

文章编号:1006-9941(2020)06-0564-05

Zr基非晶合金的燃烧释能特性

尚春明¹,施冬梅¹,张云峰¹,石永相²,余志统¹,徐雪涛¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区,河北 石家庄 050003; 2. 西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘要: 为探究Zr基非晶合金的燃烧释能特性,采用氧弹量热法测定了 $Zr_{68.5-x}Al_{7.5+x}(Cu+Ni)_{24}$ ($x=0, 2.5, 5, 7.5$)非晶合金箔带在氧气压力0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 2 MPa和3 MPa下的燃烧热,使用X射线衍射仪分析了燃烧产物的物相组成,并与TNT、PTFE/Al含能材料的能量特性进行了对比。结果表明,Zr基非晶合金的燃烧热、反应效率与Zr与Al原子比成负相关;燃烧释放的能量主要来自金属元素的氧化反应,还有极少量的能量来自金属元素间的化合反应;燃烧热、反应效率随氧气压力的升高而增大,但增长速率逐渐减小,其规律符合一阶衰减指数函数;Zr基非晶合金具有较高的化学潜能,单位质量的能量密度为 $10.981 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$,单位体积的能量密度为 $72.035 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

关键词: Zr基非晶合金;氧弹量热法;燃烧热;释能反应;能量密度

中图分类号:TJ04

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2019219

1 引言

Zr基非晶合金是一种多功能含能结构材料^[1],具有力学性能好、能量密度高、易制备等特性,尤其在受到高动态冲击时会引发剧烈的类爆炸反应而释放大量能量。在弹药应用上,Zr基非晶合金可制成具有动能侵彻和内爆释能双重毁伤效应的含能破片^[2]、药型罩^[3]、穿甲弹芯^[4]等,大幅提高弹药的毁伤威力,因此在军事领域具有很大的应用潜力。

1998年,LIU^[5]发现了Zr基非晶合金在拉伸破碎时会发出巨响和明亮的闪光。针对这个现象,Gilbert^[6]、WEI^[7-8]等学者开展了Zr基非晶合金在空气、氮气和氩气不同气氛下的撞击实验,研究结果证实了Zr基非晶合金具有释能性,而且在空气中的释能最剧烈,其组成金属元素被完全氧化。WANG^[9]使用X射线衍射仪分析了Zr基非晶合金破片高速撞击钢靶后产物的物相组成,发现其主要成分为 ZrO_2 。从上述研究可

以得出Zr基非晶合金的能量来源主要是组成元素的氧化反应。更多的研究表明,由于受到冲击速度^[10-11]、靶板厚度^[12]、非晶颗粒度等诸多因素的影响,冲击过程的释能反应并不完全,所以难以反映出Zr基非晶合金蕴含的总能量。相比之下,燃烧热是表征含能材料化学潜能的手段之一。

为此,本研究在前期的实验基础^[13]上,参照GJB770B-2005火炸药试验方法和GB/T213-2008煤的发热量测定方法,采用氧弹量热法测量了不同Zr与Al原子比、氧气气氛中不同压力下Zr基非晶合金的燃烧热,分析了Zr与Al原子比、压力对燃烧释能的影响,并与其它含能材料的能量特性进行了对比,为进一步研究Zr基非晶合金的释能特性及应用提供支撑。

2 实验部分

2.1 实验样品

实验样品 $Zr_{68.5-x}Al_{7.5+x}(Cu+Ni)_{24}$ ($x=0, 2.5, 5, 7.5$)非晶合金箔带,由Zr、Al、Cu、Ni四种元素组成。其中,Zr、Al元素的原子百分比之和为76%,Cu、Ni元素的原子百分比之和为24%,Zr与Al原子比依次为68.5:7.5、66:10、63.5:12.5、61:15。Zr基非晶合金箔带的制备采用甩带法,使用冷壁坩埚真空电弧熔炼设备将高纯

收稿日期:2019-08-11;修回日期:2019-09-08

网络出版日期:2020-02-27

作者简介:尚春明(1996-),男,硕士研究生,主要从事Zr基非晶合金的释能性研究。e-mail:1371849243@qq.com

通信联系人:施冬梅(1967-),女,副教授,主要从事弹药质量监控与试验评估研究。e-mail:13383013059@163.com

引用本文:尚春明,施冬梅,张云峰,等. Zr基非晶合金的燃烧释能特性[J]. 含能材料,2020,28(6):564-568.

