

文章编号: 1001-2486 (2002) 03-0023-04

FCG 电枢膨胀过程流体计算*

杨汉武, 钟辉煌, 张建德

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 建立了爆炸磁压缩装置 (FCG) 的 2-D 轴对称有限元模型, 应用显式非线性动力分析程序进行求解, 得到了爆磁压缩装置电枢膨胀过程的图像。电枢使用 Johnson-Cook 材料模型和根据实验 Hugoniot 曲线确定的 Grüneisen 状态方程, 考虑到了材料应变率硬化和塑性功绝热加热过程; 炸药材料采用 JWL 状态方程, 得到了铝金属管电枢的膨胀过程、膨胀张角以及塑性功导致的电枢温度升高。

关键词: 爆炸磁压缩; 电枢; 有限元分析

中图分类号: O46 文献标识码: A

Hydrodynamic Calculation of the Armature Expansion Process

YANG Han-wu, ZHONG Hui-huang, ZHANG Jian-de

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

Abstract: A 2-D axisymmetric nonlinear explicit finite-element dynamic analysis program is applied to compute the armature expansion process of the magnetic flux compression generator (FCG). The temperature rising and thermal softening are considered as Johnson-Cook material is used for the armature. The results present the picture of expansion process of the armature, the expansion angle and temperature rising.

Key words: FCG; armature; FEA

爆炸磁压缩发生器 (FCG) 是一种把炸药化学能量转化为电磁能的脉冲功率源。在电感储能的应用上具有广泛的前途, 因为它储能密度高、结构简单、造价低。目前理论解析解已经可以估算出一些重要参数, 但是由于爆炸过程的复杂性和进一步提高 FCG 的输出效率, 仍然需要更深入地理解。

电枢的膨胀对磁场做功是螺旋型 FCG 工作的核心。例如电枢的膨胀张角直接关系到 FCG 装置的设计, 它可以依靠经验公式或实验得到, 但受经验公式的适用范围和实验结果的判断困难 (照相分辨精度有限) 的限制。如果使用流体力学程序, 选定恰当的材料模型, 可以比较准确地得到膨胀张角和其他信息, 对理解整个过程具有帮助。在这一方面已经有了一些初步的工作^[1], 但失之于模型过于简单: 一般采用简单的流体弹塑性模型, 没有考虑到应变率的影响和塑性功导致温度升高的影响, 而这些因素在爆炸过程中显然是存在的; 另外 Euler 网格算法较难给出变形的细致边缘图像。

本文利用显式非线性动力有限元分析程序^[2]细致地研究了其膨胀过程, 电枢材料采用包含应变率效应和温度效应的 Johnson-Cook 材料模型^[3]; 炸药材料应用程序起爆, 使用 JWL 状态方程 (EOS)。由于过程属于大形变过程, 在分析中应用了 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian 算法) 选项^[4]: 在 Lagrange 算法的优点上, 融进了 Euler 算法, 对变形巨大的网格进行重分, 以保证网格的质量。

1 有限元模型

螺线管的存在使得 FCG 本质上是 3-D 的; 但在螺线管密绕、特别是在仅计算电枢膨胀过程的情况下, 可以把 FCG 简化为 2-D 轴对称模型。由于 FCG 能量转换效率较低, 线圈磁场产生的磁压阻碍电枢的膨胀比起炸药爆炸的冲击作用要小得多, 故流体计算的结果仍具有很大的设计价值。

* 收稿日期: 2001-11-20
基金项目: 国家 863 高技术资助项目 (863-410-7)
作者简介: 杨汉武 (1974—), 男, 博士生。

图1给出了计算使用的初始网格,底边线为对称轴,右端为起爆面,突出的炸药柱用以模拟平面波发生器的作用。模型共有3360个四边形单元,4083个节点,炸药和金属应用不同的网格密度。模型几何参数为:电枢长490mm、内径50mm、外径57mm,炸药柱长510mm,其中炸药部分伸出,用以模拟平面波发生器的作用。柱锥形电感线圈在起爆端比电枢缩进80mm,目的是在形成稳定爆轰之后才与电枢接触;锥角 11.3° ,使用锥角的目的是提高电感变化率,以达到FCG有较高的电压输出。这里对其也划分了网格,但其并不参加计算,网格的作用是直观地看出电枢膨胀与其接触效果。

炸药和电枢之间使用仅滑动接触选项。由于炸药柱突出于电枢之外,故此在计算最初接触点时导致电枢网格的较大变形,从而计算不可继续。故此在计算过程中应用重启动分析,在删除失效的单元后继续。

