

压剪加载下炸药装药中剪切带形成与发展模型^{*}

卢芳云 薛鸿陆

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 研究了在压剪加载下炸药这类粘塑性介质中剪切带的形成与发展。提出了一种反映炸药装药中剪切带形成和发展的计算方法,并分析了剪切带发展变化特性与炸药起爆的关系。

关键词 剪切带, 炸药装药, 压剪加载

分类号 O 382. 4

The Formation and Development of Shear Bands in Explosives under Combined Compression-shear Loading

Lu Fangyun Xue Honglu

(Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract A calculation model of shear bands is proposed in this paper to describe the formation and development of the shear bands in viscoplastic materials, such as explosives, when they are acted by Combined Compression-shear Loads. The calculation results in a further recognition of the shear bands. Further more, the relationship between variation features of the shear bands and initiation of the explosives are discussed.

Key words shear band, explosive charge, combined compression-shear loading

大量证据表明不均匀的剪切变形或剪切带化,以及伴随的瞬变非均匀温度效应,是几乎所有固体受冲击波压缩后都存在的一种普遍现象^[1]。从原理上讲,当一种固体材料,包括金属和炸药装药,受到快速剪切塑性流动时,可能发生两种变形过程,一是应变硬化效应过程,二是热软化效应过程。它们都影响材料的应力-应变行为,而且都与塑性流动速度有关。流动的早期,应变硬化的主宰作用使变形均匀化;当热软化超过应变硬化后,可观察到流动的变形状态从均匀化向非均匀化的转变。这种不均匀变形状态的特点是,持续的变形与能量耗散向一个局部区域,即剪切带中集中。剪切带的发展,可造成不均匀的

* 1995年5月20日收稿。

热状态。对于金属材料,可观察到这个局部化区域中的组织变化如相变等,而对于炸药装药则只能预计由此诱发起爆的可能性。因此,研究这个问题对于探讨炸药装药在压剪加载下起爆机制,解释其起爆响应规律有着十分关键的作用。

本文将从一个较直观简单的模型出发,计算炸药装药中剪切带的形成的发展,分析炸药对压剪加载的响应特性以及剪切带起爆机制的现实性。

1 一个剪切带形成与发展模型

1.1 剪切带的形成过程

假定试件中某处在跨度为 d 的范围内可能形成一个剪切带。初始时刻 t_0 , 试件中处于均匀的剪切变形状态, 有应变率 $\dot{\gamma}$ 。剪切带的形成意味着变形开始不均匀, 耗散能量向一个局部集中, 造成这部分的应变率增加到 $\dot{\gamma}_t$, 这个局部的宽度在 t 时刻为 a , 即剪切带宽度。图1是剪切带形成的模型, 此模型假定剪切带内外各自呈均匀分布状态, 且只与时间有关。

1.2 形成剪切带的初始状态

形成剪切带的初始状态由平面压剪波的作用造成, 假定压剪波形成了材料中的总功率

$$\dot{E} = \sum \sigma_j \dot{\epsilon}_j \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

其中 $\dot{\epsilon}_i$, σ_i 为应变率张量和应力张量分量, 代入平面压剪波后状态, 得到 $\dot{E} = \dot{E}_d + \dot{E}_p$ 。 \dot{E}_d 是单位体积耗散能量率, 反映了畸变功率; \dot{E}_p 是单位体积压缩能量率, 反映了压缩功率。剪切带形成是由于耗散能量的局部化集中引起的, 故假定这部分能量全部向剪切带中集中, 造成了剪切带中能量率密度为 $\dot{E}_l = \dot{E}_d d / a$

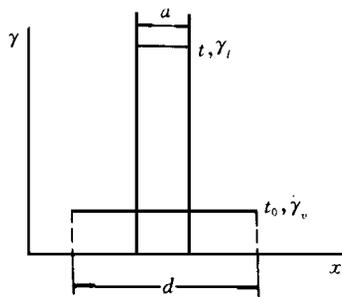


图1 剪切带形成模型

压缩能量在剪切带形成过程中不发生重新分配, 剪切带内外同时分享这部分能量。

1.3 剪切带形成与发展过程中的能量守恒^[2]

