

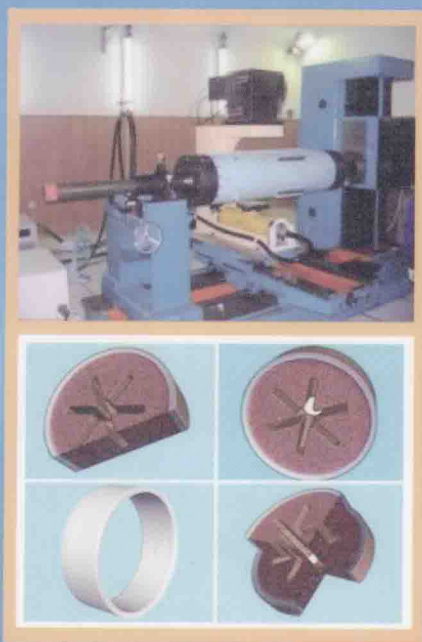


国防科技图书出版基金

固体火箭发动机 三维可视化故障诊断技术

3D Visualization Fault Diagnosis Technology
for Solid Rocket Motor

卢洪义 朱敏 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

固体火箭发动机三维可视化 故障诊断技术

3D Visualization Fault Diagnosis Technology
for Solid Rocket Motor

卢洪义 朱敏 于光辉 董可海 李朋 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

固体火箭发动机三维可视化故障诊断技术 / 卢洪义
等编著. —北京:国防工业出版社, 2014. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 09649 - 1

I. ①固... II. ①卢... III. ①固体推进剂火箭发动机
- 故障诊断 IV. ①V435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 222539 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 1/4 字数 328 千字

2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

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

目 录

第 1 章 固体火箭发动机常见故障及诊断技术	1
1.1 固体火箭发动机一般结构组成及特点	1
1.2 固体火箭发动机常见缺陷	2
1.3 装药典型缺陷的危害性影响因素分析	4
1.3.1 脱粘的危害性影响因素	5
1.3.2 裂纹的危害性影响因素	6
1.3.3 气泡的危害性影响因素	6
1.4 固体火箭发动机重点探伤区域	7
1.4.1 单室单推力内表面星孔燃烧固体火箭发动机重点探伤区域	7
1.4.2 单室双推力内表面星孔燃烧固体火箭发动机重点探伤区域	8
1.4.3 单室单一推进剂两种结构形状以上固体火箭发动机重点探伤区域	9
1.4.4 端面燃烧固体火箭发动机重点探伤区域	9
1.5 固体火箭发动机缺陷无损检测技术	9
1.5.1 固体火箭发动机壳体的无损检测	10
1.5.2 喷管的无损检测	10
1.5.3 点火发动机的无损检测	11
1.5.4 固体火箭发动机及药柱的无损检测	11
参考文献	14
第 2 章 固体火箭发动机工业 CT 断层成像	15
2.1 工业 CT 无损检测技术的理论基础——图像重建理论	15
2.1.1 Radon 变换与中心切片定理	16
2.1.2 平行束卷积反投影算法	21
2.2 “平移+连续旋转”扇束扫描方式图像重建	22
2.3 “连续旋转”扇束扫描方式图像重建	29
2.3.1 等角射线扇束数据的直接重建算法	30

2.3.2	等距射线扇束数据的卷积反投影重建算法	34
2.3.3	重排算法	37
2.4	固体火箭发动机局部区域 CT 探伤检测	41
2.4.1	Radon 变换非局部性分析	42
2.4.2	小波局部重建	45
2.4.3	局部重建误差分析	46
2.4.4	基于无缺陷同截面投影数据的局部实时反投影局部检测	48
	参考文献	51

