



中华人民共和国安全生产行业标准

AQ/T 4105—2023

代替 AQ 4105—2008

烟花爆竹 烟火药 TNT 当量测定方法

Fireworks-Determination methods of TNT equivalent of pyrotechnics

2023-02-21 发布

2023-08-20 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测定原理	2
5 试验条件	2
6 试验仪器和设备	3
7 试验程序	4
8 TNT 当量计算及测量不确定度评定	5
附录 A (规范性) 测量不确定度评定	8

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 AQ 4105—2008《烟花爆竹 烟火药 TNT 当量测定方法》，与 AQ 4105—2008 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 修改了试验数量要求(见 5.4,2008 年版的 8.9)；
- b) 修改了起爆方式(见 5.6,2008 年版的第 8 章)；
- c) 修改了测点布置要求,包含内外部安全距离(比例距离)范围(见 5.7,2008 年版的 8.2)；
- d) 重新编写了试验测量仪器设备的主要技术参数和要求(见第 6 章,2008 年版的第 4 章)；
- e) 提出了新的超压 TNT 当量计算方法,包含测量数据归一化处理及不同比例距离 TNT 当量分布计算(见 8.2、8.3、8.4、8.5.1、8.6.1、8.7.1、8.8,2008 年版的第 9 章)；
- f) 增加了爆炸空气冲击波比冲量 TNT 当量计算方法(见 8.5.2、8.6.2、8.7.2、8.8)；
- g) 增加了测量不确定度评定方法(见 8.9 和附录 A)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国应急管理部提出。

本文件由全国安全生产标准化技术委员会烟花爆竹安全分技术委员会(SAC/TC 288/SC 4)归口。

本文件起草单位：中国兵器工业火炸药工程与安全技术研究院,北京市烟花爆竹质量监督检验站、中国烟花爆竹协会、北京理工大学、南京理工大学、国家民用爆破器材质量检验检测中心。

本文件主要起草人：李素灵、魏新熙、曾丹、崔宁、杜博文、阎翀、雷驰、李增义、杜志明、徐森、张建新、刘刚、陈雁北、雷康。

本文件历次版本发布情况为：

——2008 年首次发布为 AQ 4105—2008；

——本次为首次修订。

烟花爆竹 烟火药 TNT 当量测定方法

1 范围

本文件规定了自由场条件下,烟花爆竹用烟火药爆炸冲击波超压及比冲量 TNT 当量的试验测定方法,包括试验条件、试验仪器和设备、试验程序、数据处理及测量不确定度评估等内容。

本文件适用于烟花爆竹用烟火药 TNT 当量的试验测定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 27418—2017 测量不确定度评定和表示

GJB 5720—2006 爆轰术语

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冲击波 shock wave

介质中相对于波前介质以超声速传播的强间断波,波阵面上介质的应力(或压力)、密度、温度等物理量发生突跃变化。

[来源:GJB 5720—2006,2.1.4]

3.2

爆炸冲击波 explosion wave

爆炸作用在周围介质中产生的冲击波。

3.3

冲击波超压 shockwave overpressure

冲击波波阵面与周围未被扰动介质(如空气)之间的压强差。

3.4

冲击波比冲量 specific impulse of shockwave

冲击波超压对时间的积分,包括冲击波正相比冲量与负相比冲量。

3.5

冲击波超压 TNT 当量 TNT equivalent of shockwave overpressure

在距爆心相同距离处,产生的冲击波超压峰值相等时,TNT 装药质量与被试样品装药质量之比。

3.6

冲击波比冲量 TNT 当量 TNT equivalent of specific impulse of shockwave

在距爆心相同距离处,产生相同的冲击波比冲量时的 TNT 装药质量与被试样品装药质量之比。

3.7

测带 experiment band

试验场地中用来布置安装传感器的带状区域。

3.8

测量不确定度 uncertainty of measurement

利用可获得的信息,表征赋予被测量量值分散性的非负参数。

[来源:GB/T 27418—2017,3.1]

4 测定原理

采用压力传感器(以下简称传感器),将烟火药爆炸后在不同距离处产生的爆炸冲击波压力信号转换成电信号,并记录各传感器输出的信号波形(冲击波超压—时间曲线),经数据处理计算得到不同比例距离处的冲击波超压峰值和比冲量,并与相同条件下获得的 TNT 爆炸冲击波超压峰值、比冲量数据进行比较,根据爆炸相似率得到不同比例距离处烟火药的冲击波超压和比冲量 TNT 当量。

5 试验条件

5.1 环境条件

试验场区相对湿度小于 80%,无雨,无雪,无雷,无大雾,风速小于 5 m/s。

5.2 场地和设施

5.2.1 试验场地应地面平整,视野开阔,在冲击波测量要求范围内无障碍物。爆心处地面应为砂土或黏土夯实地面,上铺厚度为 10 mm~20 mm 的木板,木板边长应不小于装药纸筒直径。

