

后屈曲性态的研究 用 的非线性大挠度方程第一 次得到了轴压柱壳的后屈曲状态曲线 并提出了非线性 4 年 集中研究无限接近 大挠度稳定性理论。 临界点附近的后屈曲初始阶段的性质 提出了非完善结 构稳定性的一般准则和"缺陷敏感度"的概念 建立了后 来被广泛传播的初始后屈曲理论。 4 年 考虑了 失稳前应力的不均匀性和支承边界条件的影响 提出了 非线性前屈曲一致理论。上述三种理论是现代稳定性理 论的主要组成部分 促进了人们对稳定理论与实验存在 重大差异认识的逐步深入。但限于各种理论本身的局限 性 解释还不够圆满。在上世纪 80 年代间 沈惠申在综 合分析现有理论与实验成果的基础上 提出并建立了弹 性薄壳屈曲的边界层理论²。该理论认为在圆柱薄壳屈 曲问题中 非线性前屈曲行为仅在支承边界附近的一个 窄层起主要作用 于是将 的非线性大 挠度方程化为边界层型方程 并采用摄动法得到了系列 的高阶渐进的结果 有效地推动了非线性弹性板壳稳定 理论的发展。为了将 弹性稳定理论推广用于塑性 范围 曾建立了一个能综合反映结构几何缺 陷、几何非线性和物理非线性的稳定分析模型 其缺点是 应用于薄壳结构时不能描述塑性区沿宽度和高度方向的 发展。后来 等4对 模型又有了 进一步的发展 并用于浅薄壳的稳定性分析 取得了较为 满意的结果。周承倜 也曾对具有初始缺陷的薄壳塑性 屈曲问题提出了一种理论分析方法 其实质就是用一系 列的各向异性线弹性解来逼近一个非线性塑性解。

薄壳稳定性分析理论的发展也促进了壳体设计方法 的进步。近年来 在稳定性理论的工程应用方面 和滕锦光及其所在小组关于大型钢筒仓和容器结构的系 统研究工作最有代表性。他们分别采用数值计算 和试 验测试 的方法研究了具有周向焊接凹陷的圆柱壳的屈 曲行为 综合考察了周向轴对称缺陷和焊接残余应力对 屈曲强度的影响[®] 结果表明 残余应力对圆柱壳的屈曲 强度有一定的加强作用。当壳体内同时承受很大的内压 时 可能在局部首先屈服 进而加速壳体的屈曲 即发生 先后研究了边界附近 和局部轴对 "象脚"破坏。 称缺陷处。圆柱壳的局部破坏 滕锦光则研究了具有搭 接接头的圆柱壳的塑性破坏 。研究表明 圆柱壳在边 界及环肋处出现"象脚"破坏时强度较低。他们在加工几 何缺陷、残余应力和内压等影响方面的取得了系列具有 工程应用背景的研究成果 其中许多概念和公式被欧洲 钢壳规范²采用。有关轴压圆柱钢壳稳定设计方面的综 述详见文献

按分析模型来分 薄壳结构的稳定性分析理论的发展大体经历了三个阶段 第一阶段为针对完善结构的线性弹性理论 第二阶段为考虑结构几何缺陷的非线性弹性理论 第三阶段为考虑实际材料性能的非线性弹塑性

理论。本文认为稳定性理论目前正在进入第四阶段 即 要考虑结构物理缺陷的影响。众所周知 影响薄壳结构 极限承载力的因素包括 结构形状尺寸、荷载的不均匀 性、材料力学性能、结构存在的缺陷和残余应力等 其中 缺陷的影响是最明显的。有些学者认为 在薄壳结构失 稳屈曲全过程分析的问题解决之后 失稳问题已经在一 般理论意义上被解决了 至于仍存在的失稳临界荷载理 论计算值与实验值的较大误差则被归咎于实验模型加工 制作过程中产生的初始缺陷的影响 ⁴。

考虑结构缺陷和材料塑性影响后 非线性屈曲问题 大多情况属于极值点屈曲问题。这类问题同时包含了几 何非线性和物理非线性及其相互作用的影响 涉及因素 多 控制方程复杂 所以一般很难取得解析结果。对于一 些简单的弹性稳定问题 在一定的假设条件下 可以利用

