

高可靠度的安全撞击强度公式^{*}

殷 刚 傅惠民

(北京航空航天大学固体力学研究所, 北京, 100083)

摘 要: 针对现有的临界落高测定方法存在的估计精度差、可信程度低的缺点, 建立了高置信度、高可靠度的安全撞击强度公式。该公式可以综合利用当前试验数据和以往积累的试验数据确定安全撞击强度, 从而既提高了估计精度又减少了试验费用。大量 Monte Carlo 仿真分析表明, 该式不仅可以在小样本条件下确定安全撞击强度, 而且置信度高。最后给出了一个具体应用的实例。

主题词: 推进剂, 机械感度, 冲击强度, 防爆试验, 统计分析, 蒙特卡罗法

分类号: V 512

STRENGTH FORMULA OF PROPELLANT SAFETY IMPACT WITH RELIABILITY LEVEL

Yin Gang Fu Huimin

(Inst. of Solid Mechanics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: The current method of determining critical drop height has some defects as that the precision was bad and the confidence level was low. To resolve these problems, a formula of determining safety impact strength with high confidence and high reliability was given. The formula could make full use of the current test data and the test data that accumulated before. By which, a more precise result could be got and the expenditure and time of test were reduced. The contrasting analysis of Monte Carlo simulation showed that the formula could not only determining safety impact strength with small samples but also the confidence level of the result was very high. An example was give at the end of this paper.

Subject terms: Propellant mechanical sensitivity, Impact strength, Explosion-proof test, Statistical analysis, Monte Carlo method

1 引 言

推进剂的安全撞击强度是衡量推进剂安全性能的一个重要指标, 工程中一般采用 Bruceton 法来确定, 但是由于该方法所需试验量较大 (一般不少于30个试件), 而且只是对均值估计得较准, 对方差的估计普遍偏小, 因此, 由中值外推得到的临界撞击能往往偏于危险^[1], 加之没有考虑置信度, 所得结果可信程度低, 不适于估计安全撞击强度。针对 Bruceton 法存在的这些问题, 本文建立了一种高置信度、高可靠度的安全撞击强度公式, 能有效利用以往积累的试验数据, 再加上少量试件的当前试验便可以获得高可靠度的安全撞击强度, 并经大量的

* 收稿日期: 1999-02-01 修回日期: 1999-06-09, 本课题系航空科学基金资助项目

Monte Carlo 模拟对比试验分析所证实。

2 试验原理和方法

经验表明,推进剂的撞击强度服从正态分布或对数正态分布。设有一组测定推进剂撞击强度的升降法试验结果(如图1),将相邻各级中的破坏数据点与未破坏数据点配成对子。配对时,从第一次出现相反结果的一对数据开始,即图1中的点1和点2。在满足闭合条件^[2]的情况下可将各数据点配成对子,闭合条件等价于条件 $n_i = m_{i-1}$ (n_i 为第 i 级的响应数, m_{i-1} 为第 $i-1$ 级的不响应数, $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)。此时临界落高的极大似然估计量为^[3]

$$h_i^o = (h_i + h_{i-1})/2 \quad (i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

h_i^o 为对子落高, 其个数为 n_i 。对子落高 H^o 的样本量为 $n = \sum_i n_i$ 。对于不满足闭合条件的试验可通过补做或舍弃一两个试验点的方法使其配成对子。

基于“对子落高”概念的统计方法充分利用了“响应”与“不响应”数据的综合信息,利用升降法试验的分解和最小升降法试验原理将二者有机地结合起来,克服了 Bruceton 法仅能对上述两种对立结果中容量较小的一种进行分析,从而丢失至少一半试验信息的缺陷。

