

薄壁钢管动力全屈曲 变形分析及计算

BAOBI GANGGUAN DONGLI QUANQUOU
BIANXING FENXI JI JISUAN

顾红军 方维凤 郭胜鹏 著

本书特色:

- ✿ 薄壁钢管轴向动力屈曲变形的分析及计算方法;
- ✿ 薄壁钢管径向动力屈曲变形的分析及计算方法;
- ✿ 薄壁钢管动力屈曲应变率效应。



国防工业出版社

National Defense Industry Press

薄壁钢管动力全屈曲 变形分析及计算

顾红军 方维凤 郭胜鹏 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

薄壁钢管动力全屈曲变形分析及计算/顾红军,方维凤,
郭胜鹏著. —北京:国防工业出版社,2009.1

ISBN 978-7-118-06068-3

I. 薄... II. ①顾...②方...③郭... III. ①钢管—
屈曲—分析②钢管—屈曲—计算 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 183965 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 4 $\frac{1}{2}$ 字数 124 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 25.00 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

本书是关于薄壁钢管动力屈曲变形分析及计算的学术专著。对钢管抗冲击结构的研究和应用,早已在民用工程领域中出现。在最初的工程应用中钢管一直被看作硬质材料,甚至是刚性材料。20世纪70年代,美国福特公司研究人员发现钢管在高速撞击情况下表现出流动性(屈曲)和高能量吸收特性,因此将其应用于车辆的防撞安全设计中。这是最早将钢管应用于防护设计领域。随着对钢管特性尤其是动力特性认识的深入,利用钢管设计防撞缓冲装置越来越被人们认可,不久,钢管的应用就被拓展到高速公路隔离带。

在国防建设中,针对现代迅速发展的高强度、大当量爆炸产生的爆炸冲击载荷,采用过去的高强度、高钢度的纯钢性设计概念进行防护工程结构件设计,难以满足某些机动性与安全性同时达到技术指标的要求。一种引入缓冲、吸能机理的半刚性设计概念出现在现代防护工程设计中。在这一新概念的引导下,基于钢管在高速动力载荷下的流动性(屈曲发展)和吸能特性,针对爆炸载荷的爆炸效应,钢管开始被应用于军事防护工程设施。

为了合理、科学、高效、安全地采用钢管构造防护工程结构件,必须明确钢管在爆炸冲击载荷作用下的行为,即在爆炸载荷下钢管的结构响应,确定钢管的变形尺度与爆炸冲击载荷之间的关系。对钢管的全屈曲描述可以反映钢管大变形吸能全过程,为吸能装置器材设计服务。

但屈曲过程涉及大变形、非线性 瞬态效应、应变率效应等诸

多难点,寻求精确解理论描述十分困难。而这些问题的解决,其理论价值和工程意义都极其巨大。随着计算机技术的发展,数值解不失为一种解决问题的有效途径,也为该问题的深入研究开辟了一条新的思路。

本书在反映国内外其他学者研究成果的同时,介绍了本书作者在这方面的研究成果。作者经过对多种动力实验环境条件下所得的实验结果分析比较,结合理论分析,尝试采用数值解法使这一问题得到了初步解决。本书内容主要包括薄壁钢管径向动力屈曲变形的分析及数值计算方法、薄壁钢管轴向动力屈曲变形的分析及数值计算方法以及薄壁钢管动力屈曲应变率效应。

本书适合高等院校土木、机械、冶金、材料及力学类等有关专业研究生和有关科研人员阅读或参考。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 薄壁钢管轴向动力屈曲变形	1
1.1.1 实验	1
1.1.2 理论	3
1.2 薄壁钢管径向动力屈曲变形	5
1.2.1 实验	5
1.2.2 理论	6
第 2 章 薄壁钢管径向受力分析及实验	9
2.1 圆截面薄壁钢管力学分析	9
2.1.1 圆管受力分析	9
2.1.2 圆管极值内力分析	13
2.1.3 破坏模态分析及结论	18
2.2 矩形截面薄壁钢管力学分析	19
2.2.1 矩形管受力分析	19
2.2.2 矩形管极值内力分析	21
2.2.3 破坏模态分析及结论	26
2.3 准静态压力实验	27
2.3.1 单个圆管压力实验	27
2.3.2 排式圆管压力实验	30
2.3.3 矩形管压力实验	42

