

一种新型爆炸开关的设计及研究

孟祥武, 何志伟, 郭子如, 程 奥, 王 洋, 詹 旭

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南, 232000)

摘 要: 为了克服传统熔断器在特殊环境下工作的缺点, 采用聚能装药结构设计了一种新型电路保护开关, 利用爆炸形成金属射流切断电路, 实现电器保护。使用 AUTODYN 软件数值模拟分析了小剂量装药下射流对电路的切断作用, 根据模拟计算数据确定了实验爆炸开关的外型和结构, 以二硝基重氮酚(DDNP)为炸药, 在药量 30~60mg、炸高 3~6mm 条件下进行对比实验。实验结果表明: 对于熔断片 (500V 100A) 采用 DDNP 装药炸高为 15mm、药量为 50mg 时侵彻效果最佳。

关键词: 爆炸效应; 聚能装药; 爆炸开关; 射流; 数值模拟

中图分类号: TJ45⁺9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.003

Design and Research of A New Type Explosion Switch

MENG Xiang-wu, HE Zhi-wei, GUO Zi-ru, CHENG Ao, WANG Yang, ZHAN Xu

(School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232000)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traditional fuse working in special environment, a new type of circuit protection switch was designed with the shaped charge. The circuit was cut off by the metal jet formed by explosion to realize the electrical protection. The cutting off effect of the jet on the circuit under the low dose charge using AUTODYN software was simulated and analyzed. According to the simulated data, the shape and structure of the experimental explosion switch were made, and DDNP was used as explosive in the contrast experiment under the condition of 30~60mg charge and 3~6mm explosion height. The experiment shows that for the fuse of 100A/500V, the penetration effect is the best when DDNP charge height is 15mm and charge quantity is 50mg.

Key words: Explosion effect; Shaped charge; Explosion switch; Jet; Numerical simulation

在实际的发电、输电及用电过程中, 难免会产生电路故障, 然而目前电力行业使用的断路器绝大部分是物理熔断片或机械断路器, 断开电路时间长达几十毫秒甚至上百毫秒以上。这种反应时长对于交流输电电路或是电压电流不敏感的系统有足够的容错率, 但是对于无惯性的直流输电系统来说, 几十毫秒的电网故障足够引发设备间的连锁反应, 严重威胁电网安全稳定。因此传统的电路保护方式已不能满足电子设备紧急情况下快速精准断电的要求, 电网的三道防线控

制不适用于直流等特殊电路系统^[1]。为了使电路电网在直流系统、强磁场等工作环境中得到保护, 迫切需要新型、高效、可控的断路元件。

对于传统断路器存在的不足, 涌现了采用化学能量为动力的断路装置应用于高功率、高电压、强直流的电路, 如爆炸式开断器载流体、电爆炸断路开关和等离子体融蚀断路开关等^[2]。综合其中, 爆炸断路开关具有反应快、应用广泛、价格低廉、结构简单、适合大规模生产等优点。因此, 本文提出了一种应用聚

收稿日期: 2019-12-13

作者简介: 孟祥武 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事工业炸药装药结构及性能研究。

能效应的新型非接触爆炸式断路器,防止导体产生的热量转导给炸药,在炸药不直接接触导体的情况下产生聚能射流,通过添加线性聚能药型罩加大对炸药能量的利用率^[1,3]。本研究阐述了其切割小尺寸电导体的原理,并对切割过程进行数值模拟,对电路保护性能进行实验验证。

1 爆炸开关装置的设计

1.1 爆炸开关结构

爆炸开关结构如图1所示。图1中壳中心贯穿一根优良导体,同时一爆炸聚能射流装置垂直正对于目标导体。壳内部分填充了缓冲物质。聚能装置的起爆由数字电路控制,信号外接到开关控制中心。

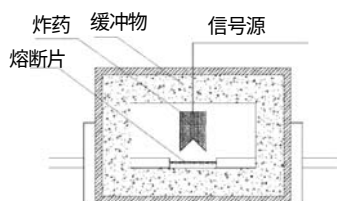


图1 爆炸开关结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of explosive switch

1.2 聚能装置结构设计

根据使用目的,聚能装置应满足几点基本要求:

(1) 小体积、小药量。聚能装置仅切割导体,并非破坏整个电路。同时为了防止产生有害噪声,需控制装置的总能量,所设计的装置需体积小、装药少。(2) 小锥角。根据聚能射流理论,锥角越小射流穿透深度越深、开口越小,本装置只需断开电路,无需花费多余能量开口,采用小锥角即可。(3) 结构尽量简单,易于加工和更换。爆炸开关为单次工作,即发生不可逆性断路装置即功能性报废,需更换开关才能恢复电路继续使用。爆炸材料具有良好的储存稳定性,有效储存周期内起爆性能可靠稳定,爆炸性能不变^[3]。(4) 采用塑料壳体。设计装药结构在高温、强磁等极端环境条件下仍能正常工作,采用非金属外壳可防止爆炸产生后金属碎片重新连电路,同时还可以防止金属破片的有害效应,减少成本。(5) 采用石英砂包覆。同样是为了防止断开后电路重新连通,同时可吸收爆炸产生的多余能量和噪音。

1.3 炸药种类的选用和药量

根据爆炸开关的结构功能设计要求,聚能装药结构必须实现对导体的彻底切割,保证电路完全断开,且避免产生电弧放电再次导通。聚能炸药结构需提前预埋在熔断器中,从安全性角度考虑,预置炸药量越少越安全,从起爆可靠性角度考虑,敏感度越高越好,但是安全性降低,同时需考虑装药结构的体积、炸药起爆最小临界直径、聚能射流终点效应等因素。通过大量前期预备实验结果的比较分析,并对比 RDX、PETN 和二硝基重氮酚(DDNP)的部分性能,选择合适的炸药。3种单质炸药的性能如表1所示。

表1 3种单质炸药的性能
Tab.1 Performance of three explosives

	RDX	DDNP	PETN
爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8 850	6 600	8 290
	($\rho=1.82\text{g}/\text{cm}^3$)	($\rho=1.5\text{g}/\text{cm}^3$)	($\rho=1.77\text{g}/\text{cm}^3$)
爆发点 $t_{\text{延滞期}}/\text{s}$	553	548	498
猛度	24	19	24

综合考虑诸多影响因素,选定起爆药 DDNP 作为爆炸开关的装药,DDNP 具有以下特点:(1) 临界直径小,可在较小装药直径下爆炸^[4];(2) DDNP 作为起爆药具有易起爆的特点,采用电火花即可起爆,简单的起爆方式可以加快保护响应速度,简化生产工艺;(3) 具有良好的安定性,可以长时间处于待起爆状态^[5];(4) 污染小。

装药量对产生金属射流的能量具有直接的影响,但实际应用过程中为了最大限度提高装药结构的安全性(即能完成切割目标的最小预置装药量),减小爆炸产生的噪声、破片、冲击波和有毒气体等有害效应的影响,同时为了获得较好的实验效果,根据相关参考文献和 DDNP 当量估算,选取实验的药量约为 30~60mg^[6]。

2 仿真模拟与分析

2.1 计算模型

爆炸开关装药结构计算模型如图2所示。

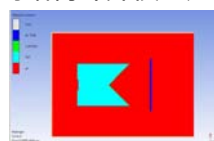


图2 爆炸计算模型

Fig.2 Blasting computation model

聚能装药结构由药型罩、壳体及炸药组成,装药直径 $D=15\text{ mm}$,装药长径比为 1:1。目标熔断片垂直于聚能装药结构。

2.2 模拟计算状态方程及实验材料选用

数值模拟过程中,爆炸材料和药型罩金属材料相关参数均来自 AUTODYN 数据库。炸药采用 JWL 状态方程精确描述在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积和能量特征,其表达式见式 (1):

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式 (1) 中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为输入参数; P 、 E 和 V 分别表示爆炸产物的压力、单位体积的内能和相对体积 (即单位体积装药产生的爆轰产物的体积)。

选定的 DDNP 炸药的主要参数分别为:密度 $\rho=1.64\text{ g/cm}^3$,爆速 $D=8\ 380\text{ m/s}$,爆压 $P_{cj}=28.7\text{ GPa}$ 。DDNP 炸药 JWL 状态方程的主要参数见表 2。

采用空气理想气体状态方程,空气理想气体状态方程的主要参数见表 3。

表 2 DDNP 炸药 JWL 状态方程参数

Tab.2 JWL equation of state parameters of DDNP					
A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
524.23	7.678	4.2	1.1	0.34	8.5

表 3 空气理想气体状态方程

Tab.3 Air ideal gas state equation			
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\Gamma(C_p/C_v)$	$T/^\circ\text{C}$	C_v
1.225×10^{-3}	1.4	288	717.5

铜、铝和有机玻璃等相关材料的性质参数直接从 AUTODTN 自带数据库中导入:铜药型罩采用 Shock 状态方程,铝靶板采用 Shock 状态方程 Johnson cook 强度模型,并添加塑性应变失效模型 25%和瞬时几何应变腐蚀模型 250%。相关材料的力学参数见表 4。

表 4 相关材料的力学参数

Tab.4 Mechanics parameters of materials				
名称	材料	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	屈服强度/MPa	硬度/HR
药型罩	紫铜	8.96	90	-
靶片	铝	2.69	-	30
管壳	有机玻璃	1.18	-	-

2.3 射流破坏过程

根据设定参数条件,模拟形成金属射流对铝靶板的侵彻过程如图 3 所示。

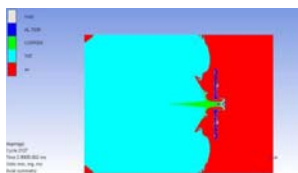


图 3 铜药型罩侵彻铝板模拟结果

Fig.3 Simulation results of copper liner penetrating aluminium plate

数值模拟结果表明,爆炸在中心处射流的速度较快,虽然药量较小,但是因为导体薄而宽可以较好地吸收爆炸能量并断裂。设计的爆炸开关聚能装药结构能够迅速可靠切断熔断片靶板,满足保护电路的要求。

3 聚能射流侵彻导体试验

3.1 试验装置及试验条件

试验选用纯铜 V 形槽状聚能罩,装药直径 10mm。根据爆炸开关的设计要求,采用小锥角药型罩,开口角度 2α 为 60° ,试验装置如图 4 所示。聚能装置从下至上依次为 60° 开口铜制药型罩、定量 DDNP、电打火头、电导线、石英砂。管壳上端石英砂使用少量胶水封口,采用电起爆方式。起爆前用 2 片 L 型塑料片将爆炸装置固定住炸高并垂直于目标导体上。



图 4 试验装置
Fig.4 Test device

聚能装药结构的炸高分别取 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm 5 组,管内药量取 40mg、45mg、50mg、55mg、60mg 交叉实验。目标铝导体为市场上常见的 100A、500V 的熔断器,铝片横截面为 3.2 mm^2 (厚 0.8mm,宽 4mm)。起爆点火头置于管体中心,起爆线沿有机玻璃管壁边缘引出 (避免产生金属破片和对电起爆系统的影响),装药结构与目标铝靶板的相对位置按正常导体设计分布并控制炸高。将试验装置置于正常熔断器的标准绝缘氧化硅陶瓷外壳内,壳内壁周边粘贴海绵等缓冲物质,减弱爆炸产生的有害效应。断路信号电流发出后,起爆装置激发,迅速起爆主装药。

3.2 试验结果与分析

聚能装药结构爆炸切割效能的影响因素较多,选择装药量和炸药 2 个代表性的因素,固定主装药类别、药型罩材质、结构等因素,研究装药量和炸高对聚能爆炸效能的影响。选用 5 组炸高,每组采用 5 种药量,

共 25 组数据。将导体的破坏程度分为 1~5 共 5 个等级。爆炸切割后铝靶板变形和断裂分为 5 个等级，等级越高切割破坏越彻底。等级 1：铝片变形<5mm；等级 2：铝片变形<10mm；等级 3：铝片变形>15mm；等级 4：铝片变形且有裂隙；等级 5：铝片完全断裂。爆炸射流侵彻测试结果见表 5 和图 5。由图 5 可以看出，试验中破坏程度呈规律性变化，当药量 50mg、炸高 15mm 时效果最好，落在预估范围内，说明设计结构较为合理。

表 5 爆炸侵彻铝靶板的破坏程度 (等级)
Tab.5 Degree of damage caused by explosion penetrating aluminium sheet

装药量/mg	炸高/mm				
	5	10	15	20	25
40	2	2	2	1	1
45	2	2	2	2	1
50	2	3	5	3	2
55	3	4	5	4	2
60	3	5	5	5	3

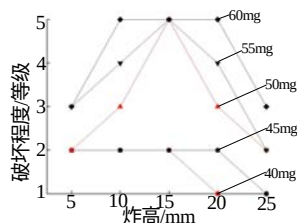


图 5 铝靶板破坏程度
Fig.5 Degree of aluminum destroy

在侵彻金属导体时，宽而薄的导体既可以保证正常工作时候的导电，又可在射流切割作用下完全断裂，几乎不产生多余的破片。氧化硅陶瓷外壳在受爆炸后依然能保持结构完整性。合适的装药量和炸高可以彻底切断铝导体结合部，装药量为 50~60mg 时，具有较好的爆炸切割效果，同时可以产生可控的爆炸有害效应；炸高较低时，爆炸产物不能形成有效射流，未能完全切断铝靶板结合部；炸高较高时，形成射流能量损失较大，仍无法完全切割铝靶板结合部；炸高为 15mm 时，爆炸生成产物形成射流可以作用于目标物，完成切割。

4 结论

(1) 电路异常情况下爆炸开关利用聚能效应可

产生金属射流快速切断导体。(2) 直接使用起爆药作为聚能装药可以很好地避免繁琐的点火激发系统，采用电火花即可引发爆炸，可在不影响断路性能的情况下减小装置体积。(3) 试验和数值模拟结果表明，采用的聚能装置，在装药量为 50mg、炸高为 15mm 时，侵彻切割效果最佳，可以完全切断 0.8mm×4mm 铝导体电路，避免残体产生电弧再次导通。

参考文献：

- [1] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-16.
- [2] 诸吕锋,陈厚和,侯洵,等.爆炸式开断器载流体的设计与测试[J].高电压技术,2004,30(12):56-57,64.
- [3] 宋执权,傅鹏.爆炸开关系统的研制[J].高压电器,2005,41(4):245-248.
- [4] 黄文尧,颜事龙.炸药化学与制造[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [5] 王绳勋.DDNP 的长期存放加速试验和计算方法[J].爆破器材,1981(2):1-4.
- [6] 谭多望,孙承伟.成型装药研究新进展[J].爆炸与冲击,2008,28(1):50-56.
- [7] 杨刚,傅奕轲,郑建民,等.基于 SPH 方法对不同药型罩线性聚能射流形成及后效侵彻过程的模拟[J].振动与冲击,2016,35(4):56-61.
- [8] 董世康,胡芳友,崔爱永,等.聚能射流侵彻飞机铝合金蒙皮的仿真与试验研究[J].振动与冲击,2019,38(4):184-190.
- [9] 纪冲,龙源,杨旭,等.线型聚能切割器在工程爆破中的应用研究[J].爆破器材,2004,33(1):32-35.
- [10] 李裕春,吴腾芳,徐全军,等.线型聚能装药射流形成过程的数值模拟[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2002(3):73-77.
- [11] 恽寿榕,涂侯杰.爆炸力学计算方法[M].北京:北京理工大学出版社,1995.
- [12] 王金鹏,曾攀,雷丽萍,等.2024AL 高温应变率下动态塑性本构关系的实验研究[J].塑性工程学报,2008(3):101-104.