5.2.2 测站(测控室)应采取防冲击波、防地震波措施,为试验人员提供足够的安全防护。测站内应有足够空间布置试验仪器和设备。

5.2.3 爆炸点周围 200 m 内应无人员活动,无易燃易爆物,无重要建筑物。

5.2.4 测站应设置接地装置,接地电阻宜不大于 4 Ω 。

5.3 试验药量

被试药剂试验药量宜在 3 kg~10 kg 之间,对未知爆炸能力的被试药剂,分别用 1 kg \pm 1 g、3 kg \pm 3 g、10 kg \pm 10 g 进行爆轰测试,根据测试结果确定试验药量。对比试验 TNT 装药量应与被试药剂药量相同。

5.4 试验数量

一种被试药剂最少进行三发试验。试验出现异常或测试数据出现异常时应补充试验,获得至少三发有效试验数据。

5.5 装药方式

5.5.1 被试药剂及 TNT 均宜采用圆柱形散装药,高径比宜为 1:1。

5.5.2 根据 TNT 和被试药剂的密度级试验药量,用牛皮纸(120 g/m²)制作装药纸筒,将规定质量的 TNT 和被试药剂缓慢倒入相应纸筒内,轻轻振动使药面平整。

5.6 起爆方式

5.6.1 试验采用触地起爆方式,TNT 和被试药剂放置于地面木板上。

5.6.2 试验应采用远程起爆。采用雷管起爆时,起爆宜采用双发雷管并联起爆。雷管不能直接起爆时可增加传爆药柱。

5.7 测点布置

5.7.1 试验应至少布置两条测带,夹角应不大于 90° 。

5.7.2 测点应布置在测带的轴线上,每条测带可根据试验药量在比例距离 $3\text{ m/kg}^{1/3}\sim 50\text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内布置不少于10个测点,测点距离分布应根据试验药量确定。可根据试验需要增加测点数量,每条测带上的对应测点与爆心的距离应相同,测点布置示意图见图1。

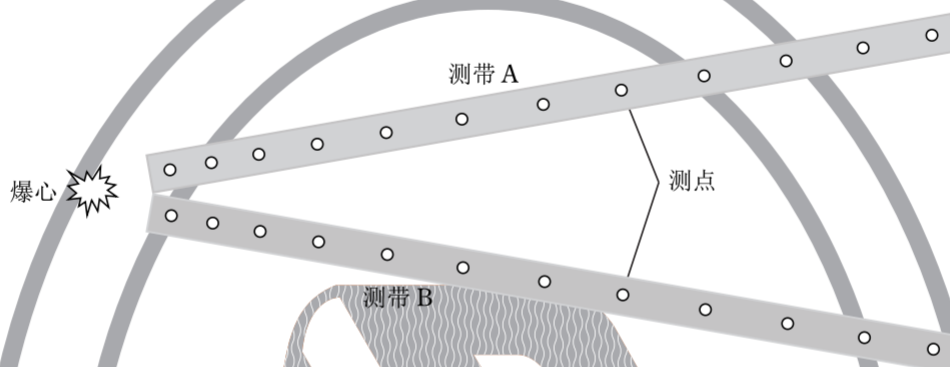


图1 测点布置示意图

5.8 取样方法

被试品及 TNT 均采用随机取样。

6 试验仪器和设备

6.1 传感器线性误差应不大于满量程的1%,谐振频率应不小于200 kHz,上升时间应不大于 $4\ \mu\text{s}$,分辨率应不大于量程的 $1/10^3$ 。宜采用壁面型传感器。

6.2 信号放大器、信号调理仪带宽应不小于1 MHz,线性误差应不大于1%。

6.3 数据记录仪各通道最高采样率应不小于2 MSa/s,模拟带宽应不小于1 MHz,直流精度应优于1%,存储深度应不小于0.4 s/ch。

6.4 低噪声信号电缆宜使用 $50\ \Omega$ 同轴铜芯屏蔽电缆,电缆铜芯截面积应不小于 $0.5\ \text{mm}^2$,噪声参考值应不大于1 mV,电容峰值应不大于95 pF/m。所用电缆长度尽可能保持一致,相差应不大于50%。除与传感器、信号放大器、信号调理仪连接处外,每个测量通道的电缆应无其他接头。

6.5 起爆器与雷管应配套,确保可靠起爆并联的双发雷管。

6.6 温度计分度值应不大于 $0.5\ ^\circ\text{C}$ 。

6.7 气压计分度值应不大于10 Pa。

6.8 风速仪量程为 $0.4\ \text{m/s}\sim 30.0\ \text{m/s}$,精度为 $\pm 2.0\%$,分辨率应优于 $0.1\ \text{m/s}$ 。

6.9 UPS 电源供电时间应不小于0.5 h。

6.10 零时信号源采用通断靶。当测试记录装置超过一台时,应采用逻辑电路将零时信号分配为两路以上,分别为测试记录装置提供零时信号源,零时信号同时作为测试记录装置的触发信号。