2.4	梯度药量爆炸实验	45
2.4.1	薄壁钢管爆炸实验	45
2.4.2	普通钢管爆炸实验	49
第3章	无侧限薄壁钢管径向动力屈曲变形	53
3.1	模态解方法	53
3.2	单个圆管动力屈曲变形分析	55
3.2.1	实验现象	55
3.2.2	基本假定	56
3.2.3	变形模态设定	56
3.3	单个圆管动力屈曲变形计算	57
3.4	多层钢管动力屈曲变形计算	61
第4章	排式薄壁钢管径向动力屈曲变形	65
4.1	排式圆形截面薄壁钢管动力屈曲变形分析	65
4.1.1	实验现象	66
4.1.2	基本假定	67
4.1.3	变形模态	67
4.1.4	转动区尺寸及塑性铰位置	68
4.2	排式圆形截面薄壁钢管动力屈曲变形计算	69
4.2.1	动力压扁运动场	69
4.2.2	模态解方程	74
4.2.3	塑性铰处塑性弯矩	77
4.2.4	初始条件	77
4.2.5	钢管变形响应	79
4.3	排式矩形截面薄壁钢管动力屈曲变形分析	85
4.3.1	实验现象	85
4.3.2	基本假定	86

4.3.3	变形模态	87
4.4	排式矩形截面薄壁钢管动力屈曲变形计算	88
4.4.1	动力屈曲第一阶段	88
4.4.2	动力屈曲第二阶段	95
第5章	薄壁钢管轴向动力屈曲变形	101
5.1	准静态压力实验	102
5.1.1	单个钢管压力实验	102
5.1.2	密集钢管压力实验	103
5.2	落锤冲击实验	105
5.3	实验结果	106
5.4	轴向动力屈曲变形分析	107
5.4.1	轴对称屈曲变形	108
5.4.2	非轴对称屈曲变形	109
5.4.3	钢管屈曲变形的有效压缩距离	111
5.5	轴向动力屈曲变形计算	113
5.5.1	轴对称动力屈曲变形计算	113
5.5.2	非轴对称动力屈曲变形计算	116
5.6	非轴对称屈曲变形发展趋势	122
第6章	薄壁钢管动力屈曲应变率效应	126
6.1	应变率效应对固体材料特性的影响	126
6.2	过应力模型理论	127
6.3	薄壁钢管径向动力屈曲应变率效应	128
6.3.1	排式圆形截面钢管动力屈曲应变率效应	128
6.3.2	排式矩形截面钢管动力屈曲应变率效应	131
6.4	薄壁钢管轴向动力屈曲应变率效应	133
	参考文献	137

第 1 章 绪 论

1.1 薄壁钢管轴向动力屈曲变形

早在 20 世纪 60 年代,便开始了对圆柱壳轴向动力响应的研究。人们通过各种实验手段观察到轴向冲击载荷下圆柱壳不同的响应特性,并寻求适合的理论解释这些现象,几十年来,成果丰富。但这一问题并没有得到完善的解答,因此研究也一直在不断深入之中。

1.1.1 实验

20 世纪 60 年代初 Coppa 用实验方法讨论了圆柱壳轴向动态屈曲,并指出动态问题与静态问题相类似。Almroth 和 Lindberg 发现受轴向载荷壳体的屈曲波纹在初始阶段已经确定。Gordienko 分析了圆柱壳一端受冲击载荷作用的情况,并且在实验中观察到轴向冲击下壳体会发生非轴对称屈曲。随后,Zimcik 在圆柱壳承受轴向矩形脉冲的实验中发现,完善壳和具有轴对称初始缺陷的圆柱壳动屈曲模态呈轴对称形式,而具有非对称初始缺陷的圆柱壳,动屈曲模态呈非轴对称形式。

20 世纪 80 年代,北京大学王仁教授对受轴向冲击圆柱壳进行了实验研究。通过对铝合金材料三种不同厚度圆柱壳的实验发现:壳体动力屈曲存在两个临界失稳速度,当速度低于第一临界失稳速度时,壳体只发生均匀的轴向缩短和均匀的环向扩张;在速度等于或大于第一临界失稳速度而小于第二临界失稳速度时,出现轴对称的正弦波,半波数几乎与速度无关;当速度等于或大于第二

