

文章编号: 1006-9941(2004)03-0181-03

工业电雷管 $K-I$ 感度曲线解析

郝建春, 俞金良

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 对工业电雷管点火电流(I)和点火冲量(K)的测量研究,发现 $K-I$ 感度曲线实际上存在着一个极小值(即最小点火冲量);对曲线上不同阶段的点火过程作了相应的分析,并对偏离原理论的区段作了新的解释;最后进一步阐明了最小点火冲量和最大不点火冲量在发火感度指标中的重要性。

关键词: 电磁学;工业电雷管;点火冲量;点火电流

中图分类号: TJ457; TQ56

文献标识码: A

1 引言

点火冲量是40年代末文献^[1]中建立的一个感度概念,它反映了灼桥式电雷管主要的动力特性。点火冲量的数学表达式可由焦耳定律简单推出:

$$Q = 0.24I^2Rt \quad (1)$$

$$Q/0.24R = I^2 \cdot t = K \quad (2)$$

式中, Q 为热能(量),mJ; R 为桥丝电阻值, Ω ; I 为输入电流强度,A; t 为通电时间,ms; K 为电流冲量, $A^2 \cdot ms$ 。

此时,若输入电流强度使电雷管桥丝上粘附的引火药被点燃,则将(2)式中电流冲量称之为点火冲量。相应参数 I 则称之为点火电流, t 称之为点火时间。

为了使引火药头达到被引燃的最低温度,由灼热桥丝传给引火药的热量应累积到大于活化引火药分子所需的最小热量。该最小热量、最小温度和最小预热的数值取决于通入的点火电流的电流强度。该电流强度与引火药的化学成分、物理结构以及电桥和粘结剂的材质、尺寸等紧密相关。电流通过电桥放出热量,并随着输入电流强度的增大而显著增大。从(2)式可知,点火冲量是桥丝单位电阻所消耗的足以使点火药达到可自行反应的能量。

本实验通过对工业电雷管正式产品的测试,研究了点火冲量(K)和点火电流强度(I)的 $K-I$ 关系曲线,并对曲线上偏离原理论的区段做了新的补充性解释。

收稿日期: 2003-12-03; 修回日期: 2004-01-18

作者简介: 郝建春(1950-),男,研究员,从事军事化学与烟火技术专业的教学与研究。e-mail: haojianchun@sohu.com

2 $K-I$ 曲线的理论解释

A·И·罗里叶的工业电雷管理论认为:随着点火电流强度的增大,点火冲量将减小,并与其成双曲线关系^[1]。其中垂直渐近线为最大安全电流(I_A),水平渐近线为最小点火冲量(K_D)。由此可见,只有给雷管输入的电流强度大大超过实际使用强度时,其点火冲量就趋近于一个常量^[2](见图2中 $AA'D$ 曲线)。

3 试验验证与结果

3.1 试验方案

被测元件1:由直径0.03 mm的镍铬桥丝、以 $Pb(CNS)_2/KClO_3$ 为主要成分的引火药头及长2.0 m钝铜脚线两根组成的电雷管点火元件(如图1所示)。

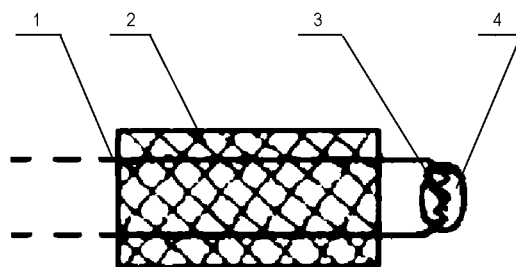


图1 工业电雷管灼热桥丝点火元件示意图

1—脚线, 2—塑胶卡口塞, 3—桥丝, 4—引火药头

Fig. 1 The sketch map of hot wire initiating component on commercial electric detonator

1—leg wire, 2—plastic bayonet plug, 3—bridge wire, 4—electric matchhead

被测元件 2: 无引火药的灼桥弹性电点火元件 (尺寸同被测元件 1)。

主测仪器: 爆破器材综合参数测量仪。

测试方法: 取多组 (每组 20 发) 被测元件, 每组元件分别输入某一强度的恒直流电使其被点火 (被测元

件 2 为桥丝熔断), 同时记录测得的通电时间 (t)。

计算公式: 采用公式 (2) 计算出相应的点火 (被测元件 2 为熔断) 冲量。

将被测元件 1 的试验结果取最具代表性的一组列于表 1。

表 1 不同点火电流强度下的点火冲量

Table 1 The initiation impulses at different initiation currents

I/A	0.37	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
$K/A^2 \cdot ms$	12.06	9.98	7.88	6.67	5.92	5.45	5.14	4.95	4.83	4.77
I/A	0.85	0.90	0.95	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60
$K/A^2 \cdot ms$	4.75	4.77	4.81	4.87	5.05	5.28	5.56	5.87	6.22	6.59

3.2 建立 $K-I$ 曲线

根据多组被测元件 1 试验结果可较精确地绘制成图 2 所示 $K-I$ 曲线的 $AA'BC$ 段。曲线 $AA'D$ 段是罗氏理论分析认为应存在的关系, 其中 $A'D$ 段 (虚线表示) 是经试验验证没有发现的“水平渐近线”线段。两条曲线的走向在 A' 点开始发生偏离。由图 2 可见, 试验曲线 $AA'BC$ 明显存在一个极小值点 B , 该点的纵坐标 K_B 可视为最小点火冲量, 横坐标 I_B 为最小点火冲量 K_B 对应的点火电流强度。在本测量范围内, 当输入电流强度 I 超过 I_B 逐步增大时, 点火冲量 K 仍然表现了与输入电流强度 I 有关的特性, 而点火时间 t 则是随着电流强度的增加明显减小, 这里表现出与罗氏理论的不一致。

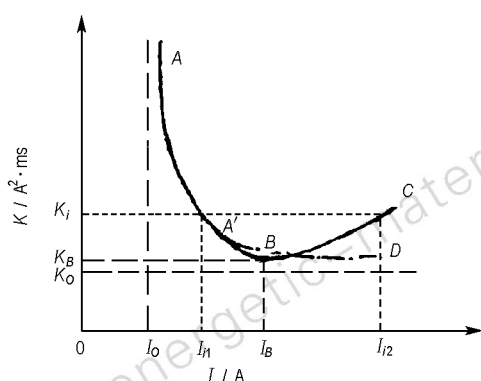


图 2 $K-I$ 感度曲线

Fig. 2 $K-I$ sensitivity curve

4 $K-I$ 曲线的试验解释

4.1 曲线的总体分析

元件 1, 以点火电流强度为 0.05 A 等值增加强度测试, 当输入恒直流电大于 0.8 A 以后, 点火时间随之急速缩短, 因而, 图 2 中的曲线 AA' 段显示出点火冲量

呈双曲线急速下降特性。在 $A'B$ 段下降趋于缓和, 过极小值 B 点 (如表 1 中 0.85 A 和 4.75 $A^2 \cdot ms$) 后, 曲线 BC 段点火冲量值随着点火电流强度继续增加而缓慢上升。

曲线的 B 点是试验得出的极值点。大于 K_B 的任何一个点火冲量值 K_i , 原则上都可以在横坐标上找到两个数值不同的点火电流强度 I_{i1} 和 I_{i2} 。在可测量范围内, K 值越大, 相应的两个数值不同的点火电流强度的差值也就越大。产生这种结果的直接原因, 不仅取决于桥丝电阻值、熔化温度, 而且与引火药剂的活化能、发热量、热感度等物理化学性能相互作用以及整个测试系统的线路组织有关。它涉及电能与热能转换、热传导和药剂的热爆炸三个方面的基础理论。著名的罗山索尔 (Rosenthol) 能量方程已经较成功地描述了这一发火过程。在试验曲线左边有一安全电流区 $[0, I_0]$, 表明在该区内的任何电流强度都不能使电雷管的引火药头点火; 在试验曲线的下面有一个安全冲量区 $[0, K_0]$, 同理, 在该区内任何电流冲量也都不会使雷管发火。在此, 我们感兴趣并要作出解释的是: 在测量范围内, 一个点火冲量有两个不同点火电流强度的反应机理是什么。

4.2 较弱电流点火段曲线 AA'

该段所对应的输入电流强度较弱 (一般不大于 0.40 A), 电桥通过预热到点火的时间较长 (一般大于 50 ms)。即电点火药头能获得所必需的热量积累以达到反应温度较慢。曲线在该段的反应机理主要是热积累达到反应温度的时间效应十分明显。

4.3 点火敏感段曲线 $A'BC$

随着点火电流强度的不断增加, 电热桥丝上的热积累速率很快达到可忽略热损耗的程度, 电桥几乎不

需要预热。在桥与药的接触面上迅速达到引火药可自行反应的温度。很明显,该曲线段在时间效应逐渐减弱的同时,点火电流效应则相应逐渐显著起来。可以认为,该段的反应机理中,电流强度作用占主导地位。其显著特点是电能可迅速转化为热能,达到点火的瞬时性高,均匀性好,可靠性高。

曲线过 B 点以后沿 BC 方向延伸,该上升段曲线的燃烧特性,主要是随着点火电流的不断增大,点火药头发火的不均匀性系数迅速减小,点火时间很快趋近于某个最小值(本试验约为 3 ms),电能通过桥丝直接转化为引火药剂的吸收热。此时,桥丝承受的电热功率已经很大,加之粘附的引火药剂对其氧化及反应热的烧蚀等作用,部分桥丝极有可能被熔断或蒸发。但是这并不意味着瞎火,因为桥丝熔融态的潜热或瞬间断区形成的电弧都能直接作用于引火药,使其获得足够的点火冲能。由于桥丝熔融消耗能量,所以在桥丝参数设计时,都使其熔断冲能大于点火冲能,从而保证了点火的可靠性。这一结论也已从对元件 2 的测量中得到证实,桥丝的熔断电流实际远远大于最小点火冲量 K_B 时的电流强度 I_B 。由于这符合罗氏关于工业电雷管的相关理论^[1],在此论述从略。当桥丝遭受强大的冲击电流的作用时,尤其在曲线 BC 的延长段,由于其物理状态部分已开始发生相变,其点火过程已经不能简单地用公式(2)来描述,而是由灼热桥丝趋向于爆炸桥丝点火理论的转化。随着点火电流强度 I 的迅速增大,桥丝由灼热、熔断发展到汽化形成冲击波点火。也就是说大于 K_B 的两个相等的点火冲量 K_i 中,以点火电流强度效应显著者如 I_{i2} ,具备了特殊条件下的实用性。爆炸桥丝雷管(EBW)、爆炸箔起爆器(EFI)等特种起爆器材的应用就证明了这一点。

综上所述,确定一个合适的点火冲量,对工业电雷管有着重要的实际意义,试验 $K-I$ 曲线的拐点附近具备点火瞬时性和可靠性高、均匀性好的特点。经过比较和计算试验所得的 B 点的最小点火冲量 K_B 是原理论水平渐近线的点火冲量 K_D 的 1.06 倍左右,恰好符合罗氏理论标称点火冲量值^[1,2],其点火电流 I_B 也恰好为其百毫秒点火电流的两倍范围,这里表现了与原理论对测量要求的相互吻合性。从曲线上可见,工业电雷管的最小点火冲量 K_B 恰好是点火时间和点火电流强度综合效应的最佳点。

5 结 论

(1) 工业电雷管 $K-I$ 感度曲线不是简单的双曲线关系,而是实际存在一个拐点,即有一个最小值存在。最小点火冲量对灼桥式电雷管的性能具有重要的实用价值。

(2) 应当注意,大于最小点火冲量的任何一个冲量值,原则上都可以在一定限度内找到两个不等的点火电流值。其差值越大,反应机理也会随之产生质的变化。

(3) 建议专业技术标准管理部门,在确定工业电雷管产品电性参数^[3,4]时,应在符合安全电流指标的基础上,增加工业电雷管最小点火冲量和最大不点火冲量参数为宜。

参考文献:

- [1] А·И·罗里叶,著. 张治平等,译. 工业电雷管[M]. 北京:国防工业出版社,1964.
- [2] 陈正衡. 矿用起爆器材[M]. 北京:煤炭工业出版社,1977.
- [3] 原苏联国家标准. ГOCT9085-76, ГOCT21806-76.
- [4] 中华人民共和国标准. GB8031-87.

Explanation on $K-I$ Sensitivity Curve of Commercial Electric Detonator

HAO Jian-chun, YU Jin-liang

(School of Chemical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: A minimum initiating impulse was found in testing curve of initiation current (I) and the initiation impulse (K) of commercial electric detonators. The different initiation processes at different region of the curve were analyzed and new explanations were given to different rules with old theory. The importance of the minimum initiation impulse and the maximal no-firing initiation impulse in the indexes of firing sensitivity is further clarified.

Key words: electromagnetics; commercial electric detonator; initiation impulse; initiation current