

圆柱壳冲击动力学 及耐撞性设计

杜星文 宋宏伟 著



科学出版社

www.sciencep.com

圆柱壳冲击动力学 及耐撞性设计

杜星文 宋宏伟 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书研究了几种典型的薄壁圆柱壳的轴向冲击吸能性能,为车辆的碰撞安全和航天器的无损回收等耐撞性相关设计提供参考。全书共分九章:第一章绪论;第二章为实验方法;第三章至第七章为复合材料圆柱壳;第八章为金属圆柱壳;第九章为材料体系圆柱壳;另含附录。

本书为从事航天工程、汽车工程等领域的技术人员进行结构耐撞性设计提供参考;同时适合于高等院校的力学、复合材料相关的教师和研究生。

图书在版编目(CIP)数据

圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计/杜星文,宋宏伟著. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-013033-2

I. 圆… II. ①杜…②宋… III. ①圆柱面壳-薄壁结构-冲击动力学
②圆柱面壳-薄壁结构-碰撞-设计 IV. TU33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 016309 号

责任编辑:胡 凯 邱 璐 贾瑞娜/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004 年 5 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2004 年 5 月第一次印刷 印张:16 1/2 插页:2

印数:1—1 500 字数:301 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

车辆行驶安全,武器装备运输,航天器软着陆等都提出了结构的耐撞性要求,即在突发或可预见的碰撞事件中,依靠特定结构的屈曲、断裂等破坏形式来减缓碰撞时的冲击载荷,耗散冲击能量。

某些圆柱壳结构在压缩/冲击载荷作用下呈现很高的吸能效率,因此近年来人们将其作为缓冲元件开展了系统的研究。由于其材料、结构范围广泛,受力条件及其损伤、破坏过程复杂,至今对其规律认识远不充分。某些方面不同的学者得出不同的结论。圆柱壳缓冲吸能特性及其应用研究越来越受到理论与工程界的重视。

哈尔滨工业大学“九五”期间承担了航天总公司的预研课题“可压缩结构缓冲技术研究”,对圆柱壳缓冲吸能特性及其应用进行了比较系统的研究。在杜星文教授的统筹指导下,除课题组教师外,先后有三位硕士研究生:桂良进、谢志民、宋宏伟和三位博士研究生:郑金鑫、谢志民、宋宏伟参与该课题研究工作。宋宏伟博士在前几届同学研究工作基础上对圆柱壳冲击吸能与缓冲特性方面进行了内容广泛的研究和总结,并取得显著成果。研究工作中实验系统的建立和所有实验工作都是在万志敏教授指导和参与下完成的。谭惠丰教授参与该课题部分研究工作。本书旨在对我们这些年在该领域取得的成果和国际在该领域取得的进展进行系统总结。全书由宋宏伟博士执笔完成初稿,并经多次讨论、修改定稿。

第一章综述国内外研究的进展情况,并对本书不涉及的其他耐撞性结构做了概述;第二章介绍圆柱壳轴向冲击吸能的实验方法及相关实验;第三章研究了玻璃纤维环氧复合材料圆柱壳轴向压缩吸能性能,总结了能量吸收影响因素和影响规律;第四章为复合材料圆柱壳轴压理论分析,研究的重点是能量吸收的预报;第五章从冲击动力学的角度对复合材料圆柱壳的轴向撞击渐进破坏响应进行表征;第六章对多种材料形式和结构形式的复合材料圆柱壳偏轴压缩进行了研究;第七章提出一体化的设计思想并讨论了复合材料圆柱壳在车辆碰撞安全和航天器回收领域的设计;第八章讨论传统的金属圆柱壳结构的冲击吸能性能;第九章研究了最新研究进展——多材料体系圆柱壳的耐撞吸能性能。

航天科技集团总公司副总经理马兴瑞教授对本研究工作给予有益指导。航天科工集团总公司李安吾高级工程师对该研究工作给予大力支持和指导。清华大学汽车系范子杰教授、中科院力学所虞钢研究员为本书的成稿提供了有力的支持和帮助。在此表示衷心感谢。

