

对落锤仪中落锤运动的监测与分析

龚汉生 陈远龄

(重庆大学 重庆 630044)

摘 要 本文论述了火炸药撞击感度测定中对落锤运动状况进行监测的必要性,介绍了监测落锤运动的方法和装置。在不同的落锤重量、落高和润滑条件下,利用落锤运动监测系统实测了落锤经过导轨上两定点之间的时间间隔 Δt 。将 Δt 与理想自由落体相对应的理论计算时间 Δt_0 进行比较,分析与探讨各种不同因素影响的规律和机理,从而提出撞击感度测定中选择落锤重量、润滑条件的原则。

关键词 火炸药撞击感度 落锤仪 监测与分析

前言

撞击感度是火炸药的重要特性之一。其测定方法是:利用一定重量的落锤自由下落,对火炸药试样进行撞击,以试样发生爆炸时的撞击功或其他参数来表示撞击感度。为此,世界各国设计制造了各种不同类型和规格的落锤仪。尽管落锤仪的结构和传动方案千差万别,但其基本运动形式不外乎是:落锤在相互平行的两竖直导轨之间上下运动,以导轨作导向,使落锤下落撞击试样时尽可能接近于自由落体运动。然而,由于导轨的存在,对于落锤下落运动状况会产生或多或少的影响。因而,撞击感度的测量结果也会受到不同程度的影响。因此,有必要对落锤的下落运动状况作定量监测,以评定落锤试验结果的准确性^[1]。在笔者所研制的《全自动火炸药撞击感度测定仪》上,设置了对落锤下落运动定量监测的装置。

1. 监测落锤下落运动的方法

在撞击感度试验中,落锤的落高变化范围很大,从几厘米到几百厘米,成百倍地变化。因而,落锤下落的全程时间变化范围也很大。而且,落锤下落过程中,落锤运动速度是变化的。想要通过直接测量落锤下落的全程时间或落锤速度来实现对落锤运动的监测是很困难的。

一种简便而有效的监测方法是:在导轨的下端两个定点上各设一个传感器,实测落锤下落过程中经过这两个定点之间的时间间隔 Δt ,按理想自由落体运动规律计算出落锤下落时经过该两点之间的时间间隔 Δt_0 ,从 Δt 和 Δt_0 之间的差值可以反映出落锤在仪器导轨间下落运动偏离理想自由落体运动的程度。可以据此对落锤仪试验的准确性作实时监测。

在笔者所研制的全自动落锤仪上,在导轨下部离落锤下落终点(即计算落高的零点)的上方安装有两个固定检测点,构成测量时间 Δt 的监测系统,如图1所示。图上, H ——落锤下落的总高度,简称为落高; S_1 ——第一检测点到零点的距离,实际上取 $S_1 = 11.4\text{cm}$;

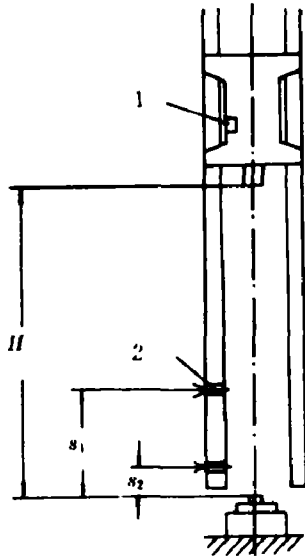


图 1

Fig. 1

1. 磁钢, 2. 霍尔元件

1. Magnet steel, 2. Hall component

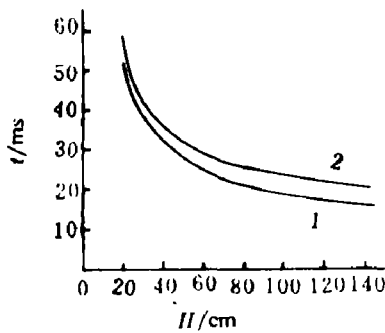


图 2

Fig. 2

曲线 1——自由落体, 曲线 2——

2.5kg 锤加 20# 机油

Curve 1——Free falling, Curve 2——

2.5kg Hammer, with 20# engine oil

s_2 ——第二检测点到零点的距离,实际上取 $s_2=3.4\text{cm}$; 两检测点之间的距离为 8cm 。

在不同落高条件下,通过这两个检测点之间的时间间隔是不同的。按理想自由落体运动规律,可以导出落锤经过 s_1 点和 s_2 点之间的时间间隔

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{H - s_2} - \sqrt{H - s_1}) \quad (1)$$

式中的重力加速度 g 、 s_1 和 s_2 均为常数。图 2 中曲线 1 表示 Δt 随落高 H 而变化的规律。从图上看,随着 H 值增大, Δt 逐渐减小,最后渐近于某一极限值。

2. 检测系统的结构和原理

如图 1 所示,落锤上装有一块磁钢,作为落锤位置的信号装置。在导轨的 s_1 和 s_2 两点各装有一枚霍尔元件作为落锤位置的检测器。磁钢和霍尔元件构成一套无接触的落锤位置检测系统,磁钢与霍尔元件之间的间隙为 0.5mm 左右。在落锤下落过程中,磁钢与 s_1 点的霍尔元件对准时,由于磁场的影响而产生霍尔效应,通过电路使计算机的计数器开始计时;落锤继续下落,磁钢对准 s_2 点霍尔元件时,霍尔效应使计算机停止计时。经过一定转换后,就得出落锤下落过程中经过 s_1 和 s_2 两点之间的时间间隔 Δt 。所测得的 Δt 可分别在计算机的显示器上显示,也可在打印机上打印出来。该系统的检测分辨率为 $0.1\mu\text{s}$ 。

从检测中发现,实测的 Δt 和理想下落时间 Δt_0 有一定差异, $\Delta t > \Delta t_0$,而且,二者之间的差值随落高 H 、落锤重量以及落锤与导轨之间的润滑条件等因素变化而变化。本文拟从实测结果出发,对各种因素对 Δt 影响的规律和机理进行探讨。

3. 落锤下落时间 Δt 的测定

从(1)式看出,在理想自由落体条件下,当 g 、 s_1 和 s_2 均为一定时,落高 H 是决定 Δt 的唯一因素。但是,在落锤仪中,落锤在导轨间的下落运动与自由落体运动状况有根本的区别,影响落锤下落时间 Δt 的因素很多,如落高 H 、导轨安装的垂直度、两导轨相互平行度、落锤与导轨间的间隙、落锤与导轨滑动面之间的摩擦与润滑条件等,而由摩擦与润滑条件再派生出润滑剂类别、用量、环境温度以及落锤质量等因素。这些派生因素是通过改变摩擦条件起作用的。

本文测定 Δt 是在以下条件下进行的:导轨的垂直度为 $0.03\text{mm}/1\text{m}$,两导轨的平行度为 $0.08\text{mm}/2.7\text{m}$,导轨与落锤间的间隙不超过 0.14mm ,环境温度 $15\sim 18^\circ\text{C}$ 。

实测中落高变化范围为 20~140cm, 计算机控制每次落高 H 误差达 $\pm 1\text{mm}$ 。按(1)式有

$$\frac{d\Delta}{dH} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{g}} \left(\frac{1}{\sqrt{H-S_2}} - \frac{1}{\sqrt{H-S_1}} \right) \quad (2)$$

由此可见, Δ 对 H 的变率也随 H 而变。当 $H=20\text{cm}$ 时, $d\Delta/dH = -0.0216$; 而 $H=140\text{cm}$ 时, $d\Delta/dH = -0.00059$ 。 H 值为最小时, $d\Delta/dH$ 的值为最大。当 $H=20\text{cm}$, 其误差为 $\pm 1\text{mm}$ 时, 由此引起 Δ 的误差为 $\pm 0.216\%$ 。随着 H 增大, H 的误差对 Δ 的影响显著减小。为了消除 H 的误差对 Δ 测量结果的影响, 在实测中, 对同一落高 H , 重复进行 10 次测定 Δ , 最后取其平均值。

为了分析各种不同因素对 Δ 的影响, 分别考察了落高 H 、不同润滑条件以及落锤重量对 Δ 的影响, 每改变一种因素, 进行一组测定, 其程序如下:

1. 在同一落锤和同一润滑条件下, 改变落高 H , 测定 Δ ;
2. 在同一落锤下, 改变润滑条件下, 重复步骤 1;
3. 改换落锤重量, 重复步骤 2。

采用了三种不同质量的落锤: 2.5kg、5kg、10kg。

先后采用过五种不同的润滑条件: 无任何润滑剂、20# 机油、煤油、钟表油、二硫化钼润滑脂。

对全部测定数据进行整理后, 按不同质量的落锤列于表 1、表 2、表 3。

为了与理想自由落体相应的时间 Δ 进行对比, 在表中列出各种不同落高 H 下的理论时间 Δ 。并以 $[(\Delta_s - \Delta)/\Delta] \times 100\%$ 的方式算出 Δ_s 与 Δ 相对误差的百分比值。

表 1 2.5kg 落锤 Δ_s 实测数据

Table 1 Measured data Δ_s of 2.5kg hammer

润滑条件		落 高 H/cm						
		20	40	60	80	100	120	140
无 润 滑	$\Delta_s/\mu\text{s}$	53211	32643	25704	21840	19334	17500	16141
	$\frac{\Delta_s - \Delta}{\Delta} \times 100\%$	3.22	3.00	3.14	2.99	2.99	2.80	3.60
20# 机 油	$\Delta_s/\mu\text{s}$	58592.7	36377.6	29434.3	25909.0	23739.9	22356.1	20570.9
	$\frac{\Delta_s - \Delta}{\Delta} \times 100\%$	13.66	14.78	18.11	22.18	26.46	31.33	31.14
理想自由落 体 $\Delta/\mu\text{s}$		51552	31692	24921	21205	18773	17023	15686

表2 5kg落锤 Δt 实测数据Table 2 Measured data Δt , of 5kg hammer

润滑条件		落 高 H/cm						
		20	40	60	80	100	120	140
无 润 滑 剂	$\Delta t_0/\mu s$	57985	33607	26759	21853	19360	17543	16153
	$\frac{\Delta t_0 - \Delta t}{\Delta t} \times 100\%$	12.4	6.04	7.38	3.06	3.13	3.05	2.98
20# 机 油	$\Delta t_0/\mu s$	58889	37051	30070	27084	24641	22332	20187
	$\frac{\Delta t_0 - \Delta t}{\Delta t} \times 100\%$	14.2	16.9	20.66	27.7	31.26	31.18	28.69
煤 油	$\Delta t_0/\mu s$	54251	33353	26444	22559	20175	18528	
	$\frac{\Delta t_0 - \Delta t}{\Delta t} \times 100\%$	5.2	5.24	6.1	6.39	7.47	8.84	
二 硫 化 钼	$\Delta t_0/\mu s$	78624	55733	47742	37178	30772		
	$\frac{\Delta t_0 - \Delta t}{\Delta t} \times 100\%$	52.5	75.9	91.57	75.7	63.9		

表3 10kg落锤 Δt 实测数据Table 3 Measured data Δt , of 10kg hammer

润滑条件		落 高 H/cm							
		20	30	40	50	60	65	80	100
20# 机 油	$\Delta t_0/\mu s$	52769	—	32562	—	25719	—	21899	—
	$\frac{\Delta t_0 - \Delta t}{\Delta t} \times 100\%$	2.36	—	2.75	—	3.2	—	3.27	—
钟 表 油	$\Delta t_0/\mu s$	—	39315	32597	28494	—	24509	—	19317
	$\frac{\Delta t_0 - \Delta t}{\Delta t} \times 100\%$	—	3.0	2.86	2.81	—	2.88	—	2.9
二 硫 化 钼	$\Delta t_0/\mu s$	53978	—	33173	—	25876	—	—	—
	$\frac{\Delta t_0 - \Delta t}{\Delta t} \times 100\%$	4.71	—	4.67	—	3.83	—	—	—
理想自由落 体 $\Delta t_0/\mu s$		51552	38162	31692	27716	24921	23824	21205	18773

4. 对落锤下落实测时间 ΔT 的分析

1. 从表 1、表 2 看出,在不加任何润滑剂,即干摩擦的条件下, Δt 对 Δ 的偏差较小,除个别落高情况以外,大多数情况都在 3% 左右。此种条件下, Δt 只受导轨几何精度以及导轨与落锤间摩擦特性的影响。

2. 在落锤和导轨之间注放某种润滑剂以后, Δt 对 Δ 的相对误差百分比都不同程度地增大。从表 1 看出,无润滑剂时,各种落高下相对误差均在 3% 左右;而加入 20# 机油后,相对误差百分比的平均值增加到 22.5% (见图 2 上曲线 2)。表 2 中加入 20# 机油后,相对误差平均值为 24.4%。最突出的是表 2 第 4 行,加入二硫化钼润滑脂后,使 5kg 落锤的 Δt 相对误差平均值增大到 71.9%。但是,粘度较低的润滑剂,如钟表油、煤油对 Δt 的影响较小。从表 2 得出,加入煤油后, Δt 的相对误差平均值为 6.53%;从表 3 看出,用钟表油润滑时,10kg 锤的 Δt 相对误差平均值为 2.89%。由此可见,润滑剂虽然能起到润滑减摩的作用,但是,由于液体本身粘滞性,会增加对落锤下落的阻力,粘度愈大,对 Δt 的影响愈大。因此,在选择润滑剂时,采用粘度较低的为佳。实验中所采用的 20# 机油(JH20)和钟表油(HY—8)的运动粘度分别为 17~33Cst 和 6.3~8.5Cst(50°C)。

3. 从表 1、和表 2 看出,在落锤和导轨间加入润滑剂后, Δt 对 Δ 相对偏差值随着落高 H 增加而变大。以 20# 机油为例,在 H 从 20cm 增大到 140cm 过程中,2.5kg 落锤的偏差值由 13.66% 增至 31.33%,5kg 落锤的偏差由 14.2% 增至 31.18%,加入其他润滑剂也出现类似情况。这种现象可从流体粘性流动特性来阐明。

根据牛顿流体粘性定律,流体层之间的内摩擦力 F 与流体流动速度沿法向的变化率(即速度梯度) du/dn 成正比,与接触面积 S 成正比,与流体的粘性性质有关,而与流体内的压强无关,其数学表达式为^[2]

$$F = \pm \mu S \frac{du}{dn} \quad (3)$$

式中, μ 为表征流体粘性性质的比例常数,称为动力粘度。

在落锤仪中,导轨固定,落锤运动,因此落锤与导轨之间润滑液的速度梯度 du/dn 的平均值应等于落锤运动速度除以落锤与导轨之间的间隙。随着落高 H 增大,落锤末速度增大,下落过程中平均速度也随之增大。按(3)式可知,下落过程中,落锤受到润滑剂的平均阻力与速度梯度成正比,而速度梯度随着 H 的增加而增大,因而导致 Δt 的相对偏差增大。

在不使用润滑剂的条件下, Δt 的相对偏差值随 H 值的变化情况不存在上述规律, Δt 的相对偏差无明显变化。

4. 从表 3 看出,10kg 落锤的 Δt 相对偏差值普遍减小,在加 20# 机油润滑的条件下, Δt 相对偏差在各种不同落高下的平均值为 2.895%;在用钟表油时该误差平均值为 2.89%;甚至在用粘稠的二硫化钼润滑脂的条件下,该误差平均值也只有 4.41%。这组实测结果表明,采用质量大的落锤可以减小由于摩擦力对测量结果的影响,可以减少测量误差。这一规律可以用牛顿运动第二定律得到合理解释。按牛顿第二定律

$$ma = W - F \quad (4)$$

式中, m 、 a 、 W 分别表示落锤的质量、运动加速度和重量, F 为落锤下落运动中所受到的摩

擦阻力。

在导轨和润滑条件为一定时,摩擦阻力 F 为一定值,于是有

$$a = g - \frac{F}{m} \quad (5)$$

从(5)式看出, m 值愈大, a 愈接近于重力加速度 g , 也就是说,落锤的实际运动加速度愈接近于自由落体状况,因而实测的 Δt 相对偏差也就愈小。反之,落锤质量愈小, Δt 的相对偏差愈大。

结 论

1. 实测的 Δt 恒大于理想自由落体相应的 Δt 值,其偏差程度受到润滑条件、导轨几何精度、落锤重量、环境温度、落高等因素的影响。 Δt 与 Δt 的偏差在一定程度上表明落锤的有效撞击功与理论值($W \times H$)的偏差。为了实时监控落锤仪的运行状况,以保证所测撞击感度的可靠性,建议在所有落锤仪上增设落锤运动监控系统,并在测量标准中补充 Δt 相对误差的许可范围。

2. 本文介绍的落锤运动监控系统实现了对落锤运动实时监测,每次下落后,可以提供分辨率为 $0.1\mu s$ 的 Δt 值输出,也可直接输出其相对误差值($[(\Delta t - \Delta t)/\Delta t] \times 100\%$)。

3. 实测 Δt 的结果表明,落锤与导轨间的润滑条件对测量结果有显著影响。润滑剂的粘度愈大,影响愈严重。因此,在撞击感度测量中,应慎重选用润滑剂,一般应选用粘度较低的润滑剂,甚至不加任何润滑剂。

4. 从实测 Δt 的数据分析中发现,落锤质量愈大, Δt 的相对误差愈小;在采用润滑剂的条件下,落高 H 愈大, Δt 的相对误差愈大。因此,在其他条件许可的情况下,应尽可能采用大质量落锤和较小落高进行测量,以减轻由于摩擦力对测量结果的影响。

参 考 文 献

- [1] 松本 荣,田中雅夫.钝性炸药の落フム感度试验,工业火药协会志,1980,41(6),354~359
 [2] 钱汝鼎.工程流体力学.北京,北京航空航天大学出版社,1989,7~8

ON MONITOR AND ANALYSIS OF HAMMER MOTION IN DROP HAMMER MACHINE

Gong Hansheng Chen Yuanling
(Chongqing University, Chongqing 630044)

ABSTRACT It is necessary to monitor the motion of hammer in testing the sensitivity of explosive to impact. The method and device for this purpose is presented in this paper.

The interval Δt in which the hammer passed through two fixed points on the guide of drop hammer machine was measured with different hammer weight, drop height and lubricants, and compared with those calculated by free-falling body equation. The principle to select the hammer weight and lubricant in testing the sensitivity to impact is proposed.

KEY WORDS sensitivity of explosive to impact, drop hammer machine, monitor and analysis of hammer motion