混凝土床身的有限元分析研究

天水星火机床有限责任公司　徐燕

本文为减轻机床重量，降低机床成本，将铸铁床身改为混凝土床身结构。对混凝土床身进行受力分析和有限元分析，对床身薄弱环节进行合理的加筋处理，再进行有限元分析，得到满足机床切削要求和机械性能的混凝土床身。

一、机床简介

1. 床身受载情况

为减轻机床重量，降低机床成本，将铸铁床身改为混凝土床身结构，安装直线导轨或镶钢导轨。为保证强度，满足机床的机械性能和车削要求，需要对混凝土床身进行有限元分析，找出薄弱环节，对薄弱环节进行特殊处理。图 1 为机床主要部件分布图，机床床身受力情况分析如图 2 床身受载图所示，床身主要受力分为两部分：一部分是受到主轴箱和尾座以及工件重力作用；另一部分切削时切削反力通过刀架对床身的作用。其中主轴箱和尾座因与床身直接接触，其重力直接作用于自身所处位置的床身导轨上，其中主轴箱重力为 20000N，尾座重力为 9000N；工件重力分别由主轴箱卡盘和尾座承担，将其均分，即主轴箱和尾座各承担 1/2 的重力，即 3000N，该力间接作用于床身；切削反力直接作用于刀架，为简便起见，将切削力分解为水平方向切削力和垂直向下的压力。

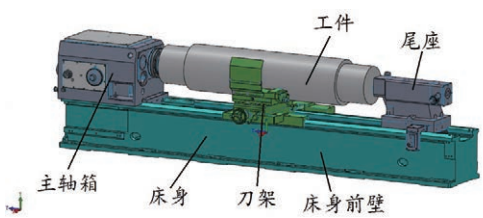


图 1 机床主要部件分布图

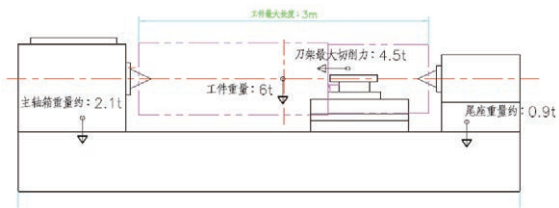


图 2 床身受载图

2. 影响床身受载的主要参数

（1）主轴转速范围：3 ～ 300rpm；（2）主轴最大扭矩：12KN · m；（3）最在承重工件重量：6t；（4）刀架最大切削力：4.5t，按两个方向的力进行分解。

3 主要部件材料信息

机床主轴箱、尾座以及刀架均为铸铁，材料为 Q345B，fy=345MPa，泊松比为 0.3，其余筋板材料均为 Q235B，fy=235MPa，泊松比为 0.3，弹性模量 E=206000MPa。考虑到该项目中要求结构件在工作状态中处于弹性状态，因此计算时铸铁材料本构关系选取双折线随动强化模型，应力－应变关系分为弹性阶段和塑性阶段，塑性段的斜率取为初始弹性模量的 0.01 倍，即 0.01E=2060MPa。应力－应变关系模型如图 3 所示。

对于床身混凝土强度等级按 C30 选取（注：C30 的配比参考方案，水：175kg，泥：461kg，砂：512kg，石子：1252kg，配合比为 0.38 ： 1 ： 1.11 ： 2.72 ）。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

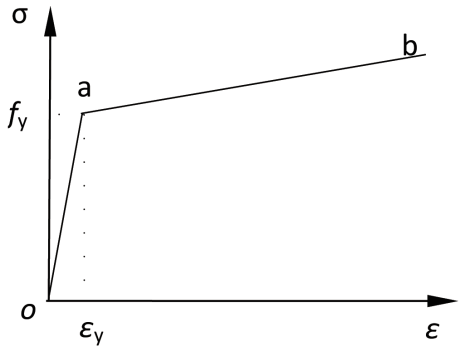


图 3 钢材材料本构关系

其应力－应变本构模型按照《混凝土结构设计规范（GB50017−2014）》中给出的本构模型选取，具体材料本构关系如下。

（1）受压骨架线，受压骨架线计算公式如式（1）所示，示意图如图 4 所示。混凝土单轴受压应力－应变曲线的参数取值如表 1 所示。

$$\sigma = (1-d_c)E_c\varepsilon \tag{1}$$

$$d_c = \begin{cases} 1-\dfrac{\rho_c n}{n-1+x^n} & x \le 1 \\ 1-\dfrac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2+x} & x > 1 \end{cases}$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c\varepsilon_{c,r}}$$

$$n = \frac{E_c\varepsilon_{c,r}}{E_c\varepsilon_{c,r} - f_{c,r}}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}$$

