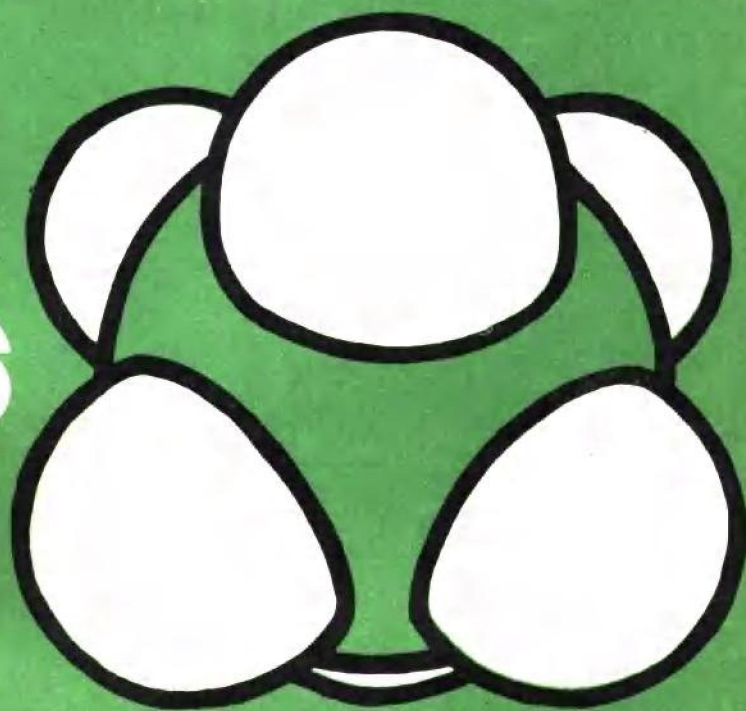


〔东德〕 W.莫尔施 W.豪席尔德 合著

SF_6



54

高压绝缘用六氟化硫

高压绝缘用六氟化硫

〔东德〕 W.莫尔施 合著
W.豪席尔德

李建基 译



机械工业出版社

目 录

1. 导言	1
2. 电场作用下的基本过程	3
2.1 分子结构及基本特性	3
2.2 初始电子的产生	10
2.3 电子的碰撞过程	15
2.4 光电离和热电离	24
3. 击穿过程的模型设想	27
3.1 电子崩	27
3.1.1 定值模型	27
3.1.2 随机模型	30
3.2 自持放电的产生条件	36
3.2.1 发生机理	36
3.2.2 流注机理	39
3.2.3 相似定律和耐电强度	45
3.3 随机击穿过程和耐电强度	53
3.3.1 一个单元范围内耐电强度的分布函数	53
3.3.2 耐电强度极值分布模型	54
3.3.3 正态分布的耐电强度模型	57
3.4 击穿过程的最终阶段	58
4. 耐电强度作为计算击穿过程的基础	61
4.1 耐电强度统计表示法的观点	61
4.2 耐电强度的确定	62
4.2.1 大样本测量问题	62
4.2.2 耐电强度的经验分布函数及其逼近法	66
4.2.3 耐电强度的特征函数	71
4.3 耐电强度的放大定律	72
4.3.1 面积效应	77
4.3.2 时间效应	79
4.3.3 标准化耐电强度的特征函数	87

4.4	电极对耐电强度的影响	92
4.4.1	电极粗糙度和粗糙度系数	93
4.4.2	电极材料	98
4.5	分界面对耐电强度的影响	100
4.5.1	存在分界面时的相似定律	100
4.5.2	电极和分界面宏观几何尺寸的影响	102
4.5.3	分界面微观几何形状的影响和分界面系数	107
4.6	SF ₆ 和其它气体组成的混合气体的耐电强度	112
5.	SF ₆ 绝缘的尺寸设计程序	118
5.1	击穿或闪络电压的半经验算法	118
5.1.1	边界条件	119
5.1.2	计算程序	121
5.2	SF ₆ 绝缘设计的一些原则	128
5.3	工程上的 SF ₆ 绝缘尺寸设计示图	133
5.3.1	计算程序	133
5.3.2	应用举例	135
6.	具有稳定局部放电的受干扰稍不均匀场的击穿	143
6.1	局部放电起始电压的确定	145
6.2	稳定的局部放电特性	149
6.2.1	流注放电和刷状放电	149
6.2.2	辉光放电	154
6.2.3	先导放电	157
6.3	有固定杂质时的击穿电压	159
6.3.1	电压波形和杂质几何形状	163
6.3.2	电压波形和绝缘气体压力	166
6.3.3	击穿和闪络	168
6.4	有自由运动杂质时的击穿	171
6.4.1	电场的畸变和局部放电起始电压	171
6.4.2	杂质的运动过程和极限电压	177
6.4.3	杂质几何形状、局部放电和击穿	185
6.4.4	工程条件下 SF ₆ 击穿的试验模型	187
7.	关于 SF ₆ 绝缘装置的制造工艺和试验要点	190

IV

7.1 SF ₆ 绝缘装置的工艺和尺寸设计间的几个关系	190
7.2 SF ₆ 绝缘中杂质的电气检测	193
7.3 SF ₆ 绝缘装置的高压试验	196
7.4 SF ₆ 高压电器投入试运行和运行中的几个问题	198
8. 展望	203
9. 常用公式符号	206
参考文献	208

1. 导 言

1900 年，当两位法国化学家 H. Moissan 和 P. Lebeau 第一次由氟和硫反应产生惰性气体六氟化硫 (SF_6) 时^[1.1]，未曾想到把它用作绝缘气体。随着电力需要量的不断增长和目前环境保护问题的日趋严重，迫切要求缩小输电装置的体积，因而需要采用抗老化的优质绝缘材料。六氟化硫气体能出色地满足这一要求。它具有优越的绝缘性能，加上极为良好的化学特性、动热特性和电气特性，使得封闭式气体绝缘原理在惊人的短时间内获得突破。大约 1940 年之后， SF_6 首先被用作核物理的高压装置绝缘气体，大概从 50 年代末起，它被用作断路器的内绝缘和灭弧介质。1965 年，金属封闭式 SF_6 全绝缘组合电器首次公开展出。目前，用 SF_6 绝缘的高压电器在市区成了必不可少的输电组合单元，而且不论从可达到的电压等级还是从技术经济最佳化方面看，研制工作均已完成。

SF_6 绝缘电器的设计、工艺、制造、试验和运行，远远超出高压技术的范围，而涉及到许多科学技术领域。问题的多样性，反映在近年来发表的大量文献中。其中，放电物理（即绝缘技术）和等离子体物理（即电弧技术）的研究成果是最新的，它们是实际应用的基础。对于在这些基础领域迄今取得的成果，尚未见综合性论述。只有 Poltew^[1.2] 所著的书对整个问题作了初步论述，并介绍了所进行的设计。但是，这样一本涉及专业面广的论著自然不可能回答专门问题。尽管对具体问题已发表了许多论文，但迄今尚未从技术角度对“ SF_6 绝缘气体中的电击穿”现象进行综合分析。本书的出发点是：试图将世界范围内研究活动所达到的认识水平加以总结，通过针对性的试验加以充实，并按统一的观点加以论述。同时，打算以经典的气体放电物理学为基础，来分析

工程条件下复杂而涉及面广的击穿过程，并以工程技术人员在实践中易于接受的方式进行处理。因为这些分析毕竟要以实用为目的，故为有利于简化模型，取消了部分详细的理论推导。

为作综合性论述，要求有一个普遍适用、具有物理含意且工程上可用的参量来表示电击穿。这样一个将理论和实际要求联系在一起的参量，就是早为实践证实且具有综合意义的“耐电强度 E_d ”。但有必要对它在数学上加以描述，并从技术上加以解释。

从物理上讲，有必要将不受空间电荷电场的和受空间电荷（稳定的局部放电）严重影响的电场中的击穿过程分别处理。从这个意义上讲，即将稍不均匀场和由于局部放电的稳定存在而引起的极不均匀场区分开来。从后面的论述中可看出，这种物理上的划分亦有利于从技术上作出结论。对 SF_6 绝缘来说，所谓极不均匀场的实际含意，仅指的是稍不均匀场由于受到不应有的干扰（如由于毛刺、尖角、杂质）而形成的那种极不均匀场。这样的极不均匀场，称之为“具有稳定局部放电的受干扰稍不均匀场”（简称“干扰场”）。

此外，需要将以下所研究的参数范围限制到有用范围之内。本书只研究室温 $\theta = 20^\circ\text{C}$ 压力在 $0.05\text{MPa} \leq p_{20} \leq 0.6\text{MPa}$ 范围内受标准化基本电压波形（直流、交流、操作波和雷电电压）作用的气态 SF_6 。在无附加标注的情况下，这些电压以峰值给出。关于电场计算方法、试验技术及大量试验数据的统计处理等的论述，本书中作了省略，可参阅文献[1.3]~[1.5]。对于 SF_6 和其它气体的混合气体问题，书中作了简要讨论。

以下，首先讨论决定着击穿过程的各种现象，为此所用的方法不作为研究的对象，而作为辅助手段。由稍不均匀场的击穿过程模型中，推导出一种 SF_6 绝缘的设计计算方法，而通过对于干扰场击穿的认识，可对其工艺和试验作出结论。尽管是这种论述方式，但没有将 SF_6 绝缘的设计、工艺和试验相互割裂开来进行研究。

2. 电场作用下的基本过程

电击穿是在电场作用下在原子范围内发生的基本过程。现代气体放电物理学为高压技术中的这一基本过程提供了丰富的知识〔2.1〕。这就使得有可能从工程应用角度用模型来描述击穿过程中的相互影响。以下讨论在 SF_6 中发生的基本过程，这对击穿的模型化极为重要。要研究这些基本过程，必须先了解 SF_6 分子结构和一些基本特性。

2.1 分子结构及基本特性

一个分子的立体结构，在很大程度上决定着其理化性质。在 SF_6 分子中，六个氟原子（图 2.1）围绕着一个中心硫原子呈八面体排布着〔2.2〕。 SF_6 分子的这种结构，极为奇特，因为处于基态的硫在共价键（M 层，表 2.1）有六个电子，只需获得两个电子，就呈现惰性气体结构。然而，共价键的 s 和 p 电子对，用极小的能量就能激励而形成另外的不成对的电子〔2.3〕。

被激发的硫原子可与强电负性的氟结合成六共价键。中心原子和成键原子愈小，且电负性愈强，则这种键合愈稳定。

正由于这一缘故，在所有卤素中，只有氟（表 2.2）能与硫化合成稳定的六共价键，而不会出现与 SF_6 类似的其它分子，诸如 SCl_6 ， SBr_6 或 SI_6 。六氟化硒（ SeF_6 ）和六氟化碲（ TeF_6 ）在分子结构和化学性质上虽与 SF_6 相似，但由于原子半径大且电负性小

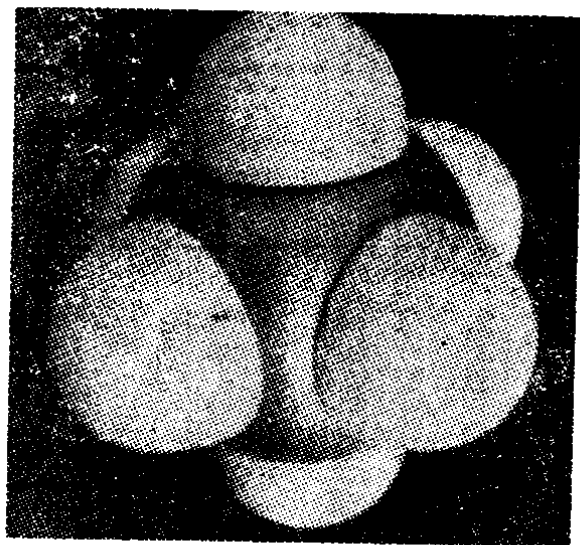
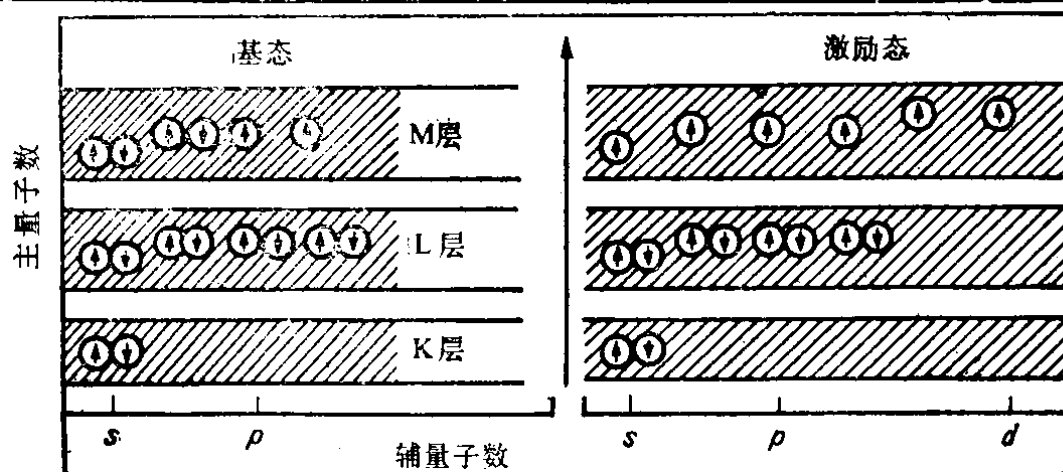


图2.1 SF_6 分子的立体模型

表2.1 硫和氟的电子层结构



电 子 层		K	L		M		
亚 层 符 号		1 s	2 s	2 p	3 s	3 p	3 d
原 子	状 态	电 子 层					
S ₍₁₀₎	基 态	2	2	6	2	4	—
S	激励态	2	2	6	1	3	2
F ₍₉₎	基 态	2	2	5	—	—	—

表2.2 SF₆和近族元素的物理性质(取自文献[2.3])

a) 卤素			
元 素	符 号	共 价 半 径 $10^{-4}\mu\text{m}$	电 负 性 ① 系 数
氟	F	0.72	4.0
氯	Cl	0.99	3.0
溴	Br	1.14	2.8
碘	I	1.33	2.4

b) 硫, 硒, 碲			
符 号	原 子 半 径 $10^{-4}\mu\text{m}$	电 负 性 ① 系 数	与 氟 的 键 合 距 离 $10^{-4}\mu\text{m}$
S	1.04	2.5	S-F 1.58
Se	1.17	2.4	Se-F 1.68
Te	1.34	2.1	Te-F 1.82

① 电负性是指与其它元素结合时获得电子的能力,因而,共价键具有偶极子性。

(表 2.2 b)，其总的稳定性远低于 SF_6 。

由于 SF_6 分子呈正八面体结构，且键合距离小，键合能量高，故其稳定性在不太高温度下接近惰性气体的稳定性。只有当温度很高时 ($>1000\text{ K}$)，在高纯度气体中才发生热离解，使不同的硫-氟键合物变成单质硫和氟或其离子 (图 2.2) [2.4]。在工程条件下，只有在电弧的不稳定热作用下，才能达到这样高的离解温度而对电工结构材料几乎无反应。在 500 K 的温度持续作用下，更不必担心 SF_6 气体分解，也不必担心会与其它材料发生化学反应。纯净的 SF_6 气体无毒、无色且无味。

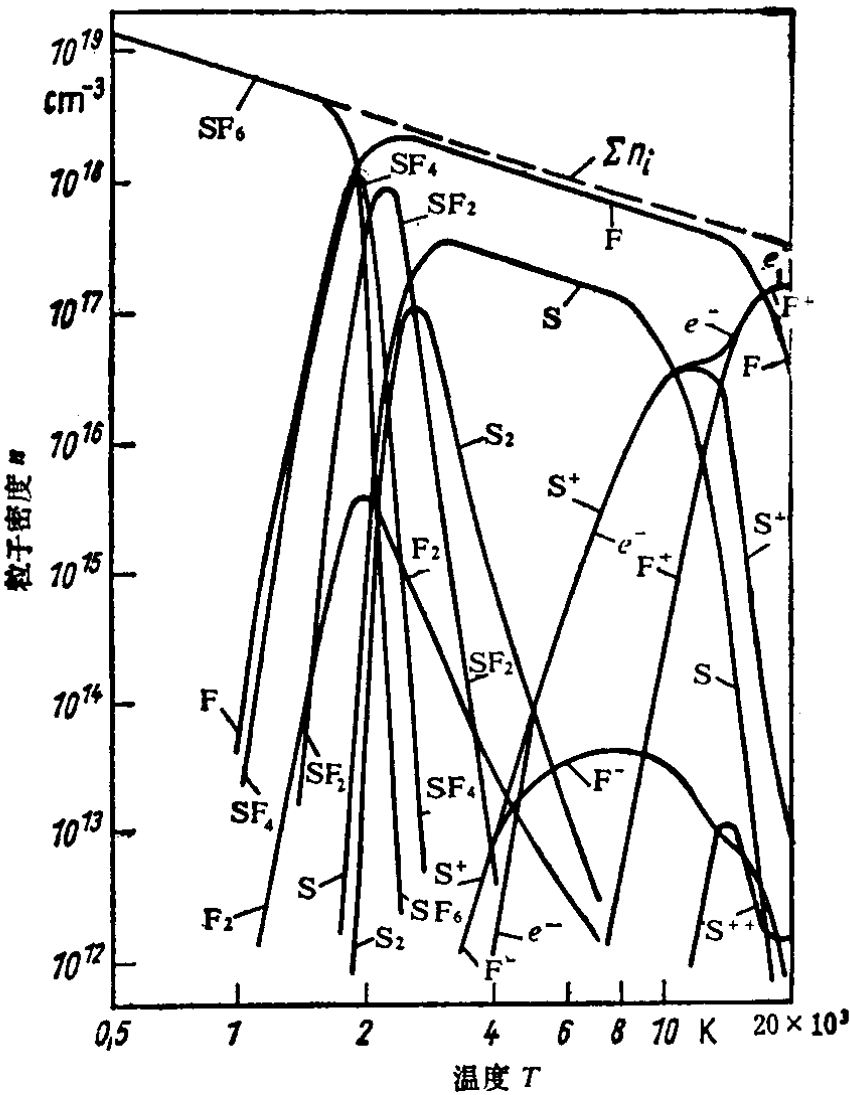


图2.2 $p_{20} = 0.1\text{ MPa}$ 时， SF_6 热离解物的粒子密度与温度的关系(取自文献[2.4])

从电场作用下的特性方面看，除分子性质外，宏观物理量也是令人感兴趣的 (表 2.3)。气体的密度随着相对分子量 M 的增

大而增加。 SF_6 的 $M = 146$ ，故因其密度大而带电粒子的平均自由行程小。 SF_6 的这些物理量同其电离能和电子亲和力一起，使 SF_6 的耐电强度比绝大多数气体要高得多（表 2.4）。

但是，气体的密度——如同物质的聚合态一样——却是取决于外部条件，诸如压力 P 和温度 ϑ 。 SF_6 的三态图（图 2.3）〔2.7〕表明，在 SF_6 绝缘的通常使用范围内（ $-40^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 80^\circ\text{C}$ ； $P < 0.8\text{MPa}$ ），气态占优势。只有当 $\vartheta < -18^\circ\text{C}$ 时，才需考虑 SF_6 气体的液化问题（图 2.4）〔2.8〕~〔2.23〕。与其它高耐电强度的气体相反， SF_6 的高度化学稳定性同有利于实际使用的温度特性是统一在一起的（参见表 2.4 中的凝结温度）〔2.24〕~〔2.27〕。