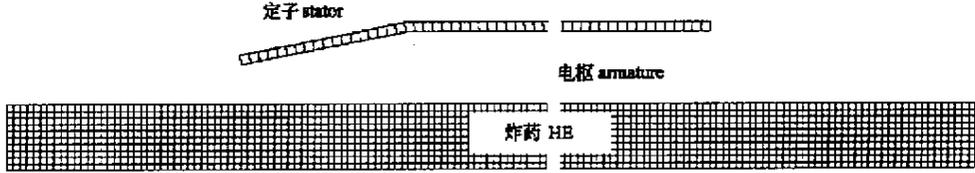


图1 计算初始网格

Fig.1 Initial calculating mesh

2 材料模型

在电枢膨胀过程中,应变率可能达到 $10^4 s^{-1}$,故材料模型中应考虑应变率的影响;大变形所产生的热量使得金属升温显著,故模型也应该包含温度效应。Johnson-Cook模型具有这些特点,并已经很成功地应用于战斗部设计。该模型把塑性流动应力 σ_f 作为等效塑性应变 ϵ 、应变率 $\dot{\epsilon}$ 和温度 T 的函数:

$$\sigma_f = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ 为无量纲塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0 = 1 s^{-1}$; $T^* = \frac{(T - T_{room})}{(T_{melt} - T_{room})}$ 是无量纲温度, T_{room} 是室温, T_{melt} 是金属的熔点。Johnson-Cook模型中的五个参数分为三个乘积项。第一项表示应变硬化,其中 A 理解为屈服强度, B 为应变硬化系数, n 是应变硬化指数;第二项是应变率因素, C 理解为应变率硬化系数;第三项表示温度的软化作用, m 为热软化系数。

金属电枢EOS使用根据实验Hugoniot曲线标定的Grüneisen状态方程,它与能量具有线性关系:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\gamma_0 \eta}{2} \right) + \gamma_0 \rho_0 E_m \quad (2)$$

式中, c_0 和 s 是定义激波速度 U_s 和粒子速度 U_p 关系的系数: $U_s = c_0 + sU_p$; $\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$ 为体积正应变; γ_0 是Grüneisen系数。

炸药爆轰产物使用JWL状态方程:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

其中 ω 、 A 、 B 、 R_1 和 R_2 是与炸药有关的参数。

电枢材料为铝,模型参数如表1所示。

表1 电枢材料参数

Tab.1 Material parameters of armature

密度 (kg/m^3)	比热 ($J/kg \cdot K$)	熔点 (K)	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	剪切模量 (GPa)	c_0 (km/s)	s	γ_0
2750	905	920	116	69	0.58	0.016	1.13	26.4	5.39	1.34	2.25

在 FCG 的实验中使用 8701 炸药，其参数见表 2。

表 2 8701 炸药参数

Tab.2 Parameters of 8701 explosive

密度 (kg/m ³)	CJ 压力 (GPa)	爆速 (km/s)	A (GPa)	B (GPa)	ω	R_1	R_2	能量密度 (GJ/m ³)	$\sqrt{2E_g}$
1.20	13.1	6.6	255.9	8.9	0.32	4.5	1.5	6.2	2.425

3 计算结果与分析

图 2 所示为电枢在不同时刻的形变和压力分布，可见电枢在与定子接触时 (28 μ s) 已经达到定常爆轰，在电枢膨胀到其直径 2 倍之前呈光滑锥形，并可得到锥形张角为 15.2°，大于定子的锥角。图 5 为电枢表面各点的膨胀速度，可见电枢膨胀很快达到最大速度。

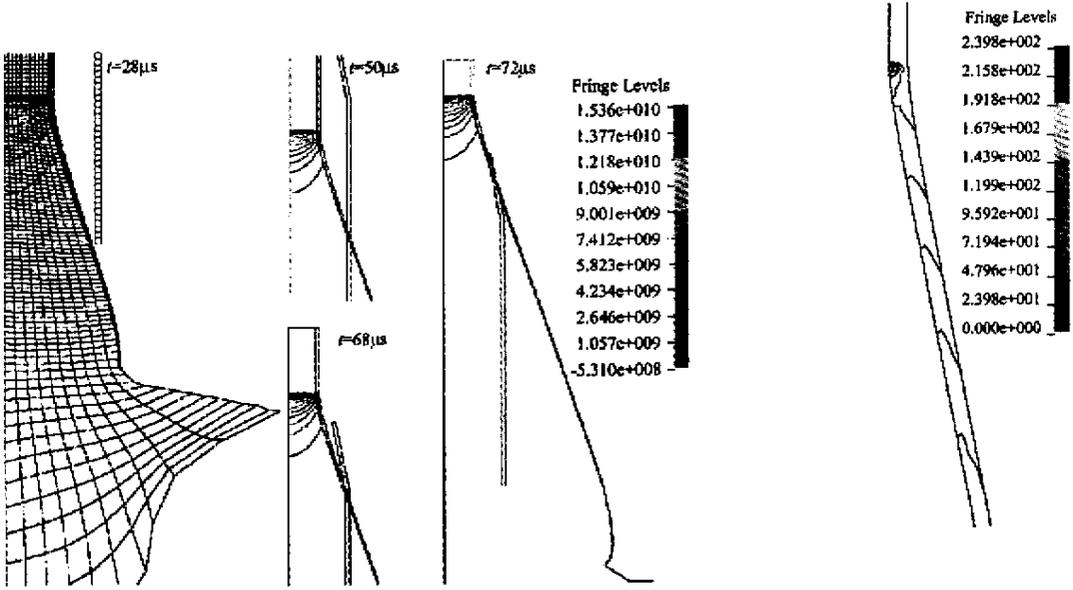


图 2 电枢在不同时刻形变和压力分布图 (单位: Pa)

