

薄壳非线性稳定理论的最新发展

周利^{1,2}, 黄义¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程系, 西安 710055; 2. 五邑大学 土木工程系, 江门 529020)

摘要: 本文回顾了近代非线性薄壳稳定理论的发展历史, 认为薄壳稳定理论的研究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。目前正在进入第四阶段, 即开始考虑结构物理缺陷的影响。最新的三个主要研究方向是: 1) 非线性薄壳有限元分析方法; 2) 材料局部损伤过程对薄壳稳定性的影响; 3) 带裂纹薄壳的稳定性分析。文中分别就这三个方向的研究现状进行了调查分析, 并对今后的研究趋势进行了展望。

关键词: 薄壳; 稳定性理论; 非线性; 薄壳有限元; 塑性损伤; 裂纹

中图分类号: TU 352.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-9379(2006)04-0023-10

Recent Development and Tendency of Nonlinear Theories of Stability for Thin-walled Shells

ZHOULI^{1,2}, HUANG Yi¹

(1. Dept. of Civil Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Dept. of Civil & Arch. Eng., Wuyi Univ., Jiangmen 529020, China)

Abstract: The development in nonlinear theories of stability for thin-walled shell was reviewed in this article and it was suggested that the theoretical research on the stability of thin shell has experienced three stages: the linear-elastic theories for perfect structures, the nonlinear-elastic theories for geometrical imperfect structures, the nonlinear and elastic-plastic theories. At present, the fourth stage begins to consider the influence of the physical defects such as crack. The recent main researches directions on the stability of thin-walled shell are: (1) nonlinear FEM method for thin-walled shells; (2) the influence of local damage on the global stability of thin shells; (3) the stability analysis of the thin shells with cracks. Finally, the advance in these three fields was reviewed systemically and future research trend were prospected outlook.

Keywords: thin-walled shell; stability theory; nonlinearity; finite element; plastic damage; cracks

1 薄壳非线性稳定理论与应用的发展

薄壳结构具有良好的薄膜张力效应和抗弯刚度, 可以做到自身轻, 承载力高, 因而广泛应用于土木、机械、化工、航空和航海等工程领域, 如屋盖、汽车、油罐、飞机和潜艇等。在静力或动力荷载作用下薄壳结构破坏的主要形式是屈曲失稳, 且呈现强烈的突然性, 常造成灾难性的事故。所以, 薄壳结构由于失稳引起的安全性和耐久性问题是人们一直普遍关注的研究课题。

薄壳稳定性分析理论一直随着薄壳结构的日益广泛应用而不断得到发展。在上个世纪初, 薄壳线性稳定分析理论开始形成, 但就结构的极限承载力而言, 其理论预计值与实际测试值还相差甚远。如对于轴压柱壳和外压球壳, 通常其屈曲荷载的实验测试值是理论预测值的 1/5 ~ 1/2。围绕这一著名问题的研究, 促使了现代薄壳结构非线性稳定理论的萌生和发展^[1]。1934年, Donnell 首次指出, 应该用非线性大挠度理论计算薄壳的后屈曲状态, 才能确定临界荷载。1939年, Karman 和钱学森开辟了

收稿日期: 2005-06-24; 收到修改稿日期: 2005-08-15

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (04011764)

作者简介:

周利(1961-), 男, 教授, 在职博士研究生, 主要从事材料与结构的破坏理论与应用研究。E-mail: lee61cn@yahoo.com.cn.

黄义(1935-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间薄壁结构和土-结构相互作用的理论与应用研究。

后屈曲性态的研究,用 Donnell 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,并提出了非线性大挠度稳定性理论。1945年, Koiter 集中研究无限接近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。1964年 Stein 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 Karman-Donnell 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 Koiter 弹性稳定理论推广用于塑性范围, Hutchinson^[3]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 Su Xu Ming 等^[4]对 Hutchinson 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。周承侗^[5]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, Rotter 和滕锦光及其所在小组关于大型钢管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^[6]和试验测试^[7]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^[8],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“象脚”破坏。Rotter 先后研究了边界附近^[9]和局部轴对称缺陷处^[10]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^[11]。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^[12]采用。有关轴压圆柱钢壳稳定设计方面的综述详见文献[13]。

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^[14]。

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 Ritz 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(FEM)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(CDM)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:1)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;3)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,有关文献层出不穷、浩如烟海。Yang 等人^[15,16]两次分别综述了1961~1989年和1990~1999

