

DOI: 10.7652/xjtuxb201509003

地脚螺栓蠕变松弛对大型数控机床 几何精度衰退的影响

刘海波, 吴嘉锟, 王永青

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 116024, 辽宁大连)

摘要: 针对大型数控机床地脚螺栓蠕变松弛的问题,建立了分布式螺栓预紧力和蠕变力的计算模型及螺栓顺序预紧和室温蠕变的模拟模型。计算模型中考虑了螺栓常温蠕变特征和螺栓孔单元间的弹性交互作用,量化分析时利用了模拟模型,以揭示蠕变松弛对机床几何精度衰退的影响规律。结合 20℃ 环境温度下拉拔实验获得了 8.8 级 T 型地脚螺栓的 3 个蠕变系数,再经 9 000 h 蠕变模拟得到的地脚螺栓预紧力松弛比约为 14.8%,床身导轨安装面直线度和平行度的相对衰退量分别为 4.3 μm 和 2.8 μm 。该结果表明,所建模型对大型数控机床基础件的螺栓预紧优化和几何精度保持能力的提升具有指导意义。

关键词: 地脚螺栓;蠕变松弛;几何精度;精度衰退;大型数控机床

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)09-0014-04

Impact of Anchor Bolts Creep Relaxation on Geometric Accuracy Decline of Large Computer Numerical Control Machine Tools

LIU Haibo, WU Jiakun, WANG Yongqing

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of
Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Aiming at anchor bolt creep relaxation of large CNC machine tools, a calculation model for preload and creep force of the distributed bolts is established, where both bolts creep at room temperature and elastic interaction among bolt-hole units are taken into consideration. A simulation for anchor bolt sequential preload and creep is also conducted and utilized to reveal the influence of bolt creep relaxation on machine geometric accuracy decline quantitatively. Furthermore, three creep parameters of the 8.8 level T-type anchor bolt are estimated via the drawing experiments under 20℃ ambient temperature. After 9 000 hours creep simulation, the anchor bolt preload relaxation reaches 14.8%, and the relative accuracy declines of straightness and parallelism of bed linear guide mounting surfaces get 4.3 μm and 2.8 μm , respectively. The developed model can be used for the fundamental parts bolt preload optimization and the geometric accuracy retention capability enhancement of large CNC machine tools.

Keywords: anchor bolt; creep relaxation; geometric accuracy; accuracy decline; large computer numerical control machine tool

数控机床床身是保障机床正常服役的关键基础件^[1]。大型/重型数控机床的床身安装大都采用地脚螺栓分布预紧方式。预紧后的地脚螺栓蠕变松弛将直接影响螺栓预紧载荷大小、床身与地基间的连接刚度、床身应力分布等,导致床身几何尺寸发生变化,进而影响机床精度的保持状态。因此,研究数控机床服役过程中的地脚螺栓长期蠕变松弛行为,及其对床身预紧状态和几何精度的影响具有重要意义和工程价值。

国内外学者和研究机构针对金属材料结构的高温蠕变开展了大量的研究^[2]。考虑到数控机床的实际工作环境,地脚螺栓的常温蠕变特征最为显著。Kassner等综述了常温/低温条件下的结晶材料的蠕变行为,讨论了蠕变塑性的基本机制^[3]。Delhomme等基于黏弹性理论对内埋于混凝土的地脚螺栓进行了数值分析,预测了地脚螺栓预应力损失规律^[4]。Fan等通过研究泥岩和螺栓瞬间粘合强度与螺栓蠕变速率、螺栓失效的关系,提出了螺栓在软质岩中的设计和应用准则^[5]。Xu等根据螺栓拉拔蠕变实验,建立了螺栓拉拔刚度与蠕变损伤模型^[6]。Kim研究了低压灌浆地脚螺栓蠕变松弛行为和载荷传递机制^[7]。杨国庆等提出了一种螺栓被连接件轴向刚度高精度计算的半解析方法,实现了不同材料不同几何尺寸参数所对应被连接件刚度的精确计算^[8]。Gurinsky分析了螺栓在黏性土壤中长期蠕变现象,并对螺栓变形进行了实验测试^[9]。上述研究多面向单个螺栓的常温蠕变,而多个螺栓的常温蠕变行为及对连接性能的交互影响仍缺乏针对性研究。

