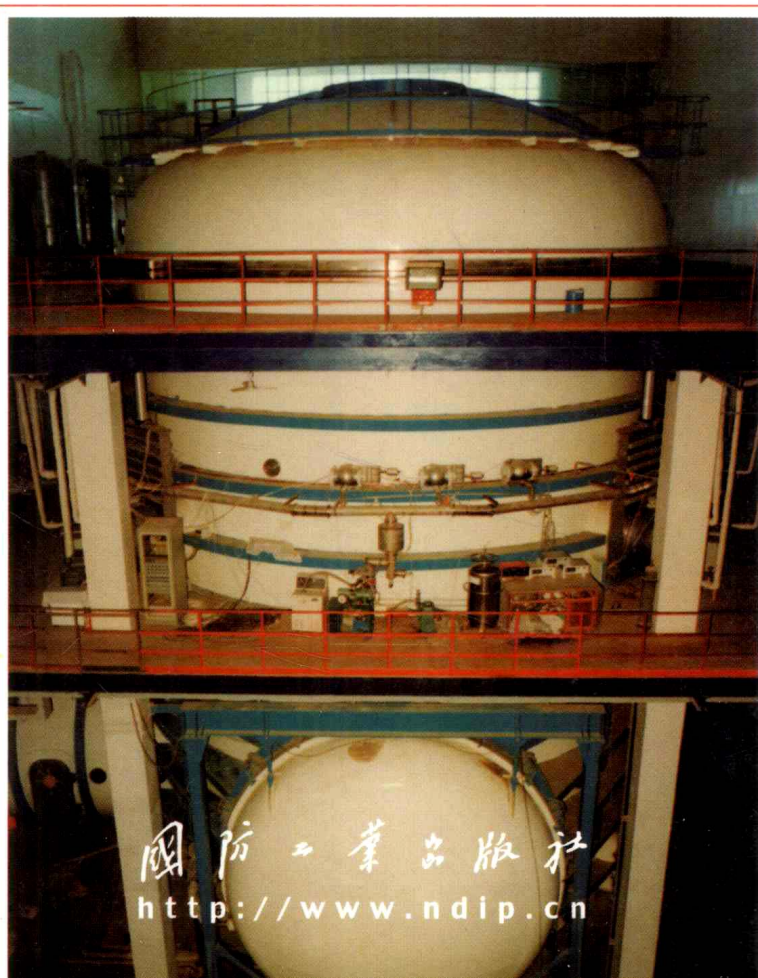


空间真空环境与真空技术

Space Vacuum Environment & Vacuum Technology

黄本诚 陈金明 著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

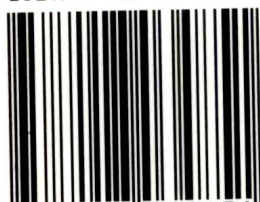


责任编辑：王祖珮
封面设计：彭建华



Space Vacuum Environment & Vacuum Technology

ISBN 7-118-03485-1



9 787118 034851 >

ISBN 7-118-03485-1/V·241
定价：69.00 元

空间真空环境与真空技术

Space Vacuum Environment & Vacuum Technology

黄本诚 陈金明 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间真空环境与真空技术/黄本诚, 陈金明著. —北京: 国防工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-118-03485-1

I. 空... II. ①黄... ②陈... III. 真空舱—环境模拟—真空技术 IV. V444. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 043953 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 插页 2 380 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 69.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的

IV

效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

**国防科技图书出版基金
第四届评审委员会组成人员**

名誉主任委员	陈达植				
顾问	黄 宁				
主任委员	刘成海				
副主任委员	王 峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	彭华良	蔡 镛			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生	
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同	
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇	
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜		

前 言

航天器在太空运行轨道的真空度范围为 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \sim 1 \times 10^{-11} \text{ Pa}$, 航天器及其暴露在外层空间的组件、涂层和材料等, 都要满足高真空与极高真空的要求, 并要求在模拟空间环境的地面试验设备中做各种检验试验。这些试验包括真空环境试验和真空组合环境试验。宇宙空间的基本环境是真空环境; 真空组合环境包括太阳辐射环境、冷黑与真空环境的组合环境(即热真空环境)、真空紫外辐射环境、真空电子辐射环境、真空原子氧环境、真空等离子体环境和真空微流星环境等。模拟空间真空环境的真空技术的特点是:

①应具有清洁、无油和无污染的真空环境;

②真空容器与真空获得系统的体积庞大, 大型应用卫星与载人航天器的真空热试验用真空容器直径达 10m 以上, 真空容器设计与制造工艺有特殊的关键技术;

③有特殊要求的真空测量技术、真空下的摄像监视技术、污染测量技术;

④有特殊要求的真空检漏技术、残余气体分析技术等。

本书共分 6 章。第 1 章为概论, 论述空间真空环境与真空环境效应; 第 2 章为大型真空容器的设计, 介绍真空容器的结构设计与有限元分析; 第 3 章介绍大型真空容器的制造工艺, 包括大型法兰、大开孔补强、大型封头等的制造工艺; 第 4 章为大型空间环境试验设备真空获得技术, 分别介绍低真空系统、高真空系统、有油系统和无油系统, 并介绍外接式低温泵、内装式深冷泵、再生系统和检漏系统的设计; 第 5 章为真空检测技术, 介绍大型真空容器及大型热沉的检漏、真空测量技术和真空下的摄像、监视技术等; 第 6 章介绍国外大型空间环境试验设备的真空技术。

本书是作者从事空间环境模拟技术与真空技术工作 40 多年实践经验的总结。我国尚未正式出版过这方面的书籍。

本书第 3 章中的很多工艺资料是根据哈尔滨工业大学田锡唐教授、王仲仁教授、王尔德教授和吴明根研究员及核工业 23 公司的专家们所编写的工艺论证报告及相关博士论文内容编写的, 在此表示感谢。

本书可供从事航天器设计、空间环境模拟技术和真空技术的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业本科生和研究生的参考用书与教学用书。

由于作者水平有限,书中错误与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

黄本诚
陈金明

目 录

第 1 章 空间真空环境与真空环境效应	1
1.1 空间真空环境	1
1.2 真空环境效应	3
1.2.1 压力差效应	3
1.2.2 真空放电效应	3
1.2.3 真空出气效应	4
1.2.4 真空环境下的分子污染效应	4
1.2.5 材料蒸发升华和分解效应	4
1.2.6 黏着和冷焊效应	5
1.2.7 真空环境下的热辐射效应	5
1.2.8 真空环境下的紫外辐照效应	5
1.2.9 真空环境下的原子氧环境效应	5
1.2.10 真空环境下的碎片环境效应.....	6
1.2.11 真空环境大气密度的阻力效应.....	6
1.2.12 真空环境下的微重力效应.....	6
1.2.13 生物的真​​空效应.....	6
1.2.14 真空环境下泄漏的影响.....	7
1.2.15 真空环境下的高能粒子辐照效应.....	7
1.2.16 真空环境下的等离子体辐照效应.....	8
1.3 真空环境模拟技术	8
1.3.1 真空环境模拟	8
1.3.2 真空容器	8
1.3.3 真空获得技术	9
1.4 真空检测技术.....	10
1.4.1 真空度测量技术.....	10
1.4.2 空间环境气体质谱分析技术.....	12
1.4.3 空间真空检漏技术.....	13
1.5 空间真空环境润滑技术.....	14
1.5.1 空间真空环境下的液体润滑技术.....	14

1.5.2	空间真空环境下的固体润滑技术	14
1.6	空间真空环境污染检测技术	15
1.7	空间真空环境与真空技术研究的展望	16
1.7.1	极高真空分子屏研究	16
1.7.2	空间真空检测技术的研究	16
1.7.3	研究具有抽除较大惰性气体成分的大型低温泵技术	16
1.7.4	姿态发动机羽流试验中的真空测试技术的研究	16
第2章	大型真空容器设计	17
2.1	概述	17
2.2	真空容器的结构与设计要求	18
2.2.1	真空容器的结构形式	18
2.2.2	真空容器设计基本原则	19
2.2.3	真空容器设计要求	20
2.3	真空容器壳体	22
2.3.1	真空容器稳定性计算	22
2.3.2	利用图算法确定真空容器的壁厚	26
2.3.3	加强圈的设计	29
2.4	开孔补强	30
2.4.1	开孔应力集中计算	30
2.4.2	开孔补强的结构形式及计算	32
2.4.3	多开孔补强	36
2.4.4	大开孔补强	36
2.5	真空容器的大门与封头设计	38
2.5.1	概述	38
2.5.2	封头的设计	39
2.5.3	框架式门结构设计	40
2.5.4	双转臂支撑回转大门结构设计	42
2.5.5	平移式门结构设计	44
2.6	真空容器的法兰设计	47
2.6.1	法兰的结构形式	47
2.6.2	整体法兰应力分析	47
2.6.3	整体法兰强度校核计算	51
2.6.4	大型法兰结构尺寸设计	55
2.6.5	法兰密封预紧力及气动夹具设计计算	56

2.7	支座设计	58
2.7.1	鞍座设计计算	58
2.7.2	立式支座设计计算	64
2.8	大型真空容器设计中有限元计算的应用	67
2.8.1	概述	67
2.8.2	利用有限元方法对 KM6 真空容器进行强度分析	68
2.8.3	利用有限元方法对 KM6 主、辅真空容器进行屈曲分析	70
2.8.4	利用有限元方法优化 KM6 副容器隔板结构	72
2.9	中国几台典型大型真空容器设计	76
2.9.1	KM6 真空容器设计	76
2.9.2	KM1, KM2, KM3 真空容器设计	90
2.9.3	KM5, KM4 真空容器设计	92
第3章	大型真空容器的制造工艺	94
3.1	大型真空容器的制造流程	94
3.1.1	概述	94
3.1.2	真空容器制造质量管理体系	94
3.1.3	大型真空容器制造的质量保证体系	95
3.1.4	真空容器的制造安装流程	96
3.2	真空容器筒体制造工艺	98
3.2.1	真空容器预制阶段施工工艺	98
3.2.2	真空容器的安装工艺	102
3.2.3	真空容器焊接工艺	110
3.3	法兰制造工艺	113
3.3.1	法兰制造工艺过程	113
3.3.2	法兰毛坯锻造与弯曲工艺	113
3.3.3	大型法兰组装与焊接工艺	115
3.3.4	法兰消除应力热处理及振动时效工艺	120
3.3.5	大型法兰的粗加工和半精加工工艺流程	121
3.3.6	大型法兰现场精加工	122
3.4	大型真空容器开孔补强与对接焊接工艺	130
3.4.1	概述	130
3.4.2	容器相贯焊缝焊接变形研究	130
3.4.3	容器相贯焊缝实际施焊工艺流程	134
3.4.4	直径 6.5m 侧大门与主容器相贯焊接工艺	135

3.5 门与封头制造工艺	138
3.5.1 封头制造工艺	138
3.5.2 封头大门的制造工艺	146
3.5.3 方舱门的制造工艺	147
第4章 大型空间环境试验设备真空获得技术	152
4.1 概述	152
4.2 预抽真空系统的设计	152
4.2.1 小型空间环境试验设备预抽真空系统的设计	152
4.2.2 中型空间环境试验设备预抽真空系统的设计	155
4.2.3 大型空间环境试验设备预抽真空系统的设计	157
4.2.4 采用直排大气罗茨泵预抽真空系统的设计	157
4.3 高真空系统设计	161
4.3.1 高真空抽气的气体负荷	161
4.3.2 高真空系统的方案选择	162
4.3.3 高真空系统设计中注意事项	163
4.4 油扩散泵系统的真空获得技术	164
4.4.1 油扩散泵系统的设计计算	164
4.4.2 中国 KM4 设备油扩散泵系统的设计计算	168
4.4.3 中国大型空间环境试验设备有油真空系统调试 结果分析	172
4.5 无油真空抽气泵	179
4.5.1 涡轮分子泵	179
4.5.2 无油机械真空泵	180
4.5.3 钛泵	180
4.5.4 内装式深冷泵	182
4.5.5 外接式低温泵	196
4.6 无油真空获得技术	204
4.6.1 无油真空系统的设计计算	204
4.6.2 中国空间环境试验设备无油真空系统的设计	205
第5章 真空检测技术	216
5.1 真空污染检测技术	216
5.1.1 航天器材料在真空下放气特性的检测技术	216
5.1.2 航天器敏感部件在轨真空实时污染检测技术	220
5.1.3 航天器真空下污染检测、防护与控制技术	221

5.2	真空检漏技术	224
5.2.1	真空检漏的漏率的设计	224
5.2.2	真空检漏方法	225
5.2.3	大型真空容器的真空检漏技术	228
5.2.4	热沉的真空检漏技术	232
5.2.5	总体检漏真空系统的设计	235
5.3	大型真空容器的外形结构与应力测量技术	237
5.3.1	大型真空容器外形结构尺寸测量技术	237
5.3.2	KM6 辅助真空容器进光孔离轴角和法兰垂直度 的测量技术	241
5.3.3	真空容器应变测量技术	244
5.4	低温泵抽速测量技术	246
5.4.1	大型深冷泵的抽速测量原理	247
5.4.2	KM4 设备内装式深冷泵的抽速测量技术	247
5.4.3	KM3 设备内装式深冷泵的抽速测量技术	253
5.4.4	外接式低温泵的抽速测量技术	259
5.5	分压力测量与气体分析	260
5.5.1	概述	260
5.5.2	“神舟”一号飞船在 KM6 空间环境试验设备试验时的 残余气体质谱分析	263
5.5.3	KM4 设备做返回式卫星真空热试验时的残余 气体质谱分析	266
5.5.4	KM5 设备做气象卫星真空热试验时的残余 气体质谱分析	267
第 6 章	国外大型空间环境试验设备的真空技术	269
6.1	概述	269
6.2	美国大型空间环境试验设备的真空技术	271
6.2.1	真空容器设计	271
6.2.2	真空获得技术	279
6.3	日本大型空间环境试验设备的真空技术	282
6.3.1	真空容器	282
6.3.2	真空获得技术	291
6.4	欧洲大型空间环境试验设备的真空技术	297
6.4.1	真空容器设计	297

6.4.2 真空获得技术	303
6.5 俄罗斯大型空间环境试验设备的真空技术	304
6.5.1 直径 17.5m 空间环境试验设备的真空技术	304
6.5.2 直径 8m 空间环境试验设备的真空技术	304
6.6 印度大型空间环境试验设备的真空技术	305
6.6.1 真空容器	305
6.6.2 真空获得技术	305
参考文献.....	307

Contents

Chapter 1	Space Vacuum Environment and Vacuum Environment Effect	1
1.1	Space Vacuum Environment	1
1.2	Vacuum Environment Effect	3
1.2.1	Pressure Difference Effect	3
1.2.2	Vacuum Discharge Effect	3
1.2.3	Vacuum Outgassing Effect	4
1.2.4	Molecular Contamination Effect in Vacuum Environment	4
1.2.5	Evaporation Sublimation and Decomposition Effect of Material	4
1.2.6	Adhesion and Cool Welding Effect	5
1.2.7	Thermal Radiation Effect in Vacuum Environment	5
1.2.8	Ultraviolet Radiation Effect in Vacuum Environment	5
1.2.9	Atomic Oxygen Effect in Vacuum Environment	5
1.2.10	Space Debris Effect in Vacuum Environment	6
1.2.11	Resistance Effect of Gas Density in Vacuum Environment	6
1.2.12	Micro-Gravity Effect in Vacuum Environment	6
1.2.13	Vacuum Effect of Biology	6
1.2.14	Leak Effect in Vacuum Environment	7
1.2.15	High Energy Particle Radiation Effect in Vacuum Environment	7
1.2.16	Plasma Radiation Effect in Vacuum Environment	8
1.3	Vacuum Environment Simulation	8
1.3.1	Vacuum Environment Simulation	8
1.3.2	Vacuum Chamber	8
1.3.3	Vacuum Acquisition Technology	9
1.4	Vacuum Detection and Measurement Technology	10
1.4.1	Measurement Technology of Vacuum	10

1. 4. 2	Mass Spectrometric Analysis Technology of Gas in Space Environment	12
1. 4. 3	Leakage Detecting Technology of Space Vacuum	13
1. 5	Vacuum Lubrication Technology in Space Environment	14
1. 5. 1	Liquid Lubrication Technology in Space Vacuum Environment	14
1. 5. 2	Solid Lubrication Technology in Space Vacuum Environment	14
1. 6	Contamination Detection and Measurement Technology in Space Vacuum Environment	15
1. 7	Recent Development of Space Vacuum Environment and Vacuum Technology	16
1. 7. 1	Molecular Screen Research in Sky-High Vacuum	16
1. 7. 2	Research on Space Vacuum Detection and Measurement Technology	16
1. 7. 3	Research on Large-Scale Cryopump Technology for Pumping Significant Quantities of Inert Gases	16
1. 7. 4	Vacuum Measuring Technology Research in Plumes Test of Spacecraft Attitude Control Thruster	16
Chapter 2	Large Vacuum Chamber Design	17
2. 1	Introduction	17
2. 2	Structure and Design Criteria of Vacuum Chamber	18
2. 2. 1	Structure of Vacuum Chamber	18
2. 2. 2	Design Guide Line of Vacuum Chamber	19
2. 2. 3	Design Criteria of Vacuum Chamber	20
2. 3	Vessel of Vacuum Chamber	22
2. 3. 1	Stability Calculation of Vessel	22
2. 3. 2	Shell Thickness Design Computation of Vessel by Image Method	26
2. 3. 3	Design of Ring Stiffeners	29
2. 4	Reinforcement of Openings	30
2. 4. 1	Stress Concentration at the Shell Openings	30
2. 4. 2	Attachment Structure Design and Calculation of Openings	32