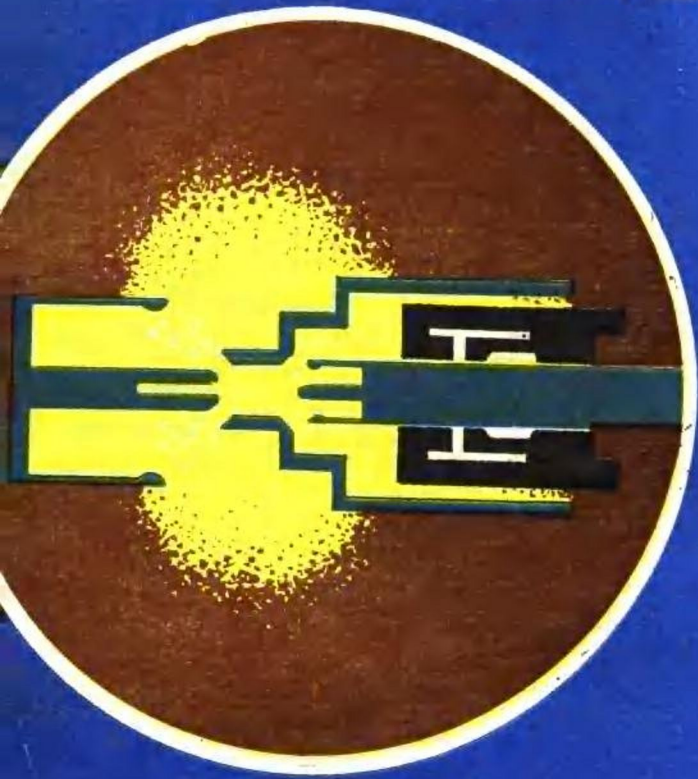


V.N. 墨尔勒 M.S. 奈杜

黎明 盛国钊 黎抗生 徐喆明 译



# SF<sub>6</sub>和真空中高压绝缘 及电弧开断的进展

V. N. MALLER  
M. S. NAIDU

ADVANCES IN  
HIGH VOLTAGE INSULATION  
AND ARC INTERRUPTION  
IN SF<sub>6</sub> AND VACUUM

First edition 1981  
PERGAMON PRESS

SF<sub>6</sub>和真空中高压绝缘及电弧开断的进展

V. N. 墨尔勒 M. S. 奈杜

黎明 盛国钊

译

黎抗生 徐喆明

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 10.75 印张 236 千字

1986年8月第一版 1986年8月北京第一次印刷

印数 0001—2230 册 定价2.20元

书号 15143·5931

## 内 容 提 要

本书是作者在广泛收集世界各国近年来有关 SF<sub>6</sub> 和真空高压绝缘及灭弧现象的重要研究成果的基础上, 进一步系统分析研究编写而成。其特点是不仅内容新颖反映了当代水平, 而且线条清晰系统性强, 并且提供了大量有实用参考价值的图表和曲线。本书主要包括两方面内容 (一) SF<sub>6</sub> 的特性及管理、SF<sub>6</sub> 和真空中放电的基本现象; (二) SF<sub>6</sub> 和真空绝缘在实际装置上的应用。全书共分八章: (1) SF<sub>6</sub> 气体性质和管理方法; (2) SF<sub>6</sub> 气体在高电压下的击穿; (3) SF<sub>6</sub> 中的电弧开断; (4) SF<sub>6</sub> 气体绝缘开关装置; (5) SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备; (6) 真空中的高电压击穿; (7) 真空中的电弧开断; (8) 真空开关装置。

本书可供从事 SF<sub>6</sub> 和真空高压绝缘设备的科研、设计、制造、安装、运行的工程技术人员及高、中等院校师生阅读和参考。

1001  
1001

## 译 者 的 话

近年来,  $SF_6$  和真空高压绝缘及灭弧方面的研究取得了很大进展,  $SF_6$  绝缘设备在超高压输电、水电资源开发和城市电网改造中得到了广泛的应用, 真空开关装置在输配电系统中也逐渐显示出其竞争性。因此, 急需一本概括全貌、实用性强的论著以供参阅。为此, 我们将 V. N. 墨尔勒和 M. S. 奈杜合著的《Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in  $SF_6$  and Vacuum》(1981年版) 译为中文, 奉献给读者。

