 **CECS XXX:2019**

**中国工程建设协会标准**

**纤维增强复合材料拉挤型材结构技术规程**

**Technical specification for pultruded fiber reinforced polymer composites structure**

（征求意见稿）

前 言

根据中国工程建设标准化协会（2016）建标协字第038号文的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准、国外先进标准、国家标准和行业标准，并在广泛征求意见的基础上，编制本标准。

本标准的主要技术内容是：1.总则；2.术语与符号；3.材料；4.基本设计规定；5. 轴心受力构件；6. 受弯、受剪、受扭构件；7.连接节点设计；8.型材混凝土组合梁；9.功能要求设计；附录A.考虑二阶效应的框架结构弹性分析方法；附录B.楼盖和人行天桥舒适度计算。

本标准由中国工程建设标准化协会负责管理，由清华大学、中冶建筑研究总院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送清华大学（地址：北京市海淀区清华大学土木工程系，邮编：100086；邮箱：wyw16@mails.tainghua.edu.cn）。

本标准主编单位： 清华大学

 中冶建筑研究总院有限公司

本标准参编单位：

 本标准主要起草人员：

本标准主要审查人：

目 次

[1 总则 3](#_Toc8113122)

[2 术语与符号 4](#_Toc8113123)

[2.1 术语 4](#_Toc8113124)

[2.2 符号 4](#_Toc8113125)

[3 材料 8](#_Toc8113126)

[3.1 一般规定 8](#_Toc8113127)

[3.2 纤维 8](#_Toc8113128)

[3.3 基体 8](#_Toc8113129)

[3.4 拉挤型材 8](#_Toc8113130)

[3.5 连接材料 11](#_Toc8113131)

[4 基本设计规定 12](#_Toc8113132)

[4.1 设计原则 12](#_Toc8113133)

[4.2 承载能力极限状态规定 12](#_Toc8113134)

[4.3 正常使用极限状态规定 13](#_Toc8113135)

[4.4 疲劳计算 13](#_Toc8113136)

[4.5 功能性设计原则 14](#_Toc8113137)

[5 轴心受力构件 15](#_Toc8113138)

[5.1 轴心受拉构件 15](#_Toc8113139)

[5.2 轴心受压构件 15](#_Toc8113140)

[6 受弯、受剪、受扭构件 21](#_Toc8113141)

[6.1 承载力与变形 21](#_Toc8113142)

[6.2 整体稳定 23](#_Toc8113143)

[6.3 受弯局部稳定 24](#_Toc8113144)

[6.4 受剪局部稳定 26](#_Toc8113145)

[6.5 集中荷载计算 27](#_Toc8113146)

[6.6 组合受力计算 28](#_Toc8113147)

[7 连接节点设计 30](#_Toc8113148)

[7.1螺栓连接节点设计 30](#_Toc8113149)

[7.2胶层连接节点设计 33](#_Toc8113150)

[7.3 胶栓混合连接节点设计 34](#_Toc8113151)

[8 型材混凝土组合梁 35](#_Toc8113152)

[8.1 一般规定 35](#_Toc8113153)

[8.2 受弯承载力计算 36](#_Toc8113154)

[8.3 受剪承载力计算 38](#_Toc8113155)

[8.4 界面连接 38](#_Toc8113156)

[8.5 组合梁的挠度计算 39](#_Toc8113157)

[8.6 构造要求 40](#_Toc8113158)

[9 功能要求设计 41](#_Toc8113159)

[9.1 防腐、耐候设计 41](#_Toc8113160)

[9.2 热工设计 41](#_Toc8113161)

[9.3 绝缘设计 41](#_Toc8113162)

[9.4 耐火设计 41](#_Toc8113163)

[9.5 耐磨设计 41](#_Toc8113164)

[10 施工与检验 42](#_Toc8113165)

[10.1 一般规定 42](#_Toc8113166)

[10.2 工厂拼装 42](#_Toc8113167)

[10.3 现场连接 43](#_Toc8113168)

[10.4 表面涂装 43](#_Toc8113169)

[11 验收与维护 45](#_Toc8113170)

[11.1 一般规定 45](#_Toc8113171)

[11.2 验收 45](#_Toc8113172)

[11.3 维护 48](#_Toc8113173)

[附录A 考虑二阶效应的框架结构弹性分析方法 49](#_Toc8113174)

[附录B 楼盖和人行天桥舒适度计算 50](#_Toc8113175)

[本标准用词说明 51](#_Toc8113176)

[引用标准名录 52](#_Toc8113177)

[条文说明 53](#_Toc8113178)

# 1 总则

**1.0.1** 为了保证纤维增强复合材料拉挤型材在建设工程应用过程中的安全性、适用性和经济性，制订本标准。

**1.0.2** 本规程适用于建筑、桥梁、电力、化工等行业中用于承力结构的纤维增强复合材料拉挤型材结构。

**1.0.3**本规程按国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153规定的原则制定。符号、计量单位和基本术语按现行国家标准《建筑结构术语和符号标准》 GB/T 50083的规定采用。

**1.0.4** 纤维增强复合材料拉挤型材结构除应执行本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

# 2 术语与符号

## 2.1 术语

**2.1.1** 纤维增强复合材料拉挤型材 pultruded fiber reinforced polymer composites profile

采用拉挤工艺生产，具有恒定截面形状的纤维增强复合材料产品。

**2.1.2** 纵向 longitudinal direction

在拉挤型材中，与拉挤成型的牵引方向相同的方向。

**2.1.3** 横向 transverse direction

在有积层结构的FRP型材中，与纵向垂直且与积层平行的方向；在无积层结构的FRP型材中，与纵向垂直的方向。

**2.1.4**  玻璃纤维 glass fiber

一般指硅酸盐熔体制成的玻璃态纤维或丝状物。

**2.1.5** 增强材料 reinforcement

 加入基体中能使其力学性能显著提高的材料，也称增强体。

**2.1.6**  毡 mat

由短切或不短切的连续纤维原丝定向或不定向地结合在一起的平面结构制品。

**2.1.7** 基体 matrix

复合材料中起粘结作用的连续相。

**2.1.8**  树脂 resin

一种具有不同的、较高相对分子量的固态、半固态或假固态、有时也可以是液态的有机物质。通常有一个软化或熔融的范围，当受力作用时有流动倾向。广义上惯指作为复合材料基体使用的聚合物。

**2.1.9** 填料 filler

为改善性能或降低成本而加入树脂中，有相对惰性的固体物质。

**2.1.10** 树脂含量 resin content

树脂体积或质量所占总体积或总质量百分比。

**2.1.11**  纤维含量 fiber content

纤维体积或质量所占总体积或总质量百分比。

## 2.2 符号

**2.2.1**  作用和作用效应

*N*——构件所承受的轴向力设计值；

*Ncr1*——构件整体稳定极限承载力；

*Ncr2*——构件局部稳定极限承载力；

*n*——应力循环次数；

$M$——弯矩设计值；

$M\_{r}$——发生材料破坏时的抗弯承载力设计值。

$M\_{cr1}$——整体稳定的抗弯承载力设计值；

$M\_{cr2}$——局部稳定的抗弯承载力设计值；

*N*——集中荷载下的计算截面承载力设计值；

$N\_{1}$——集中荷载下的计算截面腹板受拉承载力；

$N\_{2}$——集中荷载下的计算截面腹板断裂承载力；

$N\_{3}$——集中荷载下的计算截面腹板受压屈曲承载力；

$N\_{4}$——集中荷载下的计算截面翼缘受弯承载力。

**2.2.2** 材料性能和抗力

*f*fd——纤维增强复合材料拉挤型材抗拉强度设计值；

*f*fk——纤维增强复合材料拉挤型材抗拉强度标准值；

*γ*f ——纤维增强复合材料拉挤型材材料分项系数；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数；

*Tg*——纤维增强复合材料玻璃化温度；

*γ*0——纤维增强复合材料拉挤型材结构重要性系数；

*fLc*——构件抗压强度设计值；

$E\_{L}^{c}$——纵向压缩弹性模量；

$E\_{T}^{c}$——横向压缩弹性模量；

$G\_{LT}$——面内剪切模量；

$E\_{L,w}^{c}$——腹板纵向压缩弹性模量；

$E\_{T,w}^{c}$——腹板横向压缩弹性模量；

$F\_{L,f}$——翼缘的纵向强度设计值；

$F\_{L,w}$——腹板的纵向强度设计值；

$E\_{L,f}$——翼缘的纵向弹性模量标准值；

$E\_{L,w}$——腹板的纵向弹性模量标准值；

$v\_{LT}$——泊松比；

$f\_{θ}^{br}$——在设计荷载下的螺孔承压强度；

$f\_{t}$——胶层材料受拉强度设计值；

$f\_{nt}$——螺栓材料的抗拉强度设计值；

$f\_{nv}$——螺栓材料的抗剪强度设计值；

$f\_{v}$——胶层材料受剪强度设计值。

**2.2.3** 几何参数

*An*——构件净截面面积；

$A\_{g}$——构件全截面面积；

*n*——同一排螺栓孔数目；

*s*——两个连续螺栓孔的纵向中心到中心的距离；

*g*——两个连续螺栓孔的横向中心到中心的距离；

$d\_{n}$——螺孔直径；

$r\_{x}$*、*$r\_{y}$——构件绕X轴、Y轴的回转半径；

$D$——圆管外径；

$I$——构件绕弯曲轴的惯性矩；

$I\_{t}$——全截面抗扭惯性矩；

$I\_{f}$——翼缘绕弯曲轴的惯性矩；

$I\_{w}$——腹板绕弯曲轴的惯性矩；

$e\_{0}$——截面形心到剪切中心的距离；

$y$——中性轴到构件边缘纤维的距离；

$b\_{f}$——翼缘宽度；

$t\_{f}$——翼缘厚度；

$h\_{w}$——腹板高度；

$t\_{w}$——腹板厚度；

$L$——跨度或悬臂端长度；

$A\_{b}$——胶层面积。

*x*n－ 型材混凝土组合梁截面中性轴距梁顶面的高度；

*x* － 组合梁有效受压区高度；

－ 组合梁截面形心轴至梁顶面的距离；

－ 组合梁混凝土翼板截面形心轴至梁截面形心轴的距离；

－ 组合梁混凝土翼板截面形心轴至梁顶面的距离。

**2.2.4** 计算系数

*k*——有效截面折减系数；

$λ$——有效长细比；

$β\_{w}$——截面各部分板的宽度/厚度比。

$b$——截面宽度；

$t$——截面厚度；

*C*、*β*——疲劳计算参数；

$K\_{op}$——开孔系数；

$φ\_{θ}$——螺栓连接受力方向系数；

 ——剪力连接件粘接连接影响系数；

——拉挤型材构件顶板和底板1/2高度处的正应变，受拉为正；

——拉挤型材构件顶板沿梁纵向的抗压极限应变设计值和抗拉极限应变设计值；

——拉挤型材构件底板沿梁纵向的抗压极限应变设计值和抗拉极限应变设计值，最大不超过0.01。

——计算区段内弯矩最大截面的拉挤型材构件顶板和底板1/2高度处的正应变。

*ε*1——混凝土翼板受压区等效矩形应力系数；

 ——混凝土翼板的极限压应变。

# 3 材料

## 3.1 一般规定

**3.1.1** 本标准涉及的材料包括用于增强材料的纤维，用于基体材料的树脂，纤维增强复合材料拉挤型材和连接材料等。

**3.1.2**  纤维增强复合材料拉挤型材及其原材料的选用，应符合下列规定：

 **1** 选用的材料应适用于介质环境，并实现设计功能要求；

 **2**  力学性能与耐久性应保证运行安全，并满足设计使用年限要求；

 **3**  应具有质量合格证等证明文件。

**3.1.3** 纤维增强复合材料拉挤型材所用的增强材料应采用与树脂系统化学性能相匹配的浸润剂。

## 3.2 纤维

**3.2.1**  纤维增强复合材料拉挤型材所用增强材料，应选用无碱玻璃纤维及其制品，玄武岩纤维及其制品和碳纤维及其制品，并符合国家标准规定。当选用其他类型增强材料时，其材料性能应符合相关标准规定。

## 3.3 基体

**3.3.1** 纤维增强复合材料拉挤型材所采用的树脂，应采用环氧树脂、乙烯基酯树脂、聚氨酯树脂、酚醛树脂、不饱和聚酯树脂以及经验证满足使用要求的供需双方商定的其它类树脂。

**3.3.2** 基体中添加颜料、染料、着色剂或填料时，应不影响纤维增强复合材料拉挤型材力学性能和耐腐蚀性能。有阻燃要求的，树脂中可添加阻燃剂；室外使用的纤维增强复合材料拉挤型材，树脂中宜添加紫外线吸收剂。

## 3.4 拉挤型材

**3.4.1** 除有特殊要求外，纤维增强复合材料拉挤型材横截面上计入受力面积的部分任一壁厚不应小于3.0mm；外观和尺寸偏差应满足《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T 31539的相关要求。

**3.4.2** 纤维增强复合材料拉挤型材截面拐角处应尽可能做成倒角形式，以减小集中受力，同时应避免拐角处纤维断裂、富胶等缺陷的不利影响。

**3.4.3**  纤维增强复合材料拉挤型材物理性能应满足表3.4.3的要求。

表3.4.3 物理性能要求

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 要求 | 测试方法 | 最少测试样条数 |
| 1 | 巴柯尔硬度 | ≥50 | GB/T 3854 | 5 |
| 2 | 纤维体积含量/% | ≥40 | GB/T 2577 | 5 |
| 3 | 树脂不可溶份含量/% | ≥90 | GB/T 2576 | 5 |
| 4 | 吸水率/% | ≤0.6 | GB/T 1462 | 5 |
| 5 | 玻璃化温度Tg/°C | ≥80且高于结构最高平均温度20℃ | GB/T 22567方法C进行测试 | 5 |

