



机械科学与技术

*Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*

ISSN 1003-8728, CN 61-1114/TH

## 《机械科学与技术》网络首发论文

题目: “三明治”式复合结构床身连接件设计与性能研究  
作者: 黄华, 赵强, 王庆文, 郭润兰  
DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200141  
收稿日期: 2020-01-15  
网络首发日期: 2020-07-16  
引用格式: 黄华, 赵强, 王庆文, 郭润兰. “三明治”式复合结构床身连接件设计与性能研究. 机械科学与技术. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200141>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# “三明治”式复合结构床身连接件设计与性能研究

黄华, 赵强, 王庆文, 郭润兰

(兰州理工大学机电工程学院 兰州 730000)

**摘要：**以外部钢板和内部填充混凝土的“三明治”式复合结构床身具有动力学和热力学稳定的特点，是一种绿色经济的可行结构。但由于切削载荷引起的剪切力作用，内外层之间易发生“剥离”现象，需要加强联结以抵抗剪切变形。针对连接件的抗剪分析和优化设计问题，首先构建单钉单剪的物理模型，利用等效替换将其结构简化为悬臂梁，分析连接件的应力分布；并对结构进行抗剪分析，对比不同连接件的抗剪性能以确定连接件类型；在此基础上，以连接件直径、排布方式为研究因素进行有限元分析以确定群钉效应对力学性能的影响；并进一步建立连接件的剪力传递理论以验证连接件的抗剪刚度规律。结果表明：相同参数的连接件，单栓钉受剪性能优于单螺栓，不同直径的多栓钉受剪性能受其排布方式及受力方向的共同影响，并且有限元分析结果与建立的受剪承载力计算公式吻合较好，研究结果为连接件在“三明治”式复合结构床身中的应用提供了理论基础。

**关键词：**连接件；复合结构；布局设计；群钉效应

**中图分类号：**TP391.9

## Design and Performance Study of Sandwich Composite Structure Bed's Connector

Huang Hua, Zhao Qiang, Wang Qingwen, Guo Runlan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The "sandwich" composite structure bed with external steel plate and internal concrete filling has the characteristics of dynamic and thermodynamic stability, and it is a feasible structure for the green economy. However, the "peeling" phenomenon is easily occurred between the inner and outer layers because of shear force which caused by the cutting load, so the connectors are required to resist shear deformation. For the shear analysis and optimization design of the connector, a physical model of single nail and single shear is built at first. With this, the structure is simplified into a cantilever beam by equivalent replacement, and the stress distribution of the connector is analyzed and the shear strength of the structure is analyzed. Furthermore, the shear properties of different connectors is compared and the type of connector is determined. Based on this, the finite element analysis was done with the diameter and arrangement of the connectors as the affected factors to determine the effect of the group nail effect on the mechanical properties, and the shear force transfer theory of the connectors was further established to verify the law of shear stiffness. The results show that the single stud have better shear performance than the single bolt which with the same parameters, and the shear performance of multi-pins with different diameters is affected by their arrangement and the direction of force. In addition, the results of finite element analysis is agreed well with the established calculation formula of shear capacity. So, a theoretical basis for the application of the connector in the "sandwich" composite structure bed is provided by these research results.

**Keywords:** connector; composite structure; layout design; group nail effect

随着绿色制造技术的快速发展，传统机床结

构已不能满足当前高精、高效、绿色的加工要求，而采用复合材料结构制造机床基础件是满足这一需求的可行途径<sup>[1-2]</sup>，目前国内外已有众多将复合材料运用到精密机床结构件上的成功范例<sup>[3-4]</sup>。在此基础上，文献<sup>[5]</sup>提出了一种结合传统材料和复

**收稿日期：**2020-01-15

**基金项目：**国家自然科学基金（51965037、51565030）

**作者简介：**黄华(1978年8月)，博士，副教授，研究方向为数控技术与装备，hh318872@126.com；

**\*通信作者：**黄华，副教授，硕士生导师，hh318872@126.com

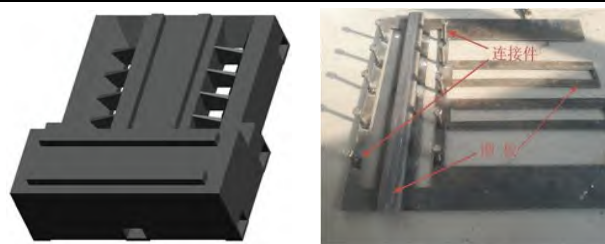
合材料两者的优点,设计“三明治”结构应用在机床上并提高了整机的阻尼和刚度特性。对于这种结构,其内外层材料之间的连接件对保证整机的可靠性和内部材料的耐久性起着重要的作用。

国内外学者针对复合材料结合面处连接件的强度及失效形式、承载性能等进行了大量研究工作。刘通等<sup>[6]</sup>通过分区退化模型研究了厚度因素、拧紧力矩对单螺栓连接强度的影响及其失效过程和形式;何柏灵<sup>[7]</sup>等提出考虑层合板面内和层间失效的复合材料连续损伤力学模型,对螺栓接头的渐进失效行为进行了预测;俸翔等<sup>[8]</sup>研究了螺栓材料、装配预紧力及孔间隙对复合材料连接强度的影响。上述文献更多关注螺栓的力学性能研究,未考虑螺栓在复合材料中的适用性。李源<sup>[9]</sup>将栓钉连接件运用到复合结构床身设计中,探究了栓钉长度、直径及基体材料对单栓钉剪切刚度的影响,并分析了栓钉数目和栓钉间距对群钉效应的影响,为床身结构设计提供了新的思路。因此结合土木工程领域中抗剪连接件将钢板与混凝土连接的组合梁设计方法,利用栓钉与混凝土的接触关系,将影响栓钉承载力和滑移性能的各项参数与装配式剪力墙的水平受剪承载力进行相关的计算<sup>[10-12]</sup>;黄侨等<sup>[13]</sup>通过 Timoshenko 梁假定,得到了跨中集中荷载下钢-混凝土简支组合梁的全梁挠度与应力的解析解。