SHANG Chun-ming, SHI Dong-mei, ZHANG Yun-feng, et al. Combustion and Energy Release Characteristics of Zr-based Amorphous Alloys[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(6):564-568.

金属熔炼为母合金,将熔融后的母合金喷射到高速旋转的铜辊上快速冷却,借助离心力抛离辊面,形成非晶合金箔带。制备的箔带如图1a所示。鉴于箔带长度长,弹性大,为方便放入坩埚进行实验,将其剪成图1b所示的1~2 cm的条状试样。

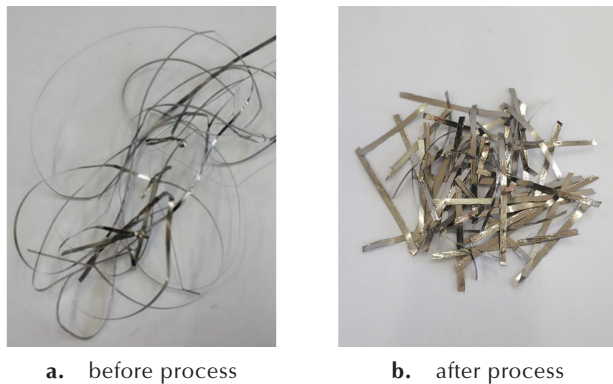


图1 处理前后的Zr基非晶合金箔带照片

Fig. 1 Photos of Zr-based amorphous alloy foil tape before and after process

2.2 实验方法

参照 GJB770B-2005 火炸药试验方法和 GB/T213-2008 煤的发热量测定方法,采用 QZLRY-2002D 型恒温式全自动微机量热仪测量 Zr 基非晶合金箔带的燃烧热。测试前采用标准量热物质苯甲酸标定量热仪的热容量,标定值为 $10933.5 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ 。具体实验条件参考文献[13]。

采用充氧仪给氧弹充入氧气,设置氧弹内的压力分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 2, 3 MPa, 每个压力条件下进行 3 次重复性实验,记录不同 Zr 与 Al 原子比非晶合金箔带在各压力下的燃烧热。使用 Empyrean 型 X 射线衍射仪对燃烧实验后的反应产物进行物相分析,扫描角度 $10^\circ\sim 100^\circ$ 。

3 结果与讨论

3.1 Zr 与 Al 的原子比对燃烧热的影响

图 2 是不同 Zr 与 Al 的原子比的非晶合金箔带在 3 MPa 压力下的燃烧热和反应效率。反应效率指实验燃烧热和理论燃烧热的比值。

从图 2 可以看出,在 3 MPa 下,Zr 基非晶合金的燃烧热和反应效率随着 Zr 与 Al 原子比的减小而增长。Zr 与 Al 原子比为 68.5:7.5 时,燃烧热和反应效率最低,燃烧热为 $10.388 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$,反应效率为 96.7%。而 Zr 与 Al 原子比为 61:15 时,燃烧热和反应效率最大,分别为