大型数控机床床身地脚螺栓安装具有螺栓分布式、数量多、预紧交互影响显著等特征,床身在长期服役过程中的预紧状态及精度衰退规律复杂,因此有必要分析地脚螺栓蠕变松弛及其影响。

1 虑及螺栓蠕变的弹性交互作用模型

为便于问题描述,将螺栓孔单元简化为弹簧-节点模型,其弹性交互作用模型如图1所示。 m_i^u 表示第*i*个螺栓孔单元的上节点,位于螺栓孔单元上圆心; m_i^d 表示第*i*个螺栓孔单元的下节点,位于螺栓孔单元下圆心。 k_i^1 为轴向刚度,位于 m_i^u 与 m_i^d 之间,表示抵抗沿螺栓孔单元轴向弹性变形的能力; k_i^2 为交互刚度,表示抵抗螺栓孔单元间的弹性交互作用导致的交互变形能力。

设第*i*个螺栓孔单元的预紧力 F_i 垂直作用在

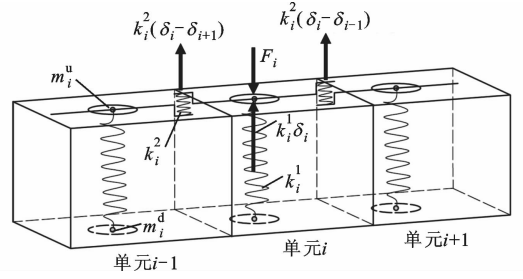


图1 螺栓孔的弹簧-节点模型

节点 m_i^u 上,根据静力学平衡关系得

$$F_i = k_i^1 \delta_i + k_i^2 (2\delta_i - \delta_{i+1} - \delta_{i-1}) \quad (1)$$

式中: δ_i 为第*i*个螺栓孔单元的节点 m_i^u 位移。

在常温环境下($T < 0.3T_m$, T 为环境温度, T_m 为螺栓熔点温度),基于时效硬化的幂律模型常用于描述金属常温蠕变行为^[10],即

$$\dot{\epsilon}^c = \frac{d\epsilon^c}{dt} = \alpha \bar{q}^n t^m \quad (2)$$

式中: $\dot{\epsilon}^c$ 为螺栓轴向应变率; $\bar{q}$ 为单轴等效偏应力; t 为蠕变时间; α 、 n 、 m 为蠕变系数, $\alpha > 0$ 、 $n > 0$ 、 $-1 \leq m < 0$ 。

对式(2)进行蠕变时间积分,得到螺栓蠕变引起的轴向应变

$$\epsilon^c = \int \alpha \bar{q}^n t^m dt = \frac{\alpha}{m+1} \bar{q}^n t^{m+1} \quad (3)$$

在螺栓蠕变的影响下,螺栓预紧力

$$F_i = EA(\epsilon_i^c + \epsilon_i^0) \quad (4)$$

式中: ϵ_i^c 为第*i*个螺栓蠕变引起的螺栓轴向应变; ϵ_i^0 为第*i*个螺栓的初始应变; E 为螺栓弹性模量; A 为螺栓横截面积。

设螺栓组包含*N*个螺栓,根据式(1)可推导出预紧力弹性交互关系的通用模型

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\delta} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F} = [F_i]_{1 \times N}^T$ 为预紧力向量; $\boldsymbol{\delta} = [\delta_i]_{1 \times N}^T$ 为螺栓孔节点位移向量; $\mathbf{K}$ 为交互作用刚度矩阵。常数 $a = 2k_i^2 + k_i^1$ 、 $b = -k_i^2$,则

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} a & b & \cdots & b \\ b & \ddots & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ b & \cdots & b & a \end{bmatrix}$$

