

复合材料非破坏性测试

中国科学院力学研究所 洗杏娟

非破坏性测试用于检验材料和结构的内在特征,了解构件原有缺陷对性能的影响,并在进行各种载荷条件下力学性能试验时观察或试验后检查构件的破坏过程,以分析和确定构件的强度、刚度、断裂、疲劳、振动等力学性能以及破坏机理。复合材料由两种以上的增强元件及基体构成,材料本身就是一种力学结构。如纤维增强复合材料,纤维是主要承力件,基体起传递载荷以及连接纤维的作用。因此材料和结构件的内部表征要比一般金属材料复杂:复合材料即使有相似的外貌,也可能由于对内在表征的依赖性而具有很不相同的性能。因此,只有采用各种非破坏性测试技术来确定其各种内在特征,才能在加工制造过程中控制质量;在成品检验中了解缺陷情况及容许极限;在使用中监测损伤过程并预报破坏。为了提高复合材料和构件的力学性能,可靠使用并充分发挥复合材料比强度高、比刚度、疲劳和振动性能好的优越性。在研究工作中也需要采用非破坏性测试技术,研究不同组分、不同铺层、不同工作状态下微裂缝的扩展规律以及控制其扩展的方法,测试结果的分析研究与理论模型相结合,为使用、制造新材料及设计新结构提供依据,这是很有意义的。

非破坏性测试能确定复合材料的空穴率、污染、夹杂物、纤维含量、纤维破断与错位程度、树脂堆积区、热裂、脱胶、分层等潜在缺陷。不同的测试方法适用于检测不同的缺陷与破坏。复合材料非破坏性测试方法主要有: x 光照相法、超声鉴定技术、声发射技术、全息摄影技术、热扫描照相法、磁涡流法、光度计及 x 光衍射仪和显微测试技术等。在采用先进技术前采用目测检查与硬帮敲打法,可以有效地检查大面积结构件的缺陷位置。目测检验结果受观看角度与试件方位的影响,硬帮敲打法基于共振技术,共振频率的变化意味着缺陷的变化,可探测材料的分层与脱胶。

1. x 光照相法

x 光照相是利用不同的材料具有不同的能量吸收的原理建立起来的无损检测 (NDT) 技术。采用低电压软的 x 光,当 x 光穿过试件时,不同的材料组织结构决定了通过 x 光的强度差异,这样软片感光的程度也不同,从显示在底片上的试件组织结构,即可发现构件的内在缺陷。根据不同的成型方法、不同的构件情况确定不同的透射方法。

对薄的纤维增强复合材料板,电压范围以 7—15kV 为宜。例如,对 2.5mm 厚的碳纤维增强塑料(CRP)用 7 分钟曝光记时对应的 12kV 电压和 0.5mA 电流,能得到好的 x 光照片。这种低而足够的能量可被碳分子吸收,因此,这种技术广泛应用于碳纤维增强塑料及其制成的各种空间元件,也适用于检测、控制 CRP 蒙皮铝蜂窝芯子的卫星天线结构,对铝蜂窝芯子做这种测试要用 50kV 电压。

x 光照相法宜于检验纤维增强塑料层板的全貌,如纤维铺层方向、纤维皱损,树脂堆积区,外部异物或夹杂物易被发现。平行于 x 光的裂缝也容易暴露,所以尽可能使透射光线

方向与缺陷方向一致。如检查分层裂缝程度，最有效的是从试件边界处涂上有机溶液，溶剂所渗进的区域就是分层的区域。溶剂是不透X光的，用X光透射后，即可观察到分层破坏情况。X光照相还可检查蜂窝结构水的渗入情况。如检测小缺陷，可用小焦点X光探伤机。一般的X光照相法不适宜测量纤维含量、空穴率等，但它与其它技术结合使用，能取得好的效果。如X光照相机与X光显微镜配合，对很薄的FRP(纤维增强塑料)进行测试，将X光照片进行光学放大，图象能确定纤维方向。又如与超声技术合并使用，有空穴的区域在高超声衰减时有一很黑的X光照相图象，与低超声衰减灰色的区域相比较，X光照片可与超声扫描的图象对照，缺陷的形状、大小很相近。超声探伤后在缺陷处打小孔，渗入感光材料，再拍照片，能看到更具体的破坏区域。有人用硫贯穿试件后，由X光照相发现空穴，但这种方法不经济，而且硫渗透对试件性能可能有影响，实用价值不大。此外还有中子射线照相，用于CRP有一定优点。