式中：α_c—混凝土单轴受压应力－应变曲线下降段参数值，按表 1 取用；$f_{c,r}$—混凝土单轴抗压强度代表值，其值可根据实际结构分析的需要分别取 f_c、f_{ck} 或 f_{cm}；$\varepsilon_{c,r}$—与单轴抗压强度 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变；d_c—混凝土单轴受压损伤演化参数。

表 1 混凝土单轴受压应力－应变曲线的参数取值

$f_{c,r}$ (N/mm²)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
$\varepsilon_{c,r}$ (10^{-6})	1470	1560	1640	1720	1790	1850	1920	1980	2030	2080	2130	2190	2240
α_c	0.74	1.06	1.36	1.65	1.94	2.21	2.48	2.74	3.00	3.25	3.50	3.75	3.99

（2）受拉骨架线，受拉骨架线计算公式如式（2）所示，如图 4 混凝土模型示意图所示。混凝土单轴受拉应力－应变曲线的参数取值如表 2 所示。

$$\sigma = (1-d_t)E_c\varepsilon \tag{2}$$

$$d_t = \begin{cases} 1-\rho_t\left(1.2-0.2x^5\right) & x \le 1 \\ 1-\dfrac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7}+x} & x > 1 \end{cases}$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c\varepsilon_{t,r}}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}$$

式中 α_t—混凝土单轴受拉应力－应变曲线下降段参数值，按表 2 取用；$f_{t,r}$—混凝土单轴抗拉强度代表值，其值可根据实际结构分析的需要分别取 f_t、f_{tk} 或 f_{tm}；$\varepsilon_{t,r}$—与单轴抗压强度 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值压应变；d_t—混凝土单轴受拉损伤演化参数。

表 2 混凝土单轴受拉应力－应变曲线的参数取值

$f_{c,r}$ (N/mm²)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_{c,r}$ (10^{-6})	65	81	95	107	118	128	137
α_c	0.31	0.70	1.25	1.95	2.81	3.82	5.00

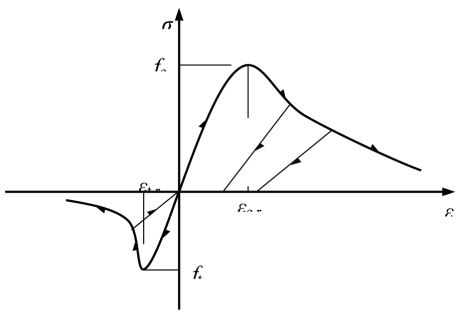


图 4 混凝土模型示意图

二、床身有限元分析

1、ABAQUS 有限元建模

ABAQUS 是功能强大的有限元软件，可以分析复杂的固体力学和结构力学系统，模拟非常庞大复杂的模型，处理高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析，同时还可以完成系统的分析和研究。由于 ABAQUS 强大的分析能力和模拟复杂系统的可靠性，它在各国的工业和研究中得到广泛的应用，在大量的高科技产品

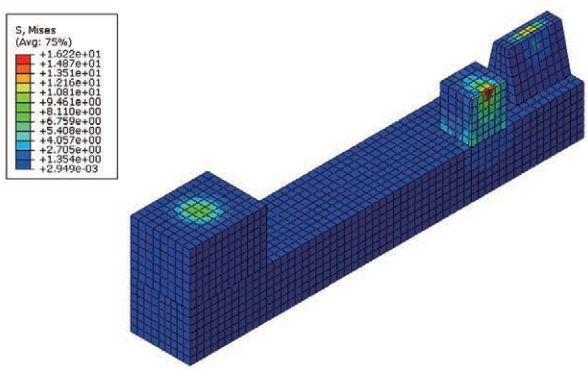
开发中发挥这巨大的作用。

根据机床的装置特征，该装置总体包括四个主要部件：主轴箱、刀架、尾座以及床身，在 ABAQUS 中，所有部件均采用三维实体单元 C3D8 建模，可以真实的模型整个结构和局部子构件的受力性能，包括应力、应变以及位移等状态，可以直观的反映结构的薄弱环节，为实际加固改造提供方案。

