

结构稳定性手册

第二部分

组合元件的皱损

国防工业出版社

内 容 简 介

本手册第二部分“组合元件的皱损”，评述了加劲条剖面的局部皱损与带强加劲条的板的皱损，结果用图表表示。给出了各种形状的纵向受压加劲条剖面、纵向受压及受剪加劲板以及受扭加劲筒的皱损系数值。虽然所给值主要是弹性皱损系数，但对某些特殊情况，也讨论了塑性的影响。

本手册可供飞行器设计、科研人员参考，对船舶、土建等方面有关人员亦有助益。

[美] NACA TN 3782

Handbook of Structural Stability

Part I - Buckling of Composite Elements

Herbert Becker

1957

*

结构稳定性手册

第二部分

组合元件的皱损

(只限国内发行)

卫 星 译 校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可登记证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 2 39千字

1972年12月第一版 1972年12月第一次印刷

统一书号：15034·1286 定价：0.19 元

毛主席语录

古为今用，洋为中用。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

外国有的，我们也要有，外国没有的，我们也要有。

中国人民有志气、有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

结构稳定性手册

第二部分

组合元件的皱损

卫星译校

国防工业出版社

1972

内 容 简 介

本手册第二部分“组合元件的皱损”，评述了加劲条剖面的局部皱损与带强加劲条的板的皱损，结果用图表表示。给出了各种形状的纵向受压加劲条剖面、纵向受压及受剪加劲板以及受扭加劲筒的皱损系数值。虽然所给值主要是弹性皱损系数，但对某些特殊情况，也讨论了塑性的影响。

本手册可供飞行器设计、科研人员参考，对船舶、土建等方面有关人员亦有助益。

〔美〕NACA TN 3782

Handbook of Structural Stability

Part I—Buckling of Composite Elements

Herbert Becker

1957

*

结构稳定性手册

第 二 部 分

组合元件的皱损

(只限国内发行)

卫 星 译 校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 2 39千字

1972年12月第一版 1972年12月第一次印刷

统一书号：15034·1286 定价：0.19 元

出版说明

遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译出版了“结构稳定性手册”，供从事飞行器设计、科研人员参考。

该手册对飞机结构的皱损破坏问题作了较为详尽的论述。对平板、曲板、筒体以及各种组合元件，在承受轴压、内压、外压、扭转、弯曲和剪切等各种载荷及各种组合载荷下的稳定问题均有叙述，并涉及了塑性问题，对理论和试验都给予了足够的重视。共分七个分册出版。

本手册译自（美）全国航空谘询委员会〔现在为全国航空和宇宙航行局〕，我们对手册内一些繁琐之处做了删改，但书内也还有吹嘘、片面之处，望读者遵照毛主席“排泄其糟粕，吸收其精华”的教导，批判的去阅读参考。

目 录

引言	5
符号	8
加强元件的局部皱损	10
加劲条的特性	10
皱损应力的计算	11
皱损应力的数值	13
塑性影响	13
纵向受压加劲板的皱损	15
一般情况	15
纵向受压加劲板的特性	15
皱损应力的计算	16
皱损应力的数值	16
塑性影响	19
加劲条扭转刚度的影响	19
受剪加劲板的皱损	21
受剪加劲板的特性	21
皱损应力的计算	22
皱损应力的数值	22
塑性影响	24
应用	25
参考文献	26
表1~3	29
图1~23	32

引 言

在本手册的第一、三部分讨论了简单板元件的皱损特性^[1,2]。结构元件通常由两个或更多的简单板元件组成，这些简单板元件排列得能使每一元件的皱损应力由于与其连接的相邻元件所提供的支持而提高。这种组合元件叫做加劲条，因为它常常被用来加强板，以提高其皱损应力。如果一个结实的加劲条不发生局部皱损，因而在特定的载荷下只有它的轴向刚度、弯曲刚度以及扭转刚度才影响板-加劲条组合件的性能，那么这样的加劲条就称作“强加劲条”。本报告中所给出的有关加劲板皱损的数据都是对强加劲条而言的。

本报告从讨论加强元件的局部皱损应力的计算开始。对常用的加劲条的剖面形状，如Z形、槽形与帽形剖面，均作了皱损分析，并给出了便于计算皱损应力的曲线。对于发生弹性皱损的剖面，可能在比皱损值大得多的载荷下才发生破坏。加强元件的破坏，或者局部失稳破坏，在文献〔3〕中进行讨论。