临界失稳速度时,壳体将出现大挠度的非规则屈曲形式,这时壳体明显丧失了承载能力,相应的半波数也略有减少。第一临界失稳速度即为通常意义上的屈曲阈速度,而相应于非均匀非轴对称屈曲模态的第二临界失稳速度是首次发现。

20 世纪 90 年代,韩铭宝等通过实验得出:当壳体很薄时,非轴对称屈曲临界速度(第二临界速度)会比轴对称屈曲临界速度(第一临界速度)小。

陈长安等在实验中发现了两瓣、三瓣等非轴对称屈曲模态,并注意到当冲击载荷相对小时,应力波反射后壳体发生屈曲。

马宏伟等对受轴向冲击圆柱壳的塑性动力屈曲进行了实验研究,从实验中得到了对应于轴对称屈曲模态的第一临界速度及对应于椭圆形和三角形两种非轴对称屈曲模态的第二临界速度,并得到了一些有益的结论,如:讨论后屈曲问题时,必须考虑横向惯性效应。

进入 21 世纪,随着计算机硬件和软件的飞速发展,基于计算机技术的数值模拟仿真日趋成熟,为科学研究开辟了一条新的途径。2004 年,姜正旭等为了研究轴向冲击下圆管的不同屈曲模式产生原因,采用动力显式有限元法进行了大量数值模拟,认为初始几何缺陷的随机性是产生不同失效模式的原因之一。

岳建军进行了冲击载荷作用下圆柱壳型结构的动力响应分析与仿真模拟。分析了轴向冲击载荷作用下非线性弹性圆柱壳轴对称动力响应问题和缺陷圆柱壳的非轴对称弹塑性动力响应问题,运用 Matlab/Simulink 工具对受轴向冲击圆柱壳的动力响应过程进行了动态仿真,后又用有限元分析程序 ANSYS/LS-DYNA 分别对圆柱壳型结构碰撞和流-固冲击结构动力响应问题进行了仿真分析,得出了一些有意义的结论。

2006 年,陈永涛等基于有限元仿真研究了薄壁圆柱壳轴向动力屈曲问题,通过比较撞击系统动能的时间历程和屈曲变形的时间历程,提出了用以确定第二临界速度的能量迭代法,并用落锤冲击实验验证了该方法的可行性和正确性。仿真结果还表明,轴向

冲击下的薄壁圆柱壳,随径厚比增加,折曲边数有明显增加趋势。

乔及森等对铝合金薄壁方管结构进行了轴向动静载挤压实验和有限元仿真研究,描述了方管的失稳变形特征。其研究表明:初始冲击速度对该类铝合金试件的承载性能无明显影响,但对变形有较大影响。

2008年,赵广臣等用 LS-DYNA 对不同材料圆柱壳在轴向冲击下的屈曲行为进行了数值模拟,得到了钢管在冲击下的皱折模态。

路国运和张善元采用落锤及空气动力枪对铜、铝、钢质圆管进行了轴向冲击实验,得到了丰富的屈曲模态及冲击力时程曲线,指出了高速撞击不是产生动力塑性屈曲的充要条件,对某些韧性材料撞击速度不很高时也能出现动力塑性屈曲;动力塑性屈曲仅仅是在一个持续的轴向塑性流动内能够产生,动力渐进屈曲是塑性应变局部化的结果。

1.1.2 理论

20世纪60年代,Florence通过建立扰动微分方程进行理论分析,将屈曲位移展开为无穷级数代入扰动方程获得屈曲模态,屈曲的判别准则通常采用放大准则,这一方法后来被许多人认可并推广。

Goodier 和 Melvor 最早得出了圆柱壳弹性稳定性公式。Lindberg 将这些公式应用于壳体的动态脉冲屈曲,得出了径厚比为 100~400 的壳体屈曲方程式。

20世纪80年代初,Zimcik 对径厚比在 100~600 范围内承受轴向矩形脉冲的圆柱壳进行研究,理论分析采用 Karm-Donnell 大变形方程,假设屈曲函数,利用 Galerkin 数值方法求解。