在翻译过程中, 我们尽量保持书的原貌, 但对原书中文字和插图的某些错误或不妥之处进行了修改。此外, 为了方便读者, 我们对原书加了节次编号和书中常用的非国际单位制单位的换算表。

参加翻译工作的有黎明(第一、二、三、五章)、盛国钊(第四章、附录)、黎抗生(第七、八章)、徐喆明(第六章)。王焜明和龚汝厚同志审阅了全书译稿。

在本书翻译出版过程中, 我们得到了吴竞昌、姚抚城、王义基、李毅达、赵智大、朱德恒等同志的热情支持和鼓励, 在此我们表示诚挚的感谢。

由于时间仓促、译者水平有限, 译文中难免还有错误之处, 热诚欢迎批评指正。

## 前 言 (摘译)

对于在商业上很重要的绝缘介质—六氟化硫 ( $\text{SF}_6$ ) 气体中和在高真空中高压击穿及灭弧现象, 虽然已进行了大量的研究, 这方面的许多工作散见于大量研究论文和报告中。然而, 令人奇怪的, 是没有一本教科书论及这方面的问题。采用这些绝缘介质的各种高压电力设备的设计和研制情况, 也大多只见于世界各制造厂家的商业性杂志中。因此, 本书的目的在于将这些资料收集起来, 并进行有条理的研究。

本书内容试图包含在  $\text{SF}_6$  和高真空中高压击穿和灭弧的所有重要方面, 并特别着重介绍这些介质在高压电力设备和装置中的应用。近年来, 这两种介质在各种类型的电力设备中得到了多种应用。

这些材料可分为两个部分。第一部分论述  $\text{SF}_6$  和高真空中放电的基本现象。第二部分详细描述这些介质在实际装置中的应用。此外, 还详细介绍了  $\text{SF}_6$  气体的性质和管理方法。

为了使本书篇幅不致冗长, 在较大程度上对所涉及的材料加以限制是必要的, 但仍为包含该领域内所有重要方面内容作了不懈的努力。

本书的宗旨是: (1) 帮助从事实际工作的工程师更新和加强他们对放电原理的基础知识, 并使他们能够从事采用上述介质的高压电力设备的设计和研制工作。为此, 我们希望本书对工业部门的工程师以及对高电压设备的设计、研制

和使用感兴趣的供电和电业科研机构的人员有直接参考价值；  
（2）帮助研究生和研究人员熟悉有关这些介质的各种现象  
及其实际应用的研究和结果。

V.N. 墨尔勒

M.S. 奈杜

1980年7月1日

## 书中常用的非国际单位制单位的换算表

压	力:	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
		$1 \text{ mmHg} = 133.3224 \text{ Pa}$
		$1 \text{ Torr} = 133.3224 \text{ Pa}$
		$1 \text{ at m} = 101325 \text{ Pa}$
		$1 \text{ lb/in}^2 \text{ (psia)} = 6894.76 \text{ Pa}$
密	度:	$1 \text{ g/ml} = 1000 \text{ kg/m}^3$
		$1 \text{ g/l} = 1 \text{ kg/m}^3$
表面	张力:	$1 \text{ dyn/cm} = 10^{-3} \text{ N/m}$
长	度:	$1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$
		$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$

# 目 录

译者的话

前言 (摘译)

书中常用的非国际单位制单位的换算表

第 1 章 SF <sub>6</sub> 气体的性质和管理方法	1
1-1 引言	1
1-2 一般性质	1
1-3 物理性质	2
1-4 化学性质	8
1-5 传热特性	9
1-6 毒性	12
1-7 电气特性	12
1-8 SF <sub>6</sub> 气体的管理	16
1-9 SF <sub>6</sub> 气体的充入	17
1-10 分解产物的吸收	21
第 2 章 SF <sub>6</sub> 气体在高电压下的击穿	22
2-1 引言	22
2-2 击穿机理	22
2-3 SF <sub>6</sub> 在均匀场中的击穿	29
2-4 电晕和不均匀电场的击穿	33
2-5 实际系统中击穿电压的估算	41
2-6 SF <sub>6</sub> 与其他气体混合后的击穿	47
2-7 微粒引起的击穿	51