当加劲条强于它所加劲的板时，它对板主要起一个弹性约束作用。它可以像机翼蒙皮上的桁条那样，参加受载；或者像横向肋骨那样主要起支持作用。无论对于那种情况，在计算加劲板的皱损应力时，只须考虑加劲条的轴向、弯曲以及扭转弹性特性。这样，组合件的皱损，既可能在板中局部地发生，也可能是包括板与加劲条的总体失稳。有关单轴向

载荷作用下加劲板皱损的问题载于“纵向受压加劲板的皱损”一节中，而关于剪切载荷作用下的皱损问题，载于“受剪加劲板的皱损”一节中。

加劲曲板的皱损除了包括影响加劲平板皱损的全部参数之外，还包括有板的曲率的影响。无加劲曲板的皱损已在文献〔2〕中作了讨论。文中表明，在剪切载荷作用下，理论与试验数据符合良好；而在轴压载荷下一致性较差。在某些尺寸下，曲板的特性接近于圆筒，这就使得在极限情况可估计无加劲曲板。有关受轴压加劲曲板的分析，载于“纵向受压加劲板的皱损”一节中；而在剪切载荷作用下的加劲曲板的分析，载于“受剪加劲板的皱损”一节中。在后一节中，还讨论了加劲圆筒扭转皱损的极限情况，并把其理论结果和试验数据与受剪加劲曲板的数据作了比较。

加劲条或加劲板的皱损应力，可按如下的一般关系式求得：

$$\sigma_{cr} = \frac{k_b \pi^2 E}{12(1 - \nu_e^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (1)$$

其中 b 是一般的尺寸，它可以是角材凸缘的宽度，槽形件腹板的高度，或矩形管某一边的宽度。皱损系数 k_b 是在方程 (1) 中与上述尺寸一起使用的系数。

k_b 值取决于下述参数：板的 $\frac{a}{b}$ 或 $\frac{\lambda}{b}$ ；不承载边的弹性旋转约束量 ε ；加劲条的剖面面积与板的面积之比 $\frac{A}{bt}$ ；加劲条弯曲刚度与板的弯曲刚度之比 $\frac{EI}{bD}$ 以及曲板的曲率参数 Z_b 。在以后几节中将要讨论的曲线，都把 k_b 表示成这些参数的函数。

文献〔1〕概括了材料性能对简单元件皱损的影响，其中给出并讨论了应力-应变曲线，泊桑比、包层折合系数以及塑性折合系数。文献〔2〕讨论了曲板与壳的塑性折合系数。为了方便起见，将其中有关的部分扼要地载述于“应用”一节与表1至表3中。

符 号

- A 加劲条的剖面面积, 吋²
- a 纵向受压板和简单元件的不承载边的长度, 或受剪板长边的长度[●], 吋
- b 纵向受压板和简单元件的承载边的长度或受剪板短边的长度[●], 吋
- D 每吋宽度的板的弯曲刚度, $\frac{Et^3}{12(1-\nu_p^2)}$, 吋·磅
- d 带圆头凸缘的圆头部分的宽度
- E, E_r, E_t 分别为杨氏模数, 割线模数, 切线模数, 磅/吋²
- G 剪切模数, 磅/吋²
- h 矩形管加劲条的宽度 (见图 5(c))
- I 加劲条剖面的抗弯惯性矩, 吋⁴
- J 加劲条剖面的抗扭惯性矩, 吋⁴
- k 皱损系数
- k_b 与宽度为 b 的元件的皱损应力相应的加劲条广义皱损系数
- k_c, k_s 分别为压缩皱损系数和剪切皱损系数
- L 圆筒的长度, 吋
- M 作用于有旋转约束的元件边缘的力矩, 吋·磅

● 符号 a 和 b 表示加劲板上加劲条之间的尺寸, 或无加劲板两平行边之间的距离。因此, 除受剪加劲曲板外, 皱损应力都是对加劲板的单个元件而不是按板的整个尺寸来计算的。但在受剪加劲曲板的情况下, 为了便于与圆筒的数据作比较, 把 a 和 b 作为整个板的尺寸更为合适。

