

基于热点应力法的焊接结构疲劳强度分析

吕松才

(特雷克斯(常州)机械有限公司 江苏 常州 213000)

摘要: 本文旨在说明热点应力法及其在焊接结构疲劳强度分析中的应用, 提供在设计及工程样机阶段尽可能确切地评估复杂焊接结构件疲劳强度寿命的参考。对热点应力法的定义、原理、表面外推获取方法、热点区域有限元的建模原则及合适的 S-N 疲劳曲线选用等内容进行详细介绍, 概括了热点应力法在机械焊接结构中的应用。并根据系统的方法介绍, 总结了在工程实际应用中热点应力法的分析步骤和流程。

关键词: 热点应力; 疲劳强度; 焊趾; 有限元法; S-N 曲线; 国际焊接协会 IIW

0 引言

焊接结构的焊接接头及部件细节的疲劳强度评定多采用名义应力法。但实际应用中焊接结构往往十分复杂无法明确其名义应力及位置, 现行的规范中也无对应的细节分类, 存在一定的局限性。

随着分析软件和硬件的发展, 热点应力法已在海洋工程结构、船舶工业、机械制造业等领域得到了广泛应用。热点应力考虑了由于宏观结构构造及几何外形不连续引起的应力集中, 不需要考虑焊缝自身切口效应引起的非线性应力峰值的影响, 也不考虑焊缝处的残余应力。热点应力的 S-N 疲劳曲线仅与热点处相应的应力值有关, 焊接结构细节形式不会影响评估结果, 对于不同连接方式的焊接接头的疲劳强度评定, 理论上只用一条 S-N 疲劳曲线即可完成评估, 而切口应力法和名义应力法在 S-N 曲线的选用上是比较复杂多样的。然而如何准确确定焊趾处热点应力的方法和由此方法确定的热点应力如何选择合适的 S-N 曲线两个问题, 尚在进一步研究

完善中。

1 热点应力法基本原理

1.1 热点应力和热点应力法定义

热点应力 (Hot Spot Stress) 通常是指结构件中危险截面上的危险点应力或者最大的结构应力。通常取焊趾处为焊接结构件的热点, 因为此部位往往是疲劳裂纹的起始点, 也易产生疲劳裂纹。

热点应力法是以获取的热点应力为基准并选取合适的 S-N 疲劳曲线进行结构疲劳试验或疲劳强度评定的方法。此方法适用于对裂纹始于焊趾处的疲劳破坏的强度分析, 如图 1 中 (a) ~ (d) 所示。它不适用于裂纹从焊缝根部开始并通过焊缝扩展的情况的疲劳分析。如图 1 中 (e) ~ (h) 所示。

1.2 热点类型

焊接板结构中, 热点一般可以根据焊缝焊趾的方向及所在主附板的位置分为两种类型。a 型热点位于焊趾根部处于板的表面, b 型热点位于焊趾根部处于板边缘

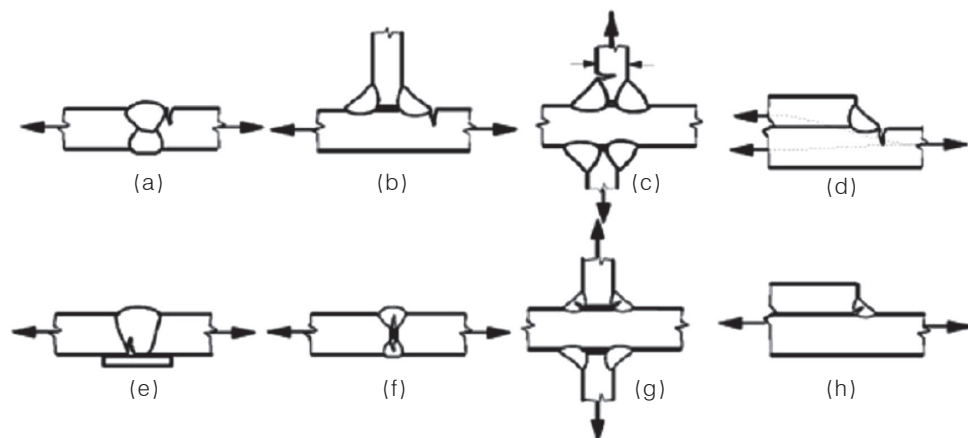


图 1 焊缝接头裂纹产生与扩展方式

的板厚平面上,如图2所示。

1.3 热点应力的组成

热点应力由膜应力和弯曲应力两部分组成。对于图2所示a型热点,结构应力 σ_{hs} 沿板厚的分布通常为膜应力 σ_m 与壳体弯曲应力 σ_b 之和,如图3所示。计算公式如式(1)。