---



2-8	影响SF <sub>6</sub> 气体击穿强度的因素	57
2-9	SF <sub>6</sub> 中绝缘子的沿面闪络	65
第3章	SF <sub>6</sub> 中的电弧开断	72
3-1	引言	72
3-2	基本的电弧现象	74
3-3	SF <sub>6</sub> 中的简单开断电弧	75
3-4	SF <sub>6</sub> 中的气吹电弧	81
3-5	SF <sub>6</sub> 中的电流截断	100
3-6	SF <sub>6</sub> 中电弧开断研究的现状	104
3-7	SF <sub>6</sub> 混合气体中的电弧开断	105
第4章	SF <sub>6</sub> 气体绝缘开关装置	108
4-1	引言	108
4-2	SF <sub>6</sub> 断路器的优点	109
4-3	双压式SF <sub>6</sub> 断路器	110
4-4	单压式(压气式)SF <sub>6</sub> 断路器(765kV及以下)	115
4-5	单压式SF <sub>6</sub> 断路器的设计依据	117
4-6	单压式SF <sub>6</sub> 断路器的操作机构	127
4-7	灭弧室的几何形状	130
4-8	喷嘴形状的设计	131
4-9	自灭弧式SF <sub>6</sub> 断路器	136
4-10	维修要求和可靠性	138
4-11	SF <sub>6</sub> 气体断路器的发展趋势	140
4-12	SF <sub>6</sub> 全封闭组合电器	141
4-13	GIS的优点	141
4-14	SF <sub>6</sub> 绝缘全封闭组合电器的要求	142
4-15	设计上应考虑的一般问题	143
4-16	气体绝缘开关设备及其部件的设计	151

4-17	气体绝缘开关设备及其部件的介绍	153
4-18	SF <sub>6</sub> 气体的充入	162
4-19	SF <sub>6</sub> 气体处理装置	164
4-20	GIS 的绝缘配合	166
4-21	GIS 的发展趋势	170
<b>第 5 章</b>	<b>SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备</b>	<b>171</b>
5-1	引言	171
5-2	SF <sub>6</sub> 气体绝缘电缆	171
5-3	SF <sub>6</sub> 气体绝缘电流互感器	186
5-4	SF <sub>6</sub> 气体绝缘套管	195
5-5	SF <sub>6</sub> 绝缘电气设备的一般试验方法	201
<b>第 6 章</b>	<b>真空中的高电压击穿</b>	<b>204</b>
6-1	引言	204
6-2	强电场下的电子发射	205
6-3	真空中的预击穿现象	206
6-4	击穿机理	210
6-5	影响真空间隙击穿强度的其他因素	222
6-6	真空中沿固体绝缘子的击穿	224
6-7	结论	235
<b>第 7 章</b>	<b>真空中的电弧开断</b>	<b>237</b>
7-1	引言	237
7-2	真空电弧概述	239
7-3	阴极现象	239
7-4	真空电弧的等离子体	247
7-5	阳极现象	248
7-6	真空中的电弧恢复现象	252
7-7	今后的工作	257

第 8 章 真空开关装置	259
8-1 引言	259
8-2 真空开断的优点	259
8-3 真空接触器和真空断路器	262
8-4 真空灭弧室介绍	262
8-5 真空接触器的操作机构	265
8-6 真空断路器的操作机构	266
8-7 真空断路器的触头材料	270
8-8 真空断路器触头的几何形状	282
8-9 制造技术	289
8-10 真空开关装置的应用	296
8-11 真空开关装置的维护	306
附录 1	308
附录 2	310
参考文献	310

