

电力机车丛书

气动电器

陈开运 胡臻祥 编

中国铁道出版社

1988年·北京

前 言

铁道机车车辆用牵引电器中包括大量由压缩空气传动的气动电器。这类电器在一般电器书籍中很少阐述，而在机车车辆上使用得比较多，在当前我国大力发展电力、内燃机车牵引之际，为了便于使用、维护和检修人员及其他初学者学习气动电器的各种技术性能及要求，特编写本书以供参考。

本书简单介绍了一些直流接触器、断路器所必须具有的电弧理论知识，以及制定某些技术参数所必须的电路理论知识，重点阐明电空接触器、高速断路器、位置转换开关、电空阀、压力继电器和这些电器所使用的辅助联锁接点等产品的结构特点、设计方法、产品选用及技术要求等。

气动电器和一般电器一样，它的理论牵涉面比较广，内容比较复杂，除了和一般电器共有的电磁系统、电弧、电触头、绝缘、电动力、热计算、机械运动与强度、电器可靠性与特性配合，新技术、新材料、新工艺、新结构等许多领域外，还包括气传动机构及机车车辆用牵引电器的许多特殊技术问题。

气动电器的某些理论还不如牵引电动机、牵引变压器那样系统、成熟，本书归纳一些在设计、使用中必不可少的理论知识和国内外一些产品实例，给大家作一个简单地介绍。由于我们工作经验有限，在编写中存在问题比较多，出现错误及不当之处在所难免，希望读者指正。

本书共分十章，第一、三、五、七、九章由陈开运编写；第二、十章由陈开运、胡臻祥编写；第四、六、八章由胡臻祥、陈开运编写。

编 者

内 容 简 介

本书主要介绍铁道电力、内燃机车及电动车组使用的各种气动电器。全书共分十章，分别介绍其技术要求、灭弧原理、结构选择、动作原理、主要技术参数等，同时对气动电器发展中的一些问题加以简单介绍。为了使这些电器在选用、使用中有一个正确的方法，书中对这些电器在使用、维护方面也提出了一些技术要求。

电力机车丛书

气 动 电 器

陈开运 胡臻祥 编

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 张贵珍 封面设计 刘景山

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168毫米 $\frac{1}{32}$ 印张：7.375字数：188千

1989年10月 第1版 第1次印刷

印数：1—2000册 定价：4.25元

ISBN7-113-00512-8/TM·29

目 录

第一章 概 述

- 一 气动电器的分类与用途..... 1
- 二 技术要求..... 3
- 三 气动电器的发展方向..... 8

第二章 直流电弧及其熄灭原理

- 一 一般原理..... 9
- 二 直流电弧燃烧和熄灭..... 15
- 三 直流电弧熄灭原理与方式..... 19

第三章 直流电路参数及短路电流的计算

- 一 直流电路的闭合..... 35
- 二 直流电路的分断..... 38
- 三 短路电流的计算..... 40

第四章 高速断路器

- 一 高速断路器的任务与要求..... 43
- 二 高速断路器的触头系统..... 43
- 三 高速断路器操作系统 45
- 四 高速断路器的灭弧装置..... 52
- 五 TDG1型高速断路器 56
- 六 高速断路器的研制动向与发展..... 63

第五章 电空接触器

- 一 电空接触器的任务与要求..... 70
- 二 电空接触器的总体结构..... 71
- 三 电空接触器的触头系统..... 78
- 四 电空接触器的灭弧系统..... 85
- 五 电空接触器的传动系统 119
- 六 电空接触器的绝缘设计 125

七	真空型电空接触器的设计·····	127
八	电空接触器产品简介·····	128
第六章	位置转换开关	
一	位置转换开关的任务与要求·····	136
二	位置转换开关的总体结构·····	136
三	位置转换开关的结构设计·····	143
四	THK3型转换开关简介·····	149
第七章	电空阀 ·····	155
一	电空阀的任务与要求·····	155
二	电空阀的结构·····	155
三	电空阀的吸力特性与反力特性·····	166
四	电空阀电磁铁静态特性计算·····	169
五	电空阀电磁铁动态特性·····	184
六	电空阀的结构动作原理与主要技术参数·····	191
第八章	压力继电器	
一	压力继电器的任务与要求·····	193
二	压力继电器基本结构·····	194
三	机车用压力继电器·····	196
四	压力继电器的发展问题·····	201
第九章	辅助接点	
一	辅助联点的任务与要求·····	203
二	辅助接点的结构设计·····	204
三	改善辅助接点工作条件的方法·····	211
第十章	气动电气的使用、维护、保养	
一	一般维护·····	213
二	接点润滑油的使用·····	216
三	石棉水泥灭弧材料的绝缘处理·····	218
四	气动部件的维护、试验·····	219
五	气动电器使用须知·····	221

第一章 概 述

机车上使用的牵引电器由于受机车结构的限制，要求其外形尺寸（特别是屏板面的安装尺寸）小，以便提高屏柜装置电气设备的容纳率。机车车辆用牵引电器广泛采用压缩空气作为传动介质，这种气动电器有如下特点：

1. 具有较大的传动功率；
2. 控制功率小（只需要小容量的直流电源）；
3. 体积小巧；
4. 操作时与接触网有无电源无关。

一、气动电器的分类与用途

机车上使用的气动电器种类繁多，根据性能可分为如下几种：

1. 集电装置；
2. 主保护电器；
3. 调压装置；
4. 电空接触器；
5. 位置转换开关；
6. 电空阀；
7. 压力继电器、调节器。

下面根据用途分别加以阐述。

（一）集电装置

集电装置是指机车从接触网或第三轨受取电流的电器。装在车顶上从接触网取电的电器叫受电弓；装在机车下部从第三轨受取电流的电器叫三轨受流器，其中比较简单的三轨受流器也可以

设有传动气缸。这一部分有专门书籍介绍，本书不加论述。

（二）主保护电器

主要是指机车上的主保护断路器。在交流电力机车、电动车组上用交流断路器（又称主断路器）；在直流电力机车、电动车组上用直流断路器。由于交流电力机车的交—直—交系统的发展，在交—直—交系统的直流部分保护也可能用直流断路器。对于交流断路器有专门书籍介绍，本书仅对直流断路器作一介绍。

（三）调压装置

交、直流电力机车上依靠改变牵引变压器抽头或变换牵引电动机串联电阻值来调节牵引电动机端电压的电气设备，这些电气设备有做成组合型的，通常又称为调压开关；也有用单位接触器组合而成，这些单位接触器往往都是用压缩空气传动、由电空阀控制的电空接触器。对于调压开关有专门书籍介绍，单位接触器将在本书的电空接触器中介绍。

（四）电空接触器

交、直流电力机车以及内燃机车、电动车组中大量使用由压缩空气传动、电空阀控制的电空接触器，它们主要用作线路接触器、制动接触器、励磁接触器、磁场削弱接触器、调压接触器等。交、直流电力机车、内燃机车、电动车组上无论电子化程度怎么高，使用电空接触器数目从目前看来还不能减少。

（五）位置转换开关

在电力机车、内燃机车、电动车组上使用直流串励电动机牵引时，控制机车运行方向（向前或向后）或控制机车工作状态（牵引或制动）时所需要的电气设备，前者叫反向器，后者叫牵引、制动转换开关。

（六）电空阀

利用气动电气设备的控制阀，即由电磁铁控制的气阀阀门，来控制气动电器或各种气动设备的动作称为电空阀，对于各种气动设备不属于本书介绍的内容，本书仅对电空阀本身进行介绍。

(七) 压力继电器、调节器

由于机车使用空气制动机及各种大型气动电器而使压缩空气压力变化较大。为了保证机车用气动电器有良好的工作条件，控制电路中应设置压力调节器和压力继电器（或称压力开关）来检测气压变化情况，以实现控制压缩机打风、气—电的联锁控制等，从而保证各电气设备工作正常。

在内燃机车、动车上为保证柴油机、变扭器良好地工作，大量使用油压继电器以检测各部分润滑油压的情况，由于这些电器有许多是油、气压通用的，故一并介绍。

二、技术要求

随着牵引动力的发展，要求气动电器具有更高的可靠性。牵引电器是安装在一个可移动的机车车辆车体（或箱体）内，这给它提出了一系列有别于一般工业用电器的特殊要求：

1. 因频繁地启动、制动，要求气动电器具有较高的机械寿命与电寿命；
2. 机车供电（气）条件较差，要求气动电器具有较高的工作电（气）压上限与较低的工作电（气）压下限；
3. 能满足机车运行于不同地区的自然环境条件下提出的各种要求，如在环境温度变化大、潮湿、灰尘、腐蚀气体等条件下能正常工作；
4. 能满足机车运行中的各种耐振动、抗冲击、倾斜等要求；
5. 由于车体（或箱体）内空间尺寸的限制，要求气动电器能适应电气设备的密集布置，在各种工作状态下各电器工作互不干扰，要求体积小、重量轻；
6. 保证控制电路各联锁接点的工作可靠，要求低压联锁接点有低而稳定的接触电阻；
7. 继电保护的作用机构应不受供电电（气）压、环境温度变