2. 超声检测技术

当前利用超声脉冲扫描与超声频率分析技术来检测复合材料的缺陷日益广泛。

超声测试技术主要在两个领域：超声衰减测量和超声脉冲速度。超声衰减基本方法有脉冲反射和透射两种。脉冲反射法基于一个不连续的能量反射或对总响应有关的效应；透射法记录完全通过试件的能量。透射技术的优点是受试件表面不平度和外形等因素的影响不大，而且是不适用于薄的FRP的反射法的替代，因为，如果层板薄或缺陷多，许多反射波会重迭，造成混淆，失去分辨率。

透射测试方法是以一超声能量短路脉冲(1—20MHz)透射到试件中，通过试件后脉冲衰减，超声衰减的程度受空穴的出现、分层、基件性质以及试件表面的影响，由此可以辨别各种缺陷。如空穴出现会增加全面衰减。如图1，

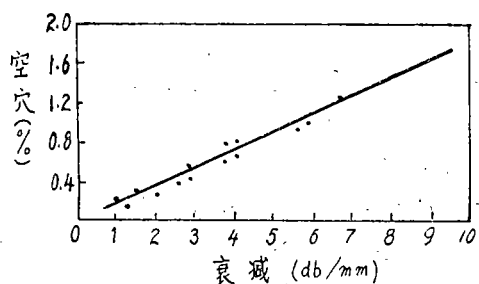


图1. 空穴对超声衰减的影响

表现的是空穴百分率与超声衰减程度的关系，显示了CRP不同时超声衰减对不同的空穴百分率的实验标定曲线。分层趋向产生一回反射，这就可与空穴区分开来。材料表面的皱折与锯齿形都能增强超声脉冲的衰减，因此试件表面准备要注意均匀一致。超声透射技术采用液体耦合可用两种浸渍型超声探头，试件在水槽里接受测试，采用C扫描技术用于观测大面积的复合材料构件和

蜂窝夹层结构较为方便。在水槽中板的两对边有发射和接收的同步光谱扫描运动，可确定不同纤维含量的面积和分层的区域。为了减少水对试件的污染还研制了其他简单的方法。

如超声频率以0.5—1.0MHz采用一般的软接触传感器，用一块聚乙烯塑料与试件接触，试件在共振模型引起振动，在距离若干毫米处另一软接触探头拾起，信号通过示波器显示幅值—时间的图形，幅值的改变意味着缺陷的存在。这种方法能检测严重的夹杂、蜂窝芯子的破损以及预浸片的撕裂，但不适于大面积的检测。还有滚轮式探头装置，与一个固定在充油胶肽的不滚动轴上的发射传感器连用，提供一可靠的再现超声耦合。这一装置的特点是要并入一接收信号装置，接入一窄带可调鉴别器，除调谐以外将其余频率都滤掉，这就限制了许多假的和干扰效应，探头扫过试件时检验不同的接收强度，分辨率有很大改进，试件表面很快通过滚轮探头受到检验，C扫描可作图。

此外还有福克(Fokker)粘接试验器。其主要功能是检测材料内在的粘接性能,尤其是检验固化树脂的内在性能和树脂的疏松程度,树脂的疏松是主要的连接缺陷,树脂固化时要求一定的压力防止疏松。从标定的幅值-频率相关曲线可以得到连接质量的可靠定量情况。共振频率峰移动的相关曲线和破坏实验曲线自动画出并可编码。

不同材料采用不同传感器,频率范围在50KHz—MHz之间。对夹层结构两边都需检验,仪器的清晰度是探头直径的函数,探头直径2/3大小的缺陷可探测,最小可用探头直径小于6mm。

声探伤仪和谐波粘结检验器用两个压电传感器作为探头,一是转换的和一个声信号发生器,振动传到试件,第二个传感器测量这些振动的幅值。结构内在的破坏由幅值图象的变化表示。

从超声衰减值中区分试件中的空穴和层间裂缝是有一定困难的,而且超声衰减对纤维体积含量不十分敏感,因此采用超声脉冲分类速度的技术代替超声衰减测量是必要的。

超声脉冲速度技术依赖于复合材料弹性模量的变化情况和它们各向异性特征。超声脉冲速度通过一种材料与脉冲传播方向的弹性模量的平方成比例。经过检测可得出材料的参数如纤维体积含量、纤维方向和空穴含量等,从小试件到大试件均可测量。这是一种很巧妙的技术,需要进一步研究。