以上研究中往往只针对螺栓连接件在复合材料中的力学性能或只考虑栓钉在土木领域的应用,而对“三明治”式复合结构床身的抗剪连接件缺乏实际应用分析,关于栓钉在床身的优化设计研究更是少见。针对以上不足,本文通过建立等效悬臂梁模型,以不同单钉连接件为研究对象对其应力分布进行研究,并考虑群钉效应下连接件布局设计,利用力的传递机制来验证此设计方法,为以提高“三明治”式复合结构床身的动静态特性为目标的连接件设计方法提供了参考。

## 1 连接件受力机理及变形分析

本文参考某型号卧式加工中心原型铸铁床身,设计了如图 1(a) 所示的以外部钢板和内部填充混凝土的“三明治”式复合结构床身模型,为防止内外层之间发生“剥离”现象,需要对连接件进行抗剪分析和优化设计,如图 1(b) 的连接件设计。



(a) 床身 (b) 连接件

图 1 “三明治”式床身结构

### 1.1 栓钉连接件模型建立与有限元计算

建立了栓钉连接件的钢板-混凝土复合结构,栓钉根部与钢板焊接,头部嵌入混凝土中,其物理模型如图 2 所示。为简化研究,将钢板与栓钉简化为一体,且不考虑栓钉根部焊接的影响。建立了如图 3 所示的计算坐标系,图中的  $F_s$  表示钢板-混凝土组合结构中受到的切削力,钢板的高度为  $L$ , 宽度为  $h$ , 长度为  $b$ , 混凝土的高度为  $H$ 。

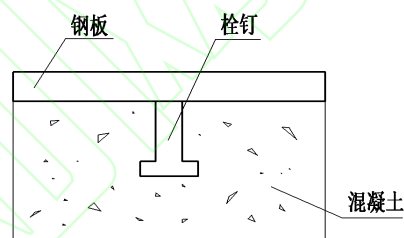


图 2 栓钉物理模型

根据图 3 的计算坐标系,构建含有栓钉实体的有限元模型,采用实体单元模拟,栓钉与混凝土的接触采用绑定约束,混凝土与钢板结合面采用有效小滑移的面面接触,摩擦约束系数为 0.3,混凝土底部采用固定约束。有限元分析时作以下假定:(1) 栓钉截面变形符合平截面假定;(2) 栓钉与混凝土接触面始终紧密贴合;(3) 钢材和混凝土受力均处于弹性范围内;(4) 忽略栓钉轴力和与混凝土接触面的摩擦力。

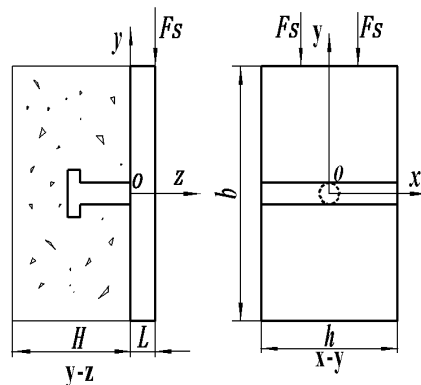


图 3 计算坐标系

### 1.2 组合结构的等效模型

钢板-栓钉整体与混凝土浇筑后紧密接触,通过约束条件将钢板视为如图 4 所示的简化悬臂

梁。将图 4 中剖面线连接的栓钉截面假设为固定钢板的固定面，研究悬臂梁下钢板受剪切力的弯曲内力。在分析设计中，钢板与栓钉结合处的截面圆直径  $d$  (栓钉直径) 作为有效长度来代替钢板的长度  $b$  进行计算，如图 5 的  $d \times h$  矩形，并假定在钢板的有效长度  $d$  内，剪切力  $F_s$  是均匀分布的。

经过等效长度替换后转换为如图 5 的  $d \times h$  矩形截面，由梁的弯曲应力公式可得截面的正应力为：

$$\sigma_s = \frac{My}{I} \quad (1)$$

其中： $\sigma_s$  为截面的正应力； $M$  为截面承受的弯矩值； $y$  为截面形心轴与所求应力点的距离，沿  $y$  轴正方向为正； $I$  为截面抗弯惯性矩。

对于钢板矩形截面，弯矩值  $M = F_s L$ ；此时

$x$  轴为截面的形心轴，故抗弯惯性矩  $I = \frac{hb^3}{12}$ ，

截面正应力公式为：

$$\sigma_s = \frac{12F_s Ly}{hb^3} \quad (2)$$

由正应力公式可知，靠近  $x$  轴的应力变小；

截面的最大正应力出现在  $y = \pm \frac{d}{2}$ ，此时：

$$\sigma_s = \frac{6F_s Ld}{hb^3} \quad (3)$$

由材料力学矩形截面梁最大切应力公式可知：

$$\tau = \frac{3F_s}{2A} \quad (4)$$

其中， $\tau$  为钢板矩形截面最大切应力； $A$  为钢板矩形截面的面积， $A = d \times h$ 。此时截面最大切应力为：

$$\tau = \frac{3F_s}{2dh} \quad (5)$$

将式 (3) 与式 (5) 进行比较，即：

$$\frac{\sigma_s}{\tau} = \frac{\frac{6F_s Ld}{hb^3}}{\frac{3F_s}{2dh}} = \frac{4Ld^2}{b^3} \quad (6)$$