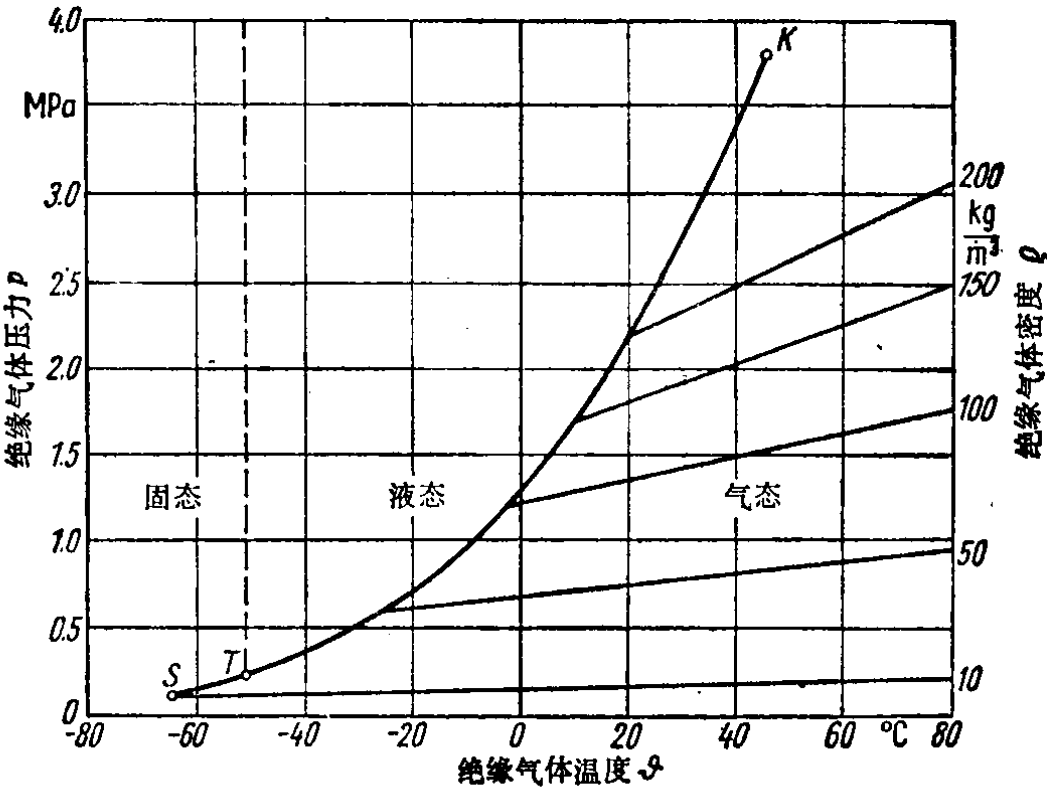


图2.3 SF_6 的三态图

图中的直线表示气态 SF_6 的恒定密度(取自文献〔2.7〕和〔2.13〕)

K—临界点 T—熔点 S—升华点

绝缘气体的密度，决定着对放电起决定性作用的基本过程，而与温度和压力无关。但鉴于实际情况（充气罐的可测性、安全规程等），大多给出某一定温度 ϑ 下的气体压力来取代气体密度。

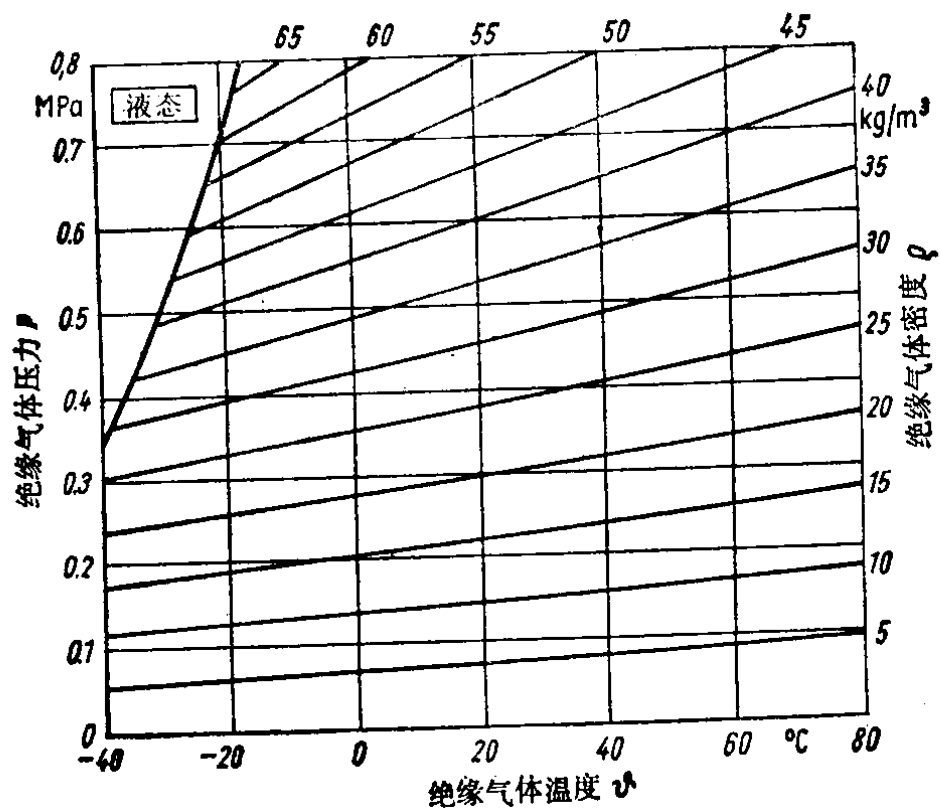


图2.4 在常用的SF₆绝缘使用范围内，SF₆气体的温度、压力和密度三者的关系(取自文献[2.13])