在剪切带内部, 单位体积内能的变化率为 $\rho \dot{E}_s = \rho C_v \dot{T}_s$; $\rho \dot{E}_s$ 是压缩功率 \dot{E}_p , 畸变功率的集中 \dot{E}_l , 可能引起的化学反应释放能量率 $\rho \dot{Q}$, 热扩散率 q 和由于剪切带宽 a 变化引起的质量流交换造成的热交换 $f(a) \rho C_v$ 的联合贡献, 于是具体表达式写成

$$\rho C_v \dot{T}_s = \dot{E}_l + \dot{E}_p + \rho \dot{Q} + q + f(a) \rho C_v \quad (3)$$

其中 ρ 为材料密度, T_s 为剪切带中温度, C_v 为比热, 式中点号表示对时间求导。选择 Arrhenius 关系式表示 \dot{Q} , 即 $\dot{Q} = Q_0 A \exp(-E_d / T_s)$

$$q = -k \dot{\gamma}^2 T = -4k \frac{T_s - T_B}{a^2} \quad (5)$$

其中 T_B 为剪切带外温度, k 为热传导系数。 $f(a)$ 也简单表示成

$$f(a) = -\frac{\dot{a}}{a} (T_0 - T_B) \quad (6)$$

剪切带区域外的能量平衡不考虑畸变功率的贡献, 并假定不会发生化学反应, 因此

能量守恒方程写成 $\rho C_v \dot{T}_B = \dot{E}_p + q + g(a) \rho C_v$ (7)

其中 $q = -q \frac{a}{d-a}$, $g(a) = -\frac{a}{d-a} (T_s - T_B)$ (8)

值得说明的是, 在 $\dot{a} < 0$ 时, 剪切带宽变窄, 从剪切带中分离中的热物质将使带外区域获得这部分热物质带来的能量, 但对剩余的剪切带内区域没有直接影响; 相反 $\dot{a} > 0$, 则影响主要针对带内区域, 对带外没有直接影响。因此有

$$\dot{a} > 0 \text{ 时, } \begin{cases} f(a) = 0 \\ g(a) = 0 \end{cases}; \dot{a} < 0 \text{ 时 } \begin{cases} f(a) = 0 \\ g(a) = 0 \end{cases}$$

剪切带的形成与发展使带内区域处于温度为 T_s , 应力为 τ , 剪切应变率为 $\dot{\gamma}$ 的均匀状态; 带外则处于温度 T_B , 剪切应变率为零的状态, 在两者边界上发生状态突变。这个模型直观反映了剪切带的形成特点, 但是与真实情况仍有一定差距。

1.4 剪切带中材料的本构关系^[3]

剪切带中的材料用热粘塑性本构关系描述如下:

$$\tau = Y + \mu \dot{\gamma}_t \quad (9)$$

其中 Y 是材料强度, μ 是粘性系数, 它们都是温度 T_s 的函数。

剪切带中的耗散能量率密度写成 $\dot{E}_l = \tau \dot{\gamma}_t$ (10)

已经熟知的规律是, 剪切带中的应力由于热软化而下降, 可用如下幂指数形式表示

这个性质, 即 $\tau = \tau_0 \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^n$ (11)

其中 n 与材料有关, T_0 为初始温度。从 (9), (10) 和 (2) 得出剪切带宽度 a 的表达式

$$a = \frac{d \mu \dot{E}_d}{(\tau - Y) \tau} \quad (12)$$

此式表明了 a 是温度 T_s 的函数。

解出 $\dot{a} = B d \dot{E}_d T_s$ (13)

其中 $B = \left[\mu - \frac{\mu(2\tau\tau - \tau Y - \tau Y)}{\tau(\tau - Y)} \right]$

$/[\tau(\tau - Y)]$ 。

() 表示对 T_s 求导。由 (1) ~ (8) 及 (13) 联立, 组成了以 a, T_s, T_B 为函数, 以时间 t 为自变量的常微分方程组, 积分求解此方程组, 可得到在剪切带形成与发展过程中剪切带宽度 a 和温度 T_s, T_B 的变化规律。

2 计算结果

计算中的参数选择和部分公式参考了文献^[3], 即

$$Y = Y_0 \frac{T_m - T_s}{T_m - T_0}; \mu = \mu_0 \exp\left(\frac{P}{P_0}\right) \exp\left(\frac{E}{T_s} - \frac{E}{T_0}\right); T_m = T_{m0} + k_0 P$$

