

ICS 93.040  
CCS P28

DB61

陕 西 省 地 方 标 准

DB 61/T 1996—2025

# 公路钢管混凝土桥梁节点设计规范

Specifications for Joint Design of Highway Concrete-Filled Steel Tube Bridges

2025-04-18 发布

2025-05-17 实施

陕西省市场监督管理

发布

## 目 次

前言 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 基本要求 .....	2
5 材料 .....	2
6 构造 .....	3
7 计算 .....	4
附录 A (规范性) 节点加强构造类型 .....	24
附录 B (规范性) 热点应力法疲劳验算 .....	29

## 前　　言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。  
本文件部分内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由陕西省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：长安大学、西安长安大学工程设计研究院有限公司、西安市市政设计研究院有限公司、中交第二公路工程局有限公司

本文件主要起草人：姜磊、刘永健、刘纯、许波、胡建荣、霰建平、马建勇、龙刚、程高、刘江、孟俊苗、朱伟庆、刘彬、时祎、崔磊、王昱琪。

本文件首次发布。

本文件由长安大学负责解释。

联系信息如下：

单位：长安大学

电话：029-82334577

地址：西安市碑林区南二环中段

邮编：710064

## 引　　言

钢管混凝土桥梁因其力学性能优异、经济性突出及施工便捷，广泛应用于拱桥、桁梁桥、桥塔等关键承重结构。节点作为结构传力核心，受焊接缺陷、应力集中及长期荷载作用影响，易引发疲劳开裂与局部损伤，成为桥梁安全与耐久性的薄弱环节。为系统解决节点设计难题，本规范基于二十余年科研成果与工程实践编制，旨在提升桥梁设计安全性与技术标准化水平。

本规程的先进性、系统性和地区适应性主要体现在以下几个方面：

- a) 首创 PBL 加劲型钢管混凝土节点，通过开孔钢板与混凝土协同受力，突破传统焊接节点局限性，提升刚度和疲劳性能（先进性 1）；
- b) 通过 T/Y/K 型节点静力与疲劳试验，揭示腹杆受拉/压/弯破坏模式及应力分布规律，提出承载力-刚度-疲劳综合计算方法，其中提出的钢管混凝土节点疲劳评估热点应力法，区别于现在国内外规范普遍采用的名义应力法，评估方法上具有一定的先进性，评估结果更为准确（先进性 2）；
- c) 规定对象包含圆形截面钢管节点、矩形截面钢管节点、圆形截面钢管混凝土节点和矩形截面钢管混凝土节点，以及 PBL 加劲型钢管混凝土节点，规定内容包含节点构造，刚度、承载力和疲劳计算，以及焊接要求，是针对钢管混凝土桥梁节点设计的专用规范（系统性）；
- d) 节点疲劳计算中首次引入陕西省疲劳荷载谱，相比于全国疲劳荷载谱，陕西省疲劳荷载谱更加贴合陕西省桥梁所承受的荷载，可更加精细化指导陕西省钢管混凝土桥梁节点设计（地区适应性）。
- e) 本规范可更好地指导钢管混凝土桥梁节点的设计，促进钢管混凝土结构在工程实践中的应用，有利于提升我省桥梁品质和耐久性，对促进我省公路建设转型升级、提质增效具有重要意义。

# 公路钢管混凝土桥梁节点设计规范

## 1 范围

本文件规定了公路钢管混凝土桥梁节点设计的基本规定、材料、构造、计算的要求。

本文件适用于公路钢管混凝土桥梁的节点设计。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 714 桥梁用结构钢
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 5313 厚度方向性能钢
- GB/T 6728 结构用冷弯空心型钢
- GB/T 8110 气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝
- GB/T 8162 结构用无缝钢管
- GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉
- GB/T 14957 熔化焊用钢丝
- GB/T 31387 活性粉末混凝土
- GB/T 41054 高性能混凝土技术条件
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- GB 50661 钢结构焊接规范
- GB 50923 钢管混凝土拱桥技术规范
- GB 50936 钢管混凝土结构技术规范
- JTG B01 公路工程技术标准
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG D64-01 公路钢混组合桥梁设计与施工规范
- JTG/TD 65-06 公路钢管混凝土拱桥设计规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准第一册土建工程
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- JG/T 472 钢纤维混凝土
- JGJ/T 178 补偿收缩混凝土应用技术规程
- JGJ/T 283 自密实混凝土应用技术规程
- JB/T 6061 无损检测焊缝磁粉检测

### 3 术语和定义

JTG/TD 65-06-2015界定的及下列术语和定义适用于本文。

#### 3.1

**钢管混凝土节点 Concrete-Filled steel tubular joints**

钢管混凝土桁架中弦杆和腹杆相贯焊接形成的节点。

#### 3.2

**应力集中系数 Stress concentration factor**

按弹性理论计算所得缺口或其他应力集中源处的局部最大应力与相应的名义应力的比值。

#### 3.3

**桥门架 Portal frame**

由两根立柱和顶部横梁刚性连接而成的承担桥梁上部结构竖向荷载和水平力的门式刚架结构

## 4 基本要求

4.1 节点设计应遵循安全可靠、适用耐久、经济合理、技术先进的要求。

4.2 管内混凝土未达到设计强度时，节点的变形、承载力和稳定性应按钢结构计算。

4.3 当节点偏心构造、传力性能、承载力或疲劳性能不满足要求时，应进行节点加强。

4.4 对首次采用的钢材、焊接材料、焊接方法、焊前预热方法、焊后热处理方法等，应在焊接性能试验和焊接工艺试验的基础上根据 GB 50205 和 GB 50661 的要求进行焊接工艺评定。

4.5 节点设计时应尽量减少现场焊接，且焊缝应避免交叉，以减少应力集中。

## 5 材料

### 5.1 钢材

5.1.1 钢材性能指标应满足 GB/T 700、GB/T 1591、GB/T 714 和 JTG D64 的要求。

5.1.2 圆形钢管宜采用卷制焊接直缝钢管、螺旋焊接管或无缝钢管，应满足 GB 8162 和 GB 9711 的规要求。

5.1.3 矩形钢管宜采用焊接直缝钢管或无缝钢管，应满足 GB/T 6728 的要求。

5.1.4 钢管结构中的无加劲直接焊接相贯节点，其管材的屈强比不应大于 0.8；与受拉构件焊接连接的钢管，当管壁厚度大于 40 mm 且沿厚度方向承受较大拉应力时，应采取措施防止层状撕裂，其材质应满足 GB/T 5313 的要求。

5.1.5 栓钉连接件应满足 GB/T 10433 的要求。

5.1.6 钢管混凝土节点中的钢构件，应根据所处大气环境和涂层体系保护年限，按 JT/T 722 的规定，进行防腐涂装。

### 5.2 焊接材料

5.2.1 手工焊接采用的焊条，应满足 GB/T 5117 或 GB/T 5118 的要求。

5.2.2 自动或半自动焊接采用的焊丝与焊剂应满足 GB/T 14957 的要求。

5.2.3 二氧化碳气体保护焊接用的焊丝，应满足 GB/T 8110 的要求。

### 5.3 混凝土

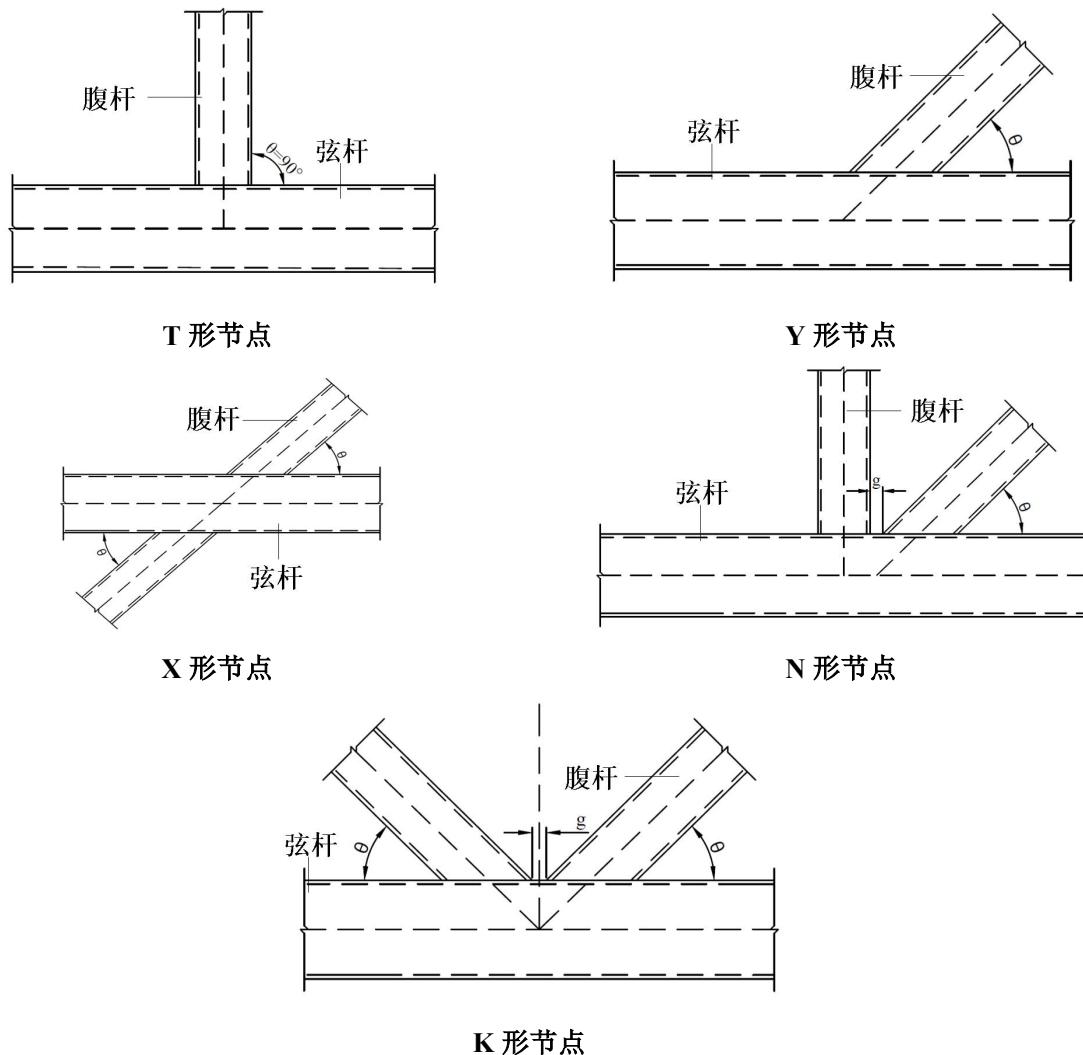
5.3.1 钢管内灌注的混凝土应采用自密实补偿收缩混凝土或超高性能混凝土，自密实补偿收缩混凝土强度等级宜为 C40~C80，性能应满足 JGJ/T 178 和 JGJ/T 283 的要求。

5.3.2 钢管与混凝土标号匹配宜满足下列要求：

- Q345、Q355 钢管，宜配不低于 C40 级的混凝土；
- Q390、Q420 钢管，宜配不低于 C50 级的混凝土；
- Q460 钢管，宜配不低于 C60 级的混凝土。

