

文章编号: 1001-1455(2004)03-0285-04

爆炸复合中起爆区不定常段的确定*

王铁福

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 对2[#]岩石炸药的定常爆轰形成过程进行了实验研究; 对起爆端稀疏波效应进行了计算。实验结果表明, 距起爆端约10倍装药厚度以内为不定常爆轰区。距离起爆端小于5倍装药厚度时, 飞板速度及碰撞角增幅较大, 5~10倍装药厚度, 两者增幅趋缓, 10倍装药厚度以后, 爆速、飞板速度及碰撞角逐步进入定常状态。飞板碰撞角的工程计算与实验结果的一致性较好。

关键词: 爆炸力学; 不定常爆轰; 爆炸复合; 2[#]岩石炸药; 起爆端效应

中图分类号: O389 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

1 引言

在爆炸复合作业中, 除了复板两侧和末端由于边界效应, 经常出现边界不焊的现象外, 在起爆端的一定范围内也经常会出现不焊或焊接质量差的区域^[1~3]。这种现象在大型超厚爆炸复合板的作业中尤为严重。出现这种现象后, 人们不得不将未焊或焊接质量差的区域切除或进行修补, 造成了材料的极大浪费。消除这些现象, 提高爆炸复合质量和复合率, 是目前国内外在大型超厚爆炸复合板生产领域急待解决的难题。

本文中以不锈钢/普碳钢大型厚板坯的爆炸复合为研究对象, 通过实验, 测试了2[#]岩石炸药从起爆开始到形成定常爆轰过程中爆速的变化, 分析了爆速的不定常对其它动态焊接参数的影响, 计算了起爆端稀疏波效应对定常爆轰的影响。这项工作对大型超厚爆炸复合板的产业化生产具有指导价值。

2 起爆端爆速增长过程试验及其结果分析

在一定的装药条件下, 炸药的爆速为一定值, 即每种炸药都有自己稳定的最大特征速度, 但是, 炸药并不是在引爆瞬间就能立刻达到这一最大特征速度, 从起爆开始到形成定常爆轰, 中间要经历一段不定常爆轰过程, 这个不定常爆轰段称为不定常爆轰区。不定常爆轰区的大小不仅与炸药本身的性能有关, 同时还与起爆能量、装药结构等有关。当传入主装药的冲击波波速大于主装药的特征速度时, 在主装药前部有一段大于特征速度的不定常爆轰区, 且传入的冲击波波速与特征爆速差值越大, 不定常爆轰区也越长。如果传入主装药中的冲击波波速低于特征爆速而大于等于临界爆速, 则它要逐步成长为正常爆轰, 并以最大特征爆速传播, 传入的冲击波速度与特征爆速相比越小, 爆轰成长期越长。当传入的冲击波速度大于装药本身的音速, 而小于装药的临界爆速时, 由于冲击波的强度不足以引起主装药自动加速的化学反应, 因而迅速衰减为音波, 装药不能发生爆轰。

在大型厚板及超厚板的爆炸复合作业中, 由于装药厚度的增加, 装药面积增大, 起爆端效应对焊接质量的影响也大大增加。为了了解大型、厚装药结构起爆以后, 定常爆轰形成的过程以及对爆炸复合的影响, 设计了如下实验方案。

实验采用2[#]岩石炸药, 其松装密度为0.7g/cm³。选普碳钢板作为飞板, 板厚15mm、宽300mm、长1500~3000mm。实验时把炸药平铺在作为飞板的普碳钢板上, 药厚60mm, 在装药一端, 采用8[#]雷管

* 收稿日期: 2003-06-17; 修回日期: 2004-03-23

作者简介: 王铁福(1946—), 男, 教授。

直接起爆炸药。炸药的爆速采用探针结合脉冲计数器进行测试,脉冲计数器的时间精度为 $1\mu\text{s}$,实验在地下 193m 的废矿巷道中进行。

图 1 用黑方点标出了所有实验数据。图中的 x_0 为测试点到起爆点的距离, v_d 为爆轰速度。将试验数据利用指数函数进行拟合,得到拟合的指数函数 $v_d = 3883.5e^{-43.24/x_0}$,此函数曲线也在图 1 中示出。从图中可以看到,在距起爆端 600mm 即 10 倍装药厚度以后,爆速逐步进入稳定状态。

为了解飞板在起爆端碰撞角的变化,可根据拟合曲线 $v_d = 3883.5e^{-43.24/x_0}$ 利用下面飞板的爆炸驱动公式^[4]

$$v_p = 0.612Rv_d / (2 + R)$$

求得飞板的运动速度,根据飞板速度可进一步计算在给定炸药下的碰撞角 β 。式中 R 为装药比,即单位面积炸药质量与单位面积飞板质量之比。计算时,首先将飞板自起爆点开始分成若干微元,逐一计算相应每一微元驱动速度和在不同时刻的位移,当第 n 个微元与基板碰撞后,计算出第 $n+1$ 个微元的空间位置,利用简单的几何运算,便可求得相应的碰撞角 β 。图 2 描绘了炸高为 12mm 时,碰撞角 β 随 x_0/δ 的变化曲线, δ 为装药厚度。

从图 2 中曲线的变化可以看出,在距起爆端 5 倍装药厚度范围内,碰撞角 β 增加较快,5~10 倍装药厚度区间增加趋缓,10 倍装药厚度以后逐步趋于稳定状态。

根据爆炸复合理论可知,爆炸复合最主要的参数有三个,即飞板速度、动态碰撞角、炸药爆速,而这三个参数之间又满足一定的几何关系,因此爆速的变化会引起相关飞板速度、碰撞角的变化。从上述实验可以看出,在不采取任何技术措施的情况下,由雷管直接起爆岩石炸药,炸药爆速经历一个逐渐增加过程,且增幅越来越小,直到获得其特征速度。与定常爆轰相比,爆速以及飞板速度的增加导致碰撞角的减小,爆速增幅越大,相应的碰撞角也越小。随着爆速增加的幅度越来越小,碰撞角也逐渐趋于一个最大值。由此看来,起爆端是否能够焊接与不定常爆轰所引起的飞板速度、动态碰撞角等焊接参数的变化有很大关系,如果其变化范围仍在可焊窗口之内,则焊接是可行的,一旦不在可焊窗口之内,则焊接失败。

为了消除起爆端的不焊现象,有些专家采取适当增加装药比的方法,这对于薄板的爆炸复合是可行的,但对厚板以及超厚板的爆炸复合却不可取。因为厚板以及超厚板的爆炸复合窗口很小,增加装药比,虽然可以弥补起爆端飞板的速度以及碰撞角的不足,但当炸药进入定常爆轰后,很可能使后面的焊接参数超出焊接窗口的上限条件而中断焊接。

3 起爆端效应的工程计算

在进行爆炸复合参数设计时,通常假定装药具有足够的宽度,爆轰波阵面已远离起爆端,来自宽度方向的稀疏效应和起爆端的稀疏效应不予考虑。然而在实际问题中并非如此。在起爆瞬间,来自装药上自由表面的稀疏波、装药宽度两侧的稀疏波以及起爆端的稀疏波同时向装药轴心传播,这时起爆端的稀疏效应不能忽略。如前所述,炸药从起爆开始到形成定常爆轰,中间要经历一段不定常爆轰过程,这个不定常爆轰过程与来自起爆端的稀疏效应密切相关。从炸药起爆到形成定常爆轰是一个非定常过程。随着爆轰波远离起爆端,起爆端稀疏效应逐渐减弱,在足够远处便可忽略,此时才可简化为定常问题进行处理。

对起爆端效应进行理论分析,首先要建立爆轰流场的理论计算模型。但要精确给出解析模型是相

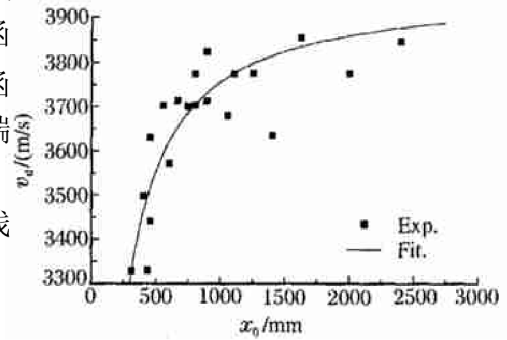


图 1 爆速试验数据和拟合函数的曲线
Fig.1 Experimental data for detonation velocity and the fitted curve

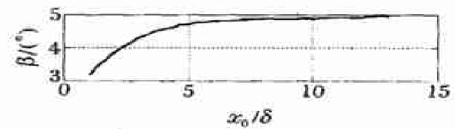


图 2 β 角与 x_0/δ 的关系曲线
Fig.2 The relation curve between β and x_0/δ

当困难的。这里采用文献[5]提出的二维近似解析方法,对起爆端效应进行理论计算。图3为爆轰流场的示意图。图中,爆轰波阵面与复板的交点 O 为坐标原点,从坐标原点开始指向起爆点的水平方向为 X 轴方向, x 为流场中任意一点到爆轰波阵面的水平方向距离, x_0 为爆轰波阵面到起爆点的距离, β 为复板的弯曲角, δ 为装药厚度, $O'R$ 为爆轰产物在空气中产生的冲击波, $O'D$ 为爆轰产物与空气的界面。在滑移爆轰作用下,爆轰产物上自由表面的飞散过程可以应用普朗特-梅耶绕流理论来描述;飞板弯曲引起流速的偏转可以用赖埃脱黑尔(Lighthill)的活塞理论来描述。起爆端的稀疏效应,根据“一维开管爆轰”的自模拟衰减规律进行处理,据此可得流场的压力表达式为

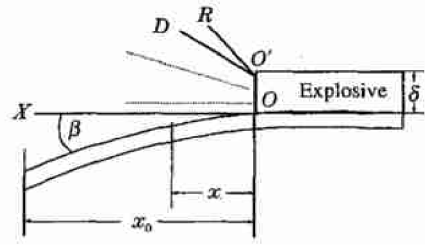


图 3 二维爆轰流场示意图

Fig.3 Two dimension detonation fluid

$$\frac{p}{p_{cj}} = \left| \left| 1 - \frac{x}{\delta} \left/ \left| \frac{x_0}{\delta} \right| + \frac{1}{\gamma_H - 1} \right| \right| \left/ \left| \frac{\gamma_H}{\gamma_H - 1} \right| \right| \left| \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 - 1} \right| \cos \left[\sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right] - \frac{(\Delta q)_y}{c_H} \frac{\gamma_0 - 1}{2} \left| \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 - 1} \right| \quad (1)$$

式中

$$\frac{(\Delta q)_y}{c_H} = \sqrt{\frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0 - 1}} \left[1 - \frac{2}{\gamma_0 + 1} \cos^2 \left[\sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right] \right]^{1/2} \cdot \left\{ \cos \left[\tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0 - 1}} \right] \tan \left[\sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right] + \tan^{-1} \frac{\delta}{x} \right] + \sin \beta \right\}$$

p 为爆轰产物的压力, p_{cj} 为定常爆轰波阵面上的压力, γ_H 为爆轰波阵面上的多方指数, γ_0 为有效多方指数, c_H 为波阵面后的声速。

流场压力求得以后,便可进一步求得在压力 p 作用下飞板的弯曲角。当把坐标原点固定在爆轰波阵面上时,飞板便以爆轰速度 v_d 向后流动。如图4所示,令 a 为向心加速度,则 $a = v_d^2/r$, r 为飞板的曲率半径,又 $ds/d\beta = r$,所以 $a = v_d^2 d\beta/ds$,根据牛顿定律

$$\rho_p v_d^2 \frac{d\beta}{ds} = p \quad (2)$$

式中: ρ_p 为飞板面密度, ds 为弧元的长度,且 $ds = dx/\cos\beta$ 。由于 $p_{cj} = \rho_0 v_d^2 / (1 + \gamma_H)$ (其中 ρ_0 为炸药密度),将(1)式带入(2)式,可得

$$\cos\beta d\beta = \frac{\rho_0 \delta}{\rho_p} \frac{1}{1 + \gamma_H} \left| \left| 1 - \frac{x}{x_0} + \frac{1}{\gamma_H - 1} \right| \right| \left/ \left| \frac{\gamma_H}{\gamma_H - 1} \right| \right| \left| \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 - 1} \right| \cdot \left[\cos \left[\sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right] - \frac{\gamma_0 - 1}{2} \frac{(\Delta q)_y}{c_H} \right] \left| \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 - 1} \right| d \left[\frac{x}{\delta} \right] \quad (3)$$

利用叠代法求解上面自变量为 x/δ 因变量为 β 的一阶微分方程,便可得到飞板的弯曲角在距起爆点不同的距离 x_0 处随 x/δ 的变化规律。同样当 x/δ 的变化区间固定,即在炸高给定的情况下,也可求得爆轰波远离起爆点时,飞板弯曲角 β 随 x_0/δ 的变化规律。

