

JO-9159 药柱的瞬态热应力研究

程源 郝莹

(中国工程物理研究院化工材料研究所)

摘要 本文应用有限单元法对 JO-9159 药柱的瞬态热应力分布进行了计算,并取得了有价值的结果,可用于生产和贮存药柱过程中对环境温度的控制,提供了避免药柱发生裂纹的方法。

关键词 有限元法 瞬态 热传导 温度分布 热应力

1 引言

热应力是炸药柱在生产、使用及库存期间产生裂纹的重要因素之一。造型粉在压制成型后常有冷却过程,在此过程中由于药柱温度分布不均而产生的热应力通常是造成炸药柱表面裂纹或裂缝的重要原因。药柱库存期间,由于昼夜温度变化,也会产生热应力,温度变化大时甚至会导致破裂。因而研究药柱的温度及热应力分布,对药柱的生产和存贮,具有很大的实际意义。由于对药柱热应力的实际测量存在一定的技术困难,而且如完全依靠实验测量耗费很大,因此有必要使用数值模拟的方法预测炸药所能承受的变温条件,从而为药柱成型后的冷却速率控制和库存条件的确定提供依据。有限元方法目前已广泛应用于各种工程和科学领域。我们把瞬态温度场分析和弹性应力问题结合起来,用于分析炸药瞬态热应力,并编制了相应的计算程序,经过与解析解对比后又用于炸药柱受热冲击的分析,所得结果和实验吻合良好。

2 瞬态温度及热应力有限元分析

有关结果表明^[1],当表面温度不是瞬间发生变化,而是在一个小的有限时间间隔内变化时,动力效应将大大减小,可采用准静力处理来求得非定常温度场引起的热应力。瞬态温度场有限元的矩阵方程为^[2]:

$$[K_s] \dot{T} + [K] T = P \quad (1)$$

式中: $[K_s]$ 是比热矩阵; \dot{T} 是结点温度的时间导数; T 是结点温度向量; $[K]$ 是有效热传导矩阵; P 是有效节点热流率向量。

方程(1)式中 $[K_s] \dot{T}$ 是非稳态导致的附加项。如此项为零即为稳态热传导,对稳态热

传导只需引入边界条件即可求解。

求解瞬态温度场必须引入初始条件,为此用有限差分法逼近一个时间相关参量 T 的一阶导数:

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_i = \frac{T_1 - T_0}{\Delta t}$$

式中: $T_1 = T(t + \frac{\Delta t}{2})$; $T_0 = T(t - \frac{\Delta t}{2})$; Δt 为时间步长,于是:

$$\left. \frac{d\tilde{T}}{dt} \right|_i = \frac{1}{\Delta t} (\tilde{T}_1 - \tilde{T}_0)$$

方程(1)式中的 \tilde{T} 和 \tilde{P} 可近似表为

$$\tilde{T} \Big|_i = \frac{1}{2} (\tilde{T}_1 + \tilde{T}_0)$$

$$\tilde{P} \Big|_i = \frac{1}{2} (\tilde{P}_1 + \tilde{P}_0)$$

于是得出瞬态温度场有限元的时域差分方程:

$$\frac{1}{\Delta t} [K_s] (\tilde{T}_1 - \tilde{T}_0) + \frac{1}{2} [K] (\tilde{T}_1 + \tilde{T}_0) = \tilde{P} \quad (2)$$

由(2)式即可引入初始条件。

由平衡方程^[2]

$$[K^*] \tilde{Q} = \tilde{F} \quad (3)$$

得到结点位移,再由方程求得单元应力。

$$\tilde{\sigma} = [D](\tilde{\epsilon} - \tilde{\epsilon}_0) = [D][B]\tilde{Q}^{(e)} - [D]\tilde{\epsilon}_0 \quad (4)$$

式中: $[K^*]$ 总刚度阵; \tilde{Q} 整体结点位移向量; \tilde{F} 总荷载向量; $[D]$ 弹性矩阵; $\tilde{Q}^{(e)}$ 单元结点位移向量; $[B]$ 应变矩阵。

按以上讨论,我们编制了求解热应力的通用程序,并与解析解进行了比较,二者吻合较好。

3 炸药柱瞬态热应力分析

3.1 JO-9159 药柱热冲击试验^[3]

为了测量 JO-9159 药柱 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 在热冲击(系指实验中由于条件所限允许有一定的样品转移时间,并非通常所指的瞬时热冲击的含义)过程中的内外温差和换热系数,在样品底部中心开了一个 $\varnothing 3\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的孔。将热电偶置于 $O(0,0)$ 点和 $S(R,0)$ 点处(图1)。将样品置于 50°C 的烘箱内达到