年薄壳元的研究发展情况。根据不同的薄壳理论、变形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^[17]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。Sze^[18]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 Poisson 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 $(1-\nu^2)$ 。故这种现象称为厚度自锁或 Poisson 自锁或 Poisson 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。Simo 和 Fox^[19]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:

1) 变形梯度的乘法分解。在描述材料的弹塑性时,

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 Hencky 应变和能量共轭的转动 Kirchhoff 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铰来取得^[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 Hooke 型材料模型来描述,将自由能分解为体积部分和偏部分^[23]。该模型并未对变形幅度强加任何限制。

3) 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^[21, 22, 24, 25]。

4) 在壳分析中的应用。壳的方程通常是采用 6 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 Euler 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 C^0 位移连续条件^[26, 27]。

Basar 和 Itskov^[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 Hooke 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 6 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:1) 基于线性或非线性的壳理论的数值模拟;2) 退化连续方法;3) 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 Liu 等人^[29, 30]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,主要障碍有三:1) 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;3) 可能降低离散系统的可调性和数值解的精度;总之,该法是非常不经济的,在模拟对象相同的情况

下,直接法所需的单元数是壳理论法或退化法的 3~5 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, Hughes 和 Liu^[31,32])。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(Stolarski 和 Belytschko^[33])。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。

Li 和 Liu^[34] 试图采用窗函数(window function)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^[35]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 3 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”(high order manifold)离散,意味着离散场是高度光滑的,通常要高于 $C^3(\Omega)$ 。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,同时避免欠缺(rank deficiencies)。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):

Gould 和 Sridharan^[36] 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 Fourier 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 Gould 和 Hara^[37] 的综述介绍。

Wohlever^[38] 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:1) 自动群分析;2) 非对称问题的预调节;3) 并行计算;4) 采用自动微分法对对称刚度块进行有效计算。

Sansour 和 Kollmann^[39] 比较分析了三种 4 节点和 9 节点有限元元在新近建立的具有 7 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,9 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。Damatty 和 Nassif^[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。

Won 和 Byung^[41] 提出了一种简单的 4 节点应力组合壳单元(stress resultant 4-node shell element)。6 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。

Laurent 和 Rio^[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 Love-Kirchhoff 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 semi-finite element(SFE)。该法可以保持 C^0 连续性,仅取单元的重心作为积分点,而不需引入 3 个古典位移以外的其它变量,从而节省了积分时间。

Kolahi 和 Crisfield^[43] 建立了一种用于壳弹塑性大应变分析的 Morley 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 $F = RU$ 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“ $\log_e U$ ”来描述,其中 U 已经被分解为主方向。借助于乘法分解 $F = F_e F_p$ 来处理塑性。与许多近期的 Morley 三角形单元模式相比,该模式对节点编号是保持不变的。

Ladeveze^[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(CDM)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 Kirajcinovic 的综述^[45]。在 CDM 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 Rabotnov^[46] 在损伤学科的开创性工作以来,McClintock^[47]、Rice 和 Tracy^[48] 首先提出了分析微空穴扩张状态的理论模型,后来, Gourson^[49]、Tvergaard^[50]、Lemaitre^[51]、Chaboche^[52] 和 Rousselier^[53] 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 10 多年又建立一些适用于大应变的损伤模型^[54-56]。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 $D = 1 - \tilde{E}/E$, 其中 E, \tilde{E} 分别为损伤前后局部材料弹性模量的变化。Zohdi 等人^[57] 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。具体迭代的过程包括: 1) 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。Kratzig 和 Petryna^[58,59] 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

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

其中 V 是位移向量, d 是损伤内变量, $\tilde{\lambda}_i$ ($1 \leq i \leq m$) 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(CDM)在工程设计中的应用开辟了广阔的前景。损伤变量 D 在 0 ~ 1 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。Eckstein 和 Basar^[60] 从 Rousselier^[53] 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 Rousselier 模型,使其适用于非弹性大应变情况,最后采用多层运动学壳模型,实现对薄壳结构损伤的数值分析。文中模拟计算了外压浅柱壳的屈曲平衡路径。