**3.4.4**  纤维增强复合材料拉挤型材的力学性能指标中，各项强度的标准值应具有95%的保证率，各项弹性模量应取平均值。

**3.4.5**  纤维增强复合材料拉挤型材力学性能要求分为三个等级：M17、M23和M30。各等级的型材应满足表3.4.5中的相应要求；相关力学性能可通过试验进行确定，或以规定中要求的最小值作为标准值。

表3.4.2 力学性能要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 要求 | 测试方法 |
| M30级 | M23级 | M17级 |
| 1 | 纵向拉伸强度/ MPa | ≥400 | ≥300 | ≥200 | GB/T 1447 |
| 2 | 横向拉伸强度/ MPa | ≥45 | ≥55 | ≥45 |
| 3 | 纵向拉伸弹性模量/ GPa | ≥30 | ≥23 | ≥17 |
| 4 | 横向拉伸弹性模量/ GPa | ≥7 | ≥7 | ≥5 |
| 5 | 纵向压缩强度/ MPa | ≥300 | ≥250 | ≥200 | GB/T 1448 |
| 6 | 横向压缩强度/ MPa | ≥70 | ≥70 | ≥70 |
| 7 | 纵向压缩弹性模量/ GPa | ≥25 | ≥20 | ≥15 |
| 8 | 横向压缩弹性模量/ GPa | ≥7 | ≥7 | ≥5 |
| 9 | 纵向弯曲强度/ MPa | ≥400 | ≥300 | ≥200 | GB/T 1449 |
| 10 | 横向弯曲强度/ MPa | ≥80 | ≥100 | ≥70 |
| 11 | 层间剪切强度/ MPa | ≥28 | ≥25 | ≥20 | GB/T 1450.1 |
| 11 | 纵向螺栓挤压强度/ MPa | ≥180 | ≥150 | ≥100 | GB/T 30968.1 |
| 13 | 横向螺栓挤压强度/ MPa | ≥120 | ≥100 | ≥70 |
| 14 | 螺钉拔出承载力/kN | ≥*kt*/3 | ≥*kt*/3 | ≥*kt*/3 | GB/T 31539附录A进行测试 |

注：螺钉拔出承载力中，t为试件厚度，单位为mm；k为系数，k=1 kN/mm。

**3.4.6** 纤维增强复合材料拉挤型材的强度设计值应按下式确定：

$f\_{fd}=\frac{f\_{fk}}{γ\_{f}γ\_{e}γ\_{T}}$ (3.4.6)

式中：*f*fd——纤维增强复合材料拉挤型材抗拉强度设计值；

*f*fk——纤维增强复合材料拉挤型材抗拉强度标准值；

*γ*f ——纤维增强复合材料拉挤型材材料分项系数，取1.25；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按表3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数，当结构最高平均温度低于(Tg-20)℃时，温度影响系数*γ*T取1.0；当结构最高平均温度高于Tg℃时，受拉强度对应的温度影响系数*γ*T取1.6，受剪和受压强度对应的温度影响系数*γ*T取6；当结构最高平均温度在(Tg-20)℃-Tg℃之间时，*γ*T采用线性内插求得；

Tg——纤维增强复合材料玻璃化温度。

表3.4.6 纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数*γ*e

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境条件 | 复材类型 | *γ*e |
| 室内环境 | 碳纤维复材（CFRP） | 1.0 |
| 玻璃纤维复材（GFRP） | 1.25 |
| 一般室外环境 | 碳纤维复材（CFRP） | 1.1 |
| 玻璃纤维复材（GFRP） | 1.4 |
| 干湿循环环境，浸水环境海洋环境，侵蚀性环境 | 碳纤维复材（CFRP） | 1.2 |
| 玻璃纤维复材（GFRP） | 1.6（强碱环境中取2.0） |

**3.4.7**  全截面压缩性能应满足《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T 31539的相关要求，获得的全截面压缩极限承载力与横截面积之比应大于纵向压缩强度的0.85倍。

**3.4.8**  有耐久性要求的设计，应按照《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T 31539进行相应的耐久性试验。

**3.4.9** 有功能性要求的设计，材料性能应达到设计规定的功能性指标。

**3.4.10** 纤维增强复合材料拉挤型材按照截面形状分为方管、圆管、双槽形、槽形、工字形、角形、T形和异形截面，如图3.4.10所示。

  

（a）方管 （b）圆管 （c）双槽形

   

（d）槽形 （e）工字形 （f）角形 （g）T形

图3.4.10 截面形状示意图

## 3.5 连接材料

**3.5.1**  纤维增强复合材料拉挤型材连接材料包括普通钢螺栓，不锈钢螺栓，非金属螺栓（尼龙，复合材料），胶接材料和其他材料。

**3.5.2**  纤维增强复合材料拉挤型材连接用钢螺栓包括 4.6 级与 4.8 级普通螺栓（C 级螺栓）及 5.6 级与 8.8 级普通螺栓（A级或 B 级螺栓），其性能和质量应符合国家现行标准《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》 GB/T 3098.1的规定。C级螺栓与A级、B级螺栓的规格和尺寸应分别符合国家现行标准《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780与《六角头螺栓》GB/T 5782的规定。

**3.5.3** 纤维增强复合材料拉挤型材连接用不锈钢螺栓性能和质量应符合国家现行标准GB/T 3098.6《紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱》的规定。

**3.5.4**  纤维增强复合材料拉挤型材连接用非金属螺栓的性能应根据试验确定，其抗拉强度不低于200 Mpa，抗剪强度不低于40 MPa。

**3.5.5** 纤维增强复合材料拉挤型材连接用胶接材料应与复合材料拉挤型材的树脂相匹配，其拉伸强度应大于25MPa。

**3.5.6** 纤维增强复合材料拉挤型材连接用其他材料应满足相应设计要求。

# 4 基本设计规定

## 4.1 设计原则

**4.1.1**  除疲劳计算外，本规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法。

**4.1.2**  纤维增强复合材料拉挤型材结构应按下列承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计：

 **1** 承载能力极限状态：构件和连接的强度破坏、疲劳破坏和因过度变形而不适于继续承载，结构和构件丧失稳定，结构转变为机动体系和结构倾覆。

 **2** 正常使用极限状态：影响结构、构件和非结构构件正常使用或外观的变形，影响正常使用的振动，影响正常使用或耐久性能的局部损坏。

**4.1.3**  建筑结构的内力按结构静力学方法进行弹性分析，不考虑型材结构的塑性发展，但应充分考虑材料的各向异性对构件内力和变形的影响；可对型材的截面构造形式、铺层方式等进行专门设计，以满足不同部位不同受力状况的需求。

**4.1.4**  应根据结构的侧移状态，合理判断是否考虑二阶效应对内力和变形的影响。当考虑二阶效应对弯矩和位移造成的增量不超过10%时，可不考虑二阶效应。当需要考虑二阶效应时，可采用结构二阶弹性分析的方法获得构件内力，或按附录A的方法，在结构一阶弹性分析的基础上进行调整得到构件内力。

**4.1.5**  结构的计算模型和基本假定应与构件连接的实际性能相符合，节点连接应充分考虑刚接、铰接或半刚接模型的实现，合理选用栓接或其它连接形式，宜采用胶栓混接连接方式。

**4.1.6**  纤维增强复合材料拉挤型材结构设计时，荷载的标准值、荷载分项系数、荷载组合系数、动力荷载的动力系数及荷载组合等，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009的规定采用。

**4.1.7** 碳纤维增强复合材料拉挤型材容重取1.7，玻璃纤维增强复合材料拉挤型材容重取1.9。

## 4.2 承载能力极限状态规定

**4.2.1**  设计纤维增强复合材料拉挤型材结构时，应根据结构破坏可能产生的后果，采用不同的安全等级。结构重要性系数*γ*0按表4.2.1选取。

表4.2.1 纤维增强复合材料拉挤型材结构重要性系数*γ*0

|  |  |
| --- | --- |
| 一级或100年 | ≥1.1 |
| 二级或50年 | ≥1.05 |
| 三级或25年 | ≥1.0 |
| 临时建筑或5年以下 | ≥0.9 |

**4.2.2** 计算结构或构件的强度、稳定性以及连接的强度时，应采用荷载设计值（荷载标准值乘以荷载分项系数）；计算疲劳时，应采用荷载标准值。

**4.2.3** 对于直接承受动力荷载的结构，在计算强度和稳定性时，动力荷载设计值应乘以动力系数。

## 4.3 正常使用极限状态规定

**4.3.1** 长期荷载组合作用下，复材构件中的最大等效应力与其材料强度标准值之比，碳纤维复材不应超过0.7，玄武岩纤维复材不应超过0.5，玻璃纤维复材不应超过0.3。

**4.3.2** 应分别验算荷载标准组合下的短期变形和准永久组合下的长期变形，并以其中的较大值作为依据。不应超过表4.3.2规定的限值。桥梁的水平构件应根据具体使用要求确定。

表4.3.2 受弯构件的挠度限值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 构件类型 | 容许值 |
| 1 | 主要构件 | 1/250  |
| 2 | 次要构件 | 1/200 |

**4.3.3** 构件长期变形需考虑不同使用年限的长期作用影响进行放大，变形放大系数如表4.4.3所示。

表4.4.3 不同设计使用年限下的变形放大系数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 设计使用年限 | 变形放大系数 |
| 1 | 5 | 1.25 |
| 2 | 25 | 1.4 |
| 3 | 50 | 1.5 |
| 4 | 100 | 1.6 |

**4.3.4**为改善外观和使用条件，可将水平构件预先起拱，起拱大小应视实际需要而定，宜为恒载标准值加1/2活载标准值所产生的挠度值。构件挠度可取在恒载和活载标准值作用下的挠度计算值减去起拱值。

**4.3.5**在风荷载和多遇地震作用下，结构层间位移角不宜超过1/250。

**4.3.6**对纤维增强复合材料拉挤型材的楼盖和人行天桥应进行竖向自振频率验算。楼盖结构和人行桥的竖向振动频率不宜小于3Hz，也可根据附录B中的方法确定加速度峰值和满足舒适度要求的限值。

**4.3.7**纤维增强复合材料拉挤型材受弯构件的变形验算可不考虑栓接开孔引起的截面削弱。

**4.3.8**构件变形和结构侧移需考虑弯曲和剪切的双重影响。

## 4.4 疲劳计算

**4.4.1** 对于结构框架、屋面及外饰面，不考虑风和地震荷载作用下的疲劳影响动荷载。有以下情况时需进行疲劳计算：

 1 峰值应力超过材料强度设计值的15%时；

 2 疲劳荷载超过总荷载40%时；

 3 构件应力变化在设计使用年限内超过4000次。

**4.4.2** 采用容许应力幅法进行疲劳计算，应力按弹性计算方法确定，容许应力幅Δσ应按下式计算。下式同时适用于容许正应力幅和剪应力幅的计算。

$$\left[Δσ\right]=\left(\frac{C}{n}\right)^{1/β}$$

式中：*n*——应力循环次数；

*C*、*β*——疲劳计算参数，按根据构件和连接类型按表4.4.2采用。

表4.4.2 疲劳计算参数C、β

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 构件和连接类别 | *β* | *C* |
| 1 | 远离凹角或紧固部位的平直构件 | 8.5 | 10.0 |
| 2 | 螺栓连接的开孔（净）截面疲劳承载力设计，此时合力集中作用于紧固部位 | 8.5 | 0.6 |
| 3 | 除2以外的螺栓连接的开孔（净）截面疲劳设计，以及支架、加劲肋的疲劳设计 | 8.5 | 0.08 |
| 4 | 其它 | 8.5 | 0.01 |

**4.4.3** 连接节点的螺栓疲劳计算应根据《钢结构设计规范》（GB 50017）。

## 4.5 功能性设计原则

**4.5.1** 可根据功能性需求，对型材的防腐、热工、绝缘、耐火性能进行专门设计。在同时进行多种功能性设计时，应对不同功能性设计导致的型材受力性能衰减进行叠加。

**4.5.2** 功能性设计时，功能性指标应满足相应标准规定。

# 5 轴心受力构件

## 5.1 轴心受拉构件

**5.1.1** 轴心受拉构件的受力应满足以下公式：

$N\leq 0.8f\_{L}^{t}kA\_{n}$ (5.1.1)

式中：*N*——构件所承受的轴向拉力设计值；

*fLt*——构件抗拉强度设计值；

*k*——有效截面折减系数。对于不带孔截面，k取1.0，对于带孔截面，k取0.7；

*An*——构件净截面面积，其具体计算方法见5.1.2；

**5.1.2** 对于带孔构件，其净截面面积An应按如下规定确定：

**1** 净截面面积不应小于0.75倍全截面面积；对于螺栓连接，计算An时螺栓孔直径取值应增加1.6mm；

**2** 对于对角线开孔或锯齿状开孔的构件（如图），在计算净界面面积An时，截面净宽度应从截面总宽度中扣除所有螺栓孔直径的总和，并加上(n-1)倍的s2/4g。



（a）锯齿状开孔 （b）对角线开孔

图5.1.2 截面开孔示意图（沿水平方向受力）

式中：n——具有横向间距的螺栓孔数目；

s——两个连续螺栓孔的纵向中心到中心的距离；

g——两个连续螺栓孔的横向中心到中心的距离。角钢相邻肢中螺栓孔的横向间距g应该取角钢外轮廓中心到中心距离并减去角钢的厚度。

**5.1.3** 轴心受拉构件的长细比L/R不得超过300，L为构件有效长度，应取构件横向支撑之间中心至中心距离，R为截面弱轴的回转半径。

## 5.2 轴心受压构件

**5.2.1** 轴心受压构件的受力应满足以下公式：

$N\leq min\{N\_{s},N\_{cr1},N\_{cr2}\}$ (5.2.1-1)

$N\_{s}=0.8f\_{L}^{c}kA\_{n}$ (5.2.1-2)

式中：N——构件所承受的轴向压力；

Ns——构件全截面抗压极限承载力；

Ncr1——构件整体稳定极限承载力；

Ncr2——构件局部稳定极限承载力；

fLc——构件抗压强度设计值；

An——构件净截面面积，其具体计算方法见5.1.2；

k——有效截面折减系数，对于不带孔截面，$k$取1.0，对于带孔截面，$k$取0.7。

**5.2.2**  恒载标准值引起的轴向应力不应超过0.2倍欧拉应力。

**5.2.3** 矩形管及方管截面整体稳定极限承载力Ncr1和局部稳定极限承载力Ncr2应按以下公式计算：

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ^{2}}A\_{g}$ (5.2.3-1)

$N\_{cr2}=0.22\frac{\sqrt{E\_{L,w}^{c}E\_{T,w}^{c}}+v\_{LT}E\_{T,w}^{c}+2G\_{LT}}{γ\_{f}γ\_{e}β\_{w}^{2}}A\_{g}$ (5.2.3-1)

式中：$λ$——有效长细比=KL / r，取各对称轴方向对应的最大值；

Ag——构件全截面面积；

$E\_{L}^{c}$——截面各部分纵向压缩弹性模量的较小值；

$E\_{L,w}^{c}$——截面各部分板纵向压缩弹性模量；

$E\_{T,w}^{c}$——截面各部分板在横向压缩弹性模量；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值；

$G\_{LT}$——面内剪切模量；

$v\_{LT}$——截面轴心受压时的泊松比；

$β\_{w}$——截面各部分板的宽度/厚度比。

**5.2.4** 圆管截面整体稳定极限承载力Ncr1和局部稳定极限承载力Ncr2应按以下公式计算：

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ^{2}}A\_{g}$ (5.2.4-1)

