

理论。本文认为要
要考虑结构物理
极限承载力的因
生、材料力学性
缺陷的影响是最
屈曲全过程分
理论意义上被
计算值与实验
作过程中产生
考虑结构缺
多情况属于极
非线性和物理
控制方程复杂
单的弹性稳
法或奇异摄
情况的薄壁
分析方法
迄今为止
大应变分
入研究。

结构的缺陷
主要是指制
形等初挠
出现的裂
、疲劳裂
和腐蚀裂
纹等。严格讲
物理缺陷又
宏观缺陷
宏观缺陷两大类。材料的细观缺陷
称为损伤
主要指由环境、荷载或变形引起的
宜采用连续介质损伤力学
方法来考
而宏观
缺陷则起着类似裂纹或诱导裂纹的作
按等效
裂纹处理
采用断裂力学方法分析。关
缺陷薄壁
结构的设计理论与应用 国内外开展
研究工作
但对含物理缺陷薄壁结构的研究工
且起步
所以计及损伤和裂纹影响的薄壳
论正是
需要进一步深入研究的重要课题。

破坏。 先后研究了边界附近 和局部轴对
处。圆柱壳的局部破坏 滕锦光则研究了具有搭
圆柱壳的塑性破坏。研究表明 圆柱壳在边
“鱼脚”破坏时强度较低。他们在加工几
影响方面的取得了系列具有
概念和公式被欧洲
情况有弹性解

定性理论目前正在进入第四阶段 即
缺陷的影响。众所周知 影响薄壳结构
包括 结构形状尺寸、荷载的不均匀
结构存在的缺陷和残余应力等 其中
显的。有些学者认为 在薄壳结构失
的问题解决之后 失稳问题已经在一
决了 至于仍存在的失稳临界荷载理
的较大误差则被归咎于实验模型加工
初始缺陷的影响⁴。

和材料塑性影响后 非线性屈曲问题
点屈曲问题。这类问题同时包含了几
线性及其相互作用的影响 涉及因素
所以一般很难取得解析结果。对于一
问题 在一定的假设条件下 可以利用
法得到半解析计算结果。而对于更为
构的非线性弹塑性稳定分析 有限元
成为一种不可替代的强有力工具。
开发出的许多壳元都不具有普适性
的薄壳有限元还远未成熟 有待于进

常可分为几何缺陷和物理缺陷。几何
和运输过程中产生的加工误差、焊接
物理缺陷则指材料冶炼和结构制造
、空穴、夹渣、焊接未熔合等 服役中产
、疲劳裂
和腐蚀裂
纹等。严格讲 物理缺陷又
宏观缺陷
宏观缺陷两大类。材料的细观缺陷
称为损伤
主要指由环境、荷载或变形引起的
宜采用连续介质损伤力学
方法来考
而宏观
缺陷则起着类似裂纹或诱导裂纹的作
按等效
裂纹处理
采用断裂力学方法分析。关
缺陷薄壁
结构的设计理论与应用 国内外开展
研究工作
但对含物理缺陷薄壁结构的研究工
且起步
所以计及损伤和裂纹影响的薄壳
论正是
需要进一步深入研究的重要课题。

薄壳非线性稳定理论与应用研究的发

展趋势可见

薄壳有限元分
影响 带裂

2 薄壳非线

薄壳结构的
情况有弹性解

下直接法所需的单元数是壳理论法或退化法的 倍。

最广泛使用的数值算法应该属于所谓的退化连续方法例 和 ²。与壳理论方法比退化方法更简单但对非线性大变形非弹性壳其模式仍然是非常复杂的。这主要是因为一些退化连续元面临着剪切自锁和薄膜自锁问题 和 。为了避免这样的数值病态现象不可避免的要采用复杂的混合模式例如“增强应变”模式或其它不协调单元方法。而且要嵌入像含损伤有限应变的热弹粘塑性这样的复杂本构关系是非常困难的甚至是不可能的。

和 ⁴ 试图采用窗函数 并基于无网格插值按照三维情况直接模拟薄壳或薄板结构的大变形行为。与以前类似的工作 相比该研究的进步在于采用了基于高阶无网格插值的窗函数并按照三维连续体直接模拟薄壳结构的大变形行为。针对三种不同材料本构关系的数值结果表明该法用于模拟薄壳结构的非常大变形过程是可行的。该法的优点是公式简单、精度提高不仅可以减轻剪切自锁、体积自锁以及由于小厚度和大转动引起的病态而且可以通过相当少的厚度方向的粒子不超过 个捕捉到厚度方向的梯度场。三维网格有限元直接方法正是由于缺乏这些能力而在发展中受阻的。