超声测试也成功地用于确定正交铺层层板的铺层次序。试验设备包括一标准超声器和一个10°双超声探头,工作频率10MHz,接收信号的大小根据探针转动从0°—360°的不同值在超声仪屏幕记录的信号角度来表示,得到不同铺层次序的特性曲线。这一技术也可用于单向或正交铺层层板局部区域的纤维扰动,因为这时纤维的方向是随机的,它的特性曲线与正确铺层层板的不同。

3. 声发射技术

材料或结构内部受载时产生的变形或破坏过程中,由于贮存应变能的释放自发产生弹性波,这一过程定义为声发射。这一特性使声发射技术成功地用于检测材料或构件内部的缺陷,以研究材料的力学性能及评价结构安全,预报破坏的发生。

声发射技术可以检测复合材料基体的剪切破坏及拉伸屈服破坏、脱胶及纤维断裂、粘接强度等。复合材料发出的声发射讯号由传感器接收转换为电讯号,通过调节器放大、鉴别后输出模拟声发射讯号,再经信号分析器进行各种分析,得到各种声发射表征参数(如振铃、铃宽、加权振铃、事件、事长、能量、幅度值、连续波、突发波等),这些参数可记录并用于报警控制等。主要的曲线图是声发射数率和声发射总数(积分累积数)(图2)。

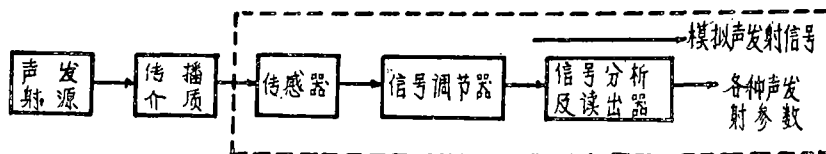


图2 声发射仪器框图

需要多少传感器要看实际应用,国外已有50通道的声发射装置。用计算机处理结果,传感器探头在声发射源附近接收发射讯号,对各传感器到达的时间间隔用三角测量技术确定缺陷的准确位置。用数字直接显示声发射源的实际坐标位置,并可排除干扰信息。弱的粘接

脱胶产生更多的声发射讯号, 纤维断裂发出高能量的声发射讯号

鉴别声发射信号排除噪声是关键问题。鉴别方法有幅度鉴别、频率鉴别、时间鉴别、空间和鉴别以及波形鉴别; 排除由于环境杂音和电干扰的影响。

声发射一般是不可逆过程, 如一试件加载至一定应力水平产生声发射然后卸载, 重新加载, 在原来的应力水平并不会发生声发射, 只有承受更高的载荷才能产生, 这一性能是 Kaiser 效应。

声发射测试较广泛地应用于两个方面, 一是检测潜在缺陷, 研究变形过程。除了静态试验还用于疲劳载荷下的破坏过程, 试件的损坏和声发射总数之间存在着极好的相关性。纤维断裂引起的声发射比基体开裂和分层的能量高。例如研究 CRP 疲劳试样的潜在缺陷, 采用宽带声发射传感器, 频率范围为 500kHz—3MHz。探头用硅滑脂放置在试件上及保证完全的声联接, 用三点弯曲装备, 声发射由传感器拾起, 接收信号用一适当的不同幅值, 用一适当的总单元, 数字积分提供累积数并显示在数值器上, 这些数描述了复合材料的疲劳性质, 在轴向加载疲劳试验中可装三个探头给出声发射信号。

