

力学性能和温度对 PTFE/Al 活性材料冲击点火的影响

周敬轅, 雷思扬, 冉宪文, 汤文辉*

(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为探究聚四氟乙烯/铝 (polytetrafluoroethylene/aluminum, PTFE/Al) 活性材料力学性能与温度对其冲击点火行为的影响,通过调控烧结条件,制备了八种 PTFE/Al 活性材料试样,并利用材料万能试验机得到了八种试样在不同温度下的应力-应变曲线,同时借助落锤装置测定了八种试样在相应温度下的点火阈值。试验结果表明:烧结时间对 PTFE/Al 弹性模量具有重要影响,温度升高会使得 PTFE/Al 试样软化;在高温条件下,烧结时间为 40 min 的 PTFE/Al 试样屈服强度更高,同时在落锤加载下更易发生反应;进一步分析发现,材料强度与冲击点火阈值在相同温度条件下呈现线性负相关关系,且该线性关系的斜率随温度升高呈指数降低趋势。上述研究为 PTFE/Al 活性材料性能的优化和应用提供了重要的理论依据。

关键词:PTFE/Al; 冲击点火; 力学性能; 落锤试验

中图分类号: O3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2025)04-206-09

论文
拓展

Effect of mechanical properties and temperature on impact ignition of PTFE/Al reactive material

ZHOU Jingyuan, LEI Siyang, RAN Xianwen, TANG Wenhui*

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of PTFE/Al (polytetrafluoroethylene/aluminum) reactive materials and temperature effects on their impact ignition behavior, eight PTFE/Al reactive material specimens were fabricated through controlled sintering conditions. Stress-strain curves of eight samples at varying temperatures were obtained by using a universal testing machine, while impact ignition thresholds of eight samples under corresponding temperatures were determined through drop-weight experiments. Experimental results demonstrated that sintering duration significantly influenced the elastic modulus of PTFE/Al composites, with elevated temperatures inducing material softening. At high-temperature conditions, specimens sintered for 40 min exhibited enhanced yield strength and demonstrated higher reactivity under drop-weight loading. Further analysis revealed a linear negative correlation between material strength and impact ignition thresholds under isothermal conditions, with the slope of this linear relationship exhibiting exponential decay as temperature increased. The findings of this study provide a significant theoretical foundation for the performance optimization and engineering applications of PTFE/Al reactive materials.

Keywords: PTFE/Al; shock ignition; mechanical property; drop hammer experiment

聚四氟乙烯/铝 (Polytetrafluoroethylene/Aluminum, PTFE/Al) 是一种特殊的含能材料,具有易于制备和高能量密度的特点^[1-2],被称为活性材料。在常规环境下 PTFE/Al 非常稳定,通常仅在冲击下释放大量能量,这种特性使其备受关注^[1,3-4]。当 Al 与 PTFE 的质量比为 26.5 : 73.5 时,理论上单位质量反应热值可达 8.53 MJ/kg,是 TNT 反应热值 (4.18 MJ/kg) 的两倍^[5-6]。因

此,PTFE/Al 在多个领域都有较好的应用前景^[2,7-10]。

力学性能是材料最基本的性能之一,PTFE/Al 的力学性能主要与原料和制备工艺有关,其中最重要的制备工艺是烧结。团队先前的研究表明,与使用纳米颗粒相比,使用微米颗粒原料烧结后,PTFE/Al 的力学性能和延展性显著提高^[5]。Wang 等^[11]研究了烧结工艺对 PTFE/Al 力学性能

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12172380)

第一作者: 周敬轅 (1994—), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, E-mail: zhoujingyuan19@nju.edu.cn

*通信作者: 汤文辉 (1964—), 男, 湖南沅江人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: tangwenhui@nudt.edu.cn

引用格式: 周敬轅, 雷思扬, 冉宪文, 等. 力学性能和温度对 PTFE/Al 活性材料冲击点火的影响 [J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(4): 206-214.

Citation: ZHOU J Y, LEI S Y, RAN X W, et al. Effect of mechanical properties and temperature on impact ignition of PTFE/Al reactive material [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(4): 206-214.

的影响,研究显示烧结温度在 325 ℃ 以上时可以观察到材料由脆性到韧性的明显转变。

冲击点火特性同样是 PTFE/Al 活性材料的重要性能,并且与其力学性能等因素密切相关。因此,人们对 PTFE/Al 的点火特性进行了大量的研究。Wu 等^[12]发现 PTFE/Al 的强度和感度随着 Al 颗粒尺寸的增加而降低,PTFE 的晶型在 19~30 ℃ 时会发生转变,因此在该温度范围内 PTFE/Al 的特性落高高度变化更为显著,并且随着温度的升高,特性落高的高度显著降低。周杰等^[13]研究了不同 Al 颗粒尺寸对 PTFE/Al/W 力学性能和点火性能的影响,研究表明 Al 颗粒尺寸的减小增加了其失效强度和反应速率。Ames^[1]通过泰勒杆试验研究表明,通常 PTFE/Al 会先发生断裂然后开始反应,然而仅断裂过程不足以激发材料的反应,必须事先在断裂部位沉积额外的能量。Xu 等^[4]研究显示,PTFE 基活性材料反应与在冲击压缩时的裂纹、变形等因素有关。Tang 等^[14]研究认为,只有掌握 PTFE/Al 准确的力学性能,才能可靠地仿真模拟其冲击反应的过程。