第 3 章 固体火箭发动机断层图像预处理 52

3.1	固体火箭发动机 ICT 探伤射束硬化伪影去除	52
3.1.1	固体火箭发动机 ICT 探伤射束硬化产生原因分析	52
3.1.2	固体火箭发动机 ICT 探伤射束硬化实验	59
3.1.3	固体火箭发动机 ICT 探伤射束硬化现象校正	71
3.2	固体火箭发动机 ICT 断层图像去噪技术研究	79
3.2.1	断层图像中的噪声	79
3.2.2	断层图像去噪方法	80
3.2.3	实验结果及分析	82
3.3	固体火箭发动机 ICT 断层图像层间插值	83
3.3.1	插值方法概述	84
3.3.2	插值方法分析	89
3.4	固体火箭发动机三维规则体数据封装	90
	参考文献	91

第 4 章 固体火箭发动机断层图像缺陷分割 94

4.1	固体火箭发动机断层图像缺陷分割基础知识	94
4.1.1	边缘检测算子	94
4.1.2	二值数学形态学	109
4.2	固体火箭发动机二维断层图像缺陷分割	114
4.2.1	分割方案 1	114
4.2.2	分割方案 2	119
4.3	固体火箭发动机三维数据场缺陷分割	124
4.3.1	三维缺陷区域的确定	124
4.3.2	三维缺陷内一点的确定	126

4.3.3	三维缺陷边缘的确定	127
4.3.4	三维缺陷边缘细化	128
4.3.5	三维缺陷分割	130
	参考文献	130
第5章	固体火箭发动机三维重构	131
5.1	体数据三维可视化技术分析	131
5.2	体数据三维可视化中的体绘制技术	132
5.2.1	体绘制中的光学模型	133
5.2.2	光线投射体绘制算法	134
5.2.3	光线投射法的主要加速方法	137
5.3	已分割规则体数据的光线投射加速方法	138
5.3.1	加速方法设计思想	138
5.3.2	加速方法描述	138
5.3.3	固体火箭发动机三维重构	142
5.4	体数据三维可视化中的面绘制技术	145
5.4.1	面绘制及主要方法	145
5.4.2	MC 方法	146
5.5	直接三维 CT 成像理论	148
5.5.1	扇形束图像重建算法	149
5.5.2	FDK 算法简介	149
5.5.3	图像重建算法的简化	151
	参考文献	155
第6章	固体火箭发动机结构及缺陷三维多视窗分析	157
6.1	重构模型空间坐标基本变换	157
6.1.1	平移变换	157
6.1.2	缩放变换	158
6.1.3	旋转变换	158
6.2	重构模型虚拟切片技术	159
6.2.1	由二维切片分割重构三维分割图像	159
6.2.2	直接三维分割图像技术	159
6.2.3	固体火箭发动机剖切显示	162
6.2.4	剥离与提取	165

6.3	固体火箭发动机透视观察技术	167
6.3.1	面绘制的透视观察	167
6.3.2	体绘制的透视观察	167
6.3.3	旋转观察分析	168
6.4	重构模型的点拾取技术	168
6.4.1	针刺取点法	168
6.4.2	轨迹球取点法	170
	参考文献	172
第7章	固体火箭发动机缺陷自动分类识别	173
7.1	固体火箭发动机缺陷自动分类识别技术分析	173
7.2	基于图像配准技术的缺陷自动识别	175
7.2.1	交互式配准法	175
7.2.2	基于像素灰度的配准方法	176
7.2.3	配准实验与分析	182
7.2.4	基于图像配准的缺陷识别设计	188
7.2.5	裂纹、脱粘、夹渣和气泡缺陷识别	189
7.2.6	变形缺陷识别	195
7.3	基于图像不变矩的缺陷自动识别	198
7.3.1	图像不变矩特征	198
7.3.2	灰度直方图特征	202
7.3.3	基于图像不变矩和直方图分析的缺陷识别方法	203
	参考文献	207
第8章	固体火箭发动机缺陷测量方法	209
8.1	固体火箭发动机缺陷表征参数	209
8.2	缺陷二维测量	211
8.2.1	缺陷位置的测量	211
8.2.2	缺陷最大长度和取向的测量	211
8.2.3	缺陷面积的测量	213
8.2.4	缺陷周长的测量	215
8.3	缺陷三维测量	217
8.3.1	缺陷位置的测量	217
8.3.2	缺陷最大长度和取向的测量	217