- n 总宽度为 nb 的板上纵向加劲条的数目, 或长度为 L 的圆筒上框的数目
 q 纵向受压的纵向加劲板上横向皱损波数
 R 曲板的曲率半径, 吋
 r 在板的一边具有加劲条时的修正量
 S 板的刚度 (各种不同的 S 值见图 2)
 t 厚度, 吋
 Z_b 板的曲率参数, $\frac{b^2}{Rt}(1-\nu_e^2)^{1/2}$
 Z_L 圆筒的曲率参数, $\frac{L^2}{Rt}(1-\nu_e^2)^{1/2}$
 Z_{nq} r 中取决于 n 与 q 的因数 (见图 12)
 $\bar{z}$ 加劲条形心至板中面的距离, 吋
 ϵ 板的弹性约束刚度与扭转刚度之比; 也表示应变
 η 塑性折合系数
 θ 简单元件的边的转角, 弧度
 λ 简单元件或板的皱损波长, 吋
 ν_e 弹性范围内的泊桑比
 σ_{cr} 广义皱损应力, 也表示受压元件的皱损应力, 磅/吋²
 τ_{cr} 受剪元件的皱损应力, 磅/吋²

注脚

- cr 皱损
 e 有效的
 f 凸缘
 L 弯边
 T 帽形剖面加劲条的上腹板
 w 腹板

加强元件的局部皱损

加劲条的特性

当纵向受载的板在加载方向有加劲条的支持时，加劲条参加承载。其结果，这一组合件可能发生的皱损形式为：板单独地局部失稳；加劲条的单个或几个简单元件的局部皱损；包括加劲条柱作用在内的板的总体失稳；或这些皱损形式的某一组合。对于加劲板的分析只适用于强加劲条，因此，在本文后面几节所讨论的那些情况中，将不包括上述第二种皱损形式。但是，为了保证加劲条的强度，首先必须确定它的局部皱损应力。这就是本节所要讨论的问题。在本节中给出了分析加劲条局部皱损的背景和一些用来迅速计算几种常用型材局部皱损应力的曲线。

加劲条的局部皱损应力和其最弱元件的皱损应力相同。因之，必须对加劲条的每一个简单元件进行纵向载荷下的皱损分析。一般最弱的元件是比较容易检验出来的。对元件的分析包括：确定沿边缘的支持与旋转约束特性，然后把该元件当作在相应边界条件下承受纵向载荷的简单板来计算其皱损应力。

然而，沿纵向连接线相接的所有构件，通常在纵向接头处有互相约束的作用。如果这种约束可以直接转换成所分析的简单元件的旋转约束量 ε 的值，则可用文献〔1、2〕中的

皱损系数曲线来求简单元件的皱损应力，从而求得加劲条的皱损应力。但是，由于每对元件之间所保持的隅角 ($\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_n$) 而引起的每一连接线上诸简单元件之间的相互旋转作用，因而每个元件加在其他元件上的约束是不能直接求得的。必须把这个问题当作在一个静不定系统中分布各构件之间力矩的问题来分析。这样作了之后， ε 就可以求得， σ_{cr} 就能够算出。

虽然隅角可以不是 90° ，但大体上一个元件在它自己平面内的刚度，足以支持垂直于其本身平面的诸相邻元件。加劲条的大部分简单元件就有这样的性能。弯边或圆头要对凸缘提供一个完全的横向支持显得太弱。它们的作用像柱一样，倾向于对否则是凸缘自由边的横向变形起弹性约束作用。因而，不能用分析皱损的互相影响问题所常用的方法进行分析。然而，在自由边上具有弯边或圆头的凸缘，可以作为加劲板进行分析，以决定这一组合件的刚度，随后就可以用这个刚度作互相影响的分析。

皱损应力的计算

加劲条的每一简单元件的皱损应力，可由方程 (1) 求得。本文给出了几种常用加劲条剖面的 k_b 曲线，并在下面“皱损应力的数值”一节中进行讨论。绘制这些曲线以及求得新加劲条剖面皱损应力的一般方法，是一个逐次近似方法，例如伦德魁斯特，斯托埃耳和什丘特的力矩分布法⁽⁴⁾，或克罗耳 (Kroll)，费希尔 (Fisher) 和黑默的逐次近似法⁽⁶⁾ 等。

