



航空制造工程手册

《航空制造工程手册》总编委会 主编

· 弹性元件工艺 ·

航空工业出版社



航空制造工程手册

弹性元件工艺

《航空制造工程手册》总编委会 主编

航空工业出版社

1994

(京)新登字 161 号

内 容 提 要

本书是《航空制造工程手册》的一个分册。书中总结了航空工业系统在弹性元件制造方面的实践经验和科研成果,重点介绍了有关的新元件、新工艺和新技术。全书分为 10 章,包括总论,弹性元件用材料,弹性元件的热处理、表面处理及焊接,螺旋弹簧,碟形弹簧,平面涡卷弹簧,膜片、膜盒,波纹管,弹簧管和谐振弹性元件等内容。

本书各章均以公式、图表及结论性文字进行表述,数据、资料丰富,实用性强,对科研、生产有指导意义。

弹性元件的性能对制造工艺的依赖性很大,在制造过程中还要修改设计参数以满足技术要求,因此本分册以“工艺为主,结合设计”的方式编写,这种做法在同类图书中尚属首次。

本书是弹性元件制造和设计人员的参考工具书,主要供从事航空制造工程的科技人员使用,也可供航空院校师生及从事一般机械制造工作的科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

航空制造工程手册:弹性元件工艺 / 《航空制造工程手册》总编委会主编;金慧根分主编。—北京:航空工业出版社,1994. 12

ISBN 7-80046-869-0

I. 弹… I. 金… III. ①航空器-制造-工艺-手册②弹性元件-工艺-手册 IV. V26—62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 11487 号

责任编辑 沈慧晨

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1994 年 12 月第 1 版

1994 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 28.5 字数: 716 千字

印数: 1—800

定价: 50.00 元

序

我国航空工业已走过了四十余年的历程,从飞机的修理、仿制到自行研制,航空制造工程得到很大的发展。在航空高科技产业的大系统中,航空制造工程是重要的组成部分之一。航空工业,就其行业性来讲,属于制造业范畴。航空制造工程的技术状况,是衡量一个国家科学技术发展综合水平的重要标志。航空制造工程的发展水平,对飞机的可靠性和使用寿命的提高、综合技术性能的改善、研制和生产成本的降低、甚至总体设计思想能否得到具体实现等均起着决定性作用。

航空制造工程已成为市场竞争的重要基础,要发展航空工业、并有效地占领市场,不仅要不断地更新设计,开发新产品,更重要的是要具备一个现代化的航空制造工程系统。在发达国家中,均优先发展航空制造工程,很多新工艺、新材料、新设备、新技术都是在航空制造工程中领先使用的,因此必须从战略高度予以重视,并采取实际而有效的措施加速它的发展。编写《航空制造工程手册》,就是为实现航空制造工程现代化的战略目标,在制造工程领域进行的基础性工作。

四十年来,我国航空工业积累了大量经验,取得了丰硕的成果,特别是改革开放以来,开扩了视野并有可能汲取更多的新科技信息。但是如何将这容量浩繁、层次复杂、学科众多的科学技术和经验汇集起来,使之成为我国航空工业、乃至国家的珍贵财富,是一项具有重大实用价值和长远意义的任务,为此航空航天部决定组织全行业的力量,统一计划、统一部署完成这项极其复杂的规模巨大的系统工程。大家本着继往开来的历史责任感和紧迫感,从1989年开始组织航空工业全行业制造工程方面造诣至深的专家、教授、学者,经过几年的努力陆续编写出版了这套基本覆盖航空制造工程各专业各学科的包括三十二个分册、几千万字的《航空制造

工程手册》。

编好这套手册是一项十分艰巨的工作。大家始终坚持求实、求新、求精、求是的原则,在确保鲜明航空特色的前提下,在总体内容上强调实用性、综合性、成套性;在表达形式上,以技术数据、图形表格、曲线公式为主;阐述扼要,结论严谨,力求使手册成为一部概念准确、数据可靠、文字简洁、编排合理、查阅方便,能为广大从事航空制造工程的科技人员提供有益指导和参考的工具书。

首次组织编纂大型手册,缺乏经验,还由于过去资料积累基础比较薄弱,新技术发展迅速和深度广度不断增加,使这项工作带有相当程度的探索性,因之错误与不足之处实为难免,恳切希望广大读者给予指正。对在这套手册编写过程中给予支持的单位和付出辛勤劳动,提供资料,参与编写,评审,出版的同志们表示衷心感谢。由于我国航空制造工程与世界水平尚存在较大差距,这套手册出版之后,还有不断求新、完善的必要,《航空制造工程手册》总编委会及其办公室是常设机构,将努力收集新的科技信息及这套工具书使用的情况和意见,为今后的修订提供依据,以求进一步完善和提高。

何文治

1992年8月28日

《航空制造工程手册》

各分册名称

- | | |
|-------------|---------------|
| 《通用基础》 | 《非金属结构件工艺》 |
| 《热处理》 | 《飞机结构工艺性指南》 |
| 《特种加工》 | 《发动机机械加工》 |
| 《表面处理》 | 《发动机装配与试车》 |
| 《焊接》 | 《发动机叶片工艺》 |
| 《特种铸造》 | 《燃油泵与调节器装配试验》 |
| 《金属材料切削加工》 | 《弹性元件工艺》 |
| 《齿轮工艺》 | 《电连接器工艺》 |
| 《工艺检测》 | 《机载设备精密加工》 |
| 《计算机辅助制造工程》 | 《光学元件工艺》 |
| 《飞机钣金工艺》 | 《框架壳体工艺》 |
| 《飞机机械加工》 | 《武器系统装配》 |
| 《飞机装配》 | 《电机电器工艺》 |
| 《飞机工艺装备》 | 《救生装备工艺》 |
| 《飞机模线样板》 | 《电子设备装配》 |
| 《金属结构件胶接》 | 《机载设备环境试验》 |

《航空制造工程手册》

总编委会、顾问及办公室组成名单

总编委会主任 何文治

总编委会副主任(按姓氏笔划排列)

马业广	王云机	王敬堂	方裕成	刘多朴
朱伯贤	任家耕	李成功	李哲浩	李章由
吴复兴	易志斌	郑作棣	杨彭基	张 彤
张士元	张钟林	周家骐	周砥中	周晓青
金德琨	姚克佩	顾元杰	徐秉铨	徐培麟
郭景山	程宝渠	屠德彰		

总编委会常务副主任 马业广

总编委会顾问(按姓氏笔划排列)

马世英	于 欣	于志耕	于剑辉	王英儒
冯 旭	杨 墉	杨光中	陆颂善	枉云汉
罗时大	荣 科	邴少安	董德馨	程华明
廖宗懋	颜鸣皋	戴世然		

总编委会委员(按姓氏笔划排列)

马业广	王广生	王云机	王国成	王喜力
王敬堂	方学龄	方裕成	刘多朴	刘树桓
刘盛东	刘瑞新	关 桥	朱伯贤	孙国壁
任家耕	严世能	何文治	何恽晋	李成功
李秋娥	李哲浩	李章由	李德澄	杜昌年
沈昌治	陈于乐	陈 进	陈积懋	陈德厚
余承业	杨彭基	吴志恩	吴复兴	张 彤
张 夏	张士元	张幼楨	张灵雨	张纯正
张钟林	张增模	周家骐	周砥中	周晓青

易志斌	郑作棣	林更元	林泽宽	林敦仪
金慧根	金德琨	国 岩	赵仲英	胡四新
胡建国	姜淑芳	姚永义	姚克佩	郝命麒
顾元杰	郭景山	晏海瑞	唐荣锡	唐瑞润
徐秉铨	徐培麟	常荣福	戚道纬	崔连信
屠德彰	程宝渠	熊敦礼	戴 鼎	

总编委会常委(按姓氏笔划排列)

马业广	王云机	何恽晋	李成功	李哲浩
吴复兴	郑作棣	周家骐	戚道纬	崔连信
屠德彰	戴 鼎			

总编委会办公室主任

戚道纬

总编委会办公室副主任(按姓氏笔划排列)

刘树桓 姜淑芳 崔连信

总编委会办公室成员(按姓氏笔划排列)

丁立铭	王偌鹏	刘树桓	刘瑞麟	邵 箭
陈 刚	陈振荣	宋占意	张士霖	林 森
段文斌	贺开运	姜淑芳	莫龙生	徐晓风
戚道纬	崔正山	崔连信		

《弹性元件工艺》分编委会组成名单

主 编 金慧根
副主编 (按姓氏笔划排列)
王柏生 刘广玉 罗浪珠
委 员 (按姓氏笔划排列)
王柏生 方健康 田天相 史惠梁 刘广玉
李 鉴 陈 进 杨粉英 张广福 汪恩媛
罗浪珠 金慧根 袁作为

《弹性元件工艺》其他编写和统稿人员名单

编写人员 (按姓氏笔划排列)
尹显镛 肖长庚 辛书贞 陈莉莉 竺梓明
周金保 庞芳仙 胡家驹 徐承祖
统稿人员 (按姓氏笔划排列)
王柏生 刘广玉 罗浪珠 金慧根

《弹性元件工艺》提供资料人员名单

王恩兰 陈 茂 栗宏波 朱 炎 杨 悦

目 录

第 1 章 总论

1.1 概述	1
1.2 工艺对弹性元件性能的影响	3
1.2.1 试验批	3
1.2.2 原材料	3
1.2.3 冷加工	4
1.2.4 热处理	4
1.2.5 焊接	4
1.2.6 表面处理	4
1.2.7 组装工序	4
1.2.8 稳定工序	4
1.2.9 检测	4
1.3 弹性元件的特性	5
1.3.1 弹性特性	5
1.3.2 非弹性特性	6
1.4 弹性元件的温度误差	6

第 2 章 弹性元件用材料

2.1 弹性元件材料的选用	8
2.2 弹性元件材料的分类	9
2.3 弹簧常用钢材	9
2.4 不锈钢	14
2.5 铜合金	16
2.5.1 黄铜、锡青铜和硅青铜	20
2.5.2 铍青铜	22
2.6 精密弹性合金	24
2.6.1 高弹性合金	24
2.6.2 恒弹性合金	29
2.7 其他弹性合金	30
2.8 各国常用弹性材料牌号对照	32
2.9 非金属弹性材料	34

第 3 章 弹性元件的热处理、表面处理及焊接

3.1 弹性元件的热处理	35
3.1.1 弹簧钢弹性元件的热处理	35
3.1.1.1 淬火和回火	35
3.1.1.2 消除应力低温退火	37

3.1.1.3 时效处理	38
3.1.1.4 软化处理	38
3.1.2 铜合金弹性元件的热处理	39
3.1.2.1 黄铜的热处理	39
3.1.2.2 锡青铜的热处理	40
3.1.2.3 铍青铜的热处理	40
3.1.2.4 镍铜合金的热处理	43
3.1.3 不锈钢弹性元件的热处理	43
3.1.3.1 奥氏体不锈钢的热处理	43
3.1.3.2 马氏体不锈钢的热处理	44
3.1.3.3 马氏体时效不锈钢的热处理	44
3.1.4 精密弹性合金弹性元件的热处理	45
3.1.4.1 铁-镍-铬基弥散强化型高弹性合金的热处理	45
3.1.4.2 钴基高弹性合金的热处理	46
3.1.4.3 镍基弥散强化型高弹性合金的热处理	47
3.1.4.4 低碳高镍型超高强度马氏体时效钢的热处理	47
3.1.4.5 铁磁性弥散强化型恒弹性合金的热处理	47
3.1.4.6 其他弹性合金、高温合金和工业纯钛的热处理	49
3.2 弹性元件的表面处理	50
3.2.1 用途	50
3.2.1.1 弹性元件表面处理的用途	50
3.2.1.2 表面处理对弹性元件的影响	50
3.2.1.3 表面处理工艺的图纸标记	50
3.2.2 表面清理和强化	51
3.2.2.1 工艺性污物的清理	51
3.2.2.2 氧化皮的清理	52
3.2.2.3 喷丸	53
3.2.2.4 质量要求和故障排除	54
3.2.3 微量削减尺寸	54
3.2.3.1 典型工艺流程	54
3.2.3.2 化学法去尺寸工艺	55

3.2.3.3 电化学法去尺寸工艺	56	3.3.6.4 真空电子束焊接	85
3.2.3.4 膜片和波纹管的去尺寸处理	57	3.3.6.5 熔焊的质量检验	87
3.2.3.5 弹性元件组合件的表面处理	59	3.3.7 弹性元件的封接	88
3.2.3.6 光亮处理	60	3.3.7.1 软钎料封接	88
3.2.3.7 质量要求和故障排除	60	3.3.7.2 贵金属钎料高温封接	89
3.2.4 电镀和化学镀	60	3.3.7.3 熔焊封接	90
3.2.4.1 工艺目的和镀液类型	61	第4章 螺旋弹簧	
3.2.4.2 工艺配方	61	4.1 用途、类型和特性	92
3.2.4.3 钢弹簧的电镀	62	4.2 材料及许用应力	94
3.2.4.4 质量要求和故障排除	62	4.2.1 材料的选择	94
3.2.5 化学转化膜	62	4.2.2 许用应力	98
3.2.5.1 钢铁氧化	62	4.3 设计计算	98
3.2.5.2 钢铁磷化	63	4.3.1 圆柱螺旋压缩和拉伸弹簧的设 计	98
3.2.5.3 铜合金钝化	63	4.3.1.1 基本结构	98
3.2.5.4 不锈钢钝化	64	4.3.1.2 基本计算公式	101
3.2.5.5 质量要求和故障排除	64	4.3.1.3 强度校核	107
3.2.6 有机涂层	64	4.3.2 圆柱螺旋扭转弹簧的设计	109
3.2.6.1 涂料	64	4.3.2.1 基本结构	109
3.2.6.2 粉末涂覆层	66	4.3.2.2 基本计算公式	111
3.2.7 防锈	66	4.3.3 截锥螺旋弹簧的设计	113
3.2.7.1 工序间防锈	66	4.3.3.1 基本结构	113
3.2.7.2 防锈处理	67	4.3.3.2 计算公式	114
3.2.7.3 储运中防锈	67	4.3.4 典型工作图样	115
3.3 弹性敏感元件焊接工艺	68	4.4 制造工艺	117
3.3.1 对焊接工艺的基本要求	68	4.4.1 工艺特点	118
3.3.2 弹性材料的焊接性	69	4.4.2 工艺技术准备	118
3.3.3 低温钎焊	69	4.4.2.1 工作图样的审核	118
3.3.3.1 钎料与钎剂	69	4.4.2.2 工艺规程的编制	120
3.3.3.2 接头形式	70	4.4.3 绕制	123
3.3.3.3 用电烙铁加热的手工钎焊	71	4.4.3.1 有心绕制	124
3.3.3.4 真空感应钎焊	72	4.4.3.2 无心绕制	130
3.3.3.5 弹簧管组合件的电阻钎焊	73	4.4.4 端部加工	139
3.3.4 高温钎焊	74	4.4.4.1 压缩弹簧的端部加工	139
3.3.4.1 手工火焰钎焊	74	4.4.4.2 拉伸弹簧的端部加工	143
3.3.4.2 膜盒中心杆的电阻钎焊	74	4.4.4.3 扭转弹簧的端部加工	146
3.3.4.3 使用硬钎料的真空高温钎焊	75	4.4.5 热处理	147
3.3.5 电阻焊	76	4.4.5.1 热处理类型	147
3.3.5.1 点焊	77	4.4.5.2 热处理的变形	147
3.3.5.2 凸焊	77	4.4.5.3 常见缺陷及预防	151
3.3.5.3 电阻缝焊	78	4.4.6 表面处理	151
3.3.6 熔焊	80	4.4.7 特殊处理	152
3.3.6.1 接头形式及夹具设计	80	4.4.7.1 立定处理	152
3.3.6.2 小电流钨极氩弧焊	83	4.4.7.2 强压处理	153
3.3.6.3 微束等离子弧焊接	84		

4.4.7.3	加温立定处理	156
4.4.7.4	喷丸处理	158
4.4.7.5	电化学抛光	158
4.5	检查与试验	159
4.5.1	制造精度与允许偏差	159
4.5.2	外观及几何尺寸的检验	164
4.5.2.1	外观检验	164
4.5.2.2	几何尺寸的检验	165
4.5.3	特性检验	167
4.5.3.1	压缩和拉伸弹簧的特性检验	167
4.5.3.2	扭转弹簧的特性检验	168
4.5.4	疲劳试验	170
4.5.5	模拟试验	171
4.6	失效分析	172
4.6.1	失效分析程序	172
4.6.2	断裂失效	172
4.6.3	永久变形	173
4.6.4	典型失效实例	174
第5章 碟形弹簧		
5.1	碟形弹簧的计算	177
5.1.1	碟簧的结构形式	177
5.1.2	A型碟簧计算	177
5.1.3	B型碟簧计算	179
5.1.4	碟簧推荐尺寸系列	181
5.1.5	碟簧特性曲线	183
5.1.6	许用应力	184
5.2	碟形弹簧的制造工艺	185
5.2.1	碟簧制造的特点	185
5.2.2	碟簧的制造工艺流程	186
5.2.3	碟簧的典型制造工艺	186
5.2.3.1	备料	186
5.2.3.2	冲裁	187
5.2.3.3	机械加工	187
5.2.3.4	成形	189
5.2.3.5	支承面加工	190
5.2.3.6	热处理	190
5.2.3.7	喷丸处理	193
5.2.3.8	强压处理	193
5.2.3.9	表面处理	194
5.2.4	碟簧的检验	195
5.2.4.1	外观检验	195
5.2.4.2	尺寸及形位公差检验	195
5.2.4.3	负荷检验	195
5.2.5	碟簧质量故障分析	197

第6章 平面涡卷弹簧

6.1	游丝	198
6.1.1	游丝的设计	198
6.1.2	游丝的制造工艺流程	199
6.1.3	拉丝	200
6.1.3.1	拉伸方法	200
6.1.3.2	拉伸配模	202
6.1.3.3	变形率控制原则	203
6.1.3.4	拉伸用润滑剂	204
6.1.3.5	带材辗压前丝材直径的确定	204
6.1.3.6	拉伸用模具	205
6.1.3.7	线材拉伸设备	206
6.1.3.8	拉丝废品的产生原因及特征	209
6.1.4	辗压	210
6.1.4.1	轧机	210
6.1.4.2	轧制道次及工艺的确定	211
6.1.4.3	厚度测量及控制	212
6.1.4.4	冷轧带材常见缺陷及预防	213
6.1.5	游丝的成形	214
6.1.5.1	盘绕	214
6.1.5.2	淬火(固溶处理)	215
6.1.5.3	定形	215
6.1.5.4	分解与修整	215
6.1.6	稳定化处理	216
6.1.7	游丝的性能测量	216
6.1.7.1	特性测试	216
6.1.7.2	弹性后效测量	219
6.1.7.3	力矩非线性测量	220
6.1.8	游丝及铜座的组合——游丝 连铜座	221
6.1.9	游丝的检验	221
6.1.9.1	外观及几何尺寸检验	221
6.1.9.2	游丝形状检验	222
6.1.9.3	电测及转速仪表用游丝的 无磁性检查	222
6.1.9.4	镀青铜制游丝的脆性检查	222
6.1.9.5	游丝连铜座的装配质量检验	223
6.2	刷握弹簧	224
6.2.1	概述	224
6.2.2	设计与计算	225
6.2.3	选材和许用应力	227
6.2.4	弹簧的制造工艺流程及工艺分析	228
6.2.4.1	制造工艺流程	228

6.2.4.2	工艺分析	228
6.2.5	毛料制造	229
6.2.6	绕制	230
6.2.7	热处理	233
6.2.8	弹性和特性检验	233
6.2.9	强扭处理	235
6.2.10	常见故障的产生原因及解决 办法	236
6.3	发条	237
6.3.1	发条的结构与计算	237
6.3.1.1	发条结构	237
6.3.1.2	发条计算	239
6.3.1.3	发条用材料	240
6.3.2	制造工艺程序	240
6.3.3	材料精制及滚剪	240
6.3.3.1	精拉、精轧	240
6.3.3.2	滚剪	240
6.3.4	热处理	241
6.3.4.1	连续退火	241
6.3.4.2	连续淬回火	242
6.3.5	拉边、磨边	243
6.3.5.1	拉边	243
6.3.5.2	磨边	243
6.3.5.3	拉边、磨边的质量检查	244
6.3.6	抛光、切断、弯钩	245
6.3.6.1	抛光	245
6.3.6.2	切断	245
6.3.6.3	弯钩	247
6.3.7	端头退火、热化及定形	247
6.3.7.1	端头退火、热化	247
6.3.7.2	S形发条的定形处理	247
6.3.8	卷绕	248
6.3.9	检验	249
6.3.9.1	外观及尺寸检查	249
6.3.9.2	力矩测量	249
6.4	恒力弹簧	249
6.4.1	设计与计算	250
6.4.2	材料选择	251
6.4.3	制造工艺流程	251
6.4.4	绕制	251
6.4.5	热处理	252
6.4.6	检验	252
6.4.7	常见故障产生的主要原因及 解决办法	252

第7章 膜片与膜盒

7.1	概述	253
7.1.1	膜片、膜盒的分类	253
7.1.2	膜片、膜盒的用途	253
7.1.3	膜片、膜盒的选用原则	253
7.1.4	膜片、膜盒的典型结构及尺寸 标注	254
7.1.5	膜片、膜盒的特性要求	256
7.1.6	集中力与有效面积	257
7.2	膜片型面的设计及特性计算	257
7.2.1	平膜片的设计计算	257
7.2.1.1	平膜片简介	257
7.2.1.2	平膜片“压力-位移”特性 计算	258
7.2.1.3	平膜片有效面积计算	259
7.2.1.4	凸形膜片及其跳跃特性	259
7.2.1.5	方形膜片	260
7.2.2	波纹膜片的设计计算	261
7.2.2.1	波纹膜片的特点	261
7.2.2.2	膜片型面参数对“压力-位移” 特性的影响	261
7.2.2.3	波纹膜片弹性特性曲线的近似 计算公式	265
7.2.2.4	几种典型波纹型面的近似 计算	267
7.2.2.5	压力与位移呈线性的膜片 型面设计计算	270
7.2.2.6	非线性特性膜片型面选择与 计算	271
7.2.2.7	按给定特性曲线设计波纹 膜片型面	272
7.2.2.8	试验法设计波纹膜片型面	273
7.2.2.9	波纹膜片有效面积计算	275
7.2.2.10	波纹膜片的过载保护	276
7.2.2.11	设计膜片型面的一般原则	277
7.2.2.12	部分典型膜片型面及其特性 曲线图例	278
7.3	金属膜片、膜盒制造工艺	287
7.3.1	几点说明	287
7.3.2	金属膜片、膜盒的典型工艺 流程	288
7.3.2.1	基本规定	288
7.3.2.2	膜片、膜盒的典型工艺流程	288
7.3.3	金属膜片、膜盒加工的主要	

工序	292	8.3.4.1 整形	358
7.3.3.1 条料精轧(辗压)	292	8.3.4.2 稳定	358
7.3.3.2 膜片成形	295	8.3.5 性能检测	359
7.3.3.3 膜片热处理时效夹具	303	8.3.5.1 气密性检查及设备	359
7.3.3.4 气密性检查	305	8.3.5.2 刚度测量及其仪器	360
7.3.3.5 稳定处理	308	8.3.5.3 有效面积的测试及设备	361
7.3.3.6 性能检测	310	8.3.5.4 残余变形百分率的测定	362
第8章 波纹管及其组件		8.3.5.5 安全压力的测定及设备	362
8.1 概述	317	8.3.5.6 工作寿命、疲劳强度的试验及 设备	363
8.1.1 结构参数	317	8.4 波纹管组件的制造工艺	363
8.1.2 主要类型及特点	317	8.4.1 压力波纹管组件制造工艺	364
8.1.3 波形	319	8.4.1.1 典型工艺流程	364
8.1.4 多层波纹管	320	8.4.1.2 典型工艺流程的主要控制 要求	364
8.1.5 常用材料及选材原则	320	8.4.2 真空波纹管组件制造工艺	364
8.1.6 波纹管在航空器中的应用	321	8.4.2.1 典型工艺流程	364
8.2 波纹管的结构参数、特性参数及 计算	322	8.4.2.2 典型工艺流程的主要控制 要求	365
8.2.1 结构参数	322	8.4.3 充液、充气波纹管组件制造 工艺	366
8.2.2 特性参数	323	8.4.4 组合焊接	366
8.2.3 设计计算	324	8.4.5 气密性检查	366
8.2.3.1 内容和要求	324	8.4.6 稳定处理及设备	366
8.2.3.2 弹性特性、安全位移及残余 变形	324	8.4.7 工质的充灌	367
8.2.3.3 刚度和工作应力	326	8.4.7.1 工质	367
8.2.3.4 有效面积	329	8.4.7.2 充灌工艺控制及设备	368
8.2.3.5 耐压强度、安全压力和工作 压力	330	8.4.8 性能检测	369
8.2.3.6 疲劳强度、工作寿命和可靠 性	331	8.5 焊接波纹管	370
8.3 波纹管的制造工艺	334	8.5.1 基本类型	370
8.3.1 无缝单层波纹管的典型工艺 流程	334	8.5.2 基本性能	370
8.3.2 管坯制造	335	8.5.3 优点	371
8.3.2.1 多次拉伸法	335	8.5.4 设计计算	371
8.3.2.2 旋压拉伸法	341	8.5.4.1 参数代号	371
8.3.2.3 轧制和焊接法	345	8.5.4.2 计算公式	372
8.3.3 波纹成形	345	8.5.4.3 计算曲线图	373
8.3.3.1 成形方法的比较和选取	345	8.5.4.4 刚度、非线性度的影响因素	373
8.3.3.2 液压成形	346	8.5.4.5 常用材料	374
8.3.3.3 滚压成形	352	8.5.4.6 膜片型面选择	375
8.3.3.4 滚压-液压成形	352	8.5.4.7 设计计算示例	376
8.3.3.5 电沉积成形	353	8.5.5 制造工艺	377
8.3.3.6 化学沉积成形	355	8.5.5.1 膜片制造	377
8.3.4 整形和稳定	358	8.5.5.2 焊接组合工艺	378
		8.5.5.3 微束等离子焊接	381

8.5.5.4 电子束焊接	382	9.5.6 氧气组件的除油	410
8.5.5.5 检查试验	382	9.5.7 组件的稳定处理	410
第9章 压力弹簧管及其组件		9.5.7.1 自然时效	
9.1 压力弹簧管的结构形式及其应用		410	
9.1.1 压力弹簧管在航空上的应用		410	
9.1.2 压力弹簧管的分类		411	
9.1.2.1 按外形结构分类		411	
9.1.2.2 按截面形状分类		411	
9.2 压力弹簧管常用材料		412	
9.3 压力弹簧管工作原理及基本特性		412	
9.3.1 压力弹簧管的工作原理		412	
9.3.2 压力弹簧管的基本特性		412	
9.3.2.1 压力-位移特性		412	
9.3.2.2 比例极限与安全系数		412	
9.3.2.3 灵敏度		412	
9.3.2.4 弹簧管几何尺寸对特性的影 响		412	
9.4 压力弹簧管的设计计算		412	
9.4.1 C形弹簧管的设计计算		412	
9.4.1.1 C型薄壁弹簧管的计算		412	
9.4.1.2 C型厚壁弹簧管的计算		412	
9.4.2 螺旋形弹簧管的计算		412	
9.5 压力弹簧管及其组件制造工艺		412	
9.5.1 典型工艺流程		412	
9.5.2 毛坯管制造		412	
9.5.2.1 对毛坯管的技术要求		412	
9.5.2.2 机械加工法		412	
9.5.2.3 拉伸法		412	
9.5.2.4 毛坯管的拉制		412	
9.5.2.5 毛坯管的检测		412	
9.5.3 弹簧管成形		412	
9.5.3.1 压扁截面成形		412	
9.5.3.2 热成形C形弹簧管		412	
9.5.3.3 三轴弯管机成形		412	
9.5.3.4 半自动弯管机成形		412	
9.5.3.5 绕制螺旋形弹簧管		412	
9.5.3.6 绕制双层螺旋形弹簧管		412	
9.5.4 组件的装配		412	
9.5.4.1 螺纹连接		412	
9.5.4.2 组合焊接		412	
9.5.4.3 熔焊		412	
9.5.4.4 激光焊		412	
9.5.4.5 自由端封焊		412	
9.5.5 防锈处理		412	
		第10章 弹性谐振元件	
		10.1 弹性谐振元件的特点、结构和 应用	
		413	
		10.2 材料选择、热处理和稳定处理	
		414	
		10.3 振动筒	
		415	
		10.3.1 结构分类及特征	
		415	
		10.3.2 频率特性方程	
		416	
		10.3.2.1 固有振动频率	
		416	
		10.3.2.2 压力频率特性	
		416	
		10.3.3 振型分析	
		416	
		10.3.3.1 振动筒的振型	
		416	
		10.3.3.2 振型的选择	
		417	
		10.3.4 旋压拉伸制造工艺	
		418	
		10.3.4.1 典型工艺流程	
		419	
		10.3.4.2 对毛坯管的要求	
		419	
		10.3.4.3 工艺参数选择	
		420	
		10.3.5 车、磨制造工艺	
		420	
		10.3.5.1 工艺、结构特点	
		420	
		10.3.5.2 工艺流程	
		421	
		10.3.5.3 工装夹具	
		421	
		10.3.5.4 设备及要求	
		421	
		10.3.5.5 制造缺陷及防止措施	
		422	
		10.3.6 振动筒的检测	
		422	
		10.3.6.1 几何参数检测	
		422	
		10.3.6.2 性能测试	
		422	
		10.3.7 绝对压力振动筒组件	
		424	
		10.3.7.1 组件结构	
		424	
		10.3.7.2 焊接组合工艺	
		424	
		10.3.7.3 真空度及焊缝检测	
		426	
		10.4 振动膜片	
		426	
		10.4.1 结构分类及特征	
		426	
		10.4.2 频率特性方程	
		427	
		10.4.3 整体结构振动膜片	
		428	
		10.4.3.1 结构形式及特点	
		428	

10.4.3.2 制造工艺	428	10.5.1.2 制造工艺	436
10.4.4 焊接结构振动膜片	430	10.5.2 双谐振音叉	436
10.4.4.1 结构形式及特点	430	10.5.3 振动弦	437
10.4.4.2 制造工艺	430	10.6 非金属弹性谐振元件	437
10.4.5 振动膜片的检测	432	10.6.1 石英弹性谐振元件	438
10.4.5.1 几何参数检测	432	10.6.1.1 振动模式及结构	438
10.4.5.2 性能参数测量	432	10.6.1.2 原材料的选择	438
10.4.6 绝对压力振动膜片组件	433	10.6.1.3 石英振梁的制造工艺及 专用设备	438
10.4.6.1 组件结构	433	10.6.2 硅弹性谐振元件	440
10.4.6.2 焊接组合工艺	433	10.6.2.1 元件的特征	441
10.4.6.3 组件检测	435	10.6.2.2 微机械加工技术	441
10.5 其他结构形式的金属弹性谐振 元件	435	10.6.2.3 制造实例	442
10.5.1 振动梁	435	参考文献	444
10.5.1.1 频率特性方程	435		

第1章 总 论

1.1 概 述

本手册重点介绍航空用各类弹性元件的制造工艺及与之密切相关的设计技术。

手册中包括膜片、膜盒、波纹管、弹簧管、薄壁圆柱筒、梁、螺旋弹簧、碟形弹簧和平面涡卷弹簧等航空上常用弹性元件。

弹性元件是利用自身的弹性变形功能工作的。主要用作测量元件、执行元件、储能元件、密封元件、弹性连接元件和隔震减振元件等。它们的性能优劣，直接影响着仪器、仪表和有关装置的性能。

弹性元件的质量，除设计因素外，很大程度上依赖于制造工艺。晶粒度、硬度、弹性、稳定性、表面质量、温度补偿特性、寿命等都与冷热加工、稳定处理方式等直接有关。因此，可以说工艺工作是提高弹性元件内在质量的重要保证。

在确定的设计和工艺条件下，弹性元件对材料的变化十分敏感。因此，不同批号、炉号和不同生产厂家的材料，在投入正式生产前，必须进行试验。可用调整设计、工艺因素的方法来补偿材料引起的特性变化。

随着需求的推动和技术的发展，弹性元件制造技术几十年来有了很大进步。先进的工艺设备（如精密热处理设备、精密焊接设备、精密特性测量设备、精密自动绕簧设备等）的应用，大大提高了工艺过程的可控性、元件特性的一致性和元件使用的可靠性。

不断采用新材料、新工艺是开发高性能弹性元件的先决条件。各种精密弹性合金的出现和广泛应用，显著地提高了弹性元件在各种使用环境下的性能；精密陶瓷、石英材料在高性能弹性元件中，越来越多地得到应用；硅材料结合半导体工艺，在敏感元件小型化、组合化、集成化方面占有特殊地位。

温度误差是弹性元件的一种主要误差，必须在选材、工艺上予以充分考虑。

弹性元件与一般机械零件不同，形状、尺寸固然重要，但满足弹性性能要求更居重要地位。往往用调整形状、尺寸、结构参数和改变材料的方法来获得所要求的特性。

因此，弹性元件主管技术人员，需通晓设计和工艺两方面的知识，统筹设计和工艺规范，才能满足预定的设计要求。为此，本手册除制造工艺内容外，还纳入了少量的必不可少的设计篇幅，以满足这方面需要。

航空用弹性元件的工作环境恶劣，性能一般要求较高，因此对材料选用、设计计算和制造工艺都有相应的严格要求。表 1.1 列出的是航空产品对弹性元件提出的基本性能要求及其相应技术措施。