$N\_{cr2}=0.8\frac{\sqrt{\frac{2}{3}G\_{LT}\sqrt{E\_{L}^{c}E\_{T}^{c}}}}{γ\_{f}γ\_{e}∙\frac{D}{2t}}A\_{g}\leq 0.8\frac{\sqrt{\frac{E\_{L}^{c}E\_{T}^{c}}{3}}}{γ\_{f}γ\_{e}∙\frac{D}{2t}}A\_{g}$ (5.2.4-2)

式中：$λ$——有效长细比=KL / r；

$A\_{g}$——构件全截面面积；

$E\_{L}^{c}$——纵向压缩弹性模量；

$E\_{T}^{c}$——横向压缩弹性模量；

$G\_{LT}$——面内剪切模量；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值；

$D$——圆管外径；

$t$——圆管壁厚。

**5.2.5** 双槽型拼接截面整体稳定极限承载力Ncr1应按以下公式计算：

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ^{2}}A\_{g}$ (5.2.5)

式中：$λ$——有效长细比=KL / r，取拼接截面X轴（平行于翼缘方向）和Y轴（平行于腹板方向）长细比最大值；

$E\_{L}^{c}$——拼接截面各部分纵向压缩弹性模量的较小值；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值；

$A\_{g}$——构件全截面面积。

**5.2.6** 双角形拼接截面整体稳定极限承载力Ncr1应为式5.2.5-1和式5.2.5-2中的较小值：

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ^{2}}A\_{g}$ (5.2.5-1)

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ\_{yz}^{2}}A\_{g}$ (5.2.5-2)

等边双角形截面拼接：

$λ\_{y}>λ\_{z}$时，

$$λ\_{yz}=λ\_{y}[1+0.16(\frac{λ\_{z}}{λ\_{y}})^{2}]$$

$λ\_{y}\leq λ\_{z}$时，

$$λ\_{yz}=λ\_{y}[1+0.16(\frac{λ\_{z}}{λ\_{y}})^{2}]$$

$$λ\_{z}=3.9\frac{b}{t}$$

长肢相并的不等边角形截面拼接：

$λ\_{y}>λ\_{z}$时，

$$λ\_{yz}=λ\_{y}[1+0.25(\frac{λ\_{z}}{λ\_{y}})^{2}]$$

$λ\_{y}\leq λ\_{z}$时，

$$λ\_{yz}=λ\_{y}[1+0.25(\frac{λ\_{z}}{λ\_{y}})^{2}]$$

$$λ\_{z}=5.1\frac{b\_{2}}{t}$$

短肢相并的不等边角形截面拼接：

$λ\_{y}>λ\_{z}$时，

$$λ\_{yz}=λ\_{y}[1+0.06(\frac{λ\_{z}}{λ\_{y}})^{2}]$$

$λ\_{y}\leq λ\_{z}$时，

$$λ\_{yz}=λ\_{y}[1+0.06(\frac{λ\_{z}}{λ\_{y}})^{2}]$$

$$λ\_{z}=3.7\frac{b\_{2}}{t}$$

式中：$λ$——有效长细比=KL / r，取X轴（垂直于对称轴方向）和Y轴（平行于对称轴方向）长细比最大值；

$A\_{g}$——构件全截面面积；

$E\_{L}^{c}$——拼接截面各部分纵向压缩弹性模量的较小值；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值；

$λ\_{yz}$——拼接截面弯扭屈曲状态等效长细比；

$λ\_{y}$、$λ\_{z}$——拼接截面对Y轴、Z轴（垂直于截面方向）的长细比

b——等边角形截面单肢宽度；

$b\_{2}$——不等边角形截面短肢长度；

t——角形截面单肢厚度。

**5.2.7** 等边角形截面整体稳定极限承载力Ncr1和局部稳定极限承载力Ncr2应按以下公式计算：

$N\_{cr2}=0.8\frac{G\_{LT}}{γ\_{f}γ\_{e}(\frac{b}{t})^{2}}A\_{g}$ (5.2.7-1)

 $N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ\_{x}^{2}}A\_{g}$ (5.2.7-2)

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ\_{yz}^{2}}A\_{g}$(5.2.7-3)

其中

$$λ\_{yz}=\frac{1}{\sqrt{2}}[\left(λ\_{y}^{2}+λ\_{z}^{2}\right)^{2}+\sqrt{\left(λ\_{y}^{2}+λ\_{z}^{2}\right)^{2}-4\left(1-\frac{e\_{0}^{2}}{r\_{0}^{2}}\right)λ\_{y}^{2}λ\_{z}^{2}}]^{\frac{1}{2}}$$

$$λ\_{z}^{2}=\frac{25.7r\_{0}^{2}A\_{g}}{I\_{t}}$$

$$r\_{0}^{2}=e\_{0}^{2}+r\_{x}^{2}+r\_{y}^{2}$$

$$I\_{t}=\frac{1}{3}\sum\_{}^{}b\_{i}t\_{i}^{3}$$

式中：$G\_{LT}$——面内剪切模量；

$b$——角形截面单肢长度；

$t$——角形截面厚度；

$E\_{L}^{c}$——角形截面两肢纵向压缩弹性模量的较小值；

$λ\_{x}$——构件绕X轴（垂直角分线方向）方向的有效长细比；

$A\_{g}$——构件全截面面积；

$λ\_{yz}$——截面弯扭屈曲等效长细比；

$λ\_{y}$、$λ\_{z}$——截面对Y轴（角分线方向）、Z轴（垂直于截面方向）的长细比；

$r\_{0}$——截面对剪切中心的极回转半径；

$r\_{x}$、$r\_{y}$——构件绕X轴、Y轴的回转半径；

$e\_{0}$——截面形心到剪切中心的距离；

$I\_{t}$——全截面抗扭惯性矩；

$b\_{i}$、$t\_{i}$——截面中第i个矩形条的长度、厚度；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值。

**5.2.8** 对于工字型截面，其整体稳定极限承载力$N\_{cr1}$和局部稳定极限承载力$N\_{cr2}$应按以下公式计算：

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ^{2}}A\_{g}$ (5.2.8-1)

$N\_{cr2}=0.8\frac{G\_{LT}}{γ\_{f}γ\_{e}(\frac{b\_{f}}{2t\_{f}})^{2}}A\_{g}$ (5.2.8-2)

$N\_{cr2}=0.22\frac{\sqrt{E\_{L,w}^{c}E\_{T,w}^{c}}+v\_{LT}E\_{T,w}^{c}+2G\_{LT}}{γ\_{f}γ\_{e}(\frac{h\_{w}}{t\_{w}})^{2}}A\_{g}$ (5.2.8-3)

式中：$λ$——有效长细比=KL / r，取X轴（平行于翼缘方向）和Y轴（平行于腹板方向）长细比最大值；

$E\_{L}^{c}$——截面翼缘或腹板纵向压缩弹性模量的较小值；

$G\_{LT}$——面内剪切模量；

$A\_{g}$——构件全截面面积；

$E\_{L,w}^{c}$——腹板纵向压缩弹性模量；

$E\_{T,w}^{c}$——腹板横向压缩弹性模量；

$v\_{LT}$——构件在轴心受压时的腹板泊松比；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值；

$b\_{f}$——翼缘宽度；

$t\_{f}$——翼缘厚度；

$h\_{w}$——腹板高度，取翼缘中心线间距；

$t\_{w}$——腹板厚度。

**5.2.9**  T型截面整体稳定极限承载力$N\_{cr1}$和局部稳定极限承载力$N\_{cr2}$应按以下公式计算：

$N\_{cr2}=0.8\frac{G\_{LT}}{γ\_{f}γ\_{e}(\frac{b\_{f}}{2t\_{f}})^{2}}A\_{g}$ (5.2.9-1)

 $N\_{cr2}=0.8\frac{G\_{LT}}{γ\_{f}γ\_{e}(\frac{h\_{w}}{t\_{w}})^{2}}A\_{g}$ (5.2.9-2)

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ\_{x}^{2}}A\_{g}$ (5.2.9-3)

$N\_{cr1}=\left(\frac{f\_{cry}+f\_{crz}}{2Hγ\_{f}γ\_{e}}\right)[1-\sqrt{1-\frac{4Hf\_{cry}f\_{crz}}{(f\_{cry}+f\_{crz})^{2}}}]A\_{g}$ (5.2.9-4)

其中：

$$f\_{cry}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{λ\_{y}^{2}}$$

$$f\_{crz}=0.7\frac{1}{R\_{p}^{2}}[D\_{J}+D\_{w}(\frac{π}{L})^{2}]$$

$$H=1-\frac{y\_{p}^{2}}{R\_{p}^{2}}$$

$$y\_{p}=\frac{h\_{w}}{2(1+\frac{b\_{f}}{h\_{w}}\frac{t\_{f}}{t\_{w}})}$$

$$R\_{p}^{2}=\frac{1}{b\_{f}t\_{f}+h\_{w}t\_{w}}[\frac{b\_{f}t\_{f}}{12}\left(b\_{f}^{2}+t\_{f}^{2}\right)+h\_{w}t\_{w}\left(\frac{h\_{w}^{2}}{3}+\frac{t\_{w}^{2}}{12}\right)]$$

$$D\_{J}=\frac{G\_{LT}}{3}(b\_{f}t\_{f}^{3}+h\_{w}t\_{w}^{3})$$

$$D\_{w}=E\_{L}(\frac{b\_{f}^{3}t\_{f}^{3}}{144}+\frac{h\_{w}^{3}t\_{w}^{3}}{36})$$

式中：$G\_{LT}$——面内剪切模量；

$b\_{f}$——翼缘宽度；

$t\_{f}$——翼缘厚度；

$h\_{w}$——腹板高度，翼缘中线到腹板底边的距离；

$t\_{w}$——腹板厚度；

$A\_{g}$——构件全截面面积；

$λ\_{x}$、$λ\_{y}$——构件绕X轴（平行于翼缘方向）、Y轴（平行于腹板方向）方向的有效长细比；

$E\_{L}^{c}$——截面翼缘或腹板纵向压缩弹性模量的较小值；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值；

$f\_{cry}$——绕Y轴的弯曲屈曲应力；

$f\_{crz}$——绕Z轴（垂直于截面方向）的扭转屈曲应力；

$D\_{J}$——截面扭转刚度；

$D\_{w}$——截面翘曲刚度。

**5.2.10** 矩形、正方形和圆形实心截面整体稳定极限承载力$N\_{cr1}$应按以下公式计算：

$N\_{cr1}=0.7\frac{π^{2}E\_{L}^{c}}{γ\_{f}γ\_{e}λ^{2}}A\_{g}$ (5.2.3-15)

式中：$λ$—有效长细比=KL / r，取各对称轴方向对应的最大值；

$E\_{L}^{c}$—纵向压缩弹性模量；

*γ*e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

*γ*T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数,，按3.4.6取值；

$A\_{g}$—构件全截面面积。

# 6 受弯、受剪、受扭构件

## 6.1 承载力与变形

**6.1.1** 承受平面内弯曲的构件，抗弯承载力采用以下公式进行承载力验算：

$M\leq M\_{r}$ （6.1.1）

式中：$M$——弯矩设计值；

$M\_{r}$——发生材料破坏时的抗弯承载力设计值。

**6.1.2** 构件发生材料破坏时，其抗弯承载力设计值为：

$M\_{r}=0.65min\left(\frac{F\_{L,f}\left(E\_{L,f}I\_{f}+E\_{L,w}I\_{w}\right)}{y\_{f}E\_{L,f}},\frac{F\_{L,w}\left(E\_{L,f}I\_{f}+E\_{L,w}I\_{w}\right)}{y\_{w}E\_{L,w}}\right)$ （6.1.2）

式中：$F\_{L,f}$——翼缘的纵向强度设计值；

$F\_{L,w}$——腹板的纵向强度设计值；

$E\_{L,f}$——翼缘的纵向弹性模量标准值；

$E\_{L,w}$——腹板的纵向弹性模量标准值；

$I\_{f}$——翼缘绕弯曲轴的惯性矩；

$I\_{w}$——腹板绕弯曲轴的惯性矩；

$y\_{f}$——中性轴到翼缘边缘纤维的距离；

$y\_{w}$——中性轴到腹板边缘纤维的距离；

**6.1.3** 当腹板和翼缘的纵向强度设计值相差不大于15%时，其抗弯承载力设计值为：

$M\_{r}=0.65\frac{F\_{L}I}{y}$ （6.1.3）

式中：$F\_{L}$——构件的纵向强度设计值；

$I$——构件绕弯曲轴的惯性矩；

$y$——中性轴到构件边缘纤维的距离。

**6.1.4** 承受平面内剪力的构件，抗剪承载力采用以下公式进行承载力验算：

$V\leq V\_{r}$ （6.1.4）

式中：$V$——剪力设计值；

$V\_{r}$——发生材料破坏时的抗剪承载力设计值。

**6.1.5** 构件发生材料破坏时，其抗剪承载力设计值为：

$V\_{r}=0.65f\_{LT}A\_{s}$ （7.1.2）

式中：$A\_{s}$——腹板面积；

$f\_{LT}$——面内剪切强度设计值；

**6.1.6** 受扭矩构件的受力应满足以下公式：

$T\leq {0.7f\_{LT}\hat{J}}/{l}$ (7.2.1)

式中：$T$——扭矩设计值；

$f\_{LT}$——面内剪切强度设计值；

$\hat{J}$——圣维南扭转常数，根据表6.1.6确定；

$l$——单位长度，1m。

表6.1.6 截面扭转参数

|  |  |
| --- | --- |
| 截面类型 | 圣维南扭转常数$\hat{J}$ |
| 圆管 | $$\frac{π}{2}(R^{4}-R\_{i}^{4})$$ |
| 方管 | $$\frac{2A^{2}}{{d\_{w}}/{t\_{w}}+{b\_{f}}/{t\_{f}}}$$ |
| 工字截面 | $$\frac{1}{3}(2b\_{f}t\_{f}^{3}+d\_{w}t\_{w}^{3})$$ |

**6.1.7** 受弯构件的挠度计算应考虑弯曲效应引起的挠度db和剪切效应引起的挠度ds，分别按以下公式计算：

构件由于弯曲产生的挠度$d\_{b}$:

$d\_{b}=k\_{1}F\_{V}L^{3}/(E\_{b}I)$ （6.1.7-1）

构件由于剪切产生的挠度$d\_{s}$:

$d\_{s}=k\_{2}F\_{V}L/A\_{w}G\_{b}$ （6.1.7-2）

式中：$E\_{b}I$——全截面弯曲刚度；

$F\_{V}$——梁上的竖向荷载；

$L$——跨度或悬臂端长度；

$k\_{1},k\_{2}$——取决于荷载类型和边界条件的系数，取值见表6.1.4。

表6.1.7 k1, k2系数取值表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 荷载类型及边界条件 | 示意图 | $$k\_{1}$$ | $$k\_{2}$$ |
| 悬臂端承受集中荷载 |  | $$1/3$$ | $$1$$ |
| 悬臂端承受均布荷载 |  | $$1/8$$ | $$1/2$$ |
| 梁端简支，跨中承受集中荷载 |  | $$1/48$$ | $$1/4$$ |
| 梁端简支，满布均布荷载 |  | $$5/384$$ | $$1/8$$ |
| 梁端固结，满布均布荷载 |  | $$1/384$$ | $$1/24$$ |

**6.1.8** 受弯构件的挠度计算应采用构件的全截面挠曲模量$E\_{b}$和全截面剪切模量$G\_{b}$。

如果制造商不提供全截面挠曲模量，则$E\_{b}$应为：

$E\_{b}=E\_{L,f}$ （6.1.8-1）

如果制造商不提供全截面剪切模量，则$G\_{b}$应为:

$G\_{b}=G\_{LT}\frac{A\_{w}}{A}$ （6.1.8-2）

式中：$E\_{L,f}$——翼缘的纵向弹性模量；

$G\_{LT}$——面内剪切模量；

$A$——横截面的总面积；

$A\_{w}$——所有腹板的面积之和。

## 6.2 整体稳定

**6.2.1** 有铺板（各种钢筋混凝土板、钢板以及复合材料板等）密铺在梁的受压翼缘上并与其牢固相连、能阻止梁受压翼缘的侧向位移时，可不计算梁的整体稳定性。

**6.2.2** 除 6.2.1 条所指情况外，受弯构件由于上翼缘受压而引起全截面失稳破坏，其整体稳定性应按公式（6.2.2）计算。

$M\_{u}\leq M\_{cr1}$ （6.2.2）

式中：$M\_{cr1}$——整体稳定的抗弯承载力设计值；

**6.2.3** 在梁构件承受沿轴线变化的弯矩作用时，可用等效弯矩$M\_{eq}$代替弯矩$M\_{u}$进行稳定性验证，等效弯矩按照公式(6.2.3-1)和(6.2.3-2)计算：

$M\_{eq}=1.3M\_{e}$ （6.2.3-1）

$0.75M\_{max}\leq M\_{eq}\leq 1.0M\_{max}$ （6.2.3-2）

式中$M\_{e}$是梁上沿轴线变化弯矩的平均值，$M\_{max}$是其最大值。

**6.2.4** 对于矩形管和方管截面的拉挤型材，其绕强轴弯曲时的整体稳定抗弯承载力标准值按下式进行计算：

$M\_{cr1}=\frac{0.56C\_{b}}{γ\_{e}γ\_{T}}\sqrt{\frac{π^{2}E\_{L,f}I\_{y}D\_{J}}{L\_{b}^{2}}}$ （6.2.4）

式中：$C\_{b}$——跨内无约束的两端有支撑构件的弯矩修正系数，按6.2.6取值。

**e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

**T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数，按3.4.6取值；

$D\_{J}$——矩形截面的扭转刚度，$D\_{J}=4\left[(b\_{f}-t\_{w})(h-t\_{f})\right]^{2}\left(\frac{G\_{LT}}{8}\left(\frac{t\_{f}}{b\_{f}}+\frac{t\_{w}}{h}\right)\right)$；

$E\_{L,f}$——翼缘的纵向弹性模量标准值；

$I\_{y}$——弱轴惯性矩；

$L\_{b}$——受压翼缘侧向约束点之间的长度或约束横截面扭转的两个相邻支撑点之间的长度。

**6.2.5** 对于工字形截面的拉挤型材，其绕强轴弯曲时的整体稳定抗弯承载力标准值按下式进行计算：

$M\_{cr1}=\frac{0.56C\_{b}}{γ\_{e}γ\_{T}}\sqrt{\frac{π^{2}E\_{L,f}I\_{y}D\_{J}}{L\_{b}^{2}}+\frac{π^{4}E\_{L,f}^{2}I\_{y}C\_{ω}}{L\_{b}^{4}}}$ （6.2.5）

式中：$C\_{b}$——跨内无约束的两端有支撑构件的弯矩修正系数，按6.2.6取值。

**e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

**T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数，按3.4.6取值；

$D\_{J}$——截面的扭转刚度，$D\_{J}=G\_{LT}\sum\_{i}^{}\frac{1}{3}b\_{i}t\_{i}^{3}$，其中“*i*”为截面组成部分的个数；

$C\_{ω}$——翘曲常数，$C\_{ω}=\frac{t\_{f}h^{2}b\_{f}^{3}}{24}$；

**6.2.6** 弯矩修正系数$C\_{b}$计算方式如下：

 **1** 跨内无约束的两端有支撑构件的弯矩修正系数$C\_{b}$按下式计算：

$C\_{b}=\frac{12.5M\_{max}}{2.5M\_{max}+3M\_{A}+4M\_{B}+3M\_{C}}\leq 3.0$ (6.2.6)

式中：$M\_{max}$——无支撑段中最大弯矩的绝对值；

$M\_{A}$——无支撑段的四分之一点的弯矩绝对值；

$M\_{B}$——无支撑段中点的弯矩绝对值；

$M\_{C}$——无支撑段三分之一点的弯矩绝对值。

 **2** 对于自由端未固定的悬臂或突出端，$C\_{b}=1.0$。

 **3** 对于工程应用中的所有情况，允许保守地取$C\_{b}$为1.0；

**6.2.7** 单轴对称构件（C形或T形构件）绕其强轴弯曲时，应进行合理的分析计算保证其整体稳定性能。

## 6.3 受弯局部稳定

**6.3.1** 受弯构件的受压翼缘和腹板若有相邻的刚性构件提供的连续约束，则可不验算受压翼缘和腹板的局部稳定。

**6.3.2** 除 6.3.1 条所指情况外，受弯构件由于平面内压应力导致构件的翼缘或腹板局部失稳引起构件破坏，其局部稳定性应按公式（6.3.2）计算。

$M\leq M\_{cr2}$ （6.3.2）

式中：*M*——弯矩设计值；

$M\_{cr2}$——局部稳定的抗弯承载力设计值；

**6.3.3** 翼缘或腹板局部失稳时，工字型、槽型、T型和矩形管截面局部失稳的抗弯承载力为：

**1** 受压翼缘局部屈曲

$M\_{cr2}=\frac{0.64}{γ\_{e}γ\_{T}}f\_{cr}\frac{E\_{L,f}I\_{f}+E\_{L,w}I\_{w}}{yE\_{L,f}}$ （6.3.3-1）

**2** 腹板局部屈曲

$M\_{cr2}=\frac{0.64}{γ\_{e}γ\_{T}}f\_{cr}\frac{E\_{L,f}I\_{f}+E\_{L,w}I\_{w}}{yE\_{L,w}}$ （6.3.3-2）

**3** 当腹板和翼缘的纵向弹性模量相差不大于15%时，其局部失稳的抗弯承载力为：

$M\_{r}=0.64\frac{f\_{cr}I}{y}$ (6.3.3-3)

式中：**e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按表4.3.3-1取值；

**T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数；

$f\_{cr}$——临界屈曲应力标准值，取（a）受压翼缘局部屈曲和（b）腹板局部屈曲中的较小者，按照6.3.4~6.3.9确定；

$E\_{L,f}$——翼缘的纵向模量标准值；

$E\_{L,w}$——腹板的纵向模量标准值；

$I\_{f}$——翼缘绕弯曲轴的惯性矩；

$I\_{w}$——腹板绕弯曲轴的惯性矩；

$I$——构件绕弯曲轴的惯性矩；

$y$——中性轴到构件边缘纤维的距离；

$E\_{L}$——纵向弹性模量标准值（取拉伸和压缩情况下的较小值）；

$E\_{T}$——横向弹性模量标准值（取拉伸和压缩情况下的较小值）。

**6.3.4**  单轴和双轴对称的工字型形截面绕强轴弯曲时，临界屈曲应力标准值*fcr*按下式计算：

**1** 受压翼缘局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{4t\_{f}^{2}}{b\_{f}^{2}}\left(\frac{7}{12}\sqrt{\frac{E\_{L,f}E\_{T,f}}{1+4.1ξ}}+G\_{LT}\right)$ （6.3.4-1）

式中：

$$ξ=\frac{E\_{L,f}t\_{f}^{3}}{6b\_{f}k\_{r}}$$

$$k\_{r}=\frac{E\_{T,w}t\_{w}^{3}}{6h}\left(1-\left[\left(\frac{48t\_{f}^{2}h^{2}E\_{L,w}}{11.1π^{2}t\_{w}^{2}b\_{f}^{2}E\_{L,f}}\right)\left(\frac{G\_{LT}}{1.25\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}+E\_{T,w}ν\_{LT}+2G\_{LT}}\right)\right]\right)$$

**2** 腹板局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{11.1π^{2}t\_{w}^{2}}{12h^{2}}\left(1.25\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}+E\_{T,w}ν\_{LT}+2G\_{LT}\right)$ （6.3.4-2）

**6.3.5** 单轴对称槽型截面绕强轴弯曲时，临界屈曲应力标准值*fcr*按下式计算：

**1** 受压翼缘局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{t\_{f}^{2}}{b\_{f}^{2}}(\frac{7}{12}\sqrt{\frac{E\_{L,f}E\_{T,f}}{1+4.1ξ}}+G\_{LT})$ （6.3.5）

式中：

$$ξ=\frac{E\_{T,f}t\_{f}^{3}}{6b\_{f}k\_{r}}$$

$$k\_{r}=\frac{E\_{T,w}t\_{w}^{3}}{3h}\left(1-\left[\left(\frac{48t\_{f}^{2}h^{2}E\_{L,w}}{11.1π^{2}t\_{w}^{2}b\_{f}^{2}E\_{L,f}}\right)\left(\frac{G\_{LT}}{1.25\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}+E\_{T,w}ν\_{LT}+2G\_{LT}}\right)\right]\right)$$

**2** 腹板局部屈曲

同式6.3.4-2。

**6.3.6** T形截面和双角形截面绕强轴弯曲时，临界屈曲应力标准值*fcr*按下式计算：

**1** 受压翼缘局部屈曲

同式6.3.4-1。

**2** 腹板局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{4t\_{w}^{2}}{h^{2}}G\_{LT}$ （6.3.6）

**6.3.7**矩形管和方形管截面受弯时，临界屈曲应力标准值*fcr*按下式计算：

**1** 受压翼缘局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{4π^{2}t\_{f}^{2}}{b\_{f}^{2}}\left(\frac{\sqrt{(E\_{L,f}E\_{T,f})(1+4.1ξ)}}{6}+(2+0.62ξ^{2})(\frac{E\_{T,f}ν\_{LT}}{12}+\frac{G\_{LT}}{6})\right)$（6.3.7-1）

其中：

$$ξ=\frac{1}{1+\frac{4E\_{T,f}t\_{f}^{3}}{5b\_{f}k\_{r}}}$$

$$k\_{r}=\frac{E\_{T,w}t\_{w}^{3}}{3h}\left(1-\left[\left(\frac{2t\_{f}^{2}h^{2}E\_{L,f}}{11.1t\_{w}^{2}b\_{f}^{2}E\_{L,f}}\right)\left(\frac{\sqrt{(E\_{L,f}E\_{T,f})}+E\_{T,f}ν\_{LT}+2G\_{LT}}{1.25\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}+E\_{T,w}ν\_{LT}+2G\_{LT}}\right)\right]\right)$$

**2** 腹板局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{11.1π^{2}t\_{w}^{2}}{6h^{2}}\left(1.25\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}+E\_{T,w}ν\_{LT}+2G\_{LT}\right)$ （6.3.7-2）

**6.3.8** 双轴对称工字形截面绕弱轴弯曲时，受压翼缘局部屈曲的临界屈曲应力标准值*fcr*按下式计算：

$f\_{cr}=\frac{4t\_{f}^{2}}{b\_{f}^{2}}G\_{LT}$ （6.3.8）

**6.3.9** 单轴对称槽截面绕弱轴弯曲时，临界屈曲应力标准值*fcr*按下式计算：

**1** 受压翼缘局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{t\_{f}^{2}}{b\_{f}^{2}}G\_{LT}$ （6.3.9-1）

**2** 腹板局部屈曲

$f\_{cr}=\frac{π^{2}t\_{w}^{2}}{6h^{2}}\left(\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}+E\_{T,w}ν\_{LT}+2G\_{LT}\right)$ （6.3.9-2）

## 6.4 受剪局部稳定

**6.4.1** 受剪构件由于平面内剪应力导致构件的腹板局部失稳引起构件破坏，其局部稳定性应按公式（6.3.2）计算。

$V\leq V\_{cr}$ （6.4.1）

式中：*V*——剪力设计值；

$V\_{cr}$——抗剪屈曲承载力设计值；

**6.4.2** 构件在计算截面的抗剪屈曲承载力应按下式计算：

$V\_{cr}=\frac{0.21k\_{LT}E\_{T,w}A\_{s}}{γ\_{e}γ\_{T}λ\_{b}^{2}}$ （7.1.3）

式中：$V\_{cr}$——计算截面的抗剪屈曲承载力；

$k\_{LT}$——受剪屈曲刚度系数，根据6.4.3计算。

$E\_{T,w}$——腹板横向弹性模量；

$A\_{s}$——腹板面积；

**e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

**T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数，按3.4.6取值；

$λ\_{b}$——腹板高厚比；

**6.4.3** 受剪屈曲刚度系数$k\_{LT}$按下式计算：

 当$2G\_{LT}+E\_{T,w}ν\_{LT}\leq \sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}$时，

$k\_{LT}=\sqrt[4]{\frac{E\_{L,w}}{E\_{T,w}}}(8.1+5.0\frac{2G\_{LT}+E\_{T,w}ν\_{LT}}{\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}})$ (7.1.4-1)

 当$2G\_{LT}+E\_{T,w}ν\_{LT}>\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}$时，

$k\_{LT}=\sqrt{ν\_{LT}+\frac{2G\_{LT}}{E\_{T,w}}}∙\left[11.7+1.4\left(\frac{\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}}{2G\_{LT}+E\_{T,w}ν\_{LT}}\right)^{2}\right]$ (7.1.4-2)

