

doi: 10.7690/bgzdh.2015.04.020

热爆炸试验数据处理中采用近似时的误差分析

王 琼, 丁 黎, 张冬梅, 刘文亮, 常 海

(西安近代化学研究所四部, 西安 710065)

摘要: 采用自研热爆炸装置对炸药 A 进行了热爆炸试验, 采用指数形式拟合了温度与延滞期的关系, 分析了拟合方程在不同温度条件下的近似结果及近似处理时的误差。分析了在 $\ln t$ 与 $1/T$ 存在线性关系的温度范围内, 采用有限个数据点去外推时的误差及外推时试验数据选取的原则。采用多种方式计算临界区域和超临界区域绝热至爆时间及各种近似处理的误差。结果表明: 对于炸药 A 而言, 采用指数拟合时延滞期误差最大为 20%; 当温度大于 480 K 时可以认为是远大于临界温度, 近似所产生的误差为 1.2%; 在 452.15~461.15 K 温度范围内 $\ln t$ 与 $1/T$ 存在线性关系。采用接近临界温度的数据外推时更接近真实值; 在临界值附近的数据越多外推时越精确; 在热爆炸试验设计和数据处理时要选择热爆炸临界温度附近的试验点。

关键词: 炸药; 数据处理; 热爆炸; 误差分析

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Error Analysis of Data Processing by Using Approximate Time on Thermal Explosion Test

Wang Qiong, Ding Li, Zhang Dongmei, Liu Wenliang, Chang Hai

(No. 4 Department, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Thermal explosion tests on explosive A were conducted on the self-developed thermal explosion test instrument, with the fitting of the relationship between temperature and time to ignition. Various expressions through approximate processing under different temperatures were gained with the corresponding processing errors analyzed. The error of extrapolating from limited data points and the principles of data choice were analyzed in the temperature range in which natural logarithm of time to ignition ($\ln t$) has the linear relationship with temperature (T). The characteristics of critical region and supercritical region were described and adiabatic time to explosion was calculated through several ways with the error analysis. Results showed that for explosive A, the maximal error of time to ignition is 20% using the exponential equation to fit the temperature and time to ignition directly, and temperature above 480 K can be regarded to exceed far from the critical temperature with error 1.2%. In the temperature range 452.15~461.15 K, the linear relationship between $\ln t$ and T exists, and the extrapolating outcome is closer to the real value when more data closer to the critical temperature are used and data points closer to critical temperature are preferred when design thermal explosion test and data processing.

Keywords: explosive; data processing; thermal explosion; error analysis

0 引言

热安全性研究是弹药新工艺开发、生产和试验研究的重要内容。通过小型热爆炸试验来评价火炸药装药的热安全性^[1-5]或通过热爆炸试验结合数值计算, 来模拟火炸药装药实际条件下的热响应特性^[6-13]是目前关于火炸药研究的主要的方向。由于热爆炸理论^[14]中的许多假设条件在试验过程中无法满足, 以及理论假设在求解过程中需要用到很多假设和近似。在热爆炸试验过程中, 只能通过试验获得有限个试验数据, 从这有限个试验数据获得的关系能否推论到其他任意温度, 外推的误差有多大? 在解析爆炸方程时, 采用各种近似时的误差有多大? 在热爆炸试验过程中应该注意哪些问题? 这些关于热爆炸试验及数据处理过程中的基本问题无

文献报道。基于此, 笔者以一种炸药的热爆炸试验数据为例, 详细分析了简单理论模型在采取近似处理试验数据时的误差以及许多公式的适用范围, 以期热爆炸试验的设计和试验数据处理提供参考。

1 试验及假设

热爆炸试验在自发研制的热爆炸系统^[14]上进行, 试验装置主要由加热系统、控温仪、测温系统、数据(时间、温度)记录系统等组成, 系统示意图见图 1。参照文献[1-4]规定采取 10 h 不发生燃烧或爆炸的最高温度与发生燃烧或爆炸的最低温度的平均值作为药柱的热爆炸临界温度。

