

自锁状态下钳剪抓一体属具接触性能研究

王旭东 赵京*

北京工业大学机械与能源工程学院,北京,100124

摘要:为了提高钳剪抓一体多功能属具中功能转换机构自锁性能的可靠性,研究了该机构在自锁状态下的接触性能,并基于测试条件设计了该机构的原始样机和测试样机,然后进行了测试研究。设计了功能转换机构的样机,提出了一种基于滑块-滑槽的自锁机构。在充分考虑样机自锁状态下的弹性变形、黏着、堆叠变形及滑动剪切的接触状态后,提出了新的接触模型。在此基础上,通过有限元分析研究了滑块-滑槽在接触区域的自锁状态和接触特性分布规律。设计了试验以验证模型及设计的可行性。结果表明,样机能够实现自锁且展现出良好的受力特性,另外,所提接触模型的最大剪切应力相对误差比传统模型低59.3%。

关键词:多功能属具;自锁条件;受力特性;接触特性

中图分类号:TH128

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Contact Properties of Clamp-Shear-Grab Integrated Attachments under Self-locked States

WANG Xudong ZHAO Jing*

College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124

Abstract: To improve the reliability of self-locked performances of the function transformation mechanisms in multi-functional clamp-shear-grab integrated attachment, the contact performance of the mechanisms under self-locked states was studied, and original prototype and test prototype of the mechanisms were designed based on test conditions, and then tests were conducted. Initially, the prototypes of function transformation mechanisms were developed, and a self-locked mechanism was proposed based on slider-groove structure. By thoroughly considering the elastic deformations, adhesions, pileup deformations, and sliding shear contact states under self-locked states, an innovative contact model was proposed. Based on these, the self-locked states and contact characteristic distributions of slider-groove in contact areas were studied through finite element analyses. Finally, experiments were designed to verify the feasibility of the model and design. Experimental results show that the prototype may achieve self-locked function and exhibits good mechanics performance, and the proposed contact model outperforms traditional model by 59.3% in terms of maximum shear stress relative error.

Key words: multi-functional attachment; self-locked condition; mechanics property; contact property

0 引言

在我国复杂多变的自然灾害挑战下,地震对救援装备的创新提出了迫切需求。传统救援属具

因功能单一及救援效率低下难以满足现代救援的高效作业要求^[1-3]。鉴于此,多功能救援属具的研发成为提高灾害救援效率的关键途径^[4]。

多功能救援属具的核心在于其能够灵活切换

收稿日期:2024-07-31

ZHANG Huiyao, HUANG Lixiang, CHEN Jiqing, et al. Strawberry Maturity Detection Algorithm Based on Improved YOLOv5s[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(4):990-999.

(编辑 胡佳慧)

作者),男,1974年生,副教授。研究方向为目标检测、系统优化等。E-mail:gaoguibing@hnust.edu.cn.

本文引用格式:

王俊,高贵兵.基于改进YOLOv5s的风电叶片表面缺陷检测方法[J].中国机械工程,2025,36(9):2108-2117.

WANG Jun, GAO Guibing. A Method for Detecting Surface Defects on Wind Turbine Blades Based on Improved YOLOv5s[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):2108-2117.

作者简介:王 俊,男,2000年生,硕士研究生。研究方向为深度学习与目标检测。E-mail:1196957365@qq.com。高贵兵*(通信

并锁定不同功能,以适应多样化的救援任务。其中,自锁机构作为实现这一功能转换与锁定的关键技术^[5-6],其性能直接关乎属具的可靠性^[7]。因此,深入探索自锁机构的自锁原理、受力特性及接触特性,对设计高效的多功能救援属具具有至关重要的意义^[8-10]。在自锁条件下,接触特性直接影响自锁性能,为了使自锁状态更加可靠,需要对接触特性进行深入分析。

前人在接触特性领域取得了丰硕成果,为自锁机构性能研究奠定了基石。文献[11]及类似研究通过复杂的数学解析,深入探索了刚性圆柱与弹性半空间接触的力学机理,构建了不同材质间接触界面行为的理论基础。文献[12-13]聚焦于黏附与弹塑性效应,分别建立了锥形尖端滑动摩擦模型和发展了混合接触分析技术。这些研究不仅验证了理论模型的适用性,还显著拓宽了接触力学在复杂应用场景中的边界。在有限元分析层面,文献[14]评估并修正了弹性圆柱接触的Hertz解,提高了模型预测的精度;文献[15]基于滑移线理论,提出了针对无摩擦刚性圆柱压入半空间塑性变形的简化模型;文献[16]则通过仿真模拟,对比了不同接触模型,为接触界面的力学行为预测提供了多维度的见解。这些工作共同促进了有限元方法在接触力学中的广泛应用和深化理解。然而,当前研究多聚焦于单一模型的分析,缺乏对复杂工况下机构中零件间的摩擦接触性能、弹塑性接触性能、黏附接触性能等多种综合性能的全面考察。

本文提出了一种基于钳剪抓一体多功能属具的滑块-滑槽自锁机构,并提出了该机构自锁状态下考虑弹性变形、黏着、堆叠变形及滑动剪切的接触模型,通过仿真和试验验证了模型和机构设计的合理性。

1 样机设计

1.1 原始样机设计

钳剪抓一体属具的性能与钳剪机构、抱抓机构、功能转换机构密切相关。钳剪机构负责钳碎水泥柱和剪切钢筋,抱抓机构负责抱抓重物,而功能转换机构则负责功能的转换与锁定。在钳剪抓一体属具剪切钢筋过程中,过大的剪切力对功能转换机构的自锁性能和受力性能提出了挑战,因此,自锁形式的设计至关重要。为了解决这一问题,本文提出了一种新的自锁机构。