式中：$E\_{L,w}$——腹板纵向弹性模量；

$E\_{T,w}$——腹板横向弹性模量；

$G\_{LT}$——面内剪切模量；

$ν\_{LT}$——面内剪切泊松比（缺乏测试数据时，可取$ν\_{LT}=0.3$）；

**6.4.5** 当腹板受剪屈曲承载力不足时，可设置填充材料，提供侧向支撑。当设置填充材料时，需填充整个截面，与腹板和受压翼缘连接牢固。

## 6.5 集中荷载计算

**6.5.1** 构件在集中荷载作用下的承载力，需满足以下公式：

$$N\leq min⁡\{N\_{1}, N\_{2}, N\_{3}, N\_{4}\}$$

式中：$N$——构件在计算截面承受的集中荷载设计值；

$N\_{1}$——集中荷载下的计算截面腹板受拉承载力，根据6.5.2计算；

$N\_{2}$——集中荷载下的计算截面腹板断裂承载力，根据6.5.3计算；

$N\_{3}$——集中荷载下的计算截面腹板受压屈曲承载力，根据6.5.4计算；

$N\_{4}$——集中荷载下的计算截面翼缘受弯承载力，根据6.5.5计算；

**6.5.2** 构件在集中荷载下的计算截面腹板断裂承载力$N\_{1}$按下式计算：

$N\_{1}=0.65l\_{eff}f\_{T,w}t\_{w}$ (6.5.2)

式中：$N\_{1}$——集中荷载下的计算截面腹板受拉承载力；

$l\_{eff}$——集中荷载分布长度，等于腹板高度和加劲肋间距的较小值；

$f\_{T,w}$——腹板受拉强度设计值；

$t\_{w}$——腹板厚度。

**6.5.3** 构件在集中荷载下的计算截面腹板断裂承载力$N\_{2}$按下式计算：

$N\_{2}=0.5ht\_{w}f\_{sh,int}\left(1+\frac{2k+6t\_{w}+b\_{w}}{d\_{w}}\right)$ (6.5.3)

式中：$N\_{2}$——集中荷载下的计算截面腹板断裂承载力；

$h$——构件高度；

$t\_{w}$——腹板厚度；

$f\_{sh}$——层间剪切强度设计值。

$k$——构件顶部与腹板拐角处距离，等于翼缘厚度与圆角半径之和；

$b\_{w}$——腹板在轴线方向上的承载长度，$b\_{w}\leq 100mm$；

$d\_{w}$——腹板高度。

**6.5.4** 构件在集中荷载下的计算截面腹板受压屈曲承载力$N\_{3}$按下式计算：

$N\_{3}=\frac{1.3t\_{w}^{3}}{γ\_{e}γ\_{T}l\_{eff}}\left(\sqrt{E\_{L,w}E\_{T,w}}+E\_{T,w}ν\_{LT}+2G\_{LT}\right)$ (6.5.4)

式中：$N\_{3}$——集中荷载下的计算截面腹板受压屈曲承载力；

$t\_{w}$——腹板厚度；

$l\_{eff}$——集中荷载分布长度，等于腹板高度和加劲肋间距的较小值；

$E\_{L,w}$——腹板纵向压缩模量；

$E\_{T,w}$——腹板横向压缩模量；

$ν\_{LT}$——面内剪切泊松比（缺乏测试数据时，可取$ν\_{LT}=0.3$）；

$G\_{LT}$——面内剪切模量。

**e ——纤维增强复合材料拉挤型材环境影响系数，按3.4.6取值；

**T ——纤维增强复合材料拉挤型材温度影响系数，按3.4.6取值；

**6.5.5** 构件在集中荷载下的计算截面翼缘受弯承载力$N\_{4}$按下式计算：

$N\_{4}=\frac{f\_{T,f}bt\_{f}^{2}}{10l\_{e}}$ (6.5.5)

式中：$N\_{4}$——集中荷载下的计算截面翼缘受弯承载力；

$f\_{T,f}$——翼缘纵向受拉强度设计值；

$t\_{f}$——翼缘厚度；

$l\_{e}$——集中荷载作用点与腹板的距离；

$b$——集中荷载在腹板上的投影宽度（$=2l\_{e}$）。

## 6.6 组合受力计算

**6.6.1** 双轴和单轴对称的拉弯构件应满足下列条件：

 (6.6.1)

式中：*P*u——轴力设计值；

*P*c——轴向受拉承载力设计值；

*M*u——弯矩设计值；

*M*c——抗弯承载力设计值，$M\_{c}=min⁡(M\_{r},M\_{cr1},M\_{cr2})$；

*x*——表示绕强轴弯曲；

*y*——表示绕弱轴弯曲；

**6.6.2** 双轴和单轴对称的压弯构件应满足下列条件：

 (6.6.2)

式中：*P*u——轴力设计值；

*P*c——轴向受压承载力设计值；

*M*u——弯矩设计值；

*M*c——抗弯承载力设计值，$M\_{c}=min⁡(M\_{r},M\_{cr1},M\_{cr2})$；

*x*——表示绕强轴弯曲；

*y*——表示绕弱轴弯曲；

**6.6.3** 闭口截面的扭转组合受力构件应满足下列条件：

$\frac{P\_{u}}{P\_{c}}+\frac{M\_{u}}{M\_{c}}+(\frac{T\_{u}}{T\_{c}})^{2}\leq 1.0$ (6.6.3)

式中：*P*u——轴力设计值；

*P*c——轴向受拉或受压承载力设计值；

*M*u——弯矩设计值；

*M*c——抗弯承载力设计值，$M\_{c}=min⁡(M\_{r},M\_{cr1},M\_{cr2})$；

*T*u——扭矩设计值；

*T*c——受扭承载力设计值；

# 7 连接节点设计

## 7.1螺栓连接节点设计

**7.1.1** 本节设计方法适用于拉挤型材的栓接节点设计。连接形式包括构件间的直接连接和通过连接构件（节点板、角形拉挤型材等）的连接。

**7.1.2** 根据实际工程计算试验后，允许使用复合材料螺栓、复合材料螺杆或连接件。本节设计方法仅适用于钢、不锈钢或铝合金螺栓连接情况。

**7.1.3** 本节设计方法仅适用于螺栓数目在任意平行于受力方向的直线上不大于3个，并且任意垂直于受力方向的直线上不大于3个的情况。当螺栓数目在平行于受力方向的直线上大于3个或者在垂直于受力方向的直线上大于3个时，需进行计算或试验确定承载力。

**7.1.4** 当螺栓节点受拉时，应考虑由于构件轴线不重合导致的面外受力。

**7.1.5** 当连接构件为角形拉挤型材或槽形拉挤型材时，应考虑构件受力偏心，在边缘留有足够空隙。

**7.1.6** 当多构件连接时，构件轴心宜交于一点，当轴心不交于一点时，应考虑偏心的影响。

**7.1.7** 垂直于受力方向的螺栓为同一排螺栓，平行于受力方向的螺栓为同一列螺栓。

**7.1.8** 节点几何尺寸宜满足表7.1.8中规定的最小值。

表7.1.8 螺栓连接节点最小几何尺寸

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 参数 | 定义 | 最小值 |
| e1 | 边缘螺栓与构件末端的间距 | 4d（受拉，单排螺栓）2d（受拉，多排螺栓）2d（受压） |
| e2 | 边缘螺栓与构件侧边的间距 | 1.5d |
| s | 相邻排螺栓间距 | 4d |
| g | 同排螺栓间距 | 4d |
| gs | 螺栓交错时，相邻排螺栓间距在垂直受力方向上的投影 | 2d |
| ls | 斜间距 | 2.8d |

注：(a) 节点尺寸由图7.1.8所示；

(b) d为螺栓公称直径；

(c) 当无法满足表中的最小几何尺寸时，应进行计算或试验分析承载力下降。



受力方向

纤维方向

螺栓排数

**图7.1.8 节点尺寸参数定义**

**7.1.9** 当连接节点为单排螺栓连接时，应根据受力状态，取下列承载力设计值中的最小值：

**1** 螺杆受拉承载力

$N\_{bt, t}=0.75nf\_{nt}A\_{b}$ (7.1.9-1)

**2** 螺杆受剪承载力

$N\_{bt, v}=0.75nf\_{nv}A\_{b}$ (7.1.9-2)

**3** 厚度方向层间剪切承载力

$N\_{tt1}=0.25πnd\_{w}tf\_{sh,tt}$ (7.1.9-3)

**4** 厚度方向面内剪切承载力

$N\_{tt2}=0.2πnd\_{w}tf\_{sh,int}$ (7.1.9-4)

**5** 螺孔承压承载力

$N\_{br}=0.8ntdf\_{θ}^{br}$ (7.1.9-5)

**6** 单螺栓剪切承载力

$N\_{sh}=0.7n(e\_{1}-{d\_{n}}/{2})tf\_{sh}$ (7.1.9-6)

**7** 净截面受拉承载力

$N\_{nt}=\frac{1}{K\_{nt}}(w-nd\_{n})tf\_{L}^{t}$ (7.1.9-7)

式中：$f\_{nt}$——螺栓材料的抗拉强度设计值；

$f\_{nv}$——螺栓材料的抗剪强度设计值；

$A\_{b}$——螺栓有效面积；

$d\_{w}$——垫圈外直径；

*t*——拉挤型材承受厚度方向拉力部位的厚度；

$f\_{sh,tt}$——层间剪切强度；

$f\_{sh,int}$——面内剪切强度。

*d*——螺栓公称直径；

$f\_{θ}^{br}$——在设计荷载下的螺孔承压强度。当受力方向与构件纵向夹角$θ$小于5°时，为纵向受压强度。当受力方向与构件纵向夹角$θ$大于5°时，为横向受压强度。

$d\_{n}$——螺孔直径；

*n*——沿螺栓有效宽度方向的螺栓排数，（$1\leq n\leq 3$）；

$f\_{L}^{t}$——纵向受拉强度；

$f\_{sh}$——面内剪切强度；

*w*——有效宽度，根据7.1.10计算。

$K\_{nt}$——净截面受拉承载力应力集中系数，按下式计算：

$K\_{nt}=2C\_{T}\left(w/d-1.5\frac{\left(w/d-1\right)}{\left(w/d+1\right)}Θ\right)+1$ (7.1.9-8)

$Θ=\left\{\begin{array}{c}1.5-{0.5w}/{e\_{1}} {e\_{1}}/{w}\leq 1\\1 {e\_{1}}/{w}>1\end{array}\right.$ (7.1.9-9)

**7.1.10** 构件有效宽度w应按下式计算：

w=e3+e4+(n-1)g (7.1.10)

式中，e3和e4分别为构件两侧的侧边距e2。当超过3d时，取值为3d（d为螺栓公称直径）。

**7.1.11** 当连接节点为多排螺栓时，不同排螺栓间的荷载分配系数如表7.1.11所示：

表7.1.11 多排螺栓荷载分配系数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 构件材料 | 螺栓排数n | 第一排螺栓承担荷载比例Lbr | 第二排螺栓承担荷载比例 | 第三排螺栓承担荷载比例 |
| FRP/FRP | 2 | 0.5 | 0.5 | - |
| FRP/钢 | 2 | 0.6 | 0.4 | - |
| FRP/FRP | 3 | 0.4 | 0.2 | 0.4 |
| FRP/钢 | 3 | 0.5 | 0.3 | 0.2 |

注：第一排螺栓为距离构件端部最近的螺栓。

**7.1.12** 当连接节点为多排螺栓连接时，应进行7.1.9中的单排螺栓承载力计算，将所得承载力除以第一排螺栓承担荷载比例Lbr，并额外计算下列承载力：

**1** 第一排螺栓净截面受拉承载力

$N\_{nt,f}=0.45\left[\frac{K\_{nt,L}L\_{br}w}{nd}+\frac{K\_{op}(1-L\_{br})}{1-({nd\_{n}}/{w})}\right]^{-1}wtf\_{θ}^{t}$ (7.1.12-1)

**2** 多排螺栓间的剪切承载力

$N\_{sh}=0.6(e\_{1}-\frac{d\_{n}}{2}+s)mtf\_{sh}$ (7.1.12-2)

**3** 块剪切承载力

$N\_{bs}=0.5(A\_{ns}f\_{sh}+φ\_{θ}A\_{nt}f\_{L}^{t})$ (7.1.12-3)

式中：$K\_{nt,L}$——多排螺栓净截面受拉承载力应力集中系数，按下式计算

$K\_{nt,L}=\frac{1}{\left({w}/{nd}\right)-1}(1+0.4(w/d-1.5\frac{({w}/{d}-1)}{({w}/{d}+1)})Θ)$ (7.1.12-4)

$Θ=\left\{\begin{array}{c}1.5-{0.5w}/{e\_{1}} {e\_{1}}/{w}\leq 1\\1 {e\_{1}}/{w}>1\end{array}\right.$ (7.1.12-5)

w——有效宽度，根据7.1.10计算；

$K\_{op}$——开孔系数，$K\_{op}=1.5+0.5(1-{d}/{w})^{3}$；

$f\_{θ}^{t}$——在设计荷载下的受拉强度。当受力方向与构件纵向夹角$θ$小于5°时，为纵向拉伸强度。当受力方向与构件纵向夹角$θ$大于5°时，为横向拉伸强度。

$L\_{br}$——第一排螺栓承担荷载比例，根据7.1.11确定。

$d\_{n}$——螺孔直径；

n——同一排螺栓数量，（$1\leq n\leq 3$）；

m——同一列螺栓数量；

$f\_{L}^{t}$——纵向受拉强度；

$f\_{sh}$——面内剪切强度设计值。

$A\_{ns}$——剪切净截面面积；

$A\_{nt}$——受拉净截面面积；

$φ\_{θ}$——受力方向系数。当受力方向与构件纵向相同时，取值为1。当受力方向与构件纵向不相同时，取值为0.5。

## 7.2胶层连接节点设计

**7.2.1** 胶层连接可用于连接非主体受力的拉挤型材构件。

**7.2.2** 胶层连接应保证胶层均匀，连接面粘结完整，胶层固化条件良好。

**7.2.3** 受拉胶层连接节点的受力应满足以下公式：

$N\leq 0.5f\_{t}A\_{b}$ (7.2.3)

式中：N——节点承受的拉力设计值；

 $f\_{t}$——胶层材料受拉强度设计值；

 $A\_{b}$——胶层面积。

**7.2.4** 受剪胶层连接节点的受力应满足以下公式：

$V\leq 0.6f\_{v}A\_{b}$ (7.2.4)

式中：V——节点承受的剪力设计值；

 $f\_{v}$——胶层材料受剪强度设计值；

 $A\_{b}$——胶层面积。

**7.2.5** 受弯矩的胶层连接节点的受力应满足以下公式：

$M\leq \frac{0.4f\_{t}I}{y\_{0}}$ (7.2.5)