其截面最大正应力与最大切应力的比值大小取决于钢板的高度  $L$  和宽度  $h$ 。

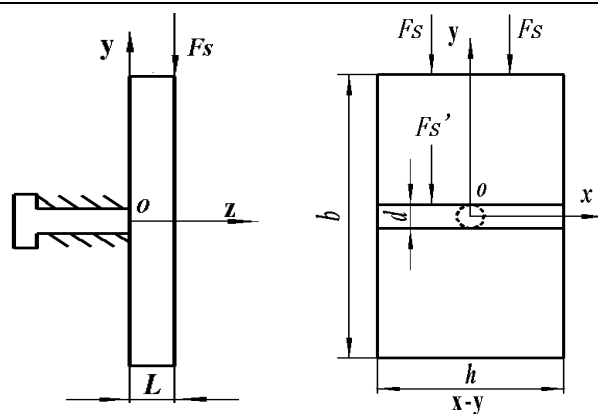


图 4 简化钢板悬臂梁 图 5 钢板的换算长度示意图

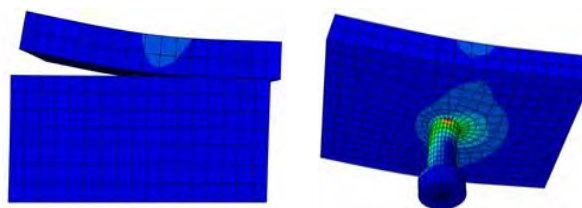
### 1.3 栓钉连接件结构模型分析

为判断剪切力作用下栓钉最容易产生疲劳裂纹的部位，在有限元软件 ABAQUS 中，设置钢板-混凝土复合结构的材料属性见表 1。模型的主要尺寸为：混凝土高度  $H=100\text{mm}$ ，宽度  $h=150\text{mm}$ ，长度  $b=220\text{mm}$ ；钢板高度  $L=30\text{mm}$ ，宽度  $h=150\text{mm}$ ，长度  $b=220\text{mm}$ ；栓钉长度为  $80\text{mm}$ ，直径为  $25\text{mm}$ 。

表 1 钢材和混凝土材料特性

	密度 $\rho / (\times 10^3 \text{kg m}^{-3})$	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E / (\text{MPa})$
钢材	7.85	0.30	$2.1 \times 10^5$
混凝土	2.50	0.18	$3.0 \times 10^4$

建立 5 组不同的剪切力数据对栓钉在组合结构的受剪性能进行分析，剪力  $F_s$  选取为 5N、10N、15N、20N、25N，定义图 3 中的  $F_s$  为横向剪切力，得到 15N 的横向剪切力作用下的组合结构应力云图如图 6。



(a) 计算所得三维实体 (b) 钢板-栓钉应力云图

图 6 栓钉的应力

由图 6 可知，钢板被“掀起”且复合结构的最大剪切破坏位于钢板与栓钉焊接处，最大应力位于图 2 靠近  $x$  轴两侧的  $x-y$  平面内。由梁的弯曲应力可知，等效为悬臂梁的钢板固定端的横截面上弯矩最大，易受到剪切破坏；而钢板受到横向剪切力时，由于  $L/b < 5$ ，钢板截面的切应力会使其“翘起”。

模型选取  $L=30\text{mm}$ ， $b=220\text{mm}$ ， $d=25\text{mm}$ 。



故式(6)的比值  $\frac{\sigma_s}{\tau} < 1$ , 截面最大正应力小于

最大切应力, 与图6(b)的结果一致。此时, 沿着坐标轴  $y$  的方向, 钢板上表面的正应力和切应力的分布是不均匀的, 靠近钢板边缘正应力较大, 而  $z$  轴处最小(为0); 靠近  $x$  轴切应力较大, 而钢板边缘较小(为0)。

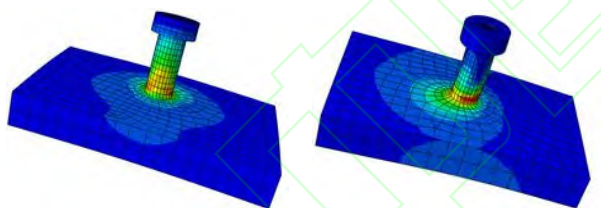
机床在切削过程中切削力方向并不固定。同理, 钢板受到作用于图3宽边  $b$  处的纵向剪切力  $F_s$  时, 靠近钢板边缘正应力较大, 在  $z$  轴处最小(为0), 靠近  $y$  轴切应力较大, 钢板边缘较小(为0)。此时  $d \times b$  矩形截面的形心轴为  $x$  轴, 故抗弯惯性矩  $I = \frac{bh^3}{12}$ , 最大正应力在  $x = \pm \frac{d}{2}$ , 由

式(1)可知  $\sigma_s' = \frac{6F_s L d}{bh^3}$ , 式(6)得:

$\frac{\sigma_s'}{\tau} = \frac{4Ld^2}{bh^2} < 1$ , 故截面最大正应力小于最

大切应力。15N的纵向剪切力作用下的有限元结果如图7(a)所示, 栓钉最大应力沿着  $y$  轴方向。

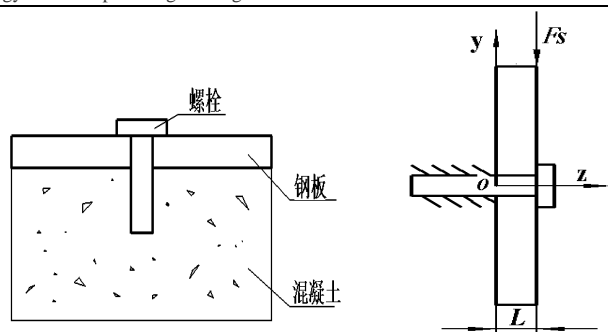
钢板受横、纵向剪切力共同作用时,  $b \times h$  矩形截面的形心轴为  $x$  轴,  $d \times b$  矩形截面为  $y$  轴, 通过钢板受横向剪切力与纵向剪切力的分析可知, 截面最大正应力小于最大切应力, 如图7(b)栓钉最大应力在截面处沿着  $x$  轴、 $y$  轴方向均有分布。



(a) 纵向剪切力应力云图 (b) 横纵向剪切力应力云图  
图7 不同剪切力钢板-栓钉应力云图

#### 1.4 螺栓连接件结构模型分析

采用螺栓连接时, 其物理模型如图8(a)所示。为研究方便, 忽略螺栓连接时产生的预紧力, 只考虑理想情况下钢板表面受到的剪切力。在有限元建模过程中, 接触约束和摩擦系数的选取与栓钉连接件一致, 分析时假定: (1) 螺栓截面变形符合平截面假定; (2) 螺栓与混凝土接触面始终紧密贴合; (3) 钢材和混凝土受力均处于弹性范围内; (4) 忽略螺栓轴力和与混凝土接触面的摩擦力。为模拟混凝土浇筑后与螺栓的紧密接触, 将螺栓与混凝土绑定约束, 通过约束条件将结构视为如图8(b)所示的圆形简化悬臂梁。