功能转换机构的自锁机构为两侧对称的滑

块-滑槽结构。如图1所示,原始样机包含滑槽(固定机座)、滑块、分离机座、钳剪刀具及剪刀等零件。当剪刀受到外力时,滑块倾向于旋转,滑槽两端产生的摩擦力阻碍滑块运动,从而实现自锁;当剪刀不受外力时,滑块无旋转趋势,可在滑槽内自由滑动。在钳剪抓一体属具剪切钢筋和钳碎水泥柱时,系统受到外力,滑块自锁,钳剪抓一体属具的功能被确定。在不同工作模式转换时,系统不受外力,滑块能自由移动。当滑块移动至外侧时,钳剪抓一体属具处于抱抓模式;滑块移动至内侧时,钳剪抓一体属具处于钳剪模式。

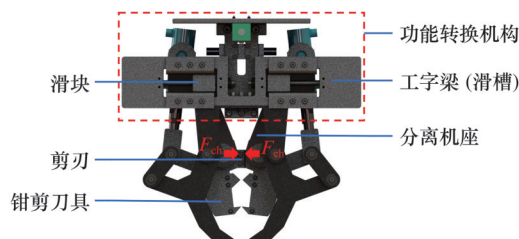


图1 功能转换机构原始样机
Fig.1 Original prototype of function transformation mechanism

1.2 测试样机设计

受试验装置的限制,测试样机在受力方向、零件连接形式及分离机座结构上与原始样机存在一定差异。具体而言,如图1和图2所示,原始样机的滑块主要受水平剪切力和竖直重力,而测试样机的滑块在拉伸压缩测试仪上的受力形式以竖直向下的压力和重力为主。为补偿这一差异,测试样机通过螺栓-碟簧结构抵消重力及其对滑块产生的力矩。零件连接形式及分离机座虽有局部调整,但整体差异较小,不影响样机功能的实现。

此外,测试样机在材料选择上与原始样机不

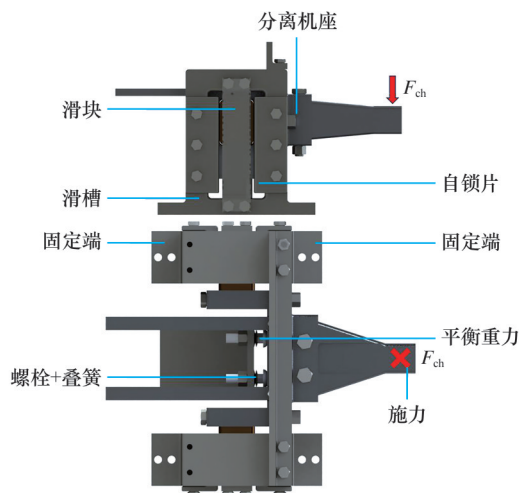


图2 功能转换机构测试样机
Fig.2 Test prototype of function transformation mechanism

同。原始样机采用hg70钢,而测试样机选用6061铝合金,主要考虑到6061质量小、易加工的优点,并且在满足强度和刚度要求的前提下降低了复杂性和安装难度。

尽管材料不同,但其设计仍然符合力学相似性原则。为证明材料差异对实验结果的影响可忽略,本文采用缩尺模型进行了力学性能分析,所涉及的物理量见表1。根据以上物理量的量纲分析得到原始样机和测试样机的相似准则:

$$\left. \begin{aligned} C_l = 0.9 \quad C_\rho C_l C_g = C_\sigma \\ C_v = 1 \quad C_\sigma = C_E \\ C_F = C_\sigma C_l^2 \quad C_M = C_\sigma C_l^3 \quad C_\epsilon = 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C_l 、 C_ρ 、 C_v 、 C_E 、 C_F 、 C_g 、 C_M 、 C_σ 、 C_ϵ 分别为测试样机与原始样机的长度相似比、密度相似比、泊松比相似比、弹性模量相似比、力相似比、重力加速度相似比、力矩相似比、应力相似比、应变相似比。

表1 原始样机和测试样机参数
Tab.1 Parameters of original prototype and test prototype

| 参数 | 原始样机 | 测试样机 | 缩尺比例 |
|---|----------|----------|------|
| 长度 l/mm | 1 | 0.9 | 0.9 |
| 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 7.8 | 2.8 | 0.36 |
| 泊松比 ν | 0.3 | 0.33 | 1.1 |
| 弹性模量 E/GPa | 200 | 70 | 0.35 |
| 力 F/N | 30 000 | 8000 | 0.27 |
| 重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ | 10 | 10 | 1 |
| 力矩 $M/(\text{N}\cdot\text{m})$ | 30 000 | 7200 | 0.24 |
| 应力 σ/MPa | 761.28 | 258.97 | 0.34 |
| 应变 ϵ | 0.007 01 | 0.006 53 | 0.93 |

关键位置的最大应力和最大应变缩尺比例约为0.34和0.93(图3)。表1列出了各物理量的缩尺比例,结果表明原始样机和测试样机的相关物理量都近似满足相似准则,进而得知测试样机在力学性能上与原始样机基本相似。因此,尽管测试样机与原始样机在局部结构和材料上有所不同,但两者的整体力学特性近似,可以有效模拟原始样机的自锁性能和受力情况。

根据测试样机的设计结果,可进一步分析其自锁情况、受力情况和接触情况。

2 模型分析

2.1 自锁条件分析

图4展示了自锁原理。测试样机在满足自锁条件时,滑块被滑槽锁住。滑块作为主动件,滑槽作为机架,系统所受外力 F_{ch} 使滑块受到倾覆力矩,同时滑块受到倾覆支撑力 F_{n1} 和 F_{n2} 。由于滑

