

低温真空技术

電子工業出版社

· * ·
低温真空技术

——基础和应用

〔德〕R·A·黑费尔 著

李旺李等 译

责任编辑 连潮东 高平

·
电子工业出版社出版（北京万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京科技印刷厂印刷

·
开本：850×1168毫米 1/32 印张：22.8 字数：282千字

1985年5月第一版 1985年6月第一次印刷

印数：1—5100册 定价：2.60元

统一书号：15290·106

译 者 序

“低温真空技术”一书是一本颇具特色的专著。作者根据他多年的科研实践经验，综合整理了大量新发表的文献，系统地论述了低温真空技术的物理基础，深入探讨了低温真空容器中的非平衡态气流理论，详细介绍了用低温手段获得真空的技术和各种低温泵的结构、性能及其应用。本书是一本对真空技术工作者有较大参考价值的新书。

本书作者黑费尔 (R·A·Haefer) 曾任瑞士物理基础部负责人，现为该部和奥地利电子显微镜研究中心顾问。他曾发表了有关真空技术、电子显微镜、固体物理、等离子体物理和低温物理等方面的论文80余篇，并出版了《低温真空技术》和《低温技术》两本书。

译者在翻译过程中曾得到中国科学院兰州近代物理研究所郭其第研究员的热情帮助，谨在此表示感谢。

译校者水平有限，错误难免，望读者指正。

译 者

一九八五年

内 容 简 介

本书扼要地论述了低温真空技术的基础理论,介绍了低温泵的工作原理和制冷方法,讨论了低温泵各特性参数的计算及其实际结构,并对各种低温泵作了专门介绍。本书还介绍了低温真空技术在宇航研究、粒子束系统、等离子体物理和热核聚变、真空工艺、表面物理学和表面分析等方面的具体应用。

本书可供从事真空技术、表面科学研究的工程技术人员、工人和高等及中等专业技术院校的师生参考。

前 言

利用低温获得真空的低温真空技术，在目前出版的真空技术教科书中所占的篇幅很少。可是，近年来低温泵的重要性和有关这方面的资料却急剧猛增，因此，希望把低温真空技术与传统的真空技术分开来专门加以介绍。本书论述了低温真空技术的物理基础、实际结构和应用，它是根据作者在这一专业领域的生产和科研中多年积累的实践经验写成的。

众所周知，高真空泵需求量不断增加，一方面是因为开辟了新的应用领域，另一方面则是由于对许多真空工艺流程提出了更高的要求，例如清洁的、不含碳氢化合物的残余气体气氛，低的极限压强，以及要求具有高的比抽速（这与泵入口面积有关），以尽可能缩短抽气时间。低温泵在这些特性方面胜过所有常规的高真空泵。

低温泵的结构形式种类繁多：有使用液氦（LHe）冷却的冷阱式低温泵（贮槽式低温泵），也有采用靠氦气流连续冷却低温板致冷的、靠再生式致冷机或焦耳-汤姆逊阀式致冷机致冷的低温泵，或利用膨胀引射器致冷的低温泵。尽管这些致冷方法不同，但是，由于其抽气低温面的结构形式适应性很强，故始终能与被抽空的容器相匹配。按照这种方式工作的低温泵，可以在所需要的地方甚至在设备难于接近的位置上充分发挥其全部抽速。

最近几年研制出运行可靠的致冷机低温泵，实现了抽气系统的全自动化，在抽速约为 $10\text{米}^3/\text{秒}$ 时，这种泵的投资费用和生产成本并不比常规泵贵，它正越来越多地在真空工艺流程中使用。在空间模拟和核裂变的大型装置中抽速必须大于 $100\text{米}^3/\text{秒}$ ，这只有利用低温泵才能经济地获得这样大的抽速。由此可知，低温泵

在真空技术中占有十分重要的地位。

从事真空工作的专业技术人员必须具备一定的低温技术知识,才能在应用低温泵时准确地判断采用哪种致冷方法最为有利,选用哪些低温技术测量方法和辅助手段最适宜。而另一方面,低温专业技术人员也需要掌握真空技术物理基础的详尽知识,掌握在大低温抽气面的容器内气体流动和压强测量等知识,还要了解低温泵的各种机理和低温泵的计算方法,以便能够确定在一定的使用情况下致冷装置的最佳尺寸。本书特别着重于通过相应的物理和技术上的数据资料以及大量的应用实例帮助读者加深理解。

