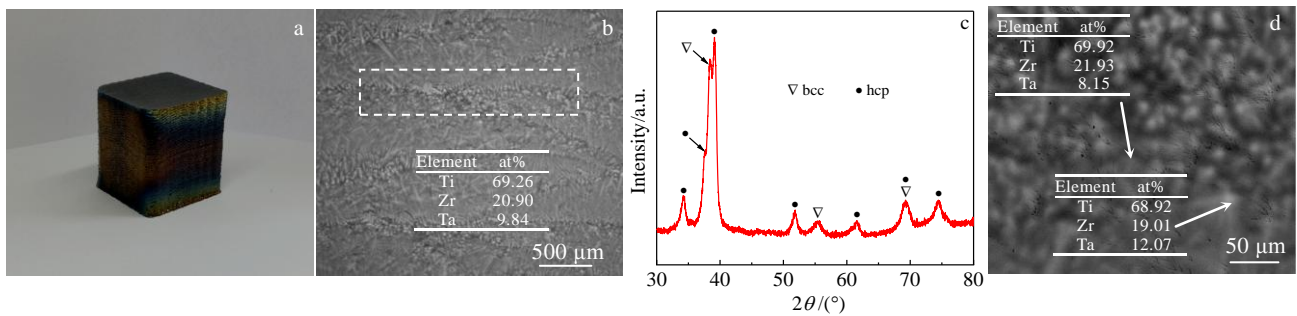


图 3 Ti-Zr-Ta 合金的照片、BSE 照片及其虚线区域的 EDS 分析结果、XRD 图谱、深色和浅色箭头标注区域 EDS 分析结果
Fig.3 Photograph (a), BSE image and EDS analysis results (b), XRD pattern (c) and EDS results of arrow marked regions (d) of Ti-Zr-Ta alloy

这意味着合金在热平衡状态下倾向于形成 Ti、Zr 富集区和 Ta 富集区，因此合金最终形成了图 3d 所示的深色富 Ti、Zr 的 hcp 相和浅色富 Ta 的 bcc 相。

2.3 Ti-Zr-Ta 合金的力学性能

含能结构材料除释能特性外，还需具备一定的强度和塑性变形能力，以确保其在爆轰加载和飞行过程中的完整性。图 4 为通过电子束熔炼制备的 Ti-Zr-Ta 原料棒材和利用激光金属沉积制备的 Ti-Zr-Ta 合金的准静态拉伸应力-应变曲线，2 种工艺所用合金成分相同，可以明显看出利用 LMD 制备的 Ti-Zr-Ta 合金强度和塑性变形能力均有较大提升，其抗拉强度和断裂应变分别达到 1202 MPa 和 5.3%。断口分析表明，LMD 制备合金的拉伸断口表面呈现出如图 5a 所示，总体表现为沿晶断裂，但更细微组织分析显示合金拉伸断面上布满韧窝，但韧窝基本为小而浅的小尺寸韧窝（图 5b），说明合金有一定的塑性变形能力，这与拉伸曲线相符合。

2.4 Ti-Zr-Ta 合金的冲击释能特性

利用弹道枪试验研究了合金的冲击释能特性，Ti-Zr-Ta 合金弹丸击穿蒙皮并撞击靶板后在靶箱内形成高温碎片云，然后与靶箱内空气充分接触并产生剧

烈的燃烧反应，透过观察窗可看到明显的火光，反应释放的热量使靶箱内气体急剧膨胀，产生高于标准大气压的准静态压力，并伴随有部分反应产物从靶箱弹丸入射孔喷出，如图 6a 所示。图 6b 是 Ti-Zr-Ta 合金以 1017、1114、1202 m/s 和传统惰性结构材料 20# 钢以 1208 m/s 撞击密闭靶箱后形成的准静态压力曲线。Ti-Zr-Ta 合金产生的压力峰值随撞击速度的提升而增加，在 1202 m/s 的撞击速度下产生的准静态压力峰值达到 0.144 MPa，反应持续时间约为 350 ms。相比之下，20#钢同样以 1208 m/s 撞击靶箱仅产生 0.032 MPa

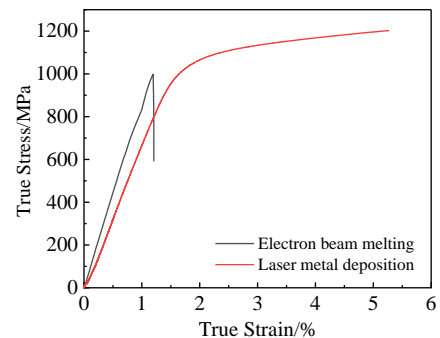


图 4 Ti-Zr-Ta 合金准静态拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Quasi-static tensile stress-strain curves of Ti-Zr-Ta alloy