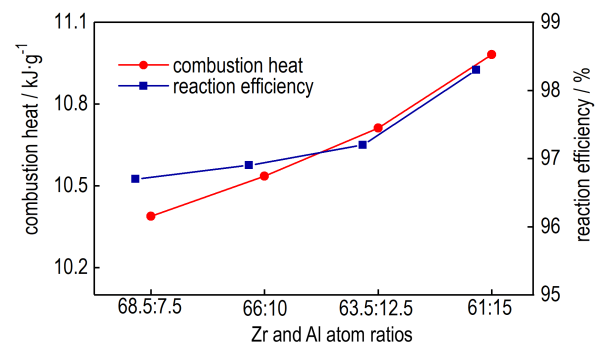
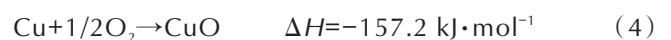
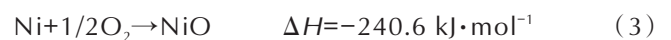
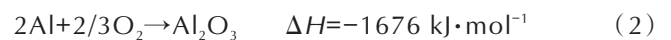
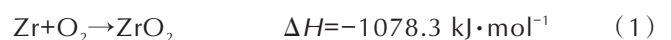


图2 3 MPa 下不同 Zr 与 Al 原子比非晶合金的燃烧热和反应效率

Fig. 2 Combustion heat and reaction efficiency of amorphous alloy with various Zr and Al atom ratios at 3 MPa

$10.981 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 98.3%。Zr 和 Al 都是亲氧元素,容易与氧气发生反应生成稳定的化合物,而且 Al 与氧气反应的放热量为 $30.46 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$,高于 Zr 与氧气反应的放热量 $11.82 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。所以在 Zr、Al 总含量不变的前提下,Al 含量的增大,可以提高 Zr 基非晶合金的燃烧热。燃烧热的增大也意味着放出更多的热量,使得箔带周围的温度增大,高温环境下有助于箔带的燃烧,从而提高了反应效率。

考虑燃烧产物中的金属间化合物 $\text{Al}_5\text{Ni}_2\text{Zr}$ 含量极低,忽略此部分放出的热量,计算金属元素与氧气发生氧化还原反应的放热量。具体反应方程式如下:



根据 Zr 基非晶合金的组分含量和上述反应方程放出的热量,计算得到 $\text{Zr}_{68.5-x}\text{Al}_{7.5+x}(\text{Cu}+\text{Ni})_{24}$ ($x=0, 2.5, 5, 7.5$) 的理论燃烧热分别为 10.735, 10.872, 11.017, $11.170 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

3.2 燃烧产物分析

采用 X 射线衍射仪对 Zr 基非晶合金的燃烧产物进行了物相分析。图 3 是不同 Zr 与 Al 原子比非晶合金箔带在 3 MPa 下的燃烧产物的 XRD 图谱。

从图 3 可以看出,不同 Zr 与 Al 的原子比的非晶合金箔带燃烧产物的物相类别相同,分为金属氧化物和金属间化合物两种。金属氧化物的主要成分为 ZrO_2 , 其它成分为 Al_2O_3 、NiO、CuO 和 Cu_2O ; 金属间化合物为 $\text{Al}_5\text{Ni}_2\text{Zr}$ 。从燃烧产物的物相组成可知,Zr 基非晶合金燃烧所释放的能量来自于两部分,一是组成元素与氧气间的氧化还原反应所放出的热量;二是金属元素间的化合反应所放出的热量。

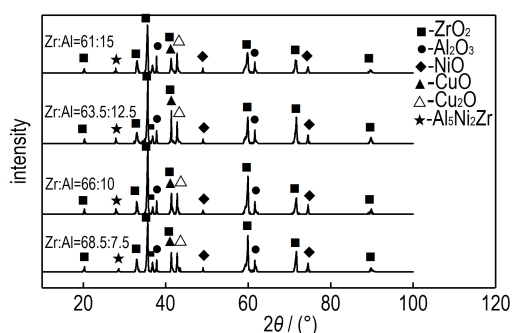


图3 3 MPa下不同Zr与Al原子比非晶合金燃烧产物的XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of the combustion products of Zr-based amorphous alloys with various atom ratios of Zr and Al at 3 MPa