8.3.3	缺陷体积的测量	219
8.3.4	缺陷表面积的测量	219
8.4	交互式测量方法	222
8.4.1	距离的交互式测量	222
8.4.2	角度的交互式测量	222
	参考文献	223
第9章	固体火箭发动机三维可视化故障诊断系统	224
9.1	系统框架与功能设计	224
9.1.1	二维序列断层图像获取	224
9.1.2	断层图像预处理	225
9.1.3	体数据三维可视化	225
9.1.4	缺陷特征提取与分类识别	226
9.2	系统开发实现	226
9.2.1	动态库的设计与实现	226
9.2.2	基于 VTK 的重建结果显示	227
9.3	系统主要功能	230
9.3.1	主界面	230
9.3.2	数据管理	231
9.3.3	图像格式转换	234
9.3.4	面绘制	236
9.3.5	体绘制	239
9.3.6	滤波算法	243
9.3.7	其他功能	244
9.4	某固体火箭发动机三维可视化故障诊断	247
	参考文献	250
附录	图像信噪比及边缘检测算子最小尺寸	251

Contents

Chapter 1	Common Fault and Diagnosis Technology of SRM	1
1.1	General Structure Composition and Characteristics of SRM	1
1.2	Common Fault of SRM	2
1.3	Hazard Influencing Factors Analysis of Charge Typical Defects	4
1.3.1	Hazard Influencing Factors of Debonding	5
1.3.2	Hazard Influencing Factors of Crack	6
1.3.3	Hazard Influencing Factors of Bubble	6
1.4	Key Testing Region of SRM	7
1.4.1	Key Testing Region of Single Chamber Single Thrust Force Internal Star Burning SRM	7
1.4.2	Key Testing Region of Single Chamber Dual Thrust Force Internal Star Burning SRM	8
1.4.3	Key Testing Region of Single Chamber Single Propellant Two or More Structures SRM	9
1.4.4	Key Testing Region of End – burner SRM	9
1.5	Non – destructive Testing Technology of SRM	9
1.5.1	Non – destructive Testing Technology of SRM Shell	10
1.5.2	Non – destructive Testing Technology of Nozzle	10
1.5.3	Non – destructive Testing Technology of Ignition Motor	11
1.5.4	Non – destructive Testing Technology of Grain	11
	Reference	14
Chapter 2	ICT Test Technology of SRM	15
2.1	Theoretical Basis of ICT Non – destructive Testing Technology :	
	Image Reconstruction Theory	15
2.1.1	Radon transform and Central Slice Theorem	16
2.1.2	Parallel Beam Convolution Back – projection Algorithm	21

2.2	“Translation + Rotation” Fan – beam Scanning Mode Image Reconstruction	22
2.3	“Continuous Rotation” Fan – beam Scanning Mode Image Reconstruction	29
2.3.1	Direct Reconstruction Algorithm of Equiangular Ray Fan – beam Data	30
2.3.2	Convolution Back – projection Reconstruction Algorithm of Equidistant Ray Fan – beam Data	34
2.3.3	Rebinding Algorithm	37
2.4	ICT Testing of Local Region of SRM	41
2.4.1	Non – locality Property of Radon Transform	42
2.4.2	Wavelet Local Reconstruction	45
2.4.3	Error Analysis of Local Reconstruction	46
2.4.4	Local Real – time Back – projection Local Testing Based on the Same Cross Section Projection Data	48
	Reference	51

Chapter 3 Tomography Data Pretreatment Technology of SRM 52

3.1	Artifact Reducing Caused by Beam Hardening in SRM ICT Inspection	52
3.1.1	Reason Analysis of Beam Hardening in SRM ICT Inspection	52
3.1.2	Simulation of SRM ICT Inspection and Simulation of Beam Hardening	59
3.1.3	Correction of Beam Hardening Phenomenon SRM ICT Inspection	71
3.2	Research on Tomography Image De – noising Technology of SRM ICT Inspection	79
3.2.1	Noise in Tomography Image	79
3.2.2	De – noising Method of Tomography Image	80
3.2.3	Experiment Results and Analysis	82
3.3	Interpolation between Slices of SRM ICT Tomography Image	83
3.3.1	Summary of Interpolation Method	84
3.3.2	Analysis on Interpolation Method	89