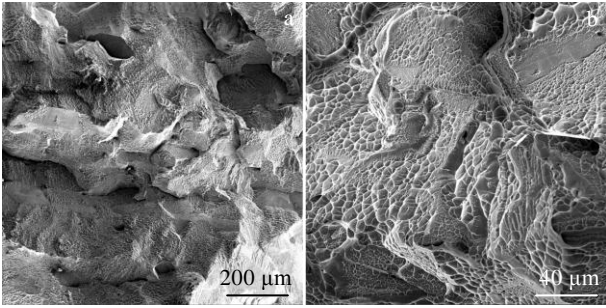


图 5 LMD 制备 Ti-Zr-Ta 合金的拉伸断口 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphologies of tensile fracture of Ti-Zr-Ta alloy prepared by LMD: (a) intergranular fracture and (b) dimples

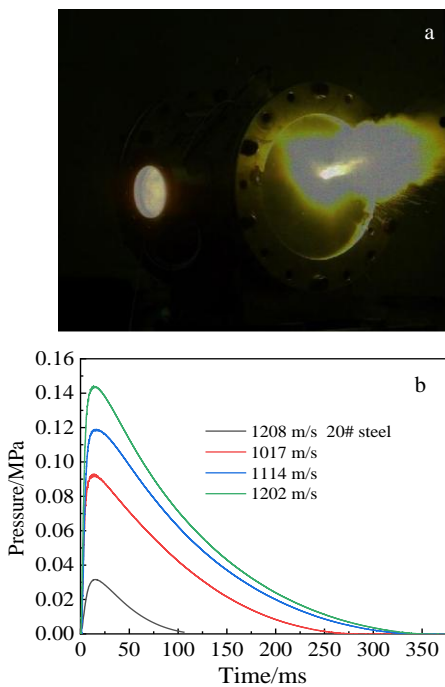


图 6 Ti-Zr-Ta 合金弹丸高速撞击释能现象和反应释能产生的准静态压力曲线

Fig.6 Photograph of impact reaction process (a) and quasi-static pressure curves (b) of Ti-Zr-Ta alloy projectile

的峰值压力, 且压力持续时间仅为 100 ms, 因此可以说明由高燃烧热值元素组成的 Ti-Zr-Ta 含能结构材料展现出优异的释能特性。

冲击反应产生的压力值是衡量 ESMs 释能效果的重要标准。由于弹丸穿透蒙皮形成的入射孔直径较小, 并且冲击反应时间极短, 通过入射孔喷出的反应产物可忽略不计, 因此可将反应近似为绝热反应, 通过压

力峰值可计算出弹丸单位质量的能量释放量(E)。根据 Ames 等人^[23]的研究, 弹丸单位质量的能量释放量(E)与产生的准静态压力峰值满足:

$$E = \Delta P \frac{V}{(\gamma - 1)m} \quad (1)$$

式中, ΔP 是准静态压力峰值; V 是密闭靶箱体积, 为 0.027 m^3 ; γ 是密闭靶箱中的气体绝热指数, 为 1.4; m 是弹丸的质量。表 1 为 Ti-Zr-Ta 合金以不同冲击速度产生的准静态压力和单位质量能量释放量, Ti-Zr-Ta 合金的单位质量能量释放量同样随撞击速度的提升而增加, 最高在 1202 m/s 时达到 2.02 kJ/g, 在同等测试条件下与现有单位质量能量释放量较高的 TiZrNbTa 难熔金属型 ESMs 相比 (1.71 kJ/g) 展现出较大提升^[6], 这表明减少合金组元并增大合金内高燃烧热值元素 Ti、Zr 的含量有助于提升合金单位质量的能量释放量。

为研究 Ti-Zr-Ta 合金在冲击释能过程中的释能机制, 对 1202 m/s 撞击速度下产生的反应产物碎片进行了回收分析。图 7a 为收集到的不同尺寸反应产物碎片的质量分布图, 其中粒径小于 0.3 mm 的碎片的质量仅占碎片总质量的 5.98%, 说明在 1202 m/s 的撞击速度下合金的破碎程度较低, 这与合金具备一定的塑性变形能力有关。图 7b 为不同尺寸反应产物碎片的 XRD 图谱, 可以看出粒径小于 0.3 mm 反应产物碎片主要由 TiO_2 、 ZrO_2 和 TaO_2 等氧化物组成, 无明显未反应金属相的衍射峰出现。并且反应产物碎片尺寸越大, 氧化物的衍射峰强度越低, 同时在 XRD 图谱中还有未反应物质衍射峰出现, 这也说明合金的释能主要依靠高速撞击产生碎片的氧化反应。