本书内容包含下列有关章节:第一章论述整个低温真空领域的概况,并提出了几个重要问题。第二章论述了真空技术基础原理,主要是气流形式和不等温真空容器中分子流以及连续流范围内的压强测量问题。以后各章叙述低温泵的各种机理,即纯气体的冷凝(第三章),气体冷凝物上的低温吸附(第四章),多孔固体的低温吸附(第五章),混合冷凝作用和低温捕集(第六章),钛升华泵中的低温吸气(第七章)。第八章阐述低温泵各个特性参数的计算,第九章介绍低温泵的实际结构形式:这两章还讨论了低温技术基础以及致冷方法和测量方法。最后,第十章介绍低温真空技术在下列领域中的应用:宇宙研究,粒子束系统,等离子体物理和热核聚变,真空工艺技术,界面物理学和表面分析,低温地了技术和氦II致冷系统。附录的表格中有对实验工作十分重要的真空技术和低温技术数据。本书使用国际单位制。书后附有详细的参考文献目录。

格拉茨,
电子显微技术研究中心
R·A·黑费尔
1980年11月

常用符号和量度单位

名 称	符 号	量 度 单 位
面积	A	m^2 (米 ²)
平衡压强常数	B	—
流导	C	$m^3 \cdot s^{-1}$ (米 ³ /秒)
平均净吸附能	D	$J \cdot mol^{-1}$ (焦/摩尔)
能量	E	J(焦)
发射粒子流密度	E	$m^{-2} \cdot s^{-1}$ (1/米 ² /秒)
一个粒子占据的面积	F	m^2 (米 ²)
焓差	ΔH	$J \cdot mol^{-1}$ (焦/摩尔)
粒子流密度	I	$m^{-2} \cdot s^{-1}$ (米 ⁻² /秒)
克努曾数	K	—
长度	L	m (米)
摩尔质量	M	$kg \cdot kmol^{-1}$ (千克/千摩尔)
阿伏伽德罗数	$N_A = 6.02252$ $\times 10^{23}$	$kmol^{-1}$ (1/千摩尔)
粒子流量	N	s^{-1} (秒 ⁻¹)
气流, PV积, 抽吸量	Q	$P_a \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ (帕·米 ³ /秒)°
气量, PV积	\bar{Q}	$P_a \cdot m^3$ (帕·米 ³)°
热流, 致冷功率	Q	W (瓦)
气体常数	$R = 8.3143$	$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ (焦/摩尔·K)
雷诺数	Re	—

(续表)

名称	符号	量 度 单 位
抽速	S	$m^3 \cdot s^{-1}$ (米 ³ /秒)
温度	T	K
容积	V	m^3 (米 ³)
容积流量	\dot{V}	$m^3 \cdot s^{-1}$ (米 ³ /秒)
功率	\dot{W}	W (瓦)
返回数	Z	--
覆盖率	a	mol/mol(摩尔/摩尔)
适应系数	a	—
捕获几率	c	—
层厚度	d	m (米)
热辐射的辐射率	e	—
焓	h	$J \cdot kg^{-1}$ (焦/千克)
玻耳兹曼常数	$k = 1.38054 \times 10^{-23}$	$J \cdot K^{-1}$ (焦/K)
蒸发焓	I_v	$J \cdot kg^{-1}$ (焦/千克)
平均自由程	\bar{l}	m (米)
质量	m	kg (千克)
质量流量	\dot{m}	$kg \cdot s^{-1}$ (千克/秒)
粒子数密度	n	m^{-3} (米 ⁻³)
压强	P	1 Pa = 0.01 mbar
极限压强	P_u	Pa (帕)
最佳情况下达到的	P_e	Pa (帕)
极限压强		
时间	t	s (秒)
热辐射透射率	t_p	—

(续表)