作 者

2003年10月12日

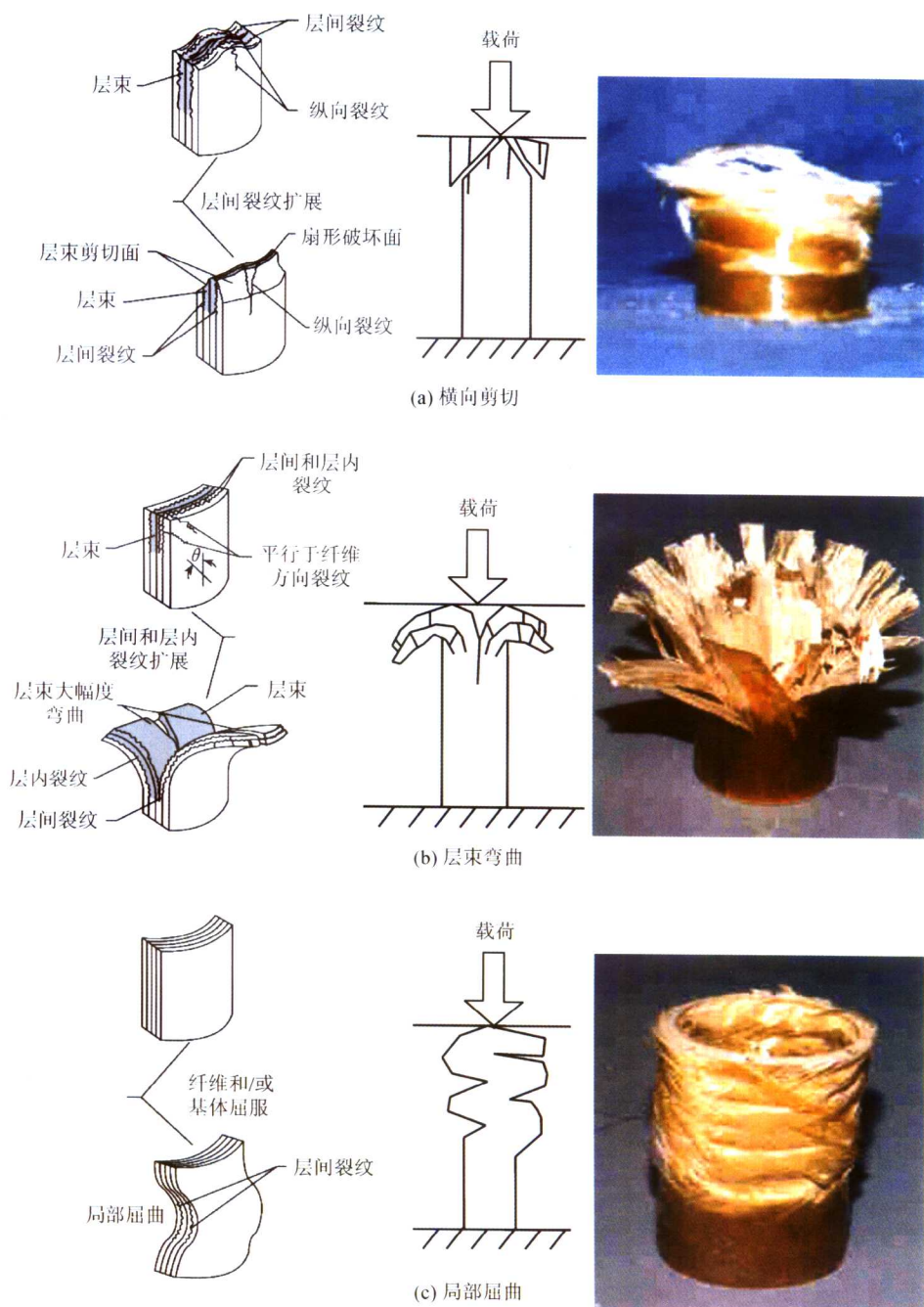


图 3-12 稳态压缩破坏模式示意图，截面图和实物图

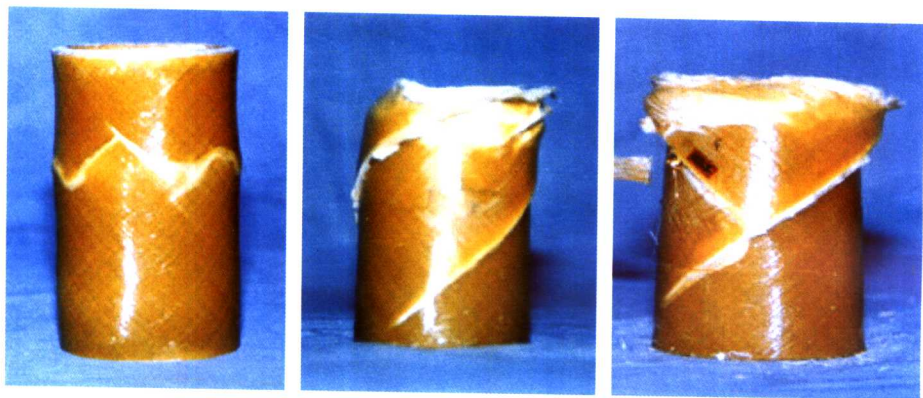


图 3-16 纯剪切导致整体失效

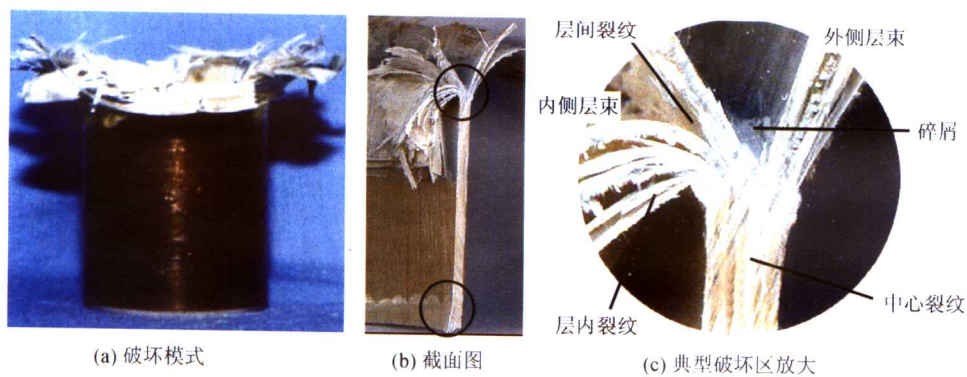