另一方面, 声发射技术广泛用于监测玻璃纤维增强塑料(GRP)的压力容器(也有 CRP 和 Kevlar 的压力容器), 在容器受力变形过程中, 是复式的微断裂模式, 每一断裂都提高了声发射。由复合材料压力容器产生的声发射表征可用以研究两个方面: 一是断裂扩展机理的基本研究, 一是用无损检验监视容器的使用。一般可将振铃计数装置和幅值单元装置固定在圆柱器壁上, AETC 传感器单元放在压力容器顶部附近, 除了得到累积计数、数率、累积事件和不同事件的幅值分布, 同时还在实验中记录了作为时间的函数均方根信号幅值。为了研究压力容器的破坏机理, 不同压力水平给出不同的事件数。例如在 1/3 破坏压力时没有发生主要损伤, 继续增压至破坏压力 2/3 时稳压, 就出现典型的 GRP 多重破坏现象。在低压时树脂开裂, 增压过程有纤维破断, 出现高能量事件, 裂缝在树脂基体扩展, 裂缝尺寸增加将引起足够高的应力导致邻近纤维的破坏; 压力进一步增加, 发生最后破坏, 高能量释放。由声发射值可以观察到在破坏压力 30% 时有部分损伤, 相当安全系数为 3.66% 破坏压力时相当安全系数为 1.5。一般安全系数 > 2。

声发射技术的定量分析尚需进一步研究。

4. 激光全息与影纹法

全息摄影应用相干激光, 可测量微小的位移和变形, 由全息图上可检测复合材料的缺陷(分层、切断等)的数量和方位, 并可测出静力载荷下试件的应力分布及位移。

激光输出参考光与衍射光都通过窗口和光扩散器, 然后参考光引到照相板, 衍射光入射到试件上, 光由试件反射到底板, 波长和相位相同的相干光束重叠时产生相互干涉, 在相板上出现细微的干涉条纹图即全息图, 显影后在参考光束的照射下, 引起衍射光板的作用, 重新产生其它波形, 通过全息图的底板, 在试件的原位置上, 得到三维实象。如试件没有发生移动, 可观察到由试件接受的反射激光和全息照相衍射形成图象的两个光源是同相的。当试件有微小的位移或变形(离开板半波长或半波长的奇数积分)时, 衍射光和试件反射光将会反相, 引起干涉破坏, 条纹的间隔由试件原来位置的位移变化率显出来, 绝对应变即可测量。有的可自动判断干涉条纹, 观察可以在变化时显影全息图(实时化), 也可以在事后两次曝光在全息图上, 都称为全息干涉法。

全息摄影技术近年来有了迅速的发展, 应用于各种纤维增强的复合材料以及复合材料板

蜂窝芯子的构件,这一技术用于复杂形状和大构件是合适的。

为了推广全息摄影技术的应用,已研制了全息摄影干涉仪并有脉冲激光全息,但尚需进一步改善设备的操作和改进解释条纹值的方法。

5. 磁涡流测试法

对能导电的复合材料可采用磁涡流法无损检测,对非导电的复合材料如玻璃纤维增强塑料不能采用磁涡流法。碳纤维增强复合材料含有导电的碳纤维(体积含量 V_f 大于30%)可采用此方法。典型的碳纤维含量为55%的单向碳纤维增强塑料的纵向阻抗为0.08欧姆,横向阻抗为0.4欧姆。复合方向的铺层和短切纤维的复合材料由于更多的纤维接触使横向阻抗值低些。

通用的圆柱形磁涡流探头放在导电材料上,在材料内感生电流。如碳纤维复合材料有导电的碳纤维和不导电的树脂基体,在这里有两种可能感应磁涡流的电路:一是电阻性磁涡流电路,磁涡流感应通过这一纤维到另一纤维的接触点;二是电阻电容磁涡流电路,这里有一个纤维间的电容电路感应磁涡流附加到电阻电路里。在低频时,传导电路为第一种;在较高的频率时,纤维之间电容的电抗变成低于交替纤维传导电路的阻抗,因而第二种类型的传导电路更合理,由实验观察表明,频率超过15MHz时,应用后一型式较为适宜。

Owston⁽⁵⁾对碳纤维增强塑料(CRP)磁涡流环路电抗的灵敏度进行了理论分析,指出磁涡流的电抗随着CRP体积分含量的变化而变化。根据这一理论设计了一个磁涡流系统,它能监控探头的阻抗以确定不同的纤维体积分含量。