3.3 压力对燃烧热的影响

图4是Zr基非晶合金箔带在氧气气氛中0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 2, 3 MPa不同压力下的燃烧热变化曲线, 图5是Zr基非晶合金箔带的燃烧反应效率随压力的变化曲线。

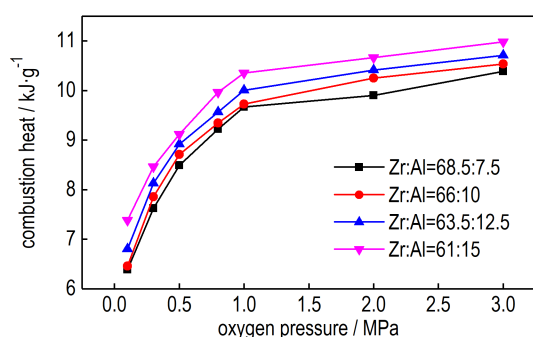


图4 Zr基非晶合金燃烧热随压力的变化曲线

Fig.4 Curves of combustion heat of Zr-based amorphous alloy with different pressures

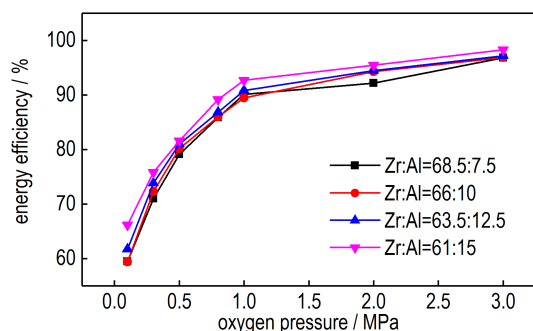


图5 Zr基非晶合金燃烧反应效率随压力的变化曲线

Fig.5 Curves of reaction efficiency of Zr-based amorphous alloy with different pressures

由图4可知,压力对燃烧过程释放的能量有明显的影响。Zr基非晶合金箔带的燃烧热与压力成正比,随着氧弹内氧气压力的增大,Zr基非晶合金的燃

烧热也逐渐增大,但增长速率逐渐减小。氧气压力1 MPa是燃烧热变化曲线的一个分界点。压力低于1 MPa时,燃烧热随压力的增大急剧上升,增长速率快,从0.1 MPa到1 MPa燃烧热的增长速率为 $3.2 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$;而高于1 MPa时,燃烧热随压力变化的增长而变得平缓,从1 MPa到3 MPa燃烧热的增长速率仅为 $0.35 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$ 。燃烧热曲线的变化表明,压力是影响Zr基非晶合金燃烧释能的重要因素。一方面,压力的增大使氧弹内的氧气含量增加,箔带与氧气的接触更充分;另一方面,压力的增大加速了助燃剂和箔带的燃烧速度^[14],短时间内产生了较多的热量,营造的高温环境又反过来加大了箔带的燃烧反应程度。

由图5可知,Zr基非晶合金箔带的燃烧反应效率随着氧弹内压力的升高而逐渐增大,但增长的速率逐渐减小,变化规律与燃烧热随压力变化的规律相似。压力从0.1 MPa升高到1 MPa时,反应效率上升明显,从60%急剧上升至90%,增长速率为 $30 \text{ \%}\cdot\text{MPa}^{-1}$;而压力从1 MPa升高到3 MPa时,反应效率随压力的变化趋于平缓,反应效率从90%缓慢上升至96%,增长速率为 $3 \text{ \%}\cdot\text{MPa}^{-1}$ 。另外,与理论燃烧热相比,实验测定的燃烧热稍低。一是因为Zr基非晶合金的组成元素均为金属元素,燃烧过程温度高,部分CuO在高温下转化为Cu₂O,而这个反应过程是吸热的;二是因为计算的理论燃烧热是考虑所有金属元素参与氧化反应放出的热量,而实际上燃烧过程中并非所有元素都被氧化,还有少量的金属间化合物生成^[14-16]。