法或奇异摄动法得到半解析计算结果。而对于更为 一般情况的薄壁结构的非线性弹塑性稳定分析 有限元

分析方法已经成为一种不可替代的强有力工具。 然而 迄今为止 已开发出的许多壳元都不具有普适性 能用于大应变分析的薄壳有限元还远未成熟 有待于进 一步深入研究。

结构的缺陷通常可分为几何缺陷和物理缺陷。几何 缺陷主要是指制造和运输过程中产生的加工误差、焊接 残余变形等初挠度 物理缺陷则指材料冶炼和结构制造 过程中出现的裂纹、空穴、夹渣、焊接未熔合等 服役中产 生的划伤、疲劳裂纹和腐蚀裂纹等。严格讲 物理缺陷又 可分为细观缺陷和宏观缺陷两大类。材料的细观缺陷 本文统一称为损伤 主要指由环境、荷载或变形引起的 材料的劣化 宜采用连续介质损伤力学 方法来考 虑其影响 而宏观缺陷则起着类似裂纹或诱导裂纹的作 用 通常都按等效裂纹处理 采用断裂力学方法分析。关 于含几何缺陷薄壁结构的设计理论与应用 国内外开展 了不少的研究工作 但对含物理缺陷薄壁结构的研究工 作则较少 且起步晚。所以计及损伤和裂纹影响的薄壳 结构稳定理论正是需要进一步深入研究的重要课题。

综上所述 从薄壳非线性稳定理论与应用研究的发 展趋势可见 目前最新的三个主要研究方向是 非线性 薄壳有限元分析方法 2 材料分布损伤对薄壳稳定性的 影响 带裂纹薄壳的稳定性分析。

2 薄壳非线性有限元的发展与展望

薄壳结构的稳定性分析除了几个简单的形状与荷载 情况有弹性解析解外 大多要靠有限元数值方法来求解。 特别是在同时考虑结构几何非线性和材料物理非线性的 情况下 有限元法已经是不可替代的计算工具。40 多年 来 随着计算机技术的不断进步 薄壳有限元分析一直是 研究的热点问题 有关文献厚出不穷、浩如烟海。 等人 两次分别综述了 8 年和 0 年薄壳元的研究发展情况。根据不同的薄壳理论、变分 原理和克服自锁的手段 已开发出许多不同的有限元模 式。高光藩和丁信伟 介绍了有关壳体有限元的分类情 况 并对平板壳元、退化壳元和多变量壳元的特点进行了 重点评述。各种有限元都有自己的特点和适用范围 目 前还没有形成统一有效的壳元形式 薄壳元的研究热潮 还将持续。壳体有限元研究的主要目标是提高计算精度 和有效性。从工程实用的观点看 壳元应该描述一般的 应变场 对任意的壳结构应该具有公式简单、计算有效、 使用简便的特点 而且不会出现任何自锁现象。 ⁸分 析了现有两层节点固体壳元在计算中可能出现的各种自 锁的原因和对策。具体内容如下

剪切与薄膜自锁。固体壳元和退化固体壳元都存在 这种奇异性 隐藏剪切和张力自锁的单元刚度非常大 当 厚度趋于零时 就像被锁住一样。剪切自锁是由于在横向 剪切应变作用下壳体两个表面的相对面内位移和中面横 向位移的耦合效应引起的 而薄膜自锁则是由于在面内和 薄膜应变作用下壳体两个表面的相对面内位移和中面面 内位移的耦合效应引起的。因此剪切自锁在平面和曲面 单元中都可能发生 而薄膜自锁仅发生在曲面单元中。

厚度或 厚度自锁。纯弯曲薄壳 厚度方向的 应力为零 厚度方向的应变与厚度坐标的度量成正比。 退化壳元是建立在零厚度应力的假设的基础上的 本构 关系中不包含厚度应力和应变。而固体壳元的厚度应变 是由节点参数导出的 与厚度坐标无关。这种特性就导 致单元的弯曲刚度过大 相当于用平面应变状态代替了 实际的平面应力状态。收敛的挠度是其精确解乘以 ⅔。故这种现象称为厚度自锁或 自锁或 厚度自锁。相应的消除方法是增强平面应力状态 降低 材料刚度矩阵。

梯形自锁或弯曲厚度自锁。曲壳节点方向不平行 梯形效应。宜采用假设的自然应变法处理。

膨胀自锁或体积自锁。当材料是不可压缩或接近不 可压缩时 发生体积自锁。宜采用增强假设应变法处理。

在几何非线性壳元模式中存在的困难之一就是有限 转动问题。有限转动不能像转换位移那样来处理 因为 转动并不具备三维空间中向量所具有的特性。处理壳有 限转动的传统方法是采用两个转动自由度。 和

基于一转动增量向量 该向量没有相对奇异转动 分量 的两个分量 建立了一个处理转动的方法。这些采 用两转动自由度的方法可以事先排除转动奇异性 具有 最小的自由度 因此是完备的和有效的。但也存在一些 缺点 必须特别注意处理边界约束 因为在这些方法中转 动自由度与局部坐标有关 对每一节点都是不同的。

