

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0065

W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶的侵彻释能特性*

张云峰, 罗兴柏, 刘国庆, 施冬梅, 张玉令, 甄建伟
(陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050000)

摘要: 为研究 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶板的侵彻释能特性, 采用高速摄影弹道枪侵彻实验和能量方程、Avrami-Erofeev 方程理论分析的方法, 对破片的侵彻释能过程、侵彻规律、释能规律进行了研究。结果表明, 破片在撞击并贯穿靶板的过程中激发了材料的燃烧反应, 在靶板前方和后方产生了明显火光, 随着撞击速度增加, 火光范围增加、亮度提高; 破片撞击速度、冲塞体速度的关系符合采用能量法推导的包含质量损失的破片侵彻公式, 破片理论弹道极限速度为 $987.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在实验速度范围内, 材料反应效率随着冲击压力的增加而增加, 与实验现象吻合。

关键词: 亚稳态合金复合材料; 侵彻规律; 释能特性; RHA 靶

中图分类号: O385; TJ410

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Penetration and energy release effect of W/ZrNiAlCu metastable reactive alloy composite fragment against RHA target

ZHANG Yunfeng, LUO Xingbai, LIU Guoqing, SHI Dongmei, ZHANG Yuling, ZHEN Jianwei
(Shijiazhuang College, Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: To study the penetration and energy release effect of W/ZrNiAlCu metastable reactive alloy composite fragment against RHA target, the penetration tests using high-speed camera and ballistic gun system were conducted. And the energy equation and Arami-Erofeev equation was produced to theoretical analyze the results of penetration tests. The results show that the combustion reaction of fragment is induced by penetration process, which initiates distinct flame in the front of the target and behind the target. The brightness and scope of flame are enhanced with the increase of impact velocity. The relationship between impact velocity and plug velocity conforms to the penetration equation deduced by energy method. The theoretical ballistic limit velocity is 987.1 m/s . The efficiency of reaction is enhanced with the increase of impact pressure within the experimental velocities, which consistent with the experiment.

Keywords: metastablereactive alloy composite; penetration characters; energy release characters; RHA target

多功能含能结构材料(multifunctional energetic structural material, MESM)是综合利用化学能和动能以提高战斗部毁伤效能的新型功能材料^[1]。不同于传统惰性破片单一的动能杀伤作用, 当 MESM 破片以一定速度撞击靶板时, 会激发剧烈的爆炸/燃烧反应, 破片贯穿靶板后, 通过动能和化学能的联合作用, 实现对靶后目标产生更大的杀伤破坏^[2]。

MESM 对特定目标的毁伤是现今较活跃的领域之一, 研究主要集中在其释能特性和侵彻毁伤效应上。Zhang 等^[3-4]和 Xiong 等^[5-6]系统研究了 Al/Ni 基 MESM 的冲击释能特性及反应机理, 并推导了温度控制冲击诱发化学反应的热化学模型^[4, 6], 结果表明 MESM 的释能反应特性与破片冲击引发的材料温升

* 收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-04-26

第一作者: 张云峰(1990—), 男, 博士研究生, 1193954881@qq.com

通信作者: 刘国庆(1975—), 男, 博士, 副教授, 13081106809@163.com

有关,反应规律符合 Avrami-Erofeev 方程。Wang 等^[7]和 Luo 等^[8]等分别研究了高聚物、W/ZrMESM 的冲击释能特性。Xu 等^[2,9]研究了 PTFE/Al/W 破片对装甲铝板的侵彻毁伤效应,通过弹道试验结果拟合了 PTFE/Al/W 破片对装甲铝板的极限穿透速度计算公式,并研究了破片对双层铝板的结构破坏作用。