## 6 构造

钢管混凝土桥梁节点宜按照节点形状划分节点类型，包括 T、Y、X、N、K 形节点，节点类型见图 1。



注：θ为弦杆与腹杆之间夹角；g为两腹杆在弦杆表面的距离（mm）

图 1 节点类型

6.1 腹杆与弦杆宜采用相贯线直接焊接连接，腹杆不应插入弦杆。

- 6.2 圆形和矩形钢管混凝土节点均应采用全熔透焊缝，焊缝构造形式应满足 GB 50661 要求。
- 6.3 钢管宜避免在节点部位设置对接接头，对接接头应采用全熔透焊缝，管端坡口可采用图 2 所示形式。

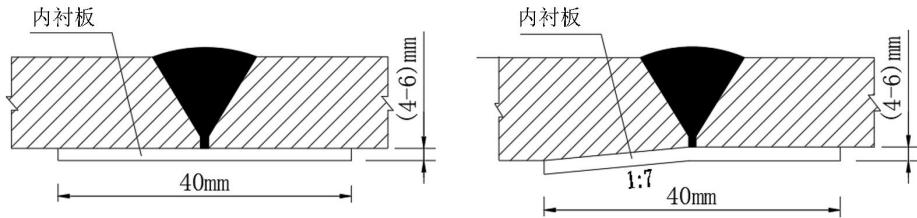


图 2 钢管对接接头坡口形式

- 6.4 对于矩形钢管混凝土等宽节点，宜采用图 3 中喇叭型坡口焊缝，应满足 GB 50017 的要求进行焊缝强度计算。

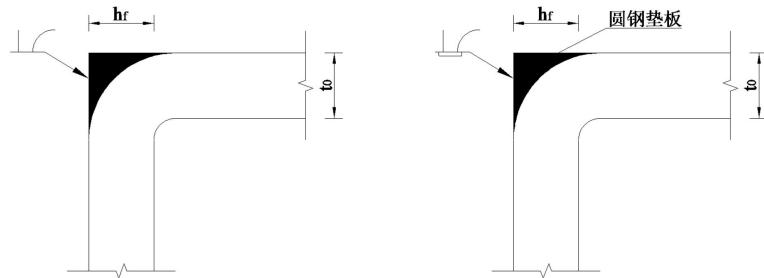


图 3 喇叭形坡口焊缝

- 6.5 钢管混凝土构件的钢管壁厚不宜小于 12 mm。
- 6.6 圆形钢管混凝土节点腹杆与弦杆直径比宜为 0.40~0.60，壁厚比宜为 0.55~1.00，弦杆径厚比不应大于 100，腹杆径厚比不应大于 50，腹杆与弦杆夹角应大于 30°。
- 6.7 矩形钢管混凝土节点腹杆与弦杆宽度比宜为 0.80~1.00，壁厚比宜为 0.50~1.00，弦杆宽厚比不应大于 70，腹杆宽厚比不应大于 40，弦杆或腹杆截面高宽比宜为 0.50~2.00，腹杆与弦杆夹角应大于 30°。
- 6.8 钢管混凝土 N、K 形节点应选用间隙节点，不应采用搭接节点。圆形钢管混凝土节点腹杆间隙  $g$  不应小于相邻两腹杆壁厚之和且不应小于 50 mm。矩形钢管混凝土节点腹杆间隙  $g$  应满足  $0.5[B-(b_1+b_2)/2] \leq g \leq 1.5[B-(b_1+b_2)/2]$ ，且  $g$  不应小于相邻两腹杆壁厚之和的要求。

注：B 为矩形钢管弦杆宽度（mm）； $b_1$  为矩形钢管受压腹杆宽度（mm）； $b_2$  为矩形钢管受拉腹杆宽度（mm）。

- 6.9 腹杆与弦杆的连接节点处宜避免偏心。偏心不可避免时，其值不宜超过  $-0.55 \leq e/D$ （或  $e/H \leq 0.25$ ）。
- 注：e 为节点偏心距离（mm），当腹杆交点在弦杆中心线下端时为正偏心，当腹杆交点在弦杆中心线上端时为负偏心；D 为圆形钢管弦杆直径（mm）；H 为矩形钢管弦杆高度（mm）。

- 6.10 当矩形钢管满足边长  $\geq 150\text{mm}$  或壁厚  $\geq 6\text{mm}$  时，应满足 GB/T 6728 要求，采用四块钢板焊接成形，并严格控制焊缝质量与尺寸精度，以满足工程安全性与耐久性要求。焊接后需校正截面尺寸，确保边长偏差  $\leq \pm 2\text{mm}$ ，对角线偏差  $\leq \pm 3\text{mm}$ ，直线度偏差  $\leq 1.5\text{mm}/\text{m}$ 。

- 6.11 节点加强构造应符合附录 A。

## 7 计算

## 7.1 一般要求

7.1.1 构造复杂的空间节点，应采用有限元法进行节点承载力性能分析。必要时，进行试验验证。

7.1.2 作为桥门架的主桁斜杆或竖杆处节点计算应符合下列要求：

- 桥门架为下端固定的框架；
- 应考虑桥门架在横向力作用下产生的轴向力和弯矩；
- 应考虑风力作用下桥门架斜腿产生的轴向力的水平分力，计入下弦杆。

## 7.2 节点刚度计算

7.2.1 钢管混凝土桁架的变形应根据线弹性理论的方法计算，应计入节点剪切变形，钢管混凝土桁架变形组成见图4。钢管混凝土桁架节点腹杆以承受轴力为主，相对于节点轴向刚度，节点转动刚度可忽略不计。

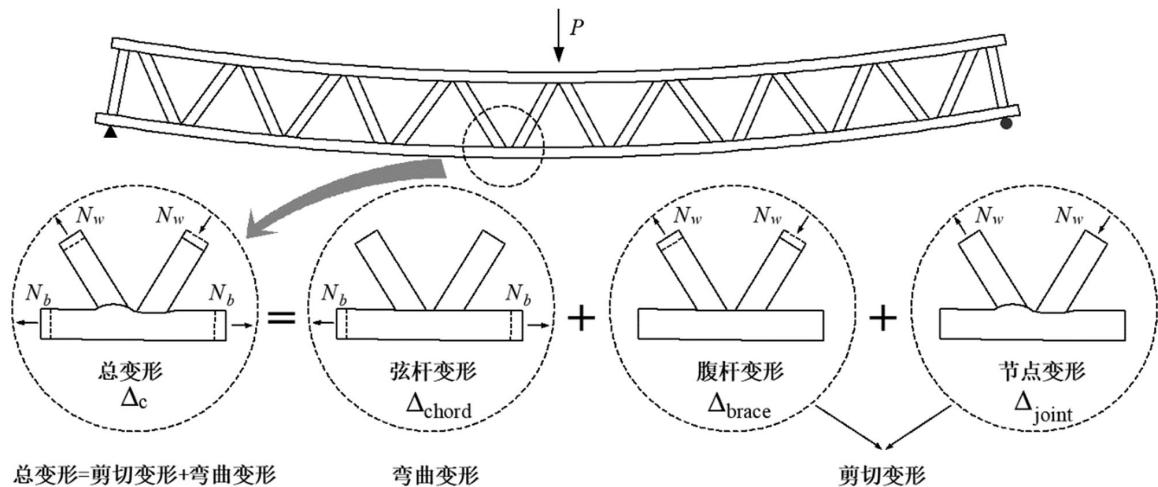


图4 钢管混凝土桁架变形组成

7.2.2 圆形钢管节点轴向刚度计算见式(1)：

$$K_J = \frac{0.256 E_s D}{\sin^2 \theta \cdot e^{[0.876 \beta + 0.035(\gamma - 0.5)]} \cdot (\gamma - 0.5)^{1.948 - 1.127 \beta}} \quad (1)$$

式中：

- |          |    |                                   |
|----------|----|-----------------------------------|
| $K_J$    | —— | 节点刚度 ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )； |
| $E_s$    | —— | 钢材弹性模量 ( $\text{MPa}$ )；          |
| $D$      | —— | 弦杆直径 ( $\text{mm}$ )              |
| $\theta$ | —— | 腹杆与弦杆夹角；                          |
| $\beta$  | —— | 腹杆与弦杆直径比值；                        |
| $\gamma$ | —— | 一半的弦杆直径与壁厚比值；                     |
| $e$      | —— | 节点偏心距离 ( $\text{mm}$ )。           |

7.2.3 圆形钢管混凝土节点轴向受压刚度应按刚性连接考虑，轴向受拉刚度应按式(1)计算，并乘以放大系数1.2。

7.2.4 矩形钢管节点和矩形钢管混凝土节点轴向刚度应按下表计算。

7.2.5

表 1 矩形钢管节点轴向刚度

节点类型		计算公式	
矩形钢管节点	T、Y形	$K_J = \begin{cases} \frac{E_s}{\sin^2 \theta \left[ \frac{(B-2T-b_1)^3}{4l_{eff} T^3} + \frac{H-T}{2b_{eff} T} \right]} & \beta < 0.5 \\ \frac{2E_s b_{eff} T}{\sin^2 \theta (H-T)} & \beta \geq 0.85 \end{cases}$	$l_{eff} = h_1(2-\beta) + 1.25B(1-\beta)$ $b_{eff} = 0.025 \left[ h_1(9\beta-1) + \frac{2.4B}{1.2-\beta} \right]$
	K形		$l_{eff} = \frac{(17.34+2\gamma)}{(59.15+107.35g/B)} \left[ (6.13-7.77\beta)B + (0.85-0.58\beta) \frac{h_1}{\sin \theta} \right]$ $b_{eff} = \frac{1}{(4.52+2.95)g/B} \left[ \frac{(69.25-2\gamma)}{(3.40+9.92\beta)} B + (-11.43+18.48\beta) \frac{h_1}{\sin \theta} \right]$

表 2 矩形钢管混凝土节点腹杆受拉轴向刚度

节点类型		计算公式	
矩形钢管混凝土节点 腹杆受拉	T、Y形	$K_J = \begin{cases} \frac{2E_s}{\sin^2 \theta \left[ \frac{(B-T-b_1)^3}{8l_{eff} T^3} + \frac{H-T}{b_{eff} T} \right]} & (\beta < 1) \\ \frac{2E_s b_{eff} T}{\sin^2 \theta (H-T)} & (\beta = 1) \end{cases}$	$l_{eff} = \frac{(46.89+2\gamma)}{100} \left[ (1.12-1.26\beta)B + 0.21 \frac{h_1}{\sin \theta} \right]$ $b_{eff} = \frac{(159.62-2\gamma)}{100} (0.06+0.35\beta)B + \frac{0.98\beta h_1}{\sin \theta}$
	K形		$l_{eff} = \frac{(57.2+2\gamma)}{(75.68+80.58g/B)} \left[ (0.85-0.92\beta)B + \frac{0.15h_1}{\sin \theta} \right]$ $b_{eff} = \frac{(318.36-2\gamma)}{(162.72+75.71g/B)} \left[ \frac{0.83B}{(1206.87\beta-826.44)} + \frac{0.98h_1}{\sin \theta} \right]$

表 3 矩形钢管混凝土节点腹杆受压轴向刚度

节点类型		计算公式	
矩形钢管混凝土节点 腹杆受压	T、Y形	$K_J = \begin{cases} \frac{l_{eff1} E c b_1}{\sin^2 \theta (H-T)} & (\beta < 0.85) \\ \frac{l_{eff2} (E_c b_1 + 2E_s T)}{\sin^2 \theta (H-T)} & (\beta \geq 0.85) \end{cases}$	$l_{eff1} = \frac{(131.35-2\gamma)}{100} \left[ (1.84-1.95\beta)B + \frac{h_1}{\sin \theta} \right]$ $l_{eff2} = \frac{(102.64-2\gamma)}{100} \left[ (1.69-1.03\beta)B + \frac{0.74h_1}{\sin \theta} \right]$
	K形		$l_{eff1} = \frac{(62.81-2\gamma)h_1/\sin \theta + (36.10-18.39\beta)B}{(34.36+7.04g/B)}$ $l_{eff2} = \frac{(104.12-2\gamma)[(0.17+2.01\beta)B + h_1/\sin \theta]}{(175.5+93.15g/B)}$

### 7.3 节点承载力计算

7.3.1 桁架内力分析可采用框架模型（图 5）。当桁架杆件的节间长度或杆件长度与截面高度之比不小于 12（弦杆）和 24（腹杆）时，分析桁架杆件内力时可将节点设为铰接。当不满足上述要求时，宜按刚接节点计算桁架内力。

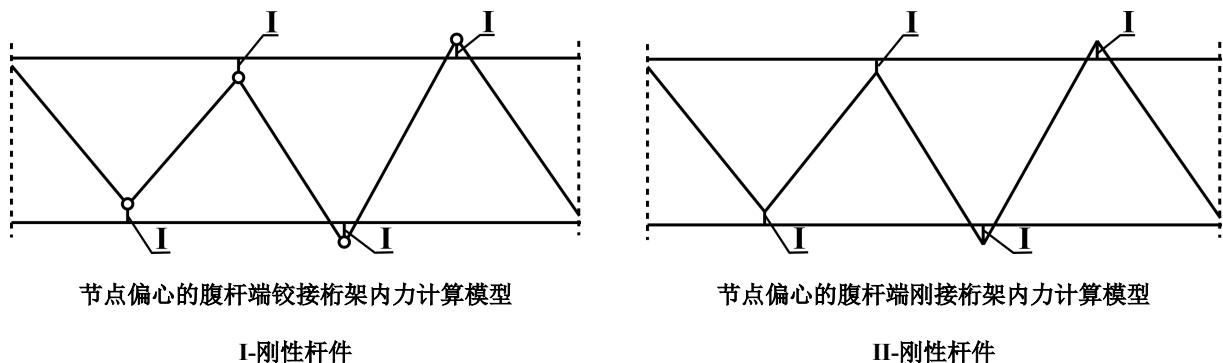


图 5 桁架内力分析框架模型

7.3.2 当采用图 5 模型计算时, 应在计算得到的杆件轴力基础上, 按表 4 中系数进行放大, 以计人节点刚性产生的次弯矩作用。

表 4 考虑节点刚性的杆件轴力放大系数

节点类型		弦杆	竖腹杆	斜腹杆
圆形	N 形	1.5	1.8	1.4
	K 形		/	1.3
矩形	N 形	1.5	2.2	1.6
	K 形		/	1.5

7.3.3 圆形钢管节点应进行弦杆屈服线破坏和弦杆冲剪破坏验算, 节点承载力设计值应满足下列公式:

a) 弦杆屈服线破坏:

$$N \leq N_i = Q_u Q_f \frac{f_{yd} T^2}{\sin \theta_i} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

式中:

b) 弦杆冲剪破坏:

$$N \leq N_i = 0.58 f_{yd} \pi d_i T \frac{k_a}{\sin \theta_i} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$k_a = \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin \theta_i} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

式中:

$N_i$  —— 腹杆轴力 (kN),  $i=1$  代表受压腹杆、 $i=2$  代表受拉腹杆;

$Q_u$  —— 圆形钢管节点承载力系数, 按表 5 计算;

$Q_f$  —— 圆形钢管节点承载力系数, 按表 6 计算;

$f_{yd}$  —— 钢材强度设计值 (MPa);

$T$  —— 圆形或矩形钢管弦杆壁厚 (mm);

$d_i$  —— 圆形钢管腹杆直径 (mm),  $i=1$  代表受压腹杆、 $i=2$  代表受拉腹杆;

$\theta_i$  —— 腹杆轴线与弦杆轴线的夹角,  $i=1$  代表受压腹杆、 $i=2$  代表受拉腹杆;

$k_a$  — 圆形钢管节点弦杆冲剪承载力计算修正系数。

表 5 圆形钢管节点承载力系数  $Q_u$

节点类型	$Q_u$ 计算公式
X形	$Q_u = 2.6 \left( \frac{1 + \beta}{1 - 0.7\beta} \right) \gamma^{0.15}$
T、Y形	$Q_u = 2.6 (1 + 6.8\beta^2) \gamma^{0.2}$
K形	$Q_u = 1.65 (1 + 8\beta^{1.6}) \gamma^{0.3} \left[ 1 + \frac{1}{1.2 + (g/T)^{0.8}} \right]$

表 6 圆形钢管节点承载力系数  $Q_f$

$Q_f$ 计算公式		
	$Q_f = (1 -  n )^{C_1}$	
	$n = \frac{N_0}{N_{p1,0}} + \frac{M_0}{M_{p1,0}}$	
	弦杆压应力 ( $n < 0$ )	弦杆拉应力 ( $n > 0$ )
T、Y、X形	$C_1 = 0.45 - 0.25\beta$	$C_1 = 0.20$
K形	$C_1 = 0.25$	

7.3.4 圆形钢管混凝土节点应进行腹杆有效宽度破坏和弦杆冲剪破坏验算，节点承载力设计值应满足下列公式：

a) 腹杆有效宽度破坏:

b) 弦杆冲剪破坏:

式中：

$N_i$  — 腹杆轴力 (kN),  $i=1$  代表受压腹杆、 $i=2$  代表受拉腹杆;

$l_{b,eff}$	——	腹杆屈服长度 (mm), 按表9计算;
$L_{p,eff}$	——	冲剪线长度 (mm), 按表9计算;
$f_{yd}$	——	钢材强度设计值 (MPa);
$T$	——	圆形或矩形钢管弦杆壁厚 (mm);
$d_i$	——	圆形钢管腹杆直径 (mm), $i=1$ 代表受压腹杆、 $i=2$ 代表受拉腹杆;
$t_i$	——	圆形或矩形钢管腹杆壁厚 (mm), $i=1$ 代表受压腹杆、 $i=2$ 代表受拉腹杆;
$\theta_i$	——	腹杆轴线与弦杆轴线的夹角, $i=1$ 代表受压腹杆、 $i=2$ 代表受拉腹杆。

7.3.5 矩形钢管节点应进行弦杆屈服线破坏、弦杆冲剪破坏、腹杆有效宽度破坏、弦杆剪切破坏和弦杆腹板局部屈曲破坏验算，节点承载力设计值应满足下列公式：

a) 弦杆屈服线破坏(适用于K形节点,  $\beta \leq 0.85$ 的T、Y和X形节点):

b) 弦杆冲剪破坏 (适用于  $b \leq B - 2T$ ) :

c) 腹杆有效宽度破坏:

d) 弦杆剪切破坏（适用于 K 形节点， $\cos\theta_1 > h_i/H$  的 X 形节点）：

$$N \leq N_g = (A_s - A_v) f_{yd} + A_v f_{yd} \sqrt{1 - \left( \frac{V}{V_{p1,0}} \right)^2} \dots \dots \dots \quad (13)$$

e) 弦杆腹板局部屈曲破坏（适用于 $\beta=1.0$  的 T、Y 和 X 形节点）：

$$N \leq N_i = \frac{f_k T}{\sin \theta_i} b_w Q_f \dots \quad (14)$$

式中：

$N_i$	—	腹杆轴向承载力 (kN), $i=1, 2$ 分别代表不同腹杆;
$N_g$	—	受剪 K 形节点, 弦杆轴向承载力 (kN);
$Q_u$	—	矩形钢管节点承载力系数, 按表 7 计算;
$Q_f$	—	矩形钢管节点承载力系数, 按表 8 计算;
$l_{b,eff}$	—	腹杆屈服长度 (mm), 按表 9 计算;
$l_{p,eff}$	—	冲剪线长度 (mm), 按表 9 计算;
$A_v$	—	间隙受剪 K 形节点, 弦杆抗剪面积 ( $\text{mm}^2$ ), 按表 10 计算;
$V$	—	K 形节点间隙截面剪力 (kN);
$V_{pl,0}$	—	弦杆抗剪承载力设计值 (kN), 按表 10 计算;

$b_w$  —— 等效柱宽度 (mm)，按表11计算；  
 $f_k$  —— 钢板屈曲强度设计值 (MPa)，按表12计算。

表 7 矩形钢管节点承载力系数  $Q_u$ 

节点类型	$Q_u$ 计算公式
T、Y、X形	$Q_u = \frac{2(h_i/B)}{(1-\beta)\sin\theta_i} + \frac{4}{\sqrt{1-\beta}}$
K形	$Q_u = 14\beta\gamma^{0.3}$

表 8 矩形钢管节点承载力系数  $Q_f$ 

$Q_f$ 计算公式		
	$Q_f = (1 -  n )^{C_1}$	
	$n = \frac{N_0}{N_{p1,0}} + \frac{M_0}{M_{p1,0}}$	
T、Y、X形	弦杆压应力 ( $n < 0$ ) $C_1=0.6-0.5\beta$	弦杆拉应力 ( $n > 0$ ) $C_1=0.10$
K形	$C_1=0.5-0.5\beta$ 且 $C_1 \geq 0.10$	

表 9 腹杆屈服长度  $l_{b,eff}$  和冲剪线长度  $l_{p,eff}$ 

	$l_{b,eff}$	$l_{p,eff}$
T、Y、X形	$l_{b,eff} = 2h_i + 2b_e - 4t_i$	$l_{p,eff} = \frac{2h_i}{\sin\theta_i} + 2b_{e,p}$
K形	$l_{b,eff} = 2h_i + b_e + b_i - 4t_i$ $b_e = \left( \frac{10T}{B} \right) \left( \frac{T}{t_i} \right) b_i \text{ 且 } b_e \leq b_i$	$l_{p,eff} = \frac{2h_i}{\sin\theta_i} + b_{e,p} + b_i$ $b_{e,p} = \left( \frac{10T}{B} \right) b_i \text{ 且 } b_{e,p} \leq b_i$

表 10 弦杆抗剪面积  $A_v$  和弦杆抗剪承载力设计值  $V_{pl,0}$ 

	$V_{pl,0} = 0.58 f_{yd} A_v$
--	------------------------------

T、Y、X形	$A_v = 2HT$
K形	$A_v = 2HT + \sqrt{\frac{1}{1+(4g^2)/(3T^2)}}BT$

表 11 等效柱宽度  $b_w$

	$\beta=1.0$	$0.85 < \beta < 1.0$
T、Y、X形	$b_w = \frac{2h_i}{\sin \theta_i} + 10T$	$\beta=0.85$ 的弦杆屈服线破坏对应节点承载力和 $\beta=1.0$ 的弦杆腹板局部屈曲破坏对应节点承载力之间进行线性插值
K形		不适用

表 12 钢板屈曲强度设计值  $f_k$

腹杆受拉	腹杆受压	
$f_k = f_y$	T、Y形	X形
	$f_k = \gamma f_y$	$f_k = 0.8 \gamma f_y \sin \theta_i$
$\chi$ 为钢管壁板局部屈曲折减系数，应参照欧洲规范Eurocode 3取值		
$\lambda = 3.46 \left( \frac{H}{T} - 2 \right) \sqrt{\frac{1}{\sin \theta_i}}$		

7.3.6 矩形钢管混凝土节点应进行腹杆有效宽度破坏、弦杆冲剪破坏和弦杆剪切破坏验算，节点承载力设计值应满足下列公式：

a) 腹杆有效宽度破坏:

$$b_e = \left( \frac{3.7}{\gamma} \right) \left( \frac{0.4}{\tau} + 0.14 \right) b_i \dots \quad (17)$$

b) 弦杆冲剪破坏:

$$b_e = \left( \frac{3.7}{\gamma} + 0.5 \right) \left( \frac{0.4}{\tau} + 0.14 \right) b_i \dots \quad (20)$$

c) 弦杆剪切破坏:

式中：

$N_i$	——	腹杆轴向承载力 (kN)， $i=1, 2$ 分别代表不同腹杆；
$f_y$	——	钢材的屈服强度 (MPa)；
$t_i$	——	圆形或矩形钢管腹杆壁厚， $i=1$ 代表受压腹杆、 $i=2$ 代表受拉腹杆；
$l_{b,eff}$	——	腹杆屈服长度 (mm)，按表9计算；
$h_i$	——	矩形钢管腹杆高度 (mm)， $i=1$ 代表受压腹杆、 $i=2$ 代表受拉腹杆；
$b_i$	——	矩形钢管腹杆宽度 (mm)， $i=1$ 代表受压腹杆、 $i=2$ 代表受拉腹杆；
$V$	——	K形节点间隙截面剪力 (kN)；
$\gamma$	——	一半的弦杆直径与壁厚比值；
$\tau$	——	腹杆与弦杆壁厚比值；
$l_{p,eff}$	——	冲剪线长度 (mm)，按表9计算；
$T$	——	圆形或矩形钢管弦杆壁厚 (mm)；
$\theta_i$	——	腹杆轴线与弦杆轴线的夹角， $i=1$ 代表受压腹杆、 $i=2$ 代表受拉腹杆；
$V$	——	K形节点间隙截面剪力 (kN)；
$N$	——	K形节点间隙截面轴力 (kN)；
$V_{pl,0}$	——	K形节点间隙截面抗剪承载力设计值 (kN)；
$N_{pl,0}$	——	K形节点间隙截面抗压承载力设计值 (kN)；
$A_s$	——	弦杆钢管截面面积 ( $mm^2$ )；
$A_c$	——	弦杆混凝土截面面积 ( $mm^2$ )。

7.3.7 钢管和钢管混凝土节点承载力应按下式计算：

$$N \leq N_i \dots \quad (23)$$

式中*i*

$N$  —— 节点杆件内力值 (kN)；  
 $N_i$  —— 节点承载力设计值 (kN)， $i=1, 2$  分别代表不同腹杆；

## 7.4 节点疲劳计算

7.4.1 节点应采用名义应力法进行疲劳验算，亦可采用热点应力法进行疲劳验算。具体按附录 B 计算。

7.4.2 疲劳荷载应满足 JTGD64 要求。

7.4.3 热点应力法疲劳验算所采用的应力幅 $\Delta\sigma$ 应为弦杆或腹杆在疲劳荷载作用下的热点应力最大变化幅度，热点应力幅应按下式计算：

$$\Delta\sigma_b = \sum_i s_i \Delta\sigma_{n,i} \dots \quad (24)$$

式中.

- $\Delta\sigma_h$  —— 热点应力幅 (MPa)；  
 $\Delta\sigma_{n,i}$  —— 基本荷载受力工况下的名义应力幅 (MPa)， $i=1、2、3\dots$ 代表不同的基本荷载工况；  
 $s_i$  —— 基本荷载受力工况下的热点应力集中系数， $i=1、2、3\dots$ 代表不同的基本荷载工况。

7.4.4 圆形钢管 T、Y、X 形节点热点应力集中系数应按表 13 计算，热点位置见图 6，基本荷载受力工况见图 7。

表 13 圆形钢管 T、Y、X 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆轴力作用且弦杆两端固定边界	
● 弦杆	$s_{cs} = T_1 F_1$ $s_{cc} = T_2$
● 腹杆	$s_{BS} = T_3 F_1$ $s_{BC} = T_4$
$T_1 = \gamma \cdot \tau^{1.1} [1.11 - 3(\beta - 0.52)^2] \sin^{1.6} \theta$ $T_2 = \gamma^{0.2} \cdot \tau [2.65 + 5(\beta - 0.65)^2] + \tau \beta (0.25\alpha - 3) \sin \theta$ $T_3 = 1.3 + \gamma \tau^{0.52} \alpha^{0.1} [0.187 - 1.25 \beta^{1.1} (\beta - 0.96)] \sin^{2.7-0.01\alpha} \theta$ $T_4 = 3 + \gamma^{1.2} \cdot \tau [0.12 e^{-4\beta} + 0.11 \beta^2 - 0.045] + \tau \beta (0.1\alpha - 1.2)$	
$\alpha$ 为弦杆计算长度与直径比值： 对于 $\alpha \geq 12$ : $F_1 = 1.0$ 对于 $\alpha < 12$ : $F_1 = 1 - (0.83\beta - 0.56\beta^2 - 0.02)\gamma^{0.23} e^{-0.21\gamma^{-1.16}\alpha^{2.5}}$	
基本荷载受力工况2：腹杆轴力作用且弦杆两端任意边界	
● 弦杆	$s_{cs} = T_5 F_2$ $s_{cc} = T_6$
● 腹杆	$s_{BS} = T_3 F_2$ $s_{BC} = T_7$
$T_5 = \gamma \tau^{1.1} [1.11 - 3(\beta - 0.52)^2] \sin^{1.6} \theta + C_1 (0.8\alpha - 6) \tau \beta^2 (1 - \beta^2)^{0.5} \sin^2(2\theta)$	

$$T_2 = \gamma^{0.2} \cdot \tau [2.65 + 5(\beta - 0.65)^2] + \tau \beta (C_2 \alpha - 3) \sin \theta$$

$$T_4 = 3 + \gamma^{1.2} \cdot [0.12e^{-4\beta} + 0.11\beta^2 - 0.045] + \tau \beta (C_3 \alpha - 1.2)$$

对于  $\alpha \geq 12$ :  $F_2 = 1.0$

对于  $\alpha < 12$ :  $F_1 = 1 - (1.43\beta - 0.97\beta^2 - 0.03)\gamma^{0.04} e^{-0.71\gamma^{-1.38}\alpha^{2.5}}$

基本荷载受力工况3: 腹杆弯矩作用

● 弦杆	$s_{cs} = 0$ $s_{cc} = T_8$
● 腹杆	$s_{BS} = 0$ $s_{BC} = T_9$
$T_8 = 1.45\beta\tau^{0.85}\gamma^{(1-0.68\beta)}\sin^{0.7}\theta$	
$T_9 = 1 + 0.65\beta\tau^{0.4}\gamma^{(1.09-0.77\beta)}\sin^{(0.06\gamma-1.16)}\theta$	
弦杆边界修正系数C: $C_1=2(C-0.5)$ ; $C_2=C/2$ $C_3=C/5$	
对于弦杆两端固定边界, $C=0.5$ 对于弦杆两端铰接边界, $C=1.0$ 对于弦杆两端介于固定和铰接边界, $C=0.7$ 热点应力集中系数s不小于2。	

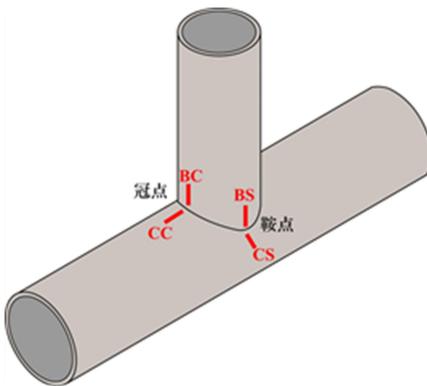


图 6 圆形钢管 T、Y、X 形节点热点位置

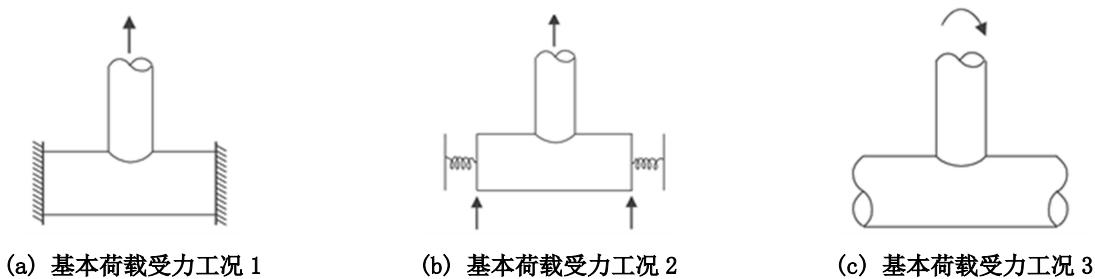


图 7 圆形钢管 T、Y、X 形节点基本荷载受力工况

7.4.5 圆形钢管 K 形节点热点应力集中系数应按表 14 计算，基本荷载受力工况见图 8。

表 14 圆形钢管 K 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆拉压平衡荷载	
● 弦杆	$S_{\max} = \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.4} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{1.1} SCF_{o,b,ax}, SCF_{o,b,ax} \text{ 按下图取值}$
● 腹杆	$, S_{\max} = \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.4} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{1.1}$ <p>对应 <math>\theta=30^\circ, 45^\circ</math> 和 <math>60^\circ</math> 时，计算得到的 <math>s_{\max}</math> 最小值分别为 2.64、2.30 和 2.12，<math>SCF_{o,b,ax}</math> 按下图取值</p>
基本荷载受力工况2和3：弦杆轴力和弦杆弯矩	
● 弦杆	$S_{\max} = 12 \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{0.3} (\sin \theta)^{-0.9}$

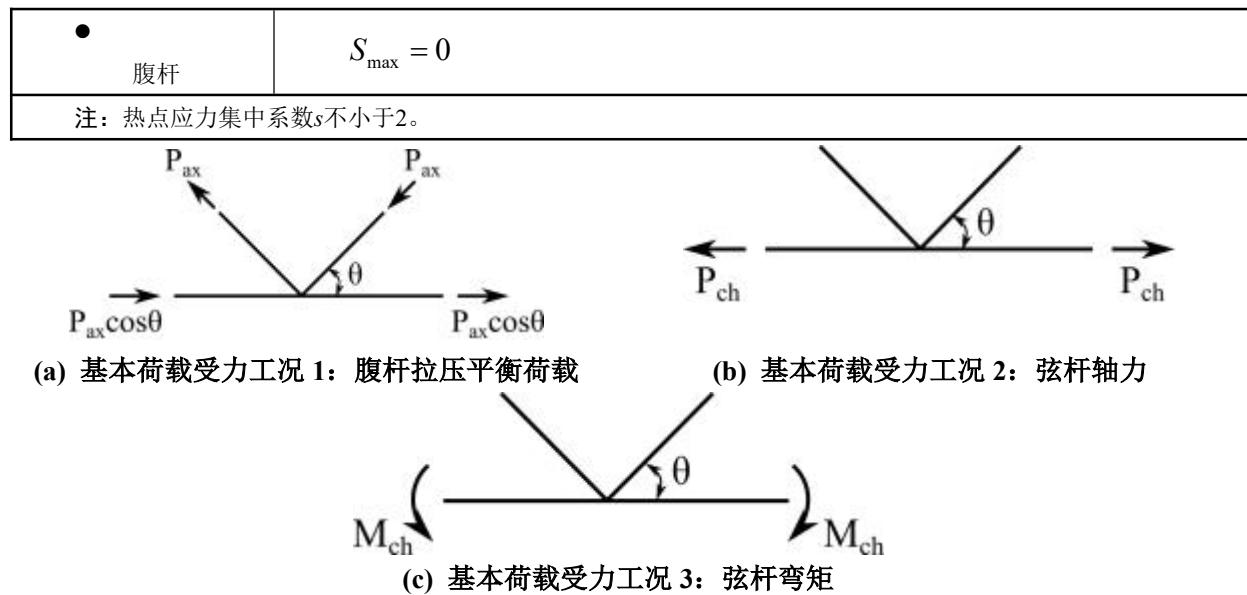


图 8 圆形钢管 K 形节基本荷载受力工况

7.4.6 圆形钢管混凝土 K 形节点热点应力集中系数应按表 15 计算，基本荷载受力工况见图 8。

表 15 圆形钢管混凝土 K 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆拉压平衡荷载	
● 弦杆	
$\theta=30^\circ$	$S_{\max} = 1.165 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.447} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{0.718} (1.056\beta^2 - 1.029\beta + 1.284)$
$\theta=45^\circ$	$S_{\max} = 1.198 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.500} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{0.908} (0.542\beta^2 - 0.528\beta + 1.607)$
$\theta=60^\circ$	$S_{\max} = 1.473 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.538} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{1.024} (-6.070\beta^2 - 1.011\beta + 2.001)$
● 腹杆	
$\theta=30^\circ$	$S_{\max} = 1.896 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.003} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{0.121} (3.401\beta^2 - 3.442\beta + 1.771)$
$\theta=45^\circ$	$S_{\max} = 2.016 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.097} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{-0.001} (4.250\beta^2 - 4.031\beta + 1.815)$
$\theta=60^\circ$	$S_{\max} = 1.503 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.203} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{0.233} (-4.097\beta^2 + 1.011\beta + 1.837)$
基本荷载受力工况2：弦杆轴力	
● 弦杆	

$\theta=30^\circ$	$S_{\max} = 1.997 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.240} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{-0.081} (3.435\beta^2 - 4.474\beta + 2.654)$
$\theta=45^\circ$	$S_{\max} = 1.503 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.214} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{-0.068} (1.511\beta^2 - 2.454\beta + 2.461)$
$\theta=60^\circ$	$S_{\max} = 1.489 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{0.167} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{-0.051} (-4.2107\beta^2 + 1.230\beta + 1.899)$
●	腹杆
$\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	$S_{\max} = 0$
基本荷载受力工况3：弦杆弯矩	
●	弦杆
$\theta=30^\circ$	$S_{\max} = 1.735 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{-0.316} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{-0.120} (3.444\beta^2 - 3.503\beta + 2.651)$
$\theta=45^\circ$	$S_{\max} = 1.385 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{-0.347} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{-0.121} (2.200\beta^2 - 1.353\beta + 2.037)$
$\theta=60^\circ$	$S_{\max} = 1.353 \left( \frac{\gamma}{12} \right)^{-0.406} \left( \frac{\tau}{0.5} \right)^{-0.048} (-2.816\beta^2 + 1.085\beta + 1.598)$
●	腹杆
$\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	$S_{\max} = 0$

对于 $\theta$ 介于 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ， $s_{\max}$ 采用线性差值。

7.4.7 矩形钢管T、Y、X形节点热点应力集中系数应按表16计算，热点位置见图9，基本荷载受力工况见图10。

表16 矩形钢管T、Y、X形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆轴力	
● 弦杆（B、C、D）	$s_B = (0.143 - 0.204\beta + 0.064\beta^2)(2\gamma)^{(1.377+1.715\beta-1.103\beta^2)} \cdot \tau^{0.75}$ $s_c = (0.077 - 0.129\beta + 0.061\beta^2 - 0.0006\gamma)(2\gamma)^{(1.565+1.874\beta-1.028\beta^2)} \cdot \tau^{0.75}$ $s_D = (0.208 - 0.387\beta + 0.209\beta^2)(2\gamma)^{(0.925+1.898\beta-2.109\beta^2)} \cdot \tau^{0.75}$ 对于 $\beta=1$ 的X形节点： $s_C$ 和 $s_D$ 分别乘以0.65和0.50。
● 腹杆（A、E）	$s_A = s_E = (0.013 + 0.693\beta - 0.278\beta^2)(2\gamma)^{(0.790+1.898\beta-2.109\beta^2)}$
基本荷载受力工况2：腹杆弯矩	

● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = (-0.011 + 0.085\beta - 0.073\beta^2)(2\gamma)^{1.722+1.151\beta-0.697\beta^2} \cdot \tau^{0.75}$ $s_c = (0.952 - 3.062\beta + 2.382\beta^2 + 0.0456\gamma)(2\gamma)^{-0.690+5.817\beta-4.685\beta^2} \cdot \tau^{0.75}$ $s_D = (-0.054 + 0.332\beta - 0.258\beta^2)(2\gamma)^{2.084-1.062\beta+0.527\beta^2} \cdot \tau^{0.75}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = s_E = (0.390 - 1.054\beta + 1.115\beta^2)(2\gamma)^{-0.154+4.555\beta-3.809\beta^2}$
基本荷载受力工况3和4: 弦杆轴力和弦杆弯矩	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = 0$ $s_c = 0.725(2\gamma)^{0.248\beta} \cdot \tau^{0.19}$ $s_D = 1.373(2\gamma)^{0.205\beta} \cdot \tau^{0.24}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = s_E = 0$
注: 热点应力集中系数s不小于2。	

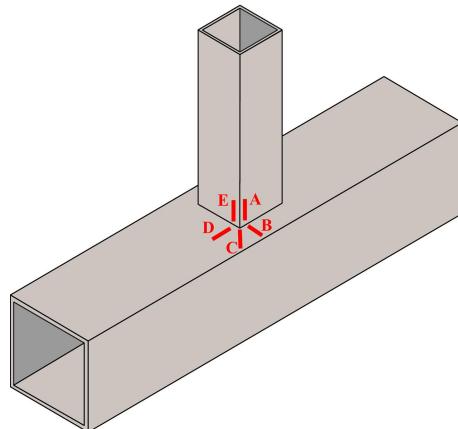
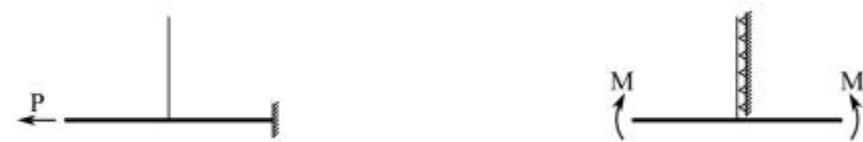


图9 矩形钢管 T、Y、X 形节点热点位置



(a) 基本荷载受力工况 1: 腹杆轴力

(b) 基本荷载受力工况 2: 腹杆弯矩



(c) 基本荷载受力工况 3：弦杆轴力

(d) 基本荷载受力工况 4：弦杆弯矩

图 10 矩形钢管 T、Y、X 形节点基本荷载受力工况

7.4.8 矩形钢管 K 形节点热点应力集中系数应按表 17 计算，基本荷载受力工况见图 8。

表 17 矩形钢管 K 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆拉压平衡荷载	
● 弦杆	$s_{\max} = (0.48\beta - 0.5\beta^2 - 0.012/\beta + 0.012/g) \cdot (2\gamma)^{1.72} \cdot \tau^{0.78} \cdot (g)^2 \cdot (\sin \theta)^{2.09}$
● 腹杆	$s_{\max} = (-0.008 + 0.45\beta - 0.34\beta^2) \cdot (2\gamma)^{1.36} \cdot \tau^{-0.66} \cdot (\sin \theta)^{1.29}$
基本荷载受力工况2和3：弦杆轴力和弦杆弯矩	
● 弦杆	$s_{\max} = (1.23\beta + 2.45) \cdot (g)^{-0.27}$
● 腹杆	$S_{\max} = 0$

注：热点应力集中系数s不小于2。

7.4.9 矩形钢管混凝土 T、Y、X 形节点热点应力集中系数应按表 18 计算，热点位置见图 9，基本荷载受力工况见图 10。

表 18 矩形钢管混凝土 T、Y、X 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆轴力	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = (0.131 + 0.095\beta - 0.052\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(1.512+0.734\beta-0.343\beta^2)} \cdot \tau^{0.927-0.128\beta}$ $s_C = (-0.069 + 0.537\beta - 0.526\beta^2 + 0.0005 \cdot 2\gamma) \cdot (2\gamma)^{(2.205+1.566\beta+1.161\beta^2)} \cdot \tau^{0.774+0.047\beta}$ $s_D = (0.108 - 0.241\beta + 0.150\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(0.934+3.324\beta-2.651\beta^2)} \cdot \tau^{0.918-0.314\beta}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = (-0.870 + 3.533\beta - 2.585\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(2.372-3.380\beta+2.143\beta^2)} \cdot \tau^{-0.002+0.374\beta}$ $s_E = (-0.143 + 0.429\beta + 0.224\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(2.276-2.205\beta+0.547\beta^2)} \cdot \tau^{-0.297+0.425\beta}$
基本荷载受力工况2：腹杆弯矩	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = (-0.109 + 0.437\beta - 0.357\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(3.750-5.933\beta+4.799\beta^2)} \cdot \tau^{0.740-0.139\beta}$

	$s_C = (-0.436 - 1.121\beta + 1.167\beta^2 + 0.097 \cdot 2\gamma)(2\gamma)^{(-0.431+3.976\beta-3.708\beta^2)} \cdot \tau^{0.803-0.177\beta}$ $s_D = (0.133 - 0.355\beta + 0.281\beta^2)(2\gamma)^{(0.008+6.305\beta-5.407\beta^2)} \cdot \tau^{0.825-0.394\beta}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = (0.635 - 1.849\beta + 1.495\beta^2)(2\gamma)^{(-1.349+8.650\beta-6.739\beta^2)} \cdot \tau^{-0.304+0.291\beta}$ $s_E = (0.196 - 0.998\beta + 1.689\beta^2)(2\gamma)^{(1.629-0.815\beta+0.498\beta^2)} \cdot \tau^{-0.274+0.113\beta}$
基本荷载受力工况3：弦杆轴力	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = 0$ $s_C = 1.006(2\gamma)^{(0.243\beta)} \cdot \tau^{0.047}$ $s_D = 1.416(2\gamma)^{(0.135\beta)} \cdot \tau^{0.133}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = s_E = 0$
基本荷载受力工况4：弦杆弯矩	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = 0$ $s_C = 0.491(2\gamma)^{(0.508\beta)} \cdot \tau^{-0.164}$ $s_D = 1.343(2\gamma)^{(0.219\beta)} \cdot \tau^{-0.030}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = s_E = 0$