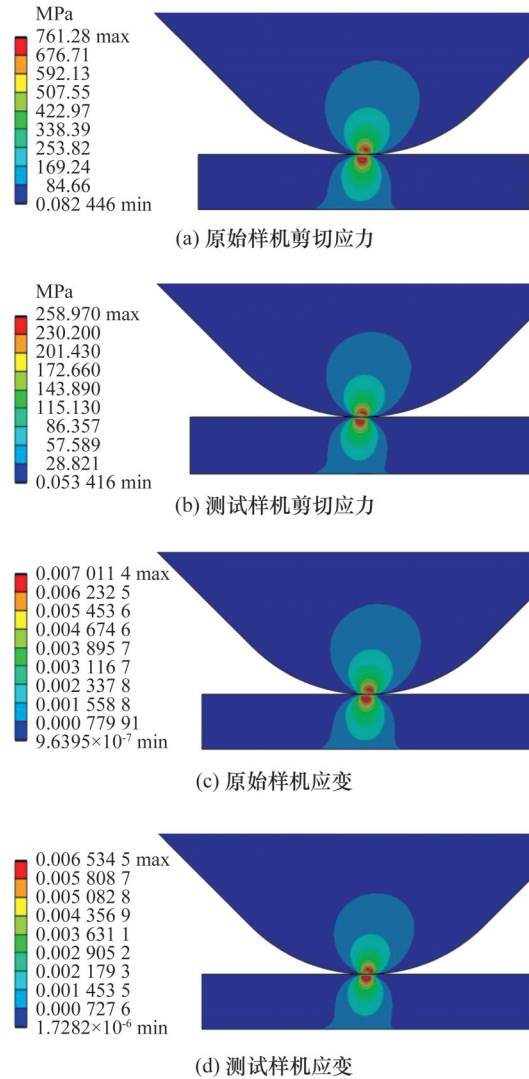


图3 原始样机与测试样机(关键位置)应力应变对比
Fig.3 Comparison of stress and strain between original prototype and test prototype (key position)

块有向右运动的趋势,故滑块受到向左的摩擦力 F_{f1} 和 F_{f2} ,即自锁力。此外,在滑块倾覆转动时,滑块与滑槽的接触形式由线接触变为滑块中半径为 R_1 的圆角与滑槽的接触形式,这种接触类似于圆柱与平面的弹性接触,其中,滑块为圆柱,滑槽为平面。

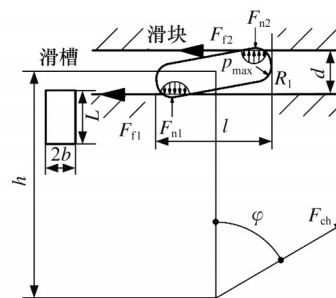


图4 自锁原理

Fig.4 Self-locked principle

根据力系平衡条件建立自锁机构的平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} F_{ch} \sin \varphi h + F_{f2} \frac{d}{2} - F_{f1} \frac{d}{2} - (F_{n1} + F_{n2}) \frac{l}{2} &= 0 \\ F_{ch} \sin \varphi - F_{f1} - F_{f2} &= 0 \\ F_{ch} \cos \varphi + F_{n1} - F_{n2} &= 0 \\ F_n &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： F_{ch} 为在剪切钢筋时一半的剪切力(功能转换机构每侧有两组滑块)； φ 为剪切力与竖直方向的夹角，本文分析 $\varphi = 90^\circ$ 的情况； h 为受力点到滑块中心的距离； F_{f1} 为滑块下端受到的摩擦力； F_{f2} 为滑块上端受到的摩擦力； d 为滑块的高度； F_{n1} 为滑块在下端受到的支持力； F_{n2} 为滑块在上端受到的支持力； l 为滑块的宽度。

根据上文计算，仅仅依靠机械结构形成自锁的条件是

$$l \leq 2\mu h + d\mu^2 \frac{1}{\tan \varphi} \quad (3)$$

式中： μ 为摩擦因数。

当 $\varphi = 90^\circ$ 时，自锁条件是

$$l \leq 2\mu h \quad (4)$$

因此，自锁状态下所需要的摩擦因数方程可由下式确定：

$$\mu_s = \begin{cases} \sqrt{\frac{(h \tan \varphi)^2}{d^2} + \frac{h \tan \varphi}{d} - \frac{h \tan \varphi}{d}} & 0^\circ < \varphi < 90^\circ \\ \frac{l}{2h} & \varphi = 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中： μ_s 为自锁状态下所需要的摩擦因数。

此时，自锁状态下的支持力 F_n 可由下式确定：

当 $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ 时

$$F_{n1} = \frac{F_{ch} \sin \varphi}{2\mu_s} - \frac{F_{ch} \cos \varphi}{2} \quad F_{n2} = \frac{F_{ch} \sin \varphi}{2\mu_s} + \frac{F_{ch} \cos \varphi}{2}$$

当 $\varphi = 90^\circ$ 时

$$F_{n1} = F_{n2} = \frac{F_{ch}}{2\mu_s}$$

基于以上分析，测试样机的自锁条件与滑块宽度、摩擦因数、受力点到滑块中心的距离以及 φ 角有关。当 $\varphi \neq 90^\circ$ 时， μ_s 、 F_{n2} 、 F_{n1} 逐渐增大，且 F_{n2} 大于 F_{n1} ，表明 φ 越大，属具越难自锁，此时滑槽上表面所受压力更大。而当 $\varphi = 90^\circ$ 时， μ_s 、 F_{n2} 、 F_{n1} 达到最大值，且 F_{n2} 等于 F_{n1} ，此时为极端自锁条件，滑槽上下表面受力相等。