同时期,王仁教授等在对临界失稳速度的理论分析中,采用放大函数法,假定屈曲模态仅为轴向坐标 X 的函数,由此给出了第一临界失稳速度 $V_{c1}^2 = 2\pi h^2 L \sigma^0 / M$,并通过考虑应变率反向来得第二临界失稳速度的近似估算式:

$$\left| 2\pi^2 n^2 \left(\frac{M + M_1 + \alpha m}{m} \right) \left(1 + \frac{ahn^2\pi^2}{2L^2} \right) a_n \bar{B}_n(0) \right| = 1$$

20 世纪 90 年代,徐新生等研究了应力波传播过程中弹塑性圆柱壳的轴对称屈曲问题,通过建立和求解扰动方程得到动态屈曲的分叉条件、临界载荷和屈曲模态,认为应力波的传播和反射导致弹性圆柱壳屈曲的发生和生长,屈曲的形式可以是轴对称屈曲和非轴对称屈曲,屈曲的时间依赖于冲击载荷。一般地讲,冲击载荷大,发生屈曲的时间就短;临界载荷由分叉条件确定,并依赖于材料常数、结构参数和冲击时间;壁厚相对较大时易发生轴对称屈曲,而壁厚相对较小时易发生非轴对称屈曲;当非轴对称屈曲阶数增加时,环向屈曲波纹随之增加,由于应力波在端部的反射,临界载荷降低。

张善元等对各向同性线性强化刚塑性圆柱壳在轴向冲击载荷作用下的屈曲行为借助放大函数法进行了理论分析,在分析中直接令屈曲模态包含轴向坐标 x 和环向坐标 θ ,通过最优模态的分析可以直接得到相应于圆柱壳发生轴对称和非轴对称屈曲模态的临界速度,在此基础上进一步讨论了临界速度与径厚比的关系。

顾王明等研究了圆柱壳在两参数轴向冲击载荷下的弹塑性动力屈曲问题。基本控制方程由加速度最小原理获得,本构关系采用增量理论。研究表明:屈曲过程可划分为两相,两相之间由临界时间 t^* 表征,并分别讨论了应力波对屈曲的影响,压缩波与弯曲波的相互作用及几何尺寸、材料参数、初始缺陷、载荷峰值和持续时间等诸多因素与动力屈曲的关系。

吴亚舸等根据势能驻值原理,建立了均匀受压矩形管的大挠度弹性屈曲理论,用于分析屈曲后相邻板件间的相互约束作用,即屈曲后板组效应。

2000 年刘理等研究了时变轴向冲击载荷作用下圆柱壳的弹塑性动力屈曲,运动方程采用 Karman - Donnell 运动方程,考虑了应变率效应,借助增量数值方法求解运动方程。计算表明:应变率敏感性显著提高了抗冲击屈曲能力;基于 B - R 准则的屈曲判断

方法和采用 Southwell 方法分析动力屈曲问题时,可以获得较为一致的临界屈曲载荷;在某些参数范围内,几何参数(R/h)和材料硬化参数(λ)对圆柱壳弹塑性屈曲的临界载荷都有较大的影响。2002 年,刘理等分析了复杂载荷作用下圆柱壳的弹塑性动力屈曲,基于 Hamilton 原理导出运动方程,借助增量数值方法求解。结果表明:均匀径向外压对圆柱壳轴向冲击屈曲过程、屈曲性态、抗冲击屈曲能力及动力失效临界载荷都有很大影响。

以上所述都是单个圆柱壳受轴向冲击载荷作用弹塑性动力屈曲问题的研究。密集圆柱壳在轴向爆炸及冲击载荷作用下的弹塑性动力屈曲问题对于抗爆结构的吸能装置设计具有重要意义,但由于密集圆柱壳之间相互形成约束,其变形形式与单个圆柱壳相比存在明显差异,给理论研究带来麻烦,而密集圆柱壳的不同排列情况,又造成圆柱壳之间相互形成约束的形式存在差异,这些差异也使得理论分析困难程度增加,以致于相关研究成果的报道比较少见。