$$(1) \begin{cases} \sigma_{hs} = \sigma_m + \sigma_b \\ \sigma_m = \frac{1}{t} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot dx \\ \sigma_b = \frac{6}{t^2} \cdot \int_{x=0}^{x=t} (\sigma(x) - \sigma_m) \cdot (\frac{t}{2} - x) \cdot dx \end{cases}$$

这些应力在板的焊缝处实际上是非线性分布的,在这里应力被理想化为如图3所示的线性。图4所示为焊趾处的切口效应所导致的沿板厚方向的非线性应力分布,局部切口应力 σ_{ln} 则由膜应力 σ_m 、弯曲应力 σ_b 和切口效应导致的非线性应力峰值 σ_{nl} 组成,其中非线性应力部分为热点应力和切口应力的区别。一般来说,热点应力只考虑了结构的宏观几何构造,排除了由于焊趾处焊缝几何形状不连续等缺陷产生的局部应力(σ_{nl})集中效应(切口效应)。根据实验结果,在热点应力S-N疲劳曲线中会考虑焊趾的切口效应。

2 热点应力外推法

由于热点位置不同产生的不同类型的热点,其外推方法也不一致。a型热点的应力分布与板厚相关,b型热点位于板厚边缘,裂纹将沿着边缘在板厚方向进行扩展形成单边穿透裂纹,热点应力分布状态与板厚不相关,所以推荐的外推参考点距焊趾的距离不是由板厚决定的。

热点的外推法一般采用两点表面线性外推和三点二次外推法,如图5所示。

图2中a型热点附近跨板厚的结构应力分布,在距离焊趾 $0.4t$ 处,非线性分量几乎消失,分布基本呈现线性,如图5所示,表面线性外推法获取热点应力正是利用这一原理。

a型热点应力:(1)国际焊接协会推荐在距离焊趾 $0.4t$ 和 $1.0t$ 处测量

或者计算提取应力,使用两点线性外推法获取热点应力,或者 $0.4t$ 、 $0.9t$ 和 $1.4t$,用三点二次外推法获取热点应力,由于这两种方法对有限元网格尺寸要求较高,需要相对精细的网格,在船舶的超大型结构件很少采用,在中小型的焊接结构中会用到;(2)船级社和国际焊接协会还推荐了在距离焊趾 $0.5t$ 和 $1.5t$ 处取点测量和计算应力进行两点外推。此方法对有限元网格的要求较宽松,一般采用 $t \times t$ 尺寸大小的网格即可。

b型热点应力:国际焊接协会推荐应用三点二次外推法,距离焊趾的参考点分别选取在 $4mm$ 、 $8mm$ 和 $12mm$ 处。

a型热点还有一种方法不需要外推,将参考点选取在距离焊趾 $0.5t$ 处,直接提取此参考点的应力作为热点应力。这种方法较简单。

有研究测试表明,对于受弯曲加载的热点应力,建议采用二次外推法,可以得到更合理的结果。一般采用 $0.4t/1.0t$ 参考点得出的热点应力高于采用 $0.5t/1.5t$ 时,