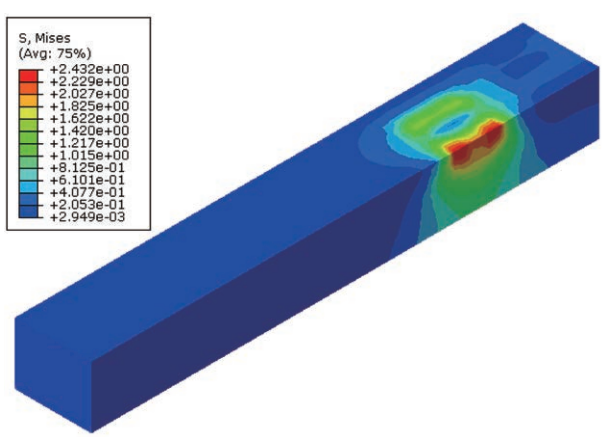
2、床身为素混凝土材料下的有限元分析

（1）Mises 应力分析。

图 5 混凝土 Mises 应力云图给出了整个机床的受力 Mises 应力云纹图，其中（a）为整体 Mises 应力云图，（b）为混凝土床身受力云图。由图 5（a）可以看出，在中间的刀架上由于存在一向外的水平力，使得该处发生应力集中，最大应力值为 16.2MPa，其余各部分应力相对较小。图 5（b）为混凝土床身的应力分布示意，可以看出，混凝土床身最大应力为刀架和混凝土的接触面处，其值约为 2.43MPa，该处混凝土发生压碎现象，其余部位混凝土应力相对较小。



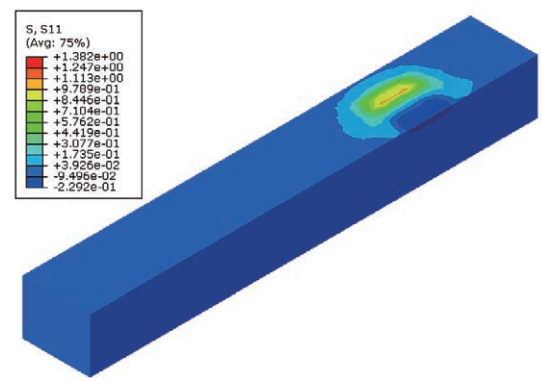
（a）整体 Mises 应力云图



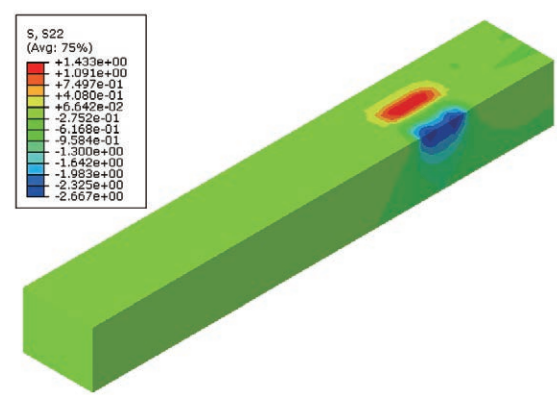
（b）混凝土床身 Mises 应力云图

图 5 混凝土 Mises 应力云图

为了分析当床身为混凝土时，机床床身在外荷载作用下的最不安全（最容易破坏）部位，有必要对每个应力分量进行计算。图 6 混凝土 Mises 应力分量云图所示为混凝土床身 Mises 应力分量计算结果，其中（a）为沿着 X 方向的应力分量，（b）为沿着 Y 方向的应力分量。可以看出，在水平力的作用下，使得刀架下部混凝土受力不均匀，载荷作用端为受压状态，而远端为受拉状态，而混凝土工作中基本不考虑其受拉作用，因为该类材料一旦受到拉应力，立即开裂，而且裂缝会发展直至贯通整个截面。由图 6（a）应力云图可以看出，其沿着 X 方向的 S_{11}=1.38MPa，图中红色部位将产生沿着床身长边方向的横向裂缝，这在结构中是不安全的，应进行加固处理。同样由图 6（b）可以看出，红色区域存在 Y 方向的应力分量，其值约为 1.44MPa，超过了我国混凝土规范中混凝土抗拉强度设计值，因此，对该部分应进行加筋处理，使其在上述荷载作用下满足相应的规范要求和使用要求。