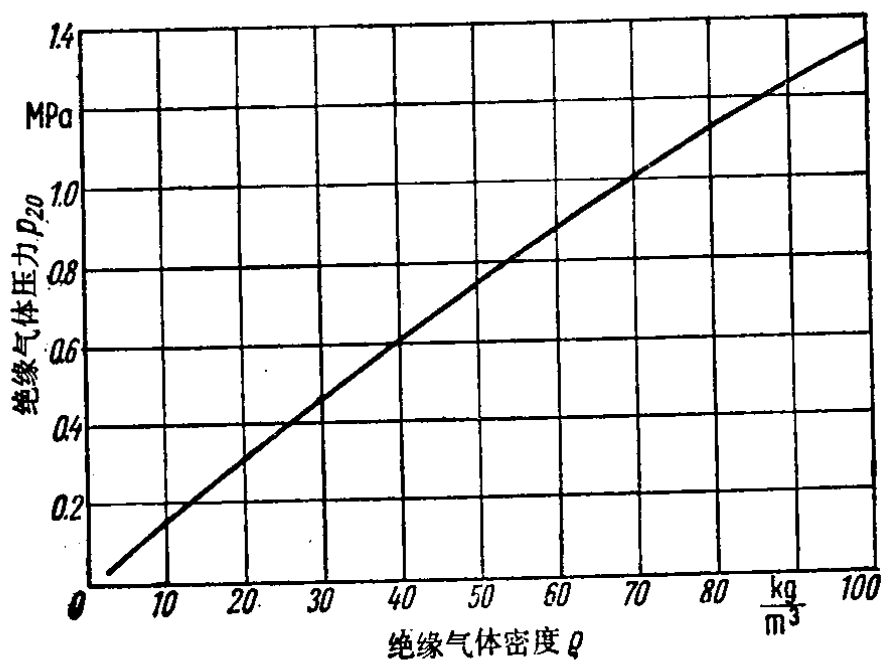


图2.5 SF₆的压力 p_{20} (当 $t = 20^{\circ}\text{C}$ 时) 与密度 ρ 的关系

表2.3 SF₆的物理性能

性能名称	边界条件	符号	量纲	数值	来源
相对分子量		M		146	[2.8]
相对介电系数	0.1MPa 25℃ 液态	ε _r		1.002049	[2.9]
介质损失角正切	-51℃	tan δ		1.81 ± 0.02	[2.10]
	0.1MPa 液态 -51℃			< 5 × 10 ⁻⁶	[2.11]
				< 1 × 10 ⁻³	[2.10]
音速	0.1MPa 30℃	v _s	$\frac{m}{s}$	138.5	[2.12]
动力粘度	0.1MPa 2℃	η	$\frac{m}{s \cdot cP}$	0.0145	取自[2.13]
	0.1MPa 31℃			0.0157	
	0.1MPa 66℃			0.0179	
临界压力		p _k	MPa	3.68	[2.14]
临界温度		θ _k	℃	45.5	[2.14]
三相点(熔点)	p = 0.22MPa	θ _r	℃	-50.8	[2.15]
升华点		θ _s	℃	-63.8	[2.16]
生成热		Q _B	$\frac{kJ}{mol}$	-63	[2.17]
溶解热		Q _s	$\frac{kJ}{mol}$	≈ 0.283	[2.18]
蒸发热	20℃	Q _D	$\frac{kJ}{mol}$	0.525	[2.19]
升华热		Q _v	$\frac{kJ}{mol}$	1.336	[2.18]
相对自由能①	25℃	$\frac{E - H_0}{T}$	$\frac{J}{molK}$	235.2	[2.16]
相对自由焓①	25℃	$\frac{H - H_0}{T}$	$\frac{J}{molK}$	57.2	[2.16]
熵	25℃	S	$\frac{J}{molK}$	292.3	[2.16]
比热	10℃ 0.1MPa = 常数	C _p C _v	$\frac{J}{molK}$	5.13	[2.20]
	10℃ V = 常数		$\frac{J}{molK}$	4.06	[2.21]
热传导系数	30℃		$\frac{J}{cm \cdot s \cdot K}$	0.82 × 10 ⁻⁵	取自[2.22]
绝热指数			$\frac{J}{cm^2 \cdot s \cdot K}$	0.44 × 10 ⁻⁵	取自[2.23]

① 参考量：T—绝对温度；H₀为T = 0K时的焓。

表2.4 不同气体的物理性能(按其电强度排列)

数据指 $p = 0.1\text{MPa}$ 和 $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ 而言		电强度	相对分 子 量	密 度	电子自由 行程长度	电离能	冷凝点
气体或蒸气	符 号	$E_d\text{①②}$ $\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$	M	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\lambda_E\text{①}$ μm	$W_i\text{①④}$ eV	ϑ_K $^\circ\text{C}$
氦	He	3.7	4	0.17	1.10	24.6	-269
氖	Ne	4.2	20	0.87	0.70	21.5	-246
氩	Ar	6.5	40	1.73	0.39	15.7	-186
氪	Kr	8.8	84	3.59	0.30	14.0	-153
氢	H ₂	15	2	0.09	0.65	15.8	-243
甲烷	CH ₄	21	16	0.72	0.29	13.1	-162
二氧化碳	CO ₂	25	45	1.91	0.24	14.4	-29
氧	O ₂	27	32	1.38	0.40	12.1	-183
水蒸汽③	H ₂ O	≈30	18	0.78		13.0	+100
空气	—	32	(29)	1.25	0.37	—	-193
氮	N ₂	33	28	1.21	0.35	15.7	-196
四氟化碳	CF ₄	36	88	3.81		15.4	
二氧化氮	NO ₂	40	44	1.94	0.24	12.9	-90
一氧化碳	CO	42	28	1.24	0.36	14.1	-192
氯	Cl ₂	52	71	3.22	0.16	11.8	-34.6
二氧化硫	SO ₂	64	64	2.93	0.17	13.4	-10
氟里昂	CF ₂ Cl ₂	80	121	5.33	0.30	≤18.0	-28
六氟化硫	SF ₆	89	146	6.39	0.22	15.9... 19.3	-63
六氟化硒③	SeF ₆	144	193	≈8.2			+49
四氯化碳③	CCl ₄	180	154	6.65	0.08	11.1	+77
氟	F ₂		18	1.695		16.5	-188