在大应变弹塑性分析的本构模型中 下列问题是特 别重要的 采用乘法分解法将变形梯度分解为纯弹性部分和纯塑性 部分 这是一个公认的非线性弹塑性运动学概念。乘法 分解意味着存在一种所谓的中间构形 即包含局部的转 动。中间构形的转动问题可以利用塑性流动的微观力学 来考虑 但在文献中仍然是没有完全解决的问题。例如 基于对数 应变和能量共轭的转动 应力 张量的弹塑性变形的本构关系需要确定塑性转动 这可 以通过假设零弹性和零塑性的较来取得²⁰⁻²²。

2 大弹性应变。假设弹性响应是各向同性的 且与 塑性变形历史无关 那么大弹性应变就可以按照新近的

型材料模型来描述 将自由能分解为体积部分和 偏部分²。该模型并未对变形幅度强加任何限制。

各向同性与运动硬化现象。在有限弹性应变的弹 塑性材料模型中考虑运动硬化 必然要涉及到变形过程 中出现的塑性各向异性问题。假设在变形过程中卸载应 力张量与加载应力张量共轴 该问题就可以被简化。在 这种情况下 塑性各向异性不会在增量迭代求解中出现 而被认为是准各向同性的^{2 2 24 2}。

4 在壳分析中的应用。壳的方程通常是采用 参数 运动模型来建立的。为了事先满足不可扩展条件 壳的 控制参数都被转换为 参数。在弯曲控制情况下非 弹性应变按层状分布考虑 这样材料性能沿壁厚就有明 显的不同。为了精确预示这种情况下的应力 将上述壳 运动学扩展为一个多层模型 并在各层界面上施加 °位 移连续条件 ^{2 2} 。

和 ²⁸ 针对大弹塑性变形的任意壳结构 介绍了一个严密的本构关系和有限元模式。考虑一般形 式的各向同性和运动硬化 并采用变形梯度的乘法分解 法建立了一个弹塑性材料模型。通过修正流动方向 考 虑了运动硬化的各向异性。变形的弹性变分采用新近的

型材料模型以适应大应变的需要。为了精确的预 示壳沿厚度方向的应力分布 采用了基于 参数壳理论 的多层壳运动学以能够实现大应变和有限转动。为了避 免在弯曲控制情况下的薄膜自锁和材料体积自锁 在整 个塑性范围内 利用增强应变的概念改善单元位移。各 种算例证明了该算法的有效性。

从全局来看 薄壳结构的数值模拟方法可以分为三 大类 基于线性或非线性壳理论的数值模拟 2 退化连 续方法 直接的三维连续方法。

直接的三维连续方法从原理上讲是最简单、最精确 的 但在应用方面普及率最低 几乎处于搁置状态。由 等人²⁰建立的多积分点六面体单元就是其中的代 表。采用这种有限单元进行三维直接模拟 主要障碍有 三 必须采用复杂的手段来避免所有可能的病态情况 2 需要在薄壳的厚度方向配置多层单元以获得比较精确

的梯度场 可能降低离散系统的可调性和数值解的精

◎ 1994-2011 Comma Academic Tradition Participation (1994-2011) Comma Academic Tradition Participation (1994-2011) Comma Academic Tradition (1994-2011) Comma

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 ² 。与壳理论方法比 退化方法 法例 和 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 和 锁和薄膜自锁问题 。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 一模拟研究方面 近期 的一些有特点的工作还有 按发表时间为序

提出了一种适用于柱支撑回转 和 线中点上有可以绕边转动的变量。通过使用 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 和 的最新进展可参见 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 节点有限单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 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换 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 °连续性 仅取单元的重心 作为积分点 而不需引入 个古典位移以外的其它变量 从而节省了积分时间。

4 建立了一种用于壳弹塑性大应 和 变分析的 三角形有限元模式。在这种单元的边

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。

⁴ 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"。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

在损伤学科的开创性工作以来 ⁴、 和 ** 首先提出了分析微空穴扩张状态的理论模型 后 来 ⁴、 ⁰、 、 ²和

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/E*,其中 *E*、*E* 分别为损伤前后局部材料弹性模量的变化。 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。 和 ³ 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

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

其中 V 是位移向量, d 是损伤内变量, λ ($\leq i \leq m$)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。 和 ⁰ 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 钢丝器于变歧环 頭索 宫

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本家重点研究的问题之一。 在 0年首次进行了弹性裂纹平板 和 在对称弯曲下的理论分析。后来 ______ 采用渐进级 数展开法也研究了同样的问题。 等人 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。 箺 人。调查了在拉伸和横向剪切情况下裂纹板的能量释放 率 和 "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 个分量。 和 采用耦合应力理论研究了 和 2 裂纹板裂尖附近的奇异性。 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 櫇



文[『 丘 が

- 戸戸 戸 町 村







第4届钢结构国际研讨会

200 年 月 Ξ 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 ۵ 0 8 8 20 82 04 2 400 0 82 2 400