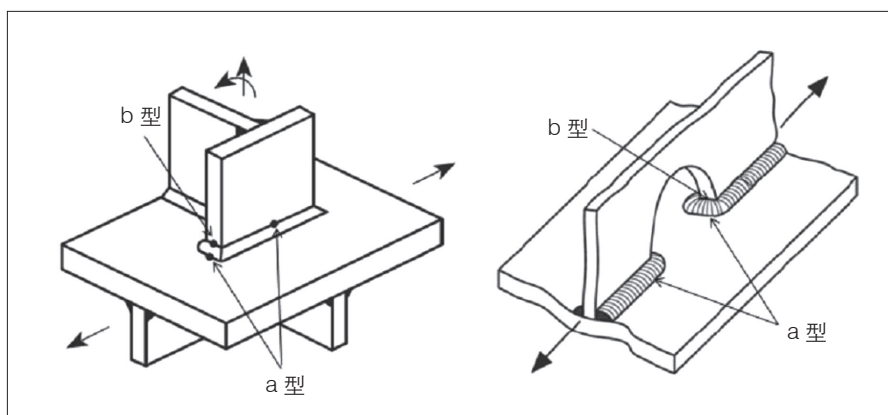


图2 焊趾热点类型

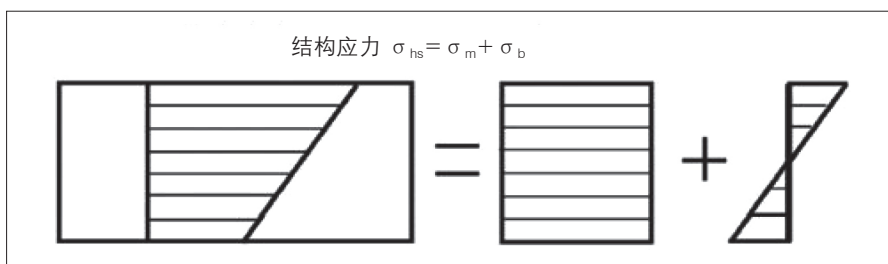


图3 结构应力包括膜应力和壳体弯曲应力

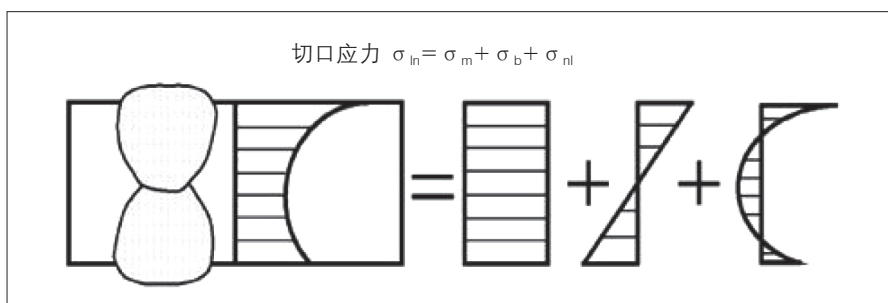


图4 切口应力包括膜应力、弯曲应力和非线性峰值应力

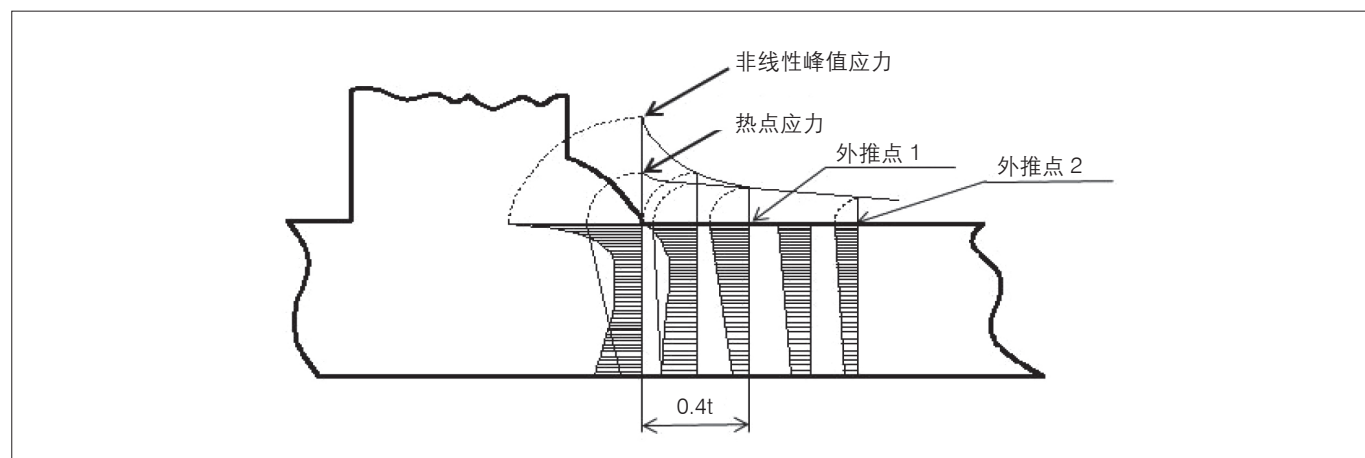


图 5 焊趾附近跨板厚的应力分布及表面线性外推示意图

但两者都稍高于 $0.5t$ 处直接提取应力方法所得到的热点应力。已有试验和研究表明对于外推方法不同导致的这种差异, 可通过选取低一级别的 S-N 疲劳曲线来补偿。