（a）混凝土 X 向应力云图



（b）混凝土 Y 向应力云图

图 6 混凝土 Mises 应力分量云图

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

（2）变形分析。

图 7 所示为混凝土床身的变形云图，可以看出由于混凝土材料具有良好的受压承载力，混凝土的变形很小。图 7 中红色区域是由于水平分力产生的俯冲变形，由于混凝土为脆性材料，因此易被压碎。

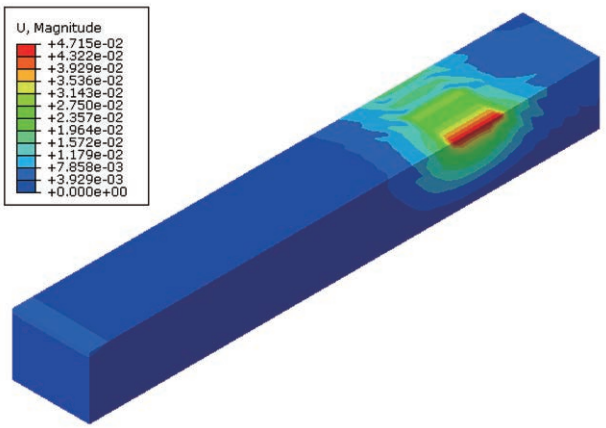


图 7 混凝土床身变形云图

三、对混凝土床身进行加筋处理

1、加筋方案

由上文分析可知，当床身为素混凝土时，刀架底部床身混凝土边缘易发生压碎破坏。为了保证机床的正常工作，必须对混凝土床身进行加筋处理。现根据床身的特征和受力情况，进行以下三个方面的加筋处理，以保证机床床身的性能要求。

（1）对混凝土床身设置钢筋笼，包括四角的受力纵筋和箍筋，其中四根受力钢筋采用二级带螺纹钢筋，直径为 18mm，箍筋采用一级光圆钢筋，直径为 8mm，沿着混凝土长边方向间距为 200mm。

（2）在主轴箱和尾座与混凝土床身上的接触表面层设置一层钢筋网片，钢筋采用一级光圆钢筋，直径为 8mm，横向间距为 120mm，纵向间距为 200mm。

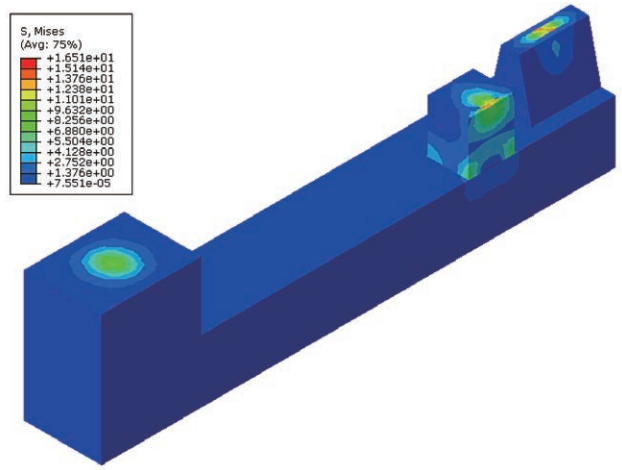
（3）为了将刀架的水平切削力传力到整个混凝土床身，避免刀架所接触的混凝土床身被压碎，在刀架行程范围的混凝土床身上设置四根通长的预埋件，其直径为为 28mm，并且沿着高度方向设置 3 道箍筋进行约束。

三种加筋方案中，通过对混凝土床身中的预埋件进行有限元分析，预埋件承担的应力是最大的，约为 16.5MPa。其次为钢筋笼，约为 11.7MPa，钢筋网片的应力相对较小，约为 9.9MPa。因此，在混凝土床身设置上述三种加筋方案，能够较好的避免混凝土由于水平荷载作用的开裂和局部压碎现象。