① 因参考文献中的数据差异很大，故给出的数据供作参考。
② 这里的电强度指板-板电场中当 $a = 1\text{cm}$ 时的击穿场强。
③ $\vartheta = \vartheta_K$
④ $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$

本文中采用 $\delta = 20^{\circ}\text{C}$ 时的绝缘气体压力 $p_{20}\ominus$ ，压力与密度的关系示于图 2.5 中。

表2.5 压力单位间的换算系数(取自〔2.5〕和〔2.6〕)

名 称	帕 斯 卡 (SI单位制)	巴	工程大气 压 力	物 理 大 气 压 力	托	毫米汞柱
代 号	Pa = N/m ²	bar	at = kp/cm ²	atm	Torr	mmWS
1 Pa	1	10 ⁻⁵	1.020 × 10 ⁻⁵	0.987 × 10 ⁻⁵	0.750 × 10 ⁻²	0.102
1 bar	10 ⁵	1	1.020	0.987	750	0.102 × 10 ⁵
1 at	0.981 × 10 ⁵	0.981	1	0.986	736	10 ⁴
1 atm	1.013 × 10 ⁵	1.013	1.033	1	760	0.103 × 10 ⁵
1 Torr	1.333 × 10 ²	1.333 × 10 ⁻²	1.360 × 10 ⁻³	1.316 × 10 ⁻³	1	13.6
1 mmWS	9.806	9.81 × 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	9.68 × 10 ⁻⁵	0.074	1

2.2 初始电子的产生

在电场作用下，只有当电场中被加速的带电粒子——主要是电子——将它的动能传给中性分子并使之电离时，才会出现放电过程。

为在放电间隙中产生所需的初始电子，在 SF₆ 中——象在大气中一样——需要有外部电离化施主。在这方面，除了地壳的天然放射性辐射外，特别是宇宙射线，它能在一个气体容积内不断地产生带电粒子。它最初由能量很大 (>150MeV $\ominus$) 的质子和氦核组成。若一次辐射的一质子与一气体分子相碰，则会使分子的原子核发生裂变，释放出高能量的二次质子、中子和 π 介子。产生的 π 介子不稳定，分裂出 μ 介子、电子、中微子和 γ 量子〔2.28〕。这些粒子所具有的能量，足以电离中性气体分子。这样，在每立方厘米大气中，每秒钟可产生 5~20 个带电粒子对，

$\ominus$ 绝缘气体压力 P 在国际单位制(SI)中亦用帕斯卡表示。因为常用的压力单位很多，故在表2.5中给出换算系数。
 $\ominus$ 为明显起见，采用电子伏(eV)单位，而未用国际单位制(SI)。

即电子-离子〔2.29〕、〔2.30〕。在一般的 SF_6 封闭容积内，可产生同样数量级的带电粒子，因为宇宙射线实际上能不受阻挡地穿过封闭壳体壁〔2.28〕。

通过宇宙射线释放的电子，在电负性气体如 SF_6 中，寿命很短，它附着在中性分子上仅几十个毫微秒。如果具有放电场强电子但其容积小且作用时间短，则不可能起到初始电子的作用。附着时形成的负离子，其寿命却长得多〔2.32〕、〔2.33〕，但其漂移速度很小（图 2.6）。这样产生的负离子，虽密度较大，但由于它的自由行程较小，所具有的动能比电子还小，几乎不能使 SF_6 分子电离。当然，若输给微小的能量，如使它处于场强为 $E/p_{20} = 80 \sim 100 \text{ kV/mm} \cdot \text{MPa}$ 〔2.34〕、〔2.35〕的电场中，与受激励的分子碰撞，

就有可能使电子脱离负离子。从能量角度看，电子的这种逸出是产生初始电子的重要过程。电子的逸出过程可看作为将在 2.3 节详细论述的附着过程的逆过程。

产生初始电子的另一个机理是阴极上的电子发射。这是因为在 SF_6 中，均匀场中的放电主要由阴极开始〔2.26〕，而在空气中，放电是从整个电极区间开始。下面估计发射电子所需的场强。逸出功（表 2.6）可通过热量的形式传给电子（热

发射），电子也可以在很高的场强作用下，通过波动式的隧道效应脱离金属（场致发射）〔2.37〕、〔2.38〕。在室温下——尽管考虑到肖特基效应〔2.37〕（图 2.7）——热发射在比场致发射高得多的场强下才能发生（图 2.8）。但是，即使是场致发射所需的场

