



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106227921 A

(43)申请公布日 2016.12.14

(21)申请号 201610552235.0

(22)申请日 2010.09.13

(30)优先权数据

0956286 2009.09.14 FR

(62)分案原申请数据

201080047853.0 2010.09.13

(71)申请人 空中客车运营简化股份公司

地址 法国图卢兹

(72)发明人 格拉尔德·库杜昂特

保罗·梅西纳

(74)专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限

公司 11227

代理人 李春晖 李德山

(51)Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

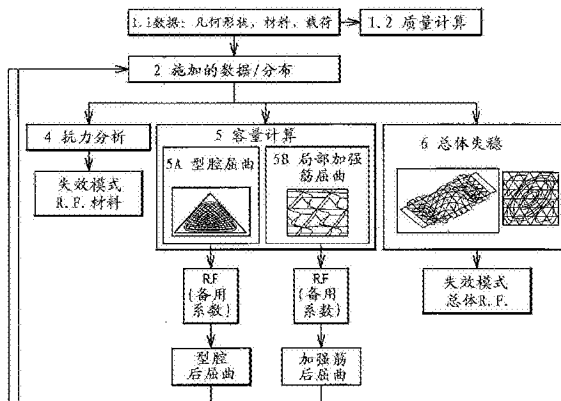
权利要求书2页 说明书44页 附图16页

(54)发明名称

用三角形格腔加强的各向同性材料面板的结构分析方法

(57)摘要

本发明提出确定由三角形格腔加强的面板尺寸的方法,其考虑航空特殊性、更具体地针对不同类型的弯曲和合适的储备系数的计算而考虑应力容量。该方法涉及利用分析方法,确定由同质且各向同性的材料组成的基本平直的面板尺寸的方法,面板由嵌入面板中的三束平行加强筋组件(称为“网格”)增强的蒙皮构成,这组加强筋在蒙皮上确定的格腔为三角形,加强筋为刀片状,加强面板必须符合对预定外部载荷的机械抗力规范,该方法包括被安排成对不同输入数据值迭代地重复进行直至获得储备系数的多个步骤,储备系数允许确定面板各组件的尺寸和布置以获得指定机械抗力。本发明具有若干优点,其中一个优点是允许安装如此获得的面板,以代替先前实现的面板。



1. 一种利用分析方法, 确定由同质并且各向同性的材料组成的基本平直的面板的尺寸的方法, 所述面板由嵌入到所述面板中的三束平行加强筋组件增强的蒙皮构成, 嵌入到所述面板中的三束平行加强筋组件为网格, 所述加强筋组在蒙皮上确定的格腔为三角形, 加强筋为刀片状, 加强的面板必须符合对预定外部载荷的机械抗力的规范,

其特征在于所述方法包括以下步骤:

- 获取与所述面板的几何形状、材料和施加于该面板的载荷有关的输入数据的值的第一获取步骤;

- 根据由三角形隔腔加强的所述面板的几何形状和所施加的外部载荷, 计算施加于所述面板的蒙皮和所述加强筋的应力的第二步骤;

- 计算在加强的所述面板的不同组件中所引发的内部载荷的第三步骤;

- 分析抗力的第四步骤, 分析抗力包括在有限载荷和极限载荷下计算所述材料的储备系数;

- 计算所述面板的局部应力容量的第五步骤, 其包括计算最大应力下的储备系数(RF);

- 计算所述面板的总体不稳定性第六步骤, 其包括计算平直的加强面板在简单载荷或复合载荷条件下的储备系数;

所述第四步骤至所述第六步骤是根据所述第三步骤的结果以独立的方式被执行的, 所述方法的各步骤被安排成针对不同的输入数据的值而迭代地重复进行, 直到获得使得能够确定所述面板的各组件的、允许获得所要求的机械抗力的尺寸和布置的储备系数。

2. 按照权利要求1所述的方法, 其特征在于, 第一获取步骤中的所述输入数据包括与材料、所述面板的尺寸、所述加强筋的直线段、腹板的尺寸、所述面板的恒定厚度以及所述面板的有限载荷有关的机械参数。

3. 按照权利要求1或2所述的方法, 其特征在于, 所述第三步骤实现利用塑性应力的迭代计算方法对施加的载荷的修正, 以将塑性考虑在内, 所述迭代计算方法一直执行到在所述第一步骤中所获取的材料的5个参数在迭代期间变化的值小于预定阈值为止, 所述5个参数为所述加强筋的分别对于角度 $0^\circ$ ,  $+ \theta$ 或 $- \theta$ 的杨氏模量和所述蒙皮的杨氏模量和弹-塑性泊松系数。

4. 按照权利要求1或2所述的方法, 其特征在于, 所述第五步骤包括计算等腰三角形格腔的屈服流变容量和储备系数的步骤5A, 为计算储备系数而考虑的施加应力仅仅是影响蒙皮的应力, 使用的外部流变是不对应于加强面板的完全载荷的蒙皮流变。

5. 按照权利要求4所述的方法, 其特征在于, 步骤5A包括如下两个子步骤: 利用有限元方法计算承受简单载荷情况的三角形板的流变容量, 其中, 所述简单载荷情况包括按照所述面板的水平方向的压缩、按照所述面板的垂直方向的压缩和剪切负荷; 随后计算这些简单载荷情况之间的相互作用曲线。

6. 按照权利要求5所述的方法, 其特征在于容量值的计算包括以下子步骤:

- 创建三角形板的有限元方法参数模型,
- 针对不同等腰角和不同简单加载情况的各种不同组合进行测试, 以获得屈服的线性结果,

- 获得与代表通过有限元方法获得的针对所述各种不同组合的所有相互作用曲线的解析多项式相容的参数。

7. 按照权利要求6所述的方法,其特征在于,在简单载荷的情况下,用以下子步骤定义相互作用曲线:

-创建具有不同等腰角的多个三角形板的有限元模型,等腰角( $\theta$ )被定义为等腰三角形的底角,

-对于每个等腰角:

1/利用有限元模型进行计算,以在无塑性修正的情况下确定各种板厚的褶皱的流变容量,

2/按照比值 $\frac{D}{h^2}$ ,跟踪屈服流变容量曲线,其中D是平板刚性,h是三角形的高度,利用按照该比值的二阶等式,对比值 $\frac{D}{h^2}$ 的值确定所述曲线,所述二阶等式中的系数 $K_1$ 和 $K_2$ 取决于角度和所考虑的载荷情况,

3/按照等腰三角形的底角,跟踪所述二阶等式的系数 $K_1$ 和 $K_2$ 的演变,这些系数是按照所考虑的三角形板的底角跟踪的,并且进行插值,以确定无论什么等腰角,都使得能够计算常数 $K_1$ 和 $K_2$ 的所述二阶等式。

8. 按照权利要求6或7所述的方法,其特征在于,在复合加载的情况下,使用以下假定:如果复合载荷的某些分量是拉伸分量,那么计算不考虑这些分量,相互作用曲线由以下子步骤定义:

-创建具有不同等腰角的多个三角形板的有限元模型,等腰角( $\theta$ )被定义为等腰三角形的底角,

-对于每个底角:

1/利用有限元模型(FEM)进行计算,以确定与外部载荷的不同分布对应的屈服的本征值,

2/对于每个底角和载荷的每种组合,跟踪相互作用曲线,随后用覆盖所有这些组合的如下的唯一等式近似这些曲线:

$$R_{cX}^A + R_{cY}^B + R_s^C = 1, \text{ 其中 } A、B、C \text{ 是经验系数, 这里 } R_i = \frac{N_i^{app}}{N_i^{crit}}, \text{ 其中 } i = cX, cY \text{ 或 } s。$$

9. 按照权利要求6所述的方法,其特征在于,就简单支承或者被夹持的等腰三角形板来说,在复合载荷的情况下,对于所有的载荷情况,使用所述相互作用曲线: $R_{cX} + R_{cY} + R_s^{\frac{3}{2}} = 1$ ,其中, $R_i$ 代表 $i = cX, cY$ 或 $s$ 的载荷比率,分别对应于沿X轴和Y轴的压缩的情况和剪切载荷的情况。

10. 按照权利要求1或2所述的方法,其特征在于,根据加强的所述面板的外部流变以及简单支撑或夹持的边界条件,来实现计算总体不稳定性的第六步骤,所述总体不稳定性的计算提供平直的加强的所述面板在简单载荷或复合载荷条件下的屈服流变容量和储备系数的数据以及对储备系数的计算。

## 用三角形格腔加强的各向同性材料面板的结构分析方法

[0001] 本申请是2010年9月13日提交的申请号为PCT/FR2010/051900,标题为“由各向同性材料组成并用三角形格腔加强的面板的结构分析方法”的专利申请的分案申请。

### 技术领域

[0002] 本发明涉及结构领域。本发明尤其涉及加强面板式结构,更具体地说,涉及用加强筋增强的这种面板。本发明涉及计算承受复合载荷的这种结构的抵抗力。

### 背景技术

[0003] 薄的加强结构占商用飞机的主要结构中的很大部分。

[0004] 通常用加强筋增强面板,所述加强筋相互垂直,在面板的蒙皮上限定矩形区域,所述矩形区域受加强筋限制,并被称为格腔。

[0005] 飞机的结构因此由加强筋和蒙皮的构架构成:

[0006] -纵向加强筋(通常称为纵梁):它们沿着载荷的主方向,提供对结构的支持。

[0007] -横向加强筋(通常称为“框架”或“肋条”):它们的主要功能是提供对纵梁的支持。

[0008] -面板(通常称为蒙皮):通常,它通常承接平面(表层)中的加载。

[0009] 纵梁和桁条被设定成彼此成 $90^\circ$ ,在蒙皮上限定矩形格腔。

[0010] 然而,在二十世纪五十年代和六十年代,对于宇宙飞行器结构,NASA提出一种称为“等栅格(Isogrid)”的加强结构的新原理(参见图1)。

[0011] 因而这种加强结构由具有网状加强筋的增强蒙皮构成,加强筋之间被设定成 $\Theta^\circ$ (在NASA设想的结构中, $\Theta = 60^\circ$ )。加强筋为刀片形状,并被嵌入面板中。由于其几何形状,这种结构具有正交各向异性的性质(当 $\Theta = 60^\circ$ 时,各向同性),在蒙皮上形成的格腔为三角形。

[0012] 在下面的说明中,术语用三角形格腔加强的结构,或者用三角形格腔加强的面板用于定义由形成三角形格腔的交叉加强筋增强的结构或面板。

[0013] 文献中可获得的用于计算用三角形格腔加强的这种结构的抵抗力和稳定性的数据有限。

[0014] 用三角形格腔加强的面板的现有计算方法的状态

[0015] 在NASA合同报告“‘Isogrid’ design handbook”(NASA-CR-124075,02/1973)中说明了用等边三角形格腔加强的面板的分析计算方法。

[0016] 该方法在文献中得到充分证明,但该方法存在一些严重的局限:仅仅使用等边三角形:角度 $= 60^\circ$ ,计算施加的应力,但不计算应力容量,材料的泊松系数仅仅等于 $1/3$ 。

[0017] 该现有方法存在许多局限,没有考虑在飞机结构上存在的所有问题,尤其是涉及边界条件和塑性的问题。因此,现有方法不能可靠地用于由三角形格腔加强的面板的结构分析计算。

### 发明内容

[0018] 为了进行由三角形格腔加强的面板的结构分析,根据复合板的理论,并且考虑到复合板的具体失效模式,提出一种结构分析方法。所述方法适用于由具有各向同性性质的材料制成的平直面板。

[0019] 这里说明的方法设想加强筋之间的底角(在“Isogrid”结构中,为 $60^\circ$ )的改变。这意味不再保证面板的各向同性性质。

[0020] 为此,本发明涉及一种利用分析方法,确定由同质并且各向同性的材料组成的基本平直的面板的尺寸的方法,所述面板由嵌入到面板中的三束平行加强筋组件(称为“网格”)增强的蒙皮构成,这组加强筋在蒙皮上确定的格腔为三角形,加强筋为刀片状,加强的面板必须符合对预定外部载荷的机械抗力的规范,

[0021] 各束加强筋之间的角度允许三角形格腔具有任意类型的等腰形状。

[0022] 按照一种有利的实现方式,所述方法包括以下步骤:

[0023] 步骤2-根据加强的面板的几何形状,和假定位于面板的平面中并施加在(面板的)截面的重心处的外部载荷,计算施加在蒙皮和加强筋中的应力,以及蒙皮中的流变和加强筋中的载荷,其中用两个正交各向异性板的组合件表示加强的面板,用等效面板表示加强筋的网格。

[0024] 步骤3-计算加强的面板的内部载荷,

[0025] 步骤4-抗力分析,包括在有限载荷和极限载荷下,计算材料的储备系数,

[0026] 步骤5-计算局部应力容量

[0027] 优选地,所述方法:

[0028] 通过每种加强筋( $0^\circ$ ,  $+\theta$ 或者 $-\theta$ )的有效直线段的定义,考虑由加强筋的后期屈服引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布,其中用 $A_{0^\circ}^{st}$ ,  $A_{+\theta}^{st}$ 和 $A_{-\theta}^{st}$ 表示加强筋的后期屈服,

[0029] 通过计算面板的有效厚度 $t_{s\_eff}$ ,考虑由格腔的后期屈服引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布,

[0030] 通过利用兰贝格-奥斯古德(Ramberg-Osgood)定律,对材料的各种特性(尤其是杨氏模量和泊松系数)迭代处理,考虑由施加的外部载荷的塑性引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布,其中对加强筋的 $E_{0^\circ}^{st}$ ,  $E_{+\theta}^{st}$ ,  $E_{-\theta}^{st}$ 和蒙皮的 $E_x^s$ ,  $E_y^s$ 和 $\nu_{ep}^{st}$ 进行迭代处理。

[0031] 根据按照本发明的方法的一种优选实现模式,所述方法包括利用塑性应力的迭代计算方法修正施加的载荷,从而考虑塑性的步骤,所述迭代方法一直执行到在处理开始时输入的材料参数的5个参数( $E_{0^\circ}^{st}$ ,  $E_{+\theta}^{st}$ ,  $E_{-\theta}^{st}$ ,  $E_{skin}$ ,  $\nu_{ep}$ )显然等于在塑性应力的计算之后获得的相同参数为止。

[0032] 按照一种有利的实现方式,所述方法包括分析抗力的步骤4,它包括比较加强的面板组件中的计算的施加载荷和材料的最大应力容量,来实现包含在有限荷载和极限荷载下对材料的储备系数进行计算的抗力分析,其中修正所施加的载荷以考虑加强的面板的塑性。

[0033] 按照一种有利的实现方式,所述方法包括计算局部应力容量的步骤5,它包括计算等腰三角形格腔的屈服流变容量和储备系数的子步骤5A,就储备系数的计算来说,要考虑的施加应力仅仅是影响蒙皮的应力,所使用的外部流变是不对应于加强面板被完全加载时

的蒙皮流变。

[0034] 这种情况下,计算等腰三角形格腔的屈服流变容量和储备系数的子步骤5A最好包括两个子步骤:首先,利用有限元方法,计算承受简单载荷情况(与平面中的两个方向相应的压缩,剪切载荷)的平板的容量值,随后计算这些简单载荷情况之间的互作用曲线。

[0035] 更准确地说,计算容量值包括以下子步骤:

[0036] • 创建三角形板的FEM参数模型,

[0037] • 测试各种不同组合,以获得屈服结果,

[0038] • 获得与解析多项式相容的参数。

[0039] 在一种特殊的实现模式中,在简单载荷的情况下,用以下子步骤定义互作用曲线:

[0040] -创建具有不同等腰角的多个三角形板的有限元模型,等腰角( $\theta$ )被定义为等腰三角形的底角,

[0041] -对于每个等腰角:

[0042] 1/利用有限元模型进行计算,以确定各种板厚的褶皱的流变容量(无塑性修正)。

[0043] 2/按照  $\frac{D}{h^2}$  比( $D$ 是平板刚性, $h$ 是三角形的高度),跟踪屈服容量的流变曲线,利用按

照该比例的二阶等式,对  $\frac{D}{h^2}$  的较小值确定所述曲线,所述二阶等式中的系数 $K_1$ 和 $K_2$ 取决于角度和所考虑的载荷情况,

[0044] 3/按照等腰三角形的底角,跟踪多项式等式的系数 $K_1$ 和 $K_2$ 的演变,这些系数是按照所考虑的三角形板的角度跟踪的,并且进行插值,以确定无论什么等腰角,都使得能够计算这些常数的多项式等式。

[0045] 同样,在计算等腰三角形格腔的屈服流变容量和储备系数的情况下,按照一种有利的方式,在复合加载的情况下,使用以下假定:如果复合载荷的某些分量为拉伸分量,则计算不考虑这些分量,互作用曲线由以下子步骤定义:

[0046] -创建具有不同等腰角的多个三角形板的有限元模型,等腰角( $\theta$ )被定义为等腰三角形的底角,

[0047] -对于每个等腰角:

[0048] 1/利用有限元模型(FEM)进行计算,以确定与外部载荷的各种分布对应的流变的本征值。

[0049] 2/对于每个角度和载荷的每种组合,跟踪互作用曲线,随后用覆盖所有这些组合的如下的唯一等式近似这些曲线:

[0050]  $R_{cX}^A + R_{cY}^B + R_s^C = 1$ ,其中A、B、C是经验系数,  $(R_i = \frac{N_i^{app}}{N_i^{crit}}$ ,其中 $R_i$ 代表载荷比率, $N_i^{app}$

和 $N_i^{crit}$ 代表施加的流变和临界流变( $i = cX, cY$ 或 $s$ )对应于沿轴X和Y的压缩的情况,以及剪切载荷的情况)。

[0051] 有利的是,所述方法还包括通过求解以下等式,计算储备系数的子步骤:

$$[0052] \left(\frac{R_{cY}}{R}\right)^A + \left(\frac{R_{cX}}{R}\right)^B + \left(\frac{R_s}{R}\right)^C = 1$$

[0053] 其中  $R = \frac{N_{cY}^{app}}{N_{cYcomb}^{crit}} = \frac{N_{cX}^{app}}{N_{cXcomb}^{crit}} = \frac{N_s^{app}}{N_{scomb}^{crit}} = \frac{1}{RF}$

[0054] 按照一种有利的实现,对于塑性修正的应力容量的计算,所述方法利用塑性修正系数,所述塑性修正系数由以下的式子定义:

[0055] -对除剪切载荷之外的所有的加载情况(简单载荷和复合加载),

[0056]  $\eta = E_{tan}/E_c$

[0057] -对于纯剪切加载的情况:

[0058]  $\eta_6 = \frac{(1+\nu_e) \cdot E_{sec}}{(1+\nu) \cdot E_c}$

[0059] 塑性修正是利用等效冯米斯(Von Mises)弹性应力计算的。

[0060] 按照一种有利的实现方式,就简单支撑或者被夹持的等腰三角形板来说,在复合加载的情况下,对于所有的加载情况,使用相互作用曲线:  $R_{cX} + R_{cY} + R_s^{\frac{3}{2}} = 1$ 。

[0061] 按照一种有利的实现方式,所述方法包括计算局部应力容量的步骤5,它包括计算被视为矩形面板的加强筋腹板的屈服应力容量和储备系数的子步骤5B,对储备系数的计算来说,施加的应力仅仅是加强筋腹板中的应力。

[0062] 按照所述方法的一种有利的实现方式,所述方法包括步骤6,在步骤6中计算总体不稳定性,提供平直的加强面板在简单载荷或复合加载条件下的屈服流变容量和储备系数的数据,对储备系数的计算来说,要考虑的施加的流变是加强面板的外部流变。

[0063] 这种情况下,更具体地说,所述方法最好包括以下子步骤:

[0064] -利用一般行为规律(等式6-8),一方面定义流变和力矩(应变)之间的流变和力矩关系,另一方面,定义所考虑的平面应力的状态。

[0065] -利用加强面板的元件的一般平衡等式(等式6-9和6-10),把流变、力矩和表面强度的密度联系起来,

[0066] -求解应力流变、表面强度密度、位移和弯曲加强筋之间的一般微分等式(等式6-17)。

[0067] 按照一种有利的实现方式,所述方法包括迭代步骤,从而使得能够按照步骤3-6至少之一的结果,修改施加的荷载的数值或者面板的尺寸值。

[0068] 在另一方面,本发明涉及一种包括一系列指令的计算机程序产品,当在计算机上执行时所述一组指令,所述指令适合于实现如上所述的方法。

## 附图说明

[0069] 参考附图,以单纯举例的方式给出本发明实施例的示例的说明,在所述附图中:

[0070] 图1-用三角形格腔加强的平板的例子,

[0071] 图2-加载和坐标系的定义,

[0072] 图3-面板的几何定义,

[0073] 图4-用三角形格腔加强的结构中的接合点,

[0074] 图5-用三角形格腔加强的面板的总体不稳定性例子,

[0075] 图6-有效宽度的理论,

- [0076] 图7-按照本发明的方法的一般组织结构图,
- [0077] 图8-按照基本三角形对网格的分解,
- [0078] 图9-在面板质量的计算中使用的基本等腰三角形,
- [0079] 图10-在面板质量的计算中使用的基本直角三角形,
- [0080] 图11-用三角形格腔加强的面板中的加强筋网格的基本形状,
- [0081] 图12-加强板的简单载荷的情况,
- [0082] 图13-加强筋上的载荷的示图,
- [0083] 图14-与边界条件的情况相应的 $K_c$ 系数的表达式,
- [0084] 图15-视为两个正交各向异性板的组合件的加强筋的面板,
- [0085] 图16-用三角形格腔加强的面板的加强筋网格的基本形状上的载荷,
- [0086] 图17-计算进行了塑性修正的施加载荷的方法,
- [0087] 图18-基本等腰三角形的符号约定,
- [0088] 图19-K系数的线性或二次插值,
- [0089] 图20-复合加载的情况,
- [0090] 图21-流变和力矩的约定,
- [0091] 图22-对压缩情况来说,与各种边界条件相应的 $h(\bar{\alpha})$ 的值,
- [0092] 图23-四边简单支撑结构的剪切屈服系数,
- [0093] 图24-剪切屈服系数值的表格,
- [0094] 图25-被夹持的四边结构的剪切屈服系数,
- [0095] 图26-对简单支撑的三角形板来说,常数 $K_1$ 按等腰角的演变,
- [0096] 图27-对简单支撑的三角形板来说,常数 $K_2$ 按等腰角的演变,
- [0097] 图28-对被夹持的三角形板来说,常数 $K_1$ 按等腰角的演变,
- [0098] 图29-对被夹持的三角形板来说,常数 $K_2$ 按等腰角的演变。

### 具体实施方式

[0099] 所说明的用三角形格腔加强的金属面板,尤其是平板的抵抗力分析方法意图用在已知类型的计算机上的程序的形式实现。

[0100] 该方法意图用于主要是平板(加强筋和蒙皮)的结构。这里说明的方法专门适用于具有下述边界的典型结构设定的计算:

[0101] 研究区域的边缘不毗连开口。

[0102] 加强筋都不伸出所研究区域之外。

[0103] 每个截面必须以加强筋为界。

[0104] 蒙皮中的所有三角形格腔被认为具有相同的厚度。

[0105] 认为所有加强筋具有相同的尺寸。

[0106] 该方法用于计算由同质并且各向同性的材料(例如,但不限于-金属)构成的面板,对这样的面板而言,借助诸如R&O之类的公式,能够使描述单调递增曲线( $\sigma, \epsilon$ )理想化(参见下文)。