图 3-17 层束弯曲破坏

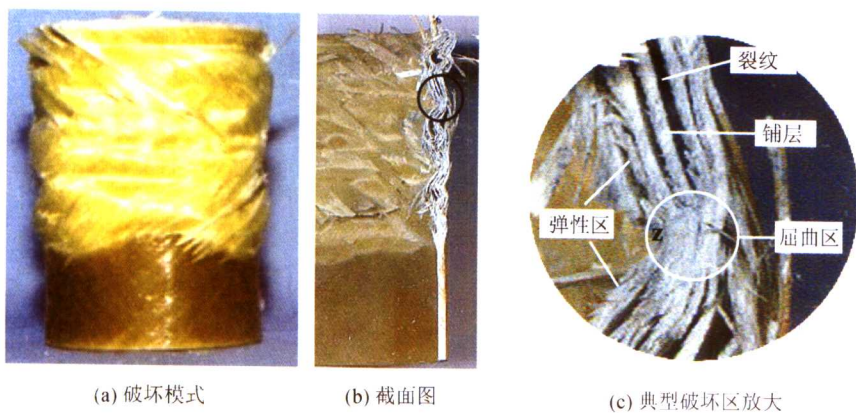


图 3-18 局部屈曲破坏

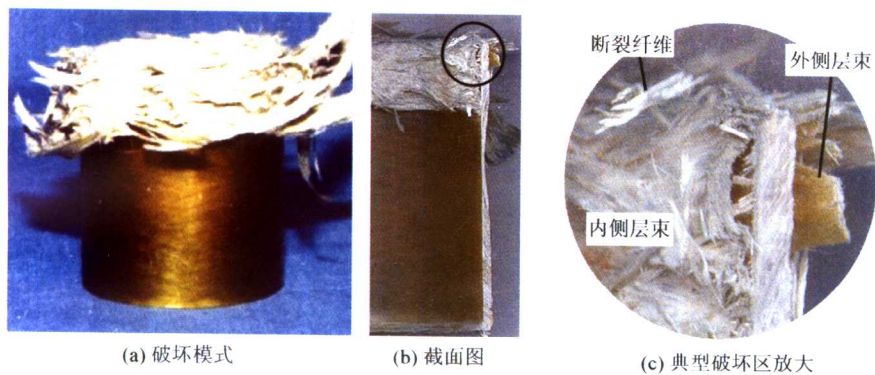


图 3-19 横向剪切破坏