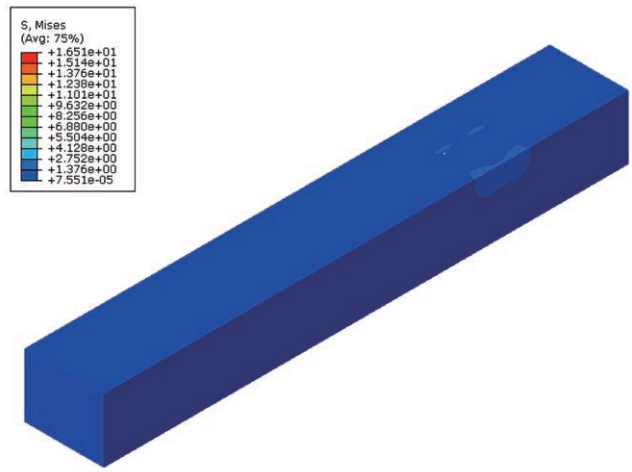
2. 混凝土床身加筋后有限元分析

（1）加筋后 Mises 应力分析。

图 8 给出了 Mises 应力云图，其中（a）为机床整体应力分布，（b）为加筋后混凝土床身应力分布。由图 8（a）可以看出，在中间的刀架上由于存在一面外的水平力，使得该处发生应力集中，最大应力值为 16.5MPa，其余各部分应力相对较小。图 8（b）为混加筋后的应力分布示意，可以看出，相对于加筋前的素混凝土，加筋后混凝土的整体应



（a）机床整体应力分布



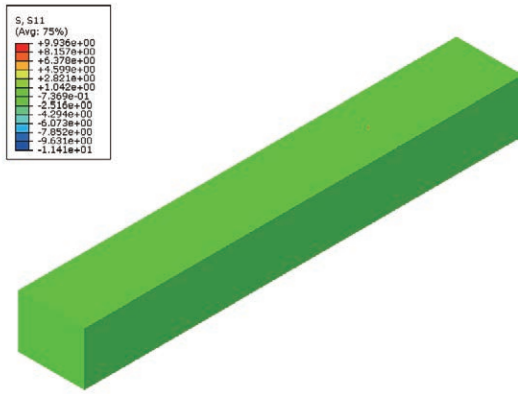
（b）加筋后混凝土床身应力分布

图 8 Mises 应力云图

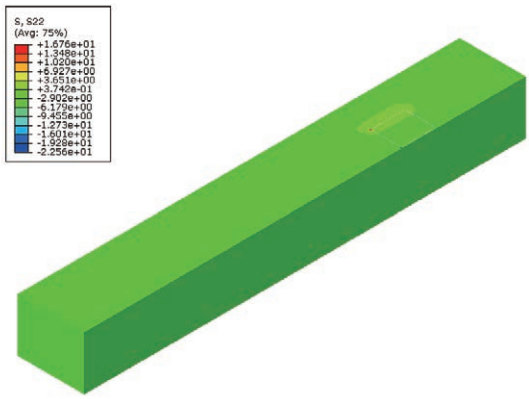
力分布比较均匀，没有出现由于局部应力过大造成的开裂或者局部压碎现象，其中内部锚杆承受了大部分水平荷载，其应力值约为 16.5MPa，整个混凝土床身受力安全。

（2）加筋后混凝土床身 Mises 应力分量分析。

图 9 所示为加筋后混凝土 Mises 应力分量云图，其中（a）为 S_{11} 应力分量（沿着 X 方向），（b）为 S_{22} 方向应力分量（沿着 Y 方向）。可以看出，混凝土床身应力沿着 X 方向和 Y 方向帆布均比较均匀，没有出现第一种计算结果中的开裂等问题，说明加筋后混凝土床身具有良好的承载能力。



（a）混凝土 S11 应力分量云图



（b）混凝土 S22 应力分量云图

图 9 加筋后混凝土 Mises 应力分量云图

四、结语

通过对混凝土床身中的预埋件进行有限元分析，发现在混凝土床身设置上述三种加筋方案，能够较好地避免混凝土由于水平荷载作用的开裂和局部压碎现象。

对加筋后 Mises 应力分析，加筋后混凝土的整体应力分布比较均匀，没有出现由于局部应力过大造成的开裂或者局部压碎现象，其中内部锚杆承受了大部分水平荷载，其应力值约为 16.5MPa，整个混凝土床身受力安全。

对加筋后混凝土床身 Mises 应力分量分析，混凝土床身应力沿着 X 方向和 Y 方向帆布均比较均匀，没有出现开裂等问题，说明加筋后混凝土床身具有良好的承载能力。

将铸件床身改为混凝土床身，通过对混凝土床身有限元分析后设置三种加筋方案，加筋处理后再次进行有限元分析，理论分析满足机床加工性能的要求，同时减轻机床重量，降低机床成本，对机床来讲是一个挑战，也是一个新思维，需要我们在实践中进一步验证和完善。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn