

文章编号: 1006-9941(2011)04-0425-03

小尺寸炸药平面波透镜界面曲线的设计

黄交虎, 尹锐, 黄辉, 魏智勇, 张丘

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为降低平面波透镜输出波形差, 依据压制平面波透镜的典型波形图, 采用反算法推算出在透镜的分段区间内的实际爆速, 根据费马原理分段设计透镜界面曲线, 再对分段界面曲线进行调整处理, 从而拟合出界面曲线的设计坐标。之后根据该设计加工透镜并进行爆轰波测试。结果表明: 该设计方法使得透镜输出波形差大大降低, $\Phi 100$ mm 及 $\Phi 60$ mm 透镜输出波形差均小于 $0.03 \mu\text{s}$ 。

关键词: 材料物理与化学; 炸药; 平面波透镜; 界面设计

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.016

1 引言

平面波透镜作为一种重要的爆轰元件, 广泛应用于爆轰理论研究、炸药的冲击起爆、材料的高压、动力压缩及高压物理等学科领域中^[1]。国内外都十分重视透镜的研究与生产^[2-6], 目前使用的透镜有浇铸成型的也有压装成型的产品。

美国在 20 世纪六七十年代就已经研制出了三种规格的平面波透镜^[3]: P-040、P081 和 P-120 型(对应直径分别为 $\Phi 100$ mm、 $\Phi 200$ mm 和 $\Phi 300$ mm), 高爆速炸药为 Comp. B 铸装或压装成型, 低爆速炸药为 Baratol(TNT/BN = 24/76) 铸装成型。平面波透镜波形平面度(在 90% 直径范围内)分别为 P-040E 型 $\leq 0.071 \mu\text{s}$ 、P-081E 型和 P-120 型 $\leq 0.10 \mu\text{s}$ 。中国工程物理研究院化工材料研究所于 1962 年首次成功研制 $\Phi 200$ mm 平面波透镜, 国防科技大学于 20 世纪 70 年代采用压装法成功研制了平面波透镜。

压制型炸药平面波透镜需经过毛坯药柱压制、高精度数控机床加和整体装配几个重要环节, 具有输出波形精度高, 稳定性和重复性较好的特点。为确保尺寸精度和波形稳定性, 高、低爆速层界面必须能较好地贴合在一起。特别是随着高精物理实验的发展, 在某些具体的实际工作中, 目前的透镜输出波形平面度还不能满足某些具体的试验要求, 尤其是在透镜小型化方面, 对透镜的输出波形同步性要求更高。为此, 本研

究针对小尺寸压制型平面波透镜低爆速层局部密度不同, 爆速存在差异的情况, 利用平面波透镜的典型输出波形, 采用反算法和分段设计原则对该透镜进行设计改进, 有效提高了透镜输出波形的同步性。

2 设计方法

2.1 基本原理

炸药透镜主要是根据尺寸规格来确定产品高度和 高低爆速层配合界面。爆轰波在炸药内部的传播方式类似于光波在介质中的传播方式, 其传播规律也符合费马原理^[4], 即爆轰波在不同爆速炸药介质中传播也会发生折射, 传播方向与波阵面垂直。

平面波透镜发生器示意图如图 1 所示。设起爆点 O 为界面曲线的坐标零点, 半径方向为 Y 轴, 高度方向为 X 轴, 则根据平面波要求: 爆轰波从 $O \rightarrow a$ 、 $O \rightarrow O1 \rightarrow O2$ 与从 $O \rightarrow A \rightarrow C$ 路径的传递时间 t 应相等。

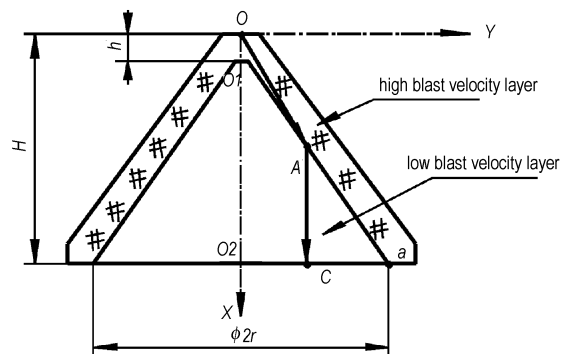


图 1 平面波透镜发生器示意图

Fig. 1 Sketch of plane wave lens

收稿日期: 2010-11-01; 修回日期: 2011-02-14

作者简介: 黄交虎(1971-), 男, 副研究员, 主要从事炸药精密机械加工技术研究。e-mail: huangjiaohu@sohu.com

根据费马原理^[4], 透镜的中心与边界的情况由如下公式计算:

$$t = \frac{\sqrt{r^2 + H^2}}{D_1} = \frac{h}{D_1} + \frac{H-h}{D_2} \quad (1)$$

式中, t 为总作用时间, μs ; D_1 和 D_2 分别为高速爆层和低爆速层爆速, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; h 为起爆高度, mm ; r , h 确定后, 可以获得传播时间 t 和总高 H 。如果使爆轰波同时到达输出底面, 那么界面任意坐标点 (x, y) 须满足:

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D_1} = \frac{h}{D_1} + \frac{x-h}{D_2} \quad (2)$$

令 $D_1/D_2 = n$

整理后得到如下公式:

$$(1-n^2)x^2 + y^2 + 2nh(n-1)x - h^2(1-n)^2 = 0 \quad (3)$$

公式(3)即高、低爆速层的界面曲线设计方程。通常的设计方法就是将设定的 n 和 h 带入方程(3), 获得配合界面。

表 1 低速层反算爆速分布

Table 1 Inverse calculated detonation velocity distribution of low velocity layer

coordinate scope	$(0 \sim y_1)$	$(y_1 \sim y_2)$	.....	$(y_{i-1} \sim y_i)$	.....	$(y_{n-1} \sim y_n)$
time difference of the wave plot	Δt_1	Δt_2	.....	Δt_i	.....	Δt_n
inverse calculated detonation velocity	D_{21}	D_{22}	.....	D_{2i}	.....	D_{2n}

2.4 爆速分区

由公式(2), 对 t 求 D_2 的偏导数:

$$\frac{\partial t}{\partial D_2} = \frac{h-x}{D_2^2} \quad (4)$$

根据式(4), 对表 1 各 D_2 求偏导, 得出 D_2 变化对总作用时间的影响, 由 $\partial t/\partial D_{2i}$ 的大小来确定划分的区间, 给定一系列常数 $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 为划分依据, 将爆速划分为 n 个区间, 如:

$$(\partial t/\partial D_{2i}) \leq a_1, a_1 \leq (\partial t/\partial D_{2i}) \leq a_2, \dots, a_{i-1} \leq (\partial t/\partial D_{2i}) \leq a_i, \dots \quad (i=1, 2, \dots, n)。$$

2.5 分段设计平面波透镜

根据爆速所分区域, 计算各区域平均爆速 D_{2i} , 则 $n_i = D_1/D_{2i}$, $(i=1, 2, \dots, n)$, 将透镜平均分为 n 个设计区域, 对每个区域, 根据式(3)分别求出界面方程。

由于雷管实际上是面起爆, 与真正意义上的点起爆有一定的区别, 经过试验, 认为其等效于偏心起爆, 设偏心起爆距为 p , y 为自变量, 由式(3)可得下式:

$$x = \frac{n_i(n_i-1)h + \sqrt{h^2(n_i-1)^2 + (n_i^2-1)(y-p)^2}}{h^2-1} \quad (5)$$

2.2 设计依据

根据以上方法设计的平面波透镜产品已经大量运用于各种试验中^[5-6]。但是依靠传统的设计思想, 透镜的输出波形同步性超过了 $0.06 \mu\text{s}$, 这就需要在传统的设计思路对平面波透镜的界面曲线设计作一些调整。

高精度透镜采用压制成型药柱机加成型的方式, 由于局部密度不同, 爆轰波传播路径上平均爆速存在差异。尤其是低速层, 需要对实际输出波形进行分段处理, 如总范围波形差 Δt 、区间波形差: Δt_1 、 Δt_2 …… Δt_n 等等, 在这些分段区间内进行实际爆速的计算, 以此来考察爆速在爆轰波传递过程中的变化情况, 并以此来作为界面曲线设计的依据。

2.3 反算低爆速 D_{2i} 分布规律

设 Δt_i 为波形差; D_{2i} 为反算爆速 $(i=1, 2, \dots, n)$, 按座标区间反算 D_{2i} 分布见表 1。

求交界面底角公式为:

$$\text{tg}\alpha = \frac{dx}{dy} = \frac{y-p}{n_i\sqrt{x^2 + (y-p)^2} - x} \quad (6)$$