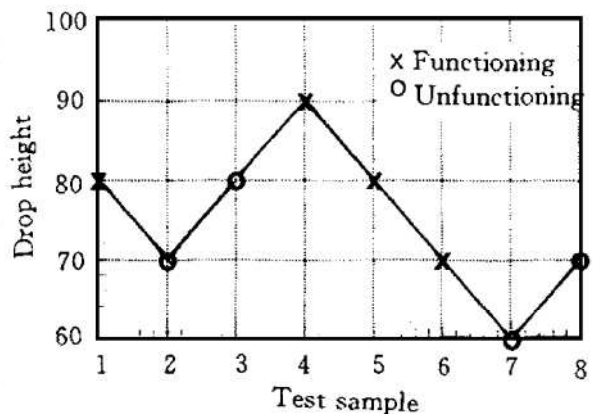


Fig. 1 The decomposition diagram of up-and-down method

3 安全撞击强度

安全撞击强度,即在撞击试验中使推进剂不发生爆燃的最大撞击强度,在可靠性评定中,由具有高可靠度的临界撞击能的置信下限来估计。对于工程中常用的置信度为 $90\% \leq Y \leq 99\%$, 不响应可靠度 $R \geq 75\%$ 的情况,当 $v > 2$ 时,置信度至少为 Y 、可靠度为 R 的临界落高的置信下限 h_R 为

$$h_R = \hat{\mu} - \sqrt{\frac{2v-1}{2v-2}} \left| 1 - \frac{u_Y^2}{w} \right|^{-1} u_R + u_Y \sqrt{\frac{1}{nn} \left| 1 - \frac{u_Y^2}{w} \right| + \frac{u_R^2}{w}} \hat{\sigma} \quad (2)$$

$$w = 2 \left| vr + uy - 0.64 \right| - 1 / \sqrt{vr + uy - 0.64} \quad (3)$$

$$r = \left| 0.25 + (7uy/v)^2 \right| (s/d)^{5/\ln v} \quad (4)$$

其中 u_R 和 u_Y 分别是概率为 R 和 Y 的标准正态偏量。 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 可由对子落高的统计量来估计,在临界落高服从正态分布的条件下有

$$\hat{\mu} = (1/n) \sum_i n_i h_i^o \quad (5)$$

标准差 σ 的估计量

$$\hat{\sigma} = \sqrt{n} s \quad (6)$$

式中

$$n^{(7)} = 2.89e^{5(2.1-j/\ln v)/(s/d)^2} \quad (7)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i n_i (h_i^o - \hat{\mu})^2}{v}} \quad (8)$$

式中 s 为样本方差, $v = n - 1$ 为子样方差的自由度, j 为刺激量级数。

置信度为 $90\% \leq Y \leq 99\%$, $R \geq 75\%$ 下的安全撞击强度 E_R 可由下式确定^[4]:

$$E_R = G(h_R - h) \quad (9)$$

其中 $G = mg$ 为落锤重力; h 为落锤反跳高度。安全撞击强度越大, 则推进剂的安全性越好, 越不易发生爆燃。

4 综合利用当前试验数据和以往试验数据估计安全撞击强度

设根据当前的撞击试验数据求得子样均值 $\hat{\mu}$ 、子样方差 s^2 及其自由度 v 。另有 m 组以往积累的撞击试验数据, 其子样均值为 $\hat{\mu}_i$, 子样方差为 s_i^2 和自由度为 v_i 。如果 $E(b_i^2 s_i^2 / d_i) \geq E(s^2 / d)$, 其中 b_i^2 为缩放系数, d 为当前试验的落高增量, d_i 为第 i 组以往撞击试验的落高增量, 那么用当前试验和以往试验的组合标准差

$$s_c = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m \frac{b_i^2 d}{d_i} v_i s_i^2 + v s^2 \right) / v_c} \quad (10)$$

及其自由度 $v_c = \sum_{i=1}^m v_i + v$ 代替式 (2) ~ (9) 中的 s 和 v , 即可得到置信度至少为 Y 、可靠度为 R 的安全撞击强度 E_R 。

要判断 $E(b_i^2 s_i^2 / d_i) \geq E(s^2 / d)$, 通常可采用下面的两种方法, 一是根据经验和有关物理性质进行判断, 例如, 厂家由于提高了生产及质量管理水平, 各种波动因素得到了进一步控制, 其产品性能的分散性不会比原来的大等。二是采用 F 检验: 如果 $d s^2 / b_i^2 d_i s_i^2 > F_{\alpha}(v, v_i)$, 那么在显著水平 α (通常可取 $\alpha = 5\%$ 或 10%) 下, 可以断定 $E(b_i^2 s_i^2 / d_i) \geq E(s^2 / d)$ 不成立, 否则不能拒绝条件 $E(b_i^2 s_i^2 / d_i) \geq E(s^2 / d)$ 。缩放系数 b_i 可以是任意正实数, 通常当 s_i^2 / d_i 与 s^2 / d 大小相近时, 可取 $b_i = 1$; $s_i / \hat{\mu}_i d_i$ 与 $s / \hat{\mu} d$ 大小相近时, 可取 $b_i = \hat{\mu} / \hat{\mu}_i$ (这里的 b_i 为定值, 即 $\hat{\mu}_i$ 和 $\hat{\mu}$ 分别只取某一次试验中的子样均值, 而非随机变量)。

5 Monte Carlo 模拟对比分析及实例

大量的 Monte Carlo 模拟试验表明, 传统的 Bruceton 对方差的估计系统地偏小, 而本文方法不仅可以在小样本条件下估计方差, 且方差估计精度远优于传统的统计方法。此外, 我们在对置信度进行大量的 Monte Carlo 模拟验证后发现: 本文方法得到的置信度通常要大于预先指定的置信度, 即可信程度更高; 而 Bruceton 法则远达不到指定的置信度, 导致安全撞击强度误差过大, 偏于危险。本文还利用国军标中评定火工品可靠性的方法^[5]来估计安全撞击强度, 结果表明, 该方法同样不能满足置信度要求, 这是由于该方法仍沿用 Bruceton 法来估计方差, 加之所采用的置信下限公式不准造成的。表1给出了根据 GAP 基推进剂撞击试验^[6]的实际结果而取 $\mu = 44.66 \text{ cm}$ 、 $\sigma = 3.05 \text{ cm}$ 及 $d = \sigma$ 的 Monte Carlo 模拟试验结果 (每种情况进行了 10 000 组试验)。

Table 1 The contrast result of confidence level of safe impact strength

Samples per unit	Estimate of confidence level $\hat{Y} (Y=0.95)$			Estimate of confidence level $\hat{Y} (Y=0.90)$		
	The method in this paper	Bruceton method	The method in GJB ^[5]	The method in this paper	Bruceton method	The method in GJB ^[5]
10	0.999	0.190	0.776	0.999	0.194	0.773
20	0.999	0.267	0.740	0.996	0.266	0.664
30	0.999	0.305	0.798	0.996	0.301	0.618
40	0.998	0.306	0.788	0.996	0.307	0.735
50	0.998	0.310	0.828	0.987	0.303	0.714
100	0.996	0.373	0.865	0.975	0.374	0.779

表2给出了某推进剂10个试件的撞击升降法试验结果 (单位: cm), 用本文方法评估该型推进剂的撞击安全性。

Table 2 Impact testing result of a propellant cm

<i>i</i>	<i>y_i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	60							1			
1	55						0		1		1
0	50	1		1		0				0	
- 1	45		0		0						

首先, 根据表2中的试验数据和式 (5)、式 (6) 求得: $u=4, j=4, d=5$, 均值估计量 $\hat{\mu}=51.5$ 和方差估计量 $\hat{\sigma}=6.664$, 然后再由式(2) 得到置信度为95%、可靠度为99.9% 的安全落高为20.3 cm。将临界落高的置信下限 $h_R=20.3$ cm、重锤质量 $m=5$ kg 及反跳高度 $h=2.5$ cm 代入式(9) 得置信度为95%、可靠度为99.9% 的安全撞击强度为 $E_R=5\times9.8\times(0.203-0.025)=8.72$ (J)。

需要指出的是, 仅由10个试件的试验结果确定高置信度的安全撞击强度, 传统方法是无能为力的。

6 结 论

综上所述, 与传统方法相比, 本文提出的确定推进剂安全撞击强度的方法不仅估计精度高, 而且可以大大减少试验量。此外, 本文方法还可以应用于材料性能测试、高电压试验及炮弹穿甲威力试验等工程领域。

参 考 文 献

1 Barry A Bolt. Design and estimation in small sample quantal response problems: a Monte Carlo study, AD-A208115, 1989.

2 傅惠民, 殷 刚. 二维升降法. 航空学报. 1998, 19 (6): 748~753

3 梁美训, 傅惠民. 以最大或然估计量作为随机变量的半子样升降法. 固体力学学报, 1986 (4): 383~387

4 Schiperoord A A. Go-no go statistics: experimental comparison of several methods. The Proceeding of the 12 Symposium of Explosives and Pyrotechnics, 1993: 3~89

5 GJB376- 87. 火工品可靠性评估方法. 1987.

6 李辰芳. 国外对 GAP 基推进剂感度性能的研究. 飞航导弹, 1996 (12): 48~51