2.2 接触性能分析

图5为测试样机的受力示意图。在这种情况下，滑块受到支持力，滑槽也受到等大的反向支持力。由于滑块的4个棱角处都有半径为 R_1 的圆角，局部赫兹应力会在滑块和滑槽的接触点(即最大应力点)产生。为准确分析可靠性，选择最大应力点进行研究。

根据赫兹接触理论，滑块和滑槽的等效弹性

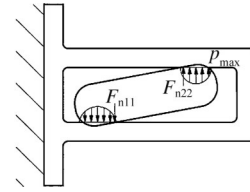


图5 测试样机受力示意图

Fig.5 Mechanical diagram of test prototype

模量为

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (6)$$

式中： E_c 为滑块与滑槽的等效弹性模量； E_1 为滑块的弹性模量； ν_1 为滑块的泊松比； E_2 为滑槽的弹性模量； ν_2 为滑槽的泊松比。

两个零件的等效半径为

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (7)$$

式中： R_c 为滑块与滑槽的等效半径； R_1 为滑块的圆角半径； R_2 为滑槽的半径。

由以上分析可知，随着自锁状态下的剪切力和支持力的增大，这种弹性接触中的半宽会逐渐增大。半宽的计算公式为

$$b_{li} = \left(\frac{4F_{ni}R_c}{\pi L E_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中： b_{li} 为滑块与滑槽触点1或触点2的半宽， $i=1, 2$ ； L 为滑块圆角的轴向接触长度。

随着半宽逐渐增大，滑块和滑槽的接触形式也从线接触变为面接触，接触面积可等效为

$$A_{li} = 2b_{li}L \quad (9)$$

式中： A_{li} 为滑块圆角与滑槽触点1或触点2的接触面积。

根据以上分析，可以计算滑块和滑槽接触部位的最大赫兹应力(此应力的方向是滑块和滑槽接触面的垂直方向)：

$$p_{\max li} = \frac{2F_{ni}}{\pi b_{li}L} \quad (10)$$

式中： $p_{\max li}$ 为滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的最大赫兹应力。

在滑块和滑槽接触部位，由摩擦力所产生的应力近似为剪切应力，可由下式计算(此应力的方向是滑块和滑槽接触面的水平方向)：

$$F_{fci} = \int_{-b_{li}}^{b_{li}} \frac{2\mu_s F_{ni} (b_{li}^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi b_{li}^2 L} dA \quad (11)$$

$$p_{fi} = \frac{F_{fci}}{A_{li}} \quad (12)$$

式中： x 为接触界面任意点到接触界面中心线的横坐标； A 为接触界面所围成的面积； p_{fi} 为滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的剪切应力； F_{fci} 为滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的摩擦力。

此后，两个应力可以转化为该受力点的主应力：

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{li} &= \frac{p_{\max li}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{p_{\max li}^2 + 4p_{fi}^2} \\ \sigma''_{li} &= \frac{p_{\max li}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{p_{\max li}^2 + 4p_{fi}^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： σ'_{li} 为滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的最大主应力； σ''_{li} 为滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的最小主应力。

传统的分析方法通过摩擦应力与赫兹应力计算主应力，但这种方法未考虑黏着、堆叠变形及滑动剪切的情况。为了更准确地分析接触性能，在此基础上，考虑了接触区域外圈的堆叠变形及滑动剪切的情况。如图6所示，滑块随着拉伸压缩测试仪的压头以速度 v 匀速运动，此时滑块受到下压力 F_n 、摩擦力 F_f 和黏着力 F_{AD} 。

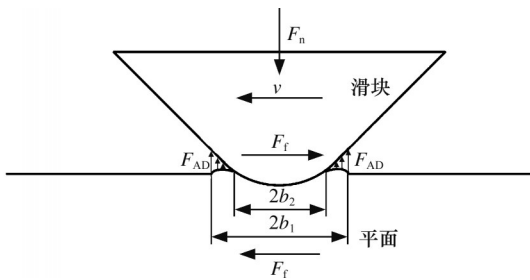


图6 滑块-平面接触界面

Fig.6 Slider-plane contact interface

在改进的模型中，黏着力力的计算方式如下：

$$F_{AD} = -3 \left[\frac{\pi G_e R_c (\Delta\gamma)^2}{8(1-\nu_1)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

式中： G_e 为弹性半空间的剪切模量， $G_e = E_c / [2(1 + \nu_1)]$ ； $\Delta\gamma$ 为黏着功， $\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\gamma_{12}$ 。

在不考虑黏着力力的情况下，弹性接触的半宽为 b_1 ；考虑黏着力后，弹性接触的半宽为 b_2 ：

$$b_{2i} = \left[\frac{4(F_{ni} + F_{AD})R_c}{\pi L E_c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中： b_{2i} 为考虑黏着力后滑块与滑槽触点1或触点2的半宽。

接触面积也会发生改变

$$A_{2i} = 2b_{2i}L \quad (16)$$

式中： A_{2i} 为考虑黏着力后滑块圆角与滑槽触点1或触点2的接触面积。

该模型考虑了接触区域外圈的堆叠变形及滑动剪切的情况。如图7所示，滑块圆角与滑槽的接触面积为 A_{HEZ} ，黏着力产生于 A_{HEZ} 外侧的滑动区面积 A_{AD} ，此时由于滑块的微小滑动， A_{AD} 出现局部微小堆叠。根据接触力学，此时应力分布为：边界法向应力 p 趋近于0，切向应力 τ 趋近于无穷大，因此， A_{AD} 的微小堆叠被切割，形成局部微小滑动；而 A_{HEZ} 由于法向应力 p 较大，切应力 τ 较小，保持黏着状态。

同样可以计算滑块和滑槽接触部位的最大赫

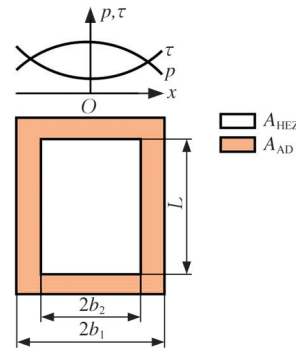


图7 改进模型原理

Fig.7 Principle of the modified model

兹应力：

$$p_{\max 2i} = -\frac{2(F_{ni} + F_{AD})}{\pi b_{li}L} \quad (17)$$

式中： $p_{\max 2i}$ 为考虑黏着力后滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的最大赫兹应力。

另外，剪切应力包含由摩擦力所产生的应力、切割 A_{AD} 所产生的剪切极限应力，可由下式计算：

$$p_{f2i} = \frac{F_{fi}}{A_{2i}} + \tau_{\max} \quad (18)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\sqrt{3}}$$

式中： p_{f2i} 为考虑黏着力后触点1或触点2的剪切应力； F_{fi} 为考虑黏着力后滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的摩擦力； τ_{\max} 为切割 A_{AD} 所产生的剪切极限应力，此部分为切割较软材料的剪切极限应力； σ_{\max} 为切割 A_{AD} 所产生的极限应力。

最后，改进后的两个应力可以转化为该受力点的主应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{2i} &= \frac{p_{\max 2i}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{p_{\max 2i}^2 + 4p_{f2i}^2} \\ \sigma''_{2i} &= \frac{p_{\max 2i}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{p_{\max 2i}^2 + 4p_{f2i}^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中： σ'_{2i} 为考虑黏着力后滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的最大主应力； σ''_{2i} 为考虑黏着力后滑块和滑槽接触部位触点1或触点2的最小主应力。

分析结果表明，不同自锁状态下传统模型与改进模型接触性能的变化规律相似。随着 φ 的增大， b_i 、 A_i 、 $p_{\max i}$ 、 p_{fi} 逐渐增大，导致 σ'_i 逐步增大，而 σ''_i 逐渐减小。在 $\varphi \neq 90^\circ$ 的自锁状态中， F_{n2} 相关参数如 b_{j2} 、 A_{j2} 、 $p_{\max j2}$ 、 p_{fj2} 、 σ'_{j2} 、 $-\sigma''_{j2}$ 的值均大于 F_{n1} 部分对应参数，表明此时滑槽上表面受力更大。而当 $\varphi = 90^\circ$ 时，各项参数达到最大值，且 F_{n1} 与 F_{n2} 相关的参数相等，达到极端自锁、受力情况。另外，改进模型中的黏着力和剪切极限应力等参数在整个过程中不受 φ 变化的影响。

综上所述，样机的接触性能与 φ 、下压力、黏着力、材料属性以及样机的尺寸等物理量相关。

3 仿真分析

基于理论分析得出了自锁状态接触模型,现采用ANSYS对滑块的自锁情况、受力情况及应力分布进行仿真分析,同时探讨其受力性能及差异。仿真选取了 $\varphi = 90^\circ$ 的极端自锁状态进行研究。分析中,滑块分别采用3Cr13、QSn6.5-0.1和6061这3种材料,而除滑块外的所有非标准件均使用6061材料。

3.1 3Cr13仿真分析

滑块材料为3Cr13时的仿真分析如图8所示,最大应力分布集中于接触中心区域并逐渐向外减小,类似于传统的赫兹应力分布。然而,由于水平向右的摩擦力作用,滑块和滑槽的最小主应力和最大剪应力的分布呈现出斜向右的椭圆形状。接触区域主要集中在滑块中部,两侧出现局部滑动(如图8a所示),这导致了黏着、堆叠变形及滑动剪切效应。由于接触面积较小,因此最大

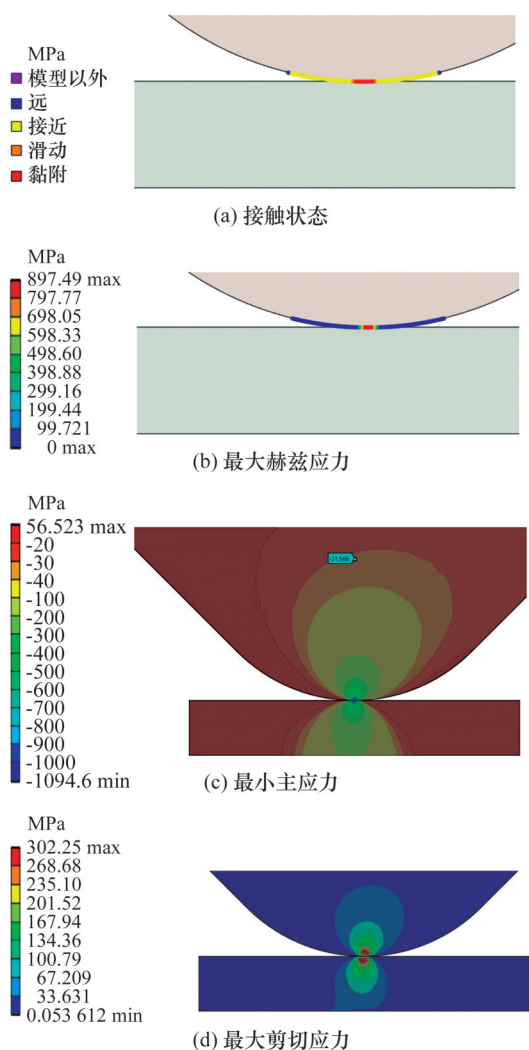


图8 3Cr13仿真分析

Fig.8 3Cr13 simulation analysis

赫兹接触应力集中在滑块与滑槽的接触点中心,最大应力值为897.5 MPa(如图8b所示)。最小主应力局部最大值达到1094.6 MPa(图8c),而最大剪切应力则集中于接触中心的滑动区域,最大值为302.3 MPa(图8d)。本组仿真表明,滑块和滑槽的最小主应力大多高于-500 MPa,最大剪切应力大多低于269 MPa,说明除局部接触点可能产生磨损变形外,滑块与滑槽整体受力表现良好,且滑块具备自锁能力。