[0107] 图7图解说明按照本发明的方法的简化组织结构图。

[0108] 在由三角形格腔加强的结构上,可出现两种失效(在方法的步骤4和6中评估所述



失效的出现):材料中的断裂(这是步骤4的对象):施加的应力已达到材料的最大应力容量( $F_{tu}$ 或 $F_{su}$ );整体失效:在整个面板中出现普遍失效(包括加强筋的网格)(该验证是步骤6的对象)。

[0109] 另外,两种失稳(步骤5的对象)削弱用三角形格腔加强的结构的整体刚性,不过不导致整个结构的整体失效:

[0110] 面板的失稳:三角形格腔的屈服

[0111] 加强筋的失稳:加强筋腹板的屈服

[0112] 被屈服的部分只能支撑它们在被屈服之前能够支撑的载荷的一部分。因此,施加的载荷在结构中被重新分配。

[0113] 注意在本发明中,不处理后期屈服计算。因此,上面所指的两种屈服被认为是失效模式。

[0114] 符号和单位

[0115] 图2中说明了符号和坐标轴系的约定。

[0116] 为每个加强筋定义本地坐标系。沿着加强筋的主要尺寸的方向,在加强筋的直线段的平面中定义X轴(这是退出轴)。沿着加强筋的方向,Z轴被定义为蒙皮的平面中的垂直轴。最后,Y轴是直角坐标系中的第三个轴。

[0117] 对力和载荷来说,与X轴相应的力的负号表示加强筋的压缩,正号表示拉伸。

[0118] 正弯曲力矩导致蒙皮中的压缩和加强筋中的拉伸。

[0119] 下表中定义了使用的一般符号。

[0120]

符号	单位	描述
A	$mm^2$	表面

[0121]

<b>I</b>	$mm^4$	惯量
<b>J</b>	$mm^4$	扭转常数
<b>K</b>	$N/mm$	平板的垂直刚性(拉伸/压缩)
<b>D</b>	$N.mm$	平板的弯曲刚性
<b><math>\sigma</math></b>	$N/mm^2$	应力
<b><math>\varepsilon</math></b>	-	应变
<b><math>\kappa</math></b>	-	平面之外的应变
<b><math>\eta</math></b>	-	塑性修正系数
<b>z</b>	$mm$	Z轴上的坐标
<b>k</b>	-	屈服系数

[0122] 后缀

[0123]

符号	单位	描述
g	-	网格
st	-	加强筋
s	-	蒙皮

[0124] 几何特性

[0125] 图3中给出了这里视为非限制性举例的面板的几何特性。

[0126] 对余下的说明来说,使用几个假定。假定Z轴是加强筋的直线段的对称平面。另外,按照加强筋的中间纤维定义尺寸a和h。另外,设想的用三角形格腔加强的面板在由 $X=0$ 和 $X=L_x$ 的两边没有加强筋。

[0127]

符号	单位	描述
<b><math>L_x</math></b>	$mm$	长度
<b><math>L_y</math></b>	$mm$	宽度
<b>a</b>	$mm$	三角形的边长
<b><math>\theta</math></b>	°	三角形的角度

[0128]

<b>h</b>	<b>mm</b>	三角形的高度( $=\frac{a}{2} \cdot \tan \theta$ )
<b>t</b>	<b>mm</b>	蒙皮的厚度
<b>d</b>	<b>mm</b>	加强筋织网的高度
<b>b</b>	<b>mm</b>	加强筋织网的厚度
<b>R<sub>n</sub></b>	<b>mm</b>	圆角节点半径
<b>R<sub>f</sub></b>	<b>mm</b>	格腔半径
<b>A<sub>x<sub>0</sub></sub><sup>st</sup></b>	<b>mm<sup>2</sup></b>	与轴 x 相应的加强筋的直线段
<b>V<sub>p</sub></b>	<b>mm</b>	面板重心和本地坐标系的原点之间的面板偏移量
<b>V<sub>w</sub></b>	<b>mm</b>	加强筋网络重心和本地坐标系的原点之间的加强筋网络偏移量

[0129] 材料

[0130]

符号	单位	描述
$F_{cy}$	<i>MPa</i>	压缩下的材料的塑性容量
$F_{tu}$	<i>MPa</i>	材料的极限抗拉力
$F_{su}$	<i>MPa</i>	材料的极限抗剪力
$\sigma_n$	<i>MPa</i>	应力参量
$\epsilon_{ult}$	-	极限塑性应变(=e%)
$\nu_e$	-	弹性泊松系数
$\nu_p$	-	塑性泊松系数(=0.5)
$\nu$	-	弹-塑性泊松系数
$E_c$	<i>MPa</i>	压缩杨氏弹性模量
$E$	<i>MPa</i>	拉伸杨氏弹性模量
$E_{sec}$	<i>MPa</i>	割线模量
$E_{tan}$	<i>MPa</i>	切线模量

[0131]

$n_{ec}$	-	压缩时的 Ramberg 和 Osgood(R&O)系数
$G$	<i>MPa</i>	剪切模量
$G_{sec}$	<i>MPa</i>	割线剪切模量
$\rho$	<i>kg/mm<sup>3</sup></i>	材料密度

[0132] 应力

[0133]

符号	单位	描述
$P_i$	$N$	<p><math>i</math> 等于下述值时的法向载荷:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>0^\circ</math>, 对成 <math>0^\circ</math> 施加在加强筋上的载荷来说</li> <li>• <math>x^\circ</math>, 对成 <math>x^\circ</math> 施加在加强筋上的载荷来说</li> </ul>
$N$	$N/mm$	流变
$M$	$N.mm$	弯曲力矩
$\tau$	$MPa$	剪切应力
$\sigma$	$MPa$	法向应力
$\sigma_{crit}^i$	$MPa$	压缩时的面板 $i$ 中的屈服应力
$\tau_{crit}^i$	$MPa$	剪切载荷下的面板 $i$ 的屈服应力
$\sigma_{app}^i$	$MPa$	元件 $i$ 上的施加应力
$RF$	—	储备系数
$R_c$	—	压缩载荷率
$R_s$	—	剪切载荷率
$R_p$	—	归因于压力的载荷率
$LL$		载荷限度
$UL$		极限载荷

[0134] 定义

[0135] 对于余下的说明,定义以下术语。

[0136] 在用三角形格腔加强的结构中,网格指的是由各加强筋构成的整个网络。

[0137] 术语节点用于描述用三角形格腔加强的结构中的几个加强筋的交点(参见图4)。实际上,它是包括两个方向的弯曲半径的复杂设计的要素。

[0138] 当结构(只在其平面中受到载荷)由于载荷而在平面中承受相当大的明显横向位移时,认为结构被屈服。图5a图解说明了用三角形格腔加强的面板的局部失稳的这种情况。

[0139] 可以通过挤压平直纸板彼此相对的两边来示范屈服现象。对较小的载荷来说,屈服是弹性的(可逆的),因为当消除载荷时,屈服消失。

[0140] 平板或壳体的局部屈服(或者局部失稳)由突起、起伏或波的出现指示,在构成薄结构的平板中常见。当考虑加强的面板时,与整体屈服相反,局部屈服描述其中纵梁(加强筋)之间的面板屈服的失稳,不过,加强筋继续支撑面板,而不在平面之外显现任何明显的应变。

[0141] 于是,该结构呈现两种平衡状态:

[0142] • 稳定:在这种情况下,当载荷增大时,偏移可控地增大,即,结构的承受额外载荷的容量得到保持,或者

[0143] • 不稳定:在这种情况下,应变即刻增大,承受载荷的容量迅速降低。

[0144] 在屈服期间,理论上,中性平衡也是可能的,这种状态用在不改变载荷的情况下,应变的增大表征。

[0145] 如果屈服应变增大过大,结构失效。如果组件或者组件的一部分可能承受屈服,那么其设计必须遵守抗力和屈服两者的应力。

[0146] 总体不稳定性指的是当在屈服期间,加强筋不再能够抵抗超出平面之外的平面的位移时出现的现象。

[0147] 图5b表示当面板到达其第一整体屈服模式时,在用三角形格腔加强的结构的压缩中的整体屈服的例子。

[0148] 因此,必须查明加强筋是否充当面板的简单支撑(在压缩、剪切载荷和复合载荷下)。如果该条件未被满足,那么必须假定面板组合件和加强筋按照失稳模式整体屈服,而这是用于航空应用的结构必须避免的。

[0149] 当结构不再能够承受额外的载荷时,发生整体失效。于是,可以认为结构已到达失效加载或加载容量。

[0150] 整体失效覆盖所有类型的失效:

[0151] • 归因于失稳(总体不稳定性,后期屈服…)的失效

[0152] • 因超过材料承受的最大载荷而引起的失效(例如,在局部屈服之后)

[0153] 面板的蒙皮的有效宽度(或工作宽度)被定义为当受到轴向压缩载荷时,由加强的面板结构中不屈服的纵梁支撑的那部分蒙皮。

[0154] 蒙皮独自的屈服不会构成面板失效;面板事实上将承受额外的载荷,直到由加强筋和有效面板形成的柱形物开始失效的应力为止。当加强筋中的应力超过蒙皮的屈服应力时,由于加强筋提供的支撑的缘故,与加强筋相邻的蒙皮可忍受额外的应力。不过,只要应力到达加强筋的水平,面板中央的应力将不超过初始屈服应力。

[0155] 由于存在抵抗屈服的局部支撑,在加强筋的位置周围的蒙皮更有效。在低于蒙皮的局部屈服应力的特定应力水平下,有效宽度等于面板的宽度。图6中图解说明了有效宽度的理论。

[0156] 材料的理想化

[0157] 同时注意一直到屈服应力( $F_{cy}$ ),可用已知的Ramberg和Osgood规律(在余下的说明中,称为R&O公式),使材料的应力-应变曲线理想化:

[0158] 
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_c} + 0.002 \cdot \left( \frac{\sigma}{F_{cy}} \right)^{n_c} \quad \text{等式 0-1}$$

[0159] 我们可以推导以下表达式:

[0160] 割线模量:

$$E_{\text{sec}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \xrightarrow{\text{R\&O law}} E_{\text{sec}} = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{0.002}{F_{cy}} \cdot \left(\frac{\sigma}{F_{cy}}\right)^{(n_c-1)}} \quad \text{等式 0-2}$$

[0162] 切线模量:

$$\frac{1}{E_{\text{tan}}} = \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial(\sigma)} = \frac{n_c}{E_{\text{sec}}} + \frac{1-n_c}{E_c} \xrightarrow{\text{R\&O law}} E_{\text{tan}} = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{0.002}{F_{cy}} \cdot n_c \cdot \left(\frac{\sigma}{F_{cy}}\right)^{(n_c-1)}} \quad \text{等式 0-3}$$

[0164] 泊松系数:

$$\nu = \frac{E_{\text{sec}}}{E_c} \cdot \nu_e + \left(1 - \frac{E_{\text{sec}}}{E_c}\right) \cdot \nu_p, \quad \nu_p = 0.5 \quad \text{等式 0-4}$$

[0166] 注意,就本领域的技术人员已知的R&O比(参见n或者修正的n)来说,这些等式只在区域[0;F<sub>cy</sub>]中才是正确的。对本研究的以下部分来说,该区域必须从F<sub>cy</sub>扩展到F<sub>tu</sub>。超过F<sub>cy</sub>,可以使用不同的曲线,一直到极限应力为止,尤其是:利用修正的n系数的R&O公式,或者椭圆法。

[0167] 下面,R&O公式利用修正的系数。两条曲线之间的连续性被保持。R&O公式的修正的n系数用下式计算:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{2p}}{\varepsilon_{1p}}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}$$

[0169] 等式0-5

[0170] 其中:

[0171]  $\varepsilon_{2p} = \varepsilon_{ult}$

[0172]  $\varepsilon_{1p} = 0.002$

[0173]  $\sigma_2 = F_{tu}$

[0174]  $\sigma_1 = F_{cy}$

[0175] 注意为了利用该公式,必须遵守下述标准:F<sub>tu</sub>>F<sub>cy</sub>和ε<sub>ult</sub>>0.002。

[0176] 在椭圆法中,在F<sub>cy</sub>之上,使用另一条曲线,直到极限应力为止:椭圆延伸曲线。自然地,应确保R&O曲线和椭圆延伸曲线之间的连续性。

[0177] 椭圆延伸的应力-应力比是:

$$\varepsilon_E(\sigma) = \varepsilon_3 - a \sqrt{1 - \frac{(\sigma - \sigma_{E_{ref}} + b)^2}{b^2}}; \quad \sigma_E(\varepsilon) = \sigma_{E_{ref}} - b + b \sqrt{1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_3)^2}{a^2}}$$

[0179] 等式0-6

[0180] 其中:

$$a = \sqrt{\frac{-b^2 \cdot x_1}{m \cdot (b - D)}}; \quad b = \frac{D \cdot (m \cdot x_1 + D)}{m \cdot x_1 + 2D} \text{—椭圆参数}$$

[0182]  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = -\epsilon_3; D = \sigma_{E\_ref} - \sigma_{RO\_ref}; m = \frac{E}{1 + \epsilon_{RO\_ref} \cdot \frac{nE}{\sigma_{RO\_ref}}}$

[0183] 塑性

[0184] 同样注意,已知塑性修正系数取决于载荷的类型和边界条件。

[0185] 下表1中给出了平直矩形面板的塑性修正系数。

[0186]

加载	边界条件	等式
压缩和弯曲	具有无载的铰接边缘(自由支撑的边缘)的凸缘	$\eta_1 = \frac{E_{sec}}{E_c} \cdot \frac{1 - \nu_e^2}{1 - \nu^2}$
	具有固定的无载边缘(夹持的自由边缘)的凸缘	$\eta_2 = \eta_1 \cdot \left( 0.33 + 0.335 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \frac{E_{tan}}{E_{sec}}} \right)$
	具有无载的铰接边缘(支撑的边缘)的平板	$\eta_3 = \eta_1 \cdot \left( 0.5 + 0.25 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \frac{E_{tan}}{E_{sec}}} \right)$
	具有无载的固定边缘(夹持的边缘)的平板	$\eta_4 = \eta_1 \cdot \left( 0.352 + 0.324 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \frac{E_{tan}}{E_{sec}}} \right)$
压缩	柱状物	$\eta_5 = \frac{E_{tan}}{E_c}$
剪切载荷	所有情况 $\sigma_{eq} = \tau \cdot \sqrt{3}$	$\eta_6 = \frac{G_{sec}}{G}$

[0187]

剪切载荷	重新变紧的边缘 $\sigma_{eq} = \tau \cdot 2$	$\eta_8 = \eta_1 \cdot \left( 0.83 + 0.17 \cdot \frac{E_{tan}}{E_{sec}} \right)$
------	-----------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------

[0188] 在剪切载荷的具体情况下,如下同样地利用材料的压缩应力-应变曲线:

[0189] • 等效法向应力的计算:  $\sigma_{eq} = \tau \cdot \sqrt{3}$

[0190] • 根据该应力 $\sigma_{eq}$ 的对应 $E_s$ 和 $\nu$ 值的计算

[0191]  $\eta_6 = \frac{G_s}{G} = \left( \frac{1 + \nu_e}{1 + \nu} \right) \cdot \frac{E_{sec}}{E_c} = \left( \frac{1 - \nu}{1 - \nu_e} \right) \cdot \eta_1$

[0192] 步骤1-数据输入模块:几何形状,材料,加载



[0193] 该方法包括输入与所考虑的用三角形格腔加强的面板相关,和与施加于该面板的加载相关的数据的第一阶段。这些数据是利用已知装置输入的,并记录在同样是已知类型的数据库中。

[0194] 用于用三角形格腔加强的面板的分析计算的输入参数具体包括:

[0195] 概要尺寸:矩形面板(尺寸: $L_x, L_y$ )

[0196] 加强筋的直线段:腹板的尺寸: $b, d$

[0197] 面板的恒定厚度( $t$ )

[0198] 面板的载荷边界 $N_x, N_y, N_{xy}$

[0199] 质量的计算

[0200] 这部分用于用三角形格腔加强的面板的质量的完整计算,包括考虑到圆角和节点的半径。计算质量的步骤与这里说明的方法的其余部分无关。利用面板的几何定义,按已在方式计算质量。

[0201] 为该处理输入的数据是面板的几何形状,包括格腔和节点的半径( $R_n$ 和 $R_f$ )。输出的数据是面板的质量。

[0202] 通过相加蒙皮和纵梁的质量,计算质量。还考虑到两个纵梁之间以及蒙皮与纵梁之间的圆角的半径。质量的计算基于两个基本三角形:等腰三角形和直角三角形(参见图8、9和10)。

[0203] 步骤2-施加的载荷的计算

[0204] 步骤2使得能够根据用三角形格腔加强的面板的几何形状和外部载荷,计算在蒙皮和加强筋中施加的应力。该方法考虑到利用迭代处理完成的施加载荷的塑性性能修正。这使得能够考虑加强筋和格腔的后期屈服。

[0205] 相对于NASA“Isogrid”design handbook”(NASA-CR-124075,02/1973),这表现出相当大的进步,因为它特别考虑了以下几点:具有 $\theta \neq 60$ 的加强筋的网格,用被视为两个正交各向异性的组合件的三角形格腔加强的面板。

[0206] 本步骤的输入数据是:

[0207] • 几何数据:

[0208] o $\theta$ :三角形的底角,

[0209] o $a$ :三角形的底边

[0210] o $A_i^{st}$ :加强筋的直线部分, $i = 0^\circ, \theta$ 或 $-\theta$ ,

[0211] o $t_s$ :蒙皮的厚度,

[0212] o $t_g$ :等同于网格的面板的厚度

[0213] • 关于材料的数据:

[0214] o $E_x^s, E_y^s$ :蒙皮的杨氏模量,

[0215] o $G_{xy}^s$ :蒙皮的剪切模量,

[0216] o $\nu_{xy}^s, \nu_{yx}^s$ :蒙皮的泊松系数,

[0217] o $E^{st}$ :加强筋的杨氏模量,

[0218] o $\nu^{st}$ :加强筋的泊松系数,

[0219] o材料数据( $n$ :Ramberg&Osgood系数, $F_{cy}, F_{tu}, \nu_{plast} = 0.5$ )

[0220] o施加在结构上的载荷( $N_{x0}, N_{y0}, N_{xy0}$ )

[0221] 在该步骤结束时获得的数据是:

[0222] •  $N_x^s, N_y^s, N_{xy}^s$ : 蒙皮中的流变,

[0223] •  $\sigma_x^s, \sigma_y^s, \sigma_{xy}^s$ : 蒙皮中的应力,

[0224] •  $\sigma_{0^\circ}, \sigma_{\theta}, \sigma_{-\theta}$ : 加强筋中的应力,

[0225] •  $F_{0^\circ}, F_{\theta}, F_{-\theta}$ : 加强筋中的载荷。

[0226] 在以下的说明部分中, 蒙皮被假定为各向同性材料。

[0227] 该方法为以下各项提供输入:

[0228] ○抵抗力的分析(步骤4): 蒙皮和加强筋中的应力

[0229] ○格腔屈服的的分析(步骤5.1): 蒙皮中的应力

[0230] ○加强筋屈服的的分析(步骤5.2): 加强筋中的应力

[0231] ○总体不稳定性分析(步骤6): 蒙皮和加强筋中的应力, 以计算用三角形格腔加强的面板的弯曲刚性。

[0232] 该计算方法要求关于加强筋的后期屈服的输入数据:  $A_{0^\circ}^{st}, A_{+\theta}^{st}$  和  $A_{-\theta}^{st}$ , 和关于格腔的后期屈服的输入数据:  $t_{s\_eff}$

[0233] 该方法用每种加强筋( $0^\circ, +\theta$  或者  $-\theta$ ) 的有效直线段的定义:  $A_{0^\circ}^{st}, A_{+\theta}^{st}$  和  $A_{-\theta}^{st}$ , 考虑到在第一种情况下, 由加强筋的后期屈服引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布, 通过面板的有效厚度:  $t_{s\_eff}$ , 考虑到由格腔的后期屈服引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布, 最后, 通过对材料的不同性质: 加强筋的  $E_{0^\circ}^{st}, E_{+\theta}^{st}, E_{-\theta}^{st}$ , 和蒙皮的  $E_x^s, E_y^s$  和  $\nu_{ep}^{st}$ , 应用迭代处理, 考虑到由施加的外部载荷的塑性引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布。

[0234] 外部载荷被假定在面板的平面中, 并施加在截面的重心处:

$$[0235] \quad \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix}$$

$$[0236] \quad \text{于是: } \varepsilon \neq 0, \text{ 并且 } \kappa = 0 \rightarrow \{N\} = [A] \cdot \{\varepsilon\} \text{ 其中 } \{N\} = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix}$$

[0237] 结果, 蒙皮中的应力不取决于所述蒙皮的厚度和平面中的位置。另外, 加强筋中的应力不取决于在加强筋的截面中的位置, 而只取决于加强筋的角度。

[0238] 在图11中定义了用于进行计算的加强筋的网格的几何定义:

[0239] 为了获得用三角形格腔加强的面板, 使该基本形状与蒙皮关联, 并根据需要重复多次。因此, 该方法不考虑边缘的几何形状的概念。

[0240] 对每个加强筋来说, 真实截面( $A_i^{st}$ , 同时  $i: 0^\circ, +\theta$  或  $-\theta$ ) 由比值  $A_i^{st} = \%A_i \times A^{st}$  给出 (在本非限制性例子中, 仅仅设想  $\%A_i = 1$  的情况)。

[0241] 加强筋的直线段包括格腔的半径的部分  $(2 \cdot R_f^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right))$ 。

[0242] 无论其在网格上的位置在哪, 对每种加强筋( $0^\circ, +\theta$  或者  $-\theta$ ) 来说, 应力和应变都相同。

[0243] 为了考虑到可以在每个加强筋中出现的塑性, 杨氏模量特定于每种加强筋( $0^\circ, +\theta$

或者- $\theta$ ):  $E_{0^\circ}^{st}, E_{\theta}^{st}, E_{-\theta}^{st}$ 。

[0244] “材料”矩阵由下式定义:

$$[0245] \quad \overline{\overline{E}}_z = \begin{pmatrix} E_{0^\circ}^{st} & 0 & 0 \\ 0 & E_{\theta}^{st} & 0 \\ 0 & 0 & E_{-\theta}^{st} \end{pmatrix}.$$

[0246] 步骤3-内部载荷的计算

[0247] 3.1 等同于加强筋的平板

[0248] 3.1.1 整体应变和加强筋应变之间的关系

[0249] 图16图解说明几何符号和约定。我们现在寻找  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy})$  和  $(\varepsilon_{0^\circ}, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_{-\theta})$  之间的关系。整体应变由以下的公式定义:

$$[0250] \quad \overrightarrow{\varepsilon}_{nm} = \overrightarrow{\overline{n}} \cdot \overline{\overline{E}} \cdot \overrightarrow{\overline{n}}$$

[0251] 于是,应变为:

$$[0252] \quad \overrightarrow{\varepsilon}_{0^\circ} = \overrightarrow{\overline{i}}_{0^\circ} \cdot \overline{\overline{E}} \cdot \overrightarrow{\overline{i}}_{0^\circ} = (1 \ 0 \ 0) \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$[0253] \quad \overrightarrow{\varepsilon}_{\theta} = \overrightarrow{\overline{i}}_{\theta} \cdot \overline{\overline{E}} \cdot \overrightarrow{\overline{i}}_{\theta} = (\cos\theta \ \sin\theta \ 0) \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$[0254] \quad \overrightarrow{\varepsilon}_{-\theta} = \overrightarrow{\overline{i}}_{-\theta} \cdot \overline{\overline{E}} \cdot \overrightarrow{\overline{i}}_{-\theta} = (\cos\theta \ -\sin\theta \ 0) \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