当探头阻抗随着试件条件变化时,通过振荡器输出到一个频率偏移表。图3表示了纤维体积分含量与测出磁涡流探头电抗变化频率偏差表读数的标定曲线。

磁涡流技术也可用于检查碳纤维增强塑料裂缝,应用时要求磁涡流系统的阻抗灵敏度大于上面所介绍的。磁涡流技术已成功地应用于确定正交铺层纤维层板的铺层次序。磁涡流在单向CRP板的电路不是环形的而是椭圆形的,主轴是纤维方向,如探头是环形的,探头和材料方向的关系会有影响;如探头是非环形的(一般在各向同性导体材料倾向用非环形磁涡流电路),当探头转动时感应电流电路不同,引起探头阻抗的改变,变化依赖于探头的形状和材料的各向异性。因此,用一标准形状的探头,可以研究各向异性的变化。也就是说,一个非环形磁涡流探头在正交铺层的CRP层板表面转动,由探头阻抗的变化情况确定复合材料铺层的性质。

目前使用的探头带有电抗敏感磁涡流电路,是六方形粉末铸铁杆,用20SWC的涂层铜丝缠绕。用于研究铺层次序的探头,是由七个铁氧体环合在一起,非磁垫片放在铁氧体之间,在沿探头长度缠绕的铜丝上涂以细金钢砂涂层。使用磁涡流电路和探头得到一批具有不同铺层次序的碳纤维增强层板的特性曲线。磁涡流技术也可用于检查CRP层板中无纤维的扰动,如果有纤维扰动将影响层板的强度和刚度。

6. 光度计及x光衍射技术

如上节所述,涡流法只适用于导电的复合材料和碳纤维复合材料;对不导电的复合材料

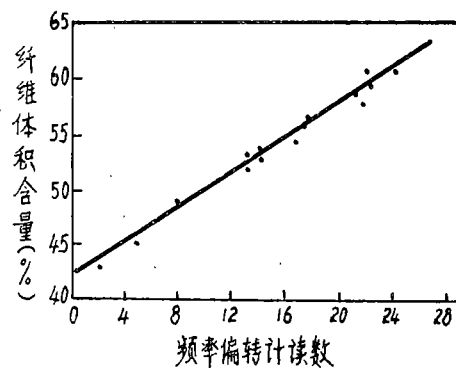


图3 磁涡流技术标定曲线

(如玻璃纤维增强塑料)用非破坏性方法确定它的纤维体积含量,需要采用光度计及x光衍射仪。

光度计测量不同的试样用不同强度的发射光;如薄的玻璃纤维增强复合材料层板在均匀强度的单色光源前,光反射再现纤维体积含量,这对薄板是很适用的,但对厚板,光发射的清晰度不够,因此需要采用x光衍射技术。实验装置包括一个标准x光发生器(Cu靶 K_2 射线,40kV,20mA)和一标准比例计算器,衍射x光相对强度的分布由脉冲鉴别器得到。具有不同纤维体积分含量的单向玻璃纤维增强复合材料试样在 2θ 于 2° — 160° (即 1° — 180° Bragg角)之间扫描,图象给出对不同 Bragg 角的衍射相对强度的分布,测出并标定各种试样的纤维体积含量对应波峰高度的曲线如图4,可见衍射x光相对强度的波峰高度和玻璃纤维增强塑料试样的纤维体积含量是逆线性关系。

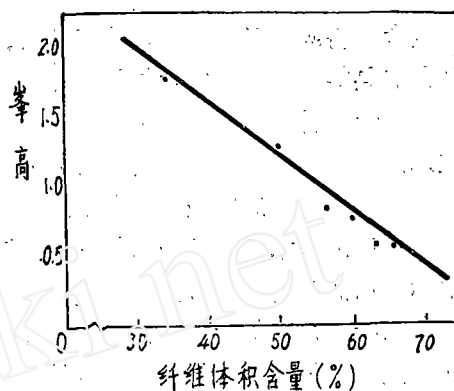


图4 光衍射技术标定曲线

7. 热扫描照相法(热像法)

复合材料结构内部存在缺陷将引起热传导的扰动,利用这一原理,使用红外照相机阴极射线管(CRT)显示装置,由测量红外光子的能量给出系统的温度,当检查表面时,任一点的温度情况由CRT的强度显示出来。红外照相机包括一个方检测器,用透镜和反射镜系统扫描观察区域。例如检验碳纤维复合材料面板铝蜂窝夹芯结构,内表面规定在前边,外表面在后边,利用试件热传导效应可观察结构内部,加热尽可能均匀,并且检查区域的温度被认为是不变的。前表面任一点的温度是该点与垂直距离的后表面对应点间热传导的函数。照相检测前表面的温度分布,温度任何变化在CRT显示都有所不同,无论A扫描或C扫描均可采用。