图 7c~7e 分别对应通过过筛处理收集到的不同尺寸 (< 0.3 mm、0.3~1 mm、> 1 mm) 典型反应物碎片的 BSE 照片。从图中可以看出, 图 7c 所示的尺寸小于 0.3 mm 的碎片的形态基本表现为球形, 这是由于在高速撞击释能时密闭靶箱内产生的反应温度已经超过合金熔点 (>1600 °C), 从而使细小的碎片熔化后冷却凝固形成球形碎片^[24]。但随着碎片尺寸的增大, 球

表 1 Ti-Zr-Ta 合金不同冲击速度下产生的准静态压力和单位质量能量释放量

Table 1 Quasi-static pressure and energy release rate of Ti-Zr-Ta alloy at different impact velocities

Velocity/ m s^{-1}	Pressure/ MPa	Mass/ g	Energy release rate/ kJ g^{-1}
1202	0.144	4.81	2.02
1114	0.119	4.80	1.67
1017	0.093	4.82	1.30

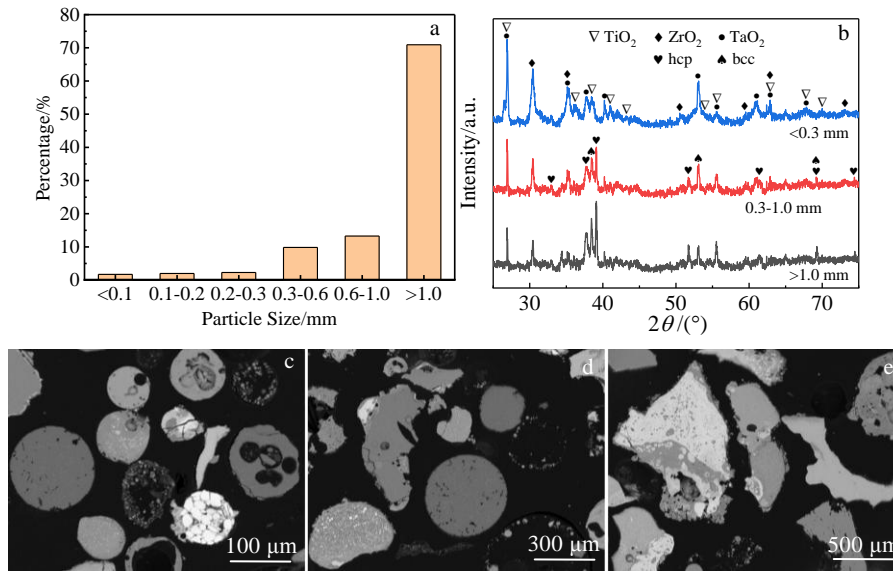


图 7 反应产物的尺寸分布、XRD 图谱及 BSE 照片

Fig.7 Particle size distribution (a), XRD pattern (b) and BSE images of the reaction products with particles sizes of <0.3 mm (c), 0.3-1.0 mm (d), and >1.0 mm (e)

形碎片的数量逐渐减少,如图 7d 和 7e 所示,碎片形态逐渐转变为不规则形状。图 7e 所示的大尺寸碎片表面有一定的氧化层出现,但内部仍为未反应组织,这也表明反应温度虽然高,但由于反应持续时间较短,不足以使大尺寸的合金碎片熔化。造成这种差异的主要原因是合金高速撞击靶箱时,形成的碎片云尺寸越小比表面积越大,与氧气的接触也更加充分,致使反应释能更为剧烈,而大尺寸碎片由于氧原子扩散距离增加而难以完全氧化释能,这也说明高速撞击时 Ti-Zr-Ta 合金的破碎行为会显著影响其能量释放特性,而合金的破碎行为与材料的动态力学性能密切相关。因此通过调整材料的力学性能,有望进一步优化材料的冲击释能特性。

3 结 论

1) 通过 LMD 技术成功制备了具有 bcc 和 hcp 双相结构的 Ti-Zr-Ta 难熔金属型含能结构材料,致密度达到 98.75%,基本实现致密化成型,合金的准静态抗拉强度和断裂应变分别达到 1202 MPa 和 5.3%,综合力学性能良好。