3.2 QSn6.5-0.1仿真分析

滑块材料为QSn6.5-0.1时的仿真分析如图9所示。与前一组仿真类似,最大应力集中在接触中心区域并逐渐向外减小,呈现出赫兹应力分布特征。受摩擦力作用,滑块与滑槽的应力分布呈斜向右的椭圆状,且接触区域未完全贴合,两侧出现局部滑动(如图9a所示),这导致了黏着、滑动剪切及堆叠变形效应。最大应力位于未滑动的赫兹接触区域,最大剪切应力则出现在局部滑动区域。图9b显示最大赫兹接触应力为823.0 MPa,

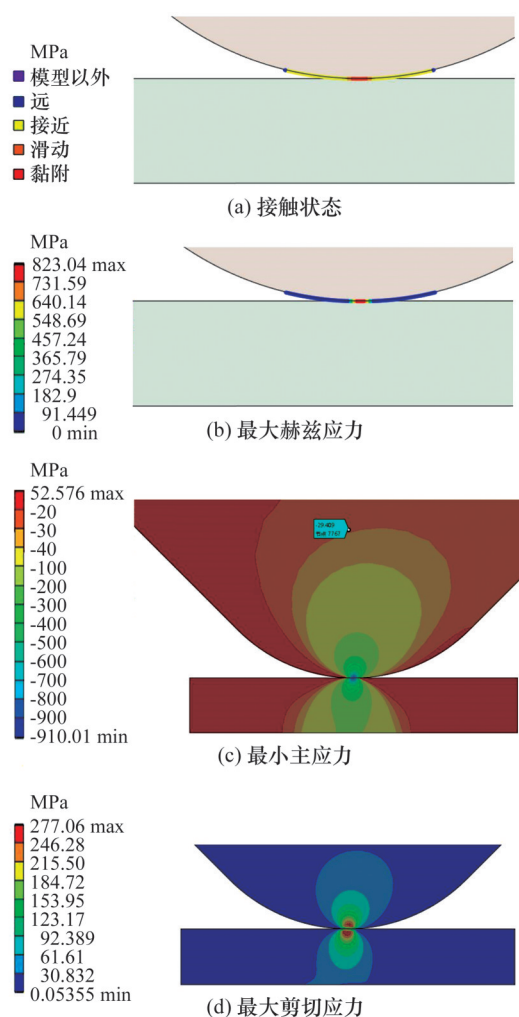


图9 QSn6.5-0.1仿真分析

Fig.9 QSn6.5-0.1 simulation analysis

而最小主应力的局部峰值为 910.0 MPa(图 9c), 最大剪切应力为 277.1 MPa(图 9d)。本组仿真中, 滑块和滑槽的最小主应力大多高于 -400 MPa, 最大剪切应力低于 247MPa, 表明滑块和滑槽尽管在局部接触点可能产生轻微磨损变形, 但整体受力情况良好, 且自锁性能优异。

3.3 6061 仿真分析

滑块材料为 6061 时的仿真分析如图 10 所示。与前两组仿真相似, 最大应力主要集中在接触中心区域, 并向外逐渐减小, 呈现出类似于赫兹应力的分布特征。在水平摩擦力的作用下, 滑块与滑槽的最小主应力和最大剪切应力呈现斜向右的椭圆状。滑块与滑槽的接触也并非完全贴合, 两侧出现局部滑动(如图 10a 所示), 这也导致黏着、滑动剪切及堆叠变形现象的发生。由于接触面积较小, 最大应力集中在未滑动的赫兹接触区域。图 10b 展示了最大赫兹接触应力, 数值为 758.2 MPa。最小主应力局部峰值达到 827.0 MPa(图 10c), 而最大剪切应力为 259.0 MPa, 集

中于滑块局部滑动区域(图 10d)。仿真结果表明, 滑块和滑槽的最小主应力大多高于 -400 MPa, 最大剪切应力大多低于 231 MPa, 表明除局部接触点可能出现轻微磨损变形外, 整体受力情况良好, 另外, 滑块具有良好的自锁性能。

3.4 理论模型与仿真模型比较

表 2 中列出了不同模型在接触类型上的区别。传统模型仅考虑自锁作用, 而改进模型则进一步考虑了黏着、滑动剪切以及自锁作用。改进模型通过引入更多的接触类型, 提供了更全面和准确的分析。这与仿真模型的接触类型一致。

表 2 接触状态对比

Tab.2 Comparison of contact states

| 模型 | 接触状态 |
|------|------------|
| 传统模型 | 自锁 |
| 改进模型 | 黏着、滑动剪切、自锁 |
| 仿真模型 | 黏着、滑动剪切、自锁 |

表 3 中列出了不同模型和材料下的最大赫兹应力 p_{max} 、最小主应力 σ 、最大剪切应力 τ_{max} 的数值, 并计算了传统模型与仿真模型之间的相对误差 Δ_1 和改进模型与仿真模型之间的相对误差 Δ_2 。仿真模型的数值被视作参考值。

