Mechanical Engineering and Technology 机械工程与技术, 2022, 11(4), 368-373
Published Online August 2022 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/met
https://doi.org/10.12677/met.2022.114042

预应力钢丝缠绕装置钢丝张力的影响分析

禹龙龙，李　倩

安徽理工大学机械工程学院，安徽　淮南

收稿日期：2022年7月19日；录用日期：2022年8月9日；发布日期：2022年8月16日

摘　要

针对预应力钢丝缠绕装置对超高压模具的预紧问题，设计了一种新型的钢丝张力调节机构，改变钢丝的张力来调节模具的预应力大小。对钢丝张力的产生进行力学模型分析，并通过有限元软件对钢丝在不同压力、不同速度与不同直径下钢丝轴向应力变化的分析。结果表明：钢丝的轴向应力跟钢丝速度呈非线性关系，随着钢丝速度的增加，钢丝轴向应力先增大，达到峰值，而后减小并最终趋于平稳；钢丝的轴向应力与液压缸压力成正比，与钢丝直径成反比。

关键词

超高压模具，预紧，钢丝缠绕，轴向应力

Analysis of the Influence of Wire Tension in Prestressed Wire Winding Devices

Longlong Yu, Qian Li

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Jul. 19th, 2022; accepted: Aug. 9th, 2022; published: Aug. 16th, 2022

Abstract

In view of the preload problem of the preload of the ultra-high pressure mold by the prestressed wire winding device, a new type of wire tension adjustment mechanism is designed to change the tension of the steel wire to adjust the prestress size of the mold. The mechanical model analysis of the generation of steel wire tension is carried out, and the axial stress change of steel wire under different pressures, different speeds and different diameters is analyzed by finite element software. The results show that the axial stress of the steel wire has a nonlinear relationship with the speed of the steel wire, and with the increase of the speed of the steel wire, the axial stress of the steel wire first increases, reaches the peak, and then decreases and eventually tends to be stable;

文章引用: 禹龙龙, 李倩. 预应力钢丝缠绕装置钢丝张力的影响分析[J]. 机械工程与技术, 2022, 11(4): 368-373.
DOI: 10.12677/met.2022.114042

The axial stress of the steel wire is proportional to the hydraulic cylinder pressure and inversely proportional to the diameter of the wire.

Keywords

Ultra-High Pressure Mold, Preload, Wire Winding, Axial Stress

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

超高压装置是超高压技术的重要组成部分[1]，在射流切割、晶体增殖和粉末冶金等设备制造中需要使用超高压技术[2] [3]，且超高压装置在人造金刚石技术中也发挥着关键作用[4]，预应力结构模具是通过在工作开始前预先对模具施加一定载荷，使模具产生反向的预紧力，能够增加模具的承载能力[5]。缠绕预应力结构是一类具有特殊结构的模具，通过将高强度钢丝或钢丝缠绕在压缸上对压缸施加预紧载荷，改变钢丝或钢丝的张力来调节压缸的预应力大小，使模具预应力分布更好[6]。在工作压力等条件相同时，缠绕预应力结构[7]比年轮式结构更加紧凑，在尺寸等条件相同时，缠绕预应力结构比年轮式结构承载能力更好。预应力缠绕技术具有结构紧凑、承载能力好、加工方法简单等特点，在诸多领域得到应用。预应力缠绕模具的关键技术是对缠绕张力的研究[8] [9]，国外对预应力缠绕技术[10]的研究主要分布在丹麦科技大学和丹佛斯公司等单位，经过发展与完善，已经用于工业生产，但是出于对自身利益的保护，相关文献或技术很少公开；国内对预应力缠绕技术的研究主要集中在与缠绕相关的工业领域中，针对模具缠绕的深入研究较少[11]。

本文对钢丝张力调节部分中钢丝轴向应力变化进行分析，对钢丝张力的产生进行力学模型分析，通过有限元仿真研究分析在不同影响因素(液压缸压力、钢丝速度、钢丝直径)下，钢丝的轴向应力变化，以解决缠绕过程中钢丝所受的轴向应力超过钢丝的抗拉强度时易发生断裂，形成安全隐患。