式中：M——节点承受的弯矩设计值；

 $f\_{t}$——胶层材料受拉强度设计值；

 $I$——胶层区域的截面惯性矩。

 $y\_{0}$——胶层受拉边缘与形心的距离。

## 7.3 胶栓混合连接节点设计

**7.3.1** 胶栓混合连接节点可用于连接受力较大的拉挤型材构件。

**7.3.2** 胶栓混合连接节点的构造及施工应同时满足螺栓连接节点和胶层连接节点的相关要求。

**7.3.3** 在结构分析时，胶栓混合连接节点可假定为刚接节点。

**7.3.4** 胶栓混合连接节点的极限承载力应按螺栓连接节点计算。

# 8 型材混凝土组合梁

## 8.1 一般规定

**8.1.1** 本章规定由纤维增强复合材料拉挤型材梁式构件与混凝土翼板通过抗剪连接构造组合形成的整体受弯的构件，一般用于简支梁体系。

**8.1.2** 组合梁中复材构件的截面形式宜采用箱形或工形，与混凝土翼板连接的界面处的纤维应选用无碱玻璃纤维或耐碱玻璃纤维，基体树脂宜选用环氧树脂。

**8.1.3** 复合材料应按线弹性材料考虑，等效弹性常数与各项强度标准值由与拉挤型材构件中相同材料、相同铺层构造和相同工艺条件的试件按标准试验方法试验确定。组合梁中混凝土的强度等级应不低于C20级，并应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的规定进行设计。

**8.1.4** 组合梁拉挤型材构件与混凝土翼板的连接界面按完全抗剪连接进行设计，剪力连接件宜采用沿横向通长设置的树脂混凝土条、复合材料波形板、复合材料小工字梁或有可靠依据的其他类型连接件。

**8.1.5** 型材混凝土组合梁混凝土翼板的有效宽度be（图8.1.5）应按下式计算：

 （8.1.5）

式中 －拉挤型材构件的顶板宽度；

、－ 组合梁外侧和内侧混凝土翼板的计算宽度，各取梁跨的1/6和翼板厚度的6倍中的较小值。此外，尚不应超过混凝土翼板实际外伸宽度；不应超过相邻拉挤型材构件顶板间的净距的1/2。当为中间梁时，公式(8.1.5)中的等于。



(a) 拉挤型材箱型截面-混凝土组合梁



1. 拉挤型材工型截面-混凝土组合梁

图8.1.5 混凝土翼板的有效宽度

**8.1.6** 组合梁的挠度应按弹性方法计算，考虑混凝土收缩和徐变，并按4.3.3的规定考虑拉挤型材徐变。

**8.1.7**  组合梁应按混凝土受压破坏的极限状态计算抗弯承载力，应避免拉挤型材构件受拉断裂、剪切断裂和界面剪力连接破坏等脆性破坏，还应考虑温差及温度产生的变形差对组合梁的不利影响。

**8.1.8** 组合梁施工中，拉挤型材构件可兼作混凝土翼板的模板使用，若梁下无临时支承，则混凝土硬结前的材料重量和施工荷载应由拉挤型材构件承受，应验算拉挤型材构件的强度、稳定性和变形。施工完成后的使用阶段，组合梁承受的续加荷载产生的变形应与施工阶段拉挤型材构件的变形相叠加。

**8.1.9** 长期荷载组合作用下，拉挤型材构件中的等效应力与其材料强度标准值之比不应超过0.7（CFRP）、0.5（AFRP）和0.3（GFRP）。

## 8.2 受弯承载力计算

**8.2.1**  型材混凝土组合梁受弯极限承载力的计算采用以下基本假定：

1 在承载力极限状态，拉挤型材构件和混凝土之间没有脱离和滑移，界面剪力能有效传递；

2 组合梁截面应变保持平截面；

3 不考虑拉挤型材构件腹板对组合梁受弯承载力的贡献，也不考虑混凝土翼板受拉区混凝土和受压区纵向钢筋的作用；

4 组合梁混凝土翼板的应力按等效矩形应力分布简化计算；

5 组合梁拉挤型材构件顶板和底板的应力沿其高度均匀分布，其值等于顶板和底板的弹性模量与其1/2厚度处正应变的乘积，不得超过顶板和底板的极限正应变设计值。

**8.2.2**  型材混凝土组合梁的受弯承载力应按下列规定计算：

1 当时，应满足

 （9.2.2-1）

2 当时，应满足

 （9.2.2-2）

3 还应满足

 (9.2.2-3)

拉挤型材构件中各处的应变按下式计算：

 (9.2.2-4a) (9.2.2-4b)

组合梁有效受压区高度按下式确定：

 （9.2.2-5）



（a）时



（b）时

图8.2.2 组合梁正截面受弯承载力计算图

式中  － 型材混凝土组合梁弯矩设计值；

*x*n－ 型材混凝土组合梁截面中性轴距梁顶面的高度；

*x* － 组合梁有效受压区高度；

 － 混凝土翼板中的混凝土抗压强度设计值；

*ε*1 － 混凝土翼板受压区等效矩形应力系数，按《混凝土结构设计规范》GB50010的有关规定确定；

 － 混凝土翼板的极限压应变，按《混凝土结构设计规范》GB50010的有关规定确定；

*h*c － 混凝土翼板的厚度；

 － 拉挤型材构件的高度；

－ 拉挤型材构件顶板的宽度和高度；

－ 拉挤型材构件底板的宽度和高度；

 － 拉挤型材构件顶板和 底板沿梁纵向的等效弹性模量；

 － 拉挤型材构件顶板和底板1/2高度处的正应变，受拉为正；

 － 拉挤型材构件顶板沿梁纵向的抗压极限应变设计值和抗拉极限应变设计值，最大不超过0.01；

 － 拉挤型材构件底板沿梁纵向的抗压极限应变设计值和抗拉极限应变设计值，最大不超过0.01。

**8.2.3** 受弯极限状态下，组合梁中性轴宜在混凝土翼板内或拉挤型材构件顶板内，满足此条件的组合梁可不进行组合梁的纵向稳定性验算。

## 8.3 受剪承载力计算

**8.3.1** 型材混凝土组合梁的受剪承载力根据以下假定计算：

1 不考虑混凝土翼板、拉挤型材构件顶板和底板对组合梁抗剪承载力的贡献，组合梁的全部剪力由拉挤型材构件的腹板承担；

2 达到受剪承载力极限状态时，拉挤型材构件腹板的极限剪应力沿腹板高度均匀分布，极限剪应力值取为腹板的剪切弹性模量与其剪应变的乘积,不得超过腹板的极限剪应变设计值。

**8.3.2** 组合梁的受剪承载力宜按以下公式计算：

 ≤ （9.3.2）

式中 － 组合梁的剪力设计值；

－ 拉挤型材构件的高度；

－ 拉挤型材构件的腹板总宽度；

－ 拉挤型材构件腹板沿梁长和梁高方向的表观平均剪切弹性模量；

－ 拉挤型材构件腹板沿梁长和梁高方向的表观平均剪应变；

－ 拉挤型材构件腹板极限剪切应变设计值，最大不超过0.005。

## 8.4 界面连接

**8.4.1**  型材混凝土组合梁的界面应通过树脂混凝土条、拉挤型材波形板、拉挤型材小工字梁等有效的剪力连接件连接，如图8.4.1所示：

*b*s

*b*s

*b*s

(a) 树脂混凝土条连接 (b) 拉挤型材波形板连接 (c) 拉挤型材小工字梁连接

图8.4.1 组合梁剪力连接件的构造形式

组合梁界面连接设计，应以剪力零点与剪力突变点为界限划分成若干区段，分段计算各区段内所需的抗剪连接件数量，在区段内均匀布置。各区段所需的抗剪连接件的总数量*n*应按该区段内最大弯矩截面上的应力分布和最大剪力确定：

 (8.4.1)

－ 计算区段内最大剪力设计值。

 － 剪力连接件与拉挤型材构件粘接连接的底面宽度；

 － 剪力连接件粘接连接影响系数，湿法成型树脂混凝土条或拉挤型材波形板的粘接连接形式，取；干法粘接树脂混凝土条、拉挤型材波形板、小工字梁的粘接连接形式，取；

 －组合梁剪力连接件与拉挤型材构件粘接连接界面的抗剪强度设计值，工艺条件有保证时，湿法成型树脂混凝土条或拉挤型材波形板的粘接连接界面，取；干法粘接树脂混凝土条、拉挤型材波形板、小工字梁的粘接连接界面，取；

－ 计算区段内弯矩最大截面的拉挤型材构件顶板和底板1/2高度处的正应变。

**8.4.2**  组合梁界面连接构造和施工应符合以下要求：

**1** 剪力连接件应沿梁宽全长设置，最大间距不应大于500mm，最小间距不应小于1.2*b*s和40mm；

**2** 剪力连接件的高度不宜小于*h*c/4，宽度*b*s不宜小于20mm或其高度的1.5倍；

**3** 剪力连接件与拉挤型材构件粘接前，应对粘接面进行除蜡去脂、打磨糙化和清洁处理；

**4** 拉挤型材构件与混凝土翼板连接的界面应制作成凹凸不平或带刻痕、毛刺的糙面或刷胶粘砂增糙处理；

**5** 拉挤型材波形板剪力连接件的顶面和侧面应预成孔，使翼板混凝土能纵横向连成结构整体，孔洞的直径或短边尺寸不宜大于波形板顶面宽度或侧面高度的1/2，也不宜小于30mm，孔洞的净间距不宜小于孔洞直径或短边尺寸的3倍；

**6** 连接剪力连接件的拉挤型材构件顶板的厚度不宜小于4mm。

## 8.5 组合梁的挠度计算

**8.5.1** 型材混凝土组合梁的挠度应按弹性方法的结构力学公式计算，计算采用的荷载组合应分别取荷载标准组合和准永久组合进行计算，并以其中的较大值作为依据。在上述两种荷载组合中，组合梁应分别取短期刚度和长期刚度。

**8.5.2** 型材混凝土组合梁的抗弯短期刚度按照下面公式计算：

 （9.5.2-1）

 (9.5.2-2)

式中 － 组合梁截面形心轴至梁顶面的距离；

－ 组合梁混凝土翼板截面形心轴至梁截面形心轴的距离；

－ 组合梁混凝土翼板截面形心轴至梁顶面的距离；

－ 组合梁拉挤型材构件的顶板和底板的截面形心轴至梁截面形心轴的距离；

－ 组合梁拉挤型材构件的顶板和底板截面形心轴至梁顶面的距离。

**8.5.3**  组合梁的抗弯长期刚度应考虑混凝土收缩和徐变以及拉挤型材徐变的影响。拉挤型材徐变按照4.3.3计算。

 **8.5.4** 组合梁宜设置预拱度，预拱度值取宜为恒载标准值及50%活载（不计冲击力）标准值作用下的挠度值，梁预拱线应做成平顺曲线。当恒载及活载（不计冲击力）产生的向下挠度不超过梁跨的1/1600时，可不设置预拱度。

##  构造要求

**8.6.1**  型材混凝土组合梁的构造要求：

**1** 组合梁混凝土翼板的高度不宜超过拉挤型材构件高度的1/4；组合梁的跨度不宜超过拉挤型材单一构件宽度或拉挤型材多个构件中距的20倍。

**2** 型材混凝土组合梁混凝土翼板横向伸出拉挤型材构件中心线的长度不小于150mm，且伸出拉挤型材构件侧板的长度不小于50mm。

**8.6.2**  拉挤型材构件应符合以下构造要求：

**1** 层合板和夹芯板中的纤维铺层方式一般可选择0°、±45°、90°三种角度，各铺层角的最小铺层百分比不宜小于5％；不同方向的铺层应尽量交错铺设，同方向连续铺设的铺层组内不应超过4层；采用45°角铺层时，应成对设置为±45°层；沿梁长变厚度的铺层，应在厚度方向上成台阶状增减，每层台阶宽度相等，并在表面应铺设不小于2层的连续铺层。

**2**  箱形截面夹芯构件及夹芯板中的夹芯应选用密度低且具有较大的剪切刚度和抗压刚度的材 料，可选用拉挤型材蜂窝夹芯、拉挤型材波纹夹芯和聚氨酯硬质泡沫夹芯，夹芯与层合板间应有可靠粘接。

**3**  拉挤型材箱形和工形截面构件通常应设置横隔板或横向加劲肋，最小间距为0.5*h*f，最大间距为2.5*h*f，在跨中、支点处和集中荷载作用位置必须设置。通过稳定性验算或有其它可靠措施保证不会发生顶板受压屈曲或腹板剪切屈曲的拉挤型材型材可不设置。

**8.6.3** 混凝土翼板应符合以下构造要求：

**1**  混凝土中的钢筋配置，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010-2002的有关规定；混凝土翼板的底面有拉挤型材板封闭时，下表面的混凝土保护层可不受限制，但应保证混凝土的浇筑密实。

**2** 混凝土中的钢筋宜通过粘接连接或机械构造连接与剪力连接件构成整体。

# 9 功能要求设计

## 9.1 防腐、耐候设计

**9.1.1** 有耐久性能要求的纤维增强复合材料拉挤型材，进行相应耐久试验后，纵向拉伸强度、横向拉伸强度、纵向压缩强度和横向压缩强度的保留率均应不小于 85%。

**9.1.2** 当结构暴露在腐蚀环境时，应采用表面毡增强，表面保护层的树脂含量不应低于85%;

**9.1.3** 当有防紫外线照射要求时，所用树脂应添加紫外线吸收剂；

**9.1.4**  外表面层的最外层应采用无空气阻聚树脂或胶衣树脂；

**9.1.5** 外表面层厚度不宜小于0.5mm。

## 9.2 热工设计

**9.2.1**有热工要求的纤维增强复合材料拉挤型材，导热系数除应符合现行国家标准的有关规定外，尚应符合设计规定的热工指标要求。

**9.2.2** 有热工要求的结构应设置合理，形成温度阻隔，避免冷桥。

**9.2.3** 纤维增强复合材料拉挤型材临界温度以170℃以下适宜，最高不超过270℃。

## 9.3 绝缘设计

**9.3.1** 当纤维增强增强复合材料结构有防静电性能要求时，应采用导电碳纤维或添加导电填料等措施，且连续表面电阻率不宜大于1.0×106 Ω。

**9.3.2** 有特殊要求的拉挤型材结构，其表面电阻率不应小于1.0×1012 Ω ，体积电阻率不应小于1.0×1013 Ω·m ,水扩散试验后的泄漏电流不大于 50μA（r.m.s）。

## 9.4 耐火设计

**9.4.1** 当纤维增强复合材料拉挤型材有阻燃性能要求时，应采用阻燃树脂或添加阻燃剂，氧指数应不低于32，火焰传播速率不应大于45。

**9.4.2**  纤维增强复合材料拉挤型材外表面应设置防火涂料或阻燃隔绝板。

**9.4.3** 纤维增强复合材料拉挤型材的切口和钻孔处应封闭。

**9.4.4** 当有特殊耐火要求时，应进行结构或构件的耐火极限试验。

## 9.5 耐磨设计

**9.5.1**当纤维增强复合材料拉挤型材结构有耐磨性能要求时，应在树脂中添加耐磨填料或采取其他技术措施。

# 10 施工与检验

## 10.1 一般规定

**10.1.1**施工准备

**1** 工程施工单位应具有建筑工程施工资质，主要专业工种应有操作上岗证。

**2**  工程应按设计文件（含施工图、设计变更文字说明等）施工。设计文件应由由资质的设计单位出具和通知过当地施工图审查部门审查。

**3**  工程施工前，应由建设单位组织监理、施工和设计单位进行设计文件会审和设计单位作技术交底，结果应记录在案。施工单位应制定完整的施工方案，并应经建设或监理单位审核确认后再进行施工。

**4**  备好工作场地及工机具。以基准面的选择，来作为装配的定位基准。为减少现场施工所用的时间，构件的准备工作应尽可能在工厂内完成。在生产过程中应严格控制构件的质量，并在试拼装过程中记录解决施工中可能出现的问题，并对现场条件超出预想范围的情况提出备案。