# 第 1 章 SF<sub>6</sub>气体的性质和管理方法

## 1 — 1 引 言

六氟化硫的历史开始于1900年,当时 Moissan和Lebeau<sup>[1]</sup>报导了首次合成硫的六卤化衍生物。这种化合物是当硫在氟的气氛中燃烧时形成的。大约到1940年, Cooper及其同行们建议将六氟化硫作为电力设备的绝缘介质,在此之前SF<sub>6</sub>没有多大的工业价值<sup>[2]</sup>。第二次世界大战期间,美国麻省理工学院对SF<sub>6</sub>进行了研究,其目的是要将SF<sub>6</sub>作为一种绝缘气体用于范德格拉夫发电机上。这一研究使人们对这种气体的兴趣迅速增长,终于导致SF<sub>6</sub>用于电力设备,如开关装置、变压器、电缆和其他专用电器上。

由于SF<sub>6</sub>具有非常高的绝缘强度和其他一些物理特性,因而广泛用于电气设备,所以在最近20年左右,人们对SF<sub>6</sub>进行了细致的工程研究。

## 1 — 2 一 般 性 质

SF<sub>6</sub>作为一种绝缘气体具有很多优点:无毒、不可燃,并有优良的冷却特性,其绝缘强度大大高于传统的绝缘气体。它还具有优良的灭弧性能,将它用于电气设备可免除火灾的

① 上角方括号内的数码表示本书各章所引用的参考文献序号。——下同

危险，大大缩小设备尺寸，並可提高系统的可靠性。

尽管SF<sub>6</sub>具有许多重要的优点，但也有一些缺点。一个主要问题是，在放电时SF<sub>6</sub>会发生分解，形成硫的低氟化物。这些产物有毒，並对许多绝缘材料和导电材料有腐蚀作用。另一个问题是，在较高压力下SF<sub>6</sub>会液化，而且价格较贵。

### 1-3 物 理 性 质

SF<sub>6</sub>的物理性质列于表1-1中。表中数据取自不同的来源，在某些情况下，结果可能有矛盾，这可能是被试SF<sub>6</sub>气体的化学纯度不同的缘故。作为SF<sub>6</sub>气体的杂质可能存在的硫的其它氟化物的性质列于表1-2中。表1-2中的数据也是取自不同的来源。

表1-1

SF<sub>6</sub>的物理性质<sup>[8]</sup>

分子量	146.06
熔点 (°C)	-50.8
升华点 (°C)	-63.8
密度 (固体) (50°C时)	2.51g/ml
密度 (液体) (50°C时)	1.98g/ml
(25°C时)	1.329g/ml
密度 (气体) (1 bar, 20°C时)	6.164g/l
临界温度 (°C)	45.6
临界压力 (bar)	36.557
临界密度	0.755g/ml
比热 (25°)	7.0 g·cal/ml·°C
表面张力 (-50°C)	11.63dyn/cm
膨胀系数 (-18.5°C)	0.027
热导率 (×10 <sup>1</sup> )	3.36cal/s·cm·°C
粘度 (气体, 25°C时, ×10 <sup>1</sup> )	1.61P
沸点 (°C)	-63
比热 (30°C)	0.143cal/g·°C
相对密度 (空气密度 = 1)	5.10
融熔膨胀系数	30%
饱和蒸汽压力 (20°C)	10.62bar
折射率 (N, 0°C时)	1.000783
密度 (20°C时, 1 bar)	6.5kg/m <sup>3</sup>

表 1 - 2

硫的氟化物的物理性质<sup>[8]</sup>

性 质	S <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	SF <sub>4</sub>	S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>
气 味	硫黄气味	无气味	无气味
熔点 (°C)	-105.5	-124	-92
沸点 (°C)	-99	-40	29
比 重	1.5 (-100°C)	—	2.08(0°C)
与氢氧化钠的反应	分解	分解	不溶解
毒 性	使人麻痹	有毒	有毒性
表 面 张 力	—	—	13.9dyn/cm
与 水 的 反 应	分解	分解	—

由表 1-3 可以明显看出, SF<sub>6</sub> 在很多物理性质方面与 CO<sub>2</sub> 类似。这两种气体在几个大气压下都会升华和熔化。温度低于 -50.8°C<sup>①</sup> (熔点) 时, SF<sub>6</sub> 气相与固相平衡, 而液态 SF<sub>6</sub> 则处于亚稳状态。另一方面, 当温度超过 45.7°C (临界温度) 时, 液态 SF<sub>6</sub> 不复存在。CO<sub>2</sub> 也有极类似的关系。SF<sub>6</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的临界体积与它们的分子量大致成正比。