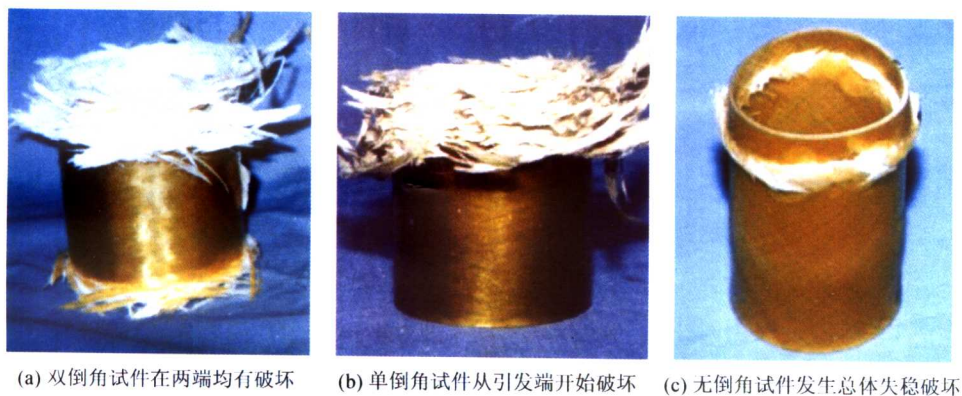


图 3-28 引发方式对试件的破坏行为的影响

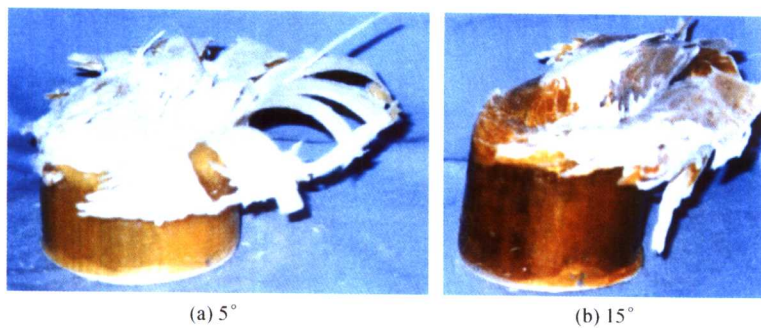
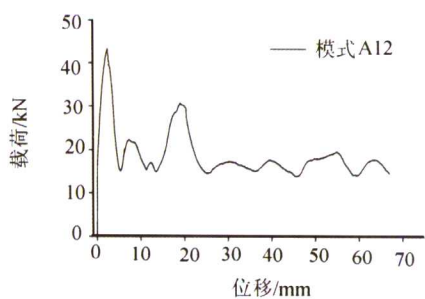
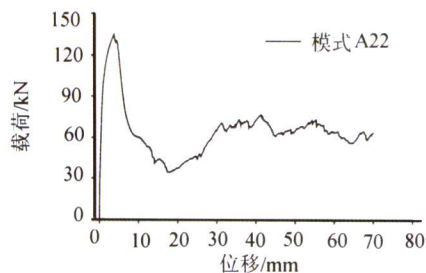