名称	符号	量 度 单 位
吸附能力	v	$P_a \cdot m^3 \cdot kg^{-1}$ (帕·米 ³ /千克)
热速度	\bar{v}	$m \cdot s^{-1}$ (米/秒)
传输几率	w	—
被抽几率	w_p	—
粘附系数	a	—
凝结系数	a_c	—
微晶大小	δ	m (米)
电离真空计的相对灵敏度	Σ	—
粘滞系数	η	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ (千克/米秒)
绝热系数	$\kappa = c_p/c_v$	—
热导率	λ	$w \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (瓦/米·K)
密度	ρ	$kg \cdot m^{-3}$ (千克/米 ³)
司蒂芬-玻尔兹曼常数	$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ (瓦/米 ² ·K ⁴)
滞留时间	τ	s (秒)

· 单位 $P_a \cdot m^3$ 和 $P_a \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ 依照表A·2在20°C气体中应用,按通常习惯“在20°C下”这个提示在多数情况下不予写出。其它单位的换算见表A·1(附A)·2

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 低温技术和真空技术之间的关系	(1)
1.2 低温泵的致冷系统	(2)
1.3 低温泵的工作机理	(3)
1.4 低温泵的类型和性能	(4)
1.5 采用大面积低温泵时容器内的气流	(7)
1.6 几种应用	(8)
第二章 真空中的气流	(10)
2.1 气流范围的划分	(11)
2.2 在装有小表面低温泵的“大”容器中的分子流	(12)
2.2.1 若干真空技术概念	(12)
2.2.2 电离真空计的不同结构	(16)
2.2.3 抽气量 Q , 抽速 S	(20)
2.2.4 Q 和 S 值的测量	(20)
2.2.5 抽气几率 W_p , 可达到的最佳极限压强 P_0	(21)
2.2.6 不同真空部件的流导 C	(23)
2.2.6.1 流导 C 和传输几率 W	(23)
2.2.6.2 不同部件的传输几率 W	(25)
2.2.6.3 挡板的热辐射传输	(27)
2.2.6.4 组合部件	(28)
2.3 在装有大面积低温泵的容器中的分子流	(33)
2.3.1 不等温容器中的粒子流密度 I 、 E 和粒子数密度 n 及 抽速 S 的计算	(33)
2.3.2 容器(气源)包围的屏蔽低温泵	(38)

2.3.3	气源被包围在中间的屏蔽低温泵	(39)
2.3.4	屏蔽低温泵结构的捕获几率 c	(40)
2.3.5	返回数 Z	(46)
2.4	连续流	(46)
2.4.1	连续流的判据	(46)
2.4.2	通过膜孔和短管的气流, 高压强下的低温泵	(47)
2.4.3	长管中的气流	(49)
2.4.4	整个真空范围内的 Q 、 P 曲线图	(51)
第三章	单一类型气体的冷凝	(53)
3.1	凝结系数 α_c 和蒸发系数 α_v	(53)
3.2	测量方法	(54)
3.2.1	基于抽速的方法	(54)
3.2.2	测重法	(58)
3.2.3	分子束法	(59)
3.3	固态气体冷凝物的蒸气压	(61)
3.4	气体的凝结系数 α_c	(63)
3.4.1	α_c 与过饱和值 P/P_c 和冷凝面温度 T_k 的关系	(63)
3.4.2	在高饱和值 P/P_c 时, α_c 与气体温度 T_k 的关系	(65)
3.4.3	α_c 与冷凝物层厚的关系	(68)
3.4.4	在异种衬底上的冷凝	(69)
3.5	气体冷凝的机理	(70)
3.6	冷凝物的结构和其它物理性能	(72)
3.6.1	微晶粒尺寸	(73)
3.6.2	生长速度、外观和密度	(75)
3.6.3	热导率	(78)
3.6.4	热辐射率 ϵ_k	(79)
第四章	气体冷凝物上的低温吸附	(83)
4.1	吸附特性曲线的测定	(84)
4.1.1	吸附等量线	(84)

4.1.2	吸附等温线	(86)
4.1.3	抽速 S	(88)
4.2	气体冷凝物上氢、氢和氦的吸附平衡	(89)
4.2.1	平衡的建立	(89)
4.2.2	吸附焓 ΔH_1 和平衡压强常数 B_1	(90)
4.2.3	根据 DRK 法进行表面测定	(92)
4.2.4	吸附特性与冷凝条件的关系	(95)
4.3	吸附冷凝层的动力学特性	(97)
4.3.1	抽速 S 和粘附系数 α	(97)
4.3.2	超高真空技术中吸附冷凝层的应用	(101)
第五章	多孔固体上的低温吸附	(103)
5.1	固体吸附剂	(103)
5.2	吸附等温线	(105)
5.3	吸附剂的其它特性	(107)
5.4	用于从大气压直到 0.1 帕区间的低温吸附泵	(108)
5.5	用于压强小于 0.1 帕的低温吸附板	(112)
5.6	高真空和超高真空下的抽速	(112)
5.7	动态吸附容量 V_0	(114)
第六章	混合气体的冷凝和低温捕集	(115)
6.1	混合冷凝物的平衡特性	(116)
6.1.1	蒸气压曲线	(116)
6.1.2	部分靠吸附、部分靠掺合对非可凝气体的束缚	(119)
6.1.3	混合冷凝机理	(119)
6.2	捕集过程的抽速	(121)
6.3	捕集过程的其它特征	(123)
第七章	金属薄膜低温吸气和 80 K 钛升华泵	(126)
7.1	粘附系数 α , 表面容量 γ , 抽气容量 ν	(127)
7.2	抽速 $S = S(P)$	(130)
7.3	极限压强 P_0 和起始压强 P_{s1}	(131)

7.4	抽气机理	(132)
7.5	80 K 钛升华泵的工艺	(133)
7.6	80 K 钛升华泵的实用结构	(134)
第八章	低温泵的计算	(136)
8.1	极限压强	(136)
8.1.1	最佳情况下低温冷凝泵可达到的极限压强 P_0 ，难凝气体问题	(136)
8.1.2	低温吸附泵的极限压强	(139)
8.1.3	影响和改善极限压强的因素	(140)
8.2	低温面的热负荷	(140)
8.2.1	热辐射	(141)
8.2.2	固体的热传导	(141)
8.2.3	冷凝功率	(142)
8.2.4	吸附功率	(143)
8.2.5	气体中的热传导	(143)
8.3	贮槽式低温泵的热负荷和致冷剂耗量	(144)
8.3.1	$T_k = 4.2\text{K}$ 的贮槽式低温泵	(144)
8.3.2	$T_k < 4.2\text{K}$ 的贮槽式低温泵	(146)
8.4	低压下($P < 10^{-4}$ 帕)各种结构的致冷功率与抽速比 Q/S	(147)
8.5	致冷机低温泵的致冷功率	(150)
8.6	在致冷机低温泵整个工作范围内的抽速 $S(P)$	(152)
8.7	最大冷凝厚度 d_{\max}	(154)
8.8	工作寿命 t_{\max} 和抽气容量 \bar{Q}	(156)
8.9	起始压强 P_{s1}	(157)
第九章	低温泵的实际结构	(160)
9.1	贮槽式低温泵	(160)
9.1.1	贮槽式冷凝低温泵	(160)
9.1.2	在极低压强使用的长寿命贮槽式低温泵	(161)

9.1.3	带分子筛吸附级的贮槽式低温泵	(165)
9.1.4	带氦冷凝物吸附级的贮槽式低温泵	(166)
9.2	按蒸发器原理工作的低温泵	(167)
9.2.1	在2.5至293K之间连续冷却的低温冷凝器	(167)
9.2.2	蒸发和冷气致冷	(169)
9.2.3	致冷剂消耗量	(171)
9.2.4	致冷剂回路的真空要求	(172)
9.2.5	蒸发器式低温泵	(173)
9.3	致冷机低温泵	(175)
9.3.1	吉福德-麦克马洪(Gifford-McMahon) 循环和致冷机	(176)
9.3.2	采用吉福德-麦克马洪致冷机的低温泵	(179)
9.3.3	斯特林(Stirling)循环和致冷机	(183)
9.3.4	采用斯特林-菲利普致冷机的低温泵	(186)
9.3.5	布雷顿(Brayton)循环和致冷机	(189)
9.3.6	采用布雷顿致冷机的低温泵	(193)
9.3.7	克劳德(Claude)循环	(195)
9.3.8	采用克劳德循环的氮致冷机/液化器	(199)
9.3.9	具有喷射级的氮致冷机/液化器	(200)
9.3.10	在 $T = 4.2\text{K}$ 和更低温度下采用氮致冷机的低温泵 ...	(201)
9.3.10.1	在 4.2K 下贮槽式致冷和根据蒸发器原理致冷...	(201)
9.3.10.2	在 $T < 4.2\text{K}$ 下贮槽式致冷	(203)
9.3.10.3	在超临界压强下用氮流冷却低温板	(204)
9.4	致冷装置的部件	(207)
9.4.1	活塞膨胀机	(207)
9.4.2	透平式膨胀机	(209)
9.4.3	压缩机	(210)
9.4.4	低温箱	(210)
9.5	用于低温泵和致冷装置的测量设备	(211)