表 1 - 3

SF<sub>6</sub> 与 CO<sub>2</sub> 的比较<sup>[5]</sup>

性 质	SF <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>
升华温度 (°C)	-63.8	-78.5
熔 点 (°C)	-50.8	-56.6
熔点时的压力 (bar)	2.25	5.27
临界温度 (°C)	45.65	31.1
临界体积 (m <sup>3</sup> /kg)	1.354 × 10 <sup>-3</sup>	4.599 × 10 <sup>-4</sup>
分 子 量 (kg/mol)	66.25	19.96

### 蒸汽压力

这一特性限制了不同温度下 SF<sub>6</sub> 气体的使用压力。图

① 原书误为 -59.4°C。——译注

1-1示出了SF<sub>6</sub>蒸汽与其液相或固相处于平衡状态的压力-温度范围。由该图可以看出,在压力约为14bar时, SF<sub>6</sub>在0℃就液化了。然而,从图1-2可看出,在需要提供较高绝缘强度和灭弧性能的压力和温度范围内,不存在液化的危险。这些特性参数可由书末附录给出的方程式(附1-1)和(附1-2)计算出来。

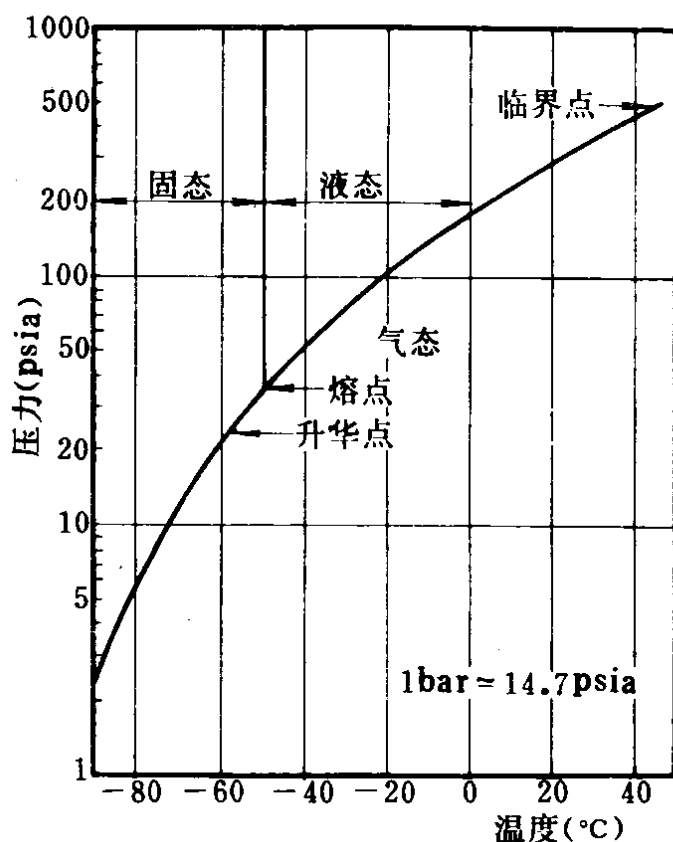


图 1-1 SF<sub>6</sub> 蒸汽和升华压力<sup>[5]</sup>

### 密度

SF<sub>6</sub>是一种致密气体。在20℃、760Torr时,其密度为6.164g/l,约为相同状态下空气密度的5倍。图1-3示出了从-273℃至45℃时SF<sub>6</sub>的密度,包括固态、液态SF<sub>6</sub>及其饱和蒸汽的密度<sup>[3]</sup>。图1-4给出了24℃时SF<sub>6</sub>的密度随压力变化的曲线<sup>[4]</sup>。