7.4.10 矩形钢管混凝土 K 形节点热点应力集中系数应按表 19 计算，基本荷载受力工况见图 8。

表 19 矩形钢管混凝土 K 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆拉压平衡荷载	
● 弦杆	$s_{\max} = (0.130 - 0.211\beta + 0.099\beta^2)(2\gamma)^{1.730} \cdot \tau^{0.577} \cdot (g^\circ)^{-0.075} \cdot (\sin \theta)^{0.810}$
● 腹杆	$s_{\max} = (-0.003 + 0.590\beta - 0.407\beta^2)(2\gamma)^{1.160} \cdot \tau^{-0.130} \cdot (g^\circ)^{-0.007} \cdot (\sin \theta)^{0.703}$
基本荷载受力工况2：弦杆轴力	
● 弦杆	$s_{\max} = (1.239 + 0.007\beta - 0.673\beta^2)(2\gamma)^{0.210} \cdot \tau^{-0.452} \cdot (g^\circ)^{-0.002} \cdot (\sin \theta)^{0.162}$
● 腹杆	$s_{\max} = 0$
基本荷载受力工况3：弦杆弯矩	
● 弦杆	$s_{\max} = (0.645 - 0.007\beta - 0.184\beta^2)(2\gamma)^{0.154} \cdot \tau^{-0.516} \cdot (g^\circ)^{-0.002} \cdot (\sin \theta)^{-0.299}$

● 腹杆	$s_{\max} = 0$
---------	----------------

7.4.11 PBL 加劲型矩形钢管混凝土 T、Y、X 形节点热点应力集中系数应按表 20 计算，热点位置见图 9，基本荷载受力工况见图 10。

表 20 PBL 加劲型矩形钢管混凝土 T、Y、X 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1：腹杆轴力	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = (5.334 - 12.357\beta + 7.191\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.829+2.170\beta+0.706\beta^2)} \cdot \tau^{0.264+0.249\beta}$ $s_C = (3.702 - 7.610\beta + 3.931\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.829+2.850\beta-0.581\beta^2)} \cdot \tau^{0.260+0.259\beta}$ $s_D = (1.636 - 2.896\beta + 1.431\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.686+3.204\beta-1.733\beta^2)} \cdot \tau^{0.267+0.123\beta}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = (1.592 - 3.674\beta + 2.838\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.991+4.920\beta-3.580\beta^2)} \cdot \tau^{-0.140+0.324\beta}$ $s_E = (1.819 - 2.047\beta + 0.768\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.390+1.824\beta-0.904\beta^2)} \cdot \tau^{-0.102+0.188\beta}$
基本荷载受力工况2：腹杆弯矩	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = (0.458 - 0.935\beta + 0.478\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.343+2.563\beta+0.001\beta^2)} \cdot \tau^{0.402-0.307\beta}$ $s_C = (0.532 - 1.101\beta + 0.571\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.214+2.433\beta-0.154\beta^2)} \cdot \tau^{0.312-0.451\beta}$ $s_D = (0.482 - 0.951\beta + 0.473\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.119+1.202\beta+0.605\beta^2)} \cdot \tau^{0.140-0.726\beta}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = (3.427 - 4.533\beta + 1.230\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-1.113+2.229\beta-0.196\beta^2)} \cdot \tau^{-0.754+1.072\beta}$ $s_E = (2.136 - 0.868\beta - 1.076\beta^2) \cdot (2\gamma)^{(-0.360+0.288\beta-0.885\beta^2)} \cdot \tau^{-0.318+0.288\beta}$
基本荷载受力工况3：弦杆轴力	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = 0$ $s_C = 0.786(2\gamma)^{(0.106\beta)} \cdot \tau^{0.106}$ $s_D = 0.959(2\gamma)^{(0.069\beta)} \cdot \tau^{0.145}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = s_E = 0$
基本荷载受力工况4：弦杆弯矩	
● 弦杆 (B、C、D)	$s_B = 0$ $s_C = 0.790(2\gamma)^{(0.293\beta)} \cdot \tau^{-0.112}$

	$s_D = 1.541(2\gamma)^{0.137\beta} \cdot \tau^{-0.093}$
● 腹杆 (A、E)	$s_A = s_E = 0$

7.4.12 PBL 加劲型矩形钢管混凝土 K 形节点热点应力集中系数应按表 21 计算，基本荷载受力工况见图 8。

表 21 PBL 加劲型矩形钢管混凝土 K 形节点热点应力集中系数

基本荷载受力工况1: 腹杆拉压平衡荷载	
● 弦杆	$s_{\max} = (0.437 + 0.121\beta + 0.046\beta^2)(2\gamma)^{0.636} \cdot \tau^{0.311} \cdot (g')^{-0.00005} \cdot (\sin \theta)^{0.793}$
● 腹杆	$s_{\max} = (0.529 + 0.646\beta + 0.131\beta^2)(2\gamma)^{0.509} \cdot \tau^{0.162} \cdot (g')^{-0.00005} \cdot (\sin \theta)^{0.420}$
基本荷载受力工况2: 弦杆轴力	
● 弦杆	$s_{\max} = (1.170 + 0.116\beta - 0.341\beta^2)(2\gamma)^{0.139} \cdot \tau^{-0.692} \cdot (g')^{-0.006} \cdot (\sin \theta)^{0.194}$
● 腹杆	$s_{\max} = 0$
基本荷载受力工况3: 弦杆弯矩	
● 弦杆	$s_{\max} = (2.048 + 0.495\beta - 0.852\beta^2)(2\gamma)^{0.047} \cdot \tau^{-0.537} \cdot (g')^{-0.003} \cdot (\sin \theta)^{-0.068}$
● 腹杆	$s_{\max} = 0$

7.4.13 采用疲劳荷载计算模型I时，应按下式验算：

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_h \leq \frac{\Delta \sigma_{h,D}}{\gamma_{Mf}} \dots \quad (25)$$

式中：

$\gamma_{\text{eff}}$  — 疲劳荷载分项系数，取1.0；

$\gamma_{Mf}$  — 疲劳抗力分项系数，对重要构件取1.35，对次要构件取1.15；

$\Delta\sigma_{h,D}$  — 常幅疲劳极限 (MPa)，按式(32)、式(33)和图11取用。

7.4.14 采用疲劳荷载计算模型II和III时，应按下式验算：

$$\gamma_{Ff} \gamma \Delta\sigma_h \leq \frac{\Delta\sigma_{h,C}}{\gamma_{Mf}} \dots \quad (26)$$

式中：

$\Delta\sigma_{h,C}$  — 疲劳细节类别 (MPa)，为对应于 $2.0 \times 10^6$ 次常幅疲劳循环的疲劳应力强度；按式(32)、式(33)和图11取用；

$\gamma$  —— 损伤等效系数,  $\gamma=\gamma_1\cdot\gamma_2\cdot\gamma_3\cdot\gamma_4$ , 且 $\gamma\leq\gamma_{\max}$ , 其中 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 、 $\gamma_4$ 、 $\gamma_{\max}$ 按JTGD64计算。

7.4.15 钢管和钢管混凝土节点可采用统一的热点应力幅 S-N 曲线，见图 11，按下式计算：

当 $10^3 < N < 5 \times 10^6$ 时，

$$\lg \Delta\sigma_h = \frac{1}{3} \left( 12.103 - \lg N_f \right) + 0.06 \lg N_f \cdot \lg \left( \frac{16}{t_i} \right) \dots \quad (27)$$

当 $5 \times 10^6 < N < 10^8$ 时，

$$\lg \Delta\sigma_h = \frac{1}{5} \left( 15.706 - \lg N_f \right) + 0.402 \lg N_f \cdot \lg \left( \frac{16}{t_i} \right) \dots \quad (28)$$

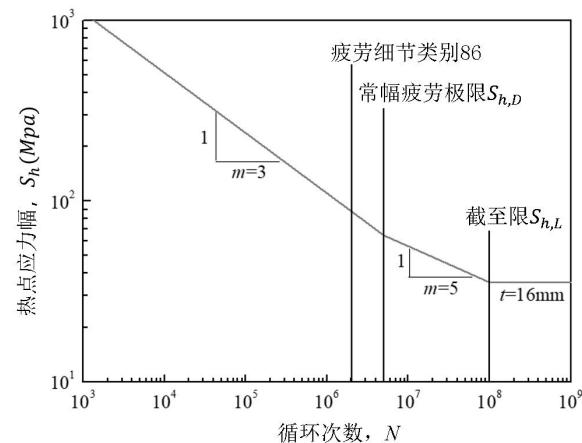


图 11 热点应力幅疲劳强度曲线

## 附录 A (规范性) 节点加强构造类型

A. 1 可采用矩形受压腹杆和工字型受拉腹杆方式，避免矩形钢管混凝土节点偏心，如图 A. 1 所示。

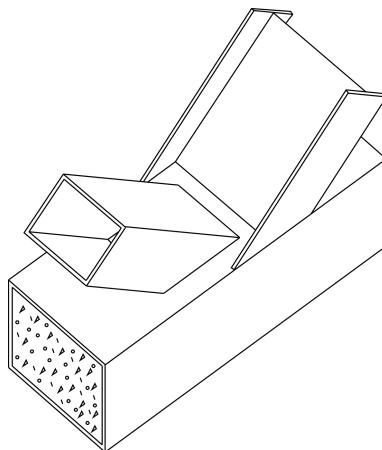


图 A.1 采用矩形受压腹杆和工字型受拉腹杆形式的钢管混凝土节点

A.2 可采用弦杆表面贴加强板方式，增加圆形和矩形钢管混凝土节点承载力，应满足以下要求：

- a) 弦杆为圆管时, 加强板宜包覆弦杆半圆(图A.2(a)), 长度方向两侧均应超过腹杆最外侧焊缝50mm以上, 但不宜超过腹杆直径的三分之二, 加强板厚度不宜小于8mm。
  - b) 弦杆为方(矩)形管且在与腹杆相连表面设置加劲板时(图A.2(b)), 加强板长度 $l_p$ 可按下列公式确定, 加强板宽度 $b_p$ 宜接近弦杆宽度, 并预留适当的焊缝位置, 加强板厚度不宜小于腹杆最大厚度的2倍。

T、Y 和 X 形节点：

K形节点：

式中：

- |                         |    |                    |
|-------------------------|----|--------------------|
| $l_p$ 、 $b_p$           | —— | 加强板的长度和宽度 (mm) ;   |
| $h_1$ 、 $h_2$           | —— | 腹杆1、2的截面高度 (mm) ;  |
| $b_1$                   | —— | 腹杆1的截面宽度 (mm) ;    |
| $\theta_1$ 、 $\theta_2$ | —— | 腹杆1、2轴线和弦杆轴线的夹角;   |
| $g$                     | —— | 两腹杆在弦杆表面的距离 (mm) 。 |

- c) 弦杆为方(矩)形管且在与弦杆两侧表面设置加强板时(图A.2(c)),K形节点加劲板长度 $l_p$ 按式(A-3)确定,T和Y形节点的加强板长度 $l_p$ 按下式计算:

- d) 加强板与弦杆应采用四周围焊。对 N、K 形节点焊缝有效高度不应小于腹杆壁厚。焊接前宜在加强板上先钻一个排气小孔，焊后应塞焊将孔封闭。

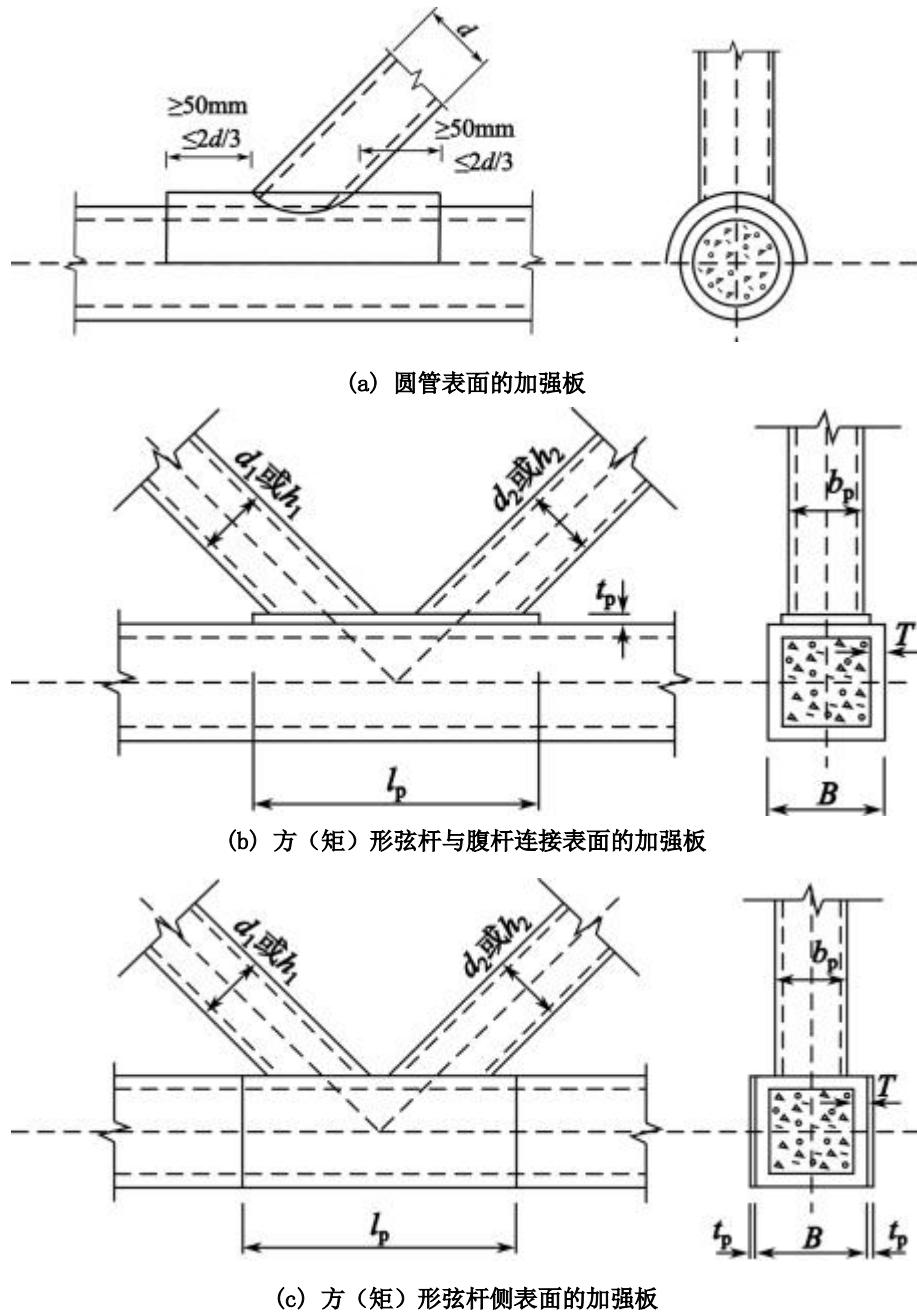


图 A.2 弦杆外表面外贴加劲板的加劲方式

A. 3 可采用弦杆和腹杆间设置加劲板的方式改善圆形钢管混凝土节点承载力和疲劳性能,如图 A. 3 所示。

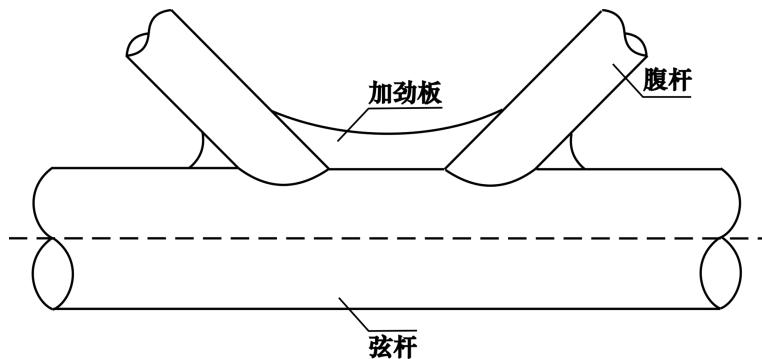
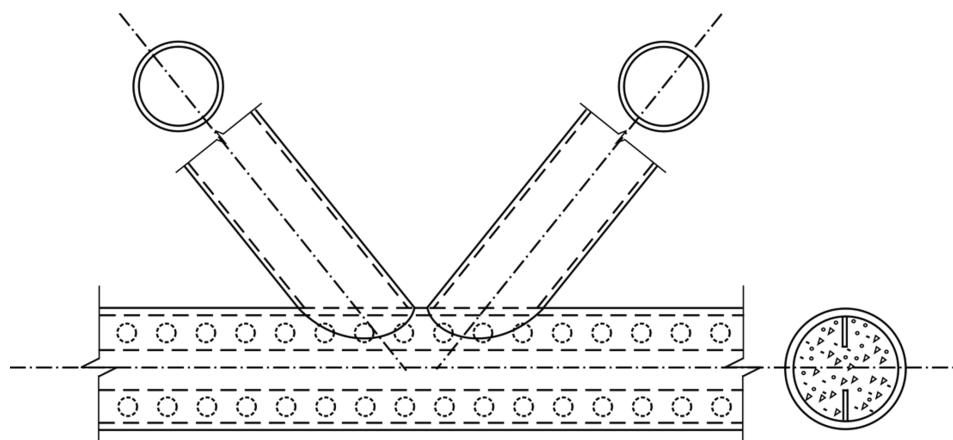


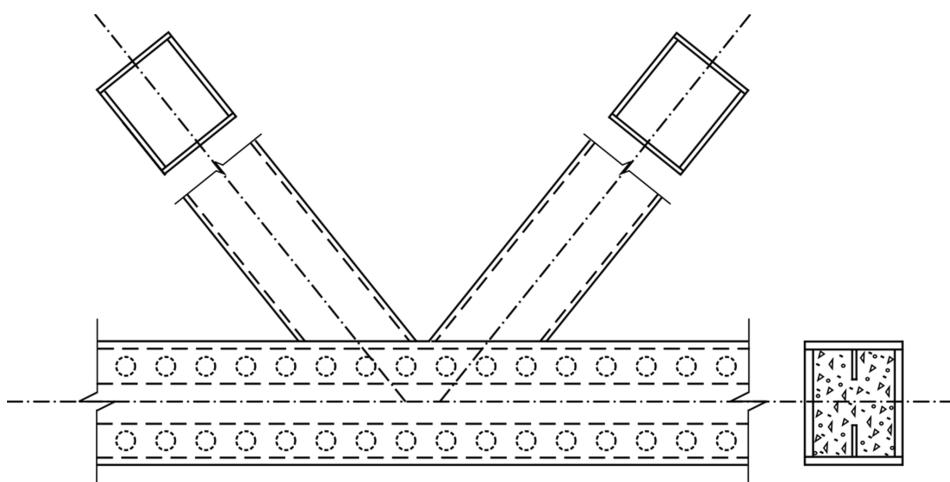
图 A.3 外设加劲板的圆形钢管混凝土节点

A.4 可采用弦杆内设开孔钢板（PBL）的方式改善圆形和矩形钢管混凝土节点界面性能、传力性能、承载力和疲劳性能，如图 A.4 所示，开孔钢板宜满足下列要求：

- 开孔钢板宜在弦杆中部或三分点处设置；
- 开孔钢板板厚不宜大于弦杆钢管壁厚；
- 开孔钢板板高宜取 1/4~1/3 的弦杆高度；
- 开孔钢板的开孔孔径宜取 1/2~3/4 的板高；
- 开孔钢板的开孔孔距（孔间净距）宜取开孔钢板的板高。



(a) PBL 加劲型圆形钢管混凝土节点

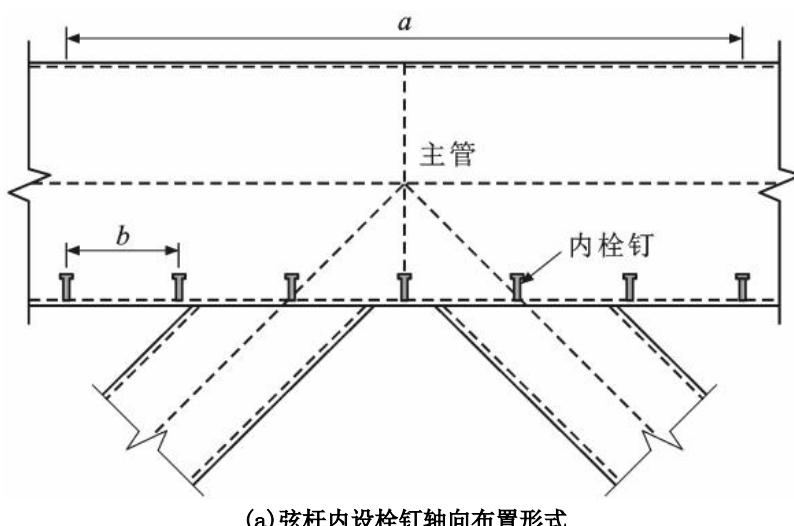


(b) PBL 加劲型矩形钢管混凝土节点

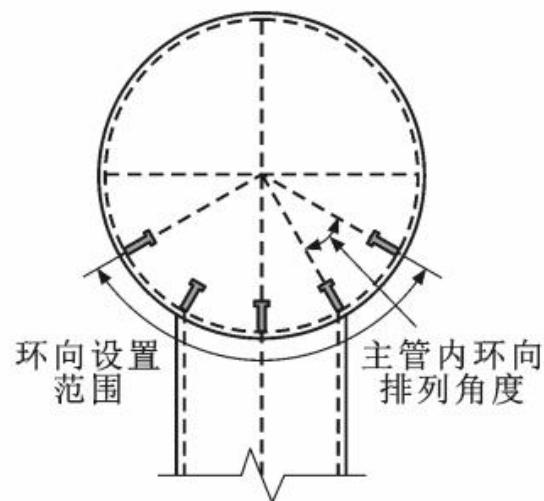
图 A. 4 PBL 加劲型钢管混凝土节点

A. 5 可采用弦杆内设栓钉的方式改善圆形和矩形钢管混凝土节点界面性能、传力性能、承载力和疲劳性能。

- a) 沿弦杆轴向布置于节点中心两侧各约2.7倍支管直径或轴向长度系数 $\geq 5.5$ , 支管侧轴向间距 $\leq 5.3$ 倍栓钉直径, 且不超过400mm; (轴向长度系数=内栓钉轴向布置总长度/支管直径)
- b) 支管侧环向布置于圆心角 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 内, 相邻栓钉环向角度建议 $30^\circ$ , 非支管侧环向角度 $\geq 45^\circ$ 且可简化布置;
- c) 直径宜取 $13\sim 25\text{mm}$  (推荐 $19\text{mm}$ ), 长度 $60\text{mm}$ , 环向相邻栓钉间距 $\geq 3.4$ 倍栓钉直径;
- d) 支管侧鞍点附近加密布置 (至少1列), 冠点区域轴向间距 $\leq 200\text{mm}$ ; 非支管侧轴向间距可放宽至 $300\sim 400\text{mm}$ ;
- e) 栓钉靠近焊缝但避免与焊缝重叠, 环向角度 $\geq 30^\circ$ 以保证混凝土流动性, 栓钉高度与保护层厚度协调。