下面利用方程(3)具体分析第三节实验中起爆端不定常爆轰对飞板运动造成的影响。根据装药结构,各计算参数分别为:炸药密度 $\rho_e = 0.7\text{g/cm}^3$,药厚 $\delta = 60\text{mm}$,炸高 $h = 12\text{mm}$,波阵面上的多方指数 $\gamma_H = 2$,有效多方指数 $\gamma_0 = 1.78$,覆板厚度 $l = 15\text{mm}$,覆板密度 $\rho_f = 7.9\text{g/cm}^3$ 。采用叠代法对方程(3)进行求解,得到飞板在相应参数下的碰撞角。图5中的曲线描述了炸高为12mm时,飞板的碰撞角随爆轰波距起爆端长度 x_0/δ 的变化。分析这条曲线不难看出,从起爆点到5倍装药厚度,折转角变化很大,5~10倍装药厚度变化趋缓,10倍装药厚度以后趋于稳定。将图2与图5相比较,可看出两者除了相应的 β 角在数值上有约10%~15%的误差外, β 角随 x_0/δ 的总体变化趋势是非常一致的。造成 β 角在数

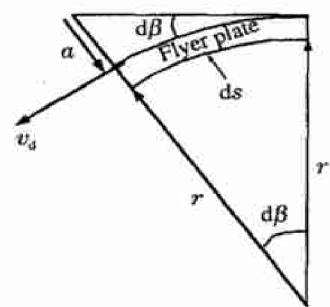


图 4 飞板弯曲示意图

Fig.4 Sketch of flyer plate bend

值上误差的原因是多方面的,一是图2中的 β 角不是直接测量参数,它是通过测量参数 v_d ,再利用相关经验公式计算得到的,因而其中包含了实验误差和经验公式本身的误差;二是图5中的计算数据是建立在二维爆轰流场近似计算基础上的,计算本身也带有误差。计算结果与实验结果对比表明,起爆端效应的计算结果是可信的,它对新的装药结构设计有很好的指导作用。

4 结 论

(1)炸药从起爆开始到形成定常爆轰,中间要经历一段不定常爆轰区,不定常爆轰区的大小不仅与炸药的本身性能有关,同时还与起爆能量、装药结构等有关。(2)通过对 $2\#$ 岩石炸药起爆端爆速增长过程试验可看出,大型厚装药结构的不定常爆轰区为约10倍装药厚度。从起爆点到5倍装药厚度,不定常爆轰对飞板速度和折转角影响较大,5~10倍装药厚度影响渐弱,10倍装药厚度以后影响逐渐消失。(3)起爆端爆轰压力场与复板折转角计算结果表明,起爆端效应对爆炸复合造成的影响范围与实验结果非常一致,因而这一计算方法对新的装药结构设计有很好的指导作用。

参考文献:

- [1] Livne Z, Munitz A. Characterization of explosively bonded iron and cooper plates[J]. Journal of Material Science, 1987, 22(19): 1495—1500.
- [2] Otto H E, Carpenter S H. Explosive cladding of large plates with lead[J]. Welding Journal, 1972, 51(7): 467—473.
- [3] Blazynski T Z. Explosive Welding Forming and Compaction[M]. London: Application Science Publishers Ltd, 1983.
- [4] Meyer M D. Impact welding using magnetically driven flyer plates[A]. Proc 4th Int Conf of the Center for High Energy Forming [C]. Denver: University of Denver, 1973, 5.3: 1—23.
- [5] 邵丙璜,张凯.爆炸焊接原理及其工程应用[M].大连:大连理工大学出版社,1987.

The determination of unsteady detonation area in explosive cladding

WANG Tie-fu^{*}

(National Key Laboratory of Transient Physics,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The motivation of the present paper is to examine the effects of unsteady detonation after its initiation on the explosive cladding. The detonation experiment using $2\#$ trimonite dynamite explosive indicated that the size of unsteady detonation area centre around the initiation point is about 10 times of explosive charge thickness. The severely affected area size of unsteady detonation centre around the initiation point on explosive welding parameters is within 5 times of explosive thickness, the effect weakened between the distance of 5 and 10 times of explosive thickness, and disappeared gradually still further. By means of the collapse angle calculation of flyer plates, the affected area in explosion cladding by unsteady detonation has been evaluated, and shows consistent with the experimental data.

Key words: mechanics of explosive; unsteady detonation; explosive cladding; $2\#$ rock dynamite; rarefaction effect of detonation point

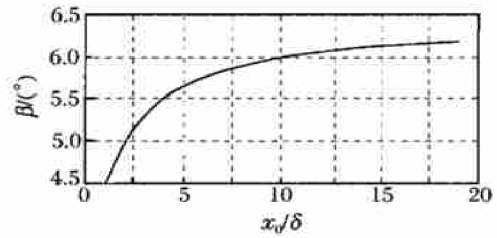


图5 β 与 x_0/δ 关系的工程计算曲线

Fig.5 The calculated curve
of relation between β and x_0/δ

* Corresponding author: WANG Tie-fu
E-mail address: wtf@public1.ptt.js.cn
Telephone: 025-84315276