**10.1.2** 材料及构配件

**1** 工程施工所用材料、构配件的等级应符合设计文件的规定；可使用力学性能、防火、防护性能达到或超过设计文件规定等级的相应材料、构配件替代。作等强（效）换算处理时，应经设计单位复核并签发相应的技术文件认可；不得采用性能低于设计文件规定的材料、构配件替代。

**2**  进入施工现场的材料、构配件，应按规定做进场验收和见证检验，并在检验合格后再在工程中应用。施工过程中各种工序交接时尚应进行交接检验，并应由监理单位签发可否继续施工的文件。

**3**  进口纤维增强复合材料拉挤型材、构配件以及金属连接件等，应有产地国的产品质量合格证书和产品标识，并应符合合同技术条款的规定。

**4**  螺栓及螺帽的材质等级和规格应符合设计文件的规定。

## 10.2 工厂拼装

**10.2.1** 螺栓连接

**1** 对于受剪螺栓连接，螺栓孔径必须保持一致。

**2**  对于螺栓孔需注意其直径必须能让螺栓在需施加外力的情况下自由通过，并保证螺栓与孔的直径差不大于1mm。

**3**  刚性垫圈应当插入螺栓头和螺母之下，其直径至少为螺栓外径的两倍，以确保纤维增强复合材料拉挤型材材料表面受力均匀。应对每个螺栓的接头进行设计以确保孔周围能够充分分散螺栓的紧固扭矩。

**4**  紧固螺栓的操作应当特别小心，同时需要考虑拉挤型材中纤维正交方向的应力阻力。

**10.2.2**  应对胶层连接进行检验，方式可以为破坏性检验或无损检验，应满足如下要求：

**1**  如采用破坏检验，工厂拼装时，每一种连接类型的接头至少需要取3个样品做破坏性检测。

**2**  无损检测可用于检测粘接的均匀性，包括检测出分层、脱粘以及气泡缺陷等。检测手段包括声波/超声波，声学或热成像学测试。

## 10.3 现场连接

**10.3.1**  施工人员

**1**  铺设安装前现场安全员对参加安装作业人员进行安全教育，严格按安装作业手册进行安装作业。

**2**  安装人员进入施工现场必须带安全帽、防护镜等必备防护用品。

**3** 高空作业施工人员必须带保险带。

**4** 深井作业必须带好保险带及呼吸器材。

**5**  现场切割过程中电动切割器材保证用电安全。

**6**  由于现场环境是已建成并已通水，在铺设区域应做好防护措施，以防止铺设过程中异物和自身材料坠落。

**7**  现场铺设过程中安全员现场监督及时发现安全隐患、及时纠正。确保现场有序、高效、高质量的完成此项工程的安装工作。

**10.3.2**  施工注意事项

**1** 参照施工图纸，首先在平整台面将工厂组件拼装成便于施工的结构单元，然后搬运至安装位置拼接组装成最终结构。

**2**  板状型材铺设时，对角线偏差≤5㎜，玻璃钢盖板边线顺直，铺设后跨度方向板与板的误差≤3㎜，铺设后板与板（墙）的误差≤5㎜，玻璃钢盖板铺设后平坦，相邻盖板之间的最大高度差≤4㎜。

**3**  对于连接件、主要构件应100%抽检，其试样选取应同批次、实际构件上取样，原构件在生产过程中可以适当加长以便取样。

## 10.4 表面涂装

**10.4.1** 待涂覆的表面需经过处理，拉挤型材涂覆前可用砂纸打磨掉表面脱模剂。

在进行表面处理涂覆时需注意以下事项：

**1**  待涂覆的表面应按照采购文件的规定进行清洗，表面处理的要求在任何情况下均不得低于涂料制造商对预期使用环境的建议。

**2** 表面处理在涂覆时应满足规定的要求。如果在进行处理和涂覆之前，表面发生降解或污染，应在涂覆之前将其恢复到指定的条件。

**3** 为了防止清洁表面发生降解或污染，不管表面有没有进行预处理，在表面清洁后和降解或污染发生之前应尽快涂覆初级涂层。

**4**  只要有进行适当的层间粘附的需要，以前涂覆的涂层就应在涂覆前粗糙化。

**5** 进行表面清洁和涂覆时，应最大限度地减少可能落在新施加的湿涂层上的灰尘和其他污染物的量。没有涂层的表面应进行适当地保护以免受到清洁和涂覆操作的影响。

**6**  若涂覆前表面遭到污染，需立即用水、洗涤剂或其他试剂清理表面，并尽快完成涂覆作业。

# 11 验收与维护

## 11.1 一般规定

**11.1.1** 纤维增强复合材料拉挤型材结构工程施工质量验收应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300及国家现行相关标准的规定。当国家现行标准对工程中的验收项目未做具体规定时，应由建设单位组织设计、施工、监理等相关单位制定验收具体要求。

**11.1.2** 纤维增强复合材料拉挤型材结构工程质量验收，应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300的有关规定。

**11.1.3**  纤维增强复合材料拉挤型材外观质量应符合设计文件相关规定。

**11.1.4**  纤维增强复合材料拉挤型材连接件应符合设计文件相关规定。

**11.1.5**  纤维增强复合材料拉挤型材应具有产品质量合格证书。

## 11.2 验收

**11.2.1** 纤维增强复合材料拉挤型材结构工程施工质量验收主控项目应符合表11.2.1的规定。

表11.2.1 纤维增强复合材料拉挤型材结构工程施工质量验收主控项目

| 内容 | 检验数量 | 检验方法 | 合格标准 |
| --- | --- | --- | --- |
| 外观 | 全部 | 在正常(光)照度下，距离。5 m，目测和钢直尺检验。 | 型材表面应光洁平整、颜色均匀，应无裂纹、气泡、毛刺、纤维裸露、纤维浸润不良等缺陷；切割面应平齐，无分层。 |
| 截面尺寸及尺寸偏差 | 全部 | 拉挤型材宽、高尺寸测量采用精度不低于。.l mm的游标卡尺，在型材两端截面测量，每截面测3次，均匀选点。拉挤型材板件厚度采用精度不低于0.02 mm的游标卡尺，在拉挤型材两端截面测量，每截面测3次，均匀选点；拉挤型材外缘斜度以及腹板挠曲，采用精度不低于0.02 mm的游标卡尺，在拉挤型材两端截面测量，每截面测3次，均匀选点；拉挤型材直线度采用水准仪进行测量，测量长度L应不小于1 m；尺寸偏差结果取最大值。 | 型材横截面上任一壁厚应不小于3.0mm，有耐久性能要求的产品，任一壁厚应不小于5.0mm，有特殊设计要求的除外；型材尺寸偏差应符合《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T31539-2015的规定。 |
| 物理性能 | 全部 | 巴柯尔硬度按GB/T 3854进行测定；纤维体积含量按GB/T 2577进行测定；树脂不可溶分含量按GB/T 2576进行测定；吸水率按GB/T 1462进行测定；玻璃化转变温度按GB/T 22567-2008方法C进行测定。 | 巴柯尔硬度不小于50；纤维体积含量不小于40%；树脂不可溶分含量不小于90%；吸水率不大于0.6%；玻璃化转变温度不小于80℃。 |
| 力学性能 | 全部 | 按《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T31539-2015试验方法试验。 | 应符合《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T31539-2015的规定。 |
| 全截面压缩性能 | 全部 | 按《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T31539-2015附录B进行测定。 | 型材的全截面压缩极限承载力与横截面积之比应大于纵向压缩强度的0.85倍。 |
| 耐久性能 | 全部 | 按《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T31539-2015耐久性能试验方法测定。 | 有耐久性能要求的型材，进行相应耐久试验后，纵向拉伸强度、横向拉伸强度、纵向压缩强度和横向压缩强度的保留率均应不小于85%。 |
| 功能性 | 全部 | 氧指数按GB/T 8924进行测定；垂直燃烧级别按GB/T 2408进行测定；水平燃烧级别按GB/T 2408进行测定；工频电气强度按GB/T 1408.1进行侧定；导热系数按GB/T 3139进行测定。 | 有功能性要求的型材，应达到设计规定的功能性指标要求，包括:氧指数、垂直燃烧、水平燃烧、工频电气强度、导热系数等。 |

**11.2.2** 纤维增强复合材料拉挤型材防腐涂料稀释剂和固化剂等材料的品种规格性能等应符合现行国家产品标准和设计要求。

**11.2.3** 纤维增强复合材料拉挤型材防火涂料的品种和技术性能应符合设计要求，并应经过具有资质的检测机构检测符合国家现行有关标准的规定。

**11.2.4** 防腐涂料和防火涂料的型号、名称、颜色及有效期应与其质量证明文件相符。开启后不应存在结皮、结块、凝胶等现象。

**11.2.5** 涂装前拉挤型材表面除锈应符合设计要求和国家现行有关标准的规定。处理后的拉挤型材表面不应有灰尘油污水和毛刺等。

**11.2.6** 涂料、涂装遍数、涂层厚度均应符合设计要求。

**11.2.7**  构件表面不应误涂、漏涂，涂层不应脱皮和返锈等。涂层应均匀无明显皱皮、流坠、针眼和气泡等。

**11.2.8** 纤维增强复合材料拉挤型材结构工程质量验收应符合下列规定：

**1**  主控项目检验结果应全部合格；

**2** 一般项目检验结果应有大于80%的检查点合格，且最大偏差不应超过允许偏差的1.2倍。

## 11.3 维护

**11.3.1** 纤维增强复合材料拉挤型材涂层出现脱皮、皱皮等，应及时进行重新涂装。

**11.3.2** 纤维增强复合材料拉挤型材构件出现超出设计规定的变形情况，应检查原因，及时加强构件或者更换构件。

**11.3.3** 纤维增强复合材料拉挤型材结构设计时应采取方便使用期间检测和维护的措施。

**11.3.4**  纤维增强复合材料拉挤型材结构工程移交时应提供使用维护说明书。

**11.3.5** 在纤维增强复合材料拉挤型材工业建筑使用初期，应制定明确的纤维增强复合材料拉挤型材结构建筑检查和维护制度。

**11.3.6** 在纤维增强复合材料拉挤型材工业建筑使用过程中，应详细准确记录检查和维修的情况，并应建立检查和维修的技术档案。

**11.3.7** 纤维增强复合材料拉挤型材结构建筑工程竣工使用1年时，应进行全面检查；此后宜按当地气候特点、建筑使用功能等，每隔3年~5年进行检查。

**11.3.8**  纤维增强复合材料拉挤型材结构建筑的检查可采用目测观察或手动检查。当发现隐患时宜选用其他无损或微损检测方法进行深入检测。

# 附录A 考虑二阶效应的框架结构弹性分析方法

框架结构的内力分析宜符合下列规定。

A.1 结构的侧向稳定和抗倾覆能力可通过支撑、剪力墙来提供。

A.2 框架结构的内力应采用二阶弹性分析。此时，应在每层柱顶附加考虑由下式计算的假想水平力Hni。

$$H\_{ni}=\frac{1}{400}Q\_{i}$$

式中，Qi——第i楼层的总重力荷载设计值。

A.3 当采用二阶弹性分析时，各杆件的杆端弯矩可用下列公式计算：

$$M\_{u}=α\_{1}M\_{1}+α\_{2i}M\_{2}$$

$$P\_{u}=P\_{nt}+P\_{lt}$$

式中，$M\_{1}、P\_{nt}$为无侧移框架的弯矩和轴力，$M\_{2}、P\_{lt}$为由框架侧移产生的附加弯矩和轴力。弯矩增大系数$α\_{1}$和$α\_{2}$可通过下式计算得到：

$$α\_{1}=\frac{β\_{mx}}{1-\frac{\sum\_{}^{}N}{P\_{e}}}\geq 1.0$$

$$α\_{2i}=\frac{1}{1-\frac{\sum\_{}^{}N∙Δu}{\sum\_{}^{}H∙h}}$$

式中，$P\_{e}$——弯矩作用方向的欧拉屈曲荷载，可按第xx节方法求得；

 $\sum\_{}^{}N$——所计算楼层各柱轴心压力设计值之和；

 $\sum\_{}^{}H$——产生层间侧移的所计算楼层及以上各层的水平力之和；

 $Δu$——按一阶弹性分析求得的计算楼层的层间侧移。

 h——所计算楼层的高度。

 $β\_{mx}$——等效弯矩系数，通过无侧移框架一阶弹性分析得到，并按下列规定采用：

 (1) 受压构件无横向荷载作用时：$β\_{mx}=0.6-0.4{M\_{2}}/{M\_{1}}$，$M\_{1}$和$M\_{2}$为端弯矩，使构件产生同曲率（无反弯点）时取同号；使构件产生反向曲率（有反弯点）时取异号，$\left|M\_{1}\right|\geq \left|M\_{2}\right|$；