[0255] 从而最后:

$$[0256] \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_{\theta} \\ \varepsilon_{-\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ 2\cos^2\theta & 2\sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

[0257] 等式3-1

[0258] 上面的矩阵用Z表示:

$$[0259] \quad \overline{\overline{Z}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ 2\cos^2\theta & 2\sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \end{pmatrix}$$

[0260] 3.1.2 应力和应力之间的关系

[0261] 如上所述,图16图解说明了几何符号和约定。加强筋中的载荷由以下的表达式给出:

$$[0262] \quad \overrightarrow{P}_i = \varepsilon_i \cdot E^{st} \cdot A^{st} \cdot \overrightarrow{i}_i, \quad (i=0^\circ, \theta, -\theta)$$

[0263] 等式3-2

[0264] 于是,下面的基本元件服从: $\vec{P}_{0^\circ}, \vec{P}_\theta, \vec{P}_{-\theta}$  ( $\vec{P}_{0^\circ}$ 被计数两次,因为按照轴Y的基本元件为2h,于是,还应考虑对应于 $0^\circ$ 的加强筋)。

[0265] 按照轴x:

$$[0266] \quad P_x^g = \sum_i \vec{P}_i \cdot \vec{x} = (2\vec{P}_{0^\circ} + \vec{P}_\theta + \vec{P}_{-\theta}) \cdot \vec{x} = 2E_{0^\circ}^{st} A_{0^\circ}^{st} \varepsilon_{0^\circ} + E_\theta^{st} A_\theta^{st} \varepsilon_\theta \cos\theta + E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \varepsilon_{-\theta} \cos\theta$$

[0267] 按照轴y:

$$[0268] \quad P_y^g = E_{0^\circ}^{st} A_{0^\circ}^{st} \varepsilon_{0^\circ} \sin\theta + E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \varepsilon_{-\theta} \sin\theta$$

[0269] 平面 $(\vec{x}, \vec{y})$ 中的剪切载荷:

$$[0270] \quad P_{xy}^g = E_{0^\circ}^{st} A_{0^\circ}^{st} \varepsilon_{0^\circ} \sin\theta - E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \varepsilon_{-\theta} \sin\theta$$

[0271] 等式3-3

[0272] 为了获得应力,使载荷由基本元件的表面分担。基本元件在与轴X相应的法向面上的截面为 $2ht_g = a \tan\theta$ 。 $t_g$ 基本元件在与轴Y相应的法向面上的截面为 $at_g$ 。

[0273] 在应力方面,我们得到:

$$[0274] \quad \sigma_x^g = \frac{P_x^g}{2ht_g} = \frac{1}{2ht_g} \begin{pmatrix} 2E_{0^\circ}^{st} A_{0^\circ}^{st} & E_\theta^{st} A_\theta^{st} \cos\theta & E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{-\theta} \end{pmatrix}$$

$$[0275] \quad \sigma_x^g = \frac{1}{at_g} \begin{pmatrix} \frac{2E_{0^\circ}^{st} A_{0^\circ}^{st}}{\tan\theta} & E_\theta^{st} A_\theta^{st} \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} & E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{-\theta} \end{pmatrix}$$

[0276] 对于 $\sigma_y$ 和 $\tau_{xy}$ ,我们用相同方法获得:

$$[0277] \quad \sigma_y^g = \frac{1}{at_g} \begin{pmatrix} 0 & E_\theta^{st} A_\theta^{st} \sin\theta & E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{-\theta} \end{pmatrix}$$

$$[0278] \quad \tau_{xy}^g = \frac{1}{at_g} \begin{pmatrix} 0 & E_\theta^{st} A_\theta^{st} \sin\theta & -E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{-\theta} \end{pmatrix}$$

[0279] 相同的结果可用矩阵形式表示:

$$[0280] \quad \begin{pmatrix} \sigma_x^g \\ \sigma_y^g \\ \tau_{xy}^g \end{pmatrix} = \frac{1}{at_g} \begin{pmatrix} \frac{2E_{0^\circ}^{st} A_{0^\circ}^{st}}{\tan\theta} & E_\theta^{st} A_\theta^{st} \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} & E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} \\ 0 & E_\theta^{st} A_\theta^{st} \sin\theta & E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \sin\theta \\ 0 & E_\theta^{st} A_\theta^{st} \sin\theta & -E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{-\theta} \end{pmatrix}$$

[0281] 等式3-4

[0282] 上面的矩阵用T表示:

$$[0283] \quad \bar{T} = \frac{1}{at_g} \begin{pmatrix} \frac{2E_{0^\circ}^{st} A_{0^\circ}^{st}}{\tan \theta} & E_{\theta}^{st} A_{\theta}^{st} \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} & E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} \\ 0 & E_{\theta}^{st} A_{\theta}^{st} \sin \theta & E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \sin \theta \\ 0 & E_{\theta}^{st} A_{\theta}^{st} \sin \theta & -E_{-\theta}^{st} A_{-\theta}^{st} \sin \theta \end{pmatrix}$$

[0284] 从而,通过利用等式3-1和Z矩阵符号:

$$[0285] \quad \begin{pmatrix} \sigma_x^g \\ \sigma_y^g \\ \tau_{xy}^g \end{pmatrix} = \bar{T} \cdot \bar{Z} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

[0286] 等式3-5

[0287] 上面的矩阵表示为W:  $\bar{W} = \bar{T} \cdot \bar{Z}$

[0288] 该关系(等式3-5)表示等同于加强筋的面板的行为类似于各向异性材料(可以完成W矩阵:所有这些单元具有非零值)。

[0289] 3.2加强的面板

[0290] 我们可以利用Kirchhoff假定:在应变之后,平面截面保持平面。加强筋的网络用具有W矩阵行为(参见等式3-5)的等效面板模拟。图15中图解说明利用两个正交各向异性的平板,模拟用三角形格腔加强的面板的部署。

$$[0291] \quad \text{对于 } v_{yx} \text{ 的计算,我们得到: } \frac{v_{xy}^s}{E_x^s} = \frac{v_{yx}^s}{E_y^s}$$

[0292] 3.2.1加强筋的应力和载荷

[0293] 等同于加强筋的面板中的流变

[0294] 流变的一般表达式是:

$$[0295] \quad N_{\alpha\beta} = \int_h \sigma_{\alpha\beta} dz \quad \text{等式 3-6}$$

[0296] 与轴X相应的流变被表示成如下所示:

$$[0297] \quad N_{xx} = \int_h \sigma_{xx} dz = \int_{\frac{h}{2} - t_s}^{\frac{h}{2} + t_s} \sigma_{xx}^s dz + \int_{\frac{h}{2} - t_s}^{\frac{h}{2} + t_s} \sigma_{xx}^g dz$$

$$[0298] \quad N_{xx} = \frac{E_x^s t_s}{1 - v_{xy}^s v_{yx}^s} \cdot \varepsilon_{xx} + \frac{v_{xy}^s E_y^s t_s}{1 - v_{xy}^s v_{yx}^s} \cdot \varepsilon_{yy} + \sigma_{xx}^g \cdot t_g$$

[0299] 通过利用等式3-5:

$$[0300] \quad N_x = \left[ \frac{E_x^s t_s}{1 - v_{xy}^s v_{yx}^s} + t_g \cdot \bar{W}_{1,1} \right] \cdot \varepsilon_x + \left[ \frac{v_{xy}^s E_y^s t_s}{1 - v_{xy}^s v_{yx}^s} + t_g \cdot \bar{W}_{1,2} \right] \cdot \varepsilon_y + t_g \cdot \bar{W}_{1,3} \cdot \varepsilon_{xy}$$

[0301] 另外,通过把相同的方法用于 $N_y$ 和 $N_{xy}$ 流变。

$$[0302] \quad N_y = \left[ \frac{v_{yx}^s E_x^s t_s}{1 - v_{xy}^s v_{yx}^s} + t_g \cdot \bar{W}_{2,1} \right] \cdot \varepsilon_x + \left[ \frac{E_y^s t_s}{1 - v_{xy}^s v_{yx}^s} + t_g \cdot \bar{W}_{2,2} \right] \cdot \varepsilon_y + t_g \cdot \bar{W}_{2,3} \cdot \varepsilon_{xy}$$

$$[0303] \quad N_{xy} = t_g \cdot \overline{\overline{W}}_{3,2} \cdot \varepsilon_x + t_g \cdot \overline{\overline{W}}_{3,3} \cdot \varepsilon_y + (2G_{xy} t_s + t_g \cdot \overline{\overline{W}}_{3,1}) \varepsilon_{xy}$$

[0304] 等式3-7

[0305] 这些表达式清楚地表明流变在蒙皮和等同于加强筋的面板之间的分布。在蒙皮中,流变和应变之间的关系是:

$$[0306] \quad \begin{pmatrix} N_x^s \\ N_y^s \\ N_{xy}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E_x^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & \frac{\nu_{xy}^s E_y^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & 0 \\ \frac{\nu_{yx}^s E_x^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & \frac{E_y^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{xy}^s t_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

[0307] 等式3-8

[0308] 我们用X表示上面的矩阵:

$$[0309] \quad \overline{\overline{X}} = \begin{pmatrix} \frac{E_x^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & \frac{\nu_{xy}^s E_y^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & 0 \\ \frac{\nu_{yx}^s E_x^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & \frac{E_y^s t_s}{1 - \nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{xy}^s t_s \end{pmatrix}$$

[0310] 从而:

$$[0311] \quad \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix} + \frac{1}{t_g} \cdot \overline{\overline{X}} \cdot \overline{\overline{W}}^{-1} \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix}$$

[0312] 等式3-9

[0313] 通过颠倒该关系,按照整体施加的流变表示网格中的流变:

$$[0314] \quad \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix} = \overline{\overline{V}} \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix}$$

[0315] 等式3-10

$$[0316] \quad \text{其中: } \overline{\overline{V}} = \left( \overline{\overline{I}}_d + \frac{1}{t_g} \cdot \overline{\overline{X}} \cdot \overline{\overline{W}}^{-1} \right)^{-1} \quad (\overline{\overline{I}}_d \text{ 是单位矩阵})$$

[0317] 加强筋中的应力和载荷

[0318] 等同于加强筋的面板中的流变可用下式表示:

$$[0319] \quad \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix} = t_g \cdot \overline{\overline{T}} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{-\theta} \end{pmatrix}$$

[0320] 等式3-11

$$[0321] \quad \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix} = t_g \cdot \overline{\overline{T}} \cdot \overline{\overline{E}}_g^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{0^\circ} \\ \sigma_\theta \\ \sigma_{-\theta} \end{pmatrix}$$

[0322] 等式3-12

[0323] 通过利用以下符号： $\overline{\overline{U}} = t_g \cdot \overline{\overline{T}} \cdot \overline{\overline{E}}_g^{-1}$ ，我们得到：

$$[0324] \quad \begin{pmatrix} \sigma_{0^\circ} \\ \sigma_\theta \\ \sigma_{-\theta} \end{pmatrix} = \overline{\overline{U}}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix}$$

[0325] 等式3-13

[0326] 最后，按照外部载荷的流变，表示加强筋中的载荷和应力：

$$[0327] \quad \begin{pmatrix} \sigma_{0^\circ} \\ \sigma_\theta \\ \sigma_{-\theta} \end{pmatrix} = \overline{\overline{U}}^{-1} \cdot \mathcal{V} \cdot \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{和} \quad \begin{pmatrix} F_{0^\circ} \\ F_\theta \\ F_{-\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{0^\circ}^{st} \\ A_\theta^{st} \\ A_{-\theta}^{st} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{0^\circ} \\ \sigma_\theta \\ \sigma_{-\theta} \end{pmatrix}$$

[0328] 等式3-14

[0329] 3.2.2蒙皮中的流变和应力

[0330] 如等式3-8所示，蒙皮中的流变被表示成如下所示：

$$[0331] \quad \begin{pmatrix} N_x^s \\ N_y^s \\ N_{xy}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^g \\ N_y^g \\ N_{xy}^g \end{pmatrix}$$

[0332] 等式3-15

[0333] 从而，蒙皮中的应力用下式表示：

$$[0334] \quad \begin{pmatrix} \sigma_x^s \\ \sigma_y^s \\ \tau_{xy}^s \end{pmatrix} = \frac{1}{t_s} \cdot \begin{pmatrix} N_x^s \\ N_y^s \\ N_{xy}^s \end{pmatrix}$$

[0335] 等式3-16

[0336] 3.3这里参考在说明中介绍的矩阵，给出计算塑性修正的施加载荷的方法(图17)

[0337] 我们注意到用于计算塑性的理论假定构成蒙皮的蒙皮的各向同性性质。塑性性能修正的施加载荷的解由迭代方法获得。

[0338] 必须进行收敛处理，一直到在开始迭代处理时输入五个材料参数( $E_{0^\circ}^{st}$ ,  $E_{+\theta}^{st}$ ,  $E_{-\theta}^{st}$ ,  $E_{skin}$ ,  $\nu_{ep}$ )等于在出口(在塑性应力的计算之后)计算的相同参数为止。在已引用的图17中，收敛参数用灰色背景表示。

- [0339] 更精确地,在迭代处理中,初始输入是在加强筋中和在蒙皮中施加的载荷。
- [0340] 对加强筋的网格来说,在3个方向:0°, +θ, -θ的加强筋的杨氏模量 $E_{0^{st}}, E_{+\theta^{st}}, E_{-\theta^{st}}$ 的第i次迭代数据使得结合角度θ的值和几何形状,能够计算矩阵[T](等式3-4)。角度θ和几何形状的值提供矩阵[Z](等式3-1)。矩阵[T]和[Z]给出矩阵[W](等式3-5)。
- [0341] 对蒙皮来说,各向同性蒙皮的材料数据 $E_{skin}, \nu_{ep}$ 使得能够计算矩阵[X](等式3-8)。
- [0342] 矩阵[W]和[X]使得能够计算矩阵[U](等式3-13)和矩阵[V](等式3-10)。
- [0343] 从这些矩阵获得的结果包括:流变,弹性应力,关于应力的塑性性能修正,修正的加强筋和蒙皮的杨氏模量的第i+1次迭代的值,修正的蒙皮的泊松系数的值,和加强筋中的载荷。
- [0344] 重复该计算,直到杨氏模量和泊松系数在迭代期间的变化值小于预定阈值为止。
- [0345] 塑性性能修正对整体屈服的影响:
- [0346] 自然地,塑性性能修正借助5个材料参数改变用总体不稳定性模量计算的行为规律矩阵(参见关于总体不稳定性部分)。

[0347] 
$$\begin{pmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ -M_{xx} \\ M_{yy} \\ -M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{A}} & \overline{\mathbf{B}} \\ - & - \\ \overline{\mathbf{B}} & \overline{\mathbf{C}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} & B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ A_{13} & A_{23} & A_{11} & B_{13} & B_{23} & B_{33} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ B_{12} & B_{11} & B_{23} & C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} & C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix}$$

- [0348] 等式3-17
- [0349] 因此,塑性性能修正还改变用于计算整体屈服的系数 $\Omega_i (i=1..3)$ 。整体屈服的分析中的塑性性能修正由这些修正的系数 $\Omega_i$ 提供。
- [0350] 3.4例子:在双向压缩和剪切载荷下的载荷的分布
- [0351] 在计算施加的应力的步骤中,考虑到格腔圆角的半径,以计算加强筋截面。另外,由于没有后期屈服,于是我们可写出:
- [0352]  $\%A_{0^{st}} = \%A_{+\theta^{st}} = \%A_{-\theta^{st}} = 100\%$
- [0353]  $t_{s\_eff} = t_s$
- [0354] 在这里说明的本非限制性例子中,用三角形格腔加强的面板的几何形状由以下参数定义:
- [0355]  $L_x = 1400.45\text{mm}$                        $a = 198\text{mm}$                       节点半径:  $R_n = 9\text{mm}$
- [0356]  $L_y = 685.8\text{mm}$                        $t = 3.64\text{mm}$                       格腔半径:  $R_f = 4\text{mm}$
- [0357]  $\theta = 58^\circ$                                $b = 2.5\text{mm}$                        $d = 37.36\text{mm}$
- [0358] 我们考虑各向同性材料。使用的弹塑性规律是Ramberg&Osgood规律。
- [0359]

E	78000
Nu	0.3
Ftu	490
Fty	460



e%	20%
n	40

[0360]  $N_x = -524.65\text{N/mm}$

[0361]  $N_y = -253.87\text{N/mm}$

[0362]  $N_{xy} = 327.44\text{N/mm}$

[0363] 以矩阵的形式编写计算内部载荷和包括塑性性能修正的施加载荷的方法:

$$\begin{matrix} \begin{matrix} \text{sig}_{xg} \\ \text{sig}_{yg} \\ \text{tau}_{xyg} \end{matrix} \\ \begin{matrix} N_x\text{-}N_{xg} \\ N_y\text{-}N_{yg} \\ N_{xy}\text{-}N_{xyg} \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \begin{matrix} W = T^2 \\ \begin{matrix} 1518 & 504 & 0 \\ 504 & 1290 & 0 \\ 0 & 0 & 504 \end{matrix} \\ X \\ \begin{matrix} 312000 & 93600 & 0 \\ 93600 & 312000 & 0 \\ 0 & 0 & 108200 \end{matrix} \end{matrix} * \begin{matrix} \begin{matrix} \text{eps}_x \\ \text{eps}_y \\ \text{gam}_{xy} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{eps}_x \\ \text{eps}_y \\ \text{gam}_{xy} \end{matrix} \end{matrix}$$

[0364]

$$\begin{matrix} \begin{matrix} N_{xg} \\ N_{yg} \\ N_{xyg} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{sig}_\theta \\ \text{sig}_{-\theta} \\ \text{sig}_{+\theta} \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \begin{matrix} V \\ \begin{matrix} 0.152 & 0.006 & 0.000 \\ 0.011 & 0.130 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.147 \end{matrix} \\ U^{-1} \\ \begin{matrix} -590 & 0.817 & 0.000 \\ 0.000 & 1.154 & 1.353 \\ 0.000 & 1.154 & 1.353 \end{matrix} \end{matrix} * \begin{matrix} \begin{matrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{matrix} \\ \begin{matrix} N_{xg} \\ N_{yg} \\ N_{xyg} \end{matrix} \end{matrix}$$

[0365] 于是,获得的结果是加强筋中的流变,应力和载荷:

[0366]  $N_{xg} = -81.1\text{N/mm}$        $\sigma_{0^\circ} = -101.14\text{MPa}$        $F_{0^\circ} = -10441\text{N}$

[0367]  $N_{yg} = -39\text{N/mm}$        $\sigma_{+\theta} = 44.25\text{MPa}$        $F_{+\theta} = 4437\text{N}$

[0368]  $N_{xyg} = 48.1\text{N/mm}$        $\sigma_{-\theta} = -135.07\text{MPa}$        $F_{-\theta} = -13537\text{N}$

[0369] 以及蒙皮中的流变和应力:

[0370]  $N_{xs} = -443.5\text{N/mm}$        $\sigma_{xs} = -121.85\text{MPa}$

[0371]  $N_{ys} = -214.87\text{N/mm}$        $\sigma_{ys} = -59.03\text{MPa}$

[0372]  $N_{xys} = 279.3\text{N/mm}$        $\tau_{xys} = 76.74\text{MPa}$

[0373] 在本例中,施加的应力存在于弹性域中。

[0374] 下表总结了蒙皮和加强筋的网格之间的流变分布:

[0375]

流变 (N/mm)	外部流变	载荷的分布-流变		载荷的分布 - 百分率	
		网格	蒙皮	网格	蒙皮
<b>N<sub>x</sub></b>	<b>-524.65</b>	<b>-81.13</b>	<b>-443.52</b>	<b>15.46%</b>	<b>84.54%</b>
<b>N<sub>y</sub></b>	<b>-253.87</b>	<b>-39.00</b>	<b>-214.87</b>	<b>15.36%</b>	<b>84.64%</b>
<b>N<sub>xy</sub></b>	<b>+327.44</b>	<b>+48.12</b>	<b>+279.32</b>	<b>14.7%</b>	<b>85.3%</b>

[0376] 步骤4-抵抗力分析模块

[0377] 本阶段目的在于通过比较在用三角形格腔加强的面板的组件中计算的施加载荷

和材料的最大应力容量,计算储备系数(RF)。

[0378] 极限加载材料中的应力容量由以下参数确定:与在加强筋腹板中施加的应力相比的 $F_{tu}$ (材料的极限抗拉力),与在蒙皮中施加的主应力相比的 $F_{tu}$ ,与蒙皮中的最大剪切容量相比的 $F_{su}$ (材料的极限抗剪力)。

[0379] 抵抗力的分析由计算限度加载材料和极限加载材料的储备系数组成。施加的应力来自于平面中的载荷(压缩、剪切载荷)或者平面之外的载荷(压力)。

[0380] 本计算的输入数据是:

[0381] • 材料的容量值: $F_{ty}, F_{cy}, F_{sy}, F_{tu}, F_{su}$

[0382] • 施加于结构的应力:

[0383] ◦ 蒙皮上的应力( $\sigma_{xs}, \sigma_{ys}$  et  $\tau_{xys}$ )

[0384] ◦ 加强筋中的法向应力

[0385] 注意:如上所述,在施加应力计算方法中,考虑到塑性性能,修正施加的应力。

[0386] 输出数据是储备系数

[0387] 面板的平面中的抵抗力的分析以下述假定为基础。蒙皮中的应力不取决于蒙皮的厚度和在平面中的位置。加强筋中的应力不取决于在加强筋的截面上的位置,而只取决于加强筋的角度。

[0388] 当同样考虑平面之外的后期屈服和行为时,这些假定无效。在这些情况下,必须实现已知类型的max/min函数,以考虑这些现象。

[0389] 主应力的计算

[0390] 为了计算蒙皮的储备系数,使用主应力( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$ 和 $\tau_{max}$ ):

$$[0391] \quad \sigma_{max\_s} = \frac{\sigma_{xs} + \sigma_{ys}}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_{xs} - \sigma_{ys})^2}{4} + \tau_{xys}^2}$$

$$[0392] \quad \sigma_{min\_s} = \frac{\sigma_{xs} + \sigma_{ys}}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_{xs} - \sigma_{ys})^2}{4} + \tau_{xys}^2}$$

$$[0393] \quad \tau_{max} = \frac{\sigma_{max\_s} - \sigma_{min\_s}}{2}$$

[0394] 等式4-1

[0395] 储备系数的计算中使用的值 $\sigma_{max}$ 被定义为在等式4-1中计算的 $\sigma_{max\_s}$ 和 $\sigma_{min\_s}$ 之间的绝对最大值。

[0396] 载荷限度(LL)下的储备系数

[0397] 关于加强筋腹板的储备系数:

$$[0398] \quad \bullet \quad RF_{in\_plane\_LL}^{blade\_0} = \frac{F_y}{\sigma_{blade\_0\_LL}}$$

$$[0399] \quad \bullet \quad RF_{in\_plane\_LL}^{blade\_+\theta} = \frac{F_y}{\sigma_{blade\_+\theta\_LL}}$$

$$[0400] \quad \bullet \quad RF_{in\_plane\_LL}^{blade\_-\theta} = \frac{F_y}{\sigma_{blade\_-\theta\_LL}}$$

[0401] 关于蒙皮的储备系数:

[0402] 剪切容量:  $RF_{in\_plane\_LL}^{skin\_shear} = \frac{F_{sy}}{\tau_{max\_LL}}$

[0403] 在该公式中,如果 $F_{sy}$ 未知,那么可以使用 $F_{su}/\sqrt{3}$

[0404] 应力:  $RF_{in\_plane\_LL}^{skin} = \frac{F_y}{\sigma_{max\_LL}}$

[0405] • 在载荷限度下计算包络(envelope)储备系数:

[0406]  $RF_{material\_LL} = \min\{RF_{in\_plane\_LL}^{blade\_0}, RF_{in\_plane\_LL}^{blade\_+\theta}, RF_{in\_plane\_LL}^{blade\_-\theta}, RF_{in\_plane\_LL}^{skin\_shear}, RF_{in\_plane\_LL}^{skin}\}$

[0407] 等式4-2

[0408] 在极限载荷UL下的储备系数:

[0409] • 关于加强筋腹板的储备系数:

[0410]  $RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_0} = \frac{F_u}{\sigma_{blade\_0\_UL}} (*)$

[0411]  $RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_+\theta} = \frac{F_u}{\sigma_{blade\_+\theta\_UL}} (*)$

[0412]  $RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_-\theta} = \frac{F_u}{\sigma_{blade\_-\theta\_UL}}$

[0413] 注意:如果 $F_{cu}$ 未知,那么可以使用 $F_{cy}$ 或 $F_{tu}$

[0414] • 关于蒙皮的储备系数:

[0415] 最大剪切容量:  $RF_{in\_plane\_UL}^{skin\_shear} = \frac{F_{su}}{\tau_{max\_UL}}$

[0416] 主应力:  $RF_{in\_plane\_UL}^{skin} = \frac{F_u}{\sigma_{max\_UL}}$

[0417] • 在极限载荷下计算包络储备系数:

[0418]  $RF_{material\_UL} = \min\{RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_0}, RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_+\theta}, RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_-\theta}, RF_{in\_plane\_UL}^{skin\_shear}, RF_{in\_plane\_UL}^{skin}\}$

[0419] 在面板的平面之外的抵抗力的分析不在本发明的范围之内。

[0420] 在分析平面中的抵抗力的方法的这部分的实现例子中,研究和前面各节中相同的几何形状和相同的载荷情况。在第一种情况下,载荷因子之比被假定等于1。

[0421] 加强筋腹板的储备系数:

[0422]  $RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_0} = 4.71$

[0423]  $RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_+\theta} = 11.14$

[0424]  $RF_{in\_plane\_UL}^{blade\_-\theta} = 3.63$

[0425] 蒙皮的储备系数:

[0426] 主应力的计算:

[0427]  $\sigma_{max\_s} = -7.52\text{MPa}$

[0428]  $\sigma_{min\_s} = -173.35\text{MPa}$

[0429]  $\tau_{max} = 82.91\text{MPa}$

[0430]  $\Rightarrow \sigma_{\max\_skin\_UL} = 173.35 MPa$

[0431] 剪切容量:  $RF_{in\_plane\_UL}^{skin\_shear} = 3.41$

[0432] 主应力:  $RF_{in\_plane\_UL}^{skin} = 2.82$

[0433] 在极限载荷(UL)下的储备系数包络RF

[0434]  $RF_{material\_UL} = 2.82$

[0435] 在塑性计算的情况下,进行迭代计算,直到施加的载荷到达抗力失效载荷为止(以便进行关于这些施加载荷的塑性性能修正)。在每个迭代循环,进行如前所述的相同计算。

[0436] 步骤5-计算局部应力容量

[0437] 两种失稳削弱用三角形格腔加强的结构的整体刚性,然而不会导致整个结构的整体失效

[0438] 面板的失稳:三角形格腔的屈服

[0439] 加强筋的失稳:加强筋腹板的屈服

[0440] 屈服部分只能承受它们在屈服之前能够承受的一部分载荷。因此,施加的载荷在结构中被重新分布。

[0441] 注意在本发明中,不处理后期屈服。因此,上面提到的两种屈服被看作是失效模式。

[0442] 5A-面板的局部屈服的计算

[0443] 在用三角形格腔加强的面板中,格腔是承受平面中的复合载荷的三角形板。为了计算在整个加强面板的简单载荷下的屈服流变容量和储备系数,使用基于有限元模型(FEM)的方法。

[0444] 本节提供等腰三角形格腔的格腔屈服流变容量的计算:三角形的底角(base)能够在所有值之间变化,在本非限制性例子中,在45°和70°之间变化。利用两种边界条件:简单支撑和夹持,以进行流变计算。

[0445] 对储备系数的计算来说,要考虑的施加应力仅仅是影响蒙皮并在上面说明的施加应力计算的章节中的确定的应力。

[0446] 本节中的输入数据是:

[0447] • 几何数据(三角形的底边,等腰角(isosceles angle),蒙皮的厚度)

[0448] • 材料数据(线性(E,v)和非线性( $F_{cy}, F_{tu}, e\%, n_c$ ))

[0449] o独特的各向同性材料

[0450] o在 $F_{cy}$ 以下,塑性屈服流变容量值才是恰当的

[0451] • 边界条件:简单支撑或夹持

[0452] • 施加于蒙皮的载荷

[0453] 应注意本节中使用的所有外部流变是蒙皮流变,并不对应于加强面板的全部加载。另外,用作屈服计算的参考长度的三角形的高度(h)被减小到加强筋腹板的半厚度。

[0454] 在本节中,用于计算三角形的高度的公式是 $h = h\_red$

[0455]  $h\_red = \frac{a\_red}{2} \cdot \tan \theta$

$$[0456] \quad a_{red} = a - b \cdot \left[ \frac{1}{\tan \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \right]$$

[0457] 输出数据是:

- [0458] • 格腔屈服容量
- [0459] • 储备系数

[0460] 本节目的在于计算等腰三角形板的流变容量。

[0461] 它包括两个部分:1/简单支撑的三角形板的容量值的计算(部分5A.5),2/夹持的三角形板的容量值的计算(部分5A.6)。

[0462] 以下的两个部分遵循相同的方法:首先,承受简单载荷情况(与X相应的压缩,与Y相应的压缩,和剪切载荷)的三角形板的容量值的计算,随后,这三种简单载荷情况之间的相互作用曲线的计算。

[0463] 5A.1计算原理

[0464] 图12中给出了设想的简单载荷的情况

[0465] 在书面文件中,存在三角形的局部屈服的几种解析公式法。这些方法的比较表明在先前引用的屈服应力之间,存在较大差异。此外,在这些方法中使用的一些参数是从借助有限元的计算获得的,测试通常是完全根据经验的,某些方法完全不提供除60°外的角度的数据。

[0466] 该问题的完整理论的发展有点漫长,这里说明的非限制性的方法实现一种完全基于有限元模型(FEM)的方法:

- [0467] • 创建三角形板的FEM参数模型(参数:底角,厚度,三角形的高度,边界条件),
- [0468] • 测试各种组合,以获得屈服的线性结果,
- [0469] • 获得将用在解析公式中的参数(系数K)。

[0470] 在容量值的计算中,还必须考虑到引起的塑性效果。施加的载荷或者是简单载荷,或者是这些简单载荷的组合。

[0471] 5A.2简单载荷的情况

[0472] 如下定义相互作用曲线。在涉及三角形的角度的本非限制性例子中,用介于45°和70°之间的角度,创建三角形板的6个有限元模型,在本节中,等腰角( $\theta$ )被定义为等腰三角形的底角(参见图18)。对于每个等腰角和对于简单载荷的每种情况,按3个要点组织研究:

[0473] 1/利用有限元模型(FEM)的计算

[0474] 进行利用已知类型的有限元模型(FEM)的三角形的局部屈服的线性计算,以确定平板的各种厚度,于是各种刚性的褶皱流变(无塑性修正)。我们注意到观察到的第一种模式总是呈现单屈服(单突起)。

[0475] 2/按照  $\frac{D}{h^2}$ ,跟踪屈服流变容量的曲线

[0476] 通常,在书面文件中,如下表述屈服流变容量:

$$[0477] \quad N_{crit} = K \cdot \frac{D}{h^2}$$

[0478] K是常数,

[0479] D是平板的刚性： $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ ，

[0480] h是三角形的高度： $h = \frac{a}{2} \cdot \tan \theta$ 。

[0481] 不过本研究证明在三角形板的情况下，对于比值 $\frac{D}{h^2}$ 的较小值来说，利用就 $\frac{D}{h^2}$ 而论的一阶等式的屈服流变容量的表达式并不恰当。利用以下形式的二阶等式，获得更好的结果：

[0482]  $N_{crit} = K_1 \left( \frac{D}{h^2} \right)^2 + K_2 \frac{D}{h^2}$  (弹性值)

[0483] 等式5-1

[0484] 常数 $K_1$ 和 $K_2$ 取决于角度和考虑的载荷情况。于是，对于每种情况和每个角度，获得常数 $K_1$ 和 $K_2$ 的值。

[0485] 3/按照等腰三角形的底角，跟踪 $K_1$ 和 $K_2$ 的演变

[0486] 按照角度跟踪 $K_1$ 和 $K_2$ ，进行插值，以确定使得能够计算介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的任意角度的这些常数的多项式等式。图19图解说明关于K系数的线性或二次插值。显然该函数还使得能够插入在从 $45^\circ$ 到 $70^\circ$ 的域之外，但是接近于该域的值。从而，通过了解等腰角和边界条件，能够直接计算正在研究的三角形板的屈服流变容量。

[0487] 5A.3复合加载的情况

[0488] 在这种情况下，使用以下假定：如果复合载荷的一些分量是拉伸分量，那么这些分量被减小为0(就计算来说，不予考虑)。事实上，保守的是认为拉伸分量对所研究的屈服流变没有任何影响，从而不改善平板上的屈服应力。例如，如果 $N_x^{app} = +200\text{N/mm}$ (它表示拉伸)和 $N_s^{app} = 300\text{N/mm}$ ，那么复合载荷容量被减小到纯剪切载荷容量。

[0489] 图21中图解说明了设想的加载情况的表示法。在本节中，使用3种有限元模型：角度等于 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $70^\circ$ 的3个等腰三角形板。对于每个角度，按两个要点组织研究：

[0490] 1/利用有限元模型(FEM)的计算

[0491] 对于下面给出的所有组合，进行利用有限元法的线性计算，以确定与外部载荷的不同分布对应的屈服的本征值。

[0492] 可看出观察的第一种模式总是呈现单突起。

[0493] 看来相互作用曲线几乎与 $\frac{D}{h^2}$ 的值无关。

[0494] 2/跟踪相互作用曲线

[0495] 对于每个角度和载荷的每种组合，跟踪相互作用曲线。之后，用其计算采取以下形式的经典曲线近似各种曲线：

[0496]  $R_1^A + R_2^B = 1$

[0497] 其中 $R_i = \frac{N_i^{app}}{N_i^{crit}}$ ， $i = cX, cY$ 或 $s$ 。

[0498] 得到的结果和选择表明相互作用曲线的等式并不取决于等腰三角形的底角，因此可以兼容地用以下形式的覆盖所有组合的单一等式统一：

[0499]  $R_{cX}^A + R_{cY}^B + R_s^C = 1$

[0500] 根据该等式,为了确定储备系数,我们可求解以下等式:

[0501]  $\left(\frac{R_{cY}}{R}\right)^A + \left(\frac{R_{cX}}{R}\right)^B + \left(\frac{R_s}{R}\right)^C = 1$

[0502] 其中  $R = \frac{N_{cY}^{app}}{N_{cYcomb}^{crit}} = \frac{N_{cX}^{app}}{N_{cXcomb}^{crit}} = \frac{N_s^{app}}{N_{scomb}^{crit}} = \frac{1}{RF}$

[0503] 5A.4塑性修正系数

[0504] 按照等腰角和边界条件,获得简单载荷情况的塑性性能修正非常复杂。事实上,对三角形板来说,挠曲函数复杂,会引起众多的数字积分问题。

[0505] 结果,根据NACA报告898(“A Unified Theory of Plastic Buckling of Columns and Plates”,1947年7月),决定利用保守的 $\eta$ 系数。

[0506] 对于除剪切载荷以外的所有加载情况(简单载荷和复合加载),利用下式,定义该系数:

[0507]  $\eta_5 = \frac{E_{tan}}{E_c}$

[0508] 对于纯剪切载荷的情况,利用下式,定义该系数:

[0509]  $\eta_6 = \frac{(1+\nu_e) \cdot E_{sec}}{(1+\nu) \cdot E_c}$

[0510] 利用Von Mises的等效弹性应力,计算修正:

[0511]  $\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{x\_comb}^{crit\ 2} + \sigma_{y\_comb}^{crit\ 2} - \sigma_{x\_comb}^{crit} \cdot \sigma_{y\_comb}^{crit} + 3 \cdot \tau_{xy\_comb}^{crit\ 2}}$

[0512] 于是,能够计算修正的应力容量:

[0513]  $\sigma_{x\_comb}^{plast} = \eta \cdot \sigma_{x\_comb}^{crit}$

[0514]  $\sigma_{y\_comb}^{plast} = \eta \cdot \sigma_{y\_comb}^{crit}$

[0515]  $\tau_{xy\_comb}^{plast} = \eta \cdot \tau_{xy\_comb}^{crit}$

[0516] 对于简单载荷的情况(与X相应的压缩,与Y相应的压缩,或者剪切载荷),塑性能修正也适用于Von Mises应力,于是对于纯关切加载的情况,修正的应力为: $\sqrt{3} \cdot \tau_{xy}$ 。

[0517] 5A.5等腰三角形简单支撑的平板

[0518] 简单载荷的情况

[0519] 图26和27表示按照等腰三角形的 $K_1$ 和 $K_2$ 常数的演变。这些曲线的等式是( $\theta$ 的单位为度):

[0520]  $K_{1cX} = -0.0000002417 \cdot \theta^4 + 0.0000504863 \cdot \theta^3 - 0.0039782194 \cdot \theta^2 + 0.1393226958 \cdot \theta - 1.8379213492$

[0521]  $K_{1cY} = -0.0000007200 \cdot \theta^4 + 0.0001511407 \cdot \theta^3 - 0.0119247778 \cdot \theta^2 + 0.4177844180 \cdot \theta - 5.4796530159$

[0522]  $K_{1s} = -0.0000018083 \cdot \theta^4 + 0.0003804181 \cdot \theta^3 - 0.0300743972 \cdot \theta^2 + 1.0554840265 \cdot \theta - 13.8695053175$

[0523]  $K_{2cX} = 0.0029565 \cdot \theta^3 - 0.4291321 \cdot \theta^2 + 21.1697836 \cdot \theta - 291.6730902$

[0524]  $K_{2cY} = 0.0068664 \cdot \theta^3 - 1.0113413 \cdot \theta^2 + 51.3462358 \cdot \theta - 852.1945224$

[0525]  $K_{2s} = 0.013637 \cdot \theta^3 - 2.017207 \cdot \theta^2 + 102.120039 \cdot \theta - 1674.287384$

[0526] 不论用于 $K_1$ 或 $K_2$ ,对 $60^\circ$ 的等腰角来说,在纯X压缩和纯Y压缩下,它们的值都相等。就蒙皮中的局部屈服而论,在 $60^\circ$ 的交点是用成 $60^\circ$ 的三角形格腔加强的结构的各向同性行为的证据。

[0527] 复合加载的情况

[0528] 在复合加载的情况下,对于简单支撑的三角形板,利用屈服的线性计算的有限元模型进行分析。于是,我们选择接近于计算的相互作用曲线,但是公式简单的保守相互作用曲线,它变成在这里说明的方法中使用的曲线。其等式为: $R_1^A + R_2^B = 1$ 。其中 $R_i = \frac{N_i^{app}}{N_i^{crit}}$ , $i = cX,$

$cY$ 或 $s$ 。

[0529] 相互作用压缩X+压缩Y(情况1)

[0530] 在这种加载情况下,对于介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度,我们选择保守的相互作用曲线。即,相对于为介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度值计算的所有相互作用曲线,宣告对低于在X的压缩 $R_{cX}$ 和在Y的压缩 $R_{cY}$ 之和的值的相互作用的曲线。该曲线由以下等式: $R_{cX} + R_{cY} = 1$ 定义。

[0531] 相互作用压缩X+剪切载荷(情况2)

[0532] 在这种加载的情况下,对于介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度,我们选择相对于按照介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度的不同相互作用曲线,由以下等式: $R_{cX} + R_s^{3/2} = 1$ 定义的保守的相互作用曲线。

[0533] 相互作用压缩Y+剪切负载(情况3)

[0534] 对于介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度,为了确定在按照Y方向的压缩和剪切载荷的复合加载的情况下的储备系数,我们选择以下公式: $R_{cY} + R_s^2 = 1$ 的保守等式。为了得出覆盖所有加载情况的单一等式,我们选择使用另一个更保守的曲线 $R_{cX} + R_s^{3/2} = 1$ 。

[0535] 相互作用压缩X+压缩Y+剪切载荷(情况4)

[0536] 为这些加载情况选择的等式是: $R_{cX} + R_{cY} + R_s^{3/2} = 1$ 。该唯一的等式用于所有复合加载的情况。

[0537] 5A.6夹持的等腰三角形板

[0538] 简单载荷的情况

[0539] 图28和29表示按照等腰三角形的 $K_1$ 和 $K_2$ 常数的演变。这些曲线的等式是( $\theta$ ,单位为度):

[0540]  $K_{1cX} = -0.0000018547 \cdot \theta^4 + 0.0003940252 \cdot \theta^3 - 0.0314632778 \cdot \theta^2 + 1.1143937831 \cdot \theta - 14.8040153968$

[0541]  $K_{1cY} = -0.0000027267 \cdot \theta^4 + 0.0005734489 \cdot \theta^3 - 0.0453489667 \cdot \theta^2 + 1.5921323016 \cdot \theta - 20.9299676191$

[0542]  $K_{1s} = -0.0000069990 \cdot \theta^4 + 0.0014822211 \cdot \theta^3 - 0.1179080417 \cdot \theta^2 + 4.1617623127 \cdot \theta - 54.9899559524$

[0543]  $K_{2cX} = 0.0110488 \cdot \theta^3 - 1.6258419 \cdot \theta^2 + 81.8278420 \cdot \theta - 1254.6580819$



[0544]  $K_{2cY}=0.0158563 \cdot \theta^3-2.3439723 \cdot \theta^2+119.5038876 \cdot \theta-1970.9532998$

[0545]  $K_{2s}=0.0252562 \cdot \theta^3-3.7563673 \cdot \theta^2+191.0642156 \cdot \theta-3113.4527806$

[0546] 复合加载的情况

[0547] 在复合加载的情况下,对于夹持的三角形板,利用屈服的线性计算的有限元模型进行分析。于是,我们选择接近于计算的相互作用曲线,但是公式简单的保守相互作用曲线,它

变成在这里说明的方法中使用的曲线。其等式为: $R_1^A+R_2^B=1$ ,同时  $R_i = \frac{N_i^{app}}{N_i^{crit}}$ ,  $i=cX, cY$ 或

S。

[0548] 相互作用压缩X+压缩Y(情况1)

[0549] 在这种加载情况下,对于介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度,我们选择相对于按照介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度的不同相互作用曲线,由以下等式: $R_{cX}+R_{cY}=1$ 定义的保守的相互作用曲线。

[0550] 相互作用压缩X+剪切载荷(情况2)

[0551] 在这种加载的情况下,对于介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度,我们选择相对于按照介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度的不同相互作用曲线,由以下等式: $R_{cX}+R_s^{3/2}=1$ 定义的保守的相互作用曲线。

[0552] 相互作用压缩Y+剪切负载(情况3)

[0553] 对于介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的角度,为了确定在按照Y方向的压缩和剪切载荷的复合加载的情况下的储备系数,我们选择以下公式: $R_{cY}+R_s^2=1$ 的保守等式。为了得出覆盖所有加载情况的单一等式,我们选择使用另一个更保守的曲线  $R_{cX}+R_s^{3/2}=1$ 。

[0554] 相互作用:压缩X+压缩Y+剪切载荷(情况4)

[0555] 用于这种加载情况的等式是: $R_{cX}+R_{cY}+R_s^{3/2}=1$ 。该唯一的等式用于所有复合加载的情况。

[0556] 5B加强筋的局部屈服的计算

[0557] 本模块计算被视为具有由用户定义的不同边界条件的矩形面板的加强筋腹板的屈服应力和储备系数。

[0558] 对储备系数的计算来说,要考虑的施加应力只是从施加应力的计算模块得到的加强筋腹板中的应力。

[0559] 在加强筋网格上,一种或几种加强筋腹板被压缩加载。因此,必须计算压缩应力容量。

[0560] 本模块的输入数据是:

[0561] • 几何数据:加强筋腹板的尺寸(长度、高度、厚度),

[0562] • 材料数据(线性(E,  $\nu$ )和非线性( $F_{cy}$ ,  $F_{tu}$ ,  $\epsilon_{ult}$ ,  $n_c$ ))。在本例中,我们仅仅考虑各向同性材料,

[0563] • 边界条件(可存在4种),

[0564] • 施加于加强筋腹板的载荷

[0565] 输出数据是加强筋腹板的屈服容量,和储备系数。加强筋腹板的屈服应力容量是(关于符号约定,参见图13):

$$[0566] \quad \sigma_{blade}^{crit} = k_c \cdot \frac{\eta \cdot E_c \cdot \pi^2}{12 \cdot (1 - \nu_e^2)} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^2$$

[0567] 等式5-2

[0568] 其中:

[0569] b:加强筋腹板的厚度

[0570] d:加强筋腹板的高度

[0571]  $L_b$ :加强筋腹板的长度

[0572]  $E_c$ :压缩杨氏模量

[0573]  $\nu_e$ :弹性域中的泊松系数

[0574]  $k_c$ :局部屈服系数(取决于边界条件和几何形状)

[0575]  $\eta$ :塑性修正系数

[0576] 注意:加强筋腹板的长度由下式给出:

[0577]  $(L_b) = a$ (对X方向的加强筋腹板来说)

[0578]  $(L_b) = \frac{a}{2} \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \theta}$ (对横向方向的加强筋腹板来说)

[0579] 按照周围的结构,可对加强筋腹板应用各种边界条件(参见图14)。我们注意到如果 $L_b/d$ 大于 $L_{im}$ 的值,那么 $k_c$ 无限地接近于 $k_\infty$ 。用于计算的推荐的保守屈服系数以众多的有限元分析情况(2个夹持的边缘-1个简单支撑的边缘-1个自由边缘)为基础。

[0580] 按照上述边界条件,并且按照关于矩形板的塑性修正系数的表1,这种情况下使用的塑性修正系数是:

$$[0581] \quad \eta = \eta_1 = \frac{E_{sec}}{E_c} \cdot \frac{1 - \nu_e^2}{1 - \nu^2}$$

[0582] 关于加强筋腹板的屈服的储备系数计算的公式适用于在用三角形格腔加强的当前面板中使用的所有类型的加强筋腹板( $0^\circ$ ,  $+\theta$ ,  $-\theta$ ):

$$[0583] \quad R_{buck}^{blade} = \frac{\sigma_{blade}^{crit}}{\sigma_{blade}^{app}}$$

[0584] 下面的例子以在前面各节中使用的相同几何形状为基础。加强筋的几何形状是: $b = 2.5\text{mm}$ 和 $d = 37.36\text{mm}$ 。加强筋腹板的长度是( $L_b$ ): $L_b = a = 198\text{mm}$ (对X方向的加强筋腹板来说)和 $L_b = \frac{a}{2} \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \theta} = 186.82\text{mm}$ (对横向加强筋腹板来说)。使用的边界条件是:2侧夹持-1侧简单支撑-1侧自由)。

[0585] 从而: $k_{c_{0^\circ}} = 4.143 \cdot \left(\frac{d}{L_b}\right)^2 + 0.384 = 0.5315$ (对X方向的加强筋腹板来说),和

$$k_{c_{\theta^\circ}} = 4.143 \cdot \left(\frac{d}{L_b}\right)^2 + 0.384 = 0.5497 \text{ (对横向加强筋腹板来说)}。$$

[0586] 每个加强筋的屈服载荷是:

$$[0587] \quad \sigma_{blade_{0^\circ}}^{crit} = k_{c_{0^\circ}} \cdot \frac{\eta \cdot E_c \cdot \pi^2}{12 \cdot (1 - \nu_e^2)} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^2 = 167.78\text{MPa}$$

$$[0588] \quad \sigma_{blade\_0^\circ}^{crit} = k_{c\_0^\circ} \cdot \frac{\eta \cdot E_c \cdot \pi^2}{12 \cdot (1 - \nu_e^2)} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^2 = 173.52 \text{MPa}$$

[0589] 在每个加强筋腹板屈服的塑性修正系数是：

$$[0590] \quad \eta = \eta_1 = \frac{E_{sec}}{E_c} \cdot \frac{1 - \nu_e^2}{1 - \nu^2} = 1 \quad (\text{弹性})$$

[0591] 在加强筋中施加的载荷：

$$[0592] \quad \sigma_0 = -101.14 \text{MPa}$$

$$[0593] \quad \sigma_{+\theta} = 44.25 \text{MPa}$$

$$[0594] \quad \sigma_{-\theta} = -135.07 \text{MPa}$$

[0595] 以下是储备系数的计算结果：

$$[0596] \quad RF_{buck}^{blade\_0^\circ} = \frac{\sigma_{blade\_0^\circ}^{crit}}{\sigma_{blade\_0^\circ}^{app}} = 1.61$$

$$[0597] \quad RF_{buck}^{blade\_+\theta^\circ} = \frac{\sigma_{blade\_+\theta^\circ}^{crit}}{\sigma_{blade\_+\theta^\circ}^{app}} \Rightarrow \text{非翘曲}$$

$$[0598] \quad RF_{buck}^{blade\_-\theta^\circ} = \frac{\sigma_{blade\_-\theta^\circ}^{crit}}{\sigma_{blade\_-\theta^\circ}^{app}} = 1.28$$

[0599] 步骤6-总体不稳定性的计算

[0600] 本步骤提供在简单载荷或复合加载的条件下，用三角形格腔加强的平直面板的屈服流变容量的数据。

[0601] 各个公式以正交各向异性平板的屈服为基础。按照加载情况，2种或4种边界条件是可能的(4个简单支撑边缘，4个夹持的边缘，2个加载的简单支撑边缘和2个横向夹持的边缘，2个加载的夹持边缘和2个简单支撑的横向边缘)。对储备系数计算来说要考虑的施加的流变是作为输入数据的用三角形格腔加强的面板的外部流变。

[0602] 输入数据是：

[0603] • 几何数据：

[0604] oL<sub>x</sub>：等同于网格的面板的长度，

[0605] oL<sub>y</sub>：等同于网格的面板的宽度，

[0606] ot<sub>s</sub>：蒙皮的厚度，

[0607] ot<sub>g</sub>：等同于网格的面板的厚度，

[0608] • 关于材料的数据：

[0609] oE<sub>x</sub><sup>s</sup>, E<sub>y</sub><sup>s</sup>：蒙皮的杨氏模量，

[0610] oG<sub>xy</sub><sup>s</sup>：蒙皮的剪切模量，

[0611] ov<sub>xy</sub><sup>s</sup>, v<sub>yx</sub><sup>s</sup>：蒙皮的泊松系数，

[0612] oE<sub>x</sub><sup>g</sup>, E<sub>y</sub><sup>g</sup>：网格的杨氏模量，

[0613] oG<sub>xy</sub><sup>g</sup>：网格的剪切模量

[0614] ov<sub>xy</sub><sup>g</sup>, v<sub>yx</sub><sup>g</sup>：网格的泊松系数

[0615] • 施加于结构的载荷(N<sub>x</sub><sup>0</sup>, N<sub>y</sub><sup>0</sup>, N<sub>xy</sub><sup>0</sup>, p<sub>z</sub>)

[0616] • 边界条件(按照加载的类型,2或4是可能的)

[0617] 输出数据是:

[0618] •  $N_x^c, N_y^c, N_{xy}^c$ : 屈服流变容量,

[0619] •  $N_x^c \text{ comb}, N_y^c \text{ comb}, N_{xy}^c \text{ comb}$ : 复合屈服流变容量,

[0620] • 储备系数

[0621] 我们利用基尔霍夫(Kirchhoff)假定:在应变之后,平面各个截面大体保持平面。这里用等效面板模拟(加强筋)的网格。蒙皮和等同于网格的面板被视为正交各向异性的平板。

[0622] 材料参数证实下述关系: 
$$\frac{V_{xy}^i}{E_x^i} = \frac{V_{yx}^i}{E_y^i}$$

[0623] 图21图解说明了流变和力矩的约定。

[0624] 6.1.1位移

[0625] 向量 $\vec{U}$ 代表中位面的点M(x,y)的位移:  $\vec{U} = [u, v, w] = u(x, y)\vec{x} + v(x, y)\vec{y} + w(x, y)\vec{z}$

[0626] 不同的变量不取决于z,因为设想了应力的平面状态( $\sigma_{zz}=0$ )。

[0627] 6.1.2应变

[0628] 在位于与中位轴相隔距离z之处的平板的截面中的应变的通式是:

$$[0629] \begin{cases} \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^0 + z \cdot \kappa_{xx} \\ \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{yy}^0 + z \cdot \kappa_{yy} \\ \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xy}^0 + z \cdot \kappa_{xy} \end{cases}$$

[0630] 等式6-1

[0631] 其中:

$$[0632] \begin{cases} \varepsilon_{xx}^0 = u_{,x} + \frac{1}{2}(w_{,x})^2 \\ \varepsilon_{yy}^0 = v_{,y} + \frac{w}{R} + \frac{1}{2}(w_{,y})^2 \\ \varepsilon_{xy}^0 = \frac{1}{2}(u_{,y} + v_{,x}) + \frac{1}{2}w_{,x} \cdot w_{,y} \end{cases}$$

[0633] 等式6-2

[0634] 项 $\varepsilon_{xx}^0$ ,  $\varepsilon_{yy}^0$ 和 $\varepsilon_{xy}^0$ 代表在平板的平面中的应变中的组成。项 $\frac{1}{2}(w_{,x})^2$ ,  $\frac{1}{2}(w_{,y})^2$ 和

$\frac{1}{2}w_{,x} \cdot w_{,y}$ 代表在平板的平面中的应变中的非线性组成。项R代表壳体的半径,不过这里我们

考虑的是平板,于是 $\frac{1}{R} = 0$ 。

$$[0635] \begin{cases} \kappa_{xx} = -w_{,xx} \\ \kappa_{yy} = -w_{,yy} \\ \kappa_{xy} = -w_{,xy} \end{cases}$$

[0636] 等式6-3

[0637] 项 $Z \cdot \kappa_{xx}$ ,  $Z \cdot \kappa_{yy}$ 和 $Z \cdot \kappa_{xy}$ 代表由平板曲线的变化而引起的应变中的组成( $Z$ 是与平板的中位轴相隔的距离)。

[0638] 6.1.3行为规律

[0639] 蒙皮和等同于加强筋的面板被视为正交各向异性平板。因此,应力和应变之间的关系是:

$$[0640] \quad \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^i \\ \sigma_{yy}^i \\ \sigma_{xy}^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E_x^i}{1-\nu_{xy}^i \nu_{yx}^i} & \frac{\nu_{xy}^i E_y^i}{1-\nu_{xy}^i \nu_{yx}^i} & 0 \\ \frac{\nu_{yx}^i E_x^i}{1-\nu_{xy}^i \nu_{yx}^i} & \frac{E_y^i}{1-\nu_{xy}^i \nu_{yx}^i} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{xy}^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

[0641] 等式6-4

[0642] 其中 $i=(s,g)$ (索引 $s$ 用于与蒙皮有关的值,索引 $g$ 用于与加强筋网格有关的值)。

[0643] 6.1.4流变和力矩

[0644] 流变和单位长度的力矩的表达式是:

$$[0645] \quad N_{\alpha\beta} = \int_h \sigma_{\alpha\beta} dz$$

$$[0646] \quad M_{\alpha\beta} = \int_h \sigma_{\alpha\beta} \cdot z dz$$

[0647] 等式6-5

[0648] 其中 $(\alpha, \beta)=(x, y)$ 。

[0649] • 流变:

$$[0650] \quad N_{\alpha\beta} = \int_h \sigma_{\alpha\beta} dz = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}+t_s} \sigma_{\alpha\beta}^s dz + \int_{\frac{h}{2}-t_g}^{\frac{h}{2}} \sigma_{\alpha\beta}^g dz$$

[0651] 通过利用等式6-5和关系 $h=t_s+t_g$ ,我们得到:

$$[0652] \quad N_{xx} = \left( \frac{E_x^s t_s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{E_x^g t_g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \varepsilon_{xx}^0 + \left( \frac{\nu_{xy}^s E_y^s t_s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{\nu_{xy}^g E_y^g t_g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \varepsilon_{yy}^0$$

$$+ \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{E_x^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{E_x^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \kappa_{xx} + \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{\nu_{xy}^g E_y^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{\nu_{xy}^s E_y^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \kappa_{yy}$$

$$[0653] \quad N_{yy} = \left( \frac{\nu_{yx}^s E_x^s t_s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{\nu_{yx}^g E_x^g t_g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \varepsilon_{xx}^0 + \left( \frac{E_y^s t_s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{E_y^g t_g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \varepsilon_{yy}^0$$

$$+ \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{\nu_{yx}^g E_x^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{\nu_{yx}^s E_x^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \kappa_{xx} + \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{E_y^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{E_y^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \kappa_{yy}$$

$$[0654] \quad N_{xy} = 2 \left( G_{xy}^s t_s + G_{xy}^g t_g \right) \varepsilon_{xy}^0 + \left[ t_s t_g \left( G_{xy}^g - G_{xy}^s \right) \right] \kappa_{xy}$$

[0655] 等式6-6

[0656] • 单位长度的力矩:

$$[0657] \quad M_{\alpha\beta} = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}+t_s} \sigma_{\alpha\beta} z dz + \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}+t_g} \sigma_{\alpha\beta}^g z dz$$

[0658] 通过利用等式6-5和关系 $h=t_s+t_g$ ,我们得到:

$$[0659] \quad -M_{xx} = \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{E_x^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{E_x^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \varepsilon_{xx}^0 + \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{\nu_{xy}^g E_y^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{\nu_{xy}^s E_y^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \varepsilon_{yy}^0$$

$$+ \left[ \frac{1}{12} \left( \frac{E_x^s t_s (t_s^2 + 3t_g^2)}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{E_x^g t_g (t_g^2 + 3t_s^2)}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \right] \kappa_{xx}$$

$$+ \left[ \frac{1}{12} \left( \frac{\nu_{xy}^s E_y^s t_s (t_s^2 + 3t_g^2)}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{\nu_{xy}^g E_y^g t_g (t_g^2 + 3t_s^2)}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \right] \kappa_{yy}$$

$$[0660] \quad M_{yy} = \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{\nu_{yx}^g E_x^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{\nu_{yx}^s E_x^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \varepsilon_{xx}^0 + \left[ \frac{1}{2} t_s t_g \left( \frac{E_y^g}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} - \frac{E_y^s}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} \right) \right] \varepsilon_{yy}^0$$

$$+ \left[ \frac{1}{12} \left( \frac{\nu_{yx}^s E_x^s t_s (t_s^2 + 3t_g^2)}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{\nu_{yx}^g E_x^g t_g (t_g^2 + 3t_s^2)}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \right] \kappa_{xx}$$

$$+ \left[ \frac{1}{12} \left( \frac{E_y^s t_s (t_s^2 + 3t_g^2)}{1-\nu_{xy}^s \nu_{yx}^s} + \frac{E_y^g t_g (t_g^2 + 3t_s^2)}{1-\nu_{xy}^g \nu_{yx}^g} \right) \right] \kappa_{yy}$$

$$[0661] \quad -M_{xy} = [t_s t_g (G_{xy}^g - G_{xy}^s)] \varepsilon_{xy}^0 + \left[ \frac{1}{6} (G_{xy}^s t_s (t_s^2 + 3t_g^2) + G_{xy}^g t_g (t_g^2 + 3t_s^2)) \right] \kappa_{xy}$$

[0662] 等式6-7

[0663] 一旦获得一般行为规律(一方面,流变和力矩之间的行为规律,另一方面,应变的行为规律):

$$[0664] \quad \begin{pmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ -M_{xx} \\ M_{yy} \\ -M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{A}} & | & \bar{\mathbf{B}} \\ - & - & - \\ \bar{\mathbf{B}} & | & \bar{\mathbf{C}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{11} & 0 & 0 & B_{33} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & C_{11} & C_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{11} & 0 & C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & 0 & 0 & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix}$$

[0665] 等式6-8

[0666] 矩阵A、B和C是对称的。

[0667] 6.2平衡等式

[0668] 面板(或者壳体)的元件的一般平衡等式由连接流变、力矩和表面强度密度的以下表达式给出:

[0669]

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{xx,x} + N_{xy,y} + p_x = 0 \\ N_{yy,y} + N_{yx,x} + p_y = 0 \\ (N_{xx}w_x)_{,x} + (N_{yy}w_y)_{,y} + (N_{xy}w_x)_{,x} + (N_{yx}w_y)_{,y} - \frac{N_{xy}}{R} - M_{xx,x^2} + M_{yy,y^2} - 2M_{xy,xy} + p_z = 0 \end{array} \right.$$

[0670] 等式6-9

[0671] 其中  $\vec{f} = p_x \vec{x} + p_y \vec{y} + p_z \vec{z}$  是作用于壳体元件的表面强度密度。表面强度密度仅仅沿着z径向方向作用,而不沿着其它方向作用。于是  $p_x = p_y = 0$ 。此外,在本例中,我们考虑的是平板的情况,于是  $\frac{1}{R} = 0$ 。因此,我们获得简化的平衡等式:

$$[0672] \left\{ \begin{array}{l} N_{xx,x} + N_{xy,y} = 0 \\ N_{yy,y} + N_{yx,x} = 0 \\ N_{xx}w_{x^2} + N_{yy}w_{y^2} + 2N_{xy}w_{xy} + p_z = M_{xx,x^2} - M_{yy,y^2} + 2M_{xy,xy} \end{array} \right.$$

[0673] 等式6-10

[0674] 6.3对于这些等式的通解,我们定义以下向量

$$[0675] \quad [\boldsymbol{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{N}] = \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{W}] = \begin{bmatrix} w_{xx} \\ w_{yy} \\ w_{xy} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} -M_{xx} \\ M_{yy} \\ -M_{xy} \end{bmatrix}$$

[0676] 等式6-11

[0677] 施加在平板上的普通载荷是:

[0678] • 沿着x轴的均匀压缩流变:  $-N_x^0$ [0679] • 沿着y轴的均匀压缩流变:  $-N_y^0$ [0680] • 在x-y平面中的均匀剪切流变:  $-N_{xy}^0$ [0681] • 沿着z轴的均匀压力:  $p_z \vec{z}$ 

[0682] 因此,由于下面定义的施加的载荷是均匀的,因此能够推断等式6-10的前两个等式被证实。 $N_{xx,x} = N_{yy,y} = N_{xy,y} = N_{yx,x} = 0$ 。

[0683] 力矩的表达式:

[0684] 通过利用等式6-8和等式6-11,得到以下关系:

[0685]  $[\mathbf{N}] = \bar{\mathbf{A}}[\boldsymbol{\varepsilon}] + \bar{\mathbf{B}}[\mathbf{K}]$

[0686]  $[\mathbf{M}] = \bar{\mathbf{B}}[\boldsymbol{\varepsilon}] + \bar{\mathbf{C}}[\mathbf{K}]$

[0687] 等式6-12

[0688] 由于施加的流变是均匀的,因此获得以下关系:

[0689]  $[\mathbf{N}]_{,x^2} = 0 \Leftrightarrow \bar{\mathbf{A}}[\boldsymbol{\varepsilon}]_{,x^2} + \bar{\mathbf{B}}[\mathbf{K}]_{,x^2} = 0 \Leftrightarrow [\boldsymbol{\varepsilon}]_{,x^2} = \bar{\mathbf{A}}^{-1} \bar{\mathbf{B}}[\mathbf{W}]_{,x^2}$

[0690]  $[\mathbf{N}]_{,y^2} = 0 \Leftrightarrow \bar{\mathbf{A}}[\boldsymbol{\varepsilon}]_{,y^2} + \bar{\mathbf{B}}[\mathbf{K}]_{,y^2} = 0 \Leftrightarrow [\boldsymbol{\varepsilon}]_{,y^2} = \bar{\mathbf{A}}^{-1} \bar{\mathbf{B}}[\mathbf{W}]_{,y^2}$

$$[0691] \quad [\mathbf{N}]_{,xy} = 0 \Leftrightarrow \bar{\mathbf{A}}[\boldsymbol{\varepsilon}]_{,xy} + \bar{\mathbf{B}}[\mathbf{K}]_{,xy} = 0 \Leftrightarrow [\boldsymbol{\varepsilon}]_{,xy} = \bar{\mathbf{A}}^{-1} \bar{\mathbf{B}}[\mathbf{W}]_{,xy}$$

[0692] 等式6-13

[0693] 依据事实:  $[\mathbf{W}] = -[\mathbf{K}]$ .

[0694] 于是对于力矩,我们得到:

$$[0695] \quad [\mathbf{M}]_{,x^2} = \bar{\mathbf{B}}[\boldsymbol{\varepsilon}]_{,x^2} + \bar{\mathbf{C}}[\mathbf{K}]_{,x^2} = \left( \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{A}}^{-1}\bar{\mathbf{B}} - \bar{\mathbf{C}} \right) [\mathbf{W}]_{,x^2} = -\bar{\mathbf{D}}[\mathbf{W}]_{,x^2}$$

$$[0696] \quad [\mathbf{M}]_{,y^2} = \bar{\mathbf{B}}[\boldsymbol{\varepsilon}]_{,y^2} + \bar{\mathbf{C}}[\mathbf{K}]_{,y^2} = \left( \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{A}}^{-1}\bar{\mathbf{B}} - \bar{\mathbf{C}} \right) [\mathbf{W}]_{,y^2} = -\bar{\mathbf{D}}[\mathbf{W}]_{,y^2}$$

$$[0697] \quad [\mathbf{M}]_{,xy} = \bar{\mathbf{B}}[\boldsymbol{\varepsilon}]_{,xy} + \bar{\mathbf{C}}[\mathbf{K}]_{,xy} = \left( \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{A}}^{-1}\bar{\mathbf{B}} - \bar{\mathbf{C}} \right) [\mathbf{W}]_{,xy} = -\bar{\mathbf{D}}[\mathbf{W}]_{,xy}$$

[0698] 等式6-14

[0699] 同时

$$[0700] \quad \bar{\mathbf{D}} = \bar{\mathbf{C}} - \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{A}}^{-1}\bar{\mathbf{B}}$$

[0701] 等式6-15

[0702] D是整体刚性矩阵,是对称的。

$$[0703] \quad \bar{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{pmatrix}$$

[0704] 于是获得等式6-10的力矩的导数(derivation):

$$[0705] \quad M_{xx,x^2} = D_{11}w_{,x^4} + D_{12}w_{,x^2y^2}$$

$$[0706] \quad -M_{yy,y^2} = D_{12}w_{,x^2y^2} + D_{22}w_{,y^4}$$

$$[0707] \quad M_{xy,xy} = D_{33}w_{,x^2y^2}$$

[0708] 等式6-16

[0709] 于是,关于位移的等式6-10的表达式给出一般微分等式:

$$[0710] \quad -N_x^0 w_{,x^2} - N_y^0 w_{,y^2} - 2N_{xy}^0 w_{,xy} + p_z = \Omega_1 w_{,x^4} + \Omega_2 w_{,y^4} + \Omega_3 w_{,x^2y^2}$$

[0711] 等式6-17

[0712] 其中:

$$[0713] \quad \Omega_1 = D_{11}$$

$$[0714] \quad \Omega_2 = D_{22}$$

$$[0715] \quad \Omega_3 = 2 \cdot (D_{12} + D_{33})$$

[0716] 等式6-18

[0717] 在下节中,利用其3个弯曲加强筋( $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 和 $\Omega_3$ )模拟用三角形格腔加强的面板,以便计算正交各向异性板中的屈服流变。

[0718] 这里同样地,在这种情况下利用以下假定:如果复合载荷的某些分量是拉伸分量,那么计算不考虑这些分量。事实上,保守的是认为拉伸分量对所研究的屈服流变没有任何影响,从而不改善平板上的屈服应力。



[0719] 6.4屈服流变容量

[0720] 6.4.1纵向压缩流变(与X相应的压缩)

[0721] 平板受到均匀的纵向压缩流变(与X轴相应): $-N_x^0$ 。因此: $N_y^0 = N_{xy}^0 = p_z = 0$ 。于是,一般微分等式(等式6-17)表述:

$$[0722] \quad -N_x^0 w_{,x^2} = \Omega_1 w_{,x^4} + \Omega_2 w_{,y^4} + \Omega_3 w_{,x^2 y^2}$$

[0723] 等式6-19

[0724] 首先,我们考虑简单支撑平板(边界条件被进一步一般化):

[0725] 当 $x=0$ 和 $x=L_x$ 时: $w=0$ 和 $-M_{xx}=0$

[0726] 当 $y=0$ 和 $y=L_y$ 时: $w=0$ 和 $M_{yy}=0$

[0727] 关于位移 $w$ 的以下表达式满足上面详述的所有边界条件:

$$[0728] \quad w(x, y) = C_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (m, n) \in \mathbf{N}^2$$

[0729] 等式6-20

[0730] 关于 $w$ 的前述表达式必须满足一般微分等式(等式6-19),于是我们获得:

$$[0731] \quad N_x^0 \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 = \Omega_1 \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^4 + \Omega_2 \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^4 + \Omega_3 \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 \quad (m, n) \in \mathbf{N}^2$$

[0732]  $N_x^0$ 的最小值对应于整体屈服的流变容量 $N_x^c$ 。我们证明该值是:

$$[0733] \quad N_x^c = 2 \left(\frac{\pi}{L_y}\right)^2 \left(\sqrt{\Omega_1 \Omega_2} + \frac{\Omega_3}{2}\right)$$

[0734] 等式6-21

[0735] 可对于不同的边界条件(加载边缘和简单支撑或夹持的横向边缘),使该公式一般化:

$$[0736] \quad N_x^c = k_c \left(\frac{\pi}{L_y}\right)^2 \sqrt{\Omega_1 \Omega_2}$$

[0737] 等式6-22

[0738] 其中:

$$[0739] \quad k_c = h(\bar{\alpha}) + q \cdot \beta$$

$$[0740] \quad \bar{\alpha} = \frac{L_x}{L_y} \sqrt{\frac{\Omega_2}{\Omega_1}}$$

$$[0741] \quad \beta = \frac{\Omega_3}{2\sqrt{\Omega_1 \Omega_2}}$$

$$[0742] \quad h(\bar{\alpha}) = \begin{cases} \left(\frac{1}{\bar{\alpha}}\right)^2 + \bar{\alpha}^2, & \text{si } \bar{\alpha} \leq 1 \\ 2, & \text{sin on} \end{cases}$$