Kreja 等人^[61] 提出了一个分析几何非线性和物理非线性薄壁结构的理论和数值方法。其中非弹性材料模型包括了弹塑性、各向同性和运动硬化和塑性损伤等因素;结构模型中考虑了大挠度和大转动;并特别关注了局部损伤问题。采用分层壳模型在板壳结构中跟踪损伤的发展、预测局部破坏的起始。分别在轴对称、平面应变和平面应力问题的几何和物理非线性有限元分析中,采用了整体形式的 Lagrangian(TL) 描述方法。采用的数值算法适用于预测材料的刚度递减、局部化损伤、临界损伤状态和板壳结构的最终破坏。同时也进行了结构非线性响应的数值模拟,研究了在准单调和变化荷载作用下延性损伤的发展规律,揭示了材料损伤对构件极限承载力的影响规律。

Altenbach 等人^[62] 检验了标准的一阶剪切变形壳理论和相应的有限元方法在有关蠕变连续损伤分析中的适用性,采用 Kachanov-Rabotnov-Hayhurst 蠕变损伤材料模型,对弯管的蠕变损伤进行了模拟计算。

由以上讨论可见,利用连续介质损伤力学(CDM)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。30多年来,板壳的断裂问题一直是大家重点研究的问题之一。Knowles和Wang^[63]在1960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Williams^[64]采用渐进级数展开法也研究了同样的问题。Sih等人^[65]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,Hartranft和Sih^[66]和Wang^[67]采用Reissner板理论和积分变换方法获得了解。Viz等人^[68]调查了在拉伸和横向剪切情况下裂纹板的能量释放率,Zehnder和Hui^[69,70]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5个分量。Pagano和Sih^[71]采用耦合应力理论研究了Cosserat裂纹板裂尖附近的奇异性。Hartranft和Sih^[72]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。Fujimoto和Sumi^[73]研究了确定不同裂尖屈曲模型的临界荷载的特征公式。

Sechler和William在1955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。Folias^[74,75]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Marguerre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Copley和Sander^[76]针对含纵向裂纹和环向裂纹壳受内压作用的情况;Ducan-Fama和Sander^[77]针对含环向裂纹壳受拉伸情况。

柳春图和蒋持平^[78]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:1)论证了Reissner型板壳断裂理论的合理性和Kirchhoff型板壳断裂理论的适用范围;2)首创了分析Reissner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;3)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为薄壳问题的分析提供了以下有用的信息:1)在裂尖附近的应力和应变存在负平方根奇异性,可以确认有拉伸型和弯曲型两种类型的应力强度因子;在混合变形时,也存在一个组合应力强度因子;2)对于一个无加劲薄壳,单位裂纹扩展的能量释放率随着裂纹的扩展而增加。因此在常荷载作用下裂纹的扩展时不稳定的。这种不稳定裂纹扩展可以通过加劲肋来阻止;3)在弹性薄壳模型中,认为壳的壁厚是足够的薄,以至于对于通常荷载作用下的应力分析可以采用Kirchhoff应力假设。此时在断裂分析中横向剪切变形的影响是不显著的,可以被忽略。

弹性薄壳的断裂理论还在发展之中。Huang等人^[79]针对带裂纹或无裂纹板壳建立了一个裂纹端附近渐进场的一般理论。结果发现,要表征无剪切变形的板裂纹端附近的任意渐进场需要四个应力强度因子,两个对应与对称和反对称的拉伸;两个对应与对称与反对称弯曲。当考虑剪切变形时,需要一个附加的应力强度因子来描述反对称弯曲时的横向剪力。该文还采用复变函数方法证明,具有剪切变形的板的弯矩和薄膜力、中面面内位移和转动渐进表达式中都存在奇异性。可以采用Irwin的虚裂纹扩展方法,通过应力强度因子来表征将裂纹沿裂纹线方向扩展时的能量释放率。这样就通过总能量释放率定义了一个组合应力强度因子。有关薄壳应力强度因子的计算方法可以参见Riks和Rankin^[80]的最新总结和评述。

对于一般的薄壳断裂问题的分析很难取得解析解,都需要采用有限元方法分析。最近,Hung和Ngoc^[81]又提出了一种专门的有限元技术,用以计算带裂纹和无裂纹板壳的位移和应力场。该有限元法是基于一组特殊的组合位移单元(称为Metis元)建立的。采用几个算例对该模型进行了检验。对于拉伸裂纹板,利用单元HSM可以得到高精度的应力强度因子解。对带裂纹或无裂纹板的弯曲问题,单元HSF也有非常好的表现,计算结果非常接近Tomshenko的无裂纹解和Chen,Sosa和Eischen的带裂纹解。对于圆柱壳问题,该文结果也与Scordelis和Folias的解非常一致。Carpinteri等人^[82]采用三维有限元法计算了带外表面裂纹柱壳受内压作用的应力强度因子,并数值模拟了在循环内压作用下的裂纹扩展。Vafai和Estekanchi^[83]系统研究了在板壳有限元分析中裂尖附近网格密度、边界条件、伯松比、裂纹长度和壳曲率等参数对计算结果精度的影响问题,并分析了裂纹端张开