通过上述研究可以发现,PTFE/Al 的力学性能、温度和点火特性之间有着密切的关系,然而,目前在相关问题上还缺乏详细定量的研究和结论。为此,首先通过调整烧结条件(包括不同的烧结温度和烧结时间),制备了具有不同力学性能的试样。随后,在不同温度条件下对这些试样进行了准静态力学性能测试和落锤冲击点火试验,并利用高速摄像技术记录了冲击点火试验的动态过程。基于试验数据,本文进一步探讨了 PTFE/Al 的力学性能与点火特性之间的关系,为该材料的制备工艺优化及其性能研究提供了重要的理论依据和试验参考。

1 活性材料试样的制备

研究使用的粉末原料为 PTFE、Al,其中,PTFE 的密度为 2.1 g·cm⁻³,生产商为美国杜邦,粒径为 50 μm;Al 的密度为 2.7 g·cm⁻³,生产商为上海乃欧纳米,粒径为 5 μm。制备试样时 PTFE 与 Al 的质量比为 73.5:26.5。

试样采用冷压烧结工艺制备。第一步,将粉末材料按比例均匀混合。通常有两种混合方法,即干式混合和湿式混合。通过湿式混合,需要大量的溶剂,并且混合过程耗时较长,同时存在一定的安全风险。因此,选用干式混合方法。具体操作如下:首先将 PTFE 和 Al 按比例放入搅拌器中搅拌 10 min,然后在球磨机中混合 1 h,以确保材

料充分均匀混合。混合完成后,必须在确保球磨机充分冷却后再取出材料。第二步,使用模具将粉末压制成型。制备了两种尺寸的试样,分别为 Φ10×3 mm 和 Φ10×11 mm 在压制过程中,试样必须在 100 MPa 下保持 20 min,取出试样后静置 24 h 以消除残余应力^[15]。最后将成型试样放入真空烧结炉中进行烧结,典型的烧结温度曲线如图 1 所示,烧结过程最高的保温温度需要控制在 320~380 ℃ 之间。

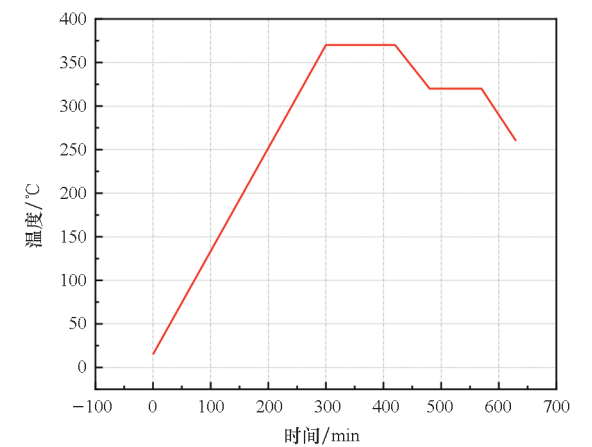


图 1 烧结温度曲线
Fig. 1 Sintering temperature curve

通过在烧结过程中改变保温温度和持续时间制备了八种不同力学性能的试样,如表 1 所示。

表 1 试验试样
Tab. 1 Experimental samples

试样 编号	烧结温 度/℃	保温时 间/min	试样 编号	烧结温 度/℃	保温时 间/min
NO. 1	350	120	NO. 5	365	360
NO. 2	350	360	NO. 6	380	40
NO. 3	365	40	NO. 7	380	120
NO. 4	365	120	NO. 8	380	360

2 试验结果

2.1 力学性能试验

利用高温万能材料试验机,对尺寸为 Φ10×11 mm 的 PTFE/Al 活性材料试样进行准静态压缩试验。该仪器拥有一个恒温箱,准静态压缩度试验在恒温箱中进行。设定了四种试验温度,即 20 ℃、100 ℃、200 ℃和 280 ℃,设定以 0.6 mm/min 的速度压缩试样,进行 3 次以上重复试验,取重合度较好的 3 个试验结果的平均值。试验获得的准静态真实应力-应变曲线如图 2 所示。

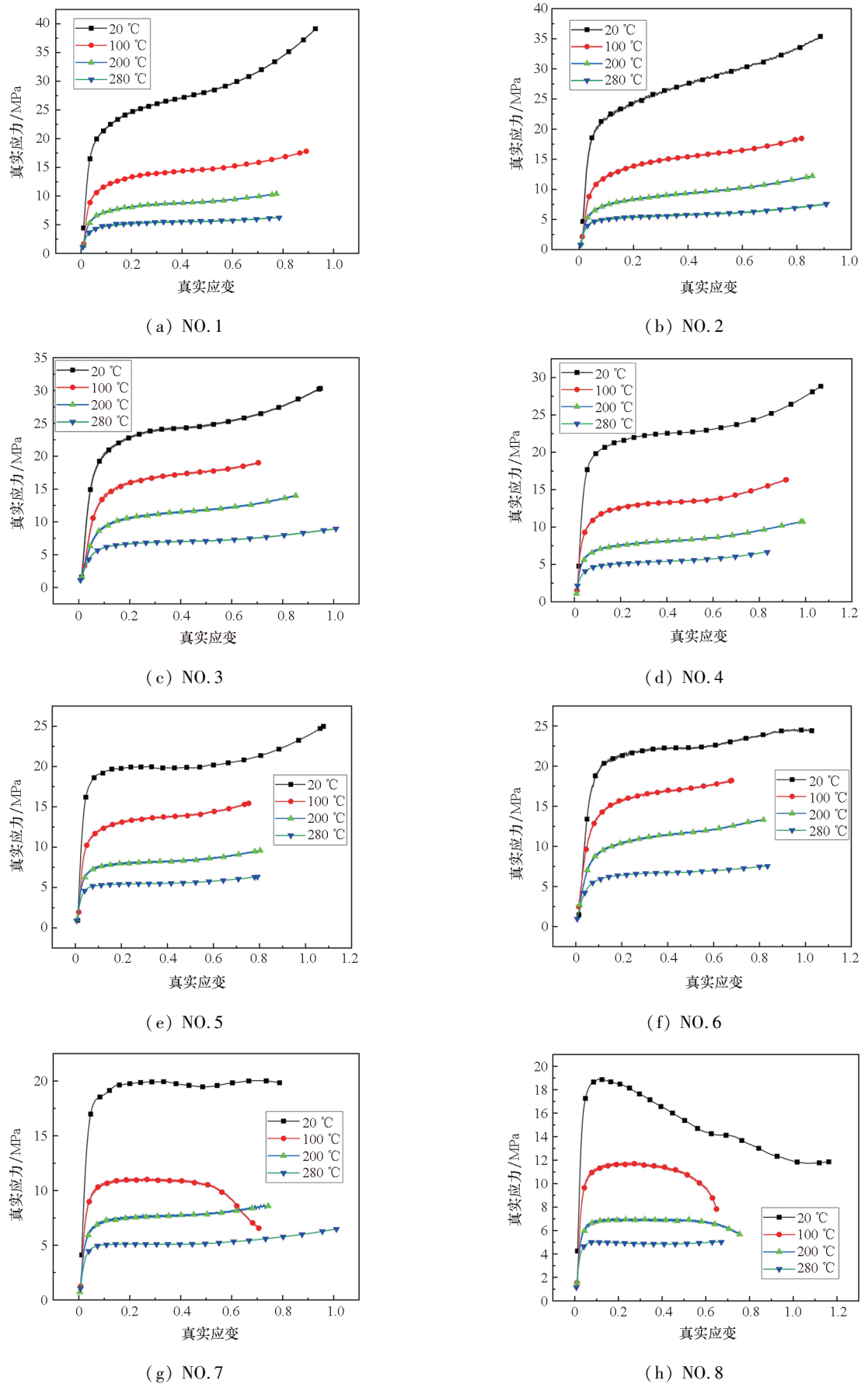
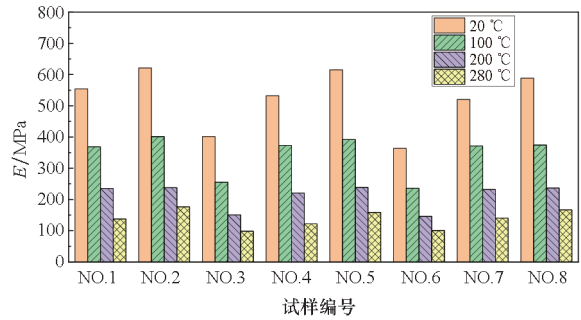


图 2 不同温度下试样的准静态压缩应力 - 应变曲线
Fig.2 Quasi-static compression stress-strain curves at different temperatures

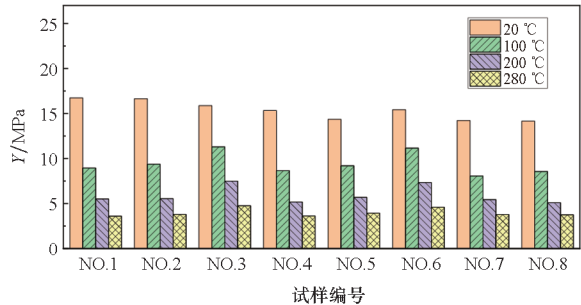
从图 2 中可以看到,试样的应力-应变曲线均存在明显的弹性和塑性段,且具有良好的延展性,在较大压缩应变下不会失效和断裂,仅烧结温度为 380 ℃ 的试样在压缩时发生断裂现象。可见烧结温度过高时,PTFE/Al 的延展性会降低。PTFE 在高温情况下会发生分解,因此较高烧结温度时 PTFE/Al 试样延展性降低可能与 PTFE 的热分解有关。

不同试验温度下试样的弹性模量和屈服强度如图 3 所示。从图 3 中可知,升温后 PTFE/Al 的软化现象显著,当试验温度从 20 ℃ 升高到 280 ℃ 时,试样的屈服强度和弹性模量平均降幅均为 75%。相同试验温度下,烧结时间长的 PTFE/Al 试样的弹性模量更高,而烧结温度的影响较小。这可能与试样烧结时间较长时,PTFE 融化再结晶更充分有关。对于屈服强度,常温下烧结时间少、烧结温度低的试样更高,而试验温度在 100 ℃ 以上时,烧结时间为 40 min 的 NO.3 和 NO.6 试样要显著高于其他试样。推测是由于烧结时间仅为 40 min 时,试样内的 PTFE 融化再结晶不够充分,存在一些不规则的形态,与金属颗粒一同形成了力链,这种较复杂的结构可能通过应力重分布机制增强试样在高温时抗屈服的能力。



(a) 不同温度下八种试样的弹性模量

(a) Elastic modulus of 8 samples at different temperatures



(b) 不同温度下八种试样的屈服强度

(b) Yield strength of 8 samples at different temperatures

图 3 弹性模量和屈服强度

Fig. 3 Elastic modulus and yield strength

2.2 落锤点火试验

落锤装置中锤头质量为 10 kg,锤头与试样接触的加载端为直径 30 mm 的圆柱体,落锤下落的最大高度为 2 m,最大速度约为 6 m/s。落锤试验使用的试样尺寸为 $\Phi 10 \times 3$ mm,整个测试过程由高速摄像机记录。

采用特性落高法研究 PTFE/Al 活性材料在冲击下的临界点火条件,PTFE/Al 试样的特性落高可使用式(1)^[16]计算:

$$H_{50} = \left[A + B \left(\frac{\sum iC_i}{D} - \frac{1}{2} \right) \right] \tag{1}$$

式中: H_{50} 是特性落高; A 是 20 次试验中最低的落锤高度; B 是落锤高度变化的间距; C_i 是在特定跌落高度中发生点火的次数; D 是试验中发生的总点火次数; i 是某一落锤释放高度的序数,最低高度序数为 0,增加一级高度 i 增加 1。

落锤试验中将八种试样通过恒温箱分别加热到 20 ℃、100 ℃、200 ℃ 和 280 ℃,取出后立即完成试验。每种条件进行 20 次试验,总共测试了 32 种条件下试样的点火特性,试验结果如图 4 所示。

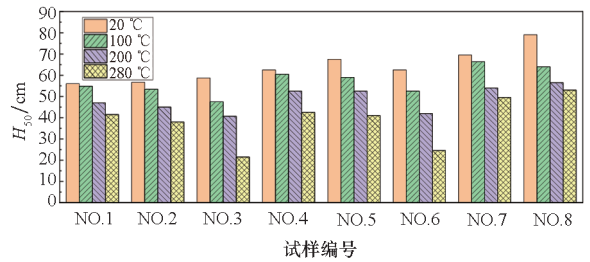


图 4 特性落高

Fig. 4 Characteristic drop height

测试得到的 H_{50} 值能够作为表征材料冲击感度的重要参数,其数值越低表明材料越容易发生点火反应,在相同冲击条件下可达到更高的反应效率。从图 4 可以看出,在常温下,制备时烧结温度高,烧结时间长的 PTFE/Al 试样,其 H_{50} 更高。此外,八种试样的 H_{50} 都随试验温度的升高而降低,但不同试样对温度变化的敏感性存在差异。其中烧结时间为 40 min 的 NO.3 和 NO.6 试样表现出最强的温度敏感性。具体而言,当温度从 20 ℃ 升至 280 ℃ 时,这两种试样的 H_{50} 值分别降至初始值的 36.6% 和 39.2%,降幅显著大于其他试样(降幅均小于 33%)。并且在 100 ~ 280 ℃ 温度范围内,NO.3 和 NO.6 试样的 H_{50} 值始终低于其他试样。

温度对 PTFE/Al 反应行为的影响不仅体现

在特性落高(H_{50})这一参数上,还显著影响点火后的反应传播过程。图 5 显示了八种试样在不同试验温度时,落锤高度接近 H_{50} 时试验中的最大火光瞬间图像,每一行对应一个试验温度。在接近点火阈值条件下,试样通常仅产生微弱的火焰,如图 5(a) 所示。但随着试验温度的升

高,PTFE/Al 材料的火焰响应也呈现显著增强的趋势,表现为火焰尺寸增大、亮度增强。值得注意的是,当落锤高度略微降低时,材料即失去反应能力。这种现象表明温度升高不仅降低了材料的点火阈值,还增强了反应传播的持续性。

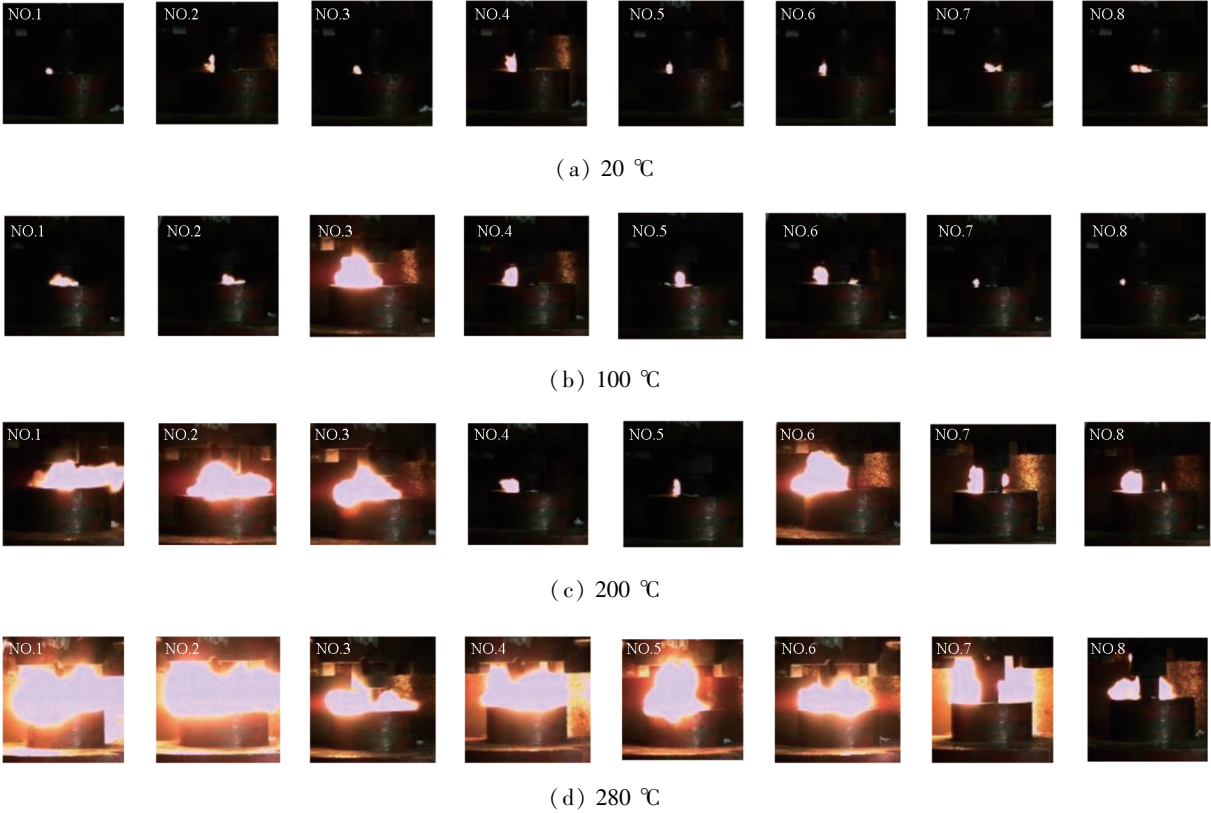


图 5 落锤试验火光
Fig. 5 Firelight of the drop hammer experiment

3 讨论与分析

通过系统分析不同温度条件下 PTFE/Al 试样的力学响应与冲击点火行为,本研究提出需建立能够量化表征材料整体压缩过程的力学参数,以便进行定量分析。由图 2 和图 3 可知,当 PTFE/Al 被压缩进入屈服阶段,其应力 - 应变曲线出现非线性波动,这表明传统弹性模量或屈服强度等单一参数已无法有效描述该材料在连续变形过程中的力学行为。进一步分析发现,若采用特定应变点的应力值作为表征量,其有效性受限于材料均匀性,当试样出现裂纹扩展或孔隙压实等结构异变时,该表征量将丧失代表性。

基于上述分析,本研究创新性地引入特性应变能(E_H)作为综合评价参数,其定义为材料在 0 ~ 0.6 应变范围内准静态压缩应力 - 应变曲线的积分值。该参数选择基于以下考量:0.6 应变阈值完整涵盖材料从弹性变形到塑性流动的主要

压缩阶段;该应变范围未超过试样的失效应变临界值;积分运算可有效融合应力 - 应变曲线的全过程特征。于是有:

$$E_H = \int_0^{0.6} \sigma d\varepsilon \tag{2}$$

将四种试验温度下得到八种活性材料试样的 E_H 值和特性落高(H_{50})进行比较,结果如图 6 所示。

图 6 中可看出,PTFE/Al 试样的 E_H 和 H_{50} 呈现高度一致的镜像变化趋势,当试样的 E_H 值增加时,其 H_{50} 值将会降低,这一现象说明两者之间存在显著的相关性。

基于各向同性弹塑性本构模型,结合力学测试获取的材料参数即弹性模量、屈服强度等,采用数值仿真方法对 PTFE/Al 试样的落锤加载过程进行了模拟计算,重点分析冲击加载过程中试样的温度场演化。温度设定为常温 20 °C (293.15 K),网格尺寸为 0.1 mm,落锤与砧板材料为钢,质量为

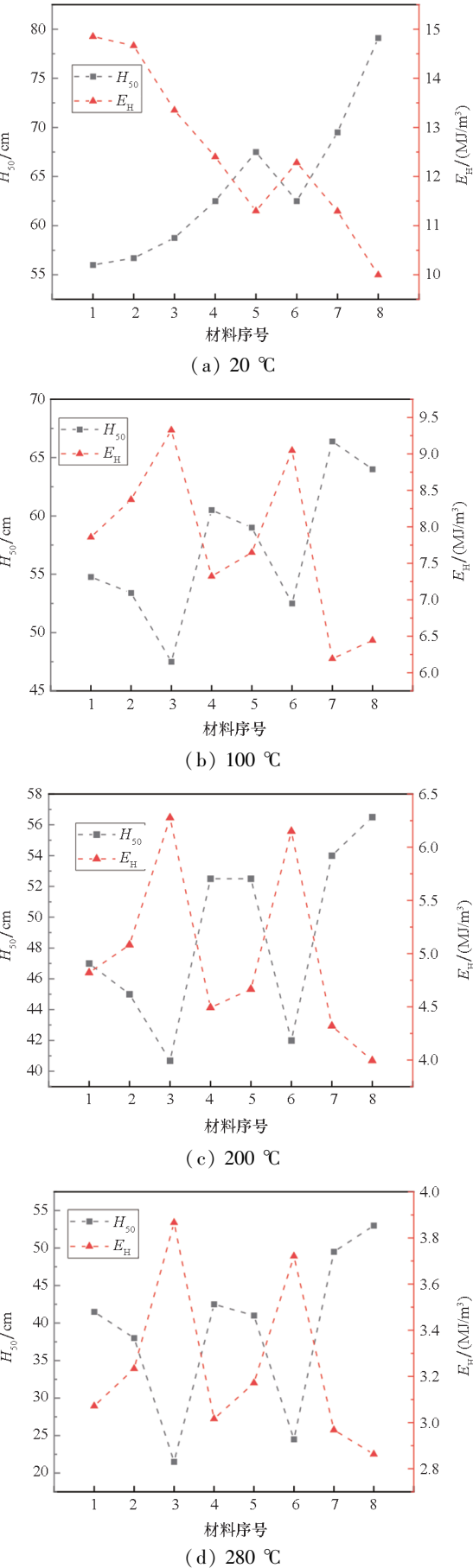


图6 H_{50} 与 E_H 对比

Fig. 6 Comparison between H_{50} and E_H

10 kg,采用刚体模型,落锤高度取 70 cm,加载速度为 3.7 m/s。当试样在落锤加载下发生较大变形时,典型的温度场分布如图 7 所示。



图7 典型落锤试验试样大变形温度云图

Fig. 7 Temperature cloud map of a typical drop hammer test specimen undergoing large deformation

由图 7 可看出,在落锤加载过程中,试样塑性变形功转化为热能导致温度升高。试样温度分布较为均匀,温度由初始的 293. 15 K 增加到了 300 K 以上。这种温升效应有利于促进 PTFE/Al 材料的化学反应活性,为冲击点火提供了支持。

仿真计算得到,八种试样在常温下,加载速度为 3.7 m/s 时,平均的温度变化如图 8 所示。

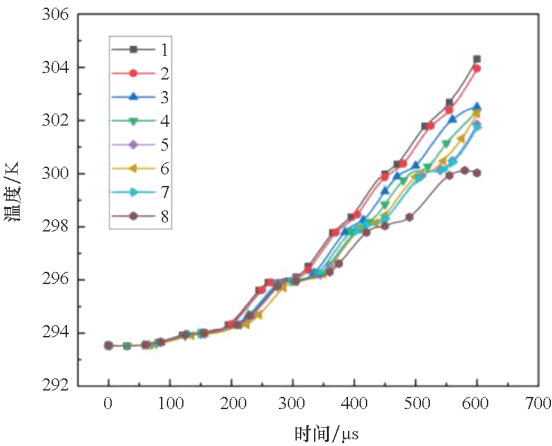


图8 常温下落锤加载中八种试样温度变化曲线

Fig. 8 Temperature variation curves of eight samples during drop hammer loading at room temperature

图 8 中温度变化的趋势表明,试样在落锤加载中前期的温度增长与弹性模量成正比,而发生较大变形时,温度与图 6 (a) 中试样的 E_H 值成正比。基于以上的结果分析认为:在落锤冲击过程中,由于落锤强度远高于 PTFE/Al 活性材料,试样均被压缩至相近的极限变形状态。尽管落锤携带的机械能远超过试样反应所需的阈值能量,但由于试样力学性能不同,吸收和转化机械能的能力存在显著差异。 E_H 值较高的试样具有更强的力学强度,在相同冲击条件下承受更大的载荷,从而导致落锤对试样做功增加,提高了试样在落锤加载过程中的能量转换率,有利于试样温度的升高。这种能量转换效率的提升使得高 E_H 值试样

能够在较低的落锤高度下达到反应阈值,表现为更低的 H_{50} 值。

基于 E_H 与 H_{50} 呈现的高度对称分布特征,本研究对四个温度条件下的试验数据进行了线性回归分析。通过最小二乘法拟合建立了定量关系,拟合公式为:

$$H_{50}=k \cdot E_H+d$$

(3)

其中, k 表示斜率, d 表示截距。拟合结果如图 9 和表 2 所示。

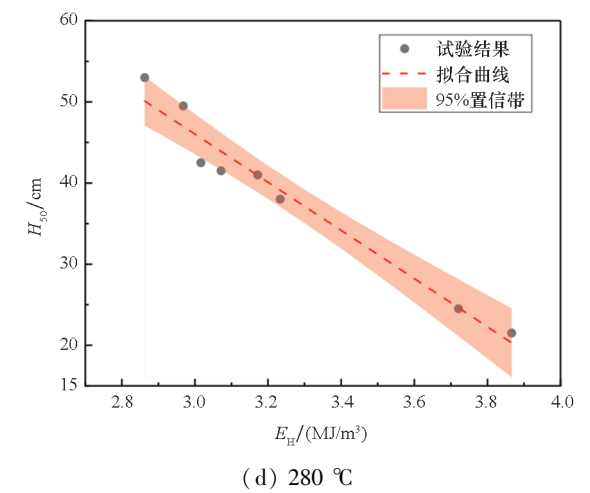
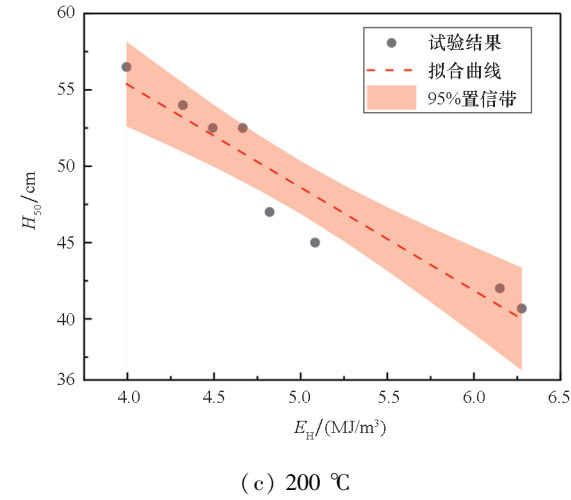
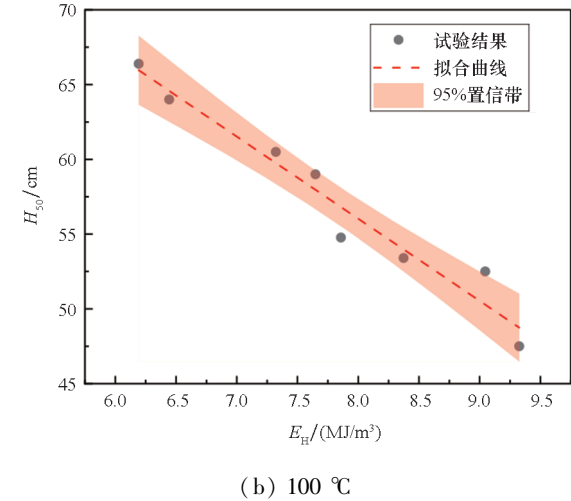
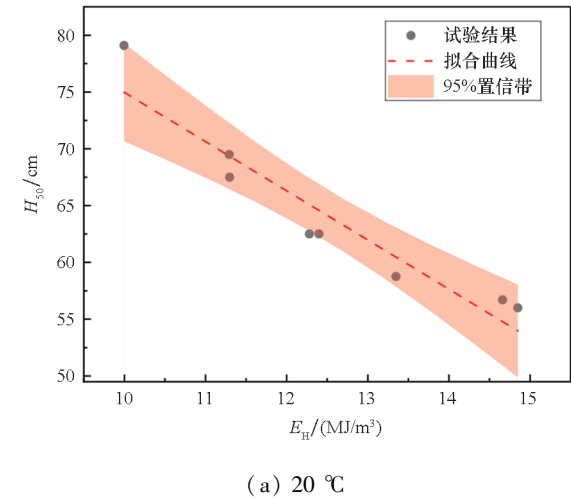


图 9 线性拟合结果
Fig. 9 Linear fitting results

表 2 线性拟合参数
Tab. 2 Linear fitting parameters

温度/℃	$k/(\text{cm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{MJ}^{-1})$	d/cm
20	-4.33	118.26
100	-5.49	99.98
200	-6.74	82.32
280	-29.68	135.08

图 9 所示的拟合结果表明,相同温度下 PTFE/Al 试样的 E_H 和 H_{50} 之间存在显著的负线性相关关系。

表 2 中数据显示,随着试验温度升高,拟合曲线斜率的绝对值呈现非线性加速增长趋势,这表明材料强度变化对冲击感度的影响随温度升高而增强。这种现象产生的两个主要因素:一是温度升高后本身 PTFE/Al 材料的强度会下降,从而导致材料强度的绝对差值减小;二是强度降低后,大大降低了材料在加载过程中的能量吸收效率,吸收相同的能量需要更多落锤的冲击动能。

基于试验数据的分析,发现拟合曲线斜率与温度之间存在复杂的非线性关系。为定量描述这一关系,本研究采用经验公式进行拟合,其数学表达式为:

$$k=y_0+\alpha e^{R_0 \cdot T}$$

(4)

其中, T 为温度, y_0 、 α 和 R_0 为拟合参数。

拟合曲线如图 10 所示,拟合计算得到参数的值分别为: $y_0=-4.845\ 84\ \text{cm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$, $\alpha=-5.602\ 6 \times 10^{-7}\ \text{cm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$, $R_0=0.031\ 83$ 。

拟合结果表明,在试验温度范围内,式(4)能

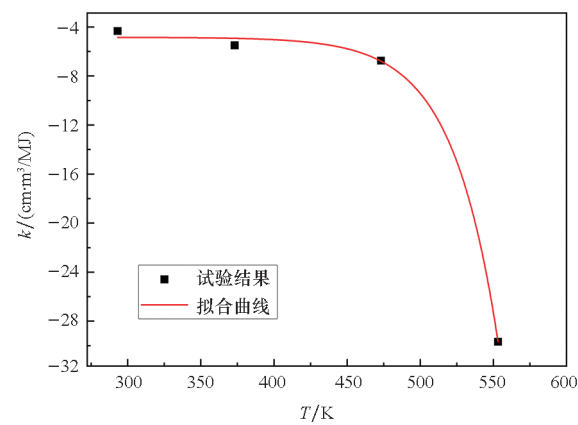


图 10 温度和斜率拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of temperature and slop

够准确描述斜率与温度的非线性关系。基于式(3)、式(4)以及表 2 的数据,本文成功建立了 PTFE/Al 活性材料的温度 - 强度 - 点火阈值定量关系模型。

4 结论

本文通过力学测试和落锤试验,获取了不同制备条件和环境温度下 PTFE/Al 活性材料的准静态力学性能数据,并揭示了材料力学性能与温度对冲击点火行为的影响。主要研究工作和结论如下:

- 1)得到了不同温度下八种 PTFE/Al 试样的准静态力学性能。研究表明,PTFE/Al 活性材料具有较好的压缩延展性,温度升高会使得材料软化,烧结时间对 PTFE/Al 弹性模量的影响较烧结温度更为显著。在常温条件下,研究的范围内烧结温度较低的 PTFE/Al 试样屈服强度更高,高温条件下,烧结时间为 40 min 的试样展现出更高的屈服强度。
- 2)研究了温度和材料强度对活性材料冲击点火的影响。试验结果表明,温度升高降低了活性材料的 H_{50} 值,提升了材料在点火阈值附近的反应活性,并且烧结时间为 40 min 的活性材料在高温下更容易发生反应。
- 3)基于准静态压缩试验,提出采用特性应变能(E_H)作为表征压缩强度的参数。建立了特性应变能与落锤试验的点火条件,即特性落高(H_{50})之间的定量关系模型。研究结果表明,二者之间存在显著的负线性关系,即材料强度越大其特性落高越低,利用试验数据拟合得到了不同温度下线性关系的斜率 k 和截距 d 。同时

分析认为,斜率 k 随温度升高存在呈指数降低趋势。基于试验数据,采用经验公式成功拟合了斜率 k 与温度 T 之间的定量关系。为预测 PTFE/Al 在不同温度条件下的冲击响应特性提供了参考。

参考文献 (References)

[1] AMES R G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials [J]. MRS Online Proceedings Library, 2006, 896(1) : 308.

[2] ZHENG Y F, ZHENG Z J, LU G C, et al. Mesoscale study on explosion-induced formation and thermochemical response of PTFE/Al granular jet[J]. Defence Technology, 2023, 23: 112 - 125.

[3] WU Z Y, LIU J X, ZHANG S, et al. Enhanced thermal-and impact-initiated reactions of PTFE/Al energetic materials through ultrasonic-assisted core-shell construction [J]. Defence Technology, 2022, 18(8) : 1362 - 1368.

[4] XU X C, ZHANG Q C, FANG H J, et al. Mechanical properties, impact initiation characteristics and energy release effect of Al/PTFE reactive materials enhanced by Fe particles[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(3) : 683 - 700.

[5] ZHOU J Y, DING L L, TANG W H, et al. Experimental study of mechanical properties and impact-induced reaction characteristics of PTFE/Al/CuO reactive materials [J]. Materials, 2019, 13(1) : 66.

[6] ZOU X, ZHOU J Y, TANG W H, et al. Modeling of impact energy release of PTFE/Al reactive material [J]. Applied Sciences, 2021, 11(19) : 8910.

[7] WANG Y Z, YU Q B, ZHENG Y F, et al. Formation and penetration of jets by shaped charges with reactive material liners [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(4) : 618 - 622.

[8] SUN S X, ZHAO B B, ZHANG G P, et al. Applying mechanically activated Al/PTFE in CMDB propellant [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43 (11) : 1105 - 1114.

[9] 郭焕果, 卢冠成, 何锁, 等. 活性复合罩聚能装药侵彻增强行为[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(12): 1259 - 1266.

[9] GUO H G, LU G C, HE S, et al. Penetration enhancement behavior of reactive material double-layered liner shaped charge[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(12) : 1259 - 1266. (in Chinese)

[10] TANG E L, WANG Y, LI L, et al. Penetration and jet flame effects induced by the interaction between a new energetic penetrator and a simulated shielding charge [J]. The European Physical Journal Plus, 2024, 139(1) : 21.

[11] WANG H F, GENG B Q, GUO H G, et al. The effect of sintering and cooling process on geometry distortion and

mechanical properties transition of PTFE/Al reactive materials[J]. Defence Technology, 2020, 16 (3): 720 – 730.

[12] WU J X, WANG H X, FENG B, et al. The effect of temperature-induced phase transition of PTFE on the dynamic mechanical behavior and impact-induced initiation characteristics of Al/PTFE [J]. Polymer Testing, 2020, 91: 106835.

[13] 周杰, 何勇, 何源, 等. Al/PTFE/W 反应材料的准静态压缩性能与冲击释能特性[J]. 含能材料, 2017, 25 (11): 903 – 912.

ZHOU J, HE Y, HE Y, et al. Quasi-static compression properties and impact energy release characteristics of Al/PTFE/W reactive materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25 (11): 903 – 912. (in Chinese)

[14] TANG E L, SUN Z M, LI L, et al. Dynamic constitutive model and ignition behavior of enhanced Al/PTFE [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 178: 104605.

[15] TAO J, WANG X F, WANG J H, et al. Reactivity and reaction mechanism of Al-PTFE mechanically activated energetic composites [J]. FirePhysChem, 2021, 1 (2): 123 – 128.

[16] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2009.

ZHANG B P, ZHANG Q M, HUANG F L. Detonation physics [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2009. (in Chinese)