化的影响,

8. 维护简单、甚至无须维护。

针对这些要求,气动电器在设计中除应注意满足TB1333《机车电器基本技术条件》和有关电器专业标准提出的技术要求外,还应注意以下问题:

(一) 高的电寿命与机械寿命

频繁的启、制动,要求气动电器有较高的电寿命与机械寿命。由于气动电器的供电(气)条件较差,电(气)压变化范围较大,势必在满足最低电(气)压条件下能正常工作时,在最高电(气)压条件下工作就会有过多的动能引起气动电器在动作时产生冲击、振动,从而增加了电器部件的电磨损与机械磨损,为此加强气动电器减振措施很为重要。改善触头振动情况对提高电寿命有益,而改善合闸过程中的冲击对提高机械寿命与电寿命都有好处。当然电器产品的结构与材质对电寿命、机械寿命的影响也是十分重要的,均应认真研究选择。其机械寿命最低要求见表1—1。

气动电器机械寿命最低要求

表 1—1

名 称	动 作 次 数
直流断路器 电空接触器、电空阀	100万次
位置转换开关	20万次
压力继电器	20万次

(二) 大的工作电(气)压范围

电力机车的供电(气)条件差是由于电路的供电距离长、空气制动系统的频繁使用、维护不良造成控制电源压降大及气路泄漏、某些故障状态的使用等造成的,工作电压上、下限可达0.7~1.2倍额定电压(控制电压为0.7~1.05倍),工作气压上、下限为0.75~1.3倍额定工作气压。高的工作电(气)压除了影响

寿命之外，还会造成线圈发热加剧，灭弧能力要求提高，电器的耐合闸冲击电流要求提高。为此须在降低温升、改善散热条件、提高灭弧能力，提高耐冲击电流上进行改进。

（三）耐环境能力

气动电器使用的环境温度范围较大，可以在 $-25\sim+45^{\circ}\text{C}$ 范围内正常工作，能允许在 -40°C 存放。安装在某些特殊部位的气动电器（如柴油机侧）环境温度更高。在最大工作电压（电流）和最高环境温度下，气动电器的温升极限还须留有一定裕量，并应加强线圈与发热元件的散热效果。为减少机车出库的准备作业时间，及在低温下可随时出库，要保证气动电器在低温下不会因气缸润滑油的凝结而增加阻力，影响气动电器正常动作，为此对气缸低温适应程度要认真选择。大力发展不需要加润滑油无维护要求的气缸来适应低温的要求。

对防尘、防潮、防腐等要求可分从两方面进行：对金属部分要求有适当的防腐措施，如优良的电镀层或保护漆，一般采用镀锌、镀铬、镀镍、镀锡、镀银、镀铜、发蓝（黑）等，由于发蓝（黑）元件防护能力差，可以用浸渍绝缘漆、刷瓷漆等办法进行补偿。对绝缘部分要求有足够的绝缘漏电距离与放电间隙，应按标准的漏电距离、放电间隙参数进行选择，决不能认为只要耐压能通过，漏电距离、放电间隙小一点没问题，漏电距离是考虑了绝缘材料表面积灰、吸潮、老化等影响，在绝缘能力降低时而留的一点裕量，这个裕量一定要保留。绝缘材料的吸潮性能各有不同，应选择不易吸潮的绝缘材料而不要采用易吸潮的绝缘材料（如棉质或纸质的绝缘材料）作电绝缘件。为提高线圈的防潮、散热能力，采用不饱和树脂浇注的绝缘结构。为提高配套电子器件的防潮能力，可采用整块电子板进行绝缘浸漆或浇注硅胶密封措施。

为提高产品的防护能力，可在结构上考虑加防护罩、防护箱等。有些电器不便加防护罩、防护箱，则亦应改进车内通风系统以减少灰尘、水份，腐蚀气体进入电气设备，以改善电器工作的环

境条件。

(四) 耐振动、冲击、倾斜能力

机车的振动加速度为 $1g$ ，冲击加速度为 $3g$ ，倾斜度不大于 10° ，电器产品应在 $1 \sim 50\text{Hz}$ 频率范围内不产生共振。为提高电器的耐振动、冲击、倾斜能力，在结构上要考虑不同安装位置可能引起的振动，如机车纵向冲击最厉害，气动电器的安装在这一方面应当加强。在设计上要尽量减轻可动部件的重量，如以塑料代替钢材等，同时采用平衡块、减少零部件活动间隙等措施来提高产品的耐振性能。还应计算零件重量与可能产生的激振力，并校验它与作用弹簧力之比，是否能产生强迫振动。

(五) 小型化、轻量化与密集布置

由于机车上电气设备很多，加上机车结构尺寸的限制，要求车上的电器设备体积小、重量轻，并能适于屏柜上的密集布置，既要求产品具备各种工作性能，又要求相互之间不产生影响。电器设备的小型、轻量化，既不能靠任意缩小尺寸，也不能靠减少工作性能来达到。应建立在新技术、新工艺、新材料、新结构的基础上，充分利用材料和空间的合理性来确保性能的提高。电器设备布置密集，一旦故障便影响一大片，这就要求电器有更高的可靠性。随着机车牵引力的增加，电器产品的工作电流与故障电流也愈来愈大，故也要求电器产品有较大的通流能力、灭弧能力与耐受大冲击电流的能力。针对这些要求，设计者应多研究一些能承受较大冲击电流的分裂式触头；接触压力补偿装置；游离区小、灭弧能力强的新型灭弧系统；新型触头材料；新型灭弧板材料。为提高限流效果，要对速动机构、限流措施进行研究；为达到屏板面的最大容纳率，对电器的屏板面安装外形尺寸优先数应进行研究。

(六) 低压辅助接点接触稳定可靠

一台机车上要有 $300 \sim 450$ 个辅助接点和主令电器接点，这些接点的可靠工作对系统工作的稳定性极为重要。各低压接点可靠工作的主要标志是有低而稳定的接触电阻。由于银接点的材质较

软，则较硬的砂粒等粘附在触头表面，就会影响接点的接触。各种尘埃、工业尘烟的积集以及绝缘材料的释放气体（如苯类）经电弧烧灼后，易在触头表面引起高阻膜。为了减少电阻膜的影响，研究接触压力与接触电阻的关系，研究触头闭合过程中具有研磨作用的结构措施，以及研究带罩壳的防护结构等是非常重要的，采取双接点并联、三接点并联可提高接点接触的可靠性。银为贵金属，我国的银资源缺乏，为此节银工作很重要。为了保证接点可靠地工作，可采用接点油之类的电接触薄膜润滑脂（如BY-2型电接触薄膜润滑脂）保护接点表面。

（七）继电保护装置工作的稳定性

继电保护动作的准确度应不受控制电（气）压和温度变化的影响，设计中应尽量排除上述变化影响整定值的结构方案。不能排除时，应采用稳压或温度补偿措施，以使其影响减少到最小限度。在采用电子器件作跳闸装置、继电保护装置时，要求电子装置具有足够的抗干扰能力，应该选择特性不易受温度影响的电子元件。

（八）无维护化

机车上使用的电器品种复杂、数量繁多，运行中经常进行大量维护是不现实的，为此在设计中就要考虑维护工作量少的或根本不需要维护的结构方案。易损零件应更换简便；零部件应能迅速方便地组装成件；小形紧固件组合理化（螺钉、弹簧垫、平垫圈组成不可分离的组件）以减少丢失等各种便于维护的措施同样十分重要。

无维护化目前可以进行如下几项工作：

1. 发展密封接点或密封电器（如真空接点、充气接点的应用、各种真空电器与充气电器的应用、各种带密封罩壳的电器的应用）；
2. 耐弧触头材料与灭弧板的应用；
3. 使用塑料轴承；
4. 采用无润滑气缸；

5. 继电保护装置的无触点化;
6. 研究无电弧切断电路。

三、气动电器的发展方向

气动电器发展的总趋势与一般电器相同, 其表现为:

1. 缩小体积, 降低重量;
2. 扩大工作机能, 减少产品系列, 加强三化 (通用化、标准化、系列化);
3. 改进工艺, 改善产品性能, 不断提高可靠性, 不断降低生产成本;
4. 减少材料消耗, 减少金属材料消耗 (以塑料代替), 减少贵金属的消耗;
5. 减少装配接线维护工作量, 并向无维护化方向发展。

这一切均是为了提高可靠性、提高质量和改善性能提出的。电器产品的发展受新技术发展的影响最为敏感, 世界各国都是把各种最新的科研成果及时地反应到产品中去, 以便在激烈的竞争中取得优势。

因此我们也一定要在新技术、新结构、新材料、新工艺的研究上狠下功夫, 在发展我国的气动电器事业中走出自己的新路子。

第二章 直流电弧及其熄灭原理

直流开关电器都是利用电弧来开断电路，为此对电弧的特性应该有一定的认识。电弧的物理过程比较复杂，影响其特性的因素很多，至今尚无法用理论方法来计算电弧特性。本章对直流电弧的特性作一概略的介绍（有关交流电弧的特性请参阅“主断路器”或其它理论书籍），以便对灭弧系统设计提供一些最基本的理论依据。

一、一般原理

（一）电弧发生的条件

对开关电器来讲，电弧产生有两种主要途径：

1. 电路开断时电弧的发生

在触头开始分离时，作用在它们之间的接触压力将减少，接触面缩小，因而接触电阻和触头中放出的热量就增加。热量集中在很小的体积中，金属被加热到高温而熔化，在触头之间形成液态金属桥，最后金属桥被拉开，在触头之间形成过渡的或稳定的电弧。

另一种理论认为，正在分离的触头可看作可变电容的电容器，它经过电抗而被电路电压充电。触头间距离不断地增加，间隙电场强度在某一临界距离可达最大值。这一临界距离约为 3×10^{-7} cm，此时电场强度可达 3×10^7 V/cm以上，这对场电子发射是完全足够的，然后在触头间形成电弧。

2. 触头闭合时电弧的发生

连接到电源的两个触头闭合之前会发生电击穿，这时就可以产生通常的电弧放电。触头上的电压并不是立即稳定的，电弧建

立的时间太约为 10^{-6} s, 与发生击穿时的触头距离无关。由于触头接触前其表面是冷的, 气体介质也是冷的, 故产生电弧是场电子发射起主要作用。这时不可能有热电子发射的击穿。

(二) 直流电弧的组成

直流电弧可以分为三个区域: 阴极电位降区域、弧柱(电弧正光柱)和阳极电位降区域。

图2—1上示出沿电弧长度分布的电弧三个区域的电位降和电位梯度。由于在阴极附近有正空间电荷, 电位有急剧的跃变, 即是有阴极电位降 U_K 。沿着弧柱部分电位 U_c 均匀上升, 这意味着弧柱电位梯度保持不变。在阳极附近有未补偿的负空间电荷, 决定阳极的电位降 U_a 。阴极和阳极电位都集中在非常小的长度内, 约为 10^{-4} cm。

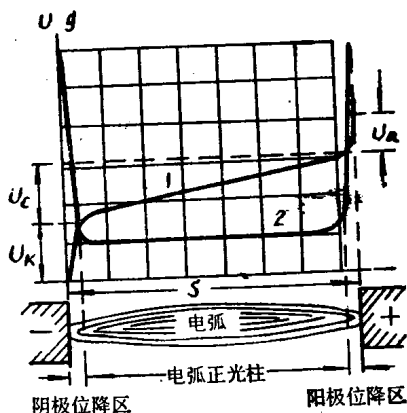


图2—1 直流电弧电压及电位梯度分析图

(三) 电弧的伏安特性

电弧的伏安特性说明电弧电压与电流的关系, 是电弧最重要特性之一。电弧电压与电流之间的函数关系首先决定于电弧间隙的物理过程。弧柱的物理状态不是静止的, 在其中始终进行着游离和消游离过程。如果游离和消游离过程相平衡, 则电弧处于动平衡状态而不是时间的函数。弧柱处于动平衡的工作状态称为静态或稳态。稳态电弧的伏安特性称静特性。

气体放电的伏安特性如图2—2所示, 在辉光放电区域内伏安特性是上升的, 即当电流增大时阴极电压降 U_K 增高约为300~400V。在弧光放电区内伏安特性是下降的, 当电流增大时阴极电压降减少, 约为10~20V。

应该注意到电弧电压与电弧长度之间的关系。在电弧长度大

于1.0cm时，电压 U_h 与长度的关系是直线上升的（如图2—3所示）；在长度较小时，直线关系就变弯曲了；而在 $l \rightarrow 0$ 时，电

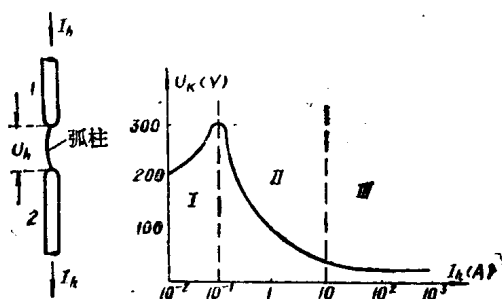


图2—2 气体放电的伏安特性

- U_h ——弧柱电压；
 I——非正常辉光放电区域；
 II——从辉光放电转为弧光放电的过渡区域；
 III——弧光放电区域。

弧电压在理论上就等于阴、阳极电位降之和。由图2—3可见，随着电流的增大， U_h 随电弧长度 l 上升的斜率就下降。

（四）弧柱的电位梯度

采用弧柱电位梯度与电流的关系 $E_h = f(I_h)$ 来代替电弧电压与电流的关系 $U_h = f(I_h)$ 。这两种关系是一致的；电弧电位梯度 E 更能说明弧柱的特性，而电弧电压则是说明全部电弧。在电

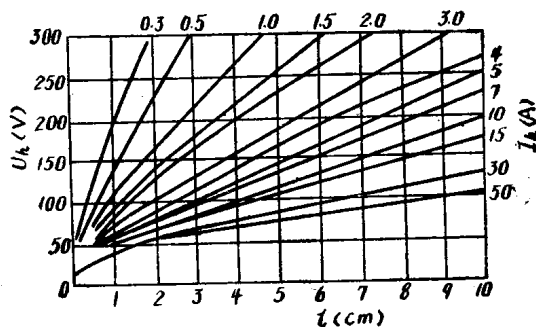


图2—3 电弧电压与长度的关系曲线

弧长度较大时，这两种关系实际上无多大差别。

弧柱的电位梯度与许多因素有关，如电弧电流大小、电弧运动速度、外界磁场大小、灭弧室缝宽、气体压力、气体的导热系数等。

电弧的散热条件好坏、消游离过程强弱均影响弧柱电位梯度 E_h 。图 2—4 所示为在空气中平静燃炽的电弧静特性和在磁场力作用下迅速移动而使冷却加强的电弧静特性。可以见到加强冷却的电弧其弧柱电位梯度和静特性有很大提高。

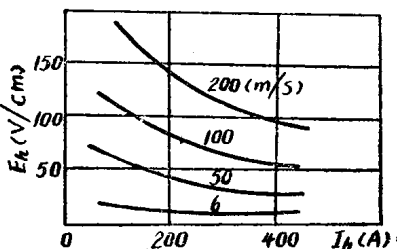


图 2—4 弧柱伏安特性与电弧运动速度的关系

弧柱电位梯度与电弧横向运动速度的关系可用下式表达

$$E_h = E_{h_0} + A \left(\frac{v^2}{I_h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{V/cm}) \quad (2-1)$$

式中 E_{h_0} ——当 $v = 0$ 时的弧柱电位梯度；
 v ——电弧横向运动的速度 (m/s)；
 A ——常数。

当电流为 10~2360 A、宽缝灭弧时，式 (2—1) 可以写成

$$E_h = E_{h_0} + \delta \left(\frac{v^2}{I_h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{V/cm}) \quad (2-2)$$

窄缝灭弧时式 (2—1) 可写成

$$E_h = E_{h_0} + 0.015 \left(\frac{v I_h}{\delta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{V/cm}) \quad (2-3)$$

式中 δ ——缝宽 (cm)。

在许多情况中，电弧热量的散出与电弧在其中燃炽的气体的可动性和导热系数密切相关，试验证实了这一点。图 2—6 是在一个大气压下各种气体的弧柱伏安特性。氢有最大的导热系数 [$\lambda = 17.4 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$] 和可动性，空气的导热系数为 $2.24 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。试验表明弧柱电位梯度有随气体导热系数大