[0743]  $q=2$

[0744] 图22表示按照不同边界条件(4个简单支撑的边缘的情况是基本曲线)的 $h(\bar{\alpha})$ 的值。

[0745] 6.4.2横向压缩流变(与Y相应的压缩)

[0746] 平板受到均匀的横向压缩流变(与Y轴相应): $-N_y^0$ 。因此: $N_x^0 = N_{xy}^0 = p_z = 0$ 。解法与在上一节中说明的解法相同。

[0747] 屈服容量流变 $N_y^c$ 用下式表示:

$$[0748] \quad N_y^c = k_c \left( \frac{\pi}{L_x} \right)^2 \sqrt{\Omega_2 \Omega_1} \quad \text{等式 6-23}$$

[0749] 其中

$$[0750] \quad k_c = h(\bar{\alpha}) + q \cdot \beta$$

$$[0751] \quad \bar{\alpha} = \frac{L_y}{L_x} \sqrt[4]{\frac{\Omega_1}{\Omega_2}}$$

$$[0752] \quad \beta = \frac{\Omega_3}{2\sqrt{\Omega_2 \Omega_1}}$$

$$[0753] \quad h(\bar{\alpha}) = \begin{cases} \left( \frac{1}{\bar{\alpha}} \right)^2 + \bar{\alpha}^2, \\ 2 \end{cases},$$

[0754]  $q=2$

[0755] 6.4.3剪切流变

[0756] 平板受到均匀剪切流变: $-N_{xy}^0$ 。因此: $N_x^0 = N_y^0 = p_z = 0$ 。我们注意在本段中,以下公式仅仅适用地 $L_y < L_x$ 。在相反的情况下,一些项必须被交换: $L_x \longleftrightarrow L_y$ ,和 $\Omega_1 \longleftrightarrow \Omega_2$ 。屈服流变容量 $N_{xy}^c$ 用下式表示:

$$[0757] \quad N_{xy}^c = k_s \left( \frac{\pi}{L_y} \right)^2 \sqrt[4]{\Omega_1 \Omega_2^3}$$

[0758] 等式6-24

[0759] 其中 $k_s$ 从图23中的曲线图中,和图24(简单支撑边缘的情况)及图25(4个夹持边缘的情况)中获得(来源:S.G.Lekhnitskii:Anisotropic Plates,Gordon and Breach)。

[0760] 表和曲线图的输入数据用下式定义:

$$[0761] \quad \bar{\alpha} = \frac{L_y}{L_x} \sqrt[4]{\frac{\Omega_1}{\Omega_2}} \quad \begin{array}{l} \bar{\alpha} \leq 1 \text{ 的情况} \\ \text{上述以外的情况} \end{array}$$

$$\beta = \frac{\Omega_3}{2\sqrt{\Omega_2 \Omega_1}}$$

[0762] 6.4.4双轴向压缩流变

[0763] 平板受到复合加载:均匀的纵向压缩流变(与x轴相应)和均匀的横向压缩流变(与y轴相应): $-N_{x\text{comb}}^0$ 和 $-N_{y\text{comb}}^0$ 。因此: $N_{xy}^0 = p_z = 0$ 。我们用: $N_{y\text{comb}}^0 = \lambda N_{x\text{comb}}^0$ 定义 $\lambda$ 。一般微

分等式被表示成:

$$[0764] \quad -N_{x\text{ comb}}^0 w_{,x^2} - N_{y\text{ comb}}^0 w_{,y^2} = \Omega_1 w_{,x^4} + \Omega_2 w_{,y^4} + \Omega_3 w_{,x^2 y^2}$$

[0765] 等式6-25

[0766] • 边界条件:4个简单支撑的边缘

[0767] 当 $x=0$ 和 $x=L_x$ 时: $w=0$ 和 $-M_{xx}=0$

[0768] 当 $y=0$ 和 $y=L_y$ 时: $w=0$ 和 $M_{yy}=0$

[0769] 偏移的表达式:

[0770] 位移 $w$ 的以下表达式满足上面详述的所有边界条件:

$$[0771] \quad w(x, y) = C_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (m, n) \in \mathbf{N}^2$$

[0772] 等式6-26

[0773] 屈服流变容量 $(N_{x\text{ comb}}^c, N_{y\text{ comb}}^c)$ :

[0774] 关于 $w$ 的上述表达式必须满足一般微分等式(等式6-25),于是,我们得到:

[0775]

$$N_{x\text{ comb}}^0 \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 + N_{y\text{ comb}}^0 \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 = \Omega_1 \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^4 + \Omega_2 \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^4 + \Omega_3 \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 \quad (m, n) \in \mathbf{N}^2$$

[0776] 按照 $\lambda$ 的 $N_{x\text{ comb}}^0$ 的表达式必须满足:

$$[0777] \quad N_{x\text{ comb}}^0 = \frac{\pi^2}{L_y^2 m^2 + \lambda L_x^2 n^2} \left[ \Omega_1 \left(\frac{L_y}{L_x}\right)^2 m^4 + \Omega_2 \left(\frac{L_x}{L_y}\right)^2 n^4 + \Omega_3 m^2 n^2 \right] \quad (m, n) \in \mathbf{N}^2$$

[0778] 从而,获得屈服流变容量:

[0779]

$$N_{x\text{ comb}}^c = \text{Min} \left\{ \frac{\pi^2}{L_y^2 m^2 + \lambda L_x^2 n^2} \left[ \Omega_1 \left(\frac{L_y}{L_x}\right)^2 m^4 + \Omega_2 \left(\frac{L_x}{L_y}\right)^2 n^4 + \Omega_3 m^2 n^2 \right], (m, n) \in \mathbf{N}^2 \right\}$$

$$[0780] \quad N_{y\text{ comb}}^c = \lambda N_{x\text{ comb}}^c$$

[0781] 等式6-27

[0782] • 边界条件:4个夹持的边缘:

[0783] 当 $x=0$ 和 $x=L_x$ 时:  $w=0$ 和 $\frac{\partial w}{\partial y}=0$

当 $y=0$ 和 $y=L_y$ 时:  $w=0$ 和 $\frac{\partial w}{\partial x}=0$

[0784] 位移的表达式:

[0785] 位移 $w$ 的以下表达式满足上面详述的所有边界条件:

$$[0786] \quad w(x, y) = C_{mn} \left[ 1 - \cos\left(\frac{m \cdot 2 \cdot \pi \cdot x}{L_x}\right) \right] \left[ 1 - \cos\left(\frac{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot y}{L_y}\right) \right] \quad (m, n) \in \mathbf{N}^2$$

[0787] 等式6-28

[0788] 屈服流变容量( $N_{x\text{comb}}^c, N_{y\text{comb}}^c$ ):

[0789] 按照 $\lambda$ 的 $N_{x\text{comb}}^0$ 的表达式必须满足:

$$[0790] \quad N_{x\text{comb}}^0 = \frac{4\pi^2}{L_y^2 m^2 + \lambda L_x^2 n^2} \left[ \Omega_1 \left( \frac{L_y}{L_x} \right)^2 m^4 + \Omega_2 \left( \frac{L_x}{L_y} \right)^2 n^4 + \frac{1}{3} \Omega_3 m^2 n^2 \right] \quad (m, n) \in \mathbf{N}^2$$

[0791] 从而,获得屈服流变容量:

[0792]

$$N_{x\text{comb}}^c = \text{Min} \left\{ \frac{4\pi^2}{L_y^2 m^2 + \lambda L_x^2 n^2} \left[ \Omega_1 \left( \frac{L_y}{L_x} \right)^2 m^4 + \Omega_2 \left( \frac{L_x}{L_y} \right)^2 n^4 + \frac{1}{3} \Omega_3 m^2 n^2 \right], (m, n) \in \mathbf{N}^2 \right\}$$

$$[0793] \quad N_{y\text{comb}}^c = \lambda N_{x\text{comb}}^c$$

[0794] 等式6-29

[0795] 6.4.5纵向和剪切压缩流变

[0796] 平板受到复合加载:均匀的纵向(与轴X相应)和剪切压缩流变: $-N_{x\text{comb}}^0$ 和 $-N_{xy\text{comb}}^0$ ,因此: $N_y^0 = p_z = 0$ 。

[0797] 互作用等式:

[0798] 纵向和剪切压缩的复合流变的互作用等式是:

$$[0799] \quad R_x + R_{xy}^{1.75} = 1$$

[0800] 等式6-30

[0801] 其中:

$$[0802] \quad R_x = \frac{N_{x\text{comb}}^c}{N_x^c} \text{纵向压缩流变的比率}$$

$$[0803] \quad R_{xy} = \frac{N_{xy\text{comb}}^c}{N_{xy}^c} \text{剪切流变的比率}$$

[0804] 其中 $N_x^c$ 和 $N_{xy}^c$ 是上面关于单轴向加载计算的屈服流变容量。

[0805] 6.4.6横向和剪切压缩流变

[0806] 平板受到均匀的横向压缩流变(与y轴相应)和剪切流变: $-N_{y\text{comb}}^0$ 和 $-N_{xy\text{comb}}^0$ ,因此: $N_x^0 = p_z = 0$ 。

[0807] 横向和剪切压缩的复合流变的互作用等式是:

$$[0808] \quad R_y + R_{xy}^{1.75} = 1$$

[0809] 等式6-31

[0810] 其中:

$$[0811] \quad R_y = \frac{N_{y\text{comb}}^c}{N_y^c} \text{是横向压缩流变的比率}$$

$$[0812] \quad R_{xy} = \frac{N_{xy\text{comb}}^c}{N_{xy}^c} \text{是剪切流变的比率}$$

[0813] 其中 $N_y^c$ 和 $N_{xy}^c$ 是上面关于单轴向加载计算的屈服流变容量。

[0814] 6.4.7双轴向和剪切压缩流变

[0815] 平板受到复合加载:均匀的纵向压缩流变(与x轴相应)和均匀的横向压缩流变(与y轴相应),以及屈服流变: $-N_{xcomb}^0$ 、 $-N_{ycomb}^0$ 和 $-N_{xycomb}^0$ 。因此: $p_z=0$ 。

[0816] 分两步获得相互作用等式。首先,我们确定与双轴向压缩流变对应的储备系数 $RF_{bi}$ :

$$[0817] \quad RF_{bi} = \frac{N_{xcomb}^c}{N_{xcomb}^0} = \frac{N_{ycomb}^c}{N_{ycomb}^0}$$

[0818] 等式6-32

[0819] 随后把该值用在关于双轴向和剪切压缩的复合流变的相互作用等式中:

$$[0820] \quad R_{bi} + R_{xy}^{1.75} = 1$$

[0821] 等式6-33

[0822] 其中:

[0823]  $R_{bi} = RF_{bi}^{-1}$ 是双向轴压缩流变的比率

[0824]  $R_{xy} = \frac{N_{xycomb}^0}{N_{xy}^c}$ 是剪切流变的比率

[0825] 其中 $N_{xy}^c$ 是在纯剪切载荷下计算的屈服流变容量。

[0826] 按照本发明的方法还包括迭代循环(参见图7)。该循环使得能够按照步骤3-6至少之一的结果,修正施加的载荷的值,或者所考虑的用三角形格腔加强的面板的尺寸值。

[0827] 如上所述的方法至少可部分以电子数据表式程序上的宏的形式来实现。

[0828] 这样的程序从而用于例如输入保存在专用区域中的材料和几何形状数据,以及考虑的载荷和边界条件的各种情况并提供面板质量,特别涉及三角形格腔、加强筋在极限载荷下的储备系数以及整体失效的输出值。这些输出数据从而突出与期望的储备系数不相容的载荷或尺寸设定的情况。

[0829] 本发明的优点

[0830] 我们了解在本发明的框架内,已知的NASA处理已被充分扩展从而考虑到航空领域的特殊性:

[0831] -相对于与方向X或Y相应的压缩和剪切载荷的加强筋的局部容量值(破坏,横向失稳等),

[0832] -相对于与方向X或Y相应的压缩和剪切载荷的三角形蒙皮的局部容量值,

[0833] -塑性性能修正,

[0834] -初步质量计算,

[0835] -相对于与方向X或Y相应的压缩和剪切载荷的整体屈服的计算。

[0836] 主要的改进是关于不同种类的屈服的应力容量的计算以及相应的储备系数的计算。

[0837] 扩展:加载的情况

[0838] -双重压缩(对局部和整体屈服来说)

[0839] -复合加载:压缩和剪切负载

- [0840] 扩展:方法的参数的改进
- [0841] -不存在对材料的泊松系数的限制
- [0842] -网格角度的变化(不同于成 $60^\circ$ )
- [0843] -在用三角形格腔加强的结构被视为等效加强面板的情况下的塑性
- [0844] -关于局部或整体屈服的边界条件(夹持或中间边界条件)
- [0845] 按照本发明的确定尺寸的方法的最重要优点之一是安装用三角形格腔加强的面板,代替以前用下面的两类垂直的加强筋(纵梁和肋条)形成的面板的可能性,就相同的机械抗力来说,以前用下面的两类垂直的加强筋(纵梁和肋条)形成面板会在某些部件导致达30%的增重。
- [0846] 本发明的变形
- [0847] 本发明的范围并不局限于上面作为例子考虑的各类实施例的细节,相反可扩展到对本领域的技术人员范围的修改。
- [0848] 在说明书中,我们涉及了与航空结构的当前要求相对应的介于 $45^\circ$ 和 $70^\circ$ 之间的等腰三角形底角。然而明显的是,可以对用三角形格腔加强的面板中的所有等腰角数值实现类似的方法。
- [0849] 通过上述描述可知,本发明的实施例公开了但不限于如下方案:
- [0850] 1.一种利用分析方法,确定由同质并且各向同性的材料组成的基本平直的面板的尺寸的方法,所述面板由嵌入到所述面板中的三束平行加强筋组件(称为“网格”)增强的蒙皮构成,所述加强筋组在蒙皮上确定的格腔为三角形,加强筋为刀片状,加强的面板必须符合对预定外部载荷的机械抗力的规范,
- [0851] 其特征在于各束加强筋之间的角度允许三角形格腔具有任何等腰形状,所述方法:
- [0852] -在定义每种加强筋的有效直线部分的步骤期间,考虑加强筋的后期屈服引起的施加应力在所述面板和加强筋网格之间的重新分布,其中,对于角度 $0^\circ$ , $+\theta$ 或 $-\theta$ ,分别用 $A_{0^\circ}^{st}$ , $A_{+\theta}^{st}$ 和 $A_{-\theta}^{st}$ 表示加强筋的后期屈服有效直线部分,
- [0853] -在计算面板的有效厚度 $t_{s\_eff}$ 的步骤期间,考虑由格腔的后期屈服引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布,
- [0854] -在通过利用Ramberg-Osgood规律,对材料的各种特性尤其是杨氏模量和泊松系数,对加强筋来说是 $E_{0^\circ}^{st}$ , $E_{+\theta}^{st}$ , $E_{-\theta}^{st}$ 对蒙皮来说是 $E_x^s$ , $E_y^s$ 和 $v_{ep}^{st}$ ,进行迭代处理的步骤期间,考虑由施加的外部载荷的塑性引起的施加应力在面板和加强筋的网格之间的重新分布。
- [0855] 2.方案1的方法,其特征在于,所述方法包括利用计算塑性应力的迭代方法修正施加的载荷,从而考虑塑性的步骤,所述迭代方法一直执行到在处理开始时输入的材料参数的5个参数( $E_{0^\circ}^{st}$ , $E_{+\theta}^{st}$ , $E_{-\theta}^{st}$ , $E_{skin}$ , $v_{ep}$ )显然等于在塑性应力的计算之后获得的所述参数为止。
- [0856] 3.方案1或2的方法,其特征在于,所述方法包括计算等腰三角形格腔的屈服流变容量和储备系数的步骤5A,就储备系数的计算来说,要考虑的施加应力仅仅是影响蒙皮的应力,使用的外部流变是如下的蒙皮流变,该蒙皮流变不对应于加强面板的完全加载。
- [0857] 4.方案3的方法,其特征在于它包括两个子步骤:首先,利用有限元方法,计算承受纯加载情况(与平面中的两个方向相应的压缩,剪切载荷)的平板的容量值,随后计算这些纯加载情况之间的相互作用曲线。

[0858] 5. 方案4的方法,其特征在于容量值的计算包括以下子步骤:

[0859] • 创建三角形板的有限元方法参数模型,

[0860] • 测试各种不同组合,以获得屈服结果,

[0861] • 获得与解析多项式相容的参数。

[0862] 6. 方案5的方法,其特征在于,在纯加载的情况下,用以下子步骤定义相互作用曲线:

[0863] -创建具有不同等腰角的多个三角形板的有限元模型,等腰角( $\theta$ )被定义为等腰三角形的底角,

[0864] -对于每个等腰角:

[0865] 1/利用有限元模型进行计算,以确定各种板厚的褶皱的流变容量(无塑性修正),

[0866] 2/按照比值 $\frac{D}{h^2}$ (D是平板刚性,h是三角形的高度),跟踪屈服流变容量曲线,利用按照该比例的二阶等式,对比值 $\frac{D}{h^2}$ 的较小值确定所述曲线,所述二阶等式中的系数 $K_1$ 和 $K_2$ 取决于角度和所考虑的载荷情况,

[0867] 3/按照等腰三角形的底角,跟踪多项式等式的系数 $K_1$ 和 $K_2$ 的演变,这些系数是按照所考虑的三角形板的角度跟踪的,并且进行插值,以确定无论什么等腰角,都使得能够计算这些常数的多项式等式。

[0868] 7. 方案5或6的方法,其特征在于,在复合加载的情况下,使用以下假定:如果复合载荷的某些分量是拉伸分量,那么计算不考虑这些分量,相互作用曲线由以下子步骤定义:

[0869] -创建具有不同等腰角的多个三角形板的有限元模型,等腰角( $\theta$ )被定义为等腰三角形的底角,

[0870] -对于每个等腰角:

[0871] 1/利用有限元模型(FEM)进行计算,以确定与外部载荷的不同分布对应的屈服的本征值,

[0872] 2/对于每个角度和载荷的每种组合,跟踪相互作用曲线,随后用覆盖所有这些组合的如下的唯一等式近似这些曲线:

[0873]  $R_{cX}^A + R_{cY}^B + R_s^C = 1$ ,其中A、B、C是经验系数,(这里 $R_i = \frac{N_i^{app}}{N_i^{crit}}$ ,其中 $R_i$ 代表载荷比率,

$N_i^{app}$ 和 $N_i^{crit}$ 代表施加的流变和临界流变,其中 $i = cX, cY$ 或 $s$ ,对应于沿X轴和Y轴的压缩的情况和剪切载荷的情况)。

[0874] 8. 方案5-7中任意一项的方法,其特征在于,就简单支承或者被夹持的等腰三角形板来说,在复合加载的情况下,对于所有的加载情况,使用相互作用曲线: $R_{cX} + R_{cY} + R_s^{\frac{3}{2}} = 1$ 。

[0875] 9. 前述方案中任意一项的方法,其特征在于,所述方法包括步骤6,在步骤6中计算总体不稳定性,提供平直的加强面板在纯加载或复合加载条件下的屈服流变容量和储备系数的数据,对储备系数的计算来说,要考虑的施加的流变是加强面板的外部流变。