6.11 传感器安装件由传感器安装孔、基座和紧固螺栓等组成。

6.12 传感器、信号放大器、信号调理仪、数据记录仪等测量和记录装置应由计量检定机构进行检定或校准。传感器宜用激波管进行动态压力、谐振频率和灵敏度校准。数据记录仪的校准参数包括直流精

度、-3 dB 模拟带宽、线性度、通道隔离度等。

7 试验程序

7.1 测量信号预估

根据试验药量及被试药剂爆炸冲击波 TNT 当量的大致范围,预先估计各测点处的冲击波超压值,作为选择传感器和数据记录仪量程范围的依据。各测点冲击波超压可按公式(1)预估:

$$\Delta P = 1.02 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right) + 3.99 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^2 + 12.6 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^3 \dots\dots\dots(1)$$

式中:

ΔP ——冲击波超压峰值的预估值,单位为千克每平方厘米(kg/cm²,即 10⁵ Pa);

W ——对比试验 TNT 装药量或被试药剂按预估 TNT 当量折算的药量值,单位为千克(kg);

R ——爆心到各测点的实际距离的数值,单位为米(m)。

7.2 测点位置及传感器安装

7.2.1 按 5.7.2 布置测点。

7.2.2 根据各测点冲击波超压的预估值选择传感器,传感器量程应大于安装位置冲击波超压预估值的两倍以上。

7.2.3 将传感器安装于表面平整、直径不小于 20 mm 的钢板上,钢板厚度应不小于 10 mm。

7.2.4 传感器表面、钢板表面应与测点地面齐平。

7.2.5 传感器用螺栓紧固在基座上,并加橡胶垫圈防止振动,在爆炸冲击波作用下,传感器应不出现跳动、位移等现象。

7.2.6 传感器引线与信号电缆应可靠连接,并进行防水处理。

7.3 系统连接及调试

将传感器、信号放大器、信号调理仪、数据记录仪、UPS 不间断电源等测试仪器进行连接、调试,并将测试系统接地。

7.4 设置测试系统参数

7.4.1 数据记录仪采用外触发方式进行触发,外触发信号由零时信号源提供,并设置负延时不小于 1 ms。

7.4.2 根据冲击波超压的预估值设置数据记录仪各通道的量程,宜为预估值的两倍至三倍。

7.4.3 根据各测点传感器灵敏度参数设置数据记录仪各通道转换系数,将测试的电压或电流数据直接转换为压力数据。

7.4.4 设置数据记录仪的采样率不小于 2 MSa/s,根据冲击波到达最远测点的时间确定记录时间,记录时间应不小于 300 ms。

7.5 爆炸及测量

7.5.1 检查各测点传感器及其信号传输线路是否正常。

7.5.2 采用与试验药量相同药量的散装 TNT 进行系统验证,分析验证试验数据,判断系统是否正常,如系统正常开始正式试验。如系统处于不正常状态,应分析原因,消除影响因素或故障,并再次利用散装 TNT 进行验证。

7.5.3 再次检查各测点传感器及其信号传输线路是否正常,确定零时信号装置处于断电状态。

- 7.5.4 将对比试验 TNT 置于爆心位置的木板上,连接雷管等起爆装置。连接零时信号线及电起爆线。
- 7.5.5 人员进入测站或掩体。
- 7.5.6 警戒人员确认场地警戒安全。
- 7.5.7 起爆前 1 min 内测量风速、风向、大气压、温度、湿度等气象数据,并记录。当风速和湿度不符合 5.1 的规定时,应停止试验。
- 7.5.8 打开零时信号装置电源。
- 7.5.9 测试系统进入待触发测试状态。
- 7.5.10 起爆。
- 7.5.11 爆炸结束后,确认测试记录装置是否正常触发,查看各测点数据及波形,并初步判断各通道是否获得完整有效数据,当出现异常(包括未采集到数据、数据波形异常、超量程等)的测点数超过全部测点数的 20%时,补充试验。
- 7.5.12 采集数据波形不符合试验要求时,调整各测试通道的量程等参数。
- 7.5.13 回填爆坑、夯实,并平整场地,准备进行下一发试验。
- 7.5.14 用被试药剂代替 TNT,重复步骤 7.5.3~7.5.13。
- 7.5.15 重复步骤 7.5.3~7.5.14,直到试验全部完成。
- 7.5.16 初步分析试验数据,TNT 和被试药剂的试验数据获取率均不应低于 90%,否则应进行补充试验,以确保 TNT 和被试药剂的最终试验数据超过原计划应得试验数据的 90%以上。