位移随曲率角的变化规律。关于带裂纹圆柱壳的理论研究大多是基于无加劲弹性模型,更接近实际的模型应该是多加劲肋加强的壳。这种形式的结构只能采用有限元法进行数值分析,参见 Huang 等人^[84]的研究工作。

薄壳的变形和破坏具有明显的几何非线性和材料非线性特性。然而关于薄壳的弹塑性大变形断裂分析的工作现在还很少。最近, Hsu 等人^[85]采用裂纹端张开角和撕裂模量 T^* 断裂准则,从弹塑性和几何非线性有限元模拟分析和大量的实验测试两个方面,系统研究了多处损伤 (multiple-site damage, MSD) 对飞机机舱拼接处残余强度的影响。Baaser 和 Gross^[86]采用三维连续有限元法,模拟了带裂纹柱壳在均匀内压作用下的损伤发展。采用 Gurson 损伤模型描述中碳钢的延性材料性能。为了表征应力和损伤沿壁厚的分布,在垂直于壳表面的方向采用了三层单元。有限塑性是基于多级变形梯度实现的。计算模拟了带一个轴向穿透裂纹和一个环向穿透裂纹的薄壁管在内压作用下的损伤发展、裂纹起始、扩展过程。

薄壳结构的承载力通常是由稳定性控制的。在许多实际的荷载与几何组合条件下,壳屈曲都是缺陷敏感的,所以,带裂纹壳的屈曲特性将明显不同于那些完整壳。EI Naschie^[87]研究了一个长圆柱壳带有轴对称裂纹的问题,结果显示其临界荷载是理想荷载的一半。Dyshel^[88]采用配点法研究了无限长、带环向穿透短裂纹薄浅圆柱壳在均匀拉伸下的屈曲行为。Starnes 和 Rose^[89]针对带有纵向裂纹并承受轴压作用圆柱壳,通过分析和实验研究了裂纹长度对无加劲铝合金薄壳的屈曲荷载的影响。Estekanchi 和 Vafai^[90]推出了一个参数研究,采用有限元法分析了带穿透裂纹圆柱壳的屈曲行为,分析了各种裂纹长度、方向和拉压荷载情况下的屈曲规律。Javidruzi 等人^[91]采用有限元法研究了带裂纹圆柱壳在固定支撑和面内拉压周期荷载作用条件下的振动、屈曲和动态稳定性,并分析了裂纹长度和方向的影响。

可见,关于含裂纹薄壳稳定性的研究已开展了一些工作,但是研究面很窄,基本限于轴压圆柱壳的问题,还缺乏一个能够应用于任意几何形状和荷载情况的统一分析理论方法。这可能是由于问题涉及因素多、分析复杂的原因所致。薄壁结构稳定性研究的重要内容是确定结构破坏时的极限承载力,可是这方面的研究也不多。Zhou^[92]采用整体杆模型与局部板模型相结合的方法,首次定量研究了裂纹对薄壁偏心柱挠度和极限承载力的影响,提出了屈服-断裂双参数准则。虽然该研究存在结果太保守,且尚未考虑大挠度的影响的缺点,但对于研究带裂纹薄壳的稳定性,有一定的借鉴作用。

5 结 语

本文通过回顾近代非线性薄壳稳定理论的发展历史,指出了薄壳稳定理论的研究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,目前正在进入第四阶段,即开始考虑结构物理缺陷的影响,最新的三个主要研究方向是:1) 非线性薄壳有限元分析方法;2) 材料局部损伤过程对薄壳稳定性的影响;3) 带裂纹薄壳的稳定性分析。文中分别就这三个方向的研究现状进行了调查分析,并对今后的研究趋势进行了展望。文献调查分析表明:在薄壳非线性稳定性分析的研究中,目前存在下列不足:

- 1) 考虑结构几何缺陷影响的研究多,而考虑物理缺陷影响的研究则很少;
- 2) 纯屈曲问题和纯断裂问题都分别研究的较多,二者的综合研究则极少。实际上二者是相互耦合的;
- 3) 缺乏关于薄壳非线性稳定性分析的统一理论和方法,统一考虑大变形、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。