 (2) 受压构件有横向荷载作用时：$β\_{mx}=1.0$。

# 附录B 楼盖和人行天桥舒适度计算

B.1 纤维增强复合材料拉挤型材楼盖和人行桥的振动舒适度按下式计算：

$$P\_{c}=-166a\_{max}+100$$

式中：$P\_{c}$——舒适度系数；

$a\_{max}$——振动跨中峰值加速度（m/s2），根据B.2确定。

B.2 楼盖和人行桥跨中振动峰值加速度可按下列公式近似计算：

$$a\_{max}=\frac{F\_{p}}{βw}g$$

$$F\_{p}=p\_{0}e^{-0.35f\_{n}}$$

式中：$a\_{max}$——振动跨中峰值加速度；

$F\_{p}$——接近人行桥结构自振频率时人行走产生的作用力（kN）；

$p\_{0}$——人行走产生的作用力（kN），取0.42kN；

$f\_{n}$——人行桥竖向自振频率（Hz）；

$β$——结构阻尼比，取0.01；

 $w$——结构阻抗有效重量（kN）；

 $g$——重力加速度，取9.8 m/s2。

# 本标准用词说明

**1** 为便于在执行本规程条文时区别对待，对严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的用词：

 正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2）表示严格，在正常情况均应这样做的用词：

 正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

 正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

**2** 条文中必须按指定的标准、规范或其它有关规定执行的，其用语是“应按……规定确定”或“应符合……规定”；非必须按照所指定的标准、规范或规定执行的，其用语是“参照…”

引用标准名录

1. 《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》 GB 31539-2015
2. 《纤维增强复合材料工程应用技术标准》 GB50608
3. 《纤维增强塑料性能试验方法总则》 GB/T 1446
4. 《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》 GB/T 1447
5. 《纤维增强塑料压缩性能试验方法》 GB/T 1448
6. 《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》 GB/T 1449
7. 《纤维增强塑料层间剪切强度试验方法》 GB/T 1450.1
8. 《纤维增强塑料吸水性试验方法》 GB/T 1462
9. 《塑料 燃烧性能的测定 水平法和垂直法》 GB/T 2408
10. 《玻璃纤维增强塑料老化性能试验方法》 GB/T 2573
11. 《纤维增强塑料树脂不可溶分含量试验方法》 GB/T 2576
12. 《玻璃纤维增强塑料树脂含量试验方法》 GB/T 2577
13. 《增强塑料巴柯尔硬度试验方法》 GB/T 3854
14. 《纤维增强塑料术语》 GB/T 3961
15. 《纤维增强塑料燃烧性能试验方法 氧指数法》 GB/T 8924
16. 《塑料实验室光源暴露试验方法 第3部分：荧光紫外灯》 GB/T 16422.3-1997
17. 《电气绝缘材料 测定玻璃化转变温度的试验方法》 GB/T 22567-2008
18. 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T 50082

# 条文说明

**3.1.2** 质量证明文件应包括下列内容：

1 材料性能说明书、质量合格证、性能测试与检测报告和材料安全数据说明文件；

2 原材料质量技术指标及检测方法。

**3.1.3** 纤维增强材料与所用树脂的界面特性对制成品复合材料的所有性能有着显著的影响。这种匹配性主要体现在纤维表面所用浸润剂以及进一步加工成纤维织物制品所引入粘结剂等加工助剂的化学组分是否能与所选用树脂有非常好的结合，且不影响树脂的固化。

**3.2.1**  (a) 目前国内外拉挤型材所用增强材料主要为无碱玻璃纤维及其制品，其它增强材料如玄武岩纤维、耐碱纤维等在某些特定场合也有应用，但由于应用案例较少，其相关性能需经试验验证，并经供需双方协商确定。

(b) 玻璃纤维增强材料的玻璃类型包括硼铝硅酸盐玻璃（E）、无氟无硼的铝硅酸盐玻璃（ECR）、硅-铝-钙-镁系统玻璃（R）和硅-铝-镁系统玻璃（S），其性能指标应符合现行有关国家标准规定。

(c) 玻璃类型分类方法参照了GB/T 4202《玻璃纤维产品代号》和GB/T 18374《增强材料术语及定义》的相关规定。目前玻纤行业增强用无碱玻璃纤维主要包括四种类型，其基本性能指标如下：

表3.2.1 玻璃类型与性能指标

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 玻璃类型 | 主要特征 | 性能指标 |
| E | 硼铝硅酸盐玻璃，良好电绝缘性能和力学性能 | 碱金属氧化物含量≤0.8%浸胶纱拉伸强度≥1800Mpa |
| E-CR | 无氟无硼的铝硅酸盐玻璃，良好的电绝缘性能和耐化学腐蚀性能 | 碱金属氧化物含量≤0.8%氧化硼含量＜0.1%氟含量＜0.1%浸胶纱拉伸强度≥2200Mpa |
| R | 硅-铝-钙-镁系统玻璃，优异的力学性能 | 碱金属氧化物含量≤0.8%浸胶纱拉伸强度≥2500Mpa |
| S | 硅-铝-镁系统玻璃，极高的力学性能 | 碱金属氧化物含量≤0.8%浸胶纱拉伸强度≥2900Mpa |

**3.3.1** 所选用的乙烯基酯树脂、不饱和聚酯树脂应符合GB/T 8237《纤维增强塑料用液体不饱和聚酯树脂》的相关规定，树脂浇注体力学性能应符合表3.3.1要求，双酚A型环氧树脂应符合GB/T 13657《双酚A型环氧树脂》的相关规定，其它类树脂应符合相关标准规定。聚氨酯树脂应供需双方商定，确定指标。

表3.3.1 树脂浇注体力学性能

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 指标 | 测试方法 |
| 拉伸强度，MPa | ≥65 | GB/T 2567 |
| 拉伸弹性模量，GPa | ≥3.0 | GB/T 2567 |
| 弯曲强度，MPa | ≥110 | GB/T 2567 |
| 断裂延伸率，% | ≥2.5 | GB/T 2567 |

不饱和聚酯树脂、乙烯基酯树脂、环氧树脂是国内拉挤型材使用最为广泛的树脂，应用成熟，性能稳定。酚醛树脂以其优异的电绝缘性能和阻燃性能在电力、交通等特殊要求领域有大量应用。聚氨酯树脂具有优异的机械性能和耐候性能，作为新兴拉挤型材基体树脂也有很大的应用前景。

**3.3.2**在树脂中加入颜料、染料、着色剂、填料或触变剂等会影响压力容器制品的目视检查，如需添加，应确保供需双方同意，且不得导致制品的力学性能和耐腐蚀性能下降。为了满足阻燃要求，需要在树脂中添加阻燃剂时，必须满足设计使用要求、经供需双方同意方可使用。纤维增强塑料压力容器长期受到紫外线照射，会导致表面老化变色、强度下降，因此需加入紫外线吸收剂以提高抗紫外线辐射能力。

**3.4.4**纤维增强复合材料拉挤型材各主要受力方向的材料抗拉强度及弹性模量，应按现行国家标准GB/T 1447《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》的有关规定取值；纤维增强复合材料拉挤型材各主要受力方向的材料抗压强度及弹性模量，应按现行国家标准GB/T 1448《纤维增强塑料压缩性能试验方法》的有关规定取值。

**3.5.6** 纤维增强复合材料拉挤型材连接用其他成型方式复合材料应通过试验确定其强度指标。

**4.1.3**拉挤型材构件分析时需要考虑剪切变形的影响。

**4.2.1** 由于纤维增强复合材料拉挤型材为新材料，所以对重要性系数进行放大。

**9.1.1** 特殊环境下的拉挤型材，在长时间的腐蚀环境下，一定强度保留率才可以保证结构的安全性和可靠性。根据《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》GB/T 31539-2015的规定：有耐久性能要求的拉挤型材，进行相应耐久试验后，纵向拉伸强度、横向拉伸强度、纵向压缩强度和横向压缩强度的保留率均应不小于 85%。耐久检验项目为：耐水性能、耐碱性能、紫外线耐久性能、冻融循环耐久性能。

**9.1.2-9.1.5** 纤维增强复合材料拉挤型材有基体树脂和纤维增强复合材料组成，型材的抗腐蚀特性主要依靠于基体树脂的抗腐蚀特性，而且一定的树脂含量可以保证拉挤型材的强度，腐蚀是从外及内进行，所以最外层建议进行表面毡增强并采用无空气阻聚树脂或胶衣树脂，厚度不宜小于0.3mm。树脂中通常含有苯乙烯交联剂，在固化过程中由于空气中的氧阻聚作用，使得固化后表面产生发黏等固化不完全现象。 无空气阻聚的树脂一般是在树脂中添加少量的石蜡，在树脂固化过程中，石蜡会慢慢迁移到表面，形成隔绝空气的一层薄膜，使得表面固化完全，使用在最后一层中。紫外线将会破坏树脂分子链中苯环等结构的化学稳定性，因此对室外的玻璃钢烟囱，或者对有可能接受到紫外线照射的部位，其表面层树脂中，应加入抗紫外线的吸收剂。使得拉挤型材从外部保护和基体本身都具有一定的耐腐蚀特性。有助于保证强度，保证结构的安全性。

**9.2.1** 对于不同的工程需要，导热系数有着很大区别，难以确定一个固定的标准，《电缆用玻璃钢保护管》JC/T 988—2006中规定导热系数应大于0.22（W/m·K），《彩喷片状模塑料（SMC）瓦》JC/T 944—2005中规定：SMC瓦的导热系数应小于0.82（W/m·K）。《烟筒设计规范》GB 50051—2013 以及纤维增强塑料排烟筒工程技术规范（征求意见稿）规定导热系数应为(0. 23～0. 29)[W/(m • K)]。

**9.3.1**当对结构表面有导静电性能要求时，应设置相应的防静电设施，玻璃钢是一种绝缘性能比较好的材质，玻璃钢烟囱在使用中可能产生大量的静电，会导致安全运行隐患，所以需要考虑静电释放和接地措施。表面电阻率在1.0×106 Ω以下时，可确保静电泄漏。雷电的危害 是综合性的，包括电性质、热性质和机械性质的破坏作用。电性质破坏作用表现 在由于雷电而产生的数十万乃至数百万伏的冲击电压，它可能破坏电气设备的绝缘；绝缘损坏可能引起短路，导致火灾或爆炸事故；放电火花可能引起火灾或爆 炸；绝缘的损坏，可能使高压窜入低压，或使电气设备漏电，由此可造成严重的 触电事故；热性质的破坏作用表现在巨大的雷电流通过导体，在极短的时间内转 换出大量的热能，造成排烟筒燃烧。机械性质的破坏作用表现为排烟筒遭到破坏，甚至爆裂成碎片，防雷接地的具体要求可按各行业标准执行。

**9.4.1**在美国材料与试验协会标准《燃煤电厂玻璃纤维增强塑料CFRP）烟囱内筒设计、制造和安装标准指南》ASTM D5364（以下简称 “ASTM D5364”） 中规定了玻璃钢烟囱适合于无GGH的湿饱和烟气运行温度（60℃以下），当FGD吸收塔有旁路时，在开启旁路烟道后的烟气温度，则在短时间内不超过121℃。国内燃煤电厂用于排放湿法脱硫烟气的温度，在无GGH时，在45℃～55℃范围，有GGH时，在 80℃～95℃范围。从我们调查的国内化工、冶金和轻工等行业现有玻璃钢烟囱（大多数用于脱酸后的烟气）的使用情况来看，绝大多数长期运行温度不超过 100℃。所以确定 100℃为本规范所选玻璃钢材质适合长期使用的最高温度。从我们调查的国内化工、冶金和轻工等行业现有玻璃钢烟囱（大多数用于脱酸后的烟气）的使用情况来看，绝大多数长期运行温度不超过 100℃。所以确定 100℃为本规范所选玻璃钢材质适合长期使用的最高温度。而在现行行业标准《玻璃钢化工设备设计规定》 HG/T 20696中，按照树脂种类对设计温度作了分类规定，本规范取值也小于其中乙烯基酯树脂的设计温度范围。

材料的耐寒性能常用脆化温度（Tb）来表示。 工程上常把在某一低温下材料受力作用时只有极少变形就产生脆性破坏的这个温度称为脆化温度。 同常温下性能相比，随着温度的降低，玻璃钢材料的分子无规则热运动减慢，结构趋于有序排列；树脂将会发生收缩，柔性越好收缩越大，同时树脂伸长率会下降，而拉伸强度和弹性模量将增大，弯曲强度也会增加，树脂呈现脆性倾向。鉴于目前已有正常使用在-40℃下玻璃钢材质的管道和储罐情况，确定了未含外保温层的拉挤型材在本环境温度的使用下限指标。

当有阻燃性能要求时，宜采用反应型阻燃树脂，应根据国家消防法规和标准的有关规定，设计具有相应阻燃等级的拉挤型材。 需要注意的是，采用内、外表面阻燃的夹心结构是无法经受大火和长时间燃烧的，而选用添加型阻燃剂通常会影响拉挤型材的力学性能。

国际工业烟囱协会（CICIND）《玻璃钢（GRP）内筒标准规范》对树脂的选用主要有三类：环氧乙烯基醋树脂、不饱和聚醋树脂（双酚A富马酸型和氯菌酸型）和酚醛树脂。 对于阻燃性能，认为在需要和规定时，在玻璃钢内衬的内、外表层采用反应型阻燃树脂，或者全部采用反应型阻燃树脂。 同时强调应当遵守本地或国家的消防条例，并认为采用内外表面阻燃的结构是无法限制规模很大的火焰。

参考美国ASCE的复合材料结构设计标准，建议使用温度不高于（Tg-30）℃。同时，还应遵守相应的国家现行有关标准和规范的规定，采取相应的防护措施。这样可以在不同的环境温度下应该采用不同的树脂材料达到保证工程质量的目的。

玻璃钢材质的阻燃性表征之一是采用有限氧指数值（LOI):国内消防法规对难燃材料的要求之一是LOI不小于32。

根据《烟筒设计规范》GB 50051—2013中9. 1. 1和9.2.2条的规定，事故发生时的 30min 内温度不得超过树脂的玻璃化温度(Tg），玻璃钢的火焰传播速率不应大于45。在事故发生时，短时间内烟气温度急剧升高，而玻璃钢短期内的使用温度极限应不能超过基体树脂的玻璃化温度（Tg ）。玻璃钢材质的阻燃性表征之二是火焰传播速率：它是采用美国材料与试验协会标准《建筑材料表面燃烧性能试验方法》ASTM E84隧道法测定的玻璃钢层合板的一个指数值。 表示火焰前沿在材料表面的发展速度，关系到火灾波及邻近可燃物而使火势扩大的一个评估指标。

其他相关指标（产烟量、质量损失率等）请参考GB 8624-2012 建筑材料及制品燃烧性能分级、《建筑设计防火规范》GB 50016—2014等国家现行有关规范的规定。

**9.4.2**  纤维增强复合材料拉挤型材外表面应设置防火涂料或阻燃隔绝板。在保证材料自身耐火性能的情况下，型材表面应设置防火涂料或阻燃隔绝板等对其进行保护，来增加其耐火性能，来保障结构的耐火极限，保证人民的人身财产安全。

**9.4.3** 纤维增强复合材料拉挤型材的切口和钻孔处应封闭。主要是以为在切口和钻孔处是型材的薄弱部位，一旦起火，将首先在薄弱部位进行弱化，进而结构内部很快丧失强度。

**9.4.4**  当有特殊耐火要求时，应进行结构或构件的耐火极限试验。本规范规定的都是耐火性能的一般要求，对于特殊用途、特殊耐火要求的拉挤型材结构，应进行充分的耐火极限实验，为结构设计提供充分的依据。