

Baozhaxing Huanjing Benzhi Anquan Dianlu

Gonglu Panbie Ji Feibaozha Pingjia

# 爆炸性环境本质安全电路 功率判别及非爆炸评价

孟庆海 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# 爆炸性环境本质安全电路 功率判别及非爆炸评价

孟庆海 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书在简要介绍本质安全电路电火花点燃瓦斯理论的基础上,较为详细地论述了本质安全电路的电弧放电数学模型、电火花能量与功率、爆炸检测方法、非爆炸评价方法等内容,并从功率角度分析了电路的本质安全性能,解释了小火花能够引爆而长时大火花却不能引爆气体的矛盾现象。

本书可作为相关专业的研究生教材,亦可供相关科研人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

爆炸性环境本质安全电路功率判别及非爆炸评价/孟庆海著.  
徐州:中国矿业大学出版社,2008.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0030 - 3

I. 爆… II. 孟… III. 矿山安全—防爆电气设备—电路—  
功率测量 IV. TD684 TM933.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第125928号

- 书 名 爆炸性环境本质安全电路功率判别及非爆炸评价  
著 者 孟庆海  
责任编辑 何 戈  
责任校对 杜锦芝  
出版发行 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内)
- 网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: [cumtpyp@cumtp.com](mailto:cumtpyp@cumtp.com)
- 排 版 中国矿业大学出版社排版中心
- 印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
- 经 销 新华书店
- 开 本 850×1168 1/32 印张 4.25 字数 108 千字
- 版次印次 2008年8月第1版 2008年8月第1次印刷
- 定 价 15.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 前 言

电气安全是保证矿井安全生产的关键环节之一。井下条件恶劣,容易发生各种电气事故,且存在瓦斯、煤尘等介质,属于爆炸性危险环境。因此,除采取各种预防措施和设置必要的保护装置外,电气设备一般要求采用隔爆型和本质安全型等防爆类型,并且优先采用本质安全型。

本质安全型电气设备是在正常或故障状态下产生的电火花和热效应均不能点燃爆炸性气体的设备,它是目前爆炸性气体环境中最有使用前途和潜力的电气设备,离开本质安全电气设备,在一定程度上可以说要实现爆炸性气体环境生产过程的监视、控制等自动化过程是不可能的。“数字化矿山”的提出、智能电器、现场总线技术在井下的采用等,都为本质安全设备的发展提出日益迫切的需求。但是,多年来本质安全理论并没有得到很好解决,比如低能电弧(mJ级)放电的特殊性、不同性质电路的电弧放电数学模型、引爆爆炸性气体的能量判别标准与功率判别标准等。目前检测电路本质安全性能只能在火花试验装置上通过爆炸试验实现。

爆炸试验虽然是最直接的检测方法,但其缺点也是显然的。本质安全电路设计与检测人员都希望进一步研究本质安全电弧放电理论,能够有预估电路本质安全性能的理论判据,能够实现评价与检测电路本质安全性能的非爆炸方法,这样既可以辅助设计,提高产品本质安全性能,又可以缩短本安产品研制周期,降低成本。因此,开展爆炸性环境电路本质安全性能判据及非爆炸检测等方面的研究具有积极的理论意义和经济意义。

本质安全电路设计方法可以参照设计参考曲线,但更多的是

应用火花试验检测方法。在判别方面,过去一直使用能量判别方法,本书试图从功率角度分析电路的本质安全性能,以实现电路本质安全性能的非爆炸性评价,为电路设计和检测提供一个新思路。

本书解释了小火花能够引爆而长时大火花却不能引爆气体的矛盾现象,指出只有功率和能量都达到一定数值时,才可能造成气体的引爆,这是对能量判别标准的一个有益补充。但是功率判别与能量判别之间的数值关系需要进一步研究。本书所建立的功率判别标准只能应用于电感性本质安全电路,对于电容性和电阻性本质安全电路需要另行建立,能否获得统一的判别标准更需要进一步研究和实践检验。另外,本书所建立的电感性电路的动态数学模型涵盖了通常使用的放电电流线性衰减模型,使定性分析电感电路中电源电压和电路电感的能量比成为可能。

本书是在2000年国家自然科学基金项目“爆炸性环境电气安全理论及技术研究”和2005年国家自然科学基金项目“爆炸性环境电路本质安全功率判别式及非爆炸研究”的研究基础上得到的科研成果。本书在编写过程中得到了中国矿业大学胡天禄教授和同济大学车龙华教授的热情帮助,胡天禄教授审阅了全书,并提出了宝贵的意见,作者在此表示衷心的感谢。由于作者的水平有限,再加上属于理论探索,书中错误和不当之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

2008年3月

---

---

## 目 录

<b>1 本质安全电路的电火花点燃瓦斯理论</b> .....	1
1.1 电气放电形式 .....	1
1.1.1 火花放电 .....	1
1.1.2 电弧放电 .....	2
1.1.3 辉光放电 .....	4
1.2 不同性质电路的电气放电规律 .....	4
1.2.1 电阻性电路 .....	5
1.2.2 电感性电路 .....	6
1.2.3 电容性电路 .....	8
1.3 电火花能量 .....	10
1.3.1 最小点燃能量测定 .....	10
1.3.2 火花放电能量的简单计算 .....	12
1.4 瓦斯点燃概率 .....	13
<b>2 本质安全电路的电弧放电数学模型</b> .....	15
2.1 电路的电弧放电数学模型 .....	15
2.1.1 放电电流线性衰减模型 .....	15
2.1.2 放电电流抛物线模型 .....	19
2.1.3 放电电流幂函数模型 .....	21
2.1.4 静态伏安特性模型 .....	26
2.1.5 动态伏安特性模型 .....	32
2.1.6 动态伏安特性模型和放电电流线性衰减	

模型之间的关系	41
2.1.7 小结	42
2.2 电阻性本安电路的电弧放电数学模型	43
2.2.1 电阻性电路电弧放电数学模型	43
2.2.2 电阻电路与电感电路电弧放电的比较	48
2.3 电容性本安电路的电弧放电数学模型	49
2.3.1 放电波形	49
2.3.2 伏安特性曲线	52
2.3.3 电弧放电数学模型	53
2.4 复合电路电弧放电数学模型	54
2.5 放电时间分布规律及与电路参数的关系	58
2.5.1 放电时间的分布规律	58
2.5.2 放电时间与电路参数间的关系	62
2.5.3 小结	63
<b>3 本质安全电路的电火花能量与功率</b>	<b>65</b>
3.1 基于电流线性衰减模型分析低能电弧	65
3.1.1 放电能量	65
3.1.2 放电时间	65
3.1.3 电流变化率	65
3.1.4 电感储能与电源供给能量之比	66
3.1.5 电弧电阻	66
3.1.6 电弧功率	67
3.1.7 小结	68
3.2 本质安全电路功率判别	68
3.2.1 电感电路的能量判别标准	68
3.2.2 电感电路的功率判别标准	69
3.2.3 能量和功率判别式的试验数据分析	69

---

---

3.2.4	能量和功率判别式的关系	71
3.3	提高设计电路本质安全功率的措施	72
<b>4</b>	<b>本质安全电路的爆炸检测方法</b>	<b>74</b>
4.1	本质安全检测装置	74
4.1.1	原理	74
4.1.2	试验装置	74
4.1.3	火花试验装置标定	77
4.1.4	其他	77
4.2	爆炸方法检测	77
4.2.1	火花点燃试验概述	77
4.2.2	火花点燃试验	78
4.3	基于单片机与微机接口的火花试验自动装置	81
4.3.1	概述	81
4.3.2	火花试验自动装置的硬件结构	83
4.3.3	火花试验自动装置的软件设计	84
<b>5</b>	<b>本质安全电路的非爆炸评价方法</b>	<b>87</b>
5.1	原理	87
5.2	查表法	88
5.3	等效电感法	88
5.4	评价电路本质安全性能的非爆炸方法	91
5.4.1	MIC 曲线的拟合与插值	91
5.4.2	非线性元件的线性化	92
5.4.3	时变元件的离散化	97
5.4.4	各元件数学模型的建立	98
5.4.5	网络拓扑方程的建立及求解	105
5.4.6	本质安全性能分析	109



5.4.7	程序流程图及软件包 .....	111
5.4.8	小结 .....	119
5.5	本质安全电路的非爆炸方法检测研究 .....	119
5.5.1	本质安全电感电路的动态伏安特性 .....	120
5.5.2	电弧非线性电阻模拟 .....	120
5.5.3	小结 .....	121
<b>参考文献</b> .....		<b>123</b>

# 1 本质安全电路的电火花点燃瓦斯理论

按照标准 GB 3836.4—2000 规定,本质安全电路在正常和规定的故障情况下所产生的电火花或热效应都不能引爆规定的爆炸性气体混合物。因此,电火花对爆炸性气体(I类气体指的是甲烷)的引爆理论,是研究本质安全电路理论的基础。

本质安全电路的电火花点燃瓦斯理论是与电气放电密切相关的。可能发生短路、开路或接地等危险点在火花试验装置电极上开断时,若放电产生的能量超过引爆能量就会造成气体混合物的爆炸。

## 1.1 电气放电形式

根据气体放电理论,电路在切换时的基本放电形式有三种:火花放电(一次或多次击穿放电)、电弧放电、辉光放电。此外,还有由这三种基本放电形式所组成的混合放电。

### 1.1.1 火花放电

火花放电,一般是在接通和断开带电容的安全火花电路时,由于击穿放电间隙而产生的。切换电感—电容复合电路时,其过渡过程的电压也可能产生火花放电。对被检测电路而言,是由于连接导线存在分布电容而产生火花放电的。在这种情况下,火花放电所释放的能量主要由两部分组成,即在放电电子束中散失的能量和电极表面传导的能量,而后者的大小又决定着放电能否引燃爆炸性危险混合物。所以十分明显,电极表面传导的能量最小而

在放电电子束中散失的能量最大的火花最易点燃。

随着火花形成机构触点的断开,电路中电容上的电压将增长。当满足产生振荡的条件时,振荡过电压的数值可能超过电源电压很多倍。在电极间距增大的同时,火花间隙的电气强度也增长,便不能击穿电极的间隙,并且电感中储存的全部能量均消耗于回路的振荡过程中。

如果电气强度的增长速度低于电压的增长速度,则火花间隙将在小于该电路的最大可能的电压下被击穿。这时,由于放电电流的出现而使触头间的电压减少,从而使电流消失。于是,发生的过渡过程使触头间的电压再次升高,并使放电间隙再次被击穿。这样的击穿可能一个接一个地多次发生,直到电容上的电压再不能击穿逐渐增长的间隙为止。在放电时没有完全消耗掉的回路磁能将消失在放电结束后的振荡过程中。

### 1.1.2 电弧放电

电弧放电是研究本质安全理论时最常用的一种放电形式。在切换小电流、低电压的本质安全电路时,由于液态金属桥的断开也可以形成电弧放电。液态金属桥的形成情况是这样的:在触点断开瞬间,接触压力急剧降低,电极接触面积减小,过渡电阻值增大。当电极上的电流、电压达到与接触点熔化相应的数值时,在电极间便形成液态金属滴。在电极继续拉开的过程中,液态金属滴被拉长为连接两电极的电桥。随着桥上电压的增加,金属沸腾,并使桥爆炸般地断开。熔点低的金属容易形成液桥,而火花试验装置中采用了熔点相当低的镉,所以很容易成电弧。低压电感电路电弧放电的波形如图 1-1 所示。

电弧放电过程可人为地分为四个阶段。在第一阶段开始,触点处于闭合状态。当接头断开时,便开始了液态金属桥的形成与拉长的过程。这一阶段的持续时间决定于电极的分开速度,图中

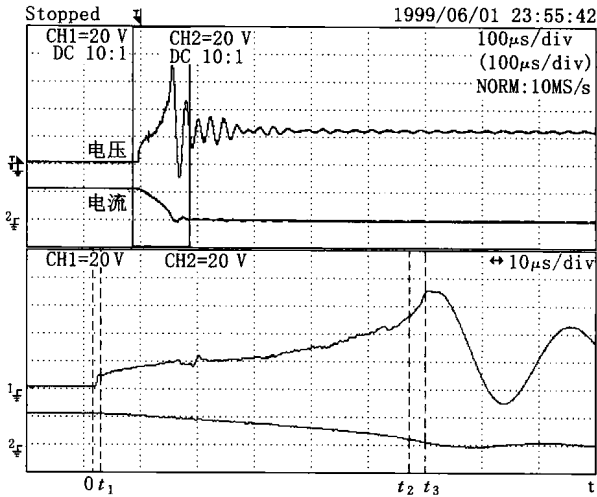


图 1-1 低压电感电路电弧放电波形

为  $0 \sim t_1$  段。在该过程中电流不能突变而缓慢减小,电压由于电极间接触电阻增大而快速增加。在桥断开之后,开始了第二阶段,即电弧阶段。在此阶段的初期,周围介质不变,电压均为恒定值,并由电源电压所决定。然后电压接近似于直线的规律缓慢增长。之后电流迅速下降,电压迅速上升,这是电弧电阻迅速增大的缘故。此阶段的持续时间决定于电路中储存的能量,并随能量的变化而改变,图中为  $t_1 \sim t_2$  段。第三阶段是电弧熄灭阶段。此时由于电弧被电极彻底断开而熄弧。电流一般还没来得及降为零,即产生截流,图中为  $t_2 \sim t_3$  段。最后阶段是第四阶段,由于线路分布电容的存在,电极电压为电容电压,其大小应满足电感—电容振荡条件,而电极将没有电流流过,图中为  $t_3$  以后。

### 1.1.3 辉光放电

在电压很高而电流较小时,可以产生辉光放电。辉光放电的特点是它的阴极电压降比电弧放电要高,可达 $100\sim 400\text{ V}$ 。所以放电能量基本上散失在阴极上,占电极损失的大部分,而不是作为引燃爆炸危险混合物的能量出现。另外,辉光放电在实际的安全电路中又非常少见,所以一般都不考虑这种情况。辉光放电如图1-2所示(虚线位置表示开始辉光放电)。

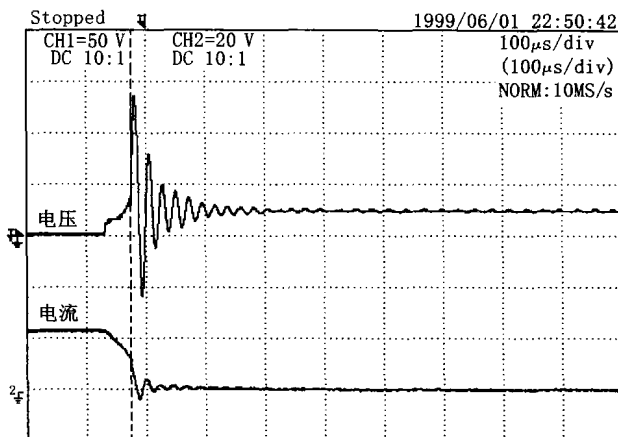


图 1-2 辉光放电波形

## 1.2 不同性质电路的电气放电规律

电路在正常操作情况下接通和断开时,或在故障状态下通断时,通断处总要产生放电火花。电火花的形成过程及特征与电路的性质(电阻性、电感性、电容性)、开关特性(接通、断开、通断速度、电极材料、电极形状等)有密切关系。

## 1.2.1 电阻性电路

### 1.2.1.1 断路火花

电阻性电路无储能元件,火花的能量仅来自于电源。当电路断开时,电极接触面积迅速减小,接触部位的电流密度急剧增加,电流密度高达  $10^7 \sim 10^8 \text{ A/mm}^2$ 。电极间的电阻也逐渐增大,电极间的电压随之增大。在电流、电压作用下,电极熔化形成液态金属桥,随后产生金属蒸气使熔桥破坏,电极电压上升,当电压高于起弧电压时就产生电弧放电。只要电阻电路的电感大于  $0.2 \mu\text{H}$ ,就会达到起弧电压。与其他性质的电路相比,电阻性电路的放电火花是比较弱的。电阻性电路断开时的波形如图 1-3 所示(图的下半部分是上半部分矩形框的放大)。

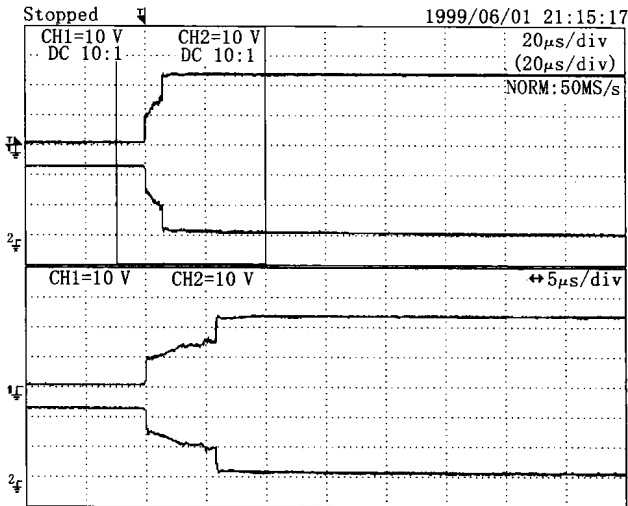


图 1-3 电阻性电路断开时的波形

### 1.2.1.2 闭路火花

纯电阻性电路中,当电路闭合时,电极快速接近,此时若电源电压较高,在接触前的瞬间使空气击穿,会产生电弧放电;若电源电压较低,接触之前不会产生电流。在电极接触瞬间,最高点先接触,并且有一定接触电阻,其电流密度很大,在该处产生高温,使电极熔化和“汽化”。由于气体覆盖层存在,电流重新中断,当电极继续靠近时,又重新发生接触,此过程一直重复到电极闭合为止。实际电路中,纯电阻性电路几乎是不存在的,在开断过程中,电路自感使电压升至起弧电压。因此,尽管电源电压低于起弧电压,电路的接通仍会产生电弧。电路的自感小于  $0.2 \mu\text{H}$  时,开关过程才是完全无弧的。波形如图 1-4 所示。

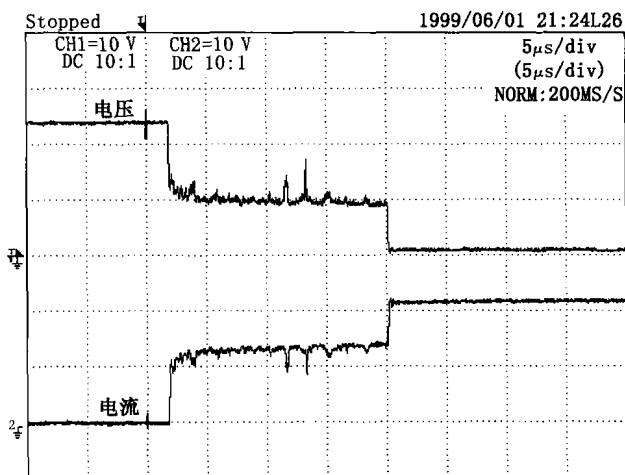


图 1-4 电阻性电路闭合时的波形

### 1.2.2 电感性电路

电感元件是储能元件,可把电路的能量以磁能的形式储存起

来,当电路变化时,又放出能量。电感的特点是当电路状态改变时,电流不能突变,而电压突变,这时既有电源向电极间隙放电,又有电感储能放电。

### 1.2.2.1 断路火花

当电路断开时,除具有上述电阻性电路的放电过程外,还受电感磁场储能的影响。断开时电极迅速离开,电阻突然增大,电流不能突变而电压突变,在电极间隙处产生很高的电势,电极间产生电弧放电,然后产生辉光放电。反电势的大小和电路电感值、分断速度有关。放电能量除电源外,还有电感的储能加入。这不仅增加了放电强度,也加长了放电时间。因此,电感电路的断路火花有更大的危险性。电感性电路断开时的放电波形如图 1-5 所示。

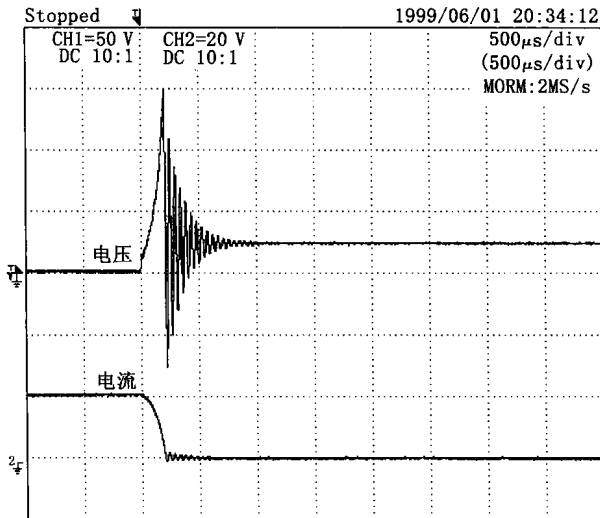


图 1-5 电感性电路断开时的放电波形

电源电压相同时,电感电路的点燃电流比电阻电路的点燃电



流低得多。如 24 V 直流电源,电阻电路的最小点燃电流约为 2 A,而 100 mH 的电感电路的最小点燃电流仅为 85 mA 左右,可见电路电感对放电的影响是很大的。

### 1.2.2.2 闭路火花

电感电路闭合瞬间电流不能突变,从零开始逐渐上升到稳定值,上升速度与电路时间常数有关,而电压急速下降到零,因此不易产生强烈放电。同断路相比,放电能量小得多。因此,分析电路本质安全性能时,不作考虑。其波形如图 1-6 所示。

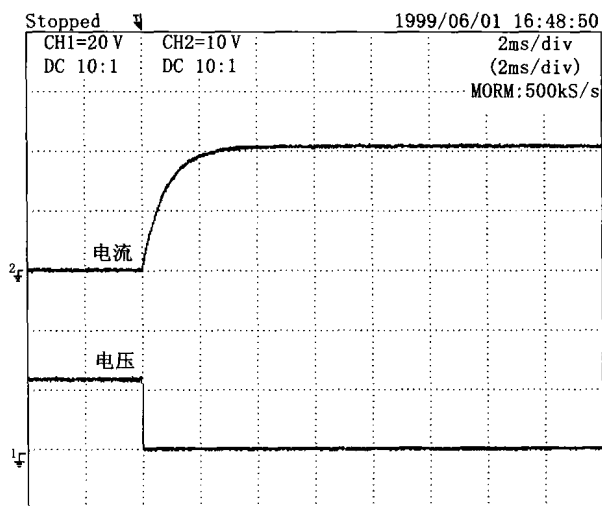


图 1-6 电感性电路闭合时的波形

## 1.2.3 电容性电路

### 1.2.3.1 断路火花

电容电路断开瞬间,电极间不存在电位差,对直流电路无切断电流,不会出现上述明显的放电现象。