在今后的薄壳稳定性分析研究中,计算技术的发展仍然是很有必要的,除了继续开发简单有效的有限元外,无网格技术是很有发展前景的。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,是今后薄壳稳定性的两个最新也是最有意义的研究方向,其发展对促进薄壳理论工程应用的是至关重要的。

参考文献:

- [1] 杜启端(2002). 现代薄壳非线性稳定性理论的发展和应 [J], 强度与环境, 29(1): 41- 51
- [2] 沈惠申(2002). 板壳后屈曲行为[M], 上海科学技术出版社
- [3] Hutchinson, J. W. (1974), (in) *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 14, Academic Press, New York, 67
- [4] Su Xu Ming et al. (1990), *Postbuckling and Imperfection Sensitivity Analysis of Structures in the Plastic Range. Part 1: Model Analysis*[J]. *Thin-Walled Structures*, 10: 263- 275
- [5] 周承侗(1979). 薄壳弹塑性稳定性理论[M], 国防工业出版社
- [6] Teng, J. G. and Rotter J. M. (1992). Buckling of pressurized axisymmetrically imperfect cylinders under axial loads [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 118(2): 229- 247
- [7] Berry, P. A., Rotter, J. M. and Bridge, R. Q. (2000). Compression tests on cylinders with circumferential weld depressions [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(4): 405- 413
- [8] Holst, J. M. F. G., Rotter, J. M. and Calladine C. R. (2000). Imperfections and buckling in cylindrical shells with consistent residual stresses [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 54: 265- 282
- [9] Rotter, J. M. (1990). Local inelastic collapse of pressurized thin cylindrical steel shells under axial compression [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 116(47): 1955- 1970
- [10] Rotter, J. M. (1988). Calculated buckling strengths for the