虽然还不能完全理解基于无网格插值的窗函数为什么具有如此卓越的性能但客观合理的解释是首先基于无网格插值的窗函数是一种“高阶的流型”

离散意味着离散场是高度光滑的通常要高于 Ω 。这种高度光滑的离散明显具有减轻由于最小尺寸模数引起的病态的趋势对计算无疑是有利的。特别是这里采用的“高阶的流型”离散能做到增加离散的光滑度而不增加系统的自由度或总粒子数。这在有限元插值中几乎是不可能的。这种特性说明特定的减少积分的对策是存在的可以做到减轻自锁同时避免欠秩。其次在大变形计算中无网格形函数支持相对大尺寸可以延迟网格扭曲奇异性。所以与有限元法相比这样的无网格计算能够允许非常大的变形而不需重新划分网格或重置粒子点。高阶有限元法也许具有无网格法的这些特性但是对于三维薄壳结构用有限元法构建高阶单元系统需要沿厚度方向设置更多的分布节点从而导致代数系统的不良状态。这可能就是高阶有限元法的计算实践很少在文献中报导的原因。

用无网格法模拟薄壳的非线性问题的研究是很有发展前景的。但目前还处在发展的初步阶段还需做进一步的比较研究定量评估其数值精度。

在薄壳非线性稳定性的有限元模拟研究方面近期的一些有特点的工作还有按发表时间为序

和 提出了一种适用于柱支撑回转壳的局部整体有限元模型。在一个结构分析中模型

包含了对称壳元、一般的壳元和柱元。在塔的对称部分采用对称的或回转的壳元而荷载和变形的不对称性通过适当的 谐函数来考虑在柱的支撑区域采用个别的柱元壳元来模拟介于对称区域和柱支撑区域之间的部分称为局部区域单元包括柱元和一般的壳元。另外壳的任何几何对称性偏差如不完整性和切口在局部区都很容易被考虑。有关局部整体有限元方法研究的最新进展可参见 和 的综述介绍。

⁸介绍了群理论在对称结构的非线性屈曲分析中的应用。研究发现板和回转壳的有限元模式的正交转换矩阵具有稀疏性在计算上提供了非常有效的对称转换利用群理论方法很容易处理计算中常常出现的病态条件问题。并指出了群理论有限元法今后的发展方向自动群分析²非对称问题的预调节并行计算⁴采用自动微分法对对称刚度块进行有效计算。

和 比较分析了三种4节点和节点有限元元在新近建立的具有自由度的有限变形壳理论中应用情况。该理论考虑了沿厚度的变化并采用了转动张量可以采用三维本构关系在具有向量结构的构形空间描述。单元既可以是应力杂交元、应变杂交元也可以基于非线性增强应变的概念的单元。不管是与中面变形有关的应变张量还是不协调增强应变场都是独立的变量。主要结论是网格正常时应力杂交元和增强应变元就是完全等效的节点单元虽然不如4节点经济但其更完备、对网格的畸变敏感性最小。

几何不完整性在薄壁结构屈曲承载力的评估中起着重要作用。由于这样的几何不完整性的形状和分布是随机变化的所以确定导致最小屈曲承载力的临界不完整性的位形就变得极具有挑战性。和 ⁴⁰采用了一种基于二进制遗传算法的优化技术和一种非线性有限元模型探讨了薄壁焊接结构的不完整性的临界位形。分析了轴压作用的圆柱壳和静水压力作用的锥形容器的非线性稳定性和相应的屈曲荷载。

和 ⁴提出了一种简单的4节点应力组合壳单元 ⁴。自由度有限元模式可以简单有效地考虑转动和截面偏心效应可用于分析加劲薄壳和无加劲薄壳。

和 ⁴²在材料坐标系中计算大转动⁴提出了一组新壳有限元模式。其中采用 假设和一种邻近单元间的插分技术考虑了薄膜和弯曲特性的耦合效应。因此这种单元被称为

。该法可以保持⁰连续性仅取单元的重心作为积分点而不需引入一个古典位移以外的其它变量从而节省了积分时间。

和 ⁴建立了一种用于壳弹塑性大应变分析的 三角形有限元模式。在这种单元的边线中点上有可以绕边转动的变量。通过使用 进

行极分解 取得局部变形梯度 最终建立谐转动有限元模式。材料特性按照“ ”来描述 其中 已经被分解为主方向。借助于乘法分解 来处理塑性。与许多近期的 三角形单元模式相比 该模式对节点编号是保持不变的。