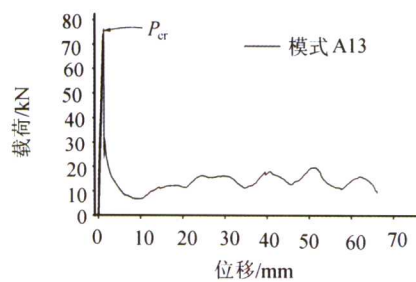
图 6-20 偏轴角度对破坏长度的影响, $[0/\pm 75]_3$ 玻璃/环氧试件



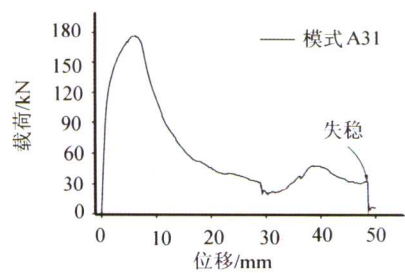
(a) 复合非轴对称破坏



(b) 复合翻裂破坏



(c) 剥离破坏



(d) 总体失稳

图 9-3 典型破坏模式及其特性曲线

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 结构的耐撞性和吸能元件	1
1.2 圆柱壳轴向冲击吸能的研究	2
1.2.1 复合材料圆柱壳结构	2
1.2.2 金属圆柱壳结构	5
1.2.3 多材料体系圆柱壳结构	6
1.3 圆柱壳结构在碰撞安全领域的应用	6
1.4 各类吸能结构的研究	9
参考文献	13
第二章 圆柱壳轴向冲击吸能实验	22
2.1 圆柱壳轴向冲击吸能特点及主要实验装置	22
2.1.1 落锤式实验装置	22
2.1.2 弹射式实验装置	24
2.1.3 改进的 Hopkinson 压杆实验装置	25
2.2 落锤式冲击实验系统及原理	27
2.2.1 落锤冲击加载装置	28
2.2.2 瞬态冲击力测量系统	29
2.2.3 瞬态位移测量系统	29
2.2.4 数据采集系统	32
2.2.5 冲击实验数据处理	32
2.3 圆柱壳轴压吸能准静态实验	34
2.4 圆柱壳轴向压缩实验控制原理	35
2.4.1 动量控制实验	35
2.4.2 动能控制实验	36
2.4.3 位移控制实验	36
2.4.4 缺陷影响实验	36
参考文献	37
第三章 复合材料圆柱壳撞击吸能特性	38
3.1 引言	38
3.2 复合材料圆柱管试件	39

3.3 复合材料圆柱管轴向压缩历程	40
3.3.1 按稳定性划分的压缩历程	40
3.3.2 按破坏形式划分的压缩历程	42
3.3.3 稳态压缩过程的三个阶段	44
3.4 能量吸收特性参数	45
3.4.1 比吸能	45
3.4.2 比载荷	46
3.4.3 引发长度和削弱长度	47
3.4.4 载荷效率和冲程效率	47
3.4.5 其他参数	48
3.5 复合材料管轴压破坏模式及吸能机理	48
3.5.1 复合材料细观断裂机理	48
3.5.2 宏观破坏模式	51
3.5.3 典型破坏模式的能量耗散机理	55
3.6 双倒角引发方式效能	59
3.7 纤维缠绕角度对能量吸收的影响	65
3.8 撞击与准静态吸能特性比较	68
3.9 复合材料圆柱管吸能特性的影响因素	70
3.9.1 组分材料性能的影响	71
3.9.2 铺层结构形式的影响	74
3.9.3 几何尺寸的影响	75
3.9.4 成型工艺的影响	77
3.9.5 实验条件的影响	78
参考文献	81
第四章 复合材料圆柱壳轴压分析	84
4.1 引言	84
4.2 复合材料圆柱壳轴压能量吸收模型	85
4.2.1 Hull 的定性描述	85
4.2.2 Farley 和 Jones 的定性模型	86
4.2.3 Mamalis 的定量分析	86
4.2.4 Gupta 的能量吸收预报模型	88
4.3 纤维缠绕复合材料圆柱壳的弹性常数	89
4.4 层合壳的屈曲分析	94
4.4.1 基本方程	94
4.4.2 临界压力的求解	96
4.5 轴向压缩位移	102