- cylindrical wall of 10,000tonnes silos at Port Kembla[R]. Investigation Report S663, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney
- [11] Teng, J. G. (1994). Plastic collapse at lap-joints in pressurized cylinders under axial load[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 120(1): 23– 45
- [12] ENV 1993- 1- 6. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1- 6: General Rules: Supplementary Rules for Shell Structures[S]. European Committee for Standardizations, Brussels, 1999
- [13] 赵阳, 滕锦光(2003). 轴压圆柱钢壳稳定设计综述[J]. *工程力学*, 20(6): 116– 126
- [14] 钱基宏(2003). 薄壳失稳机理浅析[J]. *计算力学学报*, 20(3): 365– 371
- [15] Yang, H. T. Y., Saigal, S., Liaw, D. G. (1990), Advances of thin shell finite element and some application—version II[J]. *Computers and Structures*, 35(4): 481– 504
- [16] Yang, T. Y. H., Saigal, S., Masud, A. & Kapania, R. K. (2000). A survey of recent shell finite elements[J]. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 47: 101– 127
- [17] 高光藩, 丁信伟. 薄壳结构分析有限元方法[J]. *石油化工设备*, 2002, 31(5): 28– 32
- [18] Sze, K. Y. (2002). Three- dimensional continuum finite element models for plate/ shell analysis[J]. *Prog. Struc. Engng. Mater.*, 4: 400– 407
- [19] Simo, J. C., Fox, D. D. (1989), On the stress resultant geometrically exact shell model. Part I: formulation and optimal parametrization[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 72: 267– 304
- [20] Peric, D., Owen, D. R. J., Homor, M. E. (1992), A method for finite strain elasto- plasticity based on logarithmic strains: Computational issues. *Comp [J]. Meth. App. Mech. Eng.*, 94: 35– 61
- [21] Dvorkin, E. N., Pantuso, D., Repetto, E. A. (1994), A finite element formulation for finite strain elastio- plastic analysis based on mixed interpolation of tensile components. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 114: 35– 54
- [22] Gabriel, G., Bathe, K- J. (1995), Some computational issues in large strain elastio- plastic analysis[J]. *Computers and Structures*, 56: 249– 267
- [23] Simo, J. C., Taylor, R. L., Pister, K. S. (1985), Variational and projection method for the volume constraint in finite deformation elasto- plasticity[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 51: 177– 208
- [24] Simo, J. C. (1992), Algorithms for static and dynamic multiplicative plasticity that preserve the classical return mapping schemes of the infinitesimal theory[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 99: 61– 3– 112
- [25] Eterovic, A. L., Bathe K- J. (1990), A hyperelastic- based large strain elasto- plastic constitutive formulation with combined isotropic- kinematic hardening using the logarithmic stress and strain measures[J]. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 30: 1099– 1114
- [26] Basar, Y., Ding, Y. (1995), Finite element analysis of hyperelastic thin shell with large strain[J]. *Comp. Mech*, 18: 200– 214
- [27] Kr? tzig, W. B., Jun, D. (2003), On ‘ best’ shell models— From classical shells, degenerated and multi-layered concepts to 3D[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 73: 1– 25
- [28] Basar, Y., Itskov, M. (1999), Constitutive model and finite element formulation for large strain elasto- plastic analysis of shells[J]. *Computational Mechanics*, 23: 466– 481
- [29] Liu, W. K., Guo, Y., Tang, S., Belytschko, T. (1998), A multiple- quadrature eight- node hexahedral finite element for large deformation elastoplastic analysis[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 154: 69– 132
- [30] Liu, W. K., Hu, Y. K., Belytschko, T. (1994), Multiple quadrature underintegrated finite elements[J]. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 37: 3263– 3290
- [31] Hughes, T. J. R., Liu, W. K. (1981), Nonlinear finite element analysis of shells: Part I. Three- dimensional shells[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 26: 331– 362
- [32] Hughes, T. J. R., Liu, W. K. (1981), Nonlinear finite element analysis of shells: Part II. Two- dimensional shells[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 27: 167– 181
- [33] Stolarski, H., Belytschko, T. (1983), Shear and membrane locking in curve shell elements[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 41: 279– 296
- [34] Li, S., Liu, W. K. (2000), Numerical simulations of large deformation of thin shell structures using mesh free methods[J]. *Computational Mechanics*, 25: 102– 116
- [35] Chen, J. S., Pan, C., Wu, C. T., Liu, W. K. (1997), Reproducing kernel particle methods for large deformation analysis of nonlinear structures[J]. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 139: 195– 229
- [36] Gould, P. L., Ravichandran, R. V., Sridharan, S. (1998). A local- global FE model for nonlinear analysis of column- supported shells of revolution[J]. *Engineering Structures*, 20(10): 915– 919
- [37] Gould, P. L., Hara, T. (2002), Recent Advances in Local- Global FE Analysis of Shells of revolution[J]. *Thin- Walled Structures*, 40(7- 8): 641– 649
- [38] Wohlever, J. C. (1999). Some computational aspects of a group theoretic finite element approach to the buckling and post-buckling analyses of plates and shells- of- revolution[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 170(3- 4): 373– 406
- [39] Sansour, C., Kollmann, F. G. (2000), Families of 4- node and 9- node finite elements for a finite deformation shell theory – An assessment of hybrid stress, hybrid strain and enhanced strain elements[J]. *Computational Mechanics*, 24: 435– 447
- [40] El Damatty, A. A., Nassef, A. O. (2001), A finite element optimization technique to determine critical imperfections of shell structures[J]. *Struct Mutidisc Optim*, 23: 75– 87
- [41] Won Jae Lee, Byung Chai Lee (2001), An effective finite rotation formulation for geometrical non- linear shell structures