44 针对具有塑性或粘塑性软化行为的结构 基于本构关系残数提出了一种度量有限元计算质量的经验误差估计方法。分析了包括空间离散化、时间离散化和迭代过程等在内的各种误差因素。

3 材料分布损伤对薄壳稳定性的影响

现代固体力学认为 结构的破坏是损伤累积超过一定限度的结果。随着荷载的增加 固体首先在局部发生材料尺度的破坏 本文统称细观损伤 这些细观损伤在尺寸和数量不断增加 最终汇合成可见的构件横截面尺度的宏观裂纹。

细观损伤反映了结构破坏的开始状态 通常是在连续损伤力学 的框架内研究的。对损伤力学各种方法的全面分析可以参见 的综述⁴。在中 细观损伤通常是通过一个典型的材料体积元来模糊或平均化近似考虑的。延性金属材料的细观损伤通常表现为微空穴、微裂纹和微剪切带 其中各向同性损伤过程又分为空穴形核、扩张和聚合三个阶段。从⁴

在损伤学科的开创性工作以来⁴、⁵和⁶首先提出了分析微空穴扩张状态的理论模型 后来⁴、⁷、⁸和⁹

进一步发展了各种不同的小应变损伤模型。为了更客观地描述材料的延性破坏过程 近 0 多年又建立一些适用于大应变的损伤模型⁴。上述各种损伤模型都涉及多个难以确定的材料参数,而定量测定这些细观参数 如位错密度、空穴形核率等 实际上是非常困难的 所以这些模型仍然很难在工程实际中得到采用。

为了避免这一难以处理的问题 通常都简单地用局部材料的刚度减少来表征损伤。如采用弹性模量的变化来定义损伤变量 $D = E_0/E$, 其中 E_0 、 E 分别为损伤前后局部材料弹性模量的变化。¹⁰等人 借助于内变量的单侧约束来描述损伤。如果约束被破坏 局部弹性张量的特征值降低 最终引起材料刚度损失。这种方法抛弃追踪具体的损伤过程 可容易地通过合理地选择约束来反映不同的损伤类型。可是 由于不能事先知道在整个物体中材料约束破坏是否发生和在哪里发生 所以问题是非线性的 需要采用迭代法予以求解。具体迭代法的过程包括 在初始无损伤状态下计算内变量场² 在约束破坏的位置降低材料的刚度。重复这一过程直到平衡条件和约束条件得到满足。对于一个给定的荷载 迭代最终的微结构就是损伤后的结构。

值得注意的是 损伤的理论研究从一开始就主要集中在材料尺度的破坏演化 最多是基于单个试件 几乎完全忽略了局部损伤对整体结构的影响。另一方面 整体结构的破坏模型又都是基于一个完备的固体力学场观点 相应的设计公式很少定量考虑材料或横截面尺度损伤的累积过程 不能捕捉初始损伤、服役中形成的损伤、化学的或力学的劣化等因素对结构完善性和安全性的影响。然而现代结构力学是能够追踪损伤过程的 直到结构使用寿命结束。¹¹和¹²提出了一个结构损伤的表征方法 基本思想是 材料点尺度的局部损伤和劣化在结构尺度的宏观反映 即整体结构损伤度量 可以严格地从当前结构切线刚度的降低来表征。该结构损伤变量的定义为

$$D_i(V, d) = 1 - \frac{\lambda_i(V, d)}{\lambda_i(V_0, d=0)}$$

其中 V 是位移向量, d 是损伤内变量, λ_i ($1 \leq i \leq m$) 为结构的特征谱, m 为结构自由度。这种从结构尺度定量描述材料劣化过程的理论 为促使连续损伤力学 在工程设计中的应用开辟了广阔的前景。损伤变量 D 在 0 之间变化 就能用于评估结构的实际工作状态的安全性。该文还给出了该损伤理论在钢筋混凝土梁和大型壳的应用算例。

损伤力学在薄壳结构中的直接应用研究才刚刚开始不久 发表的论文也不多。考虑材料损伤影响、模拟板壳极限承载力特性的研究就更少了。¹³和¹⁴从 原创的损伤模型出发 首先对变形梯度进行乘法分解 再利用耦合空间的超塑性本构关系来修正模型 使其蜕变为刘谔¹⁵