(a) 螺栓物理模型 (b) 简化螺栓悬臂梁

图8 螺栓结构模型

图8(b)中剖面线连接的螺栓截面假设为固定钢板的固定面, 受到的剪力为横向剪切力, 经过钢板的等效长度替换后, 研究悬臂梁下螺栓圆形截面的性能。截面的形心轴为  $x$  轴, 截面抗弯惯性矩  $I = \frac{\pi D^4}{64}$ , 传递到截面的剪切力为  $F_s'$ ,

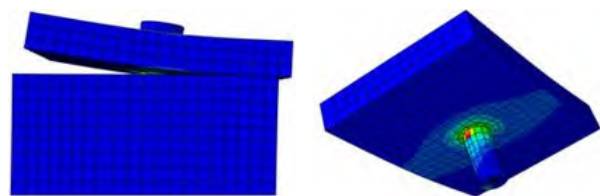
圆形截面的最大正应力在  $y = \pm \frac{d}{2}$ , 由式(1)

可知此时  $\sigma_s = \frac{32F_s' L}{\pi d^3}$ , 最大切应力在形心轴  $x$

轴处, 其值为  $\tau = \frac{4F_s'}{3A} = \frac{16F_s'}{3\pi d^2}$ , 故

$$\frac{\sigma_s}{\tau} = \frac{6L}{d}。$$

为判断在剪切力作用下螺栓最容易产生疲劳裂纹的部位, 将螺栓埋入混凝土的深度与栓钉在混凝土中埋入的深度、螺栓与栓钉直径、钢板-混凝土的尺寸大小与1.3节一致, 材料属性如表1所示, 利用图3的计算坐标系对螺栓进行性能分析。同样设定5组不同的剪力数据进行仿真分析, 剪力  $F_s$  的大小与方向选取与1.3节一致, 得到15N的横向剪切力作用下的应力云图如图9所示。



(a) 计算所得三维实体 (b) 钢板-螺栓应力云图

图9 螺栓的应力

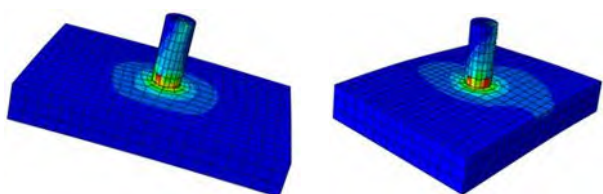
图9可知, 钢板被“掀起”且复合结构的最大剪切破坏位于钢板与混凝土结合面处, 最大应力位于图2靠近  $y$  轴两侧的  $x$ - $y$  平面内。由梁的弯曲应力可知, 复合结构结合面处弯矩最大, 易受到剪切破坏, 此时  $\frac{\sigma_s}{\tau} = \frac{6L}{d} > 1$ , 故截面最大正应力大于最大切应力, 与图9(b)的结果一

致。受到横向剪切力时，由于  $L/b < 5$ ，钢板截面的切应力会使其“翘起”。

钢板表面受到纵向剪切力时，螺栓圆形截面的形心轴为  $y$  轴，最大正应力在  $x = \pm \frac{d}{2}$ ，最

大切应力在形心轴  $y$  轴处，此时  $\frac{\sigma_s}{\tau} = \frac{6L}{d} > 1$ ，

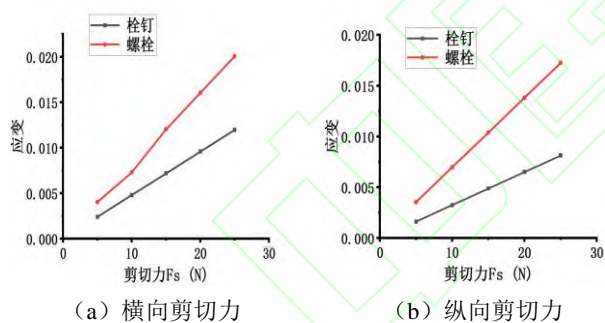
截面的最大正应力大于最大切应力，与图 10 (a) 螺栓最大应力沿着  $x$  轴方向一致。同理，受到纵向剪切力和横向剪切力的同时作用时，由钢板受横向剪切力与纵向剪切力的分析可知，截面最大正应力大于最大切应力，如图 10 (b) 螺栓最大应力在截面处沿着  $x$  轴、 $y$  轴方向。



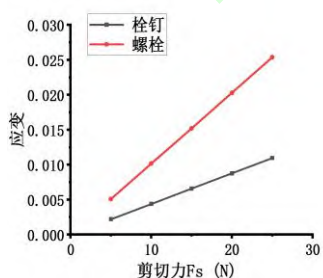
(a) 纵向剪切力应力云图 (b) 横纵向剪切力应力云图  
图 10 不同剪切力钢板-螺栓应力云图

### 1.5 剪切力对不同连接件的影响

建立 5 组不同剪切力数据进行仿真分析计算，得到不同连接件在相同的剪力大小和方向下，单连接件受剪应变的变化图，如图 11 所示。



(a) 横向剪切力 (b) 纵向剪切力



(c) 横向、纵向混合剪切力

图 11 剪切力对不同连接件的变形影响

由图 11 可知：连接件受到剪切力作用时，会发生局部变形；而在弹性范围下，随着剪切力的增大，连接件的变形也逐步增大；相同参数下，

螺栓受到的变形量大，使得组合结构在结合面处“剥离”，影响钢-混凝土结构的稳定性。故在钢-混凝土的组合结构中选取栓钉连接件继续进行研究。

## 2 栓钉连接件群钉效应分析

当单栓钉的布置间距较小，密集程度较高时，会导致栓钉与栓钉之间产生一定的耦合作用，形成显著的群钉效应。这种效应会导致各单栓钉的平均抗剪刚度下降，同时，各栓钉承载将会出现不均匀现象。因此，有必要分析栓钉直径和栓钉排布对群钉效应的影响，为复合结构床身中群钉连接件的设计提供参考。

### 2.1 栓钉直径对群钉效应的影响

为研究群钉效应下不同直径栓钉的抗剪性能，选取栓钉横向数目为 3，排布为 1 行时，对群钉的滑移变形、栓钉载荷传递及抗剪刚度进行分析。其中，栓钉间隔为 150mm，端距为 50mm，横向剪切力  $F_S$  为 10kN，直径  $D$  分别为 13mm、16mm、19mm、22mm 和 25mm。进行有限元仿真分析时，混凝土底部采用固定约束，钢板与混凝土接触面摩擦约束系数为 0.3，钢板-混凝土复合结构的材料属性见表 1。

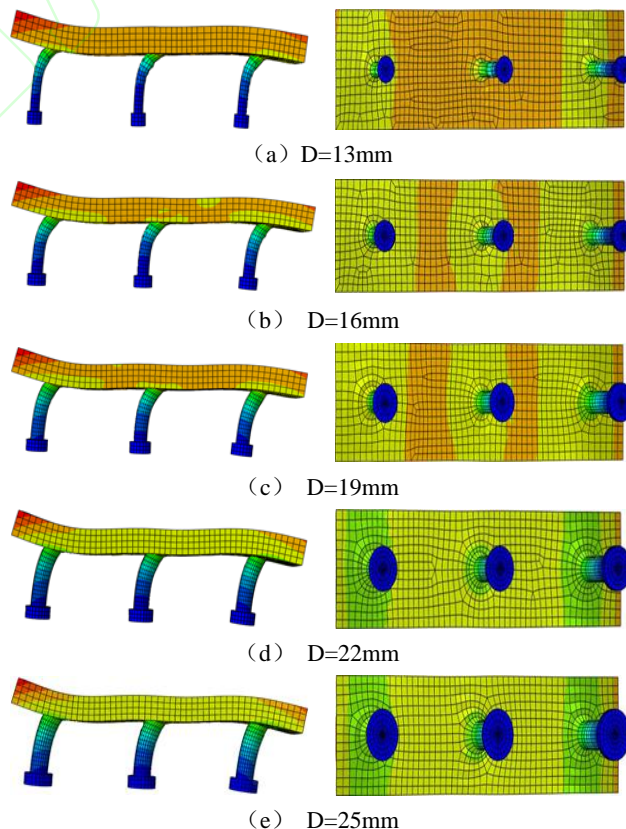


图 12 栓钉直径在横向剪切力下的摩擦界面滑移云图  
图 12 为不同栓钉直径在排布为 1 行的摩擦界



面滑移云图，通过比较可知，与钢板焊接的栓钉在正中时受到的剪切力最大，与第一节中单栓钉受到最大剪切力位置一致，摩擦面的滑移主要集中在最外侧栓钉处，此时引入栓钉的抗剪刚度  $K = \frac{F}{\delta}$ ，其中  $F$  为剪切力， $\delta$  为栓钉的变形量。随着栓钉直径的增大，摩擦面的滑移由中间栓钉逐渐向外侧的栓钉偏移，并且栓钉的抗剪刚度也随之增大。

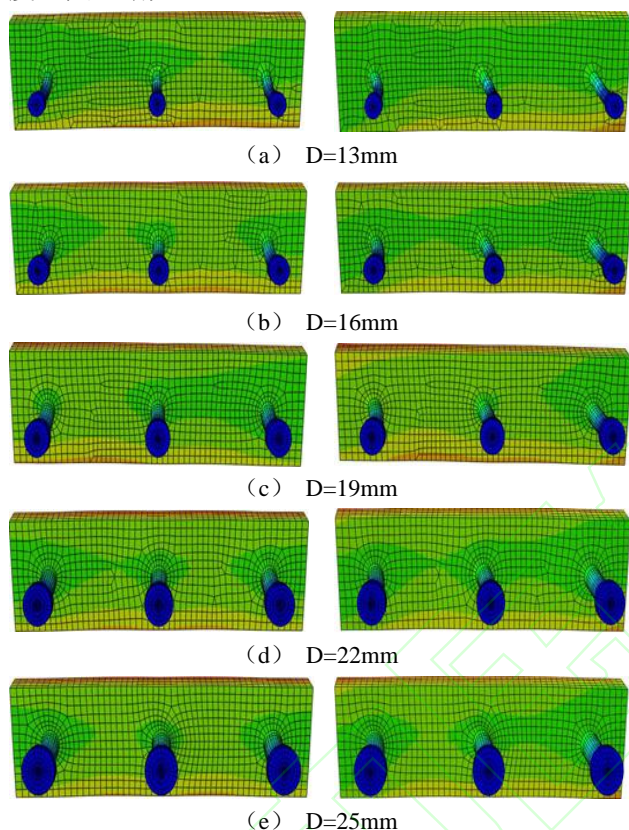


图 13 不同剪切力方向的摩擦界面滑移云图

图 13 为复合结构在不同的栓钉直径下受到纵向剪切力（左）、横纵混合剪切力（右）的摩擦界面滑移云图，随着直径的增大，摩擦面的滑移由中间栓钉逐渐向外侧栓钉偏移。

不同的栓钉直径对复合结构的单钉平均抗剪刚度有所影响。如图 14 中，随着栓钉直径的增大，复合结构的单钉平均抗剪刚度在逐渐提高，栓钉与混凝土接触面增大，承受的剪切力增大。由图 12-14 可知，栓钉受到横向剪切力时，复合结构单钉平均的抗剪刚度要强于纵向受剪和混合受剪的抗剪刚度，且滑移较小。

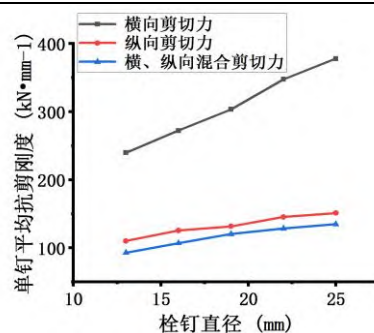


图 14 栓钉直径 1 行排列下的单钉平均抗剪刚度

## 2.2 栓钉排布方式对群钉效应的影响

为研究栓钉排布方式对复合结构单钉平均抗剪刚度的影响，将栓钉排布设为 2、3 行分别进行仿真分析。栓钉的直径、端距、间距选取均与前述一致，因此 2、3 行排布的栓钉数目会增多，钢板与混凝土的面积也会相应增加。图 15 为栓钉直径  $D=19\text{mm}$  时不同剪切力下的栓钉排布对钢板-混凝土摩擦界面滑移的影响。

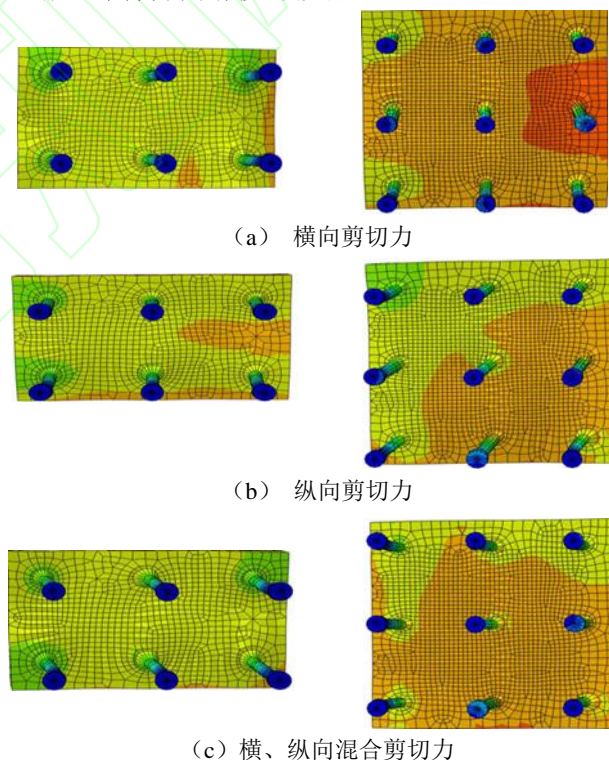


图 15 不同栓钉布局的摩擦界面滑移云图

由图 15 可知，2 行排布在施加力一侧的栓钉摩擦界面滑移较大，并且靠近中间位置的滑移量也较大，这是由于剪切力在传递过程中，受到临近栓钉抗剪刚度的影响；由于组合界面对称，3 行排布的摩擦界面滑移沿着各自剪切力方向的分布几乎一致，且受到合力的滑移较大。

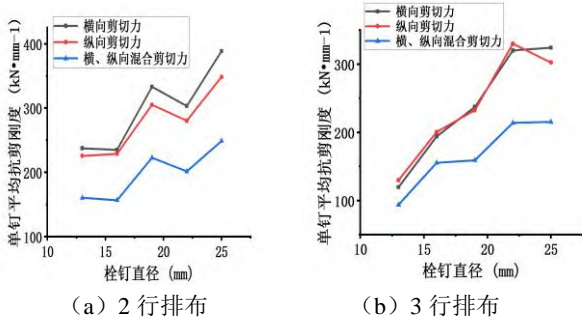


图 16 不同栓钉布局下单钉平均抗剪刚度

由图 16 可知, 栓钉排布为 2 行时, 随着栓钉直径的增大, 单钉平均抗剪刚度逐渐增大, 且复合结构在横向剪切力下单钉平均抗剪刚度最大。栓钉直径为 13mm 和 16mm 时, 单钉平均抗剪刚度不受剪切力方向的影响, 但在栓钉直径为 22mm 时, 抗剪刚度明显降低; 由于结构的对称性, 栓钉排布为 3 行时的横向与纵向剪切力单钉平均抗剪刚度相差不大, 这与图 15 中 3 行排布的滑移云图吻合。

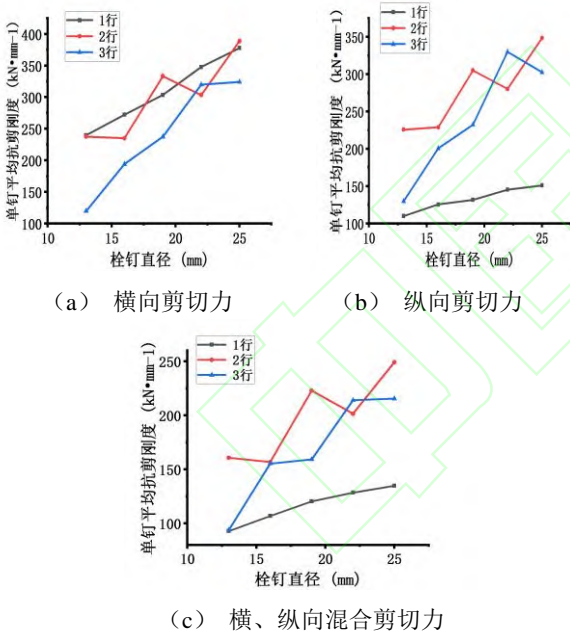


图 17 不同排布方式在不同剪切力下群钉效应的影响

图 17 为栓钉在不同排布方式下不同剪切力对群钉效应的影响。其中, 当栓钉受到横向剪切力时, 随着直径的增大, 平均抗剪刚度逐步增大, 且 2 行排布与 1、3 行排布的的单钉平均抗剪刚度有交集; 当栓钉受到纵向剪切力时, 2 行排列的抗剪刚度大于 1、3 行, 且 1 行的抗剪刚度最小, 3 行的抗剪刚度在直径为 22mm 时略大于 2 行, 随着栓钉直径的增大, 2、3 行与 1 行的抗剪刚度差距逐渐拉大; 当横、纵剪切力同时作用时, 2 行排布的抗剪刚度最大, 3 行的抗剪刚度在直径

为 22mm 时大于 2 行, 随着栓钉直径的增大, 2、3 行与 1 行的抗剪刚度差距逐渐拉开。因此, 复合结构床身中群钉连接件的设计应考虑不同位置受剪切力的情况, 选择不同排布方式。