(a) 弦杆内设栓钉轴向布置形式



(b) 弦杆内设栓钉环向布置形式

图A.5 弦杆内设栓钉钢管混凝土节点

A.6 可采用在弦杆和腹杆侧板处设置整体节点板的方式改善矩形钢管混凝土节点承载力和疲劳性能,如图 A.6 所示。

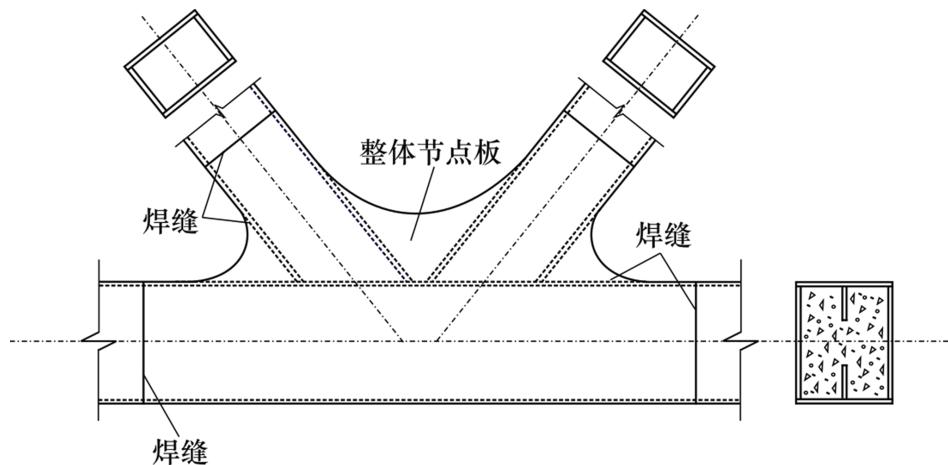


图 A.6 采用整体式节点板的矩形钢管混凝土节点

附录 B  
(资料性)  
热点应力法疲劳验算

**算例：**某矩形钢管 K 形节点，弦杆与腹杆之间夹角( $\theta$ )为  $38.7^\circ$ ，节点偏心距( $e$ )为 0，其弦杆长×宽×厚分别为  $l_0 \times b_0 \times t_0 = 180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ，面积  $A_0 = 5410 \text{ mm}^2$ ，抗弯惯性矩  $W_0 = 0.2820 \times 10^6 \text{ mm}^3$ ；腹杆长×宽×厚分别为  $l_1 \times b_1 \times t_1 = 140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ，面积  $A_1 = 2176 \text{ mm}^2$ ，抗弯惯性矩  $W_1 = 1.9025 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 。各杆件均承受常幅疲劳荷载，最小荷载为 0，最大荷载如图 B.1 所示，试计算该节点疲劳寿命。

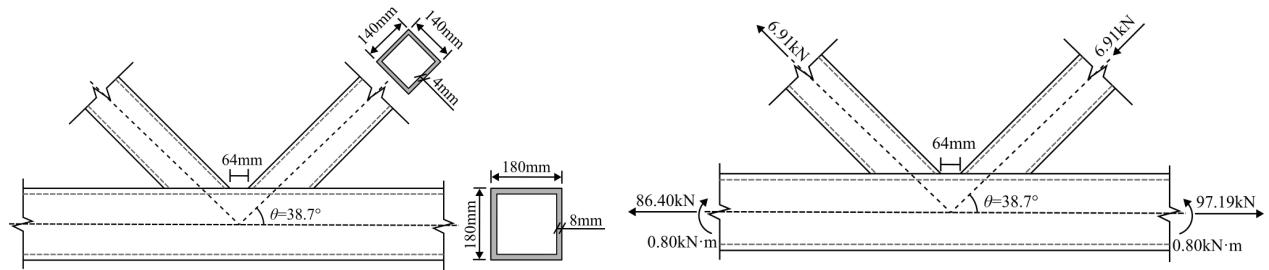


图 B.1 节点结合构造与所承受的疲劳荷载

解：

(1) 杆件几何参数计算

$$\beta = b_1 / b_0 = 140 / 180 = 0.78$$

$$\gamma = 0.5 b_0 / t_0 = 0.5 \times 180 / 8 = 11.25$$

$$\tau = t_1 / t_2 = 4 / 8 = 0.50$$

$$\theta = 38.7^\circ \quad g' = g / t_0 = 64 / 8 = 8.00$$

(2) 杆件内力分解

将 K 形节点的受力情况，分解为图 B.2 所示三种基本荷载工况的叠加。

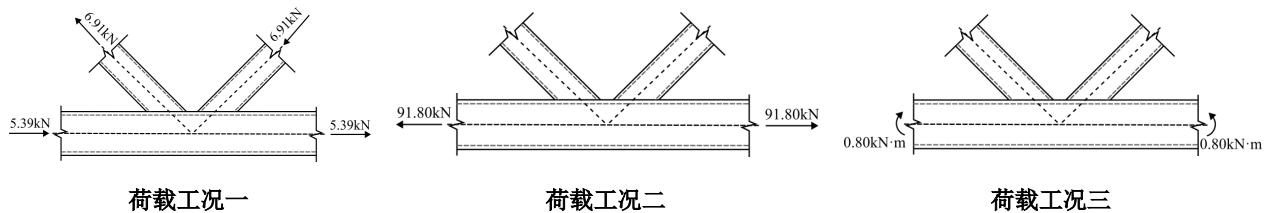


图 B.2 节点内力分解

(3) 各杆件名义应力幅计算

荷载工况一：腹杆承受轴力，其名义应力幅  $\sigma_{n,B1} = 1.5 \times 6.91 \times 10^3 / 2176 = 4.76 Mpa$

荷载工况二：弦杆承受轴力，其名义应力幅  $\sigma_{n,C2} = 1.5 \times 91.80 \times 10^3 / 5410 = 25.45 Mpa$

荷载工况三：弦杆承受弯矩，其名义应力幅  $\sigma_{n,C3} = 1.5 \times 0.8 \times 10^6 / 0.2820 \times 10^6 = 4.26 Mpa$

#### (4) 热点应力集中系数计算

根据各杆件几何参数，由本规范表 17 计算得到不同荷载工况下各杆件的应力集中系数如下：  
荷载工况一

$$\text{弦杆: } s_{C1} = (0.48\beta - 0.5\beta^2 - 0.012/\beta + 0.012/g) \cdot (2\gamma)^{1.72} \cdot \tau^{0.78} \cdot (g) \cdot (\sin \theta)^{0.29} = 3.99$$

$$\text{腹杆: } s_{B1} = (-0.008 + 0.45\beta - 0.34\beta^2) \cdot (2\gamma)^{1.36} \cdot \tau^{-0.66} \cdot (\sin \theta)^{1.29} = 8.11$$

荷载工况二

$$\text{弦杆: } s_{C2} = (2.45 + 1.23\beta) \cdot (g)^{-0.27} = 1.94 < 2.00, \text{ 取 } s_{C2} = s_{\min} = 2.00$$

$$\text{腹杆: } s_{B2} = 0$$

荷载工况三

$$\text{弦杆: } s_{C2} = (2.45 + 1.23\beta) \cdot (g)^{-0.27} = 1.94 < 2.00, \text{ 取 } s_{C2} = s_{\min} = 2.00$$

$$\text{腹杆: } s_{B3} = 0$$

#### (5) 各杆件热点应力幅计算

荷载工况一

$$\text{弦杆热点应力幅: } \sigma_{h,C1} = \sigma_{n,B1} \times s_{C1} = 4.76 \times 3.99 = 19.00 Mpa$$

$$\text{腹杆热点应力幅: } \sigma_{h,C1} = \sigma_{n,B1} \times s_{B1} = 4.76 \times 8.11 = 38.65 Mpa$$

荷载工况二

$$\text{弦杆热点应力幅: } \sigma_{h,C2} = \sigma_{n,C2} \times s_{C2} = 25.45 \times 2.00 = 50.90 Mpa$$

$$\text{腹杆热点应力幅: } \sigma_{h,B2} = 0 Mpa$$

荷载工况三

$$\text{弦杆热点应力幅: } \sigma_{h,C3} = \sigma_{n,C3} \times s_{C3} = 4.26 \times 2.00 = 8.52 Mpa$$

$$\text{腹杆热点应力幅: } \sigma_{h,B3} = 0 Mpa$$

#### (6) 各杆件总热点应力幅

$$\text{弦杆: } \Delta\sigma_{h,CA} = \sigma_{h,C1} + \sigma_{h,C2} - \sigma_{h,C3} = 19.00 + 50.90 - 8.52 = 61.38 Mpa$$

腹杆:  $\Delta\sigma_{h,BA} = \sigma_{h,B1} + \sigma_{h,B2} + \sigma_{h,B3} = 38.65 + 0 + 0 = 38.65 Mpa$

#### (7) 节点疲劳寿命计算

进行节点疲劳性能验算时, 取疲劳荷载分项系数  $\gamma_{Ff} = 1.0$ ; 桁架节点为重要构件, 故取疲劳抗力分项系数  $\gamma_{Mf} = 1.35$ ; 依据本规范 7.4.15 条, 当  $N = 2.0 \times 10^6$  时, 计算得到弦杆疲劳强度

$$\lg \Delta\sigma_{h,C} = \frac{1}{3}(12.103 - \lg N) + 0.06 \lg N \cdot \lg \left( \frac{16}{t_0} \right) = 2.05, \text{ 故 } \Delta\sigma_{h,C} = 10^{2.05} = 111 Mpa.$$

因  $\gamma_{Ff} \gamma \Delta\sigma_{h,CA} = 1.0 \times 1.0 \times 61.38 = 61.38 Mpa$  小于  $\frac{\Delta\sigma_{h,C}}{\gamma_{Mf}} = \frac{111}{1.35} = 82.22 Mpa$ , 故该节点疲劳验算通过。

弦杆疲劳寿命计算:

$$\lg(N) = \frac{12.103 - 3 \cdot \lg(\Delta\sigma_{h,CA})}{1 - 0.18 \cdot \lg\left(\frac{16}{t_0}\right)} = \frac{12.103 - 3 \cdot \lg(61.38 \times 1.35)}{1 - 0.18 \cdot \lg\left(\frac{16}{8}\right)} = 6.71$$

故弦杆疲劳寿命  $N = 10^{6.71} = 5.14 \times 10^6$  (次)

腹杆疲劳寿命计算:

当  $N = 1 \times 10^8$  时, 计算得到腹杆疲劳截止限

$$\lg(\Delta\sigma_{h,L}) = \frac{1}{5}(15.706 - \lg N) + 0.402 \lg\left(\frac{16}{t_1}\right) = 1.78, \text{ 故 } \Delta\sigma_{h,L} = 10^{1.78} = 60 Mpa$$

因腹杆设计热点应力幅  $\Delta\sigma_{h,BA} = 1.35 \times 38.65 = 52.18 Mpa$  小于疲劳截止限  $\Delta\sigma_{h,L} = 60 Mpa$

故腹杆疲劳寿命  $N > 1 \times 10^8$  (次)

综上所述, 该节点疲劳验算通过, 其疲劳寿命预测值为  $5.14 \times 10^6$  次荷载循环, 疲劳失效发生在弦杆部位。