2) 在 1202 m/s 的撞击速度下,激光金属沉积 Ti-Zr-Ta 合金在 27 L 密闭靶箱内可产生 0.144 MPa 的准静态压力,单位质量能量释放量达到 2.02 kJ/g,在同等条件下较传统惰性结构材料以及现有难熔金属型 ESMs 展现出更为优异的冲击释能特性。

参考文献 References

- [1] Reding D J. *Shock Induced Chemical Reactions in Energetic Structural Materials*[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009
- [2] Zhang Dubao(张度宝), Wang Tao(汪涛), Yu Yinhu(鱼银虎) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(11): 3469
- [3] Zhang Yunfeng(张云峰), Luo Xingbo(罗兴柏), Liu Guoqing(刘国庆) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(8): 2549
- [4] Wang Mingzhi(王明智), Wang Chuanting(王传婷), He Yong(何勇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(2): 627
- [5] Zhang Z R, Zhang H, Tang Y et al. *Materials & Design*[J], 2017, 133(5): 435
- [6] Wang Ruixin(王睿鑫). *Microstructure Evolution and Energetic Structural Properties of NbZrTiTa High-Entropy Alloy (NbZrTiTa 高熵合金的组织结构演变及结构释能特征性研究)*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018
- [7] Ren K R, Liu H Y, Chen R et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 827: 142 074
- [8] Hou Xianwei(侯先苇), Xiong Wei(熊玮), Chen Haihua(陈海华) et al. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*(力学学报)[J], 2021, 53(9): 2528

- [9] Senkov O N, Wilks G B, Scott J M *et al.* *Intermetallics*[J], 2011, 19: 698
- [10] Senkov O N, Scott J M, Senkova S V *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 509(20): 6043
- [11] Yang X, Zhang Y, Liaw P K. *Procedia Engineering* [J], 2012, 36: 292
- [12] Herzog D, Seyda V, Wycisk E *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 117: 371
- [13] Dobbstein H, Thiele M, Gurevich E L *et al.* *Physics Procedia*[J], 2016, 83: 624
- [14] Dobbstein H, Gurevich E L, George E P *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2018, 24: 386
- [15] Wang H, Gould B, Moorehead M *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 299: 117 363
- [16] Li Q Y, Zhang H, Li D C *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2020, 88: 105 195
- [17] Ren H S, Tian X J, Liu D *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(6): 1856
- [18] Singh S, Ramakrishna S, Singh R. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2017, 25: 185
- [19] Yang X G, Zhou Y, Xi S Q *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 767: 138 382
- [20] Park J M, Kang J W, Lee W H *et al.* *Materials Letters*[J], 2019, 255: 126 513
- [21] Mraya M, Singh V, Marya S *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2015, 46: 1654
- [22] Strondl A, Lyckfeldt O, Brodin H *et al.* *JOM*[J], 2015, 67: 549
- [23] Ames R G. *Materials Research Society Symposium Proceedings*[J], 2005, 896: 272
- [24] Daniel L H, Edward L D. *Advanced Engineering Materials*[J], 2017, 20: 3

Impact Initiated Energy Release Characteristics of Ti-Zr-Ta Alloy Prepared by Laser Metal Deposition

Liu Zeren, Zhao Kongxun, Tang Yu, Li Shun, Zhang Zhouan, Zhu Li'an, Ye Yicong, Bai Shuxin
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Refractory metal energetic structural materials (ESMs) have good mechanical properties and excellent impact initiated energy release characteristics. However, due to the high melting point of refractory elements, it is difficult to fabricate large size defect-free castings by traditional methods of melting and casting. In this paper, Ti-Zr-Ta refractory alloy powders were prepared by plasma rotating electrode processing technology, and Ti-Zr-Ta refractory metal ESMs was prepared by laser metal deposition (LMD) technology. The microstructure, mechanical properties and impact initiated energy release characteristics of Ti-Zr-Ta refractory metal ESMs were studied. The results show that the densification of Ti-Zr-Ta refractory metal ESMs can be achieved by LMD technology and the density of alloy reaches 98.75%. The alloy has good mechanical properties, the quasi-static tensile stress reaches 1202 MPa. Ballistic gun experiments imply that Ti-Zr-Ta alloy prepared by laser metal deposition can generate quasi-static pressure of 0.144 MPa in 27 L airtight target chamber at the impact velocity of 1202 m/s, which reveals excellent energy release characteristics.

Key words: laser metal deposition; refractory metal; energetic structural materials; impact initiated energy release characteristics

Corresponding author: Li Shun, Ph. D., Professor, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, P. R. China, E-mail: shunli@nudt.edu.cn