力矩分布法的基础是连接刚度准则，它要求在皱损发生

时，交会于一个连接线上的各简单元件刚度的总和必须为零。这是预示关于诸连接元件间的刚度分布，使得这些元件具有同样的纵向波长。皱损时连接刚度之所以消失，是因为刚度等于 M/θ 。由于在连接线上所有简单元件的 θ 都一样，所以刚度就与每个元件本身所承受的力矩成正比。然而，由于这些力矩在各元件发生小挠度皱损时必须消失，所以就产生连接刚度准则。

使用克罗耳对不承载边上不同边界条件^[8]，所准备的元件的刚度及携过系数曲线，就简化了力矩分布的分析。这在下一节“皱损应力的数值”中还将进行讨论。

实质上，计算简单元件皱损应力的逐次近似法包括任意选择一个皱损应力以及几个任意的皱损波长。对于每一个值，按方程（1）计算 σ_{cr} ，直至求得最小值。如果算得的值与起初假设的皱损应力值不符，则重复这一过程，直至假设的值与算出的值相同为止。这就是组合元件的皱损应力。

$k_c\left(\frac{\lambda}{b}, \varepsilon\right)$ 曲线应与克罗耳的刚度表^[6]一起使用（参见文献〔1〕）。

胡与麦卡洛克^[7]，古德曼与博伊德 (Boyd)^[8] 和古德曼^[9] 都研究过带有弯边或圆头的凸缘的皱损应力。他们考虑的弯边、圆头和凸缘的尺寸范围很大。热拉尔通过选用设计中经常遇到的几何尺寸使分析得到简化，并定出下述的剖面比例范围：在该范围内，当边缘加劲条的刚度增加时，元件就由凸缘转变为腹板^[10]。

罗伊 (Roy) 与什丘特用试验证明：即使相邻两元件之间的夹角小到 30° 或大到 120° ，剖面的局部皱损应力均不受影响^[11]。非 90° 角的主要影响是减小了剖面的惯性矩，从而

削弱了它的柱强度。

皱损应力的数值

使用图 1 所示的分解形式，就可以确定加劲条的皱损应力。按上节所讨论的方法求出皱损系数之后，就可以用方程 (1) 计算最弱元件的皱损应力值。图 2 中示出各种不同的刚度，克罗耳曾计算过这些值，并以表格的形式列于参考文献 [6] 中。

弯边或圆头的影响可从图 3 (a) 与 3 (b) 中获得，图中示出了热拉尔^[10] 所得到的曲线。皱损应变被表示成凸缘的 $\frac{b}{t}$ 与边上加劲条尺寸的函数，以便在作静不定分析时决定这一组合件的刚度。这样一来，这些曲线可以作为克罗耳刚度表的补充。

本报告给出了如图 4 所示的常用形状加劲条的皱损系数，图中表示出弯制和挤压成型的腹板和凸缘的尺寸。在图 5 中给出了槽形、Z 形、H 形以及矩形管等各种剖面的加劲条的皱损系数曲线。这些曲线取自克罗耳，费希尔和黑默的报告^[5]。图中的虚线确定凸缘与腹板同时发生皱损的剖面尺寸。在图 6 中给出帽形剖面加劲条的数据。这些曲线系采自凡·德·马斯 (Van Der Maas)^[12] 的曲线，它们包括了帽形剖面在各种不同宽度的中心腹板与侧面腹板情况下的一系列凸缘尺寸。应当指出，帽形剖面与带有弯边的 Z 形和槽形剖面在结构上是等效的。

塑性影响

加劲条的非弹性皱损应力，可以用诸如伦德魁斯特，斯

托埃耳和什丘特在处理弹性皱损问题时所用力矩分布法⁽⁴⁾进行计算。斯托埃耳与普赖德^[18]曾对H形剖面的加劲条做了这样的工作，并得到了与实验数据符合良好的结果（图7）。在使用力矩分布法计算皱损应力时，对剖面的每一个简单元件均使用了塑性折合系数。在这一过程中，连接刚度准则控制着剖面的理论皱损应力。

应当指出，在较大应变时的试验数据大约比应力-应变曲线低5%，而理论线最多低3%。这一分析似乎说明，对夹持凸缘使用塑性折合系数将是保守的，而对简支凸缘使用割线模数将是比较乐观的。