大行变 最脗
多。艇翻结型 使
中各型板算了 壳结全素
等人 指出了一个试析了 非常性

由以上讨论可见 利用连续介质损伤力学的概念研究薄壳结构的变形与破坏的工作 还处于概念的萌芽状态 缺乏对薄壳结构材料状态下塑性损伤的细观机理的研究 也没有明确揭示损伤对结构局部稳定性和整体稳定性的影响规律。可以相信 通过更多研究工作的积累 考虑损伤影响的稳定理论必将更加完善地反映工程实际薄壳结构的破坏规律。

4 薄壳的断裂与稳定性

板壳问题远比平面断裂问题复杂 板壳既存在面内位移 又存在面外位移 其应力应变场沿厚度方向是变化的。因此板壳问题实质是三维力学问题 不同的板壳实用理论都是对三维问题的不同二维近似。0多年来 板壳的断裂问题一直是大家重点研究的问题之一。

和 在 0年首次进行了弹性裂纹平板在对称弯曲下的理论分析。后来⁴采用渐进级数展开法也研究了同样的问题。等人⁵曾研究了拉伸和弯曲组合受力板的裂尖应力强度因子 其中需要4个应力强度因子来表征裂尖附近的一般应力场。对于剪切弯曲含裂纹平板问题 和 和 采用板理论和积分变换方法获得了解。等人⁸调查了在拉伸和横向剪切情况下裂纹板的能量释放率。和⁹则调查了弯曲与剪切、弯曲与扭转情况。研究表明含剪切变形裂纹板的应力强度因子有¹⁰个分量。和 采用耦合应力理论研究了裂纹板裂尖附近的奇异性。和²提出了一个考虑应力沿厚度变化的三维裂纹板理论 发现裂尖应力状态取决于板厚 裂长比和一个表征沿厚度应力变化的参数。对于一个拉伸裂纹板 在裂尖附近会发生局部屈曲。和 研究了确定不同裂尖屈曲模型的临界荷载的特征公式。

和 在 年首次采用弹性基础梁理论建立了一个近似分析方法 研究了带纵向裂纹圆柱壳的问题。⁴则研究了无限长无加劲弹性圆柱壳在内压作用时 纵向或环向裂纹的特性 其中假设裂纹非常短 以至于可以基于浅壳方程推导控制微分方程 从而将问题转化为求一个耦合的积分方程组。后来一些学者进一步研究了几个类似的问题 其中 和 针对含纵向裂纹和环向裂纹壳受内压作用的情况。和 针对含环向裂纹壳受拉伸情况。

柳春图和蒋持平⁸首次系统地论述了板壳弯曲断裂理论及其实用分析方法 主要贡献包括 论证了型板壳断裂理论的合理性和型板壳断裂理论的适用范围² 首创了分析型板壳裂纹尖端场的方法 深入揭示了板壳裂尖附近的力学现象 在对裂尖场进行严格的理论分析的基础上 提出了对板壳断

裂分析的局部 整体法⁴ 开拓性的研究了板壳表面裂纹的渐进场 采用局部 整体法取得了更合理的应力强度因子解。

在以上列出的弹性薄壳断裂理论研究中 所针对的圆柱壳都是无加劲的和只有一个加劲肋。这些模型能够简化数学分析 但过分简化的模型要用于实际薄壳结构的设计是不可行的。然而 基于简化模型的理论研究

壳结构的线性弹性理论 第二阶段为考虑几何非线性的非线性弹性理论 第三阶段为考虑实际材料非线性弹塑性理论 目前正在进入第四阶段考虑物理缺陷的影响 最新的三个主要研究方向是: 1 薄壳非线性稳定性分析 2 材料局部损伤对薄壳稳定性的影响 3 带裂纹薄壳的稳定性分析 这三个方向的研究现状进行了调查分析 并对未来研究趋势进行了展望。文献调查分析表明, 在薄壳稳定性分析的研究中, 目前存在下列不

足: 1 考虑物理缺陷影响的研究多, 而考虑物理缺陷对薄壳稳定性的影响研究少。

2 带裂纹薄壳和纯断裂问题都分别研究的较多, 二者耦合问题的研究较少。实际上二者是相互耦合的。

3 薄壳非线性稳定性分析的统一理论和计算方法的研究较少。材料塑性、几何缺陷、物理缺陷和残余应力等因素的综合影响。

在薄壳稳定性分析研究中, 计算技术的发展, 除了继续开发简单有效的有限元外, 还应开发新的计算方法, 具有广阔的发展前景的。损伤和裂纹对薄壳结构稳定性影响的研究才刚刚开始不久, 是今后薄壳稳定性分析中具有重要意义的研究方向, 其发展对促进薄壳稳定性分析是至关重要的。