4.6	能量吸收能力分析	107
4.7	基于流变模型的稳态压缩分析	109
4.7.1	模型的提出	109
4.7.2	忽略初始过载的流变模型	112
4.7.3	改进的流变模型	114
	参考文献	116
第五章	复合材料圆柱壳轴向冲击响应	117
5.1	引言	117
5.2	弹性系统的动态稳定性	118
5.2.1	扰动方程	118
5.2.2	不稳定区域的确定	120
5.3	复合材料圆柱壳的动态响应	120
5.3.1	问题的提出	120
5.3.2	非扰动响应	121
5.3.3	几何非线性扰动方程	125
5.3.4	圆柱壳的冲击响应	130
5.4	应力波基本理论	133
5.4.1	一维应力波	133
5.4.2	波阵面上守恒条件	134
5.4.3	复合材料中的应力波	135
5.5	基于应力波理论的等效破坏模型	135
5.5.1	等效假设	135
5.5.2	等效关系	136
5.5.3	刚性重物与等效圆柱的碰撞	138
5.5.4	渐进破坏过程描述	141
5.5.5	结果与讨论	142
5.6	轴向撞击力的简化	143
	参考文献	145
第六章	复合材料圆柱壳偏轴压缩性能	147
6.1	引言	147
6.2	复合材料圆柱管偏轴压缩实验	149
6.2.1	偏轴压缩实验试件	149
6.2.2	边界条件的影响	149
6.2.3	圆柱管偏轴压缩夹具	150
6.3	压缩性能分析	151
6.3.1	典型偏轴压缩历程	151

6.3.2	$[\pm 75]_3$ 玻璃/聚酯复合材料管偏轴压缩性能	154
6.3.3	$[0/\pm 75]_3$ 玻璃/环氧树脂复合材料管偏轴压缩性能	156
6.3.4	$[\pm 15]_3$ 玻璃/聚酯和玻璃/环氧树脂复合材料管偏轴压缩性能	156
6.4	偏轴压缩吸能性能分析	157
	参考文献	160
第七章	复合材料圆柱壳耐撞性设计	161
7.1	引言	161
7.2	理论预报与设计	162
7.3	有限元分析及设计	162
7.3.1	复合材料纵深渐进压溃冲击吸能有限元分析的关键问题	163
7.3.2	基本破坏准则	165
7.3.3	圆柱壳轴压吸能的有限元模型	166
7.3.4	轴压吸能的有限元分析实例	168
7.4	其他优化设计方法	169
7.5	复合材料结构吸能数据库	170
7.5.1	文献数据库	170
7.5.2	材料数据库	171
7.5.3	几何数据库	172
7.5.4	结构形式数据库	173
7.5.5	成型工艺数据库	174
7.5.6	加载条件数据库	174
7.5.7	其他耐撞结构数据库	174
7.6	基于一体化分析的耐撞性设计	175
7.7	圆柱壳吸能结构在航天回收系统中的设计及应用	176
7.7.1	着陆缓冲系统设计准则	176
7.7.2	复合材料圆柱壳的耐撞性设计	178
7.8	圆柱壳吸能结构在车辆碰撞安全中的应用及设计	181
	参考文献	184
第八章	金属圆柱壳冲击吸能特性	186
8.1	引言	186
8.2	金属管试件	187
8.3	典型破坏模式及其特性曲线	188
8.4	能量吸收性能分析	190
8.5	金属管能量吸收理论模型	192
8.5.1	结构动力响应分析的基本方法	192
8.5.2	金属管轴压的静态塑性铰分析	195