- [J]. *Computational Mechanics*, 27 : 360– 368
- [42] Laurent, H., Rio G. (2001), Formulation of a thin shell finite element with continuity C0 and converted material frame notion[J]. *Computational Mechanics*, 27 : 218– 232
- [43] Kolahi, A. S. & Crisfield, M. A. (2001). A large- strain elasto- plastic shell formulation using the Morley triangle[J]. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 52: 829– 849
- [44] Ladeveze, P. (2001). Constitutive relation error for F. E. analysis considering (visco-)plasticity and damage[J]. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 52: 527– 542
- [45] Krajcinovic, D. (1996), *Damage Mechanics*[M], Elsevier Science Publishers, North- Holland, Amsterdam
- [46] Rabotnov, Y. N. (1963). On the equations of state for creep [J]. *Progress in Applied Mechanics*, 307– 315
- [47] McClintock, F. A. (1968), A criterion for ductile fracture by the growth of holes[J]. *J. of App. Mech.*, 35: 363– 371
- [48] Rice, J. R., Tracy, D. M. (1969), On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields[J]. *J. of Mech and Physics*, 17: 201– 217
- [49] Gourson, A. L. (1977), Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I- yield criterion and flow rules for porous ductile media[J]. *J. Eng. Mat. and Tech*, 99: 2– 25
- [50] Tvergaard, V. (1981), Influence of voids on shear band instability under plane strain conditions[J]. *Int. J. of Frcture*, 17 (4): 389– 407
- [51] Lemaitre, J. (1985), A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. *J. Eng. Mat. and Tech*, 107: 83– 89
- [52] Chaboche, J. L. (1981), Continuum damage mechanics- - a tool to describe phenomena before crack initiation[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 64: 233– 247
- [53] Roussetier, G. (1981), Finite deformation constitutive relations including ductile fracture damage[A]. *Three- Dimensional Constitutive Relations and Ductile Fracture*[C], Nemat- Nasser S (ed). North- Holland Publishing Company: Amsterdam, 97– 111
- [54] Bammann, DJ., Aifantis, E. C. (1989), A damage model for ductile metals[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 116: 355– 362
- [55] Simo, J. C., Ju, J. W. (1989), On continuum damage- elastoplasticity at finite strains[J]. *Comp. Mech.*, 5: 375– 400
- [56] Steinmann, P., Miehe, C., Stein, E. (1994), Comparison of different finite deformation inelastic damage models within multiplicative elastoplasticity for ductile materials[J]. *Comp. Mech.*, 13: 458– 474
- [57] Zohdi, T., Feucht, M., Gross, D. & Wriggers, P. (1998). A description of macroscopic damage through microstructural relaxation[J]. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 43: 493– 506
- [58] Kr? tzig, W. B., Petryna, Y. S., Stangenberg, F. (2000). Measures of structural damage for global failure analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 37(48– 50): 7393– 7407
- [59] Kr? tzig, W. B., Petryna, Y. S. (2001), Assessment of structural damage and failure[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 71: 1– 15
- [60] Eckstein, A. & Basar, Y. (2000). Ductile damage analysis of elasto- plastic shells at large inelastic strains[J]. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 47: 1663– 1687
- [61] Kreja, I., Schmidt, R., Weichert, D. (2001), Modeling and FE- simulation of plastic ductile damage evolution in plates and shells[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 72: 146– 163
- [62] Altenbach, H., Morachkovsky, O., Naumenko, K., Sychov, A.. Geometrically nonlinear bending of thin- walled shells and plates under creep- damage conditions[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 67(1997): 339– 352
- [63] Knowles, J. K., Wang, N. M. (1960), On the bending of an elastic plate containing a crack[J]. *J. Math. Phys*, 39: 223– 236
- [64] Williams, M. L. (1961), The bending stress distribution at the base of a stationary crack[J]. *J. Appl. Mech*, 28: 78– 82
- [65] Sih, G. C., Paris, P. C., Erdogan, F. (1962), Crack- tip stress- intensity factors for plane extension and plate bending problems[J]. *J. Appl. Mech*, 29: 306– 312
- [66] Hartranft, R. J., Sih, G. C. (1968), Effect of plate thickness on the bending stress distribution around through crack[J]. *J. Math. Phys.*, 47: 276– 291
- [67] Wang, N. M. (1970), Twisting of an elastic plate containing a crack[J]. *Int. Fract. Mech.*, 6: 367– 378
- [68] Viz, M. J., Zehnder, A. A., Bamford, J. D. (1955), Fatigue fracture of thin plate under tensile and transverse shear stresses[A]. *Fracture Mechanics: 26th Volume, ASTM STP 1256* (edited by Reuter et al.) [C], Philadelphia, PA
- [69] Zehnder, A. T., Hui, C. Y. (1994), Stress intensity factors for plate bending and shearing problems[J]. *J. Appl. Mech.* 61: 719– 722
- [70] Hui, C. Y., Zehnder, A. T. (1993), A theory for the fracture of thin plate subjected to bending and twisting moments[J]. *Int. Fract. Mech.*, 61: 211– 219
- [71] Pagano, N. J., Sih, G. C. (1968), Stress singularities around a crack in a cosserat plate[J]. *Int. J. Solids Struct.*, 4: 531– 553
- [72] Hartranft, R. J., Sih, G. C. (1970), An approximate three- dimensional theory of plates with application to crack problems[J]. *Int. J. Eng. Sci.*, 8: 711– 729
- [73] Fujimoto, T., Sumi, S. (1987), Bucking of center cracked plates under tension[A]. *Role of Fracture Mechanics in Modern Technology* (edited by Sih et al) [C], Elsevier Science Publishers B. V., 747– 759
- [74] Folias, E. S. (1965), An axial crack in a pressurized cylindrical shell[J]. *Int. Fract. Mech.*, 1: 104– 113
- [75] Folias, E. S. (1967), A circumferential crack in a pressurized cylindrical shell[J]. *Int. Fract. Mech.*, 3: 1– 11
- [76] Copley, L. G., Sanders, J. L. (1969), A longitudinal crack in a cylindrical shell under internal pressure. *Int. Fract. Mech.*, 5: 117– 131
- [77] Duncan- Fama, M. E., Sanders, J. L. (1972), A circumferen-