加热炉采用空气浴加热, 加热范围室温~300 °C, 控温精度 ± 0.5 °C; 测温传感器, 测温精度

收稿日期: 2014-11-27; 修回日期: 2015-01-05

作者简介: 王 琼(1985—), 湖北人, 男, 硕士, 工程师, 从事含能材料分析、工艺危险性、弹药环境适应性及寿命评估研究。

±0.1 °C；炸药药柱直径 20 mm，长径比 1:1。

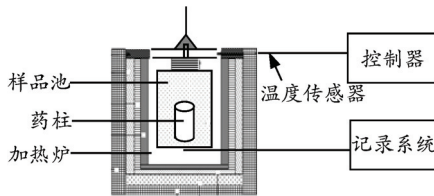


图 1 热爆炸试验示意图

假设：1) 假设药柱属于均温非绝热爆炸系统，并采用二项式近似即 $f(\theta) = (\frac{e}{2})(1 + \theta^2)$ ；2) 温度与延滞期的拟合方程假定在所有温度下都适用。

2 试验结果及分析

采用上述热爆炸试验装置测试了直径 20 mm 的 A 炸药药柱不同温度下的燃爆时间，获得了相应的热爆炸特征临界温度，试验结果见表 1。

表 1 炸药 A 的热爆炸温度及延滞期

温度 T/K	时间 t/min	现象	特征临界温度 T_{cr}/K
495.25	12.35	燃烧	
488.85	12.53	燃烧	
478.15	16.76	燃烧	
468.25	21.85	燃烧	
460.65	31.77	燃烧	452.15
458.85	38.65	燃烧	
454.65	90.05	燃烧	
452.95	115.21	燃烧	
450.35	600.00	不燃烧	

由表 1 知，炸药 A 的热爆炸临界温度为 179 °C，对炸药 A 的温度及延滞期采用指数形式拟合可得：

$$t_{ing} = 14.76991 + 102.283 \ln \times \exp[-(T_a - 452.872 \ 03)/4.318 \ 59], R^2 = 0.988 \quad (1)$$

以炸药 A 的试验数据为真值，计算了拟合数据的误差，见图 2。由图 2 可见，误差最大为 20%。

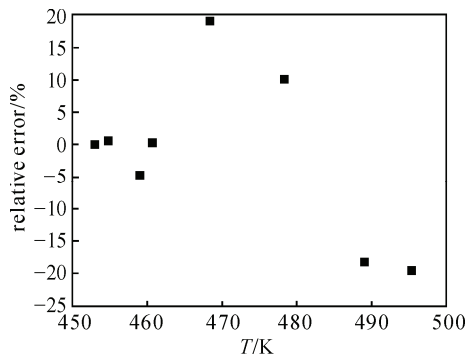


图 2 炸药 A 的温度及延滞期拟合图

2.1 不同温度区间的近似

2.1.1 温度小于临界温度

当温度接近临界温度或小于临界温度时，延滞

期远大于 14.769 91 min，以拟合方程 (1) 的计算值为真值，计算了舍去 14.769 91 min 的误差，见图 3。

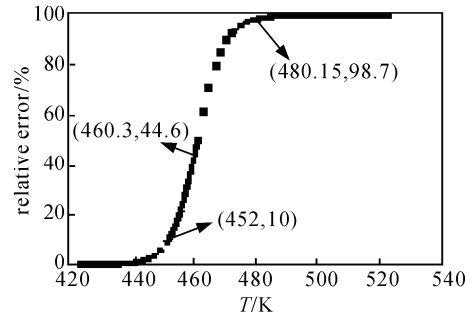


图 3 温度小于临界温度时采用近似的误差

由图 3 可知，当温度小于 452 K 时，采用近似的误差小于 10%，在温度 452.15~461.15 K 时，采用近似的误差在 10%~44.6%。由于试验的临界温度为 452.15 K，在试验中当温度低于 452.15 K 时，不能够观察到燃烧或爆炸现象即无法获得延滞期。

2.1.2 温度接近临界温度

当温度从临界温度的正方向接近临界温度时，由拟合方程 (1) 可得，特征临界温度处对应的延滞期为 117 min (它表示试验获得的特征临界温度处的延滞期，理论临界温度时延滞期为无穷大)。

2.1.3 温度大于临界温度

当温度远大于临界温度时，由方程 (1) 可知，温度越高，方程第二项趋于零，延滞期趋于 14.76 min。计算了高温下以拟合方程 (1) 为真值，舍去方程第二项的误差见图 4。由图 4 可知当温度大于 471.15 K 时，近似误差小于 10%，当温度大于 480 K 时，误差小于 1.2%，可以认为温度大于 480 K 时远大于临界温度。在实际试验时，温度选择过高，会使体系偏离于理论假设，也会使系统误差的相对比例增加。

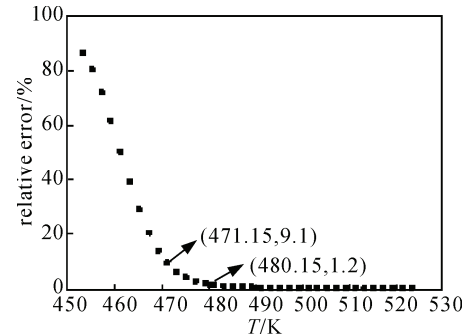


图 4 温度大于临界温度时采用近似的误差

2.2 利用有限个数据点外推时的误差

采用拟合方程 (1) 的数据做 $\ln t \sim 1 \ 000/T$ 图，

见图 5。

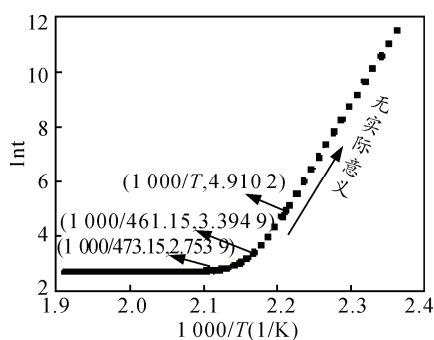


图 5 由拟合曲线获得的 A 炸药的 $\ln t \sim 1000/T$ 关系

由图 5 可知：炸药 A 在 452.15~461.15 K 温度内 $\ln t$ 与 $1/T$ 存在线性关系。为说明外推时数据的选择依据，以拟合方程为真值，在 452.15~461.15 K 选择 4 个和 3 个真实试验数据点，通过 $\ln t$ 与 $1000/T$ 的线性拟合方法外推其他温度下的延滞期。采用 4 个数据点和 3 个数据点拟合外推的误差见图 6。

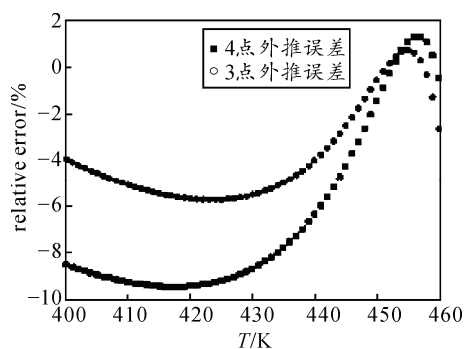


图 6 采用有限数据点外推的误差

由图 6 可知：在 $\ln t$ 与 $1000/T$ 满足线性关系的温度区间，采用有限个数据点外推时，不一定数据点越多结论就越准确。此处采用 3 点外推的误差小于 4 点外推的误差，这是由于采用 3 点外推时舍去了 460.65 K 数据，可从图 5 中解释，即越靠近临界温度的数据点线性关系越好，外推时误差越小。因此在试验中要利用有限个数据点去外推时，需获得临界温度附近的数据，越精确越多外推时误差越小。

2.3 临界区域

由均温系统的非稳定理^[15]可得：

$$\theta = \frac{T - T_a}{RT_a^2 / E} \quad (2)$$

$$t_{ad} = \frac{\rho C_v R T_a^2}{QEC_0^n A \exp(-E / RT_a)} \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{VQEC_0^n A \exp(-E / RT_a)}{\lambda S R T_a^2} \quad (4)$$

$$\varphi_{cr} = e^{-1} \quad (5)$$

炸药 A 的分解活化能可由 452.15~461.15 K 之间的试验数据通过 $\ln t$ 与 $1/T$ 线性拟合获得，数值为 291.623 kJ，热爆炸临界温度为 452.15 K。由式 (2) 可得 $T=460.5$ K，即体系临界升温 8.5 K。

令 $\frac{VQEC_0^n A}{\lambda S R T_a^2} = C_1$ ，由式 (4) 和式 (5) 可得：

$$\varphi = \frac{VQEC_0^n A \exp(-E / RT_a)}{\lambda S R T_a^2} = C_1 \times \frac{\exp(-E / RT_a)}{T_a^2} = \quad (6)$$

$$\varphi_{cr} = e^{-1}$$

可得 $C_1 = 3.657\ 55E+38$ 。

2.4 超临界区域

由非绝热系统的热爆炸可知，当分解机理函数 $f(\theta)$ 采用二次多项式近似，且 θ 趋于无穷大时，超临界区域 ($\varphi > \varphi_{cr}$) 的延滞期表达式为：

$$\tau_{ign} = \frac{t_{ign}}{t_{ad}} = \frac{2\varphi_{cr}}{[1 - (\varphi_{cr} / \varphi)^2]^{1/2}} \left[\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{\varphi_{cr} / \varphi}{[1 - (\varphi_{cr} / \varphi)^2]^{1/2}} \right] \quad (7)$$

为采取近似，计算了 $f_1(\varphi) = [1 - (\varphi_{cr} / \varphi)^2]^{1/2}$ 和 $f_2(\varphi) = \tan^{-1} \frac{\varphi_{cr} / \varphi}{[1 - (\varphi_{cr} / \varphi)^2]^{1/2}}$ 函数随温度变化关系 (图 7)。

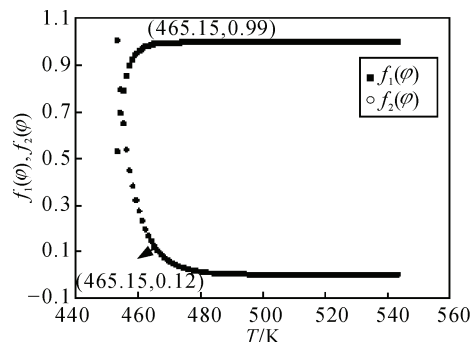


图 7 函数 $f(\varphi)$ 随温度的变化关系

由图 7 可见：当 T 大于 465.15 K 时， $f_1(\varphi) \approx 1$ ， $f_2(\varphi) \approx 0$ 。以拟合方程 (1) 为真值，计算了采用 $f_1(\varphi) \approx 1$ ， $f_2(\varphi) \approx 0$ 近似计算时的误差。温度大于 465.15 K 时，最大误差为 7.9%；温度小于 465.15 K 时采用上述近似误差会逐渐增大，温度在 450.15~460.15 K 时，误差 20%~100%。在采用上述近似后可得：

$$\tau_{ign} = \frac{t_{ign}}{t_{ad}} \approx 1.155\ 7 \quad (8)$$

上式当温度大于 465.15 K 时都成立，且最大误差为 7.9%，通过试验数据验证，证明此结论成立。将温度 465.15 K 代入公式 (1) 可得： $t_{ign} = 20.727\ 67$ min，将 t_{ign} 和 T 值代入式 (7) 中得 $t_{ad} = 16.525\ 592\ 37$ min，

即温度 465.15 K 下的绝热至爆时间约为 16.5 min。进而通过公式 (7) 可以获得任意温度下(大于临界温度)的绝热至爆时间。

2.5 热爆炸假设的前提验证

假定 $\frac{\rho C_v R}{QEC_0^n A} = C_2$, 则公式 (3) 变为

$$t_{ad} = C_2 \times \frac{T_a^2}{\exp(-E / RT_a)} \quad (9)$$

将温度 465.15 K, $t_{ad}=16.525\ 592\ 37\ \text{min}$, 代入上式, 可得常数 $C_2=8.24E-36$, 即

$$t_{ad} = (8.24E-36) \times \frac{T_a^2}{\exp(-E / RT_a)} \quad (10)$$

假定 C_2 为常数, 则可计算各温度下的 t_{ad} , 见图 8 所示。

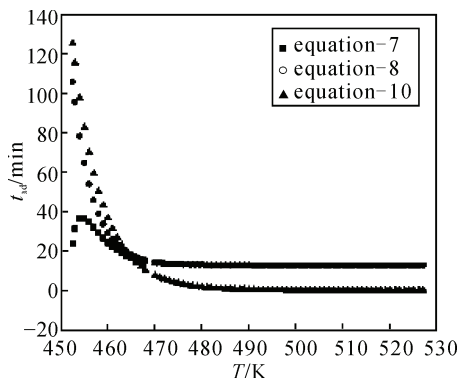


图 8 不同公式计算的绝热至爆时间

下面通过拟合方程 (1) 计算点火时间, 并由 $t_{ign}=1.155\ 7\ t_{ad}$ 计算大于 465.15 K 时的绝热至爆时间, 进而计算各温度下的 C_2 , 并以 465.15 K 下的 C_2 为真值计算各温度下 C_2 的相对误差见图 9。