表 3 应力对比

Tab.3 Stress comparison

| 材料 | 参数 | 传统模型/MPa | 改进模型/MPa | 仿真模型/MPa | $\Delta_1/\%$ | $\Delta_2/\%$ |
|------------|--------------|----------|----------|----------|---------------|---------------|
| 3Cr13 | p_{max} | 907.0 | 906.8 | 897.5 | 1.1 | 1.0 |
| | σ | 915.4 | 979.5 | 1094.6 | 16.4 | 10.5 |
| | τ_{max} | 87.8 | 266.8 | 302.3 | 71.0 | 11.7 |
| QSn6.5-0.1 | p_{max} | 827.4 | 827.3 | 823.0 | 5.3 | 5.2 |
| | σ | 835.1 | 901.7 | 910.0 | 8.2 | 0.9 |
| | τ_{max} | 80.1 | 259.1 | 277.1 | 71.1 | 6.5 |
| 6061 | p_{max} | 738.7 | 738.6 | 758.2 | 2.6 | 2.6 |
| | σ | 745.5 | 815.5 | 827.0 | 9.9 | 1.4 |
| | τ_{max} | 71.5 | 250.5 | 259.0 | 72.4 | 3.3 |

改进模型相较于传统模型在各项应力分析中表现出明显的优越性。无论是 3Cr13、QSn6.5-0.1 还是 6061 材料, 改进模型的应力值与仿真模型的参考值更接近, 特别是在最大赫兹应力和最大剪切应力方面, 改进模型的相对误差显著低于传统模型。例如, 在 3Cr13 材料中, 传统模型与仿真模型的最大剪切应力相对误差高达 71.0%, 而改进模型仅为 11.7%。

4 试验验证

试验分为两步: 首先通过模型静载试验研究

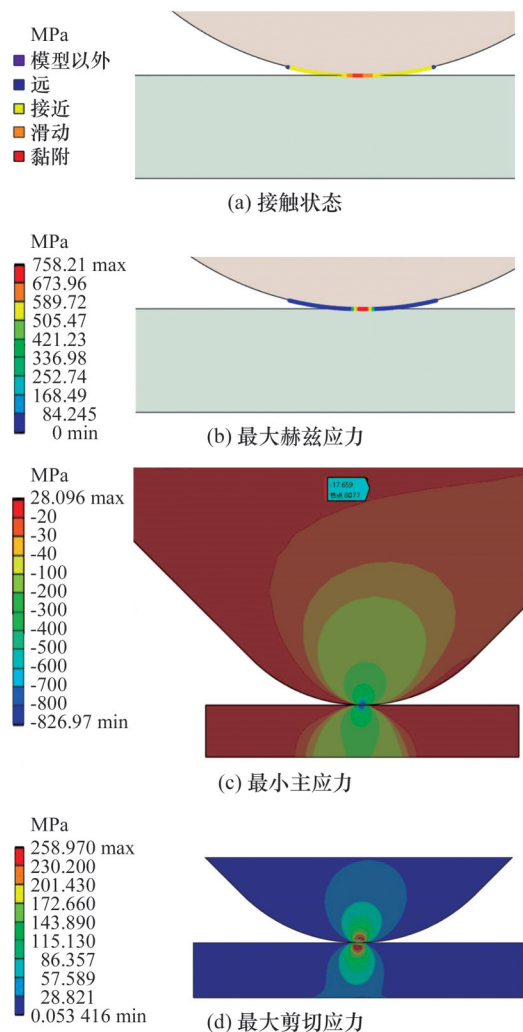


图 10 6061 仿真分析

Fig.10 6061 simulation analysis

功能转换机构的自锁性能和受力性能,然后通过工程化测试验证功能转换机构的可行性。

4.1 试验方法

4.1.1 模型静载试验方法

试验装置如图11所示,使用拉伸压缩测试仪、应变花和静态应变测试分析仪进行试验。试验过程中,针对滑块材料分别为3Cr13、QSn6.5-0.1和6061的3组试验进行分级加载(共10级),

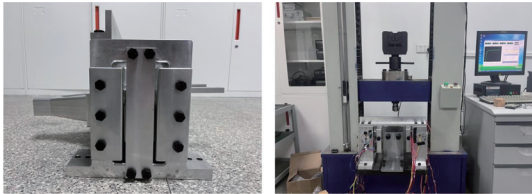


图11 试验装置

Fig.11 Test equipment

逐级增大下压力(0~8000 N),其中滑块材料参数如表4所示。在每组试验中,拉伸压缩测试仪的压头匀速下降,记录压头的位移和下压力,同时通过应变花和静态应变测试分析仪计算测试点的最大和最小弹性主应变。

表4 滑块材料参数

Tab.4 Material parameters of slider

| 材料 | E/GPa | μ | $\rho/(g \cdot cm^{-3})$ | ν |
|------------|-------|-------|--------------------------|-------|
| 3Cr13 | 219 | 0.30 | 7.76 | 0.30 |
| QSn6.5-0.1 | 117 | 0.20 | 8.65 | 0.34 |
| 6061 | 70 | 0.13 | 2.70g/cm ³ | 0.33 |

4.1.2 工程化测试方法

工程化测试包括钳剪刀具与抱抓开合试验、抱抓试验、剪切试验和钳碎试验。钳剪刀具与抱抓开合试验中,在钳剪模式和抱抓模式下刀具各进行10次闭合和张开,以观察是否有干涉或卡顿现象。抱抓试验中,要求样机在抱抓模式下将重物抱紧并抬起,并稳定移动超过5米。剪切试验涉及剪切直径为10 mm的钢筋,而钳碎试验则测试对破碎后横截面为120 mm×120 mm的水泥柱的钳碎能力。