采用指数函数拟合了Zr基非晶合金燃烧热随压力变化的关系曲线。图6是Zr与Al原子比为61:15的非晶合金箔带的燃烧热变化曲线,散点为实验数据,曲线为拟合结果。燃烧热的拟合方程 $E = -4.268 \exp(-p/0.545) + 10.921$,为一阶衰减指数函数;将燃烧热的拟合方程除以理论

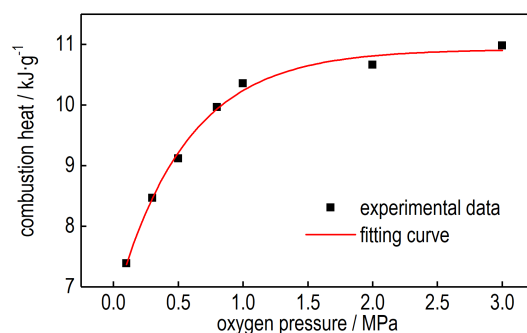


图6 Zr基非晶合金在不同压力下的燃烧热

Fig.6 Combustion heat of Zr-based amorphous alloys under different pressures

燃烧热值 $11.170 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 得反应效率的拟合方程为 $\eta = -0.382\exp(-p/0.545) + 0.978$ 。拟合方程的相关系数为 0.992, 表明两个方程均能够准确地反映出 Zr 基非晶合金的燃烧热、反应效率与压力的关系。其它 Zr 与 Al 原子比非晶合金箔带的拟合方程参数如表 1 所示。燃烧热、反应效率的拟合方程也符合 $y = a \cdot \exp(-p/b) + c$ 的一阶衰减指数函数形式, 相关系数均在 0.99 以上。

表 1 燃烧热和反应效率的拟合方程参数

Table 1 Fitting parameters of combustion heat and reaction efficiency

atom ratio of Zr, Al	$E / \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$			$\eta / \%$			r
	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	
68.5:7.5	-4.671	0.509	10.227	-0.435	0.047	0.953	0.990
66:10	-4.767	0.511	10.432	-0.438	0.047	0.960	0.995
63.5:12.5	-4.591	0.510	10.615	-0.417	0.046	0.964	0.995

Note: 1) E is the combustion heat. 2) η is the reaction efficiency. 3) r is the correlation coefficient.

3.4 与其它含能材料的比较

为了更准确地认识 Zr 基非晶合金的化学潜能, 选取了当前研究较多的多功能含能结构材料 PTFE/Al (73.5%/26.5%)^[14] 和 TNT^[16] 进行比较。表 2 列出了三种材料的密度、单位质量能量密度和单位体积能量密度。

表 2 三种含能材料的能量参数

Table 2 Energy release parameters of three energetic materials

material	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$E_c / \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$	$E_v / \text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$
$\text{Zr}_{61}\text{Al}_{15}(\text{Cu}+\text{Ni})_{24}$	6.56	10.981	72.035
PTFE/Al(73.5%/26.5%) ^[14]	2.40	13.890	33.336
TNT ^[16]	1.60	4.520	7.232

Note: 1) ρ is the material density. 2) E_c is the specific energy per unit mass. 3) E_v is the specific energy per unit volume.