W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料是新一代 MESM,具有较强的侵彻能力及释能特性,但其对轧制均质装甲(RHA)靶板的侵彻释能特性研究仍属空白。基于此,本文通过弹道枪侵彻实验和高速摄影,测量破片对 RHA 靶板的撞击速度和靶板贯穿形成的冲塞体速度,记录破片的侵彻释能过程,研究 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片的侵彻释能特性,为该亚稳态合金复合材料的进一步研究和应用提供理论和实验依据。

1 侵彻实验

1.1 实验方案

实验试样为 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片,材料通过液态真空压力浸渗工艺制备:将熔体 ZrNiAlCu 亚稳态合金通过高纯氦气吹入由 W 颗粒粉末烧结而成的基体中,保压 0.5 h 保证熔体完全浸渗 W 基体孔隙,随后放入饱和食盐水中淬火,制备出 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料。通过机加工,得到边长 8 mm 的立方体破片,破片密度为 12.9 g/cm³。

侵彻实验的实验布置如图 1 所示。破片及弹托由 14.5 mm 弹道枪发射,弹托刻有凹槽,保证出枪口后弹托、破片分离;10.5 mm 厚 RHA 靶板(GY4)中点位于射击线上,距弹道枪口 5 m,一组测速靶置于 RHA 靶板前方,距靶板 1 m,用以测量破片初速,另一组测速靶置于 RHA 靶板后方,距靶板 1 m,用以测量靶板剪切形成的冲塞体速度,每组测速靶由相距 0.5 m 的两块断通靶纸组成,断通靶纸与计时器相连接;高速摄影机置于靶板侧方,用以记录 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶板的侵彻释能过程。

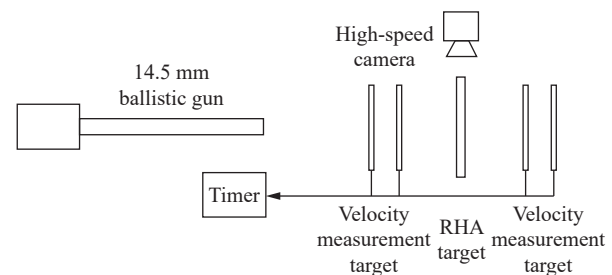


图 1 侵彻实验装置布置

Fig. 1 Layout of penetration experimental setup

1.2 实验结果

图 2 为 4 个典型撞击速度 v_i 下 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶板的侵彻释能过程,可以看出,破片撞击速度对破片侵彻过程中的释能现象有较大影响。图 2(a)中,由于撞击速度较低,破片未贯穿靶板。破片撞击靶板引发了材料的释能反应,靶板前方可见 2 束对称的火光并逐渐向外扩散。图 2(b)~2(d)中,随着撞击速度增加,靶板前方光束变长,火光范围增大、亮度变高。图 2(c)和图 2(d)中均可观察到 4 道光束。当立方体破片撞击靶板时,破片的棱角处应力集中导致材料破碎并向外飞散,因此侧向观察可以看到 2~4 束对称的火光,火光由材料碎片燃烧产生,并伴随破片飞散而逐渐扩散。当破片撞击速度增大时,撞击能增加,碎片数量增多、初始动能变大、材料温度更高、释能反应更充分,因此靶板前方火光范围增大、亮度变高。

当撞击速度 $v_i=1\ 067$ 或 $1\ 259$ m/s 时(图 2(b)和 2(c)),靶板后方呈现一道圆柱型光束,光束顶端可以看到靶板剪切破坏形成的冲塞体。在撞击并贯穿靶板过程中破片破碎,部分碎片穿过靶板并继续飞行,破片碎片由于初始速度、质量、形状的差异,形成碎片云并呈圆柱状分布。当 $v_i=1\ 508$ m/s 时(图 2(d)),靶板后方圆柱型光束的末端出现椭球状光亮,并在圆柱型光柱消散后继续燃烧($t=3.75$ ms)。当破片撞击速度较大时,部分破片碎片温度较高,贯穿靶板并与空气混合后发生燃烧,形成椭球状碎片云,该部分破片温度高,反应充分,燃烧时间较长,在靶后方形成了持续一定时间的椭球状光亮。在一定撞击速度下,W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片既可有效贯穿 10.5 mm 厚的 RHA 靶板,又可在靶后