工程实际应用中, 通常热点参考点应力通过有限元计算——探针获取应力或者用应变片在工程样机上测量应变两种方法获取。当使用应变片测量应变的方法时, 应变片的数量一般取决于壳体的弯曲应力、板厚和结构应力类型。如果板厚太小, 导致应变片与焊缝干扰无法安装, 应变片的前沿应该放置在距离焊趾 $0.3t$ 的距离处。

通常在工程样机上应变片测量中, 这些外推点获得的结果与基于粗略网格的有限元分析相比, 较为保守。

3 热点应力外推计算有限元模型

3.1 板壳单元有限元模型

板壳模型如图 6 (a) 所示。单元分布于结构构件的中面上, 建议采用带中间节点的壳单元 (8 节点), 特别是在应力梯度陡峭的情况下。单元的大小通常取为焊趾处的板厚。除了连接可能导致局部高弯曲影响情况外, 一般不对焊缝进行建模, 当用外推法计算热点应力时, 建议外推热点到单元的交线上, 以避免由于缺少焊缝对刚度影响造成的应力低估。有时焊缝也可以由具有适当刚度的倾斜板壳单元代替, 如图 6 (b) 所示。

3.2 实体单元有限元模型

实体单元模型, 如图 7 (a) 所示。为了将焊趾附近局部几何外形和刚度模拟得更真实, 通常对角焊缝进行简单建模, 如图 7 (b) 所示建模通常简化为 45° 斜坡及无焊趾过渡半径。热点取实际建模的焊趾边缘位置。

为了能获取沿厚度方向的线性应力分布, 特别是在复杂的情况下, 建议选用带中间节点的六面体单元 (20 节点), 单元网格大小在热点附近区域取与板厚 t 一致, 板厚方向布置一层单元即可。不建议使用无中间节点六面体单元 (8 节点), 由于单元的刚度特性强, 如满足计算结果在板厚方向能够呈现线性的应力分布, 需在板厚

方向上至少划分 4 层网格单元。适当的单元宽度很重要, 特别是在有陡峭应力梯度的情况下, 垂直于外推方向的单元宽度不应超过两侧焊趾边缘的宽度。图 7 (a) 中 W 等于两侧焊脚的长度与附板的厚度之和。

热点应力计算中, 当主要的加载模式是面外弯曲加载时, 推荐使用实体单元而不是板壳单元。

3.3 热点应力的提取

挪威船级社提出, 对于壳单元模型, 可以直接使用中间节点在单元表面的应力运用上述的外推方法进行热点应力计算。如图 8 所示, 对于实体单元模型, 应力可以首先由高斯积分点外推到表面, 然后将这些应力线性插值到单元表面中心或者外推到单元的边沿, 用于外推到热点应力位置。