由表 2 可知, Zr 基非晶合金的单位质量能量密度为 $10.981 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, 是传统含能材料 TNT 单位质量能量密度的 2.43 倍, 稍小于 PTFE/Al 的 $13.890 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$; 从单位体积能量密度来看, Zr 基非晶合金为 $72.035 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$, 是 TNT 的 9.96 倍, 是 PTFE/Al 的 2.16 倍; 表明 Zr 基非晶合金蕴含着较高的能量。但从释能反应来看, Zr 基非晶合金的能量释放非常依赖所处环境的氧气含量, 其自身组分反应能够释放的能量很少。根据文献[8]中 Zr 基非晶合金颗粒在氩气气氛下反应无可见光的实验现象便可看出金属元素间化合释放的能量要远少

于金属元素氧化所放出的能量。而对 PTFE/Al 这类含能材料来讲, 即便在无氧条件下, Al 和 PTFE 的反应也能释放出 $8.53 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 的能量^[14]。

综上所述, 增大氧气含量以及材料与氧气的接触面积, 可以使 Zr 基非晶合金释放更多的能量, 这也是非晶合金箔带在氧弹中燃烧的反应效率要高于非晶合金破片在冲击过程的反应效率的原因之一。而在实际应用中, 空气中的氧气含量无法改变, 因此可从破片撞击靶板后破碎的颗粒度等途径着手以提高冲击过程释放的能量。

4 结论

(1) 在 $\text{Zr}_{68.5-x}\text{Al}_{7.5+x}(\text{Cu}+\text{Ni})_{24}$ ($x=0, 2.5, 5, 7.5$) 非晶合金体系中, 燃烧热和反应效率随 Zr 与 Al 原子比的减小而逐渐增大, 最大燃烧热和反应效率分别为 $10.981 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 、98.3%。

(2) Zr 基非晶合金燃烧释放的能量来自于两部分, 一是组成金属元素与氧气间的氧化还原反应, 二是金属元素间的化合反应。燃烧产物的主要成分为 ZrO_2 , 其他成分为 Al_2O_3 、NiO、CuO、 Cu_2O 和金属间化合物 $\text{Al}_5\text{Ni}_2\text{Zr}$ 。

(3) 氧气压力是影响 Zr 基非晶合金燃烧释能的主要因素, 燃烧热、反应效率与压力的变化曲线符合一阶衰减指数函数。压力 1 MPa 为燃烧热和反应效率增长的分界点, 低于 1 MPa 时, 增长速率分别为 $3.2 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$ 、 $30\% \cdot \text{MPa}^{-1}$; 高于 1 MPa 时, 增长速率分别为 $0.35 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$ 、 $3\% \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。

(4) 单位质量的 Zr 基非晶合金能量密度为 $10.981 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, 是 TNT 的 2.43 倍, 稍小于 PTFE/Al; 单位体积能量密度为 $72.035 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$, 是 TNT 的 9.96 倍, 是 PTFE/Al 的 2.16 倍。

参考文献:

- [1] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 731-739.
ZHANG Xian-feng, ZHAO Xiao-ning. Review on multifunctional energetic structural materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 731-739.
- [2] HUANG Cai-min, LI Shun, BAI Shu-xin. Quasi-static and impact-initiated response of $\text{Zr}_{55}\text{Ni}_5\text{Al}_{10}\text{Cu}_{30}$ alloy[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, 481: 59-64.
- [3] William P, Laszlo J, Justin E. Investigation of a Bulk Metallic Glass as a Shaped Charge Liner Material[C]//23rd International Symposium on Ballistics Tarragona. Spain, 2007, 31-37.
- [4] Conner R D, Dandliker R B, Scruggs V, et al. Dynamic deformation behavior of tungstenfiber/metallic glass matrix compos-