- tial crack in a cylindrical shell under tension[J]. *Int. Fract. Mech.*, 8: 15- 20
- [78] 柳春图, 蒋持平(2000), 板壳断裂力学[M], 北京: 国防工业出版社
- [79] N. C. Huang, Y. C. Li and S. G. Russell(1997). Fracture mechanics of plates and shells applied to fail- safe analysis of fuselage Part I: Theory[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 27(3): 221- 236
- [80] Riks, E. & Rankin, C. C. (2001). Tools for the evaluation of the residual of cracked pressurized fuselage shells[A]. *Proc of The Fifth Joint NASA/FAA/DoD Aging Aircraft Conference*[C]
- [81] Nguyen Dang Hung and Tran Thanh Ngoc(2004). Analysis of cracked plates and shells using "metis" finite element model[J]. *Finite Elements in Analysis and Design* 40(8): 855- 878
- [82] Carpinteri, A., Brighenti, R. & Spagnoli, A. (2000). External surface cracks in shells under cyclic internal pressure[J]. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 23: 467- 476
- [83] A. Vafai and H. E. Estekanchi(1999). A parametric finite element study of cracked plates and shells[J]. *Thin- Walled Structures*, 33(3): 211- 229
- [84] N. C. Huang, Y. C. Li and S. G. Russell(1997). Fracture mechanics of plates and shells applied to fail- safe analysis of fuselage Part II: Computational results[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 27(3): 237- 253
- [85] Ching- long Hsu, James Lo, Jin Yu, Xiao- gong Lee and Paul Tan (2003). Residual strength analysis using CTOA criteria for fuselage structures containing multiple site damage. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(3- 4): 525- 545
- [86] H. Baaser and D. Gross(2000). Crack analysis in ductile cylindrical shells using Gurson's model[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 37(46- 47): 7093- 7104
- [87] EI Naschie, M. S. (1974), Branching solution for local buckling of a circumferentially cracked cylindrical shell. *Int. J. Mech. Sci.*, 16: 689- 697
- [88] Dyshel, M. S. H. (1989), Stability of a cracked cylindrical shell in tension[J]. *Soviet Applied Mechanics*, 25: 542- 548
- [89] Starnes Jr., J. H., Rose, C. A. (1998), Buckling and stable tearing response of unstiffened aluminum shells with long cracks[A]. *Collection of Technical paper- AIAA/ASME/ASCE/SHS/ASC Structures. Structural Dynamics and Materials Conference 1998*[C], 3: 2389- 2402
- [90] H. E. Estekanchi and A. Vafai(1999). On the buckling of cylindrical shells with through cracks under axial load[J]. *Thin- Walled Structures*, 35(4): 255- 274
- [91] M. Javidruzi, A. Vafai, J. F. Chen and J. C. Chilton (2004). Vibration, buckling and dynamic stability of cracked cylindrical shells[J]. *Thin- Walled Structures*, 42(1): 79- 99
- [92] Zhou Li and Huang Yi(2005), The elastic deflection and ultimate bearing capacity of cracked eccentric thin- walled columns[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 19(4): 401- 411

第4届钢结构国际研讨会

2006年11月16日~17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2005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:

2006年3月31日前 论文摘要截止; 2006年4月30日前 发出摘要接受通知;

2006年7月31日前 论文全文截止; 2006年8月31日前 发出论文接受通知;

2006年9月30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:

Secretariat, ISSS'06

The Korean Society of Steel Construction(KSSC)

106- 18, Munjung- dong, Songpa- ku, Seoul 138- 20, Korea

Tel: + 82- 2- 400- 7101; Fax: + 82- 2- 400- 7104

E- mail: ijoss@mail.kssc.or.kr

Website: <http://kssc.or.kr>