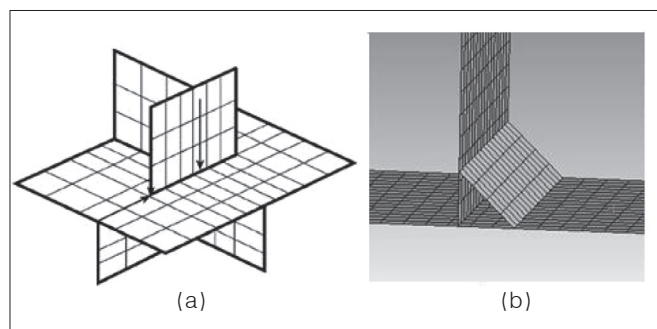


图 6 板壳单元模型

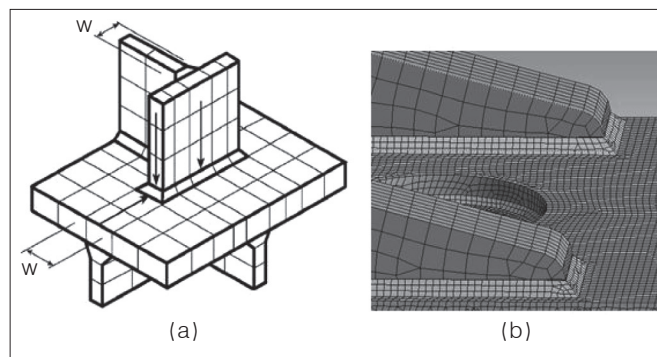


图 7 三维实体单元模型

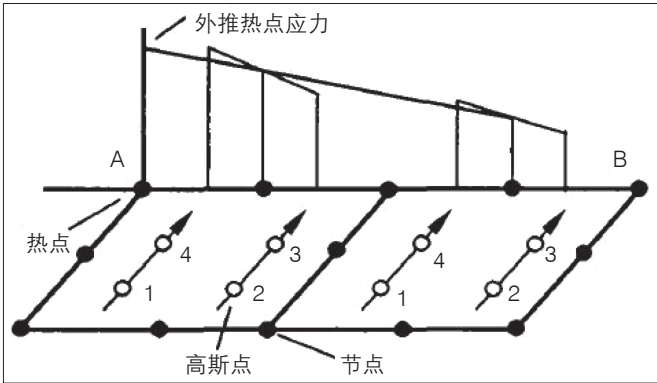


图 8 热点应力的获取

除了表面应力外推法之外，获取热点应力的方法还有厚度线性化法、Dong 法、Xiao 和 Yamada 提出的结构应力计算 1mm 法等。他们也都是基于图 5 所示焊缝部位应力沿板厚方向分布的特点，提出的能够可靠的获取热点应力的方法。

4 热点应力 S-N 曲线

在获取到结构热点应力之后，还需要使之与对应的热点应力 S-N 曲线匹配分析，才能用该方法对焊接结构接头的疲劳强度进行分析评定。

由于可以选用不同的方法获取及外推计算得到热点应力，从而同一结构所计算得的热点应力值也会存在一些差异，所以相对应的热点应力 S-N 曲线也会有所不同。各标准及文献中经过大量综合分析和试验对比后所推荐的热点应力 S-N 曲线具有分析评定参考意义。

对于基于热点应力法，选取的 S-N 曲线的参考疲劳强度，中船级社规定焊接接头参考疲劳强度为 80MPa。挪威船级社规定参考热点疲劳强度为 87MPa。对于非焊接结构，热点应力参考疲劳强度为 120MPa。

a 类型热点。当采用 0.4t/1.0t 外推法计算热点应力

时，推荐选择 FAT100 疲劳曲线。当采用 0.5t/1.5t 外推法计算热点应力时，建议热点应力的 S-N 疲劳曲线选用 FAT90。如果在距离焊趾 0.5t 处直接获取应力作为热点应力，由于应力值通常比较小，建议选用 S-N 曲线 FAT80 则更合适。

国际焊接学会 IIW 推荐了两条热点应力 S-N 疲劳曲线作为评定分析依据，并给出了 9 类焊板结构连接的结构细节作为参考，图 9 列出了几种典型的焊接结构细节。其中 1 ~ 4 参考 FAT100 疲劳曲线，5 ~ 6 参考 FAT90 疲劳曲线。图 10 为 FAT90 和 FAT100 热点应力 S-N 曲线。

5 基于热点应力法的焊缝疲劳分析步骤

5.1 分析确定典型工况

明确所评定产品机型或部件的实际运行工况，需选用典型的工况，能满足可以利用这些工况获取待评定焊缝热点位置的最大热点应力幅。

5.2 应力提取方法选取

(1) 创建有限元模型，根据以上方法描述对需要疲劳强度分析的焊缝部位进行详细化处理。通过有限元分析计算所选定的各典型工况。

(2) 如使用应变片测量获取热点应力的方法。则需要经过初步的分析计算，在工程样机上选出需进行疲劳强度分析的关键焊缝，标记热点及参考点。

5.3 获得热点应力

(1) 获取分析评定位置的热点应力参考点的实际应力值，运用上述提到的外推方法计算热点应力值（不同工况的热点应力值），根据各个工况所得的热点应力值计算最大应力幅值。