8.5.3 金属管轴压的直链移行塑性铰分析	197
8.5.4 金属管轴压的连续移行塑性铰分析	207
8.6 考虑轴向撞击动态响应的分析	212
8.7 金属管轴向撞击有限元分析	215
8.8 金属管吸能结构设计概述	216
参考文献	217
第九章 多材料体系圆柱壳冲击吸能特性	219
9.1 引言	219
9.2 多材料体系圆柱管试件	220
9.3 多材料体系圆柱管稳态压缩过程	221
9.4 典型破坏模式及特性曲线	222
9.5 能量吸收分析	224
9.5.1 复合材料层厚度的影响	224
9.5.2 纤维缠绕角的影响	226
9.5.3 金属材料性能的影响	227
9.5.4 撞击和准静态的影响	227
9.6 多材料体系圆柱管撞击吸能模型	229
9.7 三类圆柱管的缓冲吸能性能比较	236
9.7.1 能量吸收的过渡	236
9.7.2 撞击历程一般规律	237
参考文献	239
附录	240
附录 A 复合材料基本力学性能测试	240
附录 B 刚度系数的确定	242
附录 C 扰动方程参数的确定	244
附录 D 非轴向压缩试件的详细资料	245
参考文献	246

Contents

Foreword

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Structural crashworthiness and energy absorbers	1
1.2 Axial impact and energy absorption of cylindrical structures	2
1.2.1 Composite cylindrical structures	2
1.2.2 Metal cylindrical structures	5
1.2.3 Multi-material cylindrical structures	6
1.3 Applications of cylindrical structures in impact safety	6
1.4 Other energy absorption structures	9
References	13
Chapter 2 Experiments of axial impact and energy absorption of cylindrical structures	22
2.1 Characteristics of axial impact and energy absorption, and main experimental facilities	22
2.1.1 Drop-hammer impact system	22
2.1.2 Catapult impact system	24
2.1.3 Improved Hopkinson pressure bar system	25
2.2 Set-up and working principles of drop-hammer impact system	27
2.2.1 Drop-hammer loading set-up	28
2.2.2 Instantaneous impact force measurement system	29
2.2.3 Instantaneous displacement measurement system	29
2.2.4 Data acquirement system	32
2.2.5 Impact data processing	32
2.3 Quasi-static experiment of cylindrical structures	34
2.4 Controlling mechanisms of axial crushing test on cylindrical structures	35
2.4.1 Momentum controlled experiment	35
2.4.2 Kinetic energy controlled experiment	36
2.4.3 Displacement controlled experiment	36
2.4.4 Weakness controlled experiment	36
References	37

Chapter 3 Impact and energy absorption of composite cylinders	38
3.1 Introduction	38
3.2 Composite tube specimens	39
3.3 Axial crushing histories of composite tubes	40
3.3.1 Crushing histories according to the stability	40
3.3.2 Crushing histories according to the collapse mode	42
3.3.3 Three stages of a stable crushing history	44
3.4 Energy absorption evaluation parameters	45
3.4.1 Specific energy absorption	45
3.4.2 Specific stress	46
3.4.3 Triggering length and weakened length	47
3.4.4 Load efficiency and stroke efficiency	47
3.4.5 Other parameters	48
3.5 Collapse mode and energy dissipation mechanisms of composite tubes	48
3.5.1 Mini-scale fracture mechanisms of composite materials	48
3.5.2 Macroscopic collapse modes	51
3.5.3 Energy dissipation mechanisms of typical collapse mode	55
3.6 Effects of double-chamfer triggering	59
3.7 Effects of filament winding angle	65
3.8 Comparison of impact and quasi-static	68
3.9 Affecting elements on energy absorption of composite tubes	70
3.9.1 Effects of material properties	71
3.9.2 Effects of ply patterns	74
3.9.3 Effects of structural geometry	75
3.9.4 Effects of fabrication techniques	77
3.9.5 Effects of experimental conditions	78
References	81
Chapter 4 Analysis on axial crush of composite cylinders	84
4.1 Introduction	84
4.2 Analytical models for axial crushing energy absorption of composite tubes	85
4.2.1 Qualitative description by Hull	85
4.2.2 Qualitative model by Farley and Jones	86
4.2.3 Quantitative model by Mamalis	86
4.2.4 Energy absorbing prediction model by Gupta	88