2. 钢丝张力调节机构原理

2.1. 张力调节机构结构

变张力钢丝缠绕装置的关键就是对钢丝的张力进行控制，张力调节机构的轴测图如图 1 所示。张力调节机构主要由液压缸、导柱、上下垫块、上下压块等组成。下垫块通过螺钉固定安装在液压机底座上，上垫块与液压机中活塞杆末端相连，上垫块通过导柱可上下调节位置，在上下垫块上各自安装一个压块，两个压块之间钢丝从中穿过上加工出半径略小于钢丝直径的凹槽，且两端入口处加工为喇叭形，可以方便钢丝穿过。在缠绕工作开始前，将钢丝穿过上下镶块。液压系统与 PLC 相连，在缠绕工作过程中，张力检测机构不断检测钢丝张力值并反馈给 PLC，PLC 通过对比检测值与理论预定值，分析计算出张力补偿量，控制液压系统来及时调整液压缸的油压，从而调整钢丝张力值，使其满足预设要求。

2.2. 钢丝受力分析

当钢丝两端被拉紧时，由于其钢丝本身内力的存在，在钢丝上就会产生一个抵制变形的力，通常这个力，我们称作张力。当钢丝被两端拉紧时所产生的应力与钢丝张力两者之间的关系：

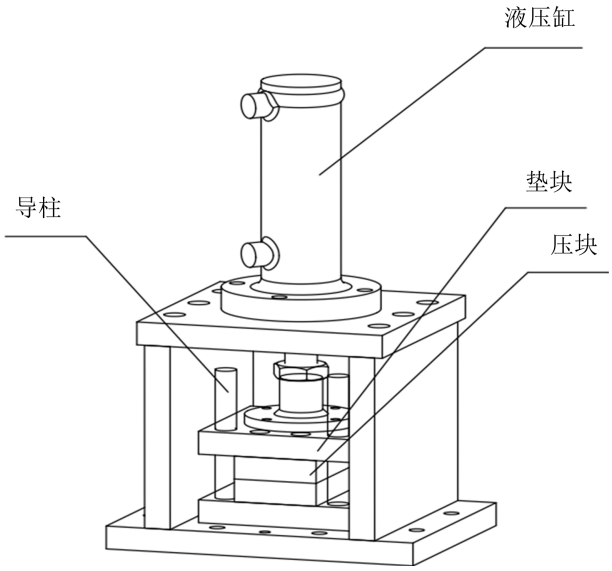

Figure 1. Axonometric drawing of the tension adjustment mechanism
图 1. 张力调节机构轴测图

$$T = A * \tau \tag{1}$$

式中：T 为钢丝张力，A 为钢丝的横截面积，τ 为钢丝横截面积上产生的拉应力。

钢丝张力的大小主要是通过液压系统对其进行调节，在张力调节机构中，钢丝处于上下两个垫块之间，此时液压缸通过上下两个垫块来对钢丝施加与钢丝轴向相垂直的压力，由于各个部件之间存在摩擦，且钢丝张力主要就是通过钢丝与上下两个垫块之间的摩擦力提供，钢丝与其余部件之间的摩擦力可忽略不计，张力调节机构中钢丝张力产生的情况可简化为图 2 所示。

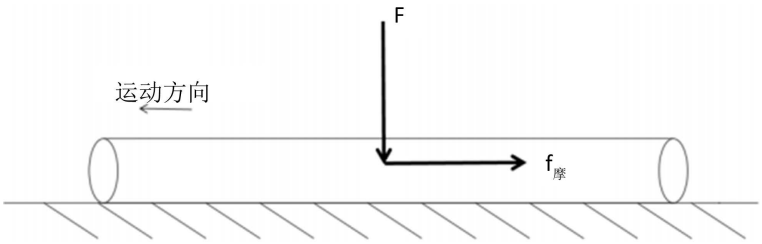

Figure 2. Brief diagram of the force of the wire
图 2. 钢丝受力简图

钢丝张力的表达式为：

$$T = f_{摩擦} \tag{2}$$

摩擦力 $f_{摩擦}$：

$$f_{摩擦} = \frac{F}{\mu} \tag{3}$$

$$f_{摩擦} = [\sigma] \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \tag{4}$$