2 螺栓蠕变力的计算

2.1 计算模型

由式(4)和式(5)可知,螺栓实际预紧状态是由螺栓蠕变和蠕变螺栓间的弹性交互共同作用的结

果,其中螺栓蠕变力是分析螺栓预紧状态变化的关键。螺栓蠕变力定义为由蠕变引起的螺栓轴向应变产生的力,即

$$F^c = EA\epsilon^c = \frac{EA}{L}\delta^c = \Delta F - \Delta F^f \quad (6)$$

式中: F^c 为螺栓蠕变力; L 为螺栓杆基本长度; δ^c 为螺栓杆长度方向的蠕变量; ΔF 为螺栓预紧力变化量; ΔF^f 为蠕变螺栓间弹性交互作用引起的力变化量。 δ^c 可直接根据蠕变前、后螺栓中杆长的变化计算得到。

由于在蠕变过程中螺栓变形为塑性的,所以 E 为变量,无法直接利用螺栓蠕变量 δ^c 计算螺栓蠕变力。根据式(6),螺栓蠕变力可通过计算 ΔF^f 间接获取。

根据式(5),可推出

$$\Delta F^f = \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\delta}^c \quad (7)$$

式中: $\Delta F^f = [\Delta F_i^f]_{1 \times N}^T$ 为蠕变螺栓间弹性交互作用引起的预紧力向量; $\boldsymbol{\delta}^c = [\delta_i^c]_{1 \times N}^T$ 为螺栓的蠕变位移向量。

结合式(6)和式(7),得出 N 个螺栓蠕变力的计算式,即

$$\mathbf{F}^c = \Delta \mathbf{F} - \Delta \mathbf{F}^f = \Delta \mathbf{F} - \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\delta}^c \quad (8)$$

式中: $\mathbf{F}^c = [F_i^c]_{1 \times N}^T$ 为蠕变力向量; $\Delta \mathbf{F} = [\Delta F]_{1 \times N}^T$ 为螺栓预紧力变化量向量。

2.2 蠕变力的预测

对内埋于混凝土地基的地脚螺栓蠕变进行数值模拟,提取各单元的弹性刚度 k_i^1 和 k_i^2 、螺栓杆长方向蠕变量 δ^c 、螺栓预紧力变化量 ΔF 等关键参量,进而计算数控机床地脚螺栓组的蠕变力。为削弱或消除混凝土蠕变疲劳对螺栓蠕变分析的耦合影响,地脚螺栓采用锚板结构。在ABAQUS环境下,建立了数控机床地脚螺栓蠕变模拟模型,如图2所示,主要参数包括:床身长度为5 m、宽度为2 m;地脚螺栓数为10;螺栓材料为16 Mn,床身材料为灰铸铁,地基材料为混凝土,锚板材料为Q235;螺栓规格为8.8级T型,螺栓的屈服极限为640 MPa、直径为40 mm、安全系数为0.52。通过螺栓拉伸蠕变实验获得该螺栓的蠕变系数 $\alpha = 3.51 \times 10^{-12}$ 、 $n = 2.5$ 、 $m = -0.91$ 。

所选的10个地脚螺栓被分成两排,对称分布于床身两侧,地脚螺栓定义序列如图3所示。采用中间向两边对称的预紧原则进行地脚螺栓组的预紧顺序规划,规划后的地脚螺栓预紧顺序为螺栓3—螺栓8—螺栓4—螺栓9—螺栓7—螺栓2—螺栓6—

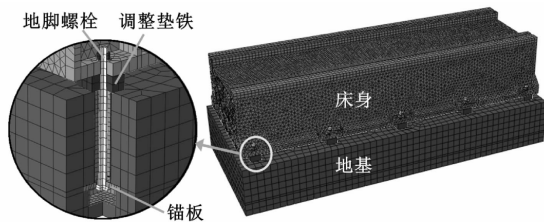
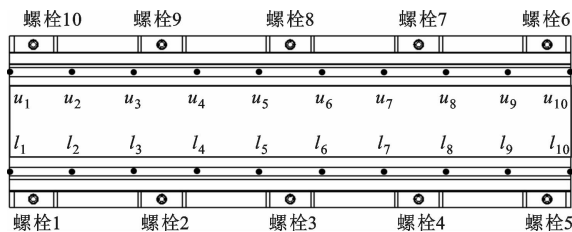


图2 地脚螺栓蠕变模拟模型



u_i 和 l_i 分别为标记在上和下导轨面的测点位置

图3 地脚螺栓序列

螺栓1—螺栓10—螺栓5,以获得优化后的初始预紧状态。

对地脚螺栓同时施加预紧力 F ,则各地脚螺栓孔单元间无弹性相互作用,即 $k_i^2 = 0$,进而可计算螺栓孔单元 i 的轴向刚度 $k_i^1 = F/\delta_i^1$, δ_i^1 为同时施力时节点位移。按预先规划的预紧顺序对地脚螺栓施加预紧力 F ,由式(1)可推导出第 i 个地脚螺栓孔单元的交互刚度

$$k_i^2 = \frac{F - k_i^1 \delta_i}{2\delta_i - \delta_{i+1} - \delta_{i-1}} \quad (9)$$

进而计算获得各地脚螺栓孔单元的 k_i^1 和 k_i^2 ,其分布如图4所示。

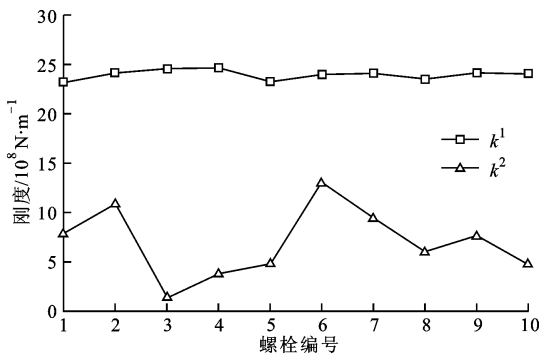


图4 螺栓孔单元刚度

提取不同蠕变模拟时间节点的 $\boldsymbol{\delta}^c$ 与 $\Delta \mathbf{F}$,结合式(9)求得的 $\mathbf{K}$,并将其代入式(8)计算螺栓蠕变力。经9 000 h螺栓蠕变模拟,3号地脚螺栓的蠕变力及预紧力变化量如图5所示。由图可以看出,随着蠕变时间的推进,地脚螺栓蠕变力趋于稳定,而蠕变螺栓间的弹性交互作用对螺栓预紧力变化的影响逐渐

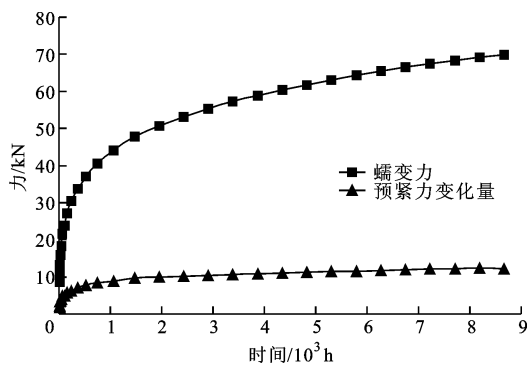


图 5 3 号地脚螺栓的蠕变力与预紧力变化量曲线

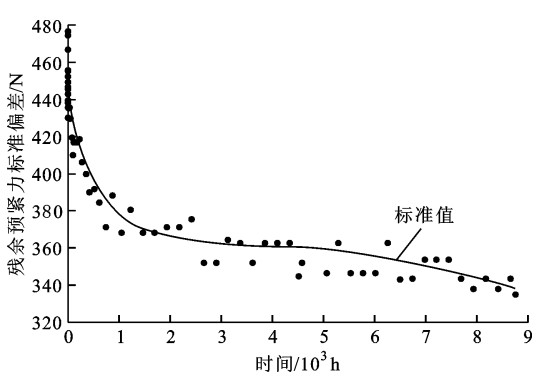


图 7 蠕变螺栓的残余预紧力标准偏差

增大。

3 机床几何精度衰退分析

为分析地脚螺栓长期蠕变松弛对床身导轨安装面的直线度、平行度等关键几何精度衰退的影响,在床身上、下 2 个导轨安装面的中线上依次均匀地取 10 个测点,得到 2 个测点序列 $S^i, i=1,2,\cdots,10$ 和 $S^i, i=1,2,\cdots,10, u_i$ 和 l_i 分别为标记在上和下导轨面的测点位置,如图 3 所示。