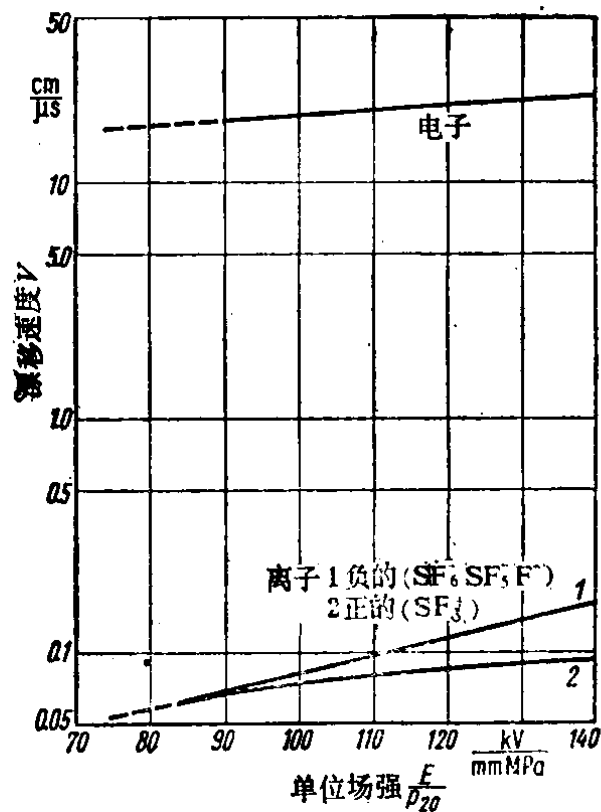


图2.6 SF_6 中电子和离子的
漂移速度(取自文献〔2.34〕)

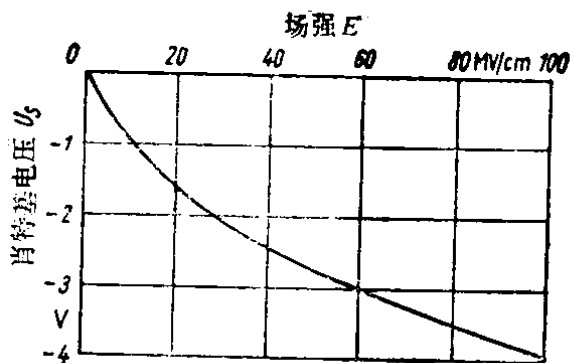


图2.7 肖特基效应引起逸出电压的降低

$$\text{有效逸出电压} \quad U_A^* = U_A + U_s = U_A - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}}$$

$$\text{逸出功} \quad W_A = eU_A^*$$

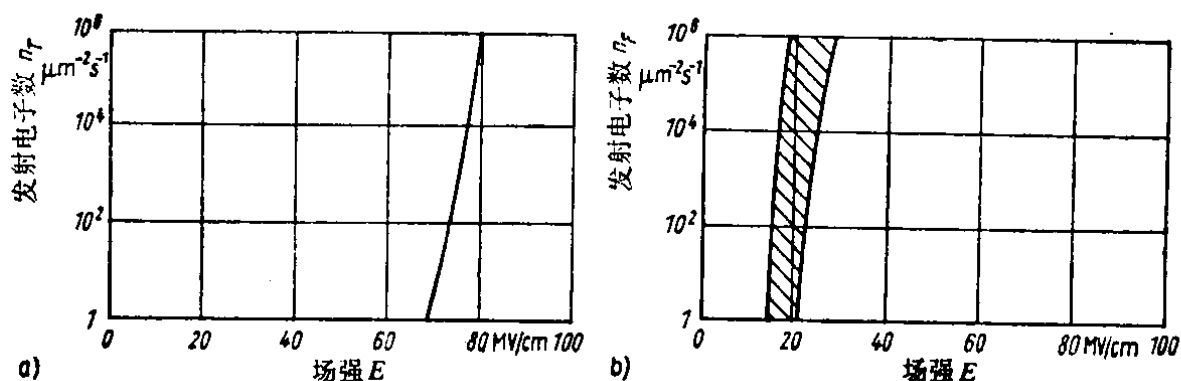


图2.8 通过发射产生的初始电子(方程式取自文献[2.37])

a) 通过热发射产生的电子数 (当 $T = 293\text{ K}$ 和 $U_A = 4.0\text{ V}$ 每微米² 和每秒的电子数);

$$n_T = \frac{G_T}{e} = \frac{4\pi m_e k^2}{h^3} T^2 \exp\left[\frac{-eU_A^*(E)}{kT}\right]$$

b) 通过场致发射产生的电子数 (当 $U_A = 4.0 \sim 5.5\text{ V}$ 时每微米² 和 每秒的电子数);

$$n_F = \frac{G_F}{e} = \frac{eE^2}{2\pi h U_A} \exp\left[\frac{-8\pi \sqrt{2m_e e} U_A^{3/2}}{3hE}\right]$$

强, 也比宏观测得的击穿场强约高 10^3 。作为发射中心, 只能是电极表面微小的凸起 $\ominus$, 这已通过电子显微镜进行研究所证实 (图 2.9) [2.4]。若以平面上的椭圆体尖端来模拟这些凸起, 则当椭圆体的轴长比 $a/b = 15$ 时, 场强就已被抬高 100 倍。如设想发射场强只能以点的形式起作用, 即控制实际使用电极, 使之凸

$\ominus$ 因之, 在图2.8中, 发射的电子数是指 1 微米这样小的面积而言的。