### 2.3 群钉接触界面的受剪承载力

钢板-混凝土复合结构受到水平剪力  $F_S$  的早期加载阶段时均处于弹性状态, 如图 18 为横向剪切力下的一行三钉结构, 将其指定为复合结构的计算部分,  $b'$  代表组合结构计算部分的高度。

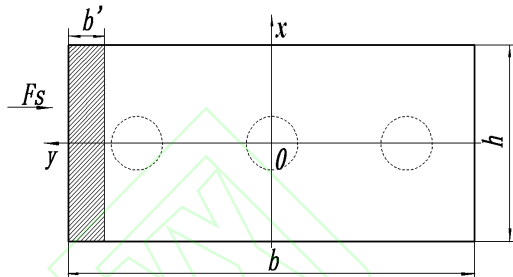


图 18 一行三钉的计算部分

弹性状态下的结构单元采用以下假设, 当试样处于弹性阶段时: (a) 复合结构计算部分的法向应变在弯矩作用下线性分布; (b) 复合结构计算部分的剪切应力在水平剪切力作用下呈二次抛物线分布; (c) 混凝土封装栓钉时二者形成单一接触, 忽略连接中的局部弯矩。因此, 复合结构计算部分的应力分布可以简化为如图 19 所示。该图中的  $\sigma$  和  $\tau$  分别代表复合结构在剪切力下的法向应力和剪切应力。

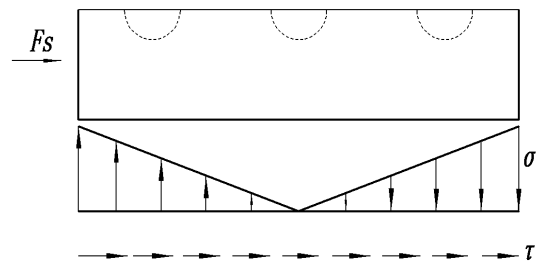


图 19 弹性阶段的应力分布

其中  $F_S$  代表施加在复合结构上的外加水平剪力;  $S_y$  表示图 18 阴影区域对中性轴 ( $x$  轴) 的静态力矩;  $I$  是复合结构计算部分对其中性轴的惯性矩, 此时:

$$\begin{cases} \sigma(y) = \frac{F_S L}{I} y = \frac{12 F_S L}{h b^3} y \\ \tau(y) = \frac{F_S S_y}{I h} = \frac{F_S}{2 I} \left( \frac{b^2}{4} - y^2 \right) \end{cases} \left( -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2} \right) \quad (7)$$

### 2.4 栓钉传递的力

图 12、15 为复合结构栓钉连接的布局。以图 20 横向剪切力作用下的一行三钉为例, 该图符号



解释如下： $d_{end}$  是最外栓钉到钢板端的距离； $l_{ei}$  ( $i = 1-3$ ) 表示每根栓钉的载荷传递长度，该长度范围内的法向和切向应力通过栓钉传递。

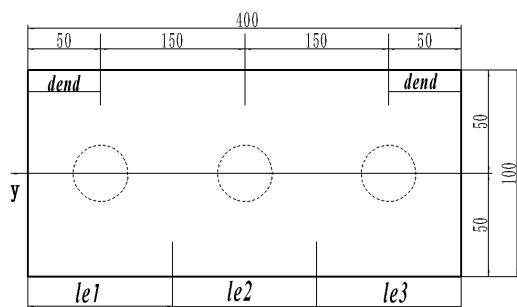


图 20 栓钉的布置

假设通过每根栓钉传递的力等于相应载荷传

递长度应力的积分，并且通过同一列栓钉传递的力是相同的，如图 15 中第一列中的栓钉转移相等剪切力。因此，通过水平连接两端的栓钉传递的钢板法向拉力 ( $V_i^v$ ) 和水平剪切力 ( $V_i^h$ ) 是：

$$\left. \begin{aligned} V_i^v &= d \int_{l_{ei}} \sigma(y) dy \\ V_i^h &= d \int_{l_{ei}} \tau(y) dy \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将剪切力  $F_s$  代入等式 (7) 和 (8) 中得到通过每个栓钉传递的法向拉力  $V^v$  与水平剪切力  $V^h$ ，由于计算公式的对称性及每根栓钉的载荷传递长度一致，其中处于拉伸端处栓钉的法向拉力  $V^v$  与水平剪切力  $V^h$  如表 2。

表 2 通过栓钉传递的力

(1 行)	横向剪切力 (kN)		纵向剪切力 (kN)		横、纵向混合剪切力 (kN)	
直径 (mm)	$V^v$	$V^h$	$V^v$	$V^h$	$V^v$	$V^h$
D <sub>1</sub>	0.126	0.301	0.438	0.975	0.456	1.020
D <sub>2</sub>	0.155	0.371	0.540	1.200	0.562	1.200
D <sub>3</sub>	0.184	0.441	0.642	1.425	0.668	1.492
D <sub>4</sub>	0.213	0.510	0.744	1.650	0.774	1.727
D <sub>5</sub>	0.242	0.580	0.843	1.875	0.877	1.963
(2 行)	横向剪切力 (kN)		纵向剪切力 (kN)		横、纵向混合剪切力 (kN)	
直径 (mm)	$V^v$	$V^h$	$V^v$	$V^h$	$V^v$	$V^h$
D <sub>1</sub>	0.100	0.242	0.177	0.489	0.203	0.546
D <sub>2</sub>	0.124	0.296	0.216	0.600	0.249	0.669
D <sub>3</sub>	0.146	0.352	0.258	0.714	0.296	0.796
D <sub>4</sub>	0.170	0.408	0.297	0.825	0.342	0.920
D <sub>5</sub>	0.194	0.464	0.339	0.939	0.391	1.047
(3 行)	横向剪切力 (kN)		纵向剪切力 (kN)		横、纵向混合剪切力 (kN)	
直径 (mm)	$V^v$	$V^h$	$V^v$	$V^h$	$V^v$	$V^h$
D <sub>1</sub>	0.522	0.522	0.522	0.522	0.738	0.738
D <sub>2</sub>	0.642	0.642	0.642	0.642	0.909	0.909
D <sub>3</sub>	0.765	0.765	0.765	0.765	1.082	1.082
D <sub>4</sub>	0.885	0.885	0.885	0.885	1.252	1.252
D <sub>5</sub>	1.005	1.005	1.005	1.005	1.421	1.421

由表 2 可知：栓钉在弹性状态下受到剪切力时，随着栓钉直径的增大，栓钉所受水平剪切力及滑移逐渐增大，其抗剪刚度反而在减小。表 2 的水平剪切力  $V^h$  与图 15-20 的平均抗剪刚度变化一致，证明此种计算方法基本符合有限元分析结果。通过栓钉传递的剪切力较外加载荷小，主要是外加载荷在传递过程中平衡接触面的摩擦力，损耗一部分力。

### 3 结论

本文以钢板-混凝土床身复合结构的抗剪连接件为研究对象，根据床身在工作时的受力情况，对连接件的受剪及排布方式进行仿真与分析，并用连接件受力理论进行验证，研究结论如下：

(1) 采用悬臂梁模型等效替换复合结构，得到了连接件在不同剪切力方向下的截面呈现 3 种不同应力分布：受到横、纵向剪切力时，单栓钉最大应力在垂直于剪切力方向的栓钉两侧，单螺栓最大应力在平行于剪切力方向的螺栓两侧；受到横、纵向混合剪切力作用时，单栓钉与单螺栓

最大应力均在结合面处有分布。

(2) 在弹性范围下,随着剪切力的增大,连接件的变形也逐步增大;而螺栓的变形量更大,更容易影响结合面的抗剪性能,使得复合结构在结合面处“剥离”,影响钢—混凝土结构的稳定性。

(3) 在群钉效应的作用下,随着栓钉直径的增大,复合结构的单钉平均抗剪刚度在逐渐提高,可以承受的剪切力也在增大;在相同的栓钉排布下,横向剪切力作用的单钉平均抗剪刚度要强于纵向和混合受剪刚度,并且在受到横向剪切力时复合结构的滑移较小。

(4) 通过建立栓钉的剪力传递理论,得到不同排布下栓钉的受力载荷与其平均抗剪刚度规律吻合较好,说明文中建立的受剪承载力计算公式是合理的。

### [参考文献]

- [1] Zulaika J J , Campa F J , Lacalle L N L D . An integrated process-machine approach for designing productive and lightweight milling machines[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(7-8):591-604.
- [2] Lee D G , Lee C S , Lee H G , et al. Novel applications of composite structures to robots, machine tools and automobiles[J]. Composite Structures, 2004, 66(1-4):17-39.
- [3] 徐平,肖振,谈海南,等. 钢纤维树脂混凝土填充结构机床基础件研究[J].机械设计,2013,30(05):52-55.  
Xu P, Xiao Z, Tan H N, et al. Study on structure element of machine tool filled with steel fiber polymer concrete structure[J]. Journal of Machine Design, 2013,30(05):52-55 (in Chinese).
- [4] Cho S K, Kim H J, Chang S H. The application of polymer composites to the table-top machine tool components for higher stiffness and reduced weight[J]. Composite Structures, 2011, 93(2): 492-501.
- [5] Lee D G , Suh J D , Kim H S , et al. Design and manufacture of composite high speed machine tool structures[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(10/11):1523-1530.
- [6] 刘通,许希武,林智育. 复合材料厚板单钉螺栓连接强度研究[J].机械强度,2017,39(02):353-359.  
Liu T, Xu X W, Lin Z Y. Research on the thick composite laminate bolt joint strength[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017,39(02):353-359 (in Chinese).
- [7] 何柏灵,葛东云. 复合材料连续损伤力学模型在螺栓接头渐进失效预测中的应用[J/OL]. 复合材料学报 :1-11[2020-03-19].<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191030.004>.  
He B L, Ge D Y. Application of continuum damage mechanics model for composites in progressive damage failure prediction of bolted joints[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica: 1-11[2020-03-19].<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191030.004> (in Chinese).
- [8] 俸翔,廖强,何安荣等. 复合材料螺栓连接失效的数值模拟[J].宇航材料工艺,2013,43(04):87-90.  
Feng X, Liao Q, He A R, et al. Numerical failure simulation of composite bolted joint[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013,43(04):87-90 (in Chinese).
- [9] 李源. 基于复合材料的加工中心关键结构件设计及多目标质量匹配优化[D].兰州:兰州理工大学,2019.  
Li Y. Design of key structural components of machining center based on composite materials and multi-objective mass matching optimization[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2019 (in Chinese).
- [10] 孙建,邱洪兴,蒋洪波. 螺栓连接装配式一字形钢筋混凝土剪力墙承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2019(8):23-30.  
Sun J, Qiu H X, Jiang H B. Analysis on load bearing capacities of rectangular precast reinforced concrete shear wall assembled by high strength bolts[J]. Journal of Building Structures, 2019,40(08):23-30 (in Chinese).
- [11] Sun J, Qiu H X, Jiang H B. Experimental study and associated mechanism analysis of horizontal bolted connections involved in a precast concrete shear wall system [J]. Structural Concrete, 2019, 20( 1) : 282-295.
- [12] 汪炳,黄侨,荣学亮. 基于 ABAQUS 的栓钉连接件承载能力分析及验证 [J]. 中外公路,2017,37(02):126-131.  
Wang B, Huang Q, Rong X L. Analysis and verification of load-bearing capacity of stud connector based on ABAQUS[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017,37(02):126-131 (in Chinese).
- [13] 黄侨,李文贤,汪炳. 考虑界面滑移与剪切变形的钢-混凝土组合梁解析方法[J].南京航空航天大学学报,2018,50(01):131-137.  
Huang Q, Li W X, Wang B. Analytical method of

steel-concrete composite beam based on interface slip and shear deformation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018,50(01):131-137 (in Chinese).

- [14] 秦飞. 材料力学[M]. 北京:科学出版社:2012.  
Qin F. Mechanics of materials[M]. Beijing: Science Press,2012 (in Chinese).
- [15] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S] .北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.( in Chinese).
- [16] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 2015 版. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010. [S] .2015 ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2015.( in Chinese).