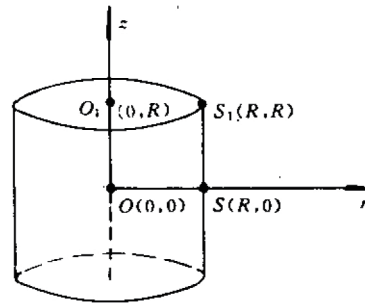


图1 热电偶位置示意图

Fig. 1 Scheme of thermocouples positions in the specimen

平衡后,分别快速放于 14°C 和 -20°C 的高低温试验箱内,作自然冷却。由热电偶测得中心及表面温差,其随时间变化如图 2 所示。同时测得该种炸药的自然热交换系数为 $10.98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

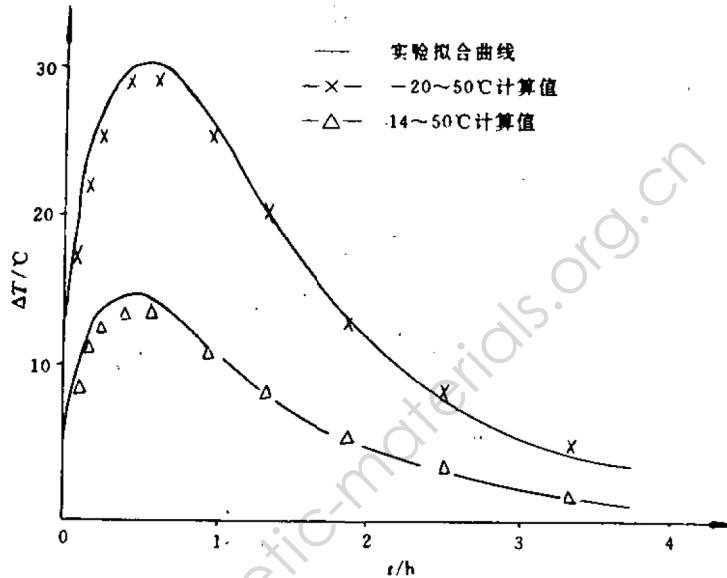


图 2 炸药内外温差与时间的关系曲线

Fig. 2 Temperature difference of explosive charge vs time curves at O and S points

3.2 JO-9159 药柱瞬态热应力分析

JO-9159 药柱属脆性固体,其拉伸弹性模量和压缩弹性模量以及抗拉强度和抗压强度均不相同^[4]。其 20°C 时抗拉、抗压强度分别为 4.84MPa 和 30.89MPa ,而拉伸弹性模量和压缩弹性模量分别为 11.37GPa 和 8.23GPa (16°C),差别较大。由于压缩强度远大于拉伸强度,在通常变温条件下所产生的压应力不会导致破坏,而通常裂纹是由拉应力所致。因而在考虑由热应力导致的裂纹或裂缝效应时主要研究拉伸应力,以拉伸弹性模量进行计算可以得到有意义的结果。JO-9159 药柱的另一个特点是其在脆性断裂前有较好的线性^[4],用线弹性计算能得到较好的结果。

炸药柱具有轴对称性,有限元计算时,用三角形剖面的轴对称单元。由于药柱和热流都具有对称性,只取 $r-z$ 剖面的 $1/4$ 进行剖分计算。有限元单元及网络划分如图 3 所示。

炸药柱初始处于平衡状态,然后置于低温条件下。药柱与空气为对流换热,换热系数随温度及尺寸变化很小,视为常数。炸药柱导热系数为 $0.369\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。瞬态温度计算采用变步长迭代求解,以减小初始时刻的振荡。初始时,步长为 30s 。在每一迭代过程中都计算出相应的热应力。图 2 绘出了在相同条件下 JO-9159 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 药柱的温差测量结果与有限元计算结果的比较,二者基本吻合。特别是随时间的延长,吻合更好。图 3 同时绘出了 JO-9159 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 药柱在 $50 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 的降温过程中, $t=15\text{min}$ 时的各结

点温度及等温线的计算结果。

在计算热应力时,考虑到降温过程并非瞬间完成,耦合效应大大减弱,因而在计算中略去了耦合项。图4、图5分别绘出了此时各结点环向和轴向应力分布和等应力曲线的计算结果。从计算结果来看,边界主要受拉应力,而内部以压应力为主(升温时情况相反)。从图中可以看到,此时边界已有部分区域的应力超出了药柱强度($\sigma_B=4.84\text{MPa}^{[4]}$)。在此条件下一共试验了八发样品,均为JO-9159 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$,其中一发出现了明显的开裂,裂纹方向既有环向(轴向拉应力所致),也有轴向(环向拉应力所致),和计算结果相符,其余七发虽未明显开裂,但可能出现了细微裂纹。

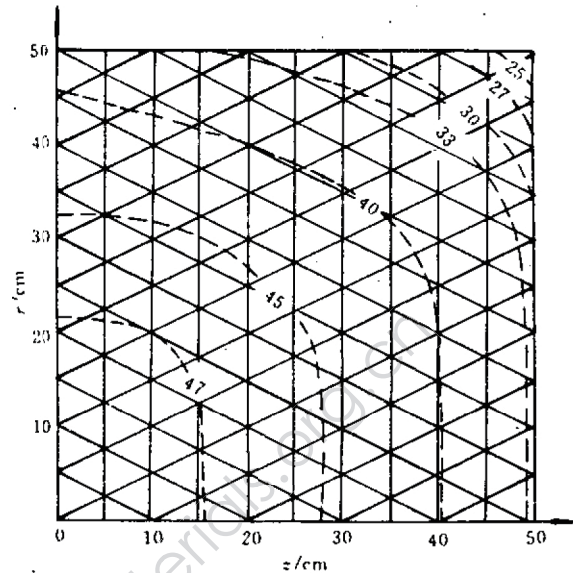


图3 有限元网格及 $t=15\text{min}$ 时等温线

Fig. 3 Finite element net and isothermal curves at $t=15\text{min}$

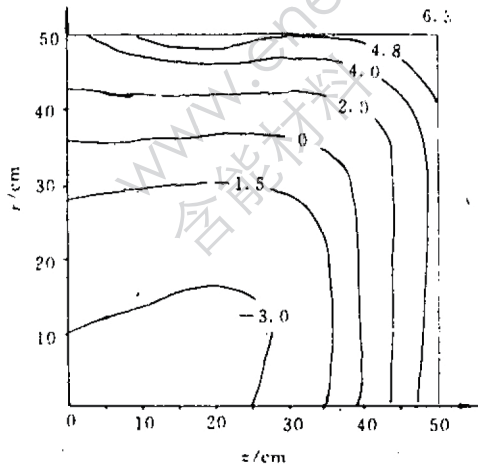


图4 JO-9159 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 药柱
环向等应力线

Fig. 4 Hoop iso-stress curves of
explosive charge

$$h=10.98\text{W/m}^2 \cdot \text{K} \quad E=11.37\text{GPa} \\ \alpha=5.17 \times 10^{-5}/\text{K} \quad \nu=0.224$$

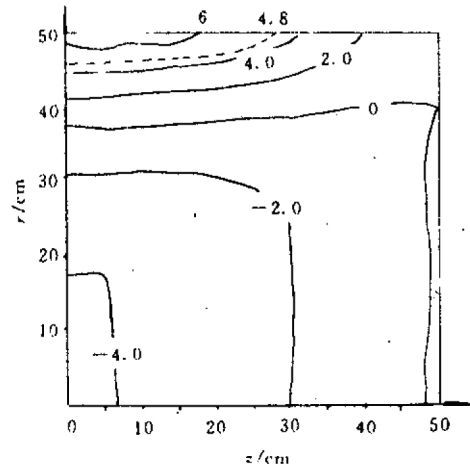


图5 JO-9159 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 药柱
轴向等应力线

Fig. 5 Axial iso-stress curves of
explosive charge

$$h=10.98\text{W/m}^2 \cdot \text{K} \quad E=11.37\text{GPa} \\ \alpha=5.17 \times 10^{-5}/\text{K} \quad \nu=0.225$$

图6、图7分别描述了 $\varnothing 50\text{mm} \times 50\text{mm}$, $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$, $\varnothing 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 和 $\varnothing 280\text{mm} \times 280\text{mm}$ 药柱的轴向及环向应力的最大值随时间变化规律,从图中可见,对于 50°C 的温差, $\varnothing 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 药柱的最大应力小于破坏强度, $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 以上药柱均大于破坏强度。

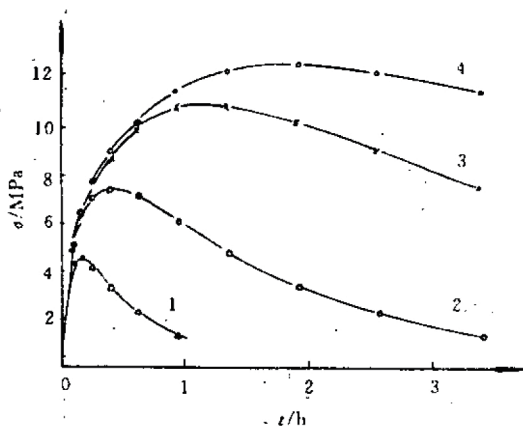


图6 轴向最大拉应力—时间曲线

Fig. 6 Axial stress(max) as a function of time

- 1— $\varnothing 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 药柱;
- 2— $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 药柱;
- 3— $\varnothing 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 药柱;
- 4— $\varnothing 280\text{mm} \times 280\text{mm}$ 药柱。

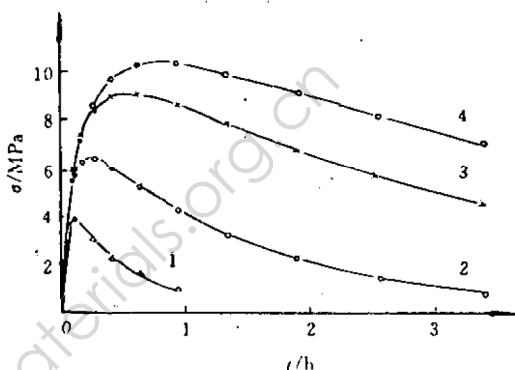


图7 环向最大拉应力—时间曲线

Fig. 7 Hoop stress(max) as a function of time

- 1— $\varnothing 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 药柱;
- 2— $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 药柱;
- 3— $\varnothing 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 药柱;
- 4— $\varnothing 280\text{mm} \times 280\text{mm}$ 药柱。

计算结果还表明,对于 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的JO-9159药柱,热冲击温差在 36°C 以下时各方向应力均小于拉伸强度。此时轴向和环向最大拉应力分别在 $S(R,0)$ 和 $S_1(R,R)$ 处,分别为 4.8MPa 和 4.4MPa ,对六发样品均为JO-9159 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 药柱进行 $50 \sim 14^\circ\text{C}$ 试验,均未出现裂纹。

4 结果与讨论

由于JO-9159药柱在常温及低温下是脆性固体,因而用弹性有限元分析已可得较好的结果。从而可以看出,为了减小成型后的药柱在降温过程中出现裂纹或裂缝,建议降温过程采用分段降温方法,对于不同类型及尺寸的药柱,每次降温的温度差可根据有限元法算出。例如,对于 $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ JO-9159药柱每次降温温差不大于 36°C ,每个降温段保持时间两小时左右。

综上所述,有限元法对于预见各种形状、尺寸的药柱所能经受的环境温度变化,以确定生产加工、使用和存贮中的温度条件,具有较大的应用价值。

参 考 文 献

- 1 杜庆华, 余寿文, 姚振汉. 弹性理论. 北京: 科学出版社, 1986.
- 2 Rao S S 著, 傅子智译. 工程中的有限元法. 北京: 科学出版社, 1991.
- 3 Hao Ying, Yang Yao. Studies on Thermal Shock Test for Cylinder Explosive. Proceedings of the 17th International Pyrotechnics Seminar Combined with the 2nd Beijing International Symposium on Pyrotechnics and Explosives. Beijing, 1991. 648~654
- 4 董海山, 周芬芬主编. 高能炸药及其相关物性能. 北京: 科学出版社, 1989.

STUDY ON TRANSIENT THERMAL STRESS OF JO-9159 EXPLOSIVE CHARGES

Cheng Yuan Hao Ying

(Institute of Chemical Materials, CAEP)

ABSTRACT The temperature distribution and thermal stress of JO-9159 explosive charges were calculated by the finite element method in this paper. Obtained results are suitable for controlling environment temperature to prevent the charges from cracking in producing and storing processes.

KEY WORDS finite element method, transient-state, heat conduction, temperature distribution, thermal stress.