4.3	Elastic constants of filament wound composite cylinders	89
4.4	Buckling analysis of laminated cylinders	94
4.4.1	Principal functions	94
4.4.2	Critical force solution	96
4.5	Axial crushing displacement	102
4.6	Energy absorption capability analysis	107
4.7	Rheologic model for stable crushing	109
4.7.1	Basic model	109
4.7.2	Rheologic model ignored initial peak load	112
4.7.3	Improved rheologic model	114
	References	116
Chapter 5	Axial impact response of composite cylinders	117
5.1	Introduction	117
5.2	Dynamic stability of elastic system	118
5.2.1	Disturbance functions	118
5.2.2	Determining unstable areas	120
5.3	Impact response of composite cylinders	120
5.3.1	Problem proposal	120
5.3.2	Non-disturbance response	121
5.3.3	Geometrical nonlinear disturbance functions	125
5.3.4	Impact dynamic of cylinders	130
5.4	Principles of stress wave	133
5.4.1	One dimensional stress wave	133
5.4.2	Conservation conditions	134
5.4.3	Stress wave in composite materials	135
5.5	Equivalent model based on stress wave theory	135
5.5.1	Equivalent assumption	135
5.5.2	Equivalent relationship	136
5.5.3	Rigid weight impact on equivalent column	138
5.5.4	Progressive damage process	141
5.5.5	Results and discussions	142
5.6	Reduction of axial impact force	143
	References	145
Chapter 6	Non-axial crushing behaviors of composite cylinders	147
6.1	Introduction	147
6.2	Off-axial crushing tests of composite cylinders	149

6.2.1	Specimens	149
6.2.2	Effects of boundary conditions	149
6.2.3	Clamp set-up for off-axial crushing test	150
6.3	Crushing behaviors	151
6.3.1	Typical off-axial crushing history	151
6.3.2	Off-axial crushing of $[\pm 75]_3$ glass/polyester tubes	154
6.3.3	Off-axial crushing of $[0/\pm 75]_3$ glass/epoxy tubes	156
6.3.4	Off-axial crushing of $[\pm 15]_3$ glass/polyester and glass/epoxy tubes	156
6.4	Energy absorption tendency	157
	References	160
Chapter 7	Crashworthiness design with composite cylindrical structures	161
7.1	Introduction	161
7.2	Theoretical prediction and design	162
7.3	Finite element analysis and design	162
7.3.1	Key problems in FEA of longitudinal progressive crush of composite structures	163
7.3.2	Fracture criteria	165
7.3.3	Finite element model of axial crushing of composite cylinders	166
7.3.4	Example of FEA on axial crushing of composite cylinders	168
7.4	Other optimization and design methods	169
7.5	Energy absorption database of composite structures	170
7.5.1	Reference database	170
7.5.2	Material database	171
7.5.3	Geometry database	172
7.5.4	Structural character database	173
7.5.5	Fabrication character database	174
7.5.6	Loading condition database	174
7.5.7	Other crashworthy member database	174
7.6	Crashworthiness design based on the systemic approach	175
7.7	Design and application of cylindrical structures in aircraft recovery	176
7.7.1	Design rules of the landing and attenuation systems	176
7.7.2	Crashworthy design of composite cylindrical structures	178
7.8	Design and application of cylindrical structures in impact safety of vehicles	181
	References	184