
高速飞行器 热结构分析与应用

Thermal Structures Analysis and
Applications of Highspeed Vehicles

范绪箕 编著



国防工业出版社

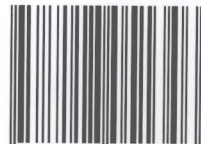
National Defense Industry Press

责任编辑：程邦仁 brcheng@ndip.cn
责任校对：钱辉玲
封面设计：陆 阳

上架建议：力学

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-05134-6



9 787118 051346 >

定价：68.00 元

高速飞行器热结构 分析与应用

Thermal Structures Analysis and
Applications of Highspeed Vehicles

范绪箕 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

热结构是指在热载荷作用下的结构。高速飞行器在大气中飞行时受到气动加热的作用,采用完全的热结构就可以避免因结构烧蚀或失效而无法胜任其所承担的飞行任务,也可避免采用热防护增加飞行器的重量。

本书系统地介绍了飞行器结构上常用的元部件在热载荷作用下数学模型的建立,热弯曲、热振动、热屈曲等的分析方法,以及对高温材料的选用和热模拟试验等对航天工程分析和设计具有实用意义的问题,也对复杂的组合结构和大型结构的分析方法作了简略的介绍。

本书可供航天器设计人员和航天工程专业的高年级本科生和研究生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速飞行器热结构分析与应用/范绪箕编著. —北京:
国防工业出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-118-05134-6

I. 高... II. 范... III. 高超音速飞行器-热力学-结构
分析 IV. V414.1 V215.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 021355 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 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 20 字数 372 千字

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 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

前 言

高超声速飞行器在出入大气层或持续在空间飞行时,将承受巨大的气动力和气动热。气动力是指大气压力和表面摩擦力,分别对飞行器产生升力和阻力,而气动热则直接为结构所感受成为热载荷。气动热能使结构材料的力学性能降低,作用应力减少以致发生蠕变,而结构部件之间的相互约束,在热载荷作用下,又将在结构中产生应力从而使变形加剧并造成翘曲和蠕变特性的变化,同时温度的交替变化也会激起结构的热振动以至颤振,这些情况表明热结构力学不仅关系到力学问题,也关系到热学和材料科学问题。

美国下一代空间发射技术(NGLT)在热结构领域的发展,注意力集中在新材料,尤其是复合材料的研发应用和壁结构的构思方面,纳米材料的应用也受到了广泛的关注。热结构研究的最终目标是发展一种组合式的多功能结构,把隔热功能融于结构之中,排除对那种脆性易损的外部热防护系统(TPS)的需求。这种新型结构的研究内容包括对材料在特殊条件下的特性的完整了解,结构组件的安排,受力的路线,热结构壁在高温下($1500^{\circ}\text{C} \sim 3000^{\circ}\text{C}$)的设计及优化和试验、验证等。因此,在热结构的书中加入一些除结构知识外有关材料的知识是很必要的。

当前,国内外关于热应力的书已有多本问世,而关于热结构力学的书则甚少。两者的区别在于,前者着重学术理论的推导,介绍其演变过程和发展规律,而后者则侧重于理论联系实际,联系到结构常用的元部件上的运用。这里要特别提出有关的两本书:一本是 B. E. Gatewood 著的“Thermal Stresses”(热应力)。这本书虽名为热应力,但注明“附有对飞机、导弹、涡轮、喷气发动机和原子反应堆的应用”。书出版得较早(1957年),但其内容与其他同时代的热应力书大不相同,是侧重于理论的工程应用,虽然所联系的目标广而不深,系统性不够,但开创了应用型热应力书籍的先河。另一本是 E. A. Thornton 的“Thermal Structures for Aerospace Applications”(航天工程上用的热结构)。现在看来这本书也算是出版得早的(1996年),但比起前者已晚了近40年。这个

期间航天工程有了极大的发展,各种飞行器相继出现,航天飞行深入太空,飞行速度越来越快。电子计算机的发展促进了数学模拟在工程上的广泛应用,增强了理论与工程结合的能力。随着先进航天飞行器对耐热要求的突出,在工程上出现了“热结构”这个名词,对于它的研究也就成为航天工程上的一个崭新的学科。Thornton 以热结构命名的书比 Gatewood 的书更有针对性和系统性。过去热应力的书以理论为主导配合一些简单结构实例来印证理论的实用性,而热结构书则应以航天工程结构上常用元部件为主体,借助于理论和耐高温材料的应用来分析其所承受的热和热应力,因而对于航天工程设计更有实用意义。