- ites[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24: 435-444.
- [5] LIU C T, Heatherly L, Horton J A, et al. Test environments and mechanical properties of Zr-base bulk amorphous alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and, Materials Science)*, 1998, 29(7): 1811-1820.
- [6] Gilbert C J, Ager J W, Schroeder V, et al. Mechanism for Light Emission During Fracture of a Zr-Ti-Cu-Ni-Be Bulk Metallic Glass: Temperature Measurements in Air and Nitrogen[J]. *MRS Proceedings*, 1998, 554: 191.
- [7] WEI H, Yoo C S. Kinetics of small single particle combustion of zirconium alloy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(2): 506-513.
- [8] WEI H, Yoo C S. Dynamic responses of reactive metallic structures under thermal and mechanical ignitions [J]. *Journal of Materials Research*, 2012, 27(21): 2705-2717.
- [9] WANG Chuan-ting, HE Yong, Ji Cheng, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of a Zr-based metallic glass[J]. *Intermetallics*, 2018, 93: 388-393.
- [10] 张云峰, 刘国庆, 李晨, 等. 新型亚稳态合金材料冲击释能特性[J]. *含能材料*, 2019, 27(8): 692-697.
ZHANG Yun-feng, LIU Guo-qing, LI Chen, et al. Shock Energy Release Characteristics of Novel Metastable Alloy Materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(8): 692-697.
- [11] 陈曦, 杜成鑫, 程春, 等. Zr基非晶合金材料的冲击释能特性[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, (6): 44-49.
CHEN Xi, DU Cheng-xin, CHENG Chun, et al. Impact Energy Releasing Characteristics of Zr-based Amorphous Alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018 (6): 44-49.
- [12] 潘念侨. Zr基非晶合金材料动态本构关系及其释能效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
PAN Nian-qiao. Dynamic Zr based amorphous alloy material constitutive relation and release energy effect research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [13] 尚春明, 施冬梅, 李文钊, 等. Zr基非晶合金燃烧热测试方法[J]. *兵器装备工程学报*, 2019(8): 193-197.
SHANG Chun-ming, SHI Dong-mei, LI Wen-zhao, et al. Study on Combustion Heat Method of Zr-Based Amorphous Alloy [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019(8): 193-197.
- [14] 刘媛媛. 延期药燃烧机理及压力对燃烧的影响[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
LIU Yuan-yuan. Mechanism of Delay Composition Combustion and Influence of Pressure on Combustion [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014.
- [15] 伍雨. PTFE/Al含能反应材料反应热测试及能量输出特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
WU Yu. Study on Reaction Heat Measuring and Energy Release Characteristics of PTFE/Al Reactive Material [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [16] 宋浦, 杨凯, 梁安定, 等. 国内外TNT炸药的JWL状态方程及其能量释放差异分析[J]. *火炸药学报*, 2013, 36(2): 42-45.
Song Pu, Yang Kai, Liang An-ding, et al. Difference Analysis on JWL-EOS and Energy Release of Different TNT Charge [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellants*, 2013, 36(2): 42-45.

Combustion and Energy Release Characteristics of Zr-based Amorphous Alloys

SHANG Chun-ming¹, SHI Dong-mei¹, ZHANG Yun-feng¹, SHI Yong-xiang², YU Zhi-tong¹, XU Xue-tao¹

(1. Ammunition Engineering Department, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. Northwest Institute of Nuclear technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To study the combustion and energy release characteristics of Zr-based amorphous alloys, the combustion heat of $Zr_{68.5-x}Al_{7.5+x}(Cu+Ni)_{24}$ ($x=0, 2.5, 5, 7.5$) under different oxygen pressures were tested by oxygen bomb calorimetry. The phase composition of combustion products were determined by X-ray diffractometer, and comparative analysis of various energetic materials was conducted. The results show that the combustion heat of Zr-based amorphous alloy is negatively correlated with the Zr: Al atom ratio. The energy released mainly comes from the oxidation reaction of metal elements, and a very small amount of energy comes from the chemical reaction between metal elements. The combustion heat and reaction efficiency increase with the increase of oxygen pressure, according with the first-order decay index function. Zr-based amorphous alloy has higher chemical potentiality, compared with PTFE/Al and TNT, Its specific energy per unit mass is $10.981 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, and the specific energy per unit volume is $72.035 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Key words: Zr-based amorphous alloys; oxygen bomb calorimeter; combustion heat; energy release reaction; energy density

CLC number: TJ04

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019219

(责编: 高毅)