1.2 薄壁钢管径向动力屈曲变形

人们在研究轴向屈曲问题的同时就注意到圆柱壳受径向载荷屈曲问题具有重要的工程应用价值,因此对这一问题的研究一直也比较活跃,随着研究的深入,得出了许多重要成果。

1.2.1 实验

20 世纪 60 年代,Abrahamson 进行了单个圆柱壳受径向冲击实验,为了解释实验中重复观察到的轴向屈曲波形,假设材料刚线性强化,不计应变率反号,用初始缺陷放大准则获得了和实验吻合较好的屈曲模态数和临界冲击速度。

DeRuntz 和 Hodge、Bueton 和 Craig 对两刚性平板间钢管的大变形规律进行研究,发现钢管受横向载荷屈服后大变形行为基本上为四塑性铰机构。这一研究成果为钢管屈曲大变形实验研究提

供了一套实用而又简明的方法和思路。

20 世纪 90 年代,曾首义等利用激波管模拟产生冲击波进行了位于两刚性平板间钢管横向动力压扁实验,实验对象为单个钢管,实验结果验证了钢管屈曲后四塑性铰变形机构。随后又利用激波管模拟产生冲击波进行了多层钢管的横向动力压扁实验,实验结果仍为四塑性铰机构。

2003 年,秦庆华等进行了薄壁圆管经受侧向冲击的落锤冲击实验和计算机仿真,获得了不同冲击能量下两端固支薄壁圆管的整体变形模态和冲击点附近局部压溃模态的发展过程。实验研究和计算机仿真结果表明,局部变形和整体变形的耦合与径厚比和跨径比等因素有关。

1.2.2 理论

在 Abrahamson 最早对单个圆柱壳受径向冲击的塑性动力屈曲研究基础上,Lindber 等将弹性影响因素考虑进来,并考虑了应变率反号的影响,进一步地 Florence 做了粘塑性分析。考虑壳厚影响最早也是从 Abrahamson 开始,随后 Florence 等在此基础上考虑了应变率效应。Deffey、Florence 等分析了冲击速度变化对壳体屈曲过程的影响,这些工作为后来该领域的理论分析奠定了基础。

1968 年 Florence 首先将 Goodier 研究板塑性屈曲中的方向矩概念引入到圆柱壳的计算中,并分析了短壳受径向冲击的塑性动力屈曲问题,在圆柱壳动力屈曲理论计算方面具有新意。1970 年 Vaughan 用同样方法分析了有限长圆柱壳的情形,得出了一些对当时的研究有一定影响的结论。1978 年 Reid 和 Reddy 重新进行了实验和理论分析,明确了钢管塑性大变形承载力增加是因为钢管在压扁过程中载荷力臂变短及材料硬化所致,同时结合考虑线性硬化,获得了一个令人满意的理论解。

国内在这方面的研究也比较活跃。茹重庆、王仁按能量原理讨论了受径向冲击载荷下圆柱壳的塑性屈曲问题,得到了具有重大理论和应用价值的临界冲击速度计算公式:

$$V_0 = \frac{4h}{a} \sqrt{\frac{E_h}{12\rho}}$$

顾王明等分别对各种不同冲击载荷作用下的圆柱壳屈曲行为进行了探讨,并且引入了不同的算法及材料假设,得出了一些有价值的结论。

对于圆柱壳在径向冲击作用下其大变形吸收能量过程的描述,由于理论分析难度较大,见诸报道的成果也比较有限。相应地,以大量实验为基础的经验公式和近似解,给问题的解决提供了一条有效路径。20 世纪 90 年代初,张铁光等在考虑了应变强化的因素下,对放置在刚性平板间的圆环受落锤冲击的动力响应作了粘塑性大变形分析,基于四塑性铰机构,把问题简化为只有一个自由度的系统,得到圆环变形挠度计算式:

$$\sigma_{i+1} = 2R \sin \beta_{i+1}$$

计算过程发现,在运动初期应变率效应起主要作用,在运动后期应变强化使圆环承载能力提高。

曾守义等将冲击波作用下的钢管吸能装置等效为一个单自由度弹塑性模型(如图 1-1 所示),提出了钢管屈服载荷动力提高系数的经验公式:

$$k_d = 1 + 0.2 \ln \frac{V}{V_0}$$

并对钢管的动抗力函数作了“三折线”假设,应用线性加速度法对

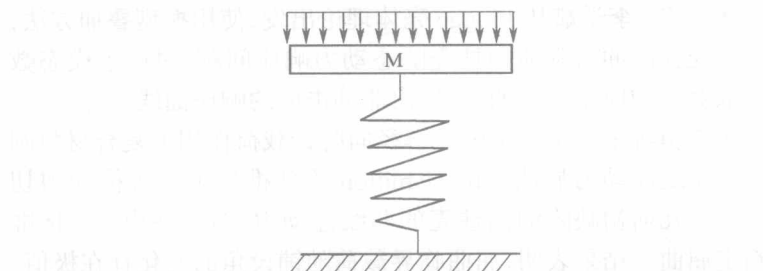


图 1-1 单自由度模型示意图

不同情况下的钢管变形规律及其对底座的作用力进行了数值求解,计算结果与实验值吻合较好。

同年,曾首义等根据激波管实验结果,假设钢管径向动力压扁四塑性铰模型,给出了钢管动力压扁模态解,首次将模态解方法应用于钢管动力屈曲问题。20世纪90年代末,曾首义等又建立了多层钢管径向动力压扁模态方程,通过对6种钢管和前板组合的实例计算,得出结论:调整钢管的软硬、层数和系统惯性,可以控制管系的变形和传递的载荷大小。

2000年,姜锡权、方秦论述了横向受压钢管作为能量吸收装置在外载下变形、吸能、减缓脉冲作用的物理过程,指出在装置的变形、吸能过程中动量定理成立。他们将装置简化为简单质量弹簧体系,提出了建立装置在动载下的抗力函数的一种方法。并指出等效静载衰减率可以作为评价较长作用时间动载作用下吸能装置吸能功效的一个重要指标。

2003年,吕波等运用弹性理论的原理和方法给出了矩形管结构在载荷作用下的稳定性解答。按照弹性力学思路,根据边界条件定义了一个挠曲函数:

$$W(x, y) = \left[c_1 + c_2 \left(\frac{x}{a} - \frac{2x^3}{a^3} + \frac{x^4}{a^4} \right) \right] \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi y}{2b} \right)$$

结合能量原理,利用里兹法来确定待定系数 c_1 、 c_2 。通过对关于待定系数的齐次线性方程组的讨论,得到矩形管的稳定性方程,从而求得最小临界力。

2006年,李学斌从Flugge壳体理论出发,使用振型叠加方法,分析了受径向冲击载荷圆柱壳瞬态动力响应问题,讨论了模态数量选取对于响应量的影响,并给出非冲击面的响应曲线。

唐文勇等采用半解析法求解径向阶跃载荷作用下复合材料圆柱壳的非线性动力屈曲。由Hamilton原理推导出包含横向剪切变形以及几何初缺陷的圆柱壳的非线性动力方程,并由B-R准则判定屈曲。结果表明,屈曲临界载荷随铺设角的变化存在极值,对既定结构可以通过调整铺设角提高结构的抗屈能力。

第2章 薄壁钢管径向受力分析及实验

对于薄壁钢管(本书中的薄壁钢管如未加说明即指圆形截面薄壁钢管),单排和多排的受力情况有所不同,钢管排列的疏密程度不同,其受力情况也不尽相同,通过分析可归为以下几类讨论。

2.1 圆截面薄壁钢管力学分析

2.1.1 圆管受力分析

2.1.1.1 一排圆管

一排圆管分疏排(图2-1)和密排(图2-2)两种形式,其受力状态也为两种(图2-3)。

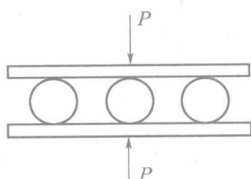


图2-1 疏排

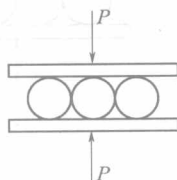


图2-2 密排

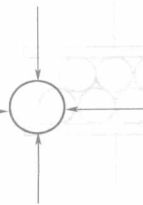


图2-3 受力图