由于蜂窝芯子和面板的缺陷引起热传导的变化,这可由系统显示的前表面温度局部升高而反映出来。这是检查蜂窝结构脱胶很有效的方法,但灵敏度比x光照相法和超声波法要低些。

选择各种无损检测技术的原则是:探测不同缺陷采用相适应的方法,要考虑适用性和有效性,能达到测试的目的,能定位,经济且使用方便。对较高要求的和复杂的结构往往需要两种或两种以上的技术合并使用才较理想。关于无损检测技术对复合材料基本特性响应及定量分析需做更多的研究。

在初始检测阶段,先采用目测和硬帮敲打的传统方法,发现早期主要缺陷,在其它处理之前即可采取措施。目测可借助光学显微镜,包括原位显微镜和可移动的显微镜,后者可观察试件破坏过程中的裂缝数目。硬帮敲打法可探测脱胶和分层的位置。x光探伤比较方便可靠,能定位和辨别,并易于分析,尤其对检测脱胶和分层能提供大量情况并有复印件。缺点是对曲面或形状复杂结构的检测有困难。超声扫描对大面积探伤最为有效,可检测各种类型的缺陷,简单,快而准确,但超声技术的有效性有赖于操作者的技巧。复合材料构件在模具上亦可采用超声透射技术检测。声发射技术适宜配合试验机进行试验中破坏检测,在静态试验和疲劳试验中均可采用,能记录破坏过程,但分析较复杂。非接触无损检测技术——全息

摄影和热相扫描从原理上是很有吸引力的,可大面积检验,并能观察应变区域.全息干涉技术很精细但要求试件夹持系统很稳定,晃动要小于光波长才能得到好的全息图象.热照相技术很敏感,可检测复杂构件的较严重的缺陷.磁涡流技术适用于测量纤维体积含量和纤维排列次序,但不能用于不导电的复合材料.此外,还有微波、光声光谱等技术已开始应用于复合材料.

复合材料应用日益广泛,从飞行器、船体、车厢、汽车、自行车、建筑物、管道、容器到体育器具等.要发挥复合材料作为承力件的轻质、高强度高刚度的优越性,很重要的环节是保证复合材料在制造或加工成型过程中的质量可靠以及材料结构良好的力学性能.无损检测技术能够检测影响复合材料性能的各种缺陷并能加以分析,由缺陷的性质和程度评定其对复合材料强度刚度的影响,如在不影响其力学性能范围是容许的,否则要求采取措施.同时通过无损检测技术研究复合材料损伤过程破坏机理,对充分利用复合材料的先进性提出科学的依据,从而解决由于对复合材料质量的考虑而采用较大的安全系数而抵消了复合材料高性能优点的问题,使复合材料得到广泛而有效的利用.因此,进一步完善现有的无损检测技术并研究发展新的非破坏检测技术对发展复合材料是极其重要的.

参 考 文 献

- [1] Green, A. K. (July 1976), *The Metallurgist and Materials Technologist*: 382—394.
- [2] Prahash, K. (Oct. 1980), *J. Composite*: 217—224.
- [3] Boywer, W. H. (July 1981), *Design and Testing of Carbon Fiber Reinforced Plastic for Aerospace Use*: 26—52.
- [4] Stone, D. E. W. (1974), *Int. Conf. Carbon Fiber (PRI, London)*, paper 28.
- [5] Owston, C. N. (1973), *Br. J. Non-Destructive Testing*, 15, 1.
- [6] White, R. G., Tnetout, H. (Apr. 1979), *J. Composites*: 101—109.
- [7] Holl, J., Worthington, P. J. (1981), *Advances in Composite Material*, vol. 2, ICCM-III: 1040—1049.

~~~~~  
(上接第 306 页)

由于有限元法过去的历程,由于有限元法的持续不断的潜力,由于它在工业部门被广泛使用,以及由于对更加错综复杂的工程系统作高级的精确分析不断增长的需要,理应对发展有限元继续给予财政上的有力支持.

算法和计算机的不断改进,开创了一个必须继续迅速发展和应用有限元法的时代.

#### 参 考 文 献(略)

孟 珊译自: Hughes, T. J. R. (1980), *Some current trends in finite element research*, *Appl. Mech. Rev.*, 33, 11; 1467—1477. (李家春校)