发生明显的燃烧反应, 是一种具有较强侵彻能力的多功能含能结构材料。需要注意的是, 由于侵彻过程中破片的破碎不可忽略, 不能使用传统惰性破片侵彻公式解释 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片的侵彻规律。

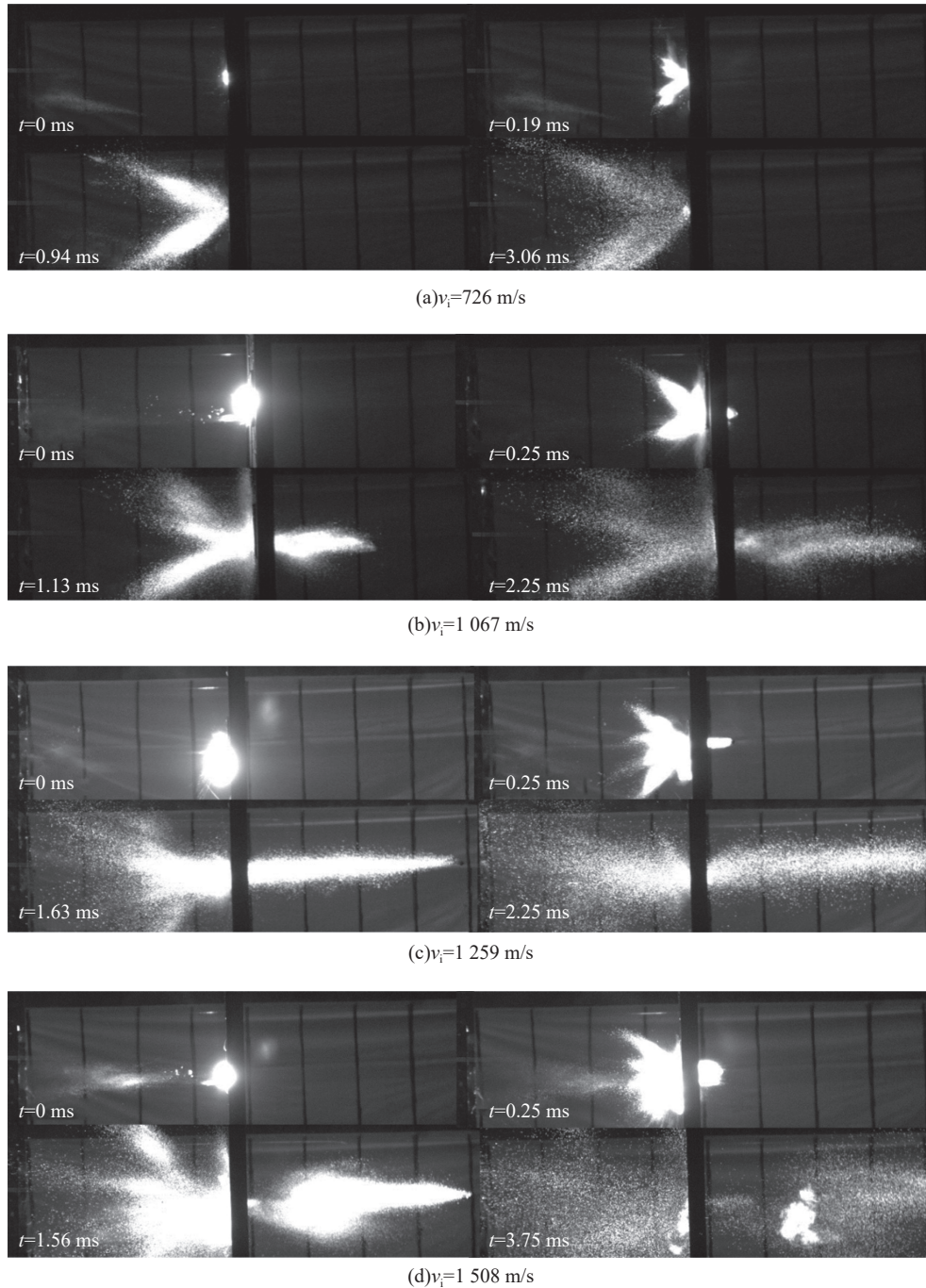


图 2 不同撞击速度下 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶板的侵彻释能过程

Fig. 2 Penetration and energy release processes of W/ZrNiAlCu metastable reactive alloy composite fragments against RHA targets at different impact velocities

表 1 为不同撞击速度 v_i 下 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶板的侵彻结果, m 为破片质量, v_p 为测得的冲塞体速度, p 为根据连续介质力学公式计算得到的破片理论冲击压力^[10]。可以看到, $v_i=973$ m/s 时: 破片贯穿靶板; 而 $v_i=995$ m/s 时, 破片未贯穿靶板。考虑到破片质量差别及弹道极限速

度 v_{bl} 附近数据量较小, 可以认为 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 10.5 mm 厚 RHA 靶板的弹道极限速度 v_{bl} 处于 810~1 067 m/s 范围内。

表 1 破片侵彻实验结果

Table 1 Experimental results of fragments penetration

编号	m/g	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	p/GPa	是否穿透
1#	6.65	726	-	16.46	否
2#	6.54	810	-	18.63	否
3#	6.39	995	-	23.62	否
4#	6.68	973	34	23.01	是
5#	6.80	1 067	137	25.63	是
6#	6.72	1 144	176	27.83	是
7#	6.37	1 159	131	28.26	是