T_{m0}, Y_0 为常态下的材料熔点和强度。各参数选取见表1。

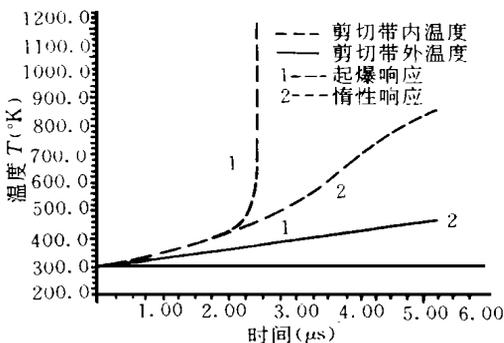


图2 剪切带发展过程中温度计算

表1 计算参数的选择(T/r(40/60)炸药)

Q_a (Cal/g)	A (1/s)	E_a (K)	Y_0 (GPa)	T_0 (K)	μ_0 (Pa s)	P_v (GPa)
300	$2.51E11$	6700	0.3	300	$1.39E-2$	0.095
E (K)	T_{m0} (K)	K_0 (K/GPa)	ρ (g/cm ³)	K (J/m K s)	C_v (J/kg K)	n
3880	385	200	1.690	0.262	$1.29E3$	3

计算得到了由图2、图3表示的剪切带内外温度和剪切带宽度 a 的变化曲线。计算的初始状态参考了75°角倾斜角平行倾斜碰撞造成的压剪加载条件,并认为入射压剪波宽度足够大。从图2表示的剪切带温度变化史可以判明,在加载强度足够高时,将形成剪切带。剪切带中的温度发展变化可能造成热爆炸的条件,见图中曲线1所示。由此可以说明

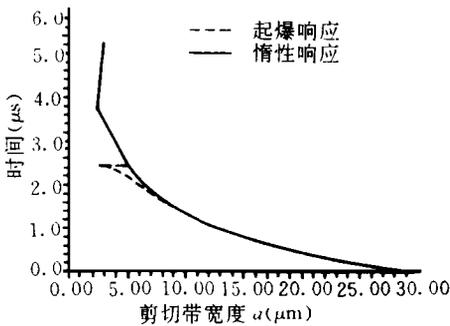


图3 剪切带发展过程中剪切带宽度计算

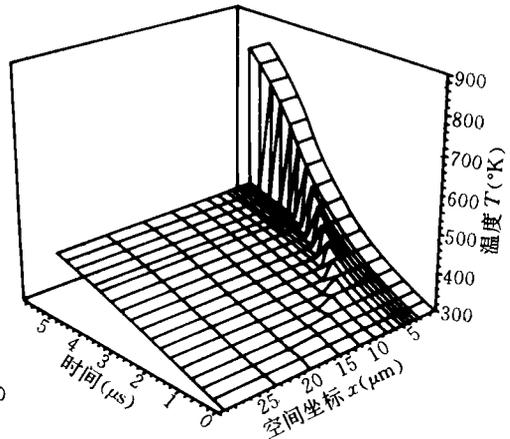


图4 剪切带的形成过程

压剪加载下炸药中形成剪切带。如果加载压剪波宽度受限,比如小于剪切带中诱发热爆炸的时间,尽管形成剪切带是可能的,但炸药起爆则受到控制。当加载条件很弱时,剪切带的形成受到阻止,这时剪切带中的温度变化趋势从图2的另一组曲线2线可以看出,显然温度的发展趋向于一种平衡的热状态。另一方面,从图3的带宽 a 变化曲线可以看到,对前者(发生爆炸)的情况,剪切带宽度发展到一定程度,即发生热爆炸,计算受阻;而后者(不发生爆炸)的情况,带宽 a 则由 $a < 0$ 的剪切带形成过程向 $a > 0$ 的剪切带内外平衡过程发展。图4给出了更加直观的剪切带形成图像。计算得到的剪切带形成图像,与已有的关于剪切带的理论和实验所描述的现象相符^[1,3]。这说明我们的计算模型是合理的。这个剪切带理论能较好地说明压剪加载下炸药的起爆响应规律。

参 考 文 献

- Grady D E, Kipp M E. J. Mech. Phys. Solids, 1987, 35(1): 95
- Swegle J W, Grady D E. Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in Materials. Meyer M A, Murr LE, 1992. 705 ~ 722
- Frey R B. The Initiation of Explosive Charges by Rapid Shear. AD- AO 90391, 1980

(责任编辑 卢天贻)