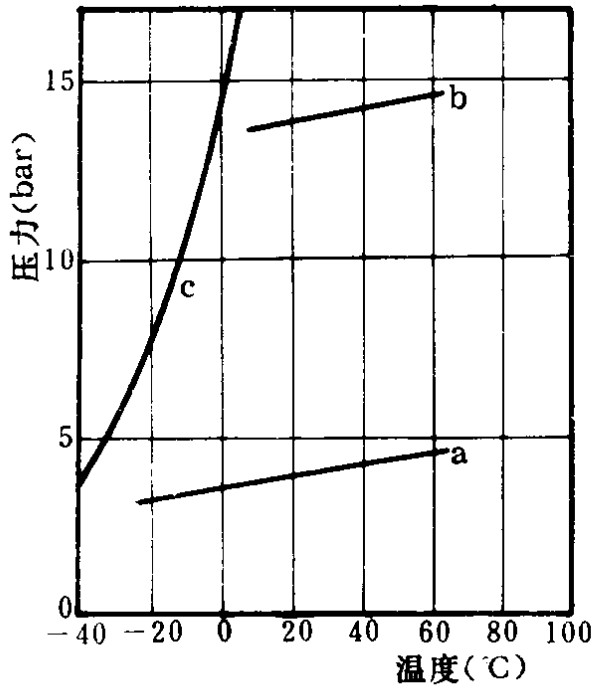


图 1-2 SF<sub>6</sub> 蒸汽压力与温度的关系曲线 [3]

曲线 b—用于灭弧的压力范围；  
 曲线 a—用于绝缘的压力范围；  
 曲线 c—蒸汽压力 [3]

图 1-3 SF<sub>6</sub> 的密度随温度的变化 [3]

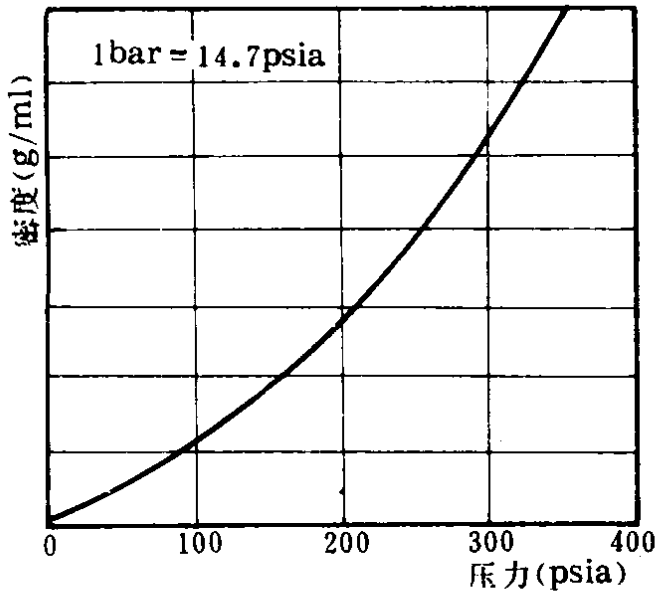
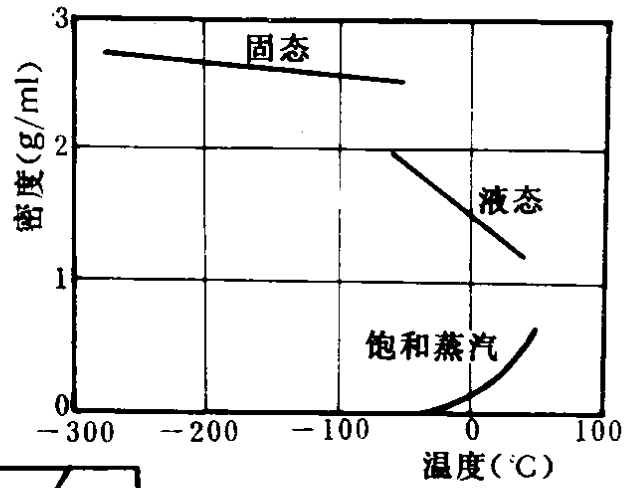


图 1-4 SF<sub>6</sub> 的密度随压力的变化 [1]