[0876] 10. 一种包括一系列指令的计算机程序产品,当在计算机上执行时所述一组指令时,所述指令适合于实现前述方案中任意一项的方法。

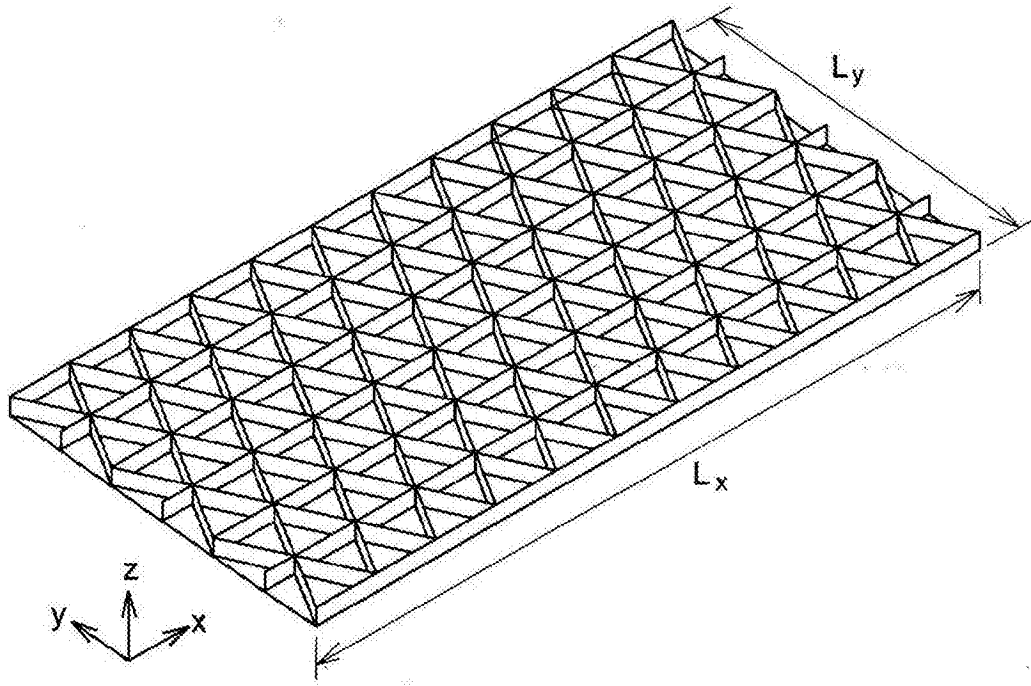


图1

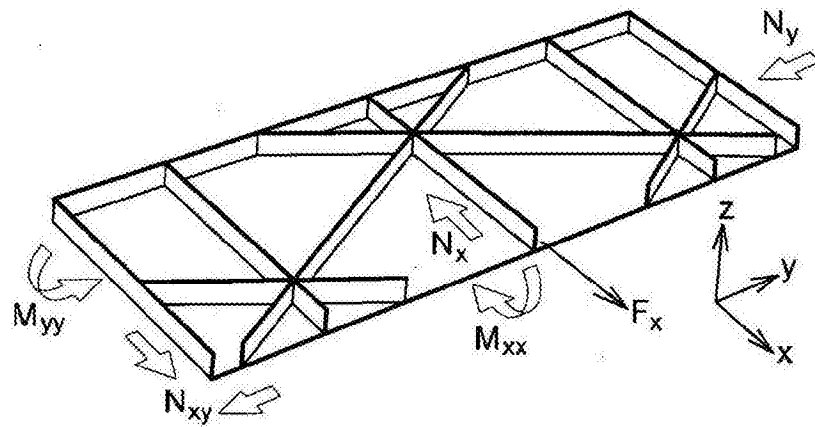


图2



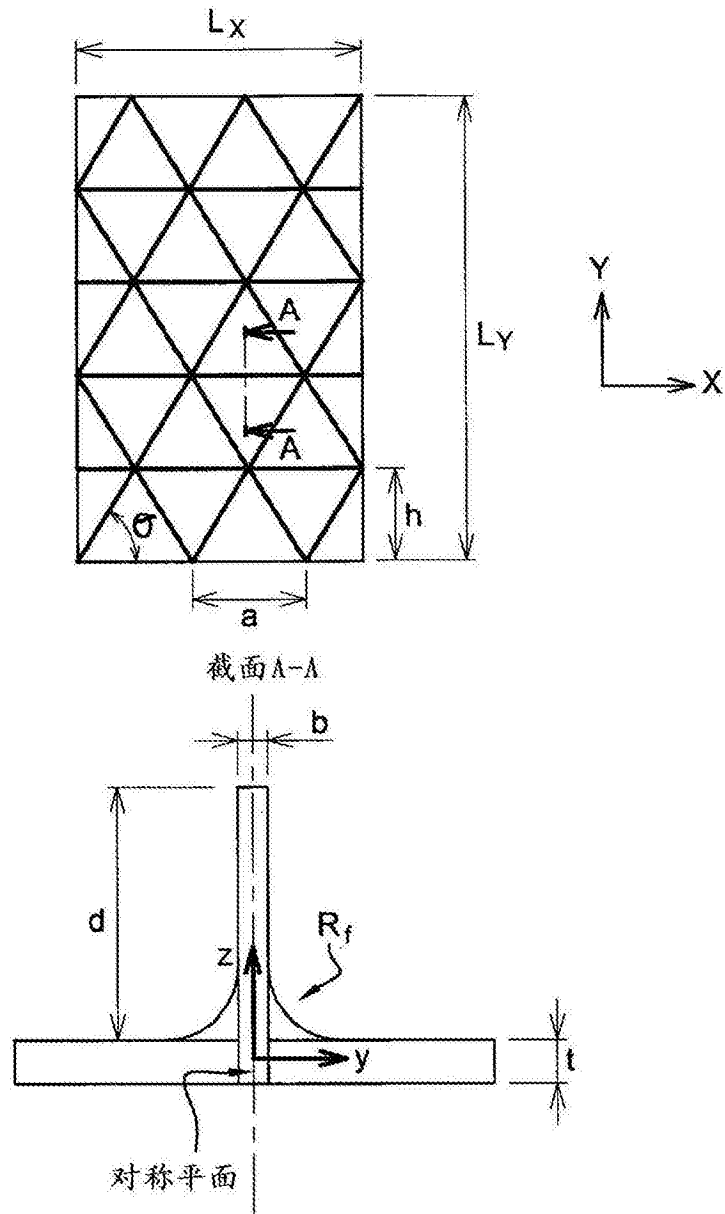


图3

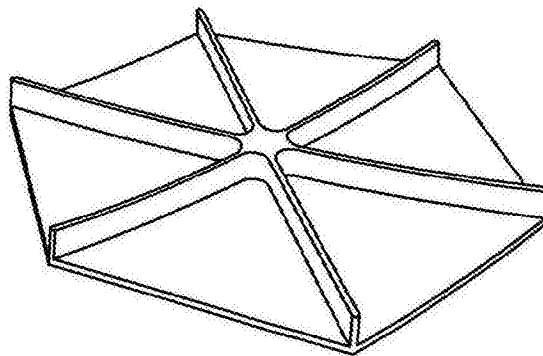


图4

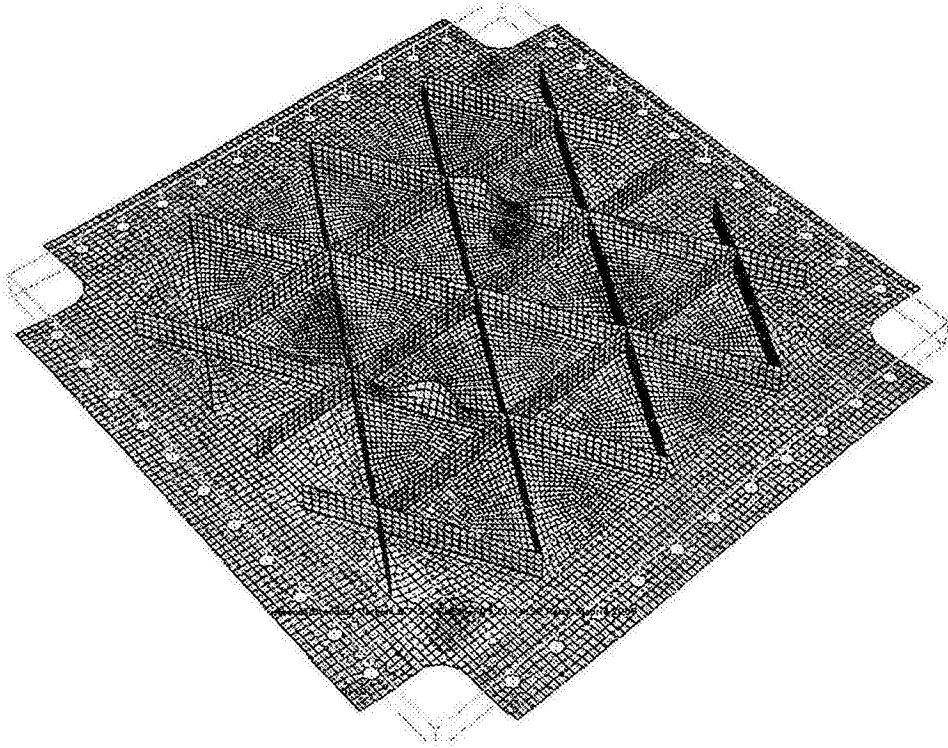


图5a

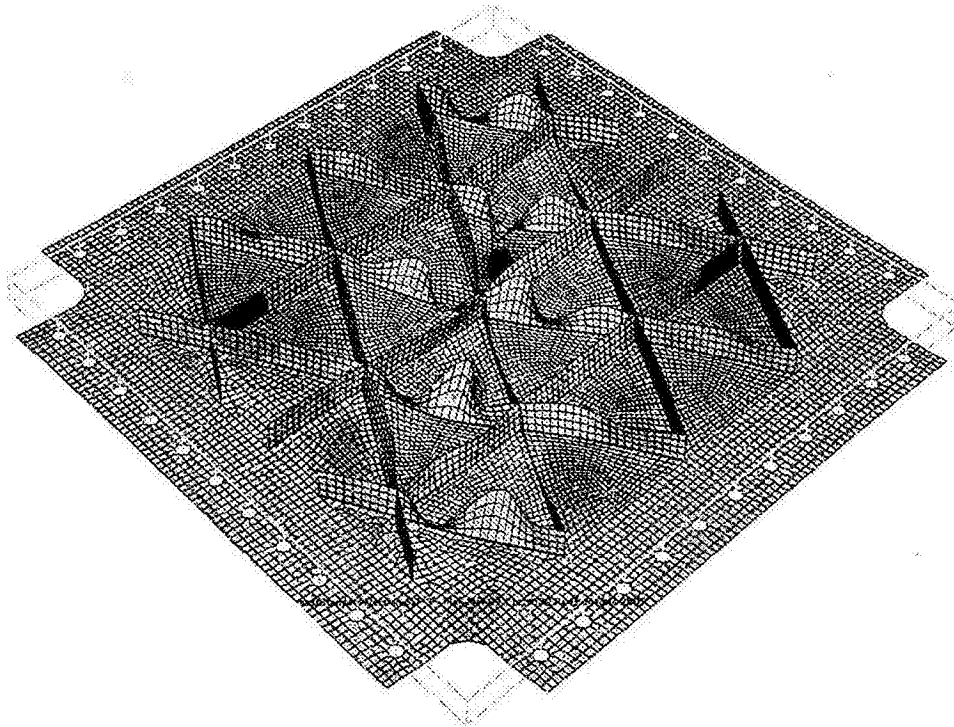


图5b

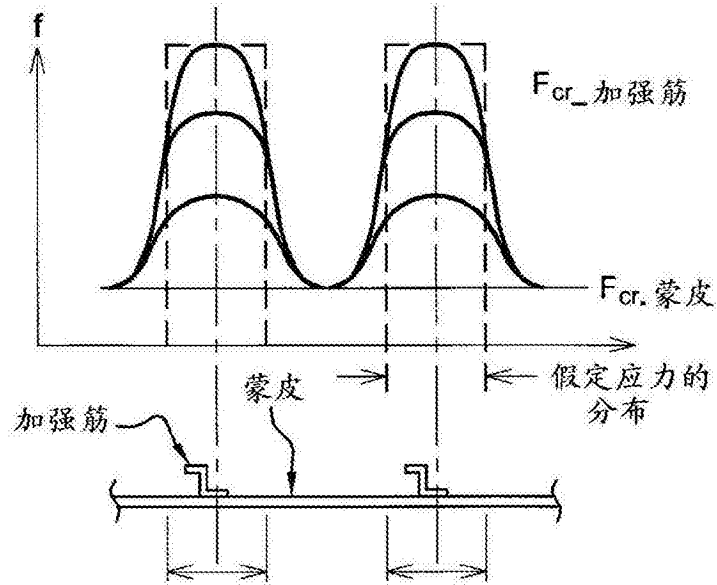


图6

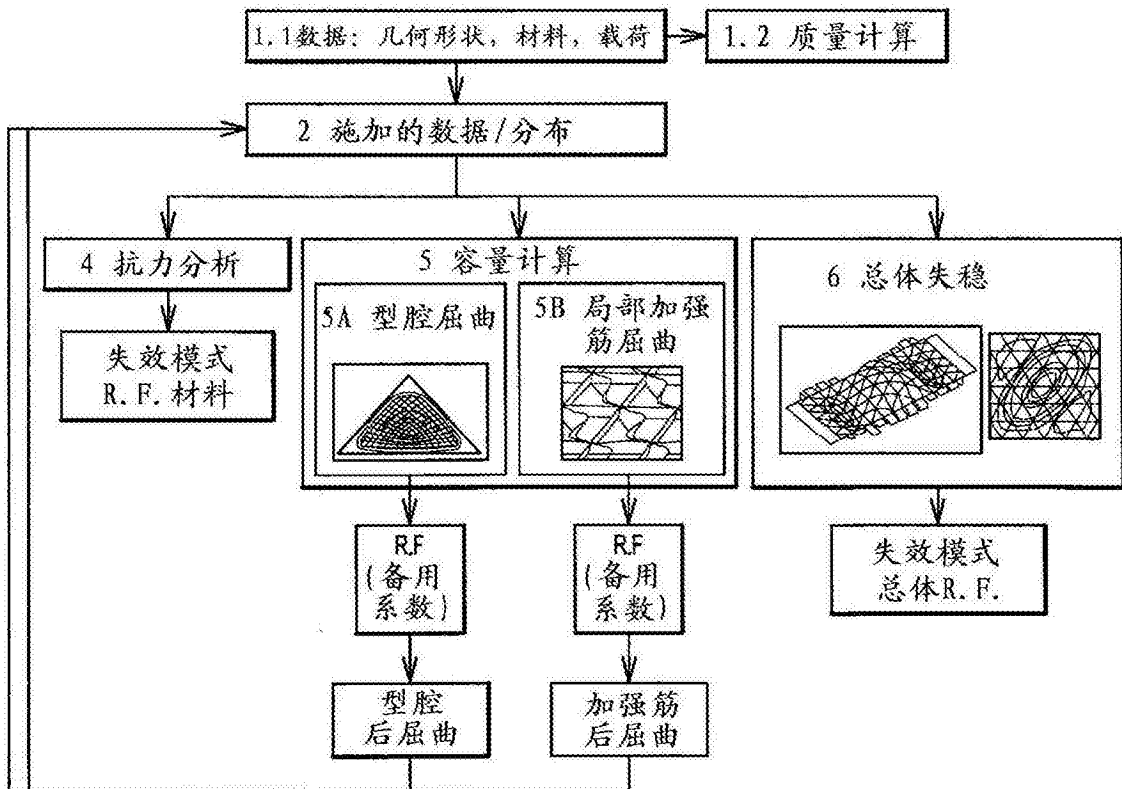


图7

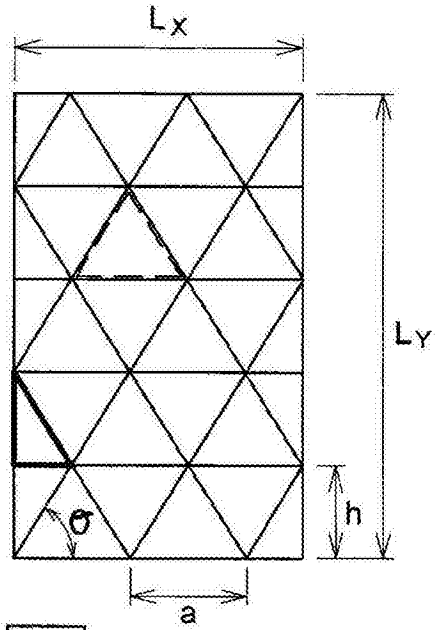


图8

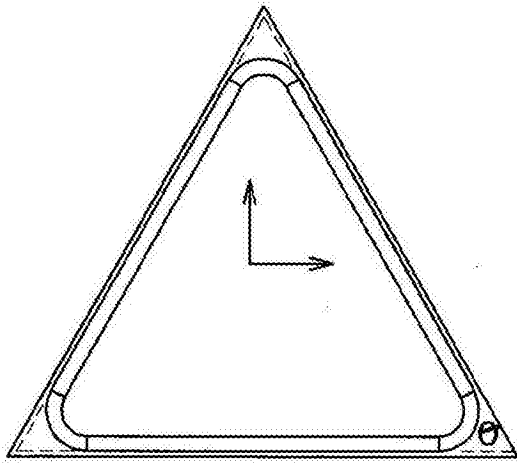


图9

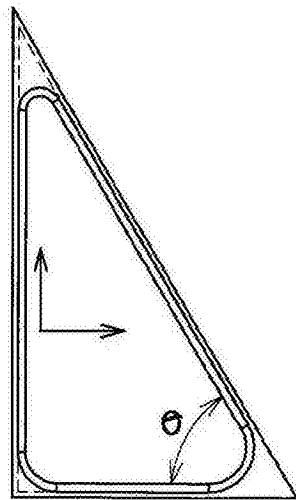
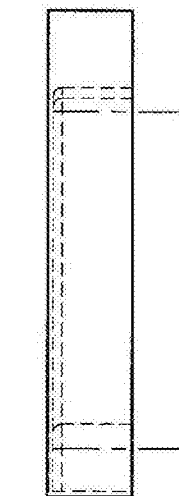


图10



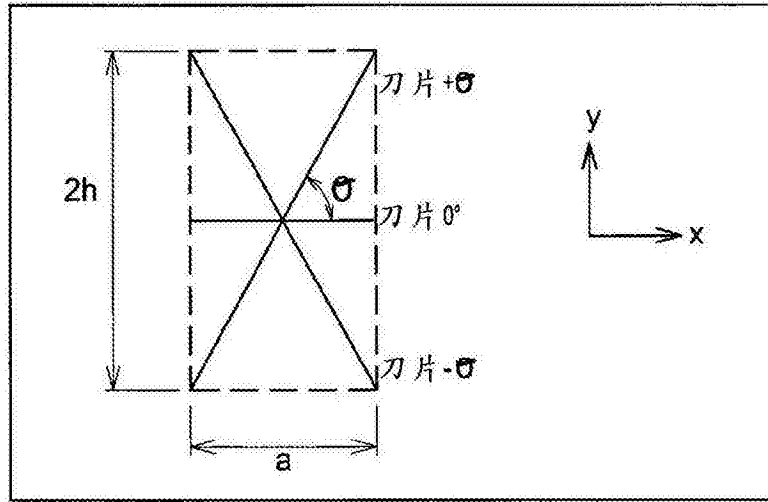


图11

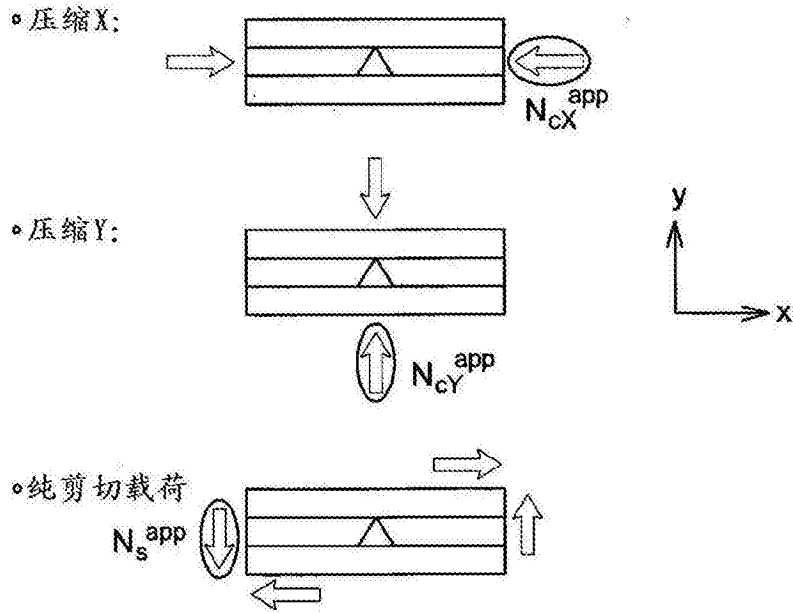


图12

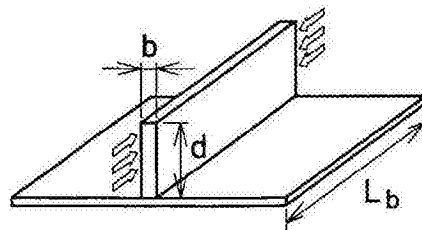
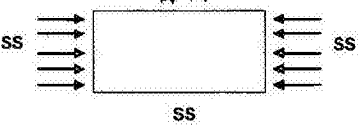
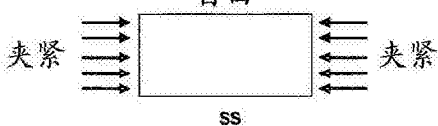

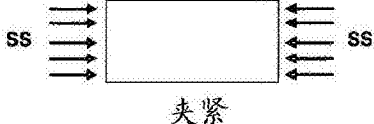


图13

	边界条件	公式 $k_c$	Lim	$k_{c\infty}$
1	保守的边界条件 自由 	$k_c = \left(\frac{d}{L_b}\right)^2 + 0.43$	$\infty$	0.43
2	"刚性的"周边刀片 自由 	$k_c = 4.143 \cdot \left(\frac{d}{L_b}\right)^2 + 0.384$	9.49	0.43
3	"刚性的"面板和周边刀片 自由 	$k_c = 0.007 \cdot \left(\frac{L_b}{d}\right)^2 + 3.923 \cdot \left(\frac{d}{L_b}\right)^2 + 0.94$	4.34	1.28
4	"刚性面板" 自由 	$k_c = 0.136 \cdot \left(\frac{L_b}{d}\right)^2 + 0.987 \cdot \left(\frac{d}{L_b}\right)^2 + 0.551$	1.64	1.28