8 TNT 当量计算及测量不确定度评定

8.1 测量数据判读

试验完成后,读取每发试验的各测点测量数据,包括冲击波超压峰值、到达时间、上升时间、正压作用时间(或直接读取正相比冲量)等数据。

8.2 试验数据归一化处理

将试验条件参数和得到的冲击波超压峰值、冲击波比冲量数据,进行归一化处理,修正到标准环境下的数据。

8.3 平均值和标准差计算

利用归一化处理后的数据,分别计算各测点距离、冲击波超压峰值、比冲量的平均值和标准差。

8.4 异常数据剔除

分析各测量距离冲击波超压和比冲量的平均值及标准差,用格拉布斯法判断在测量过程中由于仪器突然故障、突然的环境条件变化(如突然冲击或振动、电源电压突变等)等原因导致的测量数据异常。经判断确为异常的数据,予以剔除。

8.5 TNT 爆炸冲击波变化规律分析

8.5.1 超压变化的一般规律

以 TNT 试验各测点冲击波超压峰值及爆心距各测点距离归一化处理后的平均值数据为样本,按公式(2)用最小二乘法进行数据拟合,计算拟合系数 $a=(a_1, a_2, a_3)$,得到 TNT 爆炸冲击波超压变化的一般规律。

$$\Delta P_T = f(\bar{R}_T, a) = \sum_{i=1}^3 a_i \left(\frac{W_T^{1/3}}{R} \right)^i \dots\dots\dots (2)$$

式中：

ΔP_T ——TNT 试验爆心距测点距离与冲击波超压峰值利用最小二乘曲线拟合得到的函数关系；

\bar{R}_T ——TNT 试验测点比例距离,单位为米每千克的三分之一次方(m/kg^{1/3})；

W_T ——TNT 试验药量,单位为千克(kg)。

8.5.2 比冲量变化的一般规律

以 TNT 试验各测点冲击波比冲量及爆心距各测点距离归一化处理后的平均值数据为样本,按公式(3)用最小二乘法进行数据拟合,计算拟合系数 $b = (b_1, b_2, b_3)$,得到单位质量 TNT 爆炸冲击波比冲量变化的一般规律。

$$I_T = f(\bar{R}_T, b) = \sum_{i=1}^3 b_i \left(\frac{W_T^{2/3}}{R} \right)^i \dots\dots\dots (3)$$

式中：

I_T ——TNT 试验爆心距测点距离与冲击波比冲量利用最小二乘曲线拟合得到的函数关系。

8.6 被试品爆炸冲击波变化规律分析

8.6.1 超压变化的一般规律

以被试品试验各测点冲击波超压峰值及爆心距各测点距离归一化处理后的平均值数据为样本,按公式(4)用最小二乘法进行数据拟合,计算拟合系数 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 。

$$\Delta P = f(\bar{R}, c) = \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^i \dots\dots\dots (4)$$

式中：

ΔP ——被试品试验爆心距测点距离与冲击波超压利用最小二乘曲线拟合得到的函数关系；

\bar{R} ——被试品试验测点比例距离,单位为米每千克的三分之一次方(m/kg^{1/3})；

W ——被试品试验药量,单位为千克(kg)。

n 取 2 或 3,经过多次拟合,运用决定系数(判定系数)和回归标准差检验模型对被试品试验值的拟合程度,选择决定系数最高时 n 的取值,得到被试品爆炸冲击波超压变化的一般规律。

8.6.2 比冲量变化的一般规律

以被试品各测点冲击波比冲量及爆心距各测点距离归一化处理后的平均值数据为样本,按公式(5)用最小二乘法进行数据拟合,计算拟合系数 $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 。

$$I = f(\bar{R}, d) = \sum_{i=1}^n d_i \left(\frac{W^{2/3}}{R} \right)^i \dots\dots\dots (5)$$

式中：

I ——被试品试验爆心距测点距离与冲击波比冲量利用最小二乘曲线拟合得到的函数关系。

n 取 2 或 3,经过多次拟合,运用决定系数(判定系数)和回归标准差检验模型对被试品试验值的拟合程度,选择决定系数最高时 n 的取值,得到单位质量被试品爆炸冲击波比冲量变化的一般规律。

8.7 TNT 当量计算

8.7.1 冲击波超压 TNT 当量

按公式(4)计算各测点处被试品的冲击波超压值 ΔP ,代入公式(2)中,取 $\Delta P = \Delta P_T$,计算 TNT 爆炸时与被试药剂获得相同冲击波超压时的比例距离,并按公式(6)计算各测点对应的比例距离处的冲击

波超压 TNT 当量。

$$E_p^* = \left(\frac{Z_{\text{测}}}{Z_T} \right)_{P=\text{CONST}}^3 = \left(\frac{R/\sqrt[3]{W}}{R_T/\sqrt[3]{W_T}} \right)_{P=\text{CONST}}^3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

E_p^* —— 未经传爆药柱修正时被试品的 TNT 超压当量；

$Z_{\text{测}}$ —— 被试品各测点处的比例距离；

Z_T —— 与被试品各测点超压峰值相同、按公式(2)计算得到的 TNT 爆炸对应的比例距离。

8.7.2 冲击波比冲量 TNT 当量

按公式(5)计算各测点处被试品的冲击波比冲量值 I ，代入公式(3)，取 $I=I_T$ ，计算 TNT 爆炸时被试品获得相同冲击波比冲量时的比例距离，按公式(7)计算各测点对应的比例距离处的冲击波比冲量 TNT 当量。

$$E_i^* = \left(\frac{Z_{\text{测}}}{Z_T} \right)_{I=\text{CONST}}^{3/2} = \left(\frac{R/\sqrt[3]{W}}{R_T/\sqrt[3]{W_T}} \right)_{I=\text{CONST}}^{3/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

E_i^* —— 未经传爆药柱修正时被试品的冲击波比冲量 TNT 当量。

8.8 传爆药柱修正

若试验时使用了传爆药柱，应按公式(8)、公式(9)对计算结果进行修正，以消除传爆药柱爆炸效应对试验结果的影响。

$$E_p = E_p^* - \frac{D_Q}{W} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$E_i = E_i^* - \frac{D_Q}{W} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

E_p —— 经传爆药柱修正后被试品的冲击波超压 TNT 当量；

D_Q —— 传爆药柱药量，单位为千克(kg)；

E_i —— 经传爆药柱修正后被试品的冲击波比冲量 TNT 当量。

8.9 测量不确定度评定

按附录 A 规定的方法和程序对测量结果进行测量不确定度评定。

附 录 A
(规范性)
测量不确定度评定

A.1 测量不确定度来源和评定方法

A.1.1 测量不确定度来源

本文件测量不确定度来源主要包括测量重复性引入的不确定度和数据拟合引入的不确定度。两个以上同品种(TNT或被试药剂)爆炸物质量差异引入的测量不确定度,冲击波超压、冲击波比冲量引入的测量不确定度,以及经标准大气压修正后各测点距爆心距离变化引入的测量不确定度均按测量重复性引入的测量不确定度进行评定。

A.1.2 测量不确定度评定方法

根据 JJF 1059.1—2012 要求,试验重复性引入的测量不确定度采用 A 类评定,数据拟合引入的不确定度采用 B 类评定。

A.2 评定程序

A.2.1 测量不确定度分量

被测量 E_p 和 E_l 的不确定度分量有:

- a) 被试品试验药量 W 及 TNT 试验药量 W_T 引入的测量不确定度分量;
- b) 测点到爆心的距离测量重复性(经大气修正后的数值)引入的不确定度分量;
- c) 由数据拟合引入的不确定度分量。

A.2.2 标准不确定度评定

A.2.2.1 被试品及 TNT 试验药量的测量不确定度分量 $u_A(W)$ 和 $u_A(W_T)$

质量测量重复性引入的标准不确定度按公式(A.1)、公式(A.2)计算:

$$u_A(W) = \frac{s(W)}{\sqrt{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (W_i - \bar{W})^2}{m(m-1)}} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$u_A(W)$ ——被试品试验药量的测量不确定度;

m ——相同药量的被试品数量。

$$u_A(W_T) = \frac{s(W_T)}{\sqrt{m_T}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m_T} (W_{Ti} - \bar{W}_T)^2}{m_T(m_T-1)}} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$u_A(W_T)$ ——TNT 试验药量的测量不确定度;

m_T ——相同药量的 TNT 数量。

其相对标准不确定度按公式(A.3)计算。

$$u'_A(W) = \frac{u_A(W)}{W}, \quad u'_A(W_T) = \frac{u_A(W_T)}{W_T} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

- \bar{W} ——测量出的被试品的平均质量；
- \bar{W}_T ——测量出的 TNT 的平均质量；
- $u'_A(W)$ ——被试品试验药量的相对标准不确定度；
- $u'_A(W_T)$ ——TNT 药量的相对标准不确定度。

A.2.2.2 测点距爆心距离的标准不确定度 $u_k(R_k)$ 和 $u_k(R_{Tk})$ 分量

用贝塞尔公式,即按公式(A.4)分别计算相同药量的被试样品 n 次试验爆炸时各测点距爆心距离的标准测量不确定度:

$$u_k^{\Delta p}(R_k) = u_k^I(R_k) = \frac{s_k(R)}{\sqrt{2n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} (R_{ki} - \bar{R}_{ki})^2}{2n(2n-1)}} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

- $u_k^{\Delta p}(R_k)$ ——相同药量的被试品 n 次试验爆炸时各测点距爆心距离的冲击波超压标准测量不确定度；
- $u_k^I(R_k)$ ——相同药量的被试品 n 次试验爆炸时各测点距爆心距离的冲击波比冲量标准测量不确定度；
- R_k ——相同药量的被试品 n 次试验爆炸时各测点距爆心距离。

A.2.2.3 超压数据拟合不确定度分析

将被试品及 TNT 在每个测点位置上的有效峰值冲击波超压数据代入公式(A.5)、公式(A.6)求冲击波超压数据的算术平均值和标准不确定度。

$$\overline{\Delta p_k} = \frac{\sum_{i=1}^{2n} \Delta p_{ki}}{2n}, \quad \overline{\Delta p_{Tk}} = \frac{\sum_{i=1}^{2n_T} \Delta p_{Tki}}{2n_T} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

- $\overline{\Delta p_k}$ ——被试品试验得到的第 k 个测点冲击波超压修正平均值,单位为帕(Pa)；
- Δp_{ki} ——第 i 次被试品试验得到的第 k 个测点冲击波超压修正值,单位为帕(Pa)；
- n ——被试品试验次数；
- $\overline{\Delta p_{Tk}}$ ——TNT 试验得到的第 k 个测点冲击波超压修正平均值,单位为帕(Pa)；
- Δp_{Tki} ——第 i 次 TNT 试验得到的第 k 个测点冲击波超压修正值,单位为帕(Pa)；
- n_T ——TNT 试验次数。

$$\sigma_{\Delta p} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} (\Delta p_{ki} - \overline{\Delta p_k})^2}{2n(2n-1)}}, \quad \sigma_{\Delta p_T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n_T} (\Delta p_{Tki} - \overline{\Delta p_{Tk}})^2}{2n_T(2n_T-1)}} \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

- $\sigma_{\Delta p}$ ——被试品试验得到的各测点冲击波超压数据的标准不确定度；
- $\sigma_{\Delta p_T}$ ——TNT 试验得到的各测点冲击波超压数据的标准不确定度。

将测点 k 距爆心距离 R_k 代入被试品的冲击波超压拟合曲线得到 $\Delta p_k'$,水平投影到 TNT 拟合曲线上,采用数值计算方法得到相同冲击波超压值对应的测点距离,记为 R_{Tk} 。

按公式(A.7)、公式(A.8)分别利用 3σ 确定被试样品和 TNT 冲击波超压拟合曲线 $\overline{\Delta p}$ 和 $\overline{\Delta p_T}$ 95% 置信区间的半宽度。

$$a(\Delta p_k) = \zeta\% \times \Delta p_k', \quad a(\Delta p_{Tk}) = \zeta_T\% \times \Delta p_{Tk}' \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

$a(\Delta p_k)$ ——被试品冲击波超压拟合曲线 $\overline{\Delta p}$ 95%置信区间的半宽度;

$a(\Delta p_{Tk})$ ——TNT 冲击波超压拟合曲线 $\overline{\Delta p_T}$ 95%置信区间的半宽度。

$$\zeta\% = \frac{\sum_{k=1}^M (3\sigma_{\Delta p} / \overline{\Delta p}_k)}{M}, \quad \zeta_T\% = \frac{\sum_{k=1}^M (3\sigma_{\Delta p_T} / \overline{\Delta p}_{Tk})}{M} \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

M ——测带上布置的不同距离的测点数。

测量值在允许误差极限范围内的概率分布按均匀分布考虑,则被试样品和 TNT 数据拟合引入的冲击波超压的标准不确定度 $u_{Bk}^{\Delta p}(\Delta p_k)$ 、 $u_{Bk}^{\Delta p_T}(\Delta p_{Tk})$ 按公式(A.9)计算。

$$u_{Bk}^{\Delta p}(\Delta p_k) = a(\Delta p_k) / k_T, \quad u_{Bk}^{\Delta p_T}(\Delta p_{Tk}) = a(\Delta p_{Tk}) / k_T \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

$u_{Bk}^{\Delta p}(\Delta p_k)$ ——数据拟合引入的被试品冲击波超压的标准不确定度;

$u_{Bk}^{\Delta p_T}(\Delta p_{Tk})$ ——数据拟合引入的 TNT 冲击波超压的标准不确定度;

k_T ——概率分布的置信因子,此处 $k_T = \sqrt{3}$ 。

以数据拟合引入的超压不确定度 $u_{Bk}^{\Delta p}(\Delta p_k)$ 和 $u_{Bk}^{\Delta p_T}(\Delta p_{Tk})$ 为半宽度,利用 TNT 拟合曲线公式,计算 $\Delta p_k' \pm u_{Bk}^{\Delta p}(\Delta p_k)$ 投影到 TNT 拟合曲线上对应的 R 取值和 $\Delta p_{Tk}' \pm u_{Bk}^{\Delta p_T}(\Delta p_{Tk})$ 在 TNT 拟合曲线上对应的 R 取值,分别记为 R_{Tk1}^+ 、 R_{Tk1}^- 和 R_{Tk2}^+ 、 R_{Tk2}^- ,则由被试样品及 TNT 冲击波超压标准不确定度引入的 TNT 拟合曲线上距离的测量不确定度 $u_{Bk}^{\Delta p}(R_{Tk})$ 和 $u_{Bk}^{\Delta p_T}(R_{Tk})$ 分别按公式(A.10)、公式(A.11)计算。

$$u_{Bk}^{\Delta p}(R_{Tk}) = \max\{|R_{Tk1}^- - R_{Tk}|, |R_{Tk} - R_{Tk1}^+|\} \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