我接触气动加热与热应力理论始于 1958 年,当时苏联已成功发射了第一颗人造卫星,对于空间飞行科技研究有一种紧迫感,开始对克服“热障”问题感兴趣。查阅了当时所能得的相关文献和资料,如 W. H. Horton 的“The influence of kinetic heating on the design and testing of aircraft structures”和 R. L. Bisplinghoff 的“Some structural and aeroelastic considerations of high-speed flight”等发表于 1956 年的文章,深受鼓舞。30 多年后才有机会参加几个型号的气动加热和热防护设计的预研任务。通过这几项工作,使我对热结构有了一些认识,虽然这只是非常浅显的,但成为了以后工作奋斗的目标。由于自己的实际知识不够,写这样一本书是嫌先天不足,做不到写出一种新型热结构书的要求,只制定了这样一个浅显目标,就是借鉴前人的经验,初步建立本学科的一个框架以供专家学者们评阅、修改和进一步的完善和发挥。

作者

2008. 11

目 录

第1章 固体材料的应力应变及特性	1
1.1 应力应变及弹性材料的本构方程	1
1.1.1 单向拉伸的应力应变曲线	1
1.1.2 三维的应力和应变	3
1.1.3 弹性材料的本构方程	6
1.2 固体材料的屈服条件	7
1.3 塑性材料的本构方程	10
1.4 黏性材料的本构方程	12
1.4.1 黏弹性	12
1.4.2 黏塑性	14
1.5 弹性和非弹性的统一本构方程	15
参考文献	17
第2章 飞行器结构用材料	18
2.1 金属材料的力学性能	19
2.1.1 强度与塑性	19
2.1.2 硬度	19
2.1.3 疲劳强度	20
2.2 材料性能与温度的关系	21
2.2.1 弹性系数与温度的关系	21
2.2.2 热系数与温度的关系	22
2.2.3 材料的热疲劳	22
2.2.4 材料的热物性及测试	23
2.3 轻金属材料及其合金	26
2.3.1 铝及铝合金	26
2.3.2 镁及镁合金	27
2.3.3 钛及钛合金	27
2.4 复合材料	28
2.4.1 复合材料的增强纤维和基体	28

2.4.2	复合材料的界面结合强度	30
2.4.3	各类复合材料对界面的要求	32
2.5	美国在发展中的耐高温结构材料简介	33
2.5.1	钛合金	33
2.5.2	碳—碳基复合材料	34
2.5.3	纳米管结构材料	34
2.5.4	NASA LaRc 航天飞行器结构材料开发研究计划	34
2.6	航天飞行器耐高温结构材料简述	37
	参考文献	37
第3章	热弹性力学基础	39
3.1	弹性材料的应力、应变和温度的关系	39
3.1.1	各向同性体	41
3.1.2	非各向同性的其他弹性体	43
3.1.3	各向同性体的平面应力	44
3.2	复合材料的应力、应变和温度的关系	45
3.2.1	单层板	46
3.2.2	层合板的应力和应变关系	52
3.3	热弹性力学的控制方程	56
3.3.1	线性动量守恒方程	57
3.3.2	能量守恒方程	58
	参考文献	62
第4章	飞行器热结构基本元部件的应力分析	63
4.1	杆与梁的应力分析	63
4.1.1	实心杆(梁)	64
4.1.2	开口截面薄壁杆	71
4.1.3	闭口截面薄壁杆	78
4.2	板的应力分析	80
4.2.1	大挠度公式	81
4.2.2	小挠度公式	86
4.2.3	圆板的小挠度公式	88
4.2.4	层合板的平衡方程	89
4.2.5	柯利尔(Collier)的加筋壁板弯曲计算方法	91
4.3	薄壳的热应力理论	100
4.3.1	旋转薄壳	100
4.3.2	圆筒壳	112