9.5.1	低温测量	(211)
9.5.2	压强测量	(219)
9.5.3	液体致冷剂的液面高度测量	(219)
9.5.4	气体流量的测量	(220)
9.6	液体致冷剂的贮存容器	(220)
9.6.1	绝热	(220)
9.6.2	液氮贮存容器	(222)
9.6.3	液氦贮存容器	(223)
9.7	致冷剂输送系统	(224)
9.7.1	输送管、接头和密封	(224)
9.7.2	低温液体充注系统	(226)
9.7.3	自动加注装置	(227)
9.7.4	氦的回收	(231)
9.8	低温面的冷却和再加热	(231)
9.9	致冷装置的功率消耗	(235)
9.10	经济效益考察	(237)
第十章	低温真空技术的应用	(239)
10.1	宇宙空间研究	(239)
10.1.1	宇宙空间的环境条件	(239)
10.1.2	宇宙空间研究用的实验室设备	(240)
10.1.3	宇宙空间冷背景的模拟	(241)
10.1.4	一个热壁的例子	(242)
10.1.5	用液氮使冷壁冷却到80至100K的系统	(244)
10.1.5.1	液氮蒸发器系统	(245)
10.1.5.2	开放式液氮过压系统	(245)
10.1.5.3	封闭式液氮过压系统	(246)
10.1.6	采用气氮的热壁调温系统	(247)
10.1.6.1	具有液氮槽式冷却器的调温系统	(247)
10.1.6.2	采用液氮注入式冷却器的调温系统	(248)

10.1.7	模拟宇宙空间的真空	(249)
10.2	粒子束系统	(259)
10.2.1	对真空系统的要求	(259)
10.2.2	粒子加速器和贮存环	(260)
10.2.3	等离子体风洞	(263)
10.2.4	电子显微镜和电子衍射	(263)
10.2.5	质谱计	(266)
10.2.6	原子束和分子束	(267)
10.3	等离子体物理和热核聚变	(268)
10.3.1	等离子体容器的器壁问题和真空问题	(268)
10.3.2	对真空系统的要求	(270)
10.3.3	欧联环 (JET) 的真空系统	(271)
10.3.4	抽除氖、氦、氩的低温泵	(274)
10.4	薄膜和微电子学	(275)
10.4.1	薄膜制造方法	(275)
10.4.2	对真空系统的要求	(275)
10.4.3	采用低温泵的镀膜装置	(276)
10.4.4	薄膜生产中的成果	(279)
10.4.5	装料过程中的经验	(281)
10.4.6	对真空工艺流程的若干结论	(283)
10.5	其它各种应用	(284)
10.5.1	红外望远镜用的氦 II 冷却系统	(284)
10.5.2	根据动态膨胀法校准真空计和质谱计	(287)
10.5.3	界面现象、表面分析	(288)
10.5.4	极低温的获得	(289)
10.5.5	同位素技术	(289)
10.5.6	化学工艺流程	(289)
10.5.7	冷冻干燥	(290)
10.5.8	涡轮分子泵和溅射离子泵的低温型号	(290)

10.5.9 低温能源技术	(290)
10.5.10 真空冶金	(291)
10.5.11 极低压强的获得	(29J)
附录	(294)
单位换算, 致冷剂的物理特性, 真空中各种材料的出气, 测温法 和热传导	(294)
参考文献	(319)