式中：μ 为钢丝与两垫块之间的摩擦系数，$[\sigma]$ 为钢丝许用应力，d 为钢丝直径。

从上式中可以得出，钢丝张力受液压缸压力与钢丝横截面积有关。而且本装置是用于超高压模具上的钢丝缠绕装置，由于钢丝缠绕过程，钢丝的张力会随时发生变化，随着钢丝层厚度的增加，钢丝张力也在不断变化，因此需要伺服电机通过对输入控制电压信号来直接调节模具的转速，实现通过控制钢丝缠绕速度，来精确且及时的对钢丝变张力控制信号进行调节。因此钢丝的缠绕速度也会对钢丝张力产生影响。

钢丝张力由液压缸提供，液压系统供油压力的平衡方程为：

$$A = \frac{F}{P_s} \tag{5}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \tag{6}$$

式中：A 为液压缸的有效工作面积，P_s 为液压缸工作压力，D 为液压缸缸径。

3. 钢丝张力调节机构的有限元模型

为了研究钢丝张力与钢丝直径、压缸压力以及钢丝缠绕速度之间的关系，采用 ANSYS LS-DYNA 模块建立钢丝张力调节机构的有限元模型，考虑到由于钢丝张力的产生只发生在钢丝与上下两垫块之间，为了减少计算量，仅对该部分进行有限元建模，且不会影响到仿真结果的准确性，如图 3 所示。

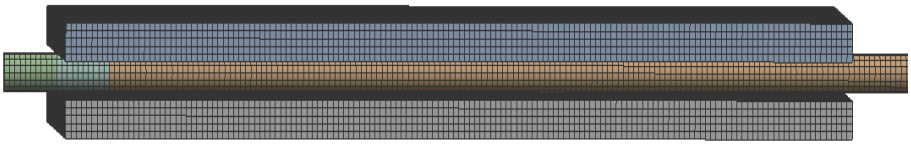

Figure 3. Brief diagram of the finite element model of the wire tension adjustment mechanism
图 3. 钢丝张力调节机构有限元模型简图

上下两垫块定义为 Solid186 实体单元，钢丝定义为 Beam198 结构钢单元，网格划分采用 MultiZone 多域扫掠型算法，划分网格单元尺寸为 1 mm。依照实验参数确定有限元仿真模型的数值，钢丝的材料选择为 Q235 结构钢，材料的主要性能有杨氏模量为 200 GPa，密度为 7850 kg/m^3，泊松比为 0.3，屈服强度为 235 MPa，抗拉强度为 400 MPa。

为了更好地定义钢丝的速度，把钢丝分为两部分，其中一部分设置在与垫块末端相距一定距离的位置，这样就可以通过设置钢丝通过垫块末端的结束时间来设定钢丝速度，如图 4 所示。把一段钢丝设置在与垫块末端相距 10 mm 处，通过设置钢丝通过垫块末端的结束时间为 1 s，则钢丝的缠绕速度则为 10 mm/s。这样就可以通过设置结束时间的长短，来到达钢丝速度的改变。把两部分钢丝之间定义为绑定约束，由于钢丝张力就是因为钢丝与垫块之间的摩擦产生，所以定义钢丝与垫块之间为摩擦约束，摩擦系数为 0.15。通过 LS-DYNA 中的显式动力学分析方法，研究钢丝在不同条件下轴向应力的变化。

Figure 4. Wire speed control diagram
图 4. 钢丝速度控制简图

针对研究目标，设计如下几种情况：钢丝直径为 3、4 和 5 mm，液压缸压力分别设定为 500 N、1000 N 和 1500 N，钢丝速度分别设定为 10、25 和 40 mm/s。经过数值模拟后，对钢丝在不同条件下的轴向应力进行对比分析。