3.4	3D Regular Volume Data Encapsulation of SRM	90
	Reference	91
Chapter 4	Fault Segmentation Technology of SRM Tomography Image	94
4.1	Basic Knowledge of Fault Segmentation of SRM Tomography Image	94
4.1.1	Edge Detection Operator	94
4.1.2	Binary Mathematical Morphology	109
4.2	Fault Segmentation of SRM 2D Tomography Image	114
4.2.1	Segmentation Scheme 1	114
4.2.2	Segmentation Scheme 2	119
4.3	Fault Segmentation of SRM 3D Data Field	124
4.3.1	Determination of 3D Fault Region	124
4.3.2	Determination of One Point in 3D Fault	126
4.3.3	Determination of 3D Edge of Fault	127
4.3.4	Edge Thinning of 3D Fault	128
4.3.5	Fault Segmentation of 3D Fault	130
	Reference	130
Chapter 5	3D Reconstruction Technology of SRM	131
5.1	3D Visualization Technology Analysis of Volume Data	131
5.2	Volume Rendering Technology in Volume Data 3D Visualization	132
5.2.1	Optical Model in Volume Rendering	133
5.2.2	Ray Casting Volume Rendering Algorithm	134
5.2.3	Key Acceleration Method in Ray Casting Method	137
5.3	Ray Casting Acceleration Method for Regular Volume Data Segmented	138
5.3.1	Design Idea of Acceleration Algorithm	138
5.3.2	Description of Acceleration Algorithm	138
5.3.3	Experiment Results	142
5.4	Surface Rendering Technology in Volume Data 3D Visualization	145
5.4.1	Surface Rendering and Key Methods	145
5.4.2	MC Method	146
5.5	Direct 3D CT Imaging Theorem	148

5.5.1	Fan – beam Image Reconstruction Algorithm	149
5.5.2	FDK Algorithm Introduction	149
5.5.3	Simplification of Image Reconstruction Algorithm	151
Reference		155
Chapter 6	3D Multi – windows Analysis of SRM Structure and Fault	157
6.1	Space Coordinate Transformation of Reconstruction Model	157
6.1.1	Translation Transformation	157
6.1.2	Scale Transformation	158
6.1.3	Rotation Transformation	158
6.2	Virtual Slice Technology of Reconstruction Model	159
6.2.1	3D Segment Image Reconstructed From 2D Slices Segment	159
6.2.2	Direct 3D Image Segment Technology	159
6.2.3	Cutting Display of SRM	162
6.2.4	Peeling and Extraction	165
6.3	Perspective Observation of SRM	167
6.3.1	Perspective Observation of SRM Based on Surface Rendering	167
6.3.2	Perspective Observation of SRM Based on Volume Rendering	167
6.3.3	Rotation Observation Analysis	168
6.4	Pickup of Point Technology of Reconstruction Model	168
6.4.1	Pickup of Point Using Needle Puncturing Method	168
6.4.2	Pickup of Point Using Trace Ball Method	170
Reference		172
Chapter 7	Automatic Classify and Identify of SRM Fault	173
7.1	Analysis of Automatic Classify and Identify of SRM Fault	173
7.2	Automatic Classify and Identify of SRM Fault based on image registration	175
7.2.1	Interactive Registration	175
7.2.2	Registration Based on Images' Pixel Gray	176
7.2.3	Registration Experiment and Analysis	182