$u_{Bk}^{\Delta p}(R_{Tk})$ ——被试品冲击波超压标准不确定度引入的 TNT 拟合曲线上距离的测量不确定度;

R_{Tk} ——TNT 拟合曲线上第 k 个测点到爆心的距离,单位为米(m);

R_{Tk1}^+ 、 R_{Tk1}^- —— $\Delta p_k' \pm u_{Bk}^{\Delta p}(\Delta p_k)$ 投影到 TNT 拟合曲线上得到对应的 R 取值,单位为米(m)。

$$u_{Bk}^{\Delta p_T}(R_{Tk}) = \max\{|R_{Tk2}^- - R_{Tk}|, |R_{Tk} - R_{Tk2}^+|\} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中:

$u_{Bk}^{\Delta p_T}(R_{Tk})$ ——TNT 冲击波超压标准不确定度引入的 TNT 拟合曲线上距离的测量不确定度;

R_{Tk2}^+ 、 R_{Tk2}^- —— $\Delta p_{Tk}' \pm u_{Bk}^{\Delta p_T}(\Delta p_{Tk})$ 投影到 TNT 拟合曲线上得到对应的 R 取值,单位为米(m)。

按公式(A.12)计算数据拟合引入的 TNT 冲击波超压曲线上距爆心距离的合成标准不确定度。

$$u_k^{\Delta p_T}(R_{Tk}) = \sqrt{u_{Bk}^{\Delta p}(R_{Tk})^2 + u_{Bk}^{\Delta p_T}(R_{Tk})^2} \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

$u_k^{\Delta p_T}(R_{Tk})$ ——数据拟合引入的 TNT 冲击波超压曲线上距爆心距离的合成标准不确定度。

A.2.2.4 冲击波比冲量数据拟合不确定度分析

将每个测点位置上测得的冲击波比冲量数据代入公式(A.13)、公式(A.14)求算术平均值和标准不确定度。

$$\bar{I}_k = \frac{\sum_{i=1}^{2n} I_{ki}}{2n}, \quad \bar{I}_{Tk} = \frac{\sum_{i=1}^{2n_T} I_{Tki}}{2n_T} \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:

\bar{I}_k ——被试品爆炸第 k 个测点冲击波比冲量修正平均值,单位为帕秒(Pa·s);

I_{ki} ——第 i 次被试品试验第 k 个测点得到的修正冲击波比冲量值,单位为帕秒(Pa·s);

\bar{I}_{Tk} ——TNT 爆炸第 k 个测点冲击波比冲量修正平均值,单位为帕秒(Pa·s);

I_{Tki} ——第 i 次 TNT 试验第 k 个测点得到的冲击波比冲量修正值,单位为帕秒(Pa·s)。

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} (I_{ki} - \bar{I}_k)^2}{2n(2n-1)}}, \quad \sigma_{I_T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n_T} (I_{Tki} - \bar{I}_{Tk})^2}{2n_T(2n_T-1)}} \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

σ_I ——被试品试验得到的各测点冲击波比冲量数据的标准不确定度;

σ_{I_T} ——TNT 试验得到的各测点冲击波比冲量数据的标准不确定度。

将测点 k 距爆心距离 R_k 代入被测品的冲击波比冲量拟合曲线得到 I_k' , 水平投影到 TNT 拟合曲线上, 采用数值计算方法得到相同冲击波比冲量值对应的测点距离, 记为 R_{Tk} 。

按公式(A.15)、公式(A.16), 分别利用 3σ 确定被试品和 TNT 冲击波比冲量拟合曲线 \bar{I} 和 \bar{I}_T 95% 的置信区间的半宽度 $a(I_k)$ 和 $a(I_{Tk})$ 。

$$a(I_k) = \zeta\% \times I_k', \quad a(I_{Tk}) = \zeta_T\% \times I_k' \dots\dots\dots (A.15)$$

式中:

$a(I_k)$ ——被试品冲击波比冲量拟合曲线 \bar{I} 95% 置信区间的半宽度;

$a(I_{Tk})$ ——TNT 冲击波比冲量拟合曲线 \bar{I}_T 95% 置信区间的半宽度。

$$\zeta\% = \frac{\sum_{k=1}^M (3\sigma_I / \bar{I}_k)}{M}, \quad \zeta_T\% = \frac{\sum_{k=1}^M (3\sigma_{I_T} / \bar{I}_{Tk})}{M} \dots\dots\dots (A.16)$$

式中:

M ——测带上布置的不同距离的测点数。

测量值在允许误差极限范围内的概率分布按均匀分布考虑, 则被试品和 TNT 曲线拟合引入的冲击波比冲量的标准不确定度 $u_{I_k}^I(I_k)$ 、 $u_{I_{Tk}}^{I_T}(I_{Tk})$ 按公式(A.17)计算。

$$u_{I_k}^I(I_k) = a(I_k) / k_T, \quad u_{I_{Tk}}^{I_T}(I_{Tk}) = a(I_{Tk}) / k_T \dots\dots\dots (A.17)$$