4. 仿真结果分析

对液压缸预紧的钢丝受到不同压力和不同速度的作用下，钢丝的轴向应力都会出现相应的变化。为研究钢丝轴向应力的变化规律，分别取不同压力与速度的钢丝，将数值模拟结果与文献[12]的理论结果进行对比，图 5 为钢丝直径取 5 mm 时，不同压力下的钢丝轴向应力－速度曲线，如图 5 所示。从图中可以看出：钢丝的轴向应力随着钢丝速度的增加，轴向应力先逐渐增大，然后达到峰值，随后随着速度的增加，轴向应力开始减小，这是由于钢丝随着速度的增加，而钢丝张力就是通过钢丝与垫块之间的摩擦而产生，随着速度的增加，钢丝与垫块之间的温度不断升高，导致钢丝与垫块摩擦系数降低，从而摩擦

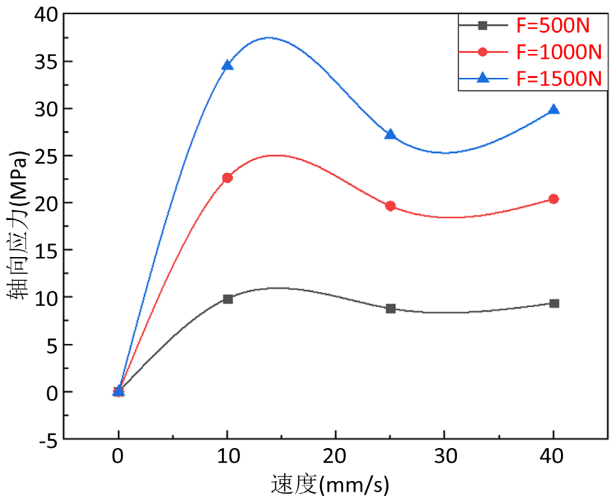

Figure 5. Axial stress-velocity curves of steel wires at three different pressures
图 5. 三种不同压力下的钢丝轴向应力－速度曲线

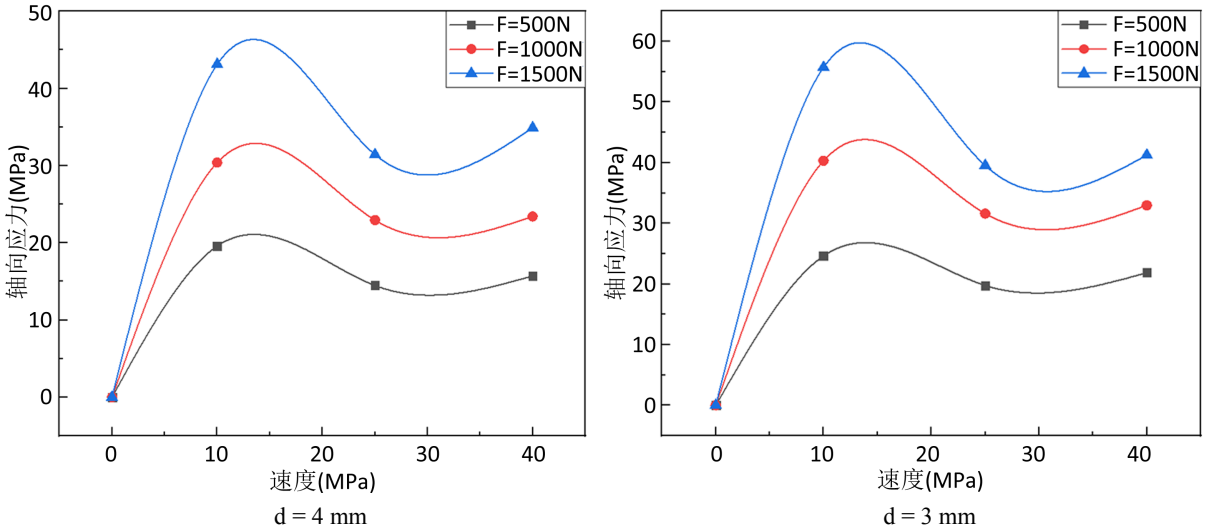

Figure 6. Axial stress-velocity curves of steel wires of different diameters
图 6. 不同直径的钢丝轴向应力－速度曲线