8#	6.65	1 240	195	30.64	是
9#	6.51	1 295	317	32.28	是
10#	6.56	1 359	397	34.21	是
11#	6.68	1 508	497	38.85	是

2 理论分析

2.1 弹道极限

破片侵彻靶板过程中加速度历程较为复杂, 因此采用质量守恒和能量守恒为基础的整体法求解弹道极限速度, 做以下三点假设:

- (1) 破片首先与自由冲塞体发生塑性碰撞, 此过程不考虑靶板的绝热剪切效应^[11];
- (2) 破片撞击靶板后部分破碎, 靶前飞散碎片不参与侵彻过程;
- (3) 冲塞体速度 v_p 约为靶后碎片飞出靶板瞬间统计平均速度 v_i 的 1.35 倍^[11]。

破片贯穿靶板前后的能量守恒方程为:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}m_f \left(\frac{m}{m+m_p} v_i \right)^2 + \frac{1}{2}m_b v_r^2 + \frac{1}{2}m_p v_p^2 + E_{fn} + W_p \quad (1)$$

式中: m_f 为靶板前方飞溅的破片碎片质量之和, m_b 为破片贯穿靶板后残余质量, m_p 为靶板冲塞体质量, E_{fn} 为破片与靶板塑性碰撞损失能量, W_p 为冲塞绝热剪切耗能。弹靶组合确定时, m_f 仅与撞击速度有关, 采用二次多项式的形式拟合:

$$m_f = m \left[a \left(\frac{v_i}{v_{bl}^*} \right)^2 + b \left(\frac{v_i}{v_{bl}^*} \right) + c \right] \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 为待定系数, v_{bl}^* 为不考虑质量损失时的弹道极限速度, m_f 满足质量守恒 $m=m_f+m_b$ 。式(1)中, E_{fn} 、 W_p 的表达式分别为^[11]:

$$E_{fn} = \frac{m_p}{m+m_p} \cdot \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (3)$$

$$W_p = 4dh^2 \cdot \frac{Y}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

式中: d 为破片边长; h 为靶板厚度; $Y=1.2$ GPa, 为靶板失效力。由弹道极限速度的定义, 当 $v_i=v_{bl}$ 时, $v_p=v_r=0$, 令 $a=b=c=0$, 将式(3)和(4)代入式(1)得 $v_{bl}^*=937.8$ m/s; 将表 1 实验数据代入式(1)拟合得到参数 $a=-2.02$, $b=6.47$, $c=-4.41$, 解式(1)得 $v_{bl}=987.1$ m/s, 在实验所确定的弹道极限速度范围内。

图 3 为 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片侵彻 10.5 mm 厚 RHA 靶板的 v_i-v_p 曲线, 其中蓝色实线为考虑破片质量损失所得曲线, 红色实线为未考虑破片质量损失所得曲线, 星型为实验数据, 可以看到, v_p 与 v_i 正相关, 蓝色实线始终位于红色实线下方。破片侵彻能力与其初始动能有关, 故破片撞击速度 v_i 越大, 冲塞体速度 v_p 越大, 侵彻能力增强。破片在侵彻靶板过程中的质量损失将导致动能降低, 进而降低破片的侵彻能力, 因此蓝色实线位于红色实线下方, 理论弹道极限速度 $v_{bl} > v_{bl}^*$, 破片质量损失对侵彻能力有较大影响。图上星状点为实验数据, 可以看到, 理论计算结果与实验数据吻合较好, 表明所做假设合理, 式(1)可以较好地解释包含质量损失的破片对中厚靶板的侵彻规律。

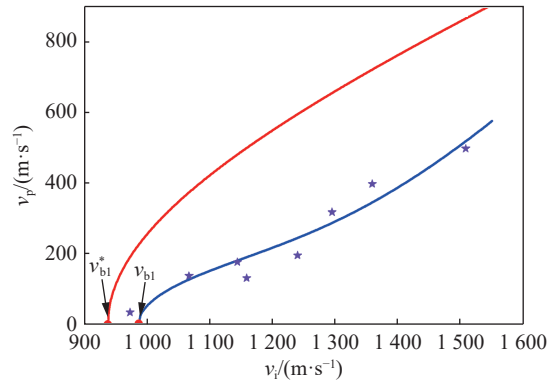


图 3 v_i-v_p 关系曲线

Fig. 3 Curve of v_i-v_p relationship

2.2 释能特性

由 Grünesien 物态方程和 Rankin-Hugoniot 能量方程得到固体 $p-V$ 形式的物态方程^[6]:

$$p(V) = \frac{\frac{V}{\gamma(V)} p_c(V) - E_c(V)}{\frac{V}{\gamma(V)} - \frac{1}{2}(V_0 - V)} \quad (5)$$

式中: p 为材料压力, V 为比容, γ 为 Grünesien 系数, p_c 、 E_c 分别为材料冷压和冷能。通过 Meyer 势, 金属材料的冷压和冷能可以表示为材料常数 $Q-q$ 的形式^[6]:

$$E_c(\delta) = \frac{3Q}{\rho_{0K}} \left\{ \frac{1}{q} \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - \delta^{-1/3} - \frac{1}{q} + 1 \right\} \quad (6)$$

$$p_c(\delta) = Q\delta^{2/3} \left\{ \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - \delta^{2/3} \right\} \quad (7)$$

式中: $\delta = \rho/\rho_{0K} = V_{0K}/V$, 为材料的相对于 0 K 时密度的压缩度, ρ_{0K} 、 V_{0K} 为 0 K 时的密度和比容。

Dugdale -MacDonald 关系式的 $Q-q$ 形式为^[6]:

$$\gamma(V) = \frac{1}{6} \cdot \frac{q^2 \delta^{-1/3} \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - 6\delta}{q \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - 2\delta} \quad (8)$$

采用胡金彪等给出的解析法可以求得材料常数 Q 、 q ^[6]:

$$s \left[1 + \left(\frac{s}{2} - \frac{1}{8} \frac{\gamma_{0K}^2}{s} - 1 \right) \alpha_v T_0 \right] = \frac{1}{12} \cdot \frac{q^2 + 6q - 18}{q - 2} \quad (9)$$

$$\left\{ C_0 \left[1 + \left(2s - \frac{\gamma_{0K}^2}{4} - 1 \right) \alpha_v T_0 \right] \right\}^2 = \frac{Q(q - 2)}{3\rho_{0K}} \quad (10)$$

式中: C_0 、 s 为 Hugoniot 参数, 其中 C_0 理论上等于材料的零压体积声速; γ_{0K} 为 0 K 时的 Grünesien 系数; α_v 为材料的体积膨胀系数; T_0 为起始温度, 即实验室室温, 取 298 K。

Boslough 根据固态材料绝热线和等熵线的关系, 假定材料等容比热为常数, 得到冲击波温度表达式^[12]:

$$T_H = T_0 \exp \left(- \int_{V_0}^{V_H} \frac{V}{\gamma} dV \right) + \frac{V}{\gamma} \frac{p_H - p_S}{C_V} \quad (11)$$

式中: T_H 为击波温度, p_H 为击波压力, V_0 、 V_H 分别为初态、击波压缩状态下的比容, C_V 为材料的等容比

热, p_s 为与冲击绝热线同一起始状态出发的等熵线压力, 其解析式为^[12]:

$$p_s(\eta) = \rho_0 C_0^2 \exp(\gamma_0 \eta) \int_0^\eta \frac{(1+(s-\gamma_0))x}{(1-sx)^3} \exp(-\gamma_0 x) dx \quad (12)$$

式中: $\eta = 1 - V/V_0$ 为压缩度, x 为压缩度的积分变量, ρ_0 为起始状态下材料密度, γ_0 为初始 Grünesien 系数。将式(5)、式(11)联立, 即可得到击波压力与击波温度的关系。

假设含能结构材料的化学反应过程仅受击波温度控制, 研究表明, 含能结构材料在高升温速率下的固态反应动力学满足 n 维 Avrami-Erofeev 方程, 经过整理, Avrami-Erofeev 方程可以表示为击波温度对反应效率一次微分的形式^[6]:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{R_u T^2}{E_a} \left[\frac{1}{2y} - \frac{n \ln(1-y) + n - 1}{n(1-y)[- \ln(1-y)]} \right] \quad (13)$$

式中: y 为反应效率, E_a 为表观活化能, R_u 为理想气体常数, n 为与边界条件和反应机理有关的系数。

表 2 为计算所需 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料参数, 图 4 为破片冲击压力与反应效率关系的理论曲线, 可以看到, 在 40 GPa 冲击压力范围内, 材料并未达到完全反应, 当 $p=40$ GPa, 材料反应效率 $y=0.541$; 材料反应效率与冲击压力正相关, 因此, 随着冲击速度增加, 破片冲击释能所产生的火光范围、火光亮度增大, 与实验现象相符合。

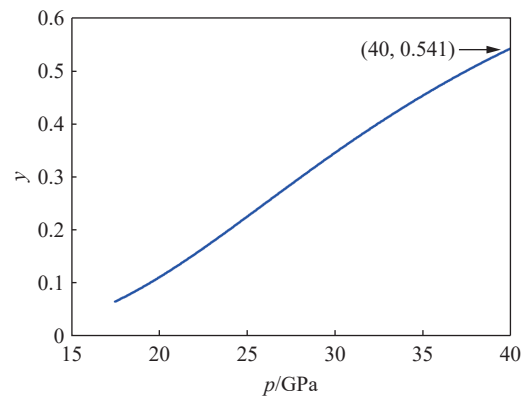


图 4 冲击压力与反应效率的理论曲线

Fig. 4 Theoretical curve of reaction efficiency versus shock pressure

表 2 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料参数^[13]