当 $x \rightarrow \infty$, $p=1 \text{ mm}$, 有:

$$\text{tg}\alpha = \frac{1}{\sqrt{n_i^2-1}} \quad (7)$$

式(7)即为计算透镜底偏角公式。

由式(5)、(7)可以计算出给定透镜底半径 r 的各个分段区间曲线坐标。

2.6 组合曲线

按上述方法设计的界面曲线是由各个跳跃曲线组成, 为了形成一条光滑的曲线, 可以通过曲线的向下平移来实现。如图 2 所示。自 y_1 后各线段必须下移 δ 值, 如图中 A_2 点下移至 A'_2 点, B_2 点移至 B'_2 点, 显然, 弧线 A_2B_2 与弧线 $A'_2B'_2$ 平行, 即 $x_{A'_2} = x_{A_2} + \delta$, 以后各点坐标计算依此类推。

当透镜底径给定后, 由 n 则可求出透镜总高 H , 当变换 n 时, 可求出相应的 H , 各对应 H 相减则可求出

对应的 δ 值, 曲线平移后, 接合处必然留有一小平台空隙, 空隙可以用直线直接过渡, 也可用圆弧相连接。通过几何计算, 求出连接直线或圆弧的方程, 从而求出其坐标值, 得到界面曲线。

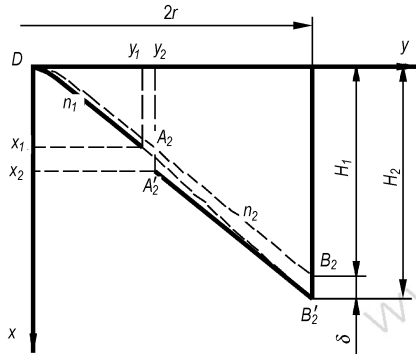


图2 界面曲线的组合

Fig.2 Fitting of interface curve

3 测试结果

根据以上的设计思路, 我们设计并制造了 $\Phi 100$ mm 压制平面波透镜 4 发, $\Phi 60$ mm 平面波透镜 2 发, 分别进行了输出波形同步性测试, 主要测试条件: 单狭缝扫描, 15 万转/分高速摄影。表 2 为测试结果。

由表 2 可以看出, 在试验透镜的底面积输出范围内, 输出波形同步性均小于 $0.03 \mu\text{s}$, 较通常的设计方法波形差降低了 50% 以上。

表 2 $\Phi 100$ mm、 $\Phi 60$ mm 透镜的波形检测结果

Table 2 Wave test results of $\Phi 100$ mm and $\Phi 60$ mm wave lens

specimen No.	scope/mm	$\Delta t/\mu\text{s}$
TJ100-1	$\Phi 100$	≤ 0.020
TJ100-2	$\Phi 100$	≤ 0.022
TJ100-3	$\Phi 100$	≤ 0.026
TJ100-4	$\Phi 100$	≤ 0.012
TJ60-1	$\Phi 60$	≤ 0.026
TJ60-2	$\Phi 60$	≤ 0.021

4 结论

两种小尺寸透镜的输出波形同步性都在 $0.03 \mu\text{s}$ 以内, 达到了最初的设计要求。说明采用反算法和分段设计原则对压制型平面波透镜进行改进设计从工程实际来讲可行。

参考文献:

- [1] 张宝铎, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.
- [2] Marsh S P. Explosive plane-wave lens; US 4729318[P]. 1988.
- [3] Vigilm G. Plane shock generator explosive lens[R]. Sandia report 1996, SAND94-3206 UC-742.
- [4] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] Tsuneaki Goto, Yasuhiko Syono, JunNAKAI, et al. Shock compression experiments in solids using high explosives[J]. *Shock Compression Experiments*, 1975, 27(8): 187-192.
- [6] Thomas J Ahrens. Dynamic compression of earth materials[J]. *Science*, 1980, 207(7): 1035-1041.

Design of Interfacial Curve of Small-sized Explosive Planar Wave Lens

HUANG Jiao-hu, YIN Rui, HUANG hui, WEI Zhi-yong, ZHANG Qiu

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: To decrease the wave time difference of pressed planar wave lens, the actual detonation velocity of each subsection of the wave lens was reversely calculated according to the wave plots, and the interfacial curve was designed dividedly based on Fermat's principle. Then the coordinates of the interfacial curve were fitted out by adjusting the divided interfacial curves. The designed wave lens was manufactured and the blast wave was detected. Results show that our design method can decrease the wave time difference greatly. The wave time differences for $\Phi 100$ mm and $\Phi 60$ mm wave lens were both less than $0.03 \mu\text{s}$.

Key words: material physics and chemistry; explosive; planar wave len; interface design

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.016