4.3.3	格栅壳结构	118
4.3.4	薄壳加强肋结构	122
4.3.5	层合壳	125
	参考文献	131
第5章	热结构计算的有限元法	132
5.1	有限元法的基本原理及推导方法	132
5.1.1	一维问题	134
5.1.2	二维问题	137
5.1.3	三维问题	144
5.2	单元的划分与集合	147
5.2.1	单元的类型和划分	147
5.2.2	单元的集合规则	157
5.3	热结构弯曲的有限元法	158
5.3.1	梁弯曲的有限元法	158
5.3.2	薄板弯曲的有限元法	162
5.3.3	薄壳结构弯曲的有限元法	172
5.4	热结构有限元法的计算机程序	177
5.4.1	输入数据	177
5.4.2	结构刚度的形成和计算	182
5.4.3	输出	183
5.4.4	计算实例	183
	参考文献	188
第6章	热振动	189
6.1	梁的热振动	189
6.1.1	梁的非耦合热弯曲振动	189
6.1.2	梁的热耦合弯曲振动	193
6.2	板的热振动	198
6.2.1	板的热弹性非耦合振动	198
6.2.2	板的热弹性耦合振动	200
6.3	层合板的热振动	205
6.4	层合板的非耦合热致振动的有限元解法	213
	参考文献	214
第7章	热屈曲	215
7.1	梁柱的热屈曲	215
7.1.1	轴向固定梁的热屈曲	216

7.1.2 轴向固定梁的热弯曲——屈曲	219
7.2 板的热屈曲	222
7.2.1 分支屈曲	223
7.2.2 后屈曲	225
7.3 壳的热屈曲	227
7.3.1 圆柱壳的平衡公式	228
7.3.2 圆柱壳的热屈曲	230
7.3.3 圆柱壳在轴向温度场和扭矩下的热屈曲	231
7.4 层合板的热屈曲	233
7.5 加筋层压板的热屈曲	240
参考文献	244
第8章 热冲击与热疲劳	245
8.1 热冲击	245
8.1.1 热冲击的温度场	246
8.1.2 热冲击下的断裂	247
8.2 热疲劳与寿命的估算	248
8.2.1 结构材料的热疲劳	251
8.2.2 结构元件的寿命估算	251
参考文献	257
第9章 热非弹性的有关问题	258
9.1 热弹塑性	258
9.2 塑性蠕变	260
9.3 黏弹性	263
9.3.1 等温的本构方程	264
9.3.2 变温的本构方程	265
9.4 黏塑性	266
9.4.1 初边值黏塑性问题	267
9.4.2 有限元公式的建立	267
9.4.3 黏塑性解题方法	268
参考文献	269
第10章 热结构气动加热模拟试验	270
10.1 气动加热计算	270
10.1.1 CFD 算法	270
10.1.2 牛顿冷却定律	271
10.1.3 壁面对流换热系数的理论分析	271

10.1.4 艾克特参考温度(焓)法	277
10.1.5 TPATH 计算程序	279
10.2 热结构内的热传递	282
10.3 结构表面的温度计算	283
10.4 气动加热的地面模拟	287
10.4.1 原始模拟系统	287
10.4.2 现代模拟系统	288
10.4.3 高真空环境的模拟	289
10.4.4 热防护材料的抗烧蚀性能模拟试验	290
参考文献	292
附录 组合结构和大型结构的热响应简介	294
参考文献	303
编后语	304

Contents

1	Stress, Strain and Material Properties of Solids	1
1.1	Stress, strain and constitutive equations of elastic materials	1
1.1.1	Stress-strain curve for uniaxial tension	1
1.1.2	Three dimensional stress and strain	3
1.1.3	Constitutive equations of elastic materials	6
1.2	Yield criteria of solids	7
1.3	Constitutive equations of plastic materials	10
1.4	Constitutive equations of viscous materials	12
1.4.1	Visco-elasticity	12
1.4.2	Visco-plasticity	14
1.5	Unified elastic and inelastic constitutive equations	15
	References	17
2	Materials used on the Structure of Highspeed Vehicles	18
2.1	Mechanical properties of metals	19
2.1.1	Strength and plasticity	19
2.1.2	Hardness	19
2.1.3	Fatigue strength	20
2.2	Relationship of material properties with temperature	21
2.2.1	Relationship of elastic constants with temperature	21
2.2.2	Relationship of thermal coefficients with temperature	22
2.2.3	Thermal fatigue of materials	22
2.2.4	Thermal properties of materials and their measurements	23
2.3	Light metals and the alloys	26
2.3.1	Aluminum and its alloys	26
2.3.2	Magnesium and its alloys	27
2.3.3	Titanium and its alloys	27
2.4	Composite materials	28
2.4.1	Reinforced fibers and matrix of composites	28