Table 2 Parameters of W/ZrNiAlCu metastable reactive alloy composite

材料	$C_0/(m \cdot s^{-1})$	s	γ_{0K}	$\alpha_1/(10^{-5} \cdot K^{-1})$	$C_1/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	$E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$	n
W/ZrNiAlCu	3 417	1.732	1.629	1.559	0.182	459.25	0.347

3 结 论

(1) W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片可以贯穿 10.5 mm 厚的 RHA 靶板, 破片撞击、贯穿靶板过程中导致材料破碎并激发燃烧反应, 靶前、靶后均可观察到大范围火光; 随着撞击速度增加, 火光范围增大, 亮度提高, 燃烧反应时间变长。

(2) 推导了 W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片侵彻规律方程, 得到了破片侵彻 10.5 mm 厚 RHA 靶板的理论弹道极限速度 $v_{bl}=987.1$ m/s, 理论计算结果与实验数据吻合较好; 破片侵彻过程中的质量损失对其侵彻能力有较大影响, 在相同撞击速度下, W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片侵彻形成冲塞体速度小于不考虑质量损失的理想情况下冲塞体速度。

(3) 由材料的 Grünesien 物态方程和 Avrami-Erofeev 方程得到材料反应效率 y 与冲击压力 p 的理论关系, 在 15~40 GPa 范围内, 材料反应效率随着冲击压力的增加而增加, 当 $p=40$ GPa 时, $y=0.541$, 因此实验过程中材料反应并不完全, 出现随着撞击速度增加, 火光范围增大、亮度提高的现象。

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. DOI: 10.3969/jissn.1006-9941.2009.06.021.

- ZHANG X F, ZHAO X N. Review on multifunctional energetic structural materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(6): 731–739. DOI: 10.3969/jissn.1006-9941.2009.06.021.
- [2] XU F Y, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Experimental study on penetration behavior of reactive material projectile impacting aluminum plate [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 95: 125–132. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.007.
- [3] ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113: 083508. DOI: 10.1063/1.4793281.
- [4] ZHANG X F, SHI A S, ZHANG J, et al. Thermochemical modeling of temperature controlled shock-induced chemical reactions in multifunctional energetic structural materials under shock compression [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111: 123501. DOI: 10.1063/1.4729048.
- [5] XIONG W, ZHANG X F, WU Y, et al. Influence of additives on microstructures, mechanical properties and shock-induced reaction characteristics of Al/Ni composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 648: 540–549. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.07.004.
- [6] XIONG W, ZHANG X F, TAN M T, et al. The energy release characteristics of shock-induced chemical reaction of Al/Ni composites [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120: 24551–24559. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b06530.
- [7] WANG H F, ZHENG Y F, YU Q B. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110: 074904. DOI: 10.1063/1.3644974.
- [8] LUO P G, WANG Z C, JIANG C L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of W/Zr energetic fragments [J]. *Materials and Design*, 2015, 84: 72–78. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.107.
- [9] XU F Y, YU Q B, ZHENG Y F, et al. Damage effects of double-spaced aluminum plates by reactive material projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 104: 13–20. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.01.023.
- [10] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 209–370.
- JING F Q. Experimental state equation guidance (second edition) [M]. Beijing: Science Press, 1999: 209–370.
- [11] ROSENBERG Z, DEKEL E. 终点弹道学 [M]. 钟方平, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014: 120–135.
- [12] 谭华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 15–61.
- TAN H. Introduction to experimental shock-wave physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 15–61.
- [13] 余志统. 钨/多元非晶合金复合材料破片侵彻及冲击释能研究 [D]. 石家庄: 陆军工程大学, 2018.
- YUZ T. Study on penetration and energy release of tungsten/multi-element amorphous alloy composite fragments [D]. Shijiazhuang: Army Engineering University, 2018.

(责任编辑 王小飞)