(2) 在参考点位置粘贴应变片。操作工程样机运行各典型工况，根据各测试结果使用外推法计算各热点应

序号	结构细节	焊接类型	FAT(Steel) 曲线	序号	结构细节	焊接类型	FAT(Steel) 曲线
1		对接焊缝 全熔透	100	4		焊接盖板 搭接接头	100
2		十字或T型接头 坡口全熔透	100	5		十字接头 角焊缝	90
3		角焊缝 纵向加强筋端部	100	6		搭接角焊缝 承载	90

图 9 结构细节分类 - 热点应力疲劳性能

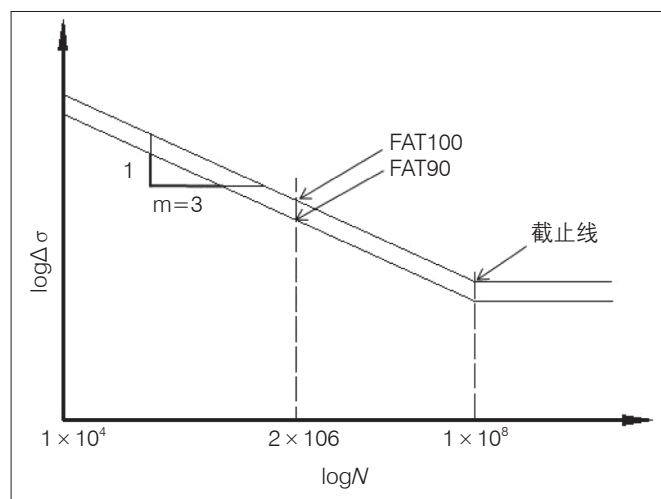


图 10 FAT90 和 FAT100 热点应力 S-N 曲线

力。综合分析获取最大应力幅值。

5.4 S-N 曲线选取

根据所选择的热点应力的提取计算方法,并明确评定位置的热点应力的 S-N 曲线(其中 S 为疲劳强度评定部位的热点应力幅)。

5.5 结语

将计算所得的待评估部位的最大热点应力幅与选定的热点应力 S-N 疲劳曲线进行比对。如果该最大的应力幅值小于热点应力 S-N 曲线的疲劳强度截止限,则该评估焊趾部位满足无限寿命的疲劳估算。

如果最大热点应力幅值高于疲劳强度截止限,则根据载荷应力谱应用 Miner 的线性累积损伤准则,并根据所选定的热点应力的 S-N 曲线计算可承受的应力循环次数。分析是否可以满足设计要求。

参考文献:

[1] Niemi E, Fricke W, Maddox SJ. Fatigue analysis of welded components: Designer's guide to the structural hot-spot stress

approach (IIW-1430-00) [R]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006: 5-13.

[2] A. Hobbacher. The document Recommendations for fatigue design of welded joints and components [J]. IIW-1539-96 / XV-854-96: 24-33.

[3] J M Lee, J K Seo e Co. 2010. Comparison of hot spot stress evaluation methods of welded structure [J]. 2010 (2): 200-210.

[4] 周张义, 李芾. 焊接构件疲劳强度评估的热点应力法的研究进展 [J]. 铁道学报, 2009(5): 90-96.

[5] 王亚飞, 徐海鹰. 热点应力法进行钢桥疲劳检算 [J]. 铁道工程学报, 2012(9): 49-52+58.

[6] 刘刚, 黄一, 陈景杰, 等. 焊接构件疲劳强度评估的热点应力法研究进展 [C] // 中国造船工程学会船舶力学学术委员会成立三十周年暨第七届学委会全体会议论文集. 2010: 380-391.

[7] Maddox SJ. Hot-spot stress design curves for fatigue assessment of welded structures [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2002: 134-141.

[8] EN 13001-1-3-1: 2012+A2: 2018. Cranes- General design, Limit states and proof competence of steel structure [S]. 2013: 38-39.

[9] BS7608: 2014+A1: 2015 Guide to fatigue design and assessment of steel products [S]. 2015: 90-104.

[10] Dong P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analyses [J]. International Journal of Fatigue, 2001: 865-876.

作者简介: 吕松才(1988.02-), 男, 汉族, 河北衡水人, 本科, 工程师, 研究方向: 工程机械设计大型结构件分析计算。