力即钢丝张力减小。而后钢丝轴向应力又开始相对增大，但增长的幅度很小，并逐渐趋于平稳。从图中还可以看出液压缸压力越大，钢丝轴向应力越大，该数值模拟结果与理论计算结果相符合，钢丝轴向应力与液压缸压力成正相关。结合仿真结果分析，在钢丝直径与所受液压缸压力相同时，钢丝缠绕速度在 10 mm/s 左右时，钢丝轴向应力达到峰值，由于本装置是用于超高压模具上的钢丝缠绕，所需要的钢丝张力较大，且经过与钢丝材料的性质进行对比，不超过钢丝的屈服极限与抗拉强度，不会出现钢丝断裂的情况。

为进一步研究钢丝轴向应力与钢丝直径之间的变化规律，分别取不同直径的钢丝，如图 6 所示，图 6 为钢丝直径取 3 mm 和 4 mm 时钢丝轴向应力－速度曲线图。通过图 5 与图 6 对比可以看出：随着钢丝直径的增大，数值模拟结果与理论计算结果比较接近，在液压缸压力和钢丝速度相同的条件下，钢丝直径越大，钢丝轴向应力越小，也更进一步证明了钢丝轴向应力与钢丝直径呈线性相关。

5. 结论

1) 提出了一种新型的钢丝张力调节机构，这种调节机构可以有效且精准地控制钢丝张力大小，可以避免在缠绕过程中钢丝所受的轴向应力超过钢丝的抗拉强度时易发生断裂的问题，不会形成安全隐患。

2) 建立了钢丝张力调节机构有限元模型，数值模拟结果表明：当钢丝直径相同时，承受相同的压力下，随着钢丝速度的增加，钢丝轴向应力先增大，达到峰值，而后减小并最终趋于平稳；当钢丝速度一定时，钢丝轴向应力与压力成正相关。

3) 随着钢丝直径的增大，在液压缸压力和钢丝速度相同的条件下，钢丝直径越大，钢丝轴向应力越小，钢丝轴向应力与钢丝直径呈线性相关。

参考文献

[1] 依卓. 双层剖分式超高压模具结构设计与有限元分析[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019.

[2] Aydın, S., Berk, D., Coruk, S., Öztürk, S. and Uysal, E. (2019) High-Pressure Water Jet Injury to the Parotid Region. *Journal of Emergency Medicine Case Reports*, **10**, 21-23. https://doi.org/10.33706/jemcr.550560

[3] Mane, S. and Kumar, S. (2019) Investigation on Effects of Cutting and Jet Parameters in Turning of AISI 4140 Hardened Alloy Steel. *Materials Science Forum*, **969**, 732-737. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.969.732

[4] 罗锡裕, 徐燕军, 刘一波. 中国人造金刚石的发展及其关键技术的进步[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(1): 1-13.

[5] 刘志卫. 多层交错剖分式超高压模具设计及其数值模拟[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.

[6] 刘志卫, 吴承伟, 童明俊, 朱守应. 钢丝缠绕剖分式超高压模具等张力预紧分析[J]. 高压物理学报, 2021, 35(1): 46-51.

[7] 童明俊. 钢丝缠绕装置设计及其液压系统的模糊控制分析[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.

[8] 叶涛. 预应力钢丝缠绕超高压液压缸的结构设计[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2017.

[9] 冯亚斌. 新型扁挤压筒结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工程大学, 2021.

[10] Groenback, J. (2001) High-Pressure Tool. World Patent: 2001036080.

[11] 来小丽, 王强, 蔡冬梅, 苑立宽. 预应力缠绕模具设计理论[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2007(4): 332-336.

[12] 杨云飞, 李明哲, 刘志卫, 等. 缠绕式挤压筒结构及缠绕层预应力分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 89-94.