这些 $\text{SF}_6$ 气体密度可用附录中给出的 Matrin-Hou 方程（附1-3）导出相互关系<sup>5</sup>。该方程描述了压力随温度和气体比容的变化。图1-5示出了用这种分析方法所得结果和（饱和）蒸气压力曲线。等密度（比容的倒数）线从（饱和）蒸汽压力曲线成直线地延伸到该各向同性气体的压力-温度范围。这样，对于给定的温度和压力，我们就可确定是否有液相存在，如果没有，可估算出 $\text{SF}_6$ 气体的密度是多少。当需要密度的插值时，可在恒定温度下，假定密度随压力线性增加来求得。

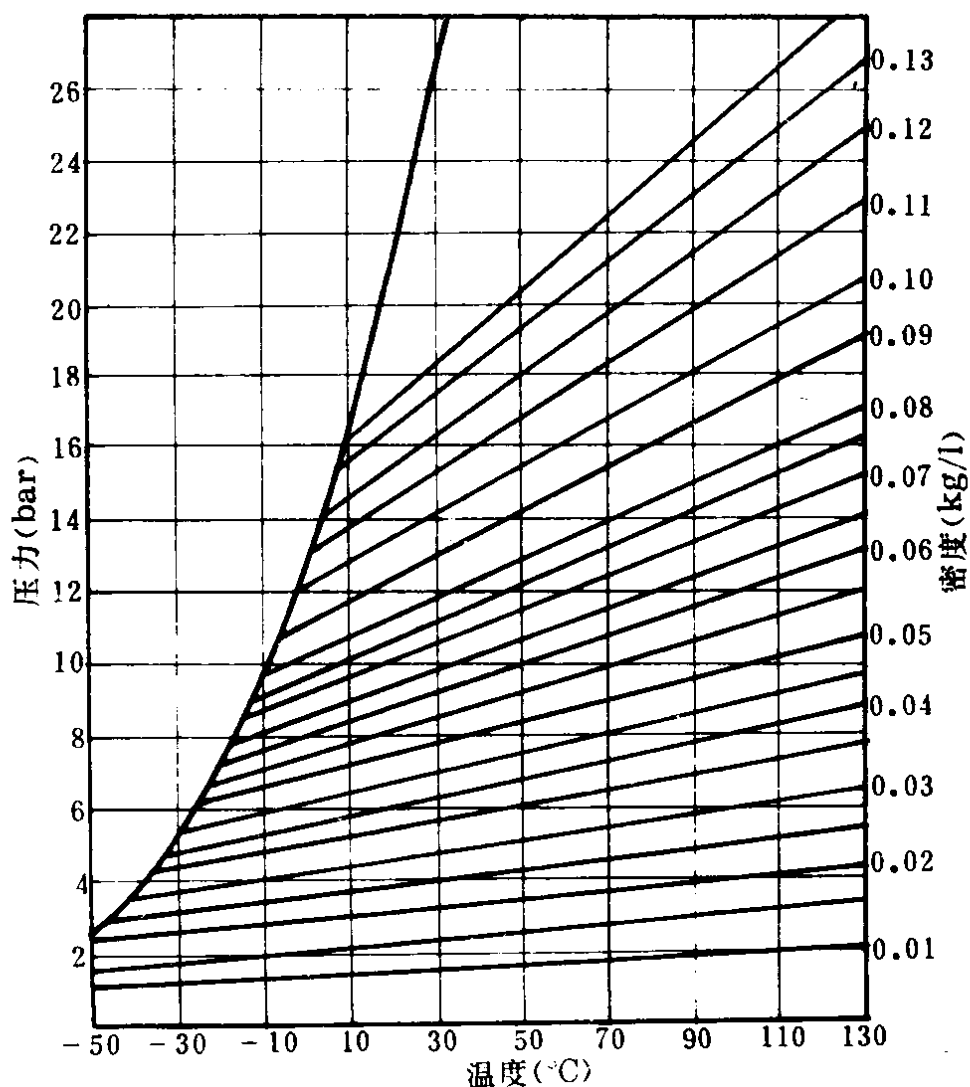


图 1-5 密度不变时 $\text{SF}_6$ 的压力-温度等容线 [ 5 ]