7.2.4	Design of Automatic Classify and Identify of SRM Fault Based on Image Registration	188
7.2.5	Automatic Classify and Identify of Crack, Debonding, Slag inclusion and Bubble	189
7.2.6	Automatic Classify and Identify of Deformation Fault	195
7.3	Automatic Classify and Identify of SRM Fault Based on Image Moment Invariants	198
7.3.1	Moment Invariants Characteristics of Image	198
7.3.2	Characteristics of Gray Histogram	202
7.3.3	Automatic Classify and Identify of SRM Fault Based on Moment Invariants and Gray Histogram Analysis	203
	Reference	207
Chapter 8	measurement method of SRM fault	209
8.1	Characterization Parameter of SRM Fault	209
8.2	2D Measurement of Fault	211
8.2.1	Measurement of Fault Position	211
8.2.2	Measurement of Maximum Length and Distribution Direction of Fault	211
8.2.3	Measurement of Fault Area	213
8.2.4	Measurement of Fault Circumference	215
8.3	3D Measurement of Fault	217
8.3.1	Measurement of Fault Position	217
8.3.2	Measurement of Maximum Length and Distribution Direction of Fault	217
8.3.3	Measurement of Fault Volume	219
8.3.4	Measurement of Fault Surface Area	219
8.4	Interactive Measurement Method	222
8.4.1	Interactive Measurement of Distance	222
8.4.2	Interactive Measurement of Angle	222
	Reference	223
Chapter 9	3D Visualization Fault Diagnosis System of SRM	224
9.1	Design of System Frame and Function	224

9.1.1	Acquisition of 2D Sequence Tomography Image	224
9.1.2	Pretreatment of Tomography Image	225
9.1.3	3D Visualization of Volume Data	225
9.1.4	Characteristics extraction, Classify and Identify of Fault ...	226
9.2	Development and Realization of System	226
9.2.1	Design and Realization of dynamic library	226
9.2.2	Reconstruction Result Display Based on VTK	227
9.3	System Main Functions	230
9.3.1	Main Interface	230
9.3.2	Data Management	231
9.3.3	Image Format Conversion	234
9.3.4	Surface Rendering	236
9.3.5	Volume Rendering	239
9.3.6	Filtering Algorithm	243
9.3.7	Other Functions	244
9.4	3D Visualization Fault Diagnosis of a Certain SRM	247
	Reference	250

Appendix	SNR of CT Images and Minimal Size of Edge Operator	251
-----------------	---	------------

第 1 章 固体火箭发动机常见故障及诊断技术

1.1 固体火箭发动机一般结构组成及特点

固体火箭发动机主要由固体推进剂装药、燃烧室、点火装置和喷管等部件组成,如图 1-1 所示。

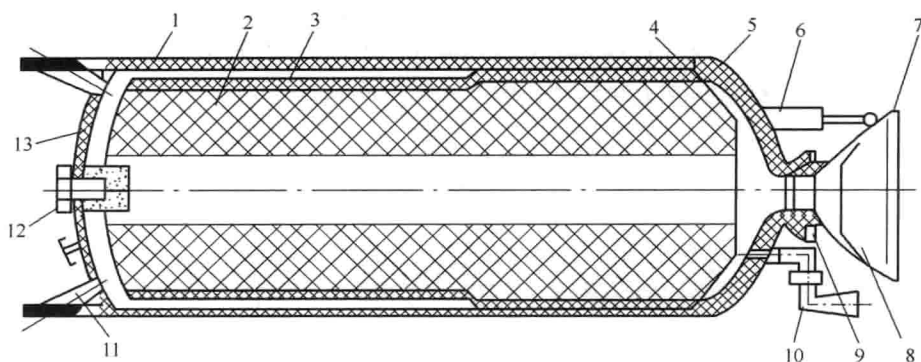


图 1-1 固体火箭发动机结构示意图

- 1—带隔热涂层的外壳; 2—固体推进剂装药; 3—包覆层; 4—装药固定组件; 5—喷管底部;
6—喷管摆动的舵机传动装置; 7—喷管; 8—活塞; 9—喷管镶块; 10—控制火箭滚动的摆动喷管;
11—推力终止装置; 12—点火器; 13—带隔热涂层的前底。