式中:

$u_{I_k}^I(I_k)$ ——数据拟合引入的被试品冲击波比冲量的标准不确定度;

$u_{I_{Tk}}^{I_T}(I_{Tk})$ ——数据拟合引入的 TNT 冲击波比冲量的标准不确定度;

k_T ——概率分布的置信因子, 此处 $k_T = \sqrt{3}$ 。

以拟合曲线引入的冲击波比冲量的不确定度 $u_{I_k}^I(I_k)$ 和 $u_{I_{Tk}}^{I_T}(I_{Tk})$ 为半宽度, 利用 TNT 拟合曲线公式, 计算 $I_k' \pm u_{I_k}^I(I_k)$ 投影到 TNT 拟合曲线上对应的 R 取值和 $I_k' \pm u_{I_{Tk}}^{I_T}(I_{Tk})$ 在 TNT 拟合曲线上对应的 R 取值, 分别记为 R_{Tk1}^+ 、 R_{Tk1}^- 和 R_{Tk2}^+ 、 R_{Tk2}^- , 则由被试品及 TNT 冲击波比冲量不确定度引入的 TNT 拟合曲线上距离的测量不确定度 $u_{I_{Tk}}^I(R_{Tk})$ 和 $u_{I_{Tk}}^{I_T}(R_{Tk})$ 分别按公式(A.18)、公式(A.19)计算。

$$u_{I_{Tk}}^I(R_{Tk}) = \max\{|R_{Tk1}^+ - R_{Tk}|, |R_{Tk} - R_{Tk1}^-|\} \dots\dots\dots (A.18)$$

式中:

$u_{I_{Tk}}^I(R_{Tk})$ ——被试品冲击波比冲量标准不确定度引入的 TNT 拟合曲线上距离的测量不确定度。

$$u_{I_{Tk}}^{I_T}(R_{Tk}) = \max\{|R_{Tk2}^+ - R_{Tk}|, |R_{Tk} - R_{Tk2}^-|\} \dots\dots\dots (A.19)$$

式中:

$u_{I_{Tk}}^{I_T}(R_{Tk})$ ——TNT 冲击波比冲量标准不确定度引入的 TNT 拟合曲线上距离的测量不确定度。

按公式(A.20)计算数据拟合引入的 TNT 冲击波比冲量曲线上距爆心距离的合成标准不确定度。

$$u_k^{I_T}(R_{Tk}) = \sqrt{u_{I_{Tk}}^I(R_{Tk})^2 + u_{I_{Tk}}^{I_T}(R_{Tk})^2} \dots\dots\dots (A.20)$$

式中:

$u_k^{I_T}(R_{Tk})$ ——数据拟合引入的 TNT 冲击波比冲量曲线上距爆心距离的合成标准不确定度。

A.2.2.5 合成相对不确定度

根据各测量不确定度分量,按公式(A.21)、公式(A.22)分别计算被试品的 TNT 冲击波超压当量及冲击波比冲量当量的合成相对标准不确定度。

$$u_r(E_{pk}) = \frac{u(E_{pk})}{E_{pk}} = \sqrt{\left(\frac{u_A(W)}{W}\right)^2 + \left(\frac{u_A(W_T)}{W_T}\right)^2 + \left(3 \cdot \frac{u_k^{\Delta p}(R_k)}{R_k}\right)^2 + \left(3 \cdot \frac{u_k^{\Delta p_T}(R_{Tk})}{R_{Tk}}\right)^2} \dots\dots\dots (A.21)$$

式中:

$u_r(E_{pk})$ ——被试品的冲击波超压 TNT 当量的合成相对标准不确定度。

$$u_r(E_{Ik}) = \frac{u(E_{Ik})}{E_{Ik}} = \sqrt{\left(\frac{u_A(W)}{W}\right)^2 + \left(\frac{u_A(W_T)}{W_T}\right)^2 + \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{u_k^I(R_k)}{R_k}\right)^2 + \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{u_k^{I_T}(R_{Tk})}{R_{Tk}}\right)^2} \dots\dots\dots (A.22)$$

式中:

$u_r(E_{Ik})$ ——被试品的冲击波比冲量 TNT 当量的合成相对标准不确定度。

A.2.2.6 扩展不确定度

除非有特殊要求,按 JJF 1059.1—2012,取包含因子为 2,按公式(A.23)、公式(A.24)分别计算被试品冲击波超压和冲击波比冲量 95% 置信水平的扩展不确定度。

$$U(E_{pk}) = 2u_r(E_{pk}) \dots\dots\dots (A.23)$$

式中:

$U(E_{pk})$ ——被试品冲击波超压峰值 95%置信水平的扩展不确定度。

$$U(E_{Ik}) = 2u_r(E_{Ik}) \dots\dots\dots (A.24)$$

式中:

$U(E_{Ik})$ ——被试品冲击波比冲量 TNT 当量 95%置信水平的扩展不确定度。