2.4.2	Interfacial bond strength of composites	30
2.4.3	Requirements on Interface in different composites	32
2.5	Brief review of developments of high temperature resistant structural materials in U. S. A.	33
2.5.1	Titanium alloys	33
2.5.2	C/C composites	34
2.5.3	Nanotube composites	34
2.5.4	Research and development plan in NASA LaRc (Langley Research Center)	34
2.6	Brief review of high temperature resistant materials of aerospace structures	37
	References	37
3	Fundamentals of Thermoelasticity	39
3.1	Relationship of stress and strain with temperature for elastic materials	39
3.1.1	Isotropic body	41
3.1.2	Other nonisotropic bodies	43
3.1.3	Plane stress of an isotropic body	44
3.2	Relationship of stress and strain with temperature for composite materials	45
3.2.1	single-layer plate	46
3.2.2	Stress-strain relationship for a laminated plate	52
3.3	Governing equations of thermoelasticity	56
3.3.1	Equations of conservation of linear momentum	57
3.3.2	Equations of conservation of energy	58
	References	62
4	Essential Members of Flying Vehicle and the Thermal Stress Analysis	63
4.1	Rods and beams	63
4.1.1	Solid bar (beam)	64
4.1.2	Thin - walled bar of open cross section	71
4.1.3	Thin - walled bar of closed section	78
4.2	Stress analysis of thin plates	80
4.2.1	Large deflection equations	81
4.2.2	Small deflection equations	86

4. 2. 3	Small deflection equations of circular plates	88
4. 2. 4	Equilibrium equations of laminated plates	89
4. 2. 5	Collier's method for bending analysis of stiffened panels	91
4. 3	Thermal stress analysis of thin shells	100
4. 3. 1	Shells of revolution	100
4. 3. 2	Cylindrical shells	112
4. 3. 3	Gridwork shells	118
4. 3. 4	Shells with ribs	122
4. 3. 5	Laminated shell	125
	References	131
5	Finite Element Method for Thermal Structures	132
5. 1	Fundamental principles and methods of derivation	132
5. 1. 1	One dimensional problems	134
5. 1. 2	Two dimensional problems	137
5. 1. 3	Three dimensional problems	144
5. 2	Division and assemblage of elements	147
5. 2. 1	Types of element and their division	147
5. 2. 2	Assembly rules of elements	157
5. 3	Finite element method for bending of thermal structures	158
5. 3. 1	Finite element method for bending of beams	158
5. 3. 2	Finite element method for bending of thin plates	162
5. 3. 3	Finite element method for bending of thin shell structures	172
5. 4	Computer program of finite element method for thermostructure	177
5. 4. 1	Data input	177
5. 4. 2	Formation of structure stiffness and its calculation	182
5. 4. 3	Output	183
5. 4. 4	Numerical example	183
	References	188
6	Thermal Vibrations	189
6. 1	Thermal Vibrations of beams	189
6. 1. 1	Uncoupled thermal bending vibration of beams	189
6. 1. 2	Coupled thermal bending vibration of beams	193
6. 2	Thermal vibrations of plates	198
6. 2. 1	Uncoupled thermoelastic vibration of plates	198
6. 2. 2	Coupled thermoelastic vibration of plates	200