如果  $\frac{L_b}{d} > \text{Lim}$  则  $K_c = K_{c\infty}$

图14

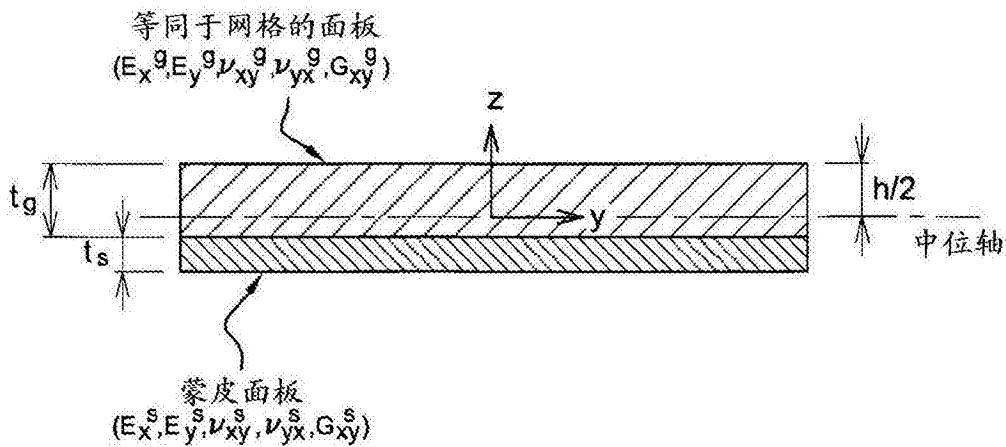


图15

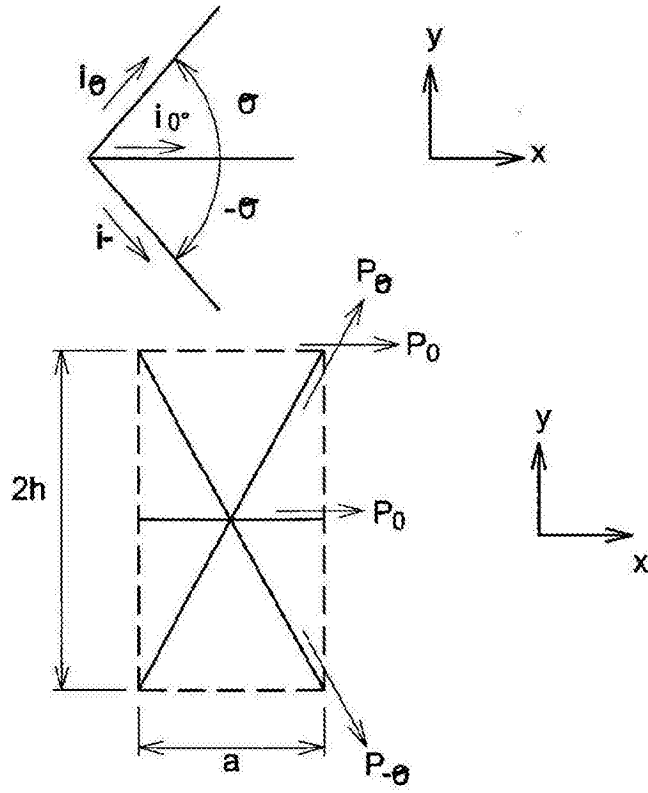


图16

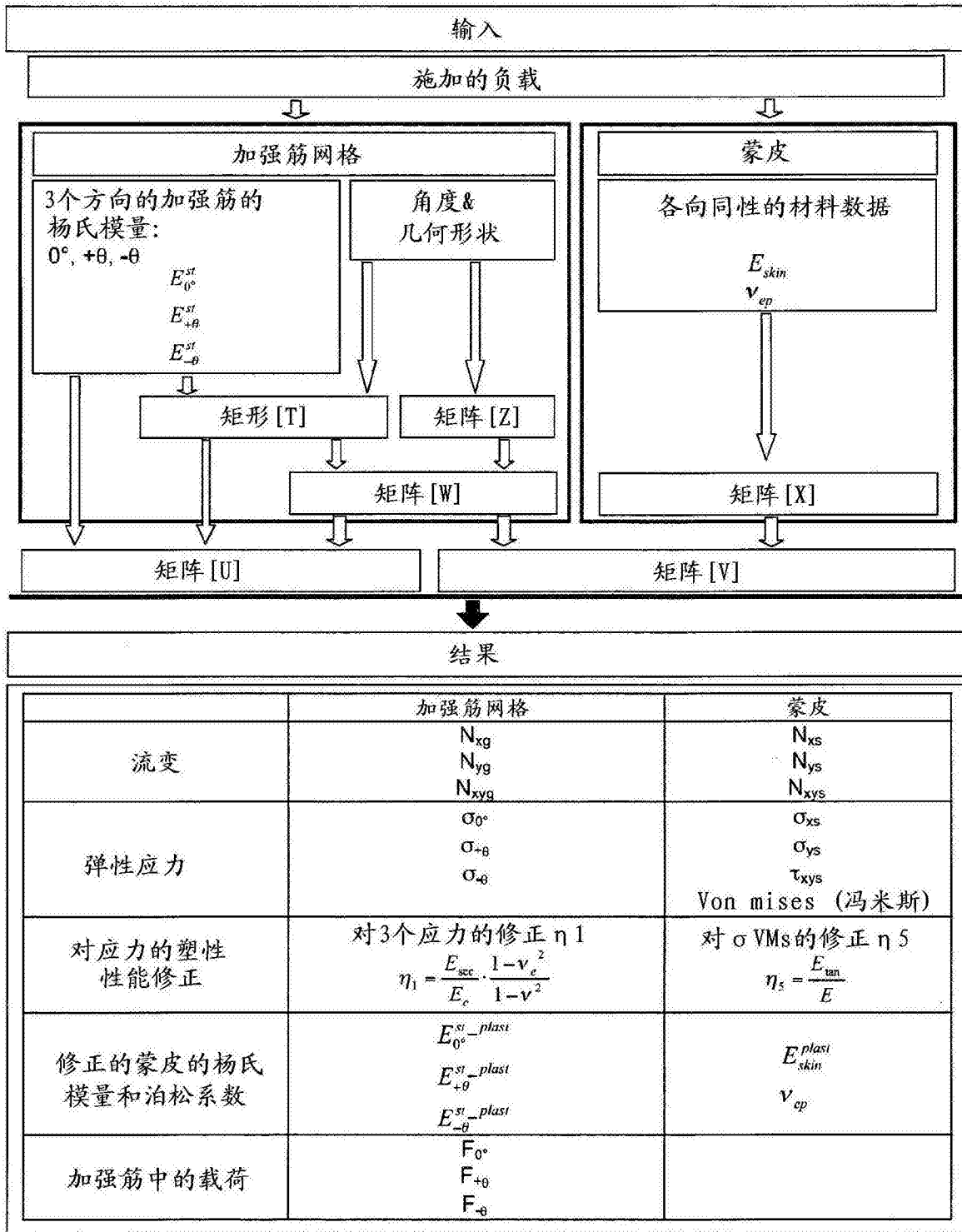


图17



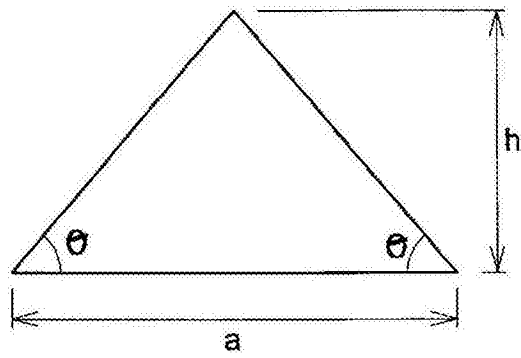


图18

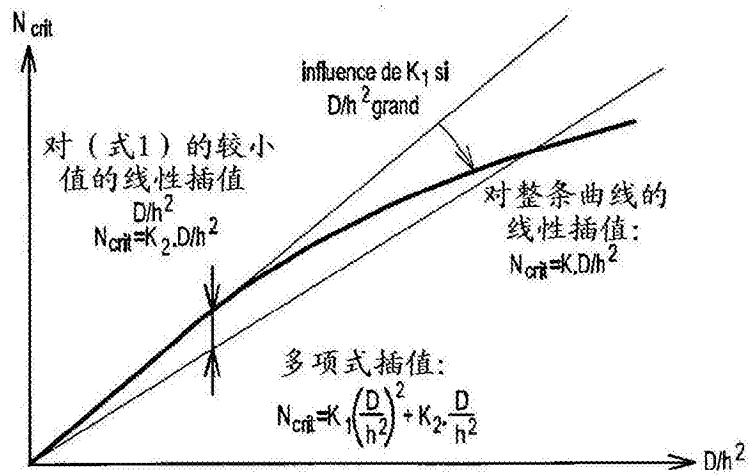


图19

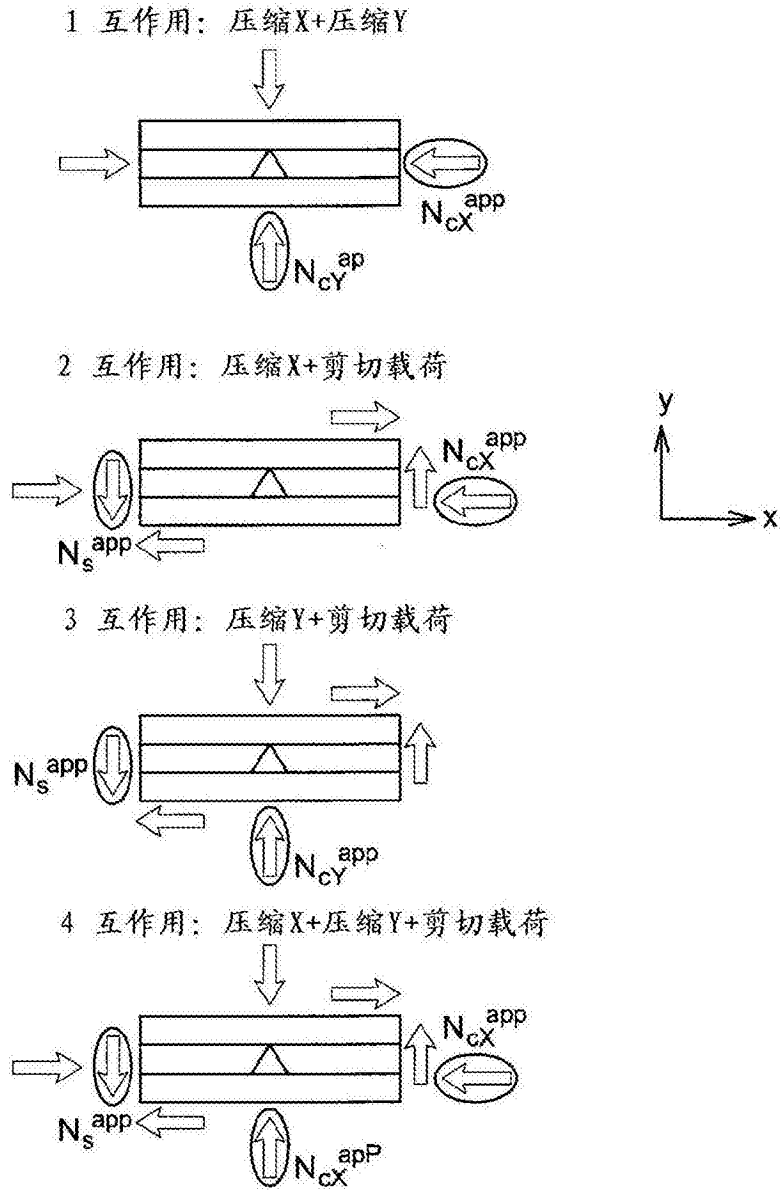


图20

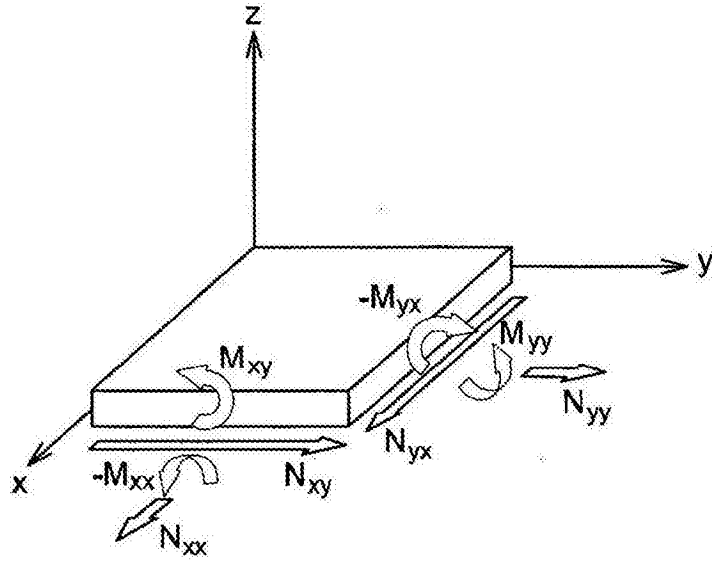


图21

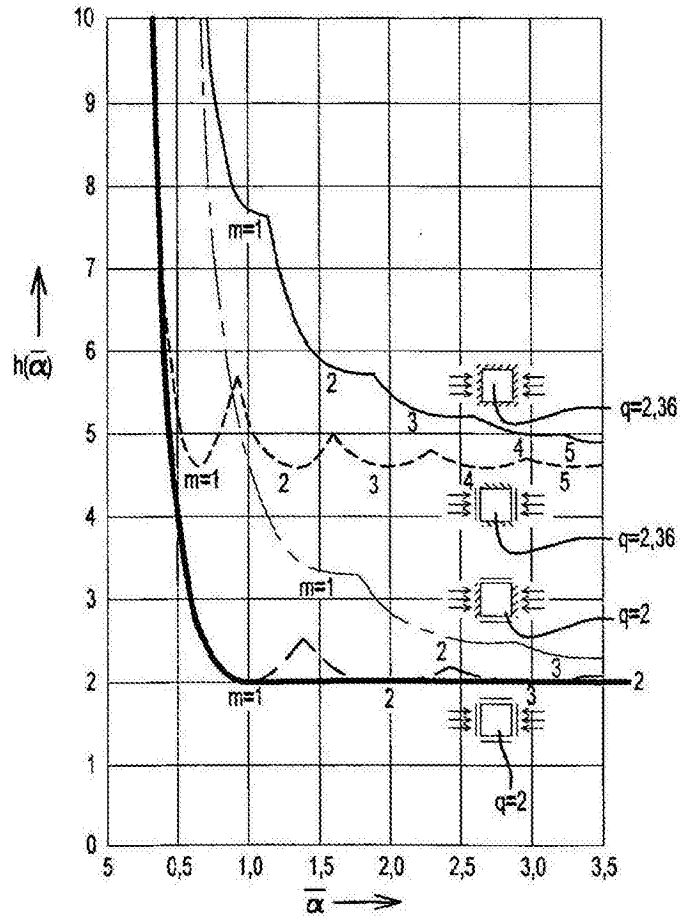


图22

$k_s$		$\beta$															
		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
$\bar{\alpha}$	0.0	3.3	3.8	4.2	4.6	5.0	5.4	5.7	6.1	6.4	6.7	7.0	7.3	7.6	7.9	8.2	8.5
	0.1	3.3	3.8	4.2	4.6	5.0	5.4	5.8	6.1	6.4	6.8	7.1	7.4	7.7	8.0	8.3	8.6
	0.2	3.4	3.9	4.3	4.7	5.2	5.6	5.9	6.3	6.6	7.0	7.3	7.6	8.0	8.3	8.6	8.9
	0.3	3.5	4.0	4.4	4.9	5.4	5.8	6.2	6.6	6.9	7.3	7.7	8.0	8.4	8.8	9.1	9.4
	0.4	3.6	4.1	4.6	5.1	5.6	6.0	6.5	7.0	7.4	7.8	8.2	8.6	9.0	9.4	9.8	10.1
	0.5	3.7	4.3	4.9	5.5	6.0	6.5	7.0	7.4	7.8	8.3	8.8	9.2	9.6	10.0	10.5	10.9
	0.6	4.2	4.7	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8	8.4	8.9	9.4	9.9	10.4	11.0	11.5	12.0
	0.7	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	9.7	10.3	10.8	11.4	12.0	12.6	13.2
	0.8	4.2	4.9	5.7	6.4	7.1	7.8	8.5	9.2	9.9	10.6	11.2	11.9	12.6	13.3	14.0	14.6
	0.9	4.4	5.2	6.1	6.8	7.7	8.5	9.2	10.0	10.8	11.6	12.4	13.2	13.9	14.7	15.5	16.2
	1.0	4.8	5.8	6.6	7.6	8.4	9.3	10.2	11.0	12.0	12.8	13.6	14.5	15.4	16.2	17.1	17.9

图24

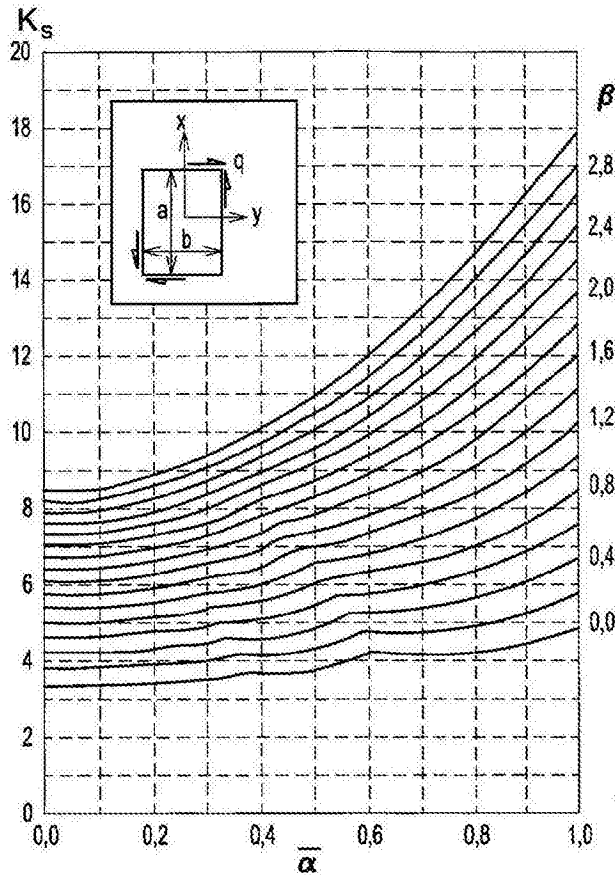


图23

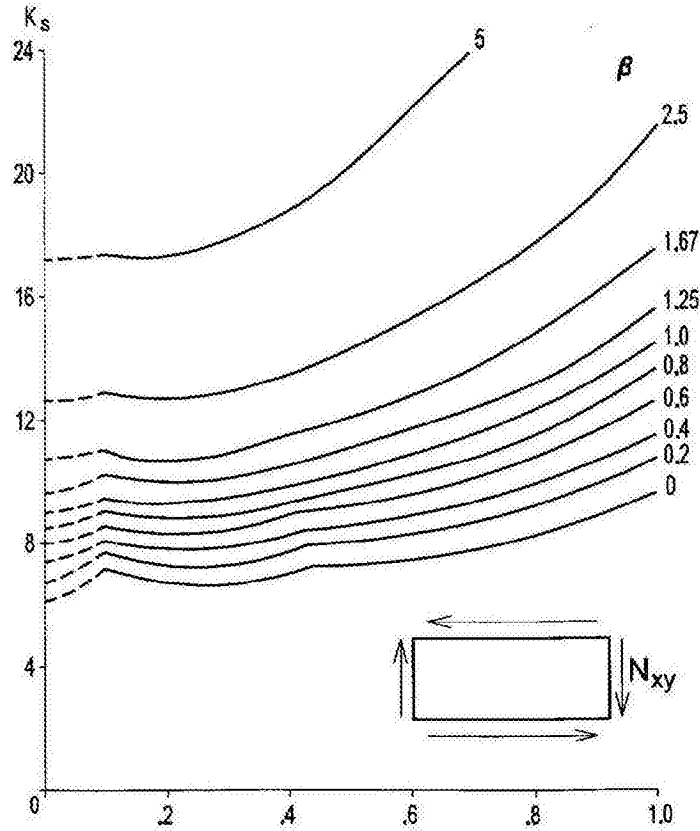


图25

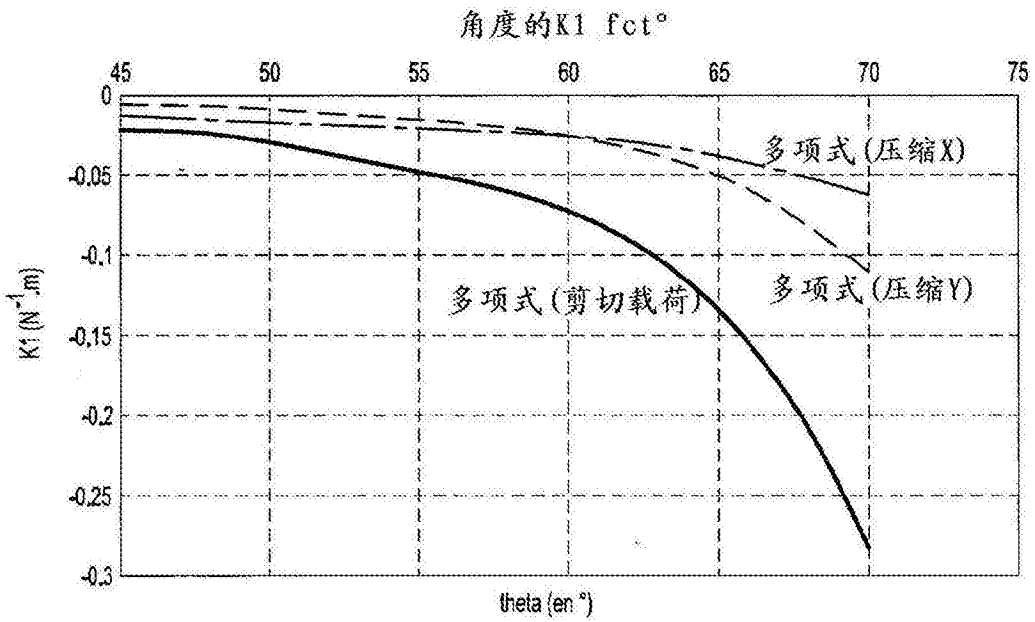


图26

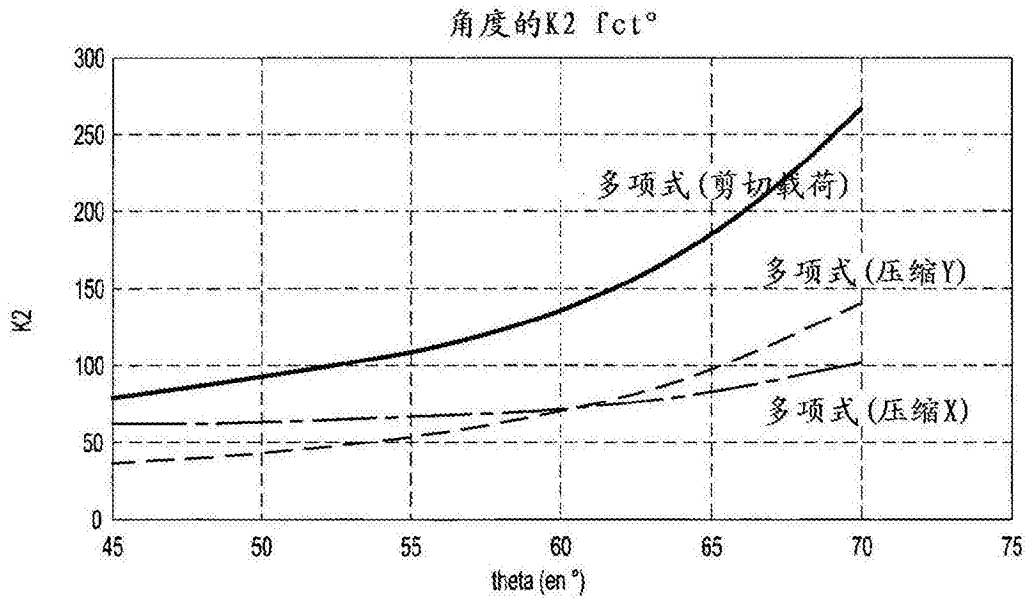


图27

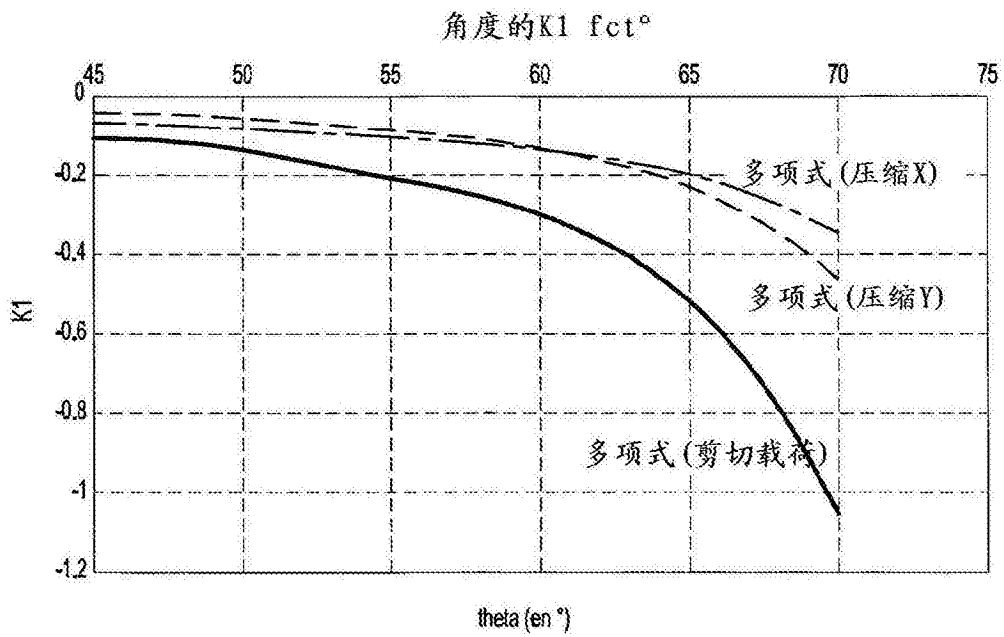


图28

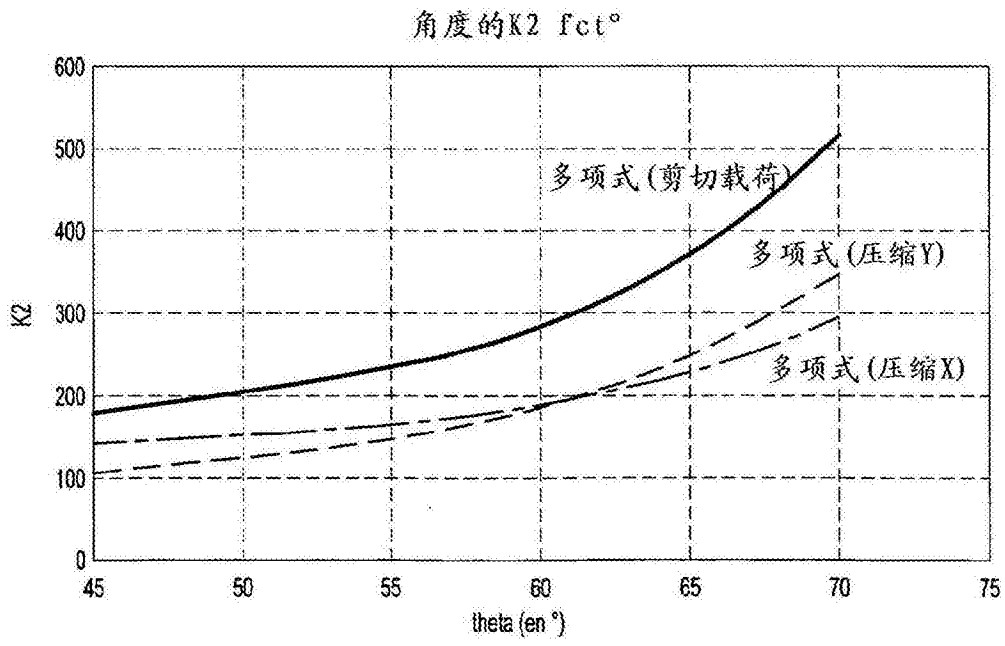


图29