由于螺栓蠕变及其弹性交互影响,使得螺栓残余预紧力松弛。按照规划顺序预紧后的螺栓初始预紧力和蠕变后的地脚螺栓残余预紧力对比曲线如图 6 所示。相比初始预紧状态,地脚螺栓预紧力的松弛比约为 14.8%。不同蠕变时间节点的地脚螺栓残余预紧力标准偏差计算结果分布如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,随着螺栓蠕变松弛,螺栓组预紧力分布均匀性与残余预紧力变化速率有关。

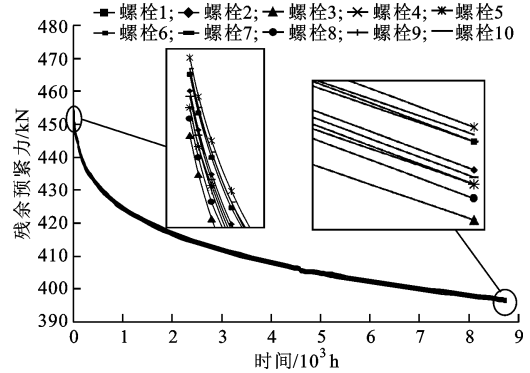
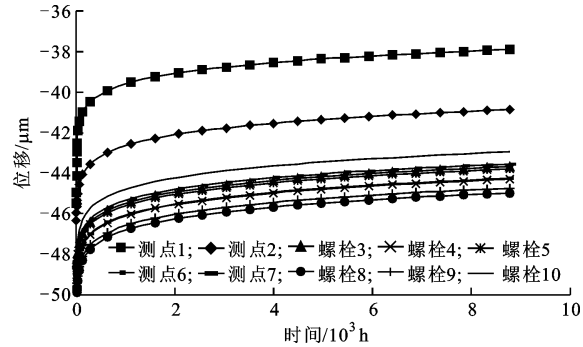
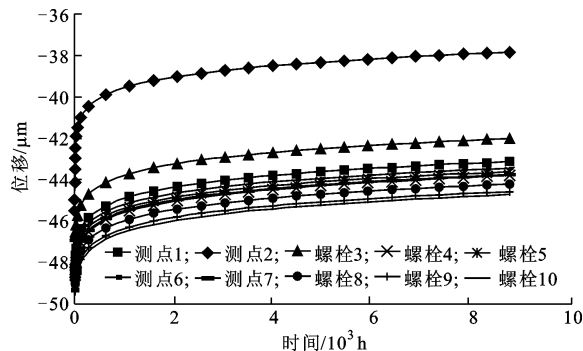


图 6 地脚螺栓残余预紧力变化曲线



(a)序列 S^i



(b)序列 S^i

图 8 测点蠕变位移曲线

2.8 μm 。

4 结 论

(1)通过对大型数控机床床身地脚螺栓预紧工艺分析,建立了虑及螺栓蠕变的弹性交互作用模型和螺栓蠕变力的计算模型,为大型数控机床地脚螺栓蠕变松弛行为的研究奠定了理论基础。

(2)开展了地脚螺栓长期、常温蠕变数值模拟,利用所建立的模型计算获得了机床服役一年的地脚螺栓蠕变力、残余预紧力和床身关键点蠕变位移的变化曲线。通过床身导轨安装面的直线度和平行度

(下转第 140 页)

床身导轨安装面上各测点由螺栓蠕变引起的位移曲线如图 8 所示。由图可以看出,各测点的最大蠕变位移约为 10.4 μm ,且蠕变位移与残余预紧力的变化趋势基本一致。根据各测点蠕变位移,按照标准 ISO230-1 计算出导轨面各直线度的最大相对衰减量为 4.3 μm ,两导轨平行度的相对衰减量为