6.3	Thermal vibrations of laminated plates	205
6.4	Finite element method for uncoupled thermal vibration of laminated plates	213
	References	214
7	Thermal Buckling	215
7.1	Thermal buckling of beams	215
7.1.1	Thermal buckling of axially restrained beams	216
7.1.2	Thermal buckling of axially restrained beams with bending	219
7.2	Thermal buckling of plates	222
7.2.1	Bifurcation buckling	223
7.2.2	Post buckling	225
7.3	Thermal buckling of shells	227
7.3.1	Equilibrium equations of cylindrical shells	228
7.3.2	Thermal buckling of cylindrical shells	230
7.3.3	Thermal buckling of cylindrical shells under uniform axial temperature field and twisting moment	231
7.4	Thermal buckling of laminated plates	233
7.5	Thermal buckling of stiffened laminated plates	240
	References	244
8	Thermal Shock and Fatigue	245
8.1	Thermal shock	245
8.1.1	Temperature field of thermal shock	246
8.1.2	Fracture under thermal shock	247
8.2	Thermal fatigue and life prediction	248
8.2.1	Thermal fatigue of structural materials	251
8.2.2	Life prediction of structural elements	251
	References	257
9	Thermal Inelasticity and Related Problems	258
9.1	Thermoplasticity	258
9.2	Thermoplastic creep	260
9.3	Viscoelasticity	263
9.3.1	Isothermal constitutive equations	264
9.3.2	Non-isothermal constitutive equations	265
9.4	Viscoplasticity	266
9.4.1	Initial value viscoplasticity problem	267

9.4.2	Construction of finite element equations	267
9.4.3	Method of solution of viscoplastic problems	268
References		269
10	Aerodynamic Heat Simulation of Thermal Structures	270
10.1	Calculation method of aerodynamic heat	270
10.1.1	CFD method	270
10.1.2	Newton's law of cooling	271
10.1.3	Theoretical analysis of surface heat convection coefficient	271
10.1.4	Eckert's reference temperature (enthalpy) method	277
10.1.5	TPATH program	279
10.2	Heat transfer in thermal structures	282
10.3	Surface temperature calculation	283
10.4	Ground simulation of aerodynamic heat	287
10.4.1	Old simulation system	287
10.4.2	Present simulation system	288
10.4.3	High altitude vacuum simulation	289
10.4.4	Anti charring simulation test of TPS materials	290
References		292
Appendix	Brief introduction on heat response of composite	
	structure and large structure	294
References		303
Epilogue		304

第1章 固体材料的应力应变及特性

固体材料均由大量的分子组成,其分子组织紧密,分子间的空隙极小,分子间的相互作用力(即凝聚力)极强且不易彼此分离,因此,一般可当作连续分布的介质来考察。任何一种连续介质的力学性能都可以用应力应变关系来描述。在三维欧几里德空间的一个连续介质微元体上,在外力作用下的应力和应变各有九个分量,它们之间存在一定的关系,这些关系根据不同连续介质的性质而定。如果连续介质是弹性介质,其应力应变关系就可由广义胡克定律确定。如果连续介质为非弹性性质,则由本构方程来确定。当然,由广义胡克定律决定的应力应变关系也称为本构方程,但这是最为简单的一类。在第1.3节中将给出这些关系,目的是为了在以后的应力分析中了解弹性与非弹性介质的区别。在本书中所阐述的问题主要还是在弹性范围内。

如把连续介质中的一个微元体缩小成近似于一个点,则作用于该点上的应力和应变关系在数学上可用张量来描述。

1.1 应力应变及弹性材料的本构方程

1.1.1 单向拉伸的应力应变曲线

固体材料在受外力时,从发生变形开始直到被破坏,一般要经过弹性变形和塑性变形两个阶段。弹性变形是指物体在卸载后完全消失的那种变形,而塑性变形是指物体在卸载后不能消失而残留下来的那种变形。这可以从材料的简单拉伸试验加以验证,其试验曲线如图1.1.1所示。

由图1.1.1可知,当加载所产生的应力在 σ_e 以下时,其应力和应变是线性关系,我们称 σ_e 为比例极限,这一阶段为材料的弹性阶段,超过 σ_e 就使材料达到非弹性阶段,然后开始进入塑性,即 σ_s ,直至 σ_b (强度极限)。显然从 $\sigma_s \sim \sigma_b$ 这一阶段,卸载后即有塑性变形保留下来的残余应变。超过 σ_s 再加载则达到一个塑性平台阶段。在这一阶段上,在应力不变的情况下可继续变形,成为塑性流动。这时金属材料似乎已经失去抵抗外力的能力而被屈服,故把 σ_s 称为材料的屈服强度。但是,并不是所有的金属材料的拉伸曲线上都出现屈服平台,工程上常常规定塑性变形量为2%的应力作为屈服强度,记为 $\sigma_{0.2}$ 。