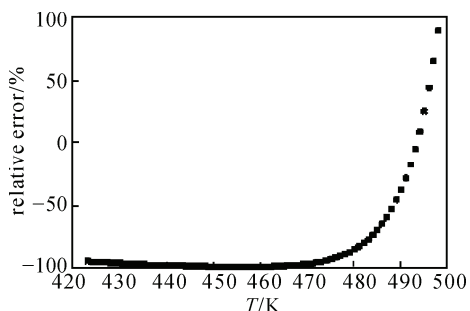


图 9 C 的误差与温度的关系

由图 9 可见: 温度低于 500 K 时, 可认为 C 为常数, 且最大误差为 100%。由以上分析可知: 在进行热爆炸试验时温度应该选择在热爆炸临界温度附近的温度区域, 超过一定的范围, 需要考虑假设条件更复杂的理论模型。

3 结束语

1) 对于炸药 A 而言, 在热爆炸试验数据处理时直接采用指数拟合温度与延滞期的关系时, 延滞期误差最大为 20%; 当温度大于 480 K 时可以认为是远大于临界温度, 近似处理时误差为 1.2%;

2) 在 452.15~461.15 K 温度范围内 $\ln t$ 与 $1/T$ 存在线性关系, 采用接近临界温度的试验数据外推时结果更准确;

3) 在运用热爆炸理论进行试验设计和数据处理时应注意该理论假设条件的适用温度区间。

参考文献:

- [1] 楚士晋, 郭明朝, 冯长根, 等. 非限定性药柱热爆炸研究[J]. 含能材料, 1994, 2(1): 1-6.
- [2] 郭明朝, 楚士晋, 冯长根, 等. 高能炸药药柱试验热爆炸的方法和结果[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 107-114.
- [3] 高大元, 张孝仪, 韦力元, 等. 炸药柱非限定性热爆炸实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 253-256.
- [4] 高大元, 韦力元, 彭强, 等. 炸药柱限定性热爆炸试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(3): 205-209.
- [5] 楚士晋. 炸药热分析[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 263-313.
- [6] Yoh J J, Mcclelland M A, Maienschein J L, et al. Simulating thermal explosion of cyclotrimethylenetrinitramine-based explosives: model comparison with experiment[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97, 083504: 1-11.
- [7] Yoh J J, Mcclelland M A, Maienschein J L, et al. Simulating thermal explosion of octahydrotetranitrotetrazine based explosives: model comparison with experiment[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100, 073515: 1-9.
- [8] Levitas V I, Henson B F, Smilowitz L B, et al. Coupled phase transformation, chemical decomposition, and deformation in plastic bonded explosive: models[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102, 113502: 1-14.
- [9] Tarver C M, Koerner J G. Effects of endothermic binders on times to explosion of HMX- and TATB-based plastic bonded explosives[J]. Journal of Energetic Materials, 2008, 26: 1-28.
- [10] 王沛, 陈朗, 冯长根. 不同升温速率下炸药烤燃模拟计算[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 47-49.
- [11] 牛余雷, 南海, 冯晓军, 等. RDX基PBX炸药烤燃试验与数值模拟[J]. 火炸药学报, 2011, 34(1): 32-36.
- [12] 陈朗, 王沛, 冯长根. 考虑相变的炸药烤燃数值模拟计算[J]. 含能材料, 2009, 17(5): 568-573.
- [13] 荆松吉. 凝聚炸药烤燃机理研究及二维数值模拟[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
- [14] 丁黎, 张腊莹, 王江宁, 等. 火炸药热爆炸临界温度试验系统[P]. 中国, CN201210051677.9. 2012.
- [15] 冯长根. 热爆炸理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 1-45.