固体推进剂装药由固体推进剂制成,包含燃烧剂、氧化剂和其他组分,是固体火箭发动机的能源和工质源。装药直接放置在燃烧室中,它可以自由装填,也可以贴壁浇注在燃烧室中。装药必须有一定的几何形状和尺寸,其燃烧面的变化必须符合一定的规律,才能实现预期的推力变化要求。为此,有时需对装药的某些部位用阻燃层进行包覆,以达到控制燃烧面变化规律的目的。

燃烧室是储存装药的容器,也是装药燃烧的工作室。因此它不仅要有一定的容积,而且还需具有对高温、高压气体的承载能力。大部分燃烧室都制成圆柱形,成为整个飞行器受力结构的一部分。也有制成其他形状的,如球形或椭球形。燃烧室材料大多采用高强度的金属材料,如各种合金钢、铝合金或钛合金等。也有采用玻璃纤维缠绕加树脂成型的玻璃钢结构。它可以大幅度减轻燃烧室壳体的重

量。为了防止壳体材料因过热而破坏,在壳体 and 高温燃气接触的表面应采取热防护措施,如涂以各种隔热涂层。

点火装置是用于点燃装药的装置,一般采用电点火,由电发火管和点火剂组成。首先由发动机启动电流点燃电发火管;然后点燃点火剂,使其产生高温高压的气体和灼热的凝相微粒引燃装药的局部燃烧面;最后通过火焰的传播,使装药全部燃烧面迅速点燃。对于较长的装药,为了确保其燃烧面全面瞬时点燃,可采用小型的点火发动机作为点火装置。

喷管具有以下功能:首先,通过它的喷喉面积来控制燃气的流量,以达到控制燃烧室内燃气压强的目的;其次,燃气通过喷管进行膨胀加速,形成超声速气流高速向后喷出,产生反作用推力。为了使亚声速流能加速为超声速流,都采用截面形状先收敛后扩张的拉瓦尔喷管。由于喷管始终承受着高温、高压、高速气流的冲刷,尤其在喉部情况更加严重,因此需要在喉部采用耐高温耐冲刷的材料(如石墨、钨钨铜等)作喉衬,并在内表面采取相应的热防护措施。为了在飞行器飞行中控制其飞行方向和姿态,需要采用推力矢量控制装置,或者将整个喷管做成可摆动或可旋转的,或者在喷管上安装其他推力矢量控制装置。

1.2 固体火箭发动机常见缺陷

固体火箭发动机药柱从浇铸到完成燃烧任务,必然经受一系列使它产生应力应变的环境条件,如固化后的降温、环境温度变化、长期储存、运输、弹射、飞行时的加速度和点火后燃烧室增压、冲击、振动等。对于一些特殊要求的发动机,还有壳体外部增压、飞行时的气动加热等。药柱完整性分析工作就是要保证在这些载荷和环境条件作用下药柱内通道表面及其他部位不发生裂纹,药柱与衬层、内绝热层界面不发生脱粘,即药柱结构完整性不被破坏。此外还要求药柱不发生过大的变形而堵塞药柱通道,更不能使药柱自燃。只有在从制造、储存到实验或飞行的全过程中保持药柱的完整性,才能保证发动机的正常工作。装填分数低的药柱只要局部没有大的应力集中,则药柱的结构完整性不会破坏。若装填分数很高,药柱的应力应变一般很大。

药柱所承受的载荷一般分为两类:一类是由导弹总体设计规定的载荷,如环境温度、飞行加速度、运输和飞行中的振动、冲击载荷以及其他环境条件;另一类是发动机制造和工作中产生的载荷,如固化降温和工作内压等。按受力状态分类,药柱首先遇到的是固化降温载荷。推进剂浇铸后,升温固化,固化后药柱粘结到发动机壳体内壁。药柱的热膨胀系数比发动机壳体热膨胀系数高一个数量级。所以,发动机环境温度从较高的固化温度降到较低的储存温度,必然在药柱内引起热应力和热应变。固化过程中还会产生固化热和固化收缩,为了把这些因素考虑进去,在计算固化降温热应力时,把零应力初始温度规定为高于固化温度 80°C (复合推进