参考文献

1 薄壳非线性稳定性理论的发展和应

用

2 薄壳后屈曲行为 上海科学技术出版社

4

0

3 弹塑性稳定性理论 国防工业出版社

2

4 弹塑性稳定性理论 国防工业出版社

2

5 弹塑性稳定性理论 国防工业出版社

2

6 弹塑性稳定性理论 国防工业出版社

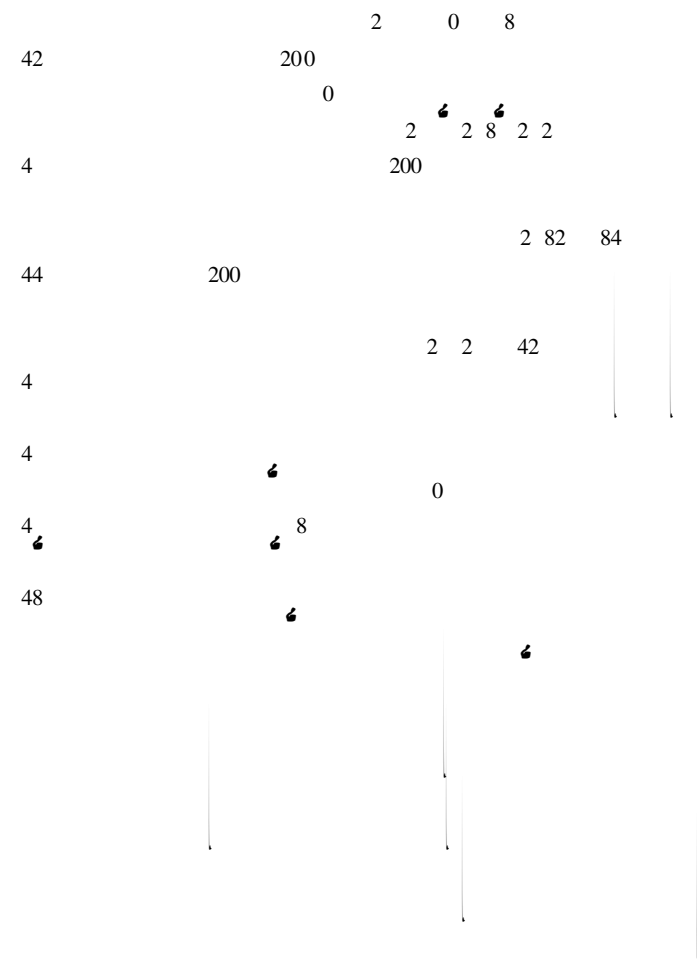
2

7 弹塑性稳定性理论 国防工业出版社

2

8 弹塑性稳定性理论 国防工业出版社

2



8	柳春图 蒋持平 2000 板壳断裂力学 北京 国防工业出版社	8	2000	0	4	2	4
80	2 22 2	8	4	4	0	04	
8	2004	88	8	8	2	42	48
82	40 8 8 8 8	8	8	8	8		
8	2 4 4	0	8	2 8	2402		
84	2 22	8	4 2	2 4			2004
8	2 2 2	2	200	42			
				4 40 4			

第4届钢结构国际研讨会

200 年 月 日 日 韩国 首尔

主办 韩国钢结构协会 国际钢结构杂志

第一、二、三届钢结构国际研讨会分别于 2000 年、2002 年及 200 年在韩国首尔顺利召开 由韩国钢结构协会和国际钢结构杂志共同主办 研讨会旨在为钢结构的研究和应用方面提供一个平台 欢迎广大科研工作者和工程师们来参会并互相交流钢结构方面的新概念、新进展以及钢结构方面的经验。

本次会议聚焦“钢结构中的创新技术” 包括 但不限于 下列主题

桥梁工程 框架结构分析 施工及管理 组合 混合结构 计算机辅助设计 连接 腐蚀 灾害评估 设计规范 动力性能 地震 风工程 制作 疲劳 断裂力学 抗火结构 楼板振动 轻型结构 维护 非线性性能 海上结构 优化 可靠度 智能结构 稳定性 不锈钢 可持续性 无约束支撑体系 焊接

会议重要日期如下

200 年 月 日前	论文摘要截止	200 年 4 月 0 日前	发出摘要接受通知
200 年 月 日前	论文全文截止	200 年 8 月 日前	发出论文接受通知
200 年 月 0 日前	会议预注册		

如希望参加会议并获得更多信息 可按以下方式联系

0 8 8 20
82 2 400 0 82 2 400 04