Fig.2 Deformation and pressure distribution at various time

图 3 $t = 54\mu$ s 时电枢温度分布 (单位: °C, 减去室温)

Fig.3 Temperature distribution at $t = 54\mu$ s

图 3 所示为在某时刻 (54 μ s) 电枢温度空间分布，在爆轰波阵面处电枢内表面和电枢膨胀剧烈处温度较高。图 4 为电枢某处 (离起爆端 8cm) 温度随时间变化的关系：在爆轰面上电枢内壁 (图 4 中曲线 A) 首先有较大的升温然后迅速下降，这主要是冲击波的压缩作用造成的，而在电枢的外表面 (图 4 中曲线 B)，冲击压缩则不明显。但随电枢继续膨胀，温度在单调升高，这是由于塑性功的结果。计算时取初始温度为室温。

在起爆点位置，电枢内壁的温度剧烈升高 (将近 100°C)，但其外壁温升则不明显；在电枢与定子接触时，其温度升高仅约 50°C。由于电枢镜像电流主要集中在金属外表面趋肤深度层中，故冲击加热的影响甚微。所以，单纯由于塑性功加热导致的电导率下降并不显著 (考虑到电流产生的 Joule 热常可使温度升高数百度)。又根据文献 [5]，电枢被压缩使得金属晶格振动减小，有利于增加电导率，故塑性功影响要更低一些。

图 5 还显示了膨胀速度趋于一稳定的最大值，它实际上可以根据 Gurney 公式^[6]算出。 $\sqrt{2E_g}$ 是 Gurney 能量，对一端起爆的圆柱形装药，金属圆筒膨胀的最大速度为：

$$v_m = \sqrt{2E_g} \left(\frac{1}{2} + \frac{M}{C} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中， M/C 为金属和炸药的质量比。计算得到 $v_m = 2260\text{m/s}$ ，这与图 5 是吻合的。

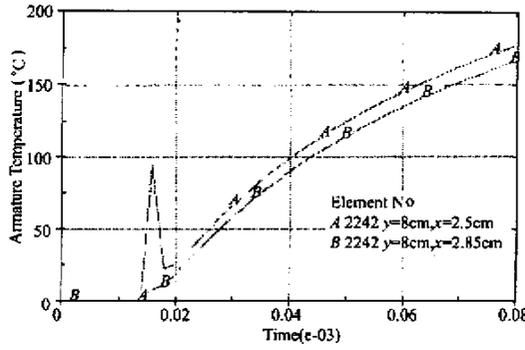


图4 电枢表面某处温度随时间关系 (减去室温)

Fig.4 Temperature changes with time at inner and outer surfaces of the armature (minus room temperature)

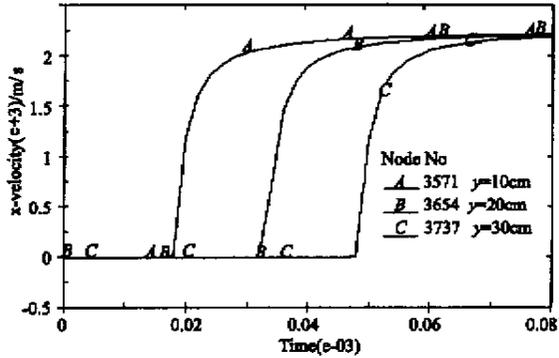


图5 电枢表面不同位置处膨胀速度

Fig.5 Expansion velocities at various locations of the armature

4 结论

计算给出了电枢的膨胀图像和膨胀张角,结果表明定子设计过于保守。为了实现电感的迅速变化,应该增大定子的锥角;或者在保持圆筒膨胀速度的情况下,提高爆速,则可以使圆筒的张角减小以与定子配合;并且电枢突出定子的长度也可以减小,从而减少药量。Johnson-Cook 材料模型给出的电枢温度表明,对于本例中铝材料电枢由于温度升高对电阻率的影响是较小的,实验设计中更应该考虑电流的焦耳热作用导致的电导率下降。

进一步的计算还可以考察其他电枢几何参数的结果,或采用铜做电枢材料的结果。本文的计算对指导 FCG 的设计,减少装药,提高 FCG 效率有所帮助。

参考文献:

- [1] 贝新源. 爆磁压缩发生器爆炸作用数值模拟 [A]. 高功率微波会议文集. 北京, 1993.
- [2] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual [M]. Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [3] Holmquist T J, Johnson G R, Cook, W H. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures [A]. Proc. 14th Intl. Symposium on Ballistics, Quebec, Canada, 1993, 591-600.
- [4] 恽寿榕, 涂候杰, 梁德寿等编. 爆炸力学计算方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [5] Knoepfel H. Pulsed High Magnetic Fields [M]. North-Holland Publishing Company, Amsterdam. 1970: 276.
- [6] Gurney R W. The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells, and Grenades [R]. BRL Report, 1943: 405.