4.2 试验结果分析

4.2.1 模型静载试验结果

自锁情况如图12所示,当滑块材料分别为3Cr13、QSn6.5-0.1和6061时,试验表明3种材料的滑块均展现出良好的自锁性能。测试点的应变变化情况如图13所示,结果显示所有测试点均处于弹性变形阶段。具体来看,3Cr13滑块的最小弹性主应变最小值为-159.57,QSn6.5-0.1滑块的最小弹性主应变最小值为-230.36,而6061滑块的最小弹性主应变最小值为-218.52。这表明

3种材料的滑块在受力性能方面表现出良好的稳定性和可靠性。

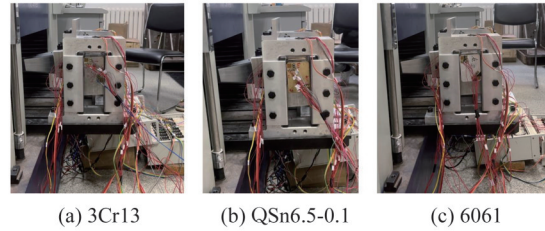


图12 自锁试验

Fig.12 Self-locked test

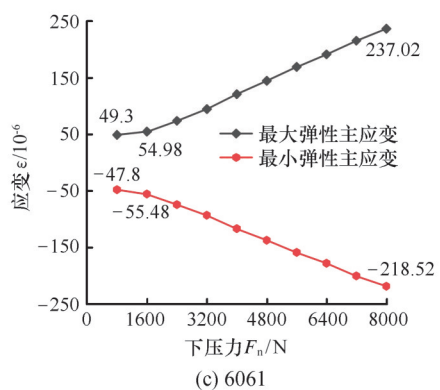
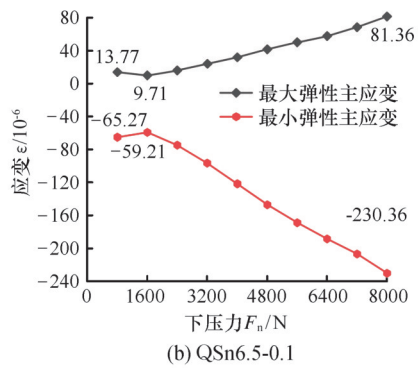
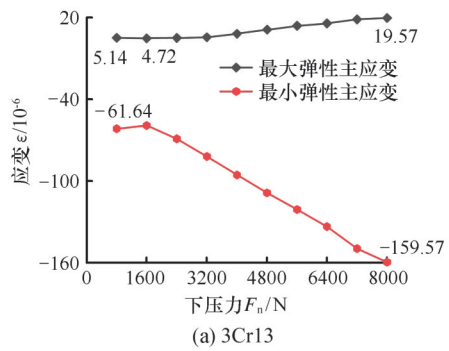


图13 应变变化情况

Fig.13 Strain changing situation

表5展示了滑块分别为3种材料时在仿真模型和测试试验中相同测点的应力值,以及两者之间的相对误差,其中仿真模型的数值见图8~图10。结果显示,仿真模型和测试试验的测点应力值非常接近,实际受力较好,相对误差较小,同时仿真模型和测试试验中3种滑块都能自锁。这说

明了仿真模型的可靠性,侧面验证了理论模型的正确性。

表5 最小主应力对比

Tab.5 Minimum principal stress comparison

| 材料 | 仿真模型测点应力/MPa | 测试试验测点应力/MPa | 误差/% |
|------------|--------------|--------------|------|
| 3Cr13 | -31.6 | -35.0 | 9.7 |
| QSn6.5-0.1 | -29.4 | -27.0 | 8.9 |
| 6061 | -17.7 | -15.3 | 15.7 |

在仿真和试验中,3种材料的滑块均实现了自锁,且各测试点均处于弹性变形阶段,表明了其良好的受力性能和结构稳定性;3组试验结果还验证了自锁模型和接触模型的有效性。此外,通过6061的滑块试验以及缩尺理论,进一步推测原始样机具备较好的自锁性能和良好的受力表现。

4.2.2 工程化测试试验结果

由于工程化样机的测试条件受限,仅能通过功能性测试验证样机的基本作业性能,因此本次工程化测试仅进行功能性验证,如表6和图14所示。测试结果表明,属具无干涉完成了10次开合动作,抱抓机构能够稳固抱抓150 kg重物并移动5 m,钳剪机构成功剪断直径10 mm的钢筋,钳剪机构钳碎了横截面为120 mm×120 mm的水泥柱。这些结果验证了样机在钳、剪、抓作业模式下的设计可靠性与运动功能稳定性。

表6 工程化测试结果

Tab.6 Engineering testing results

| 试验内容 | 试验情况 |
|------|----------------------|
| 开合试验 | 无干涉完成10次开合 |
| 抱抓试验 | 抱抓150kg重物移动5 m |
| 剪切试验 | 剪断直径为10mm的钢筋 |
| 钳碎试验 | 钳碎横截面120mm×120mm的水泥柱 |



图14 工程化测试

Fig.14 Engineering test

5 结论

基于钳剪抓一体多功能属具设计了相应的样

机,并对其进行了全面的测试与分析。首先,钳剪抓一体多功能属具中的功能转换机构采用滑块-滑槽的结构形式,具备自锁与滑动功能。其次,提出的自锁状态下的接触模型(改进模型)考虑了滑块滑动时弹性变形、黏着、堆叠变形及滑动剪切的情况。在此基础上,通过有限元分析,研究了使用不同材料制成的滑块时,滑块-滑槽结构在接触区域的自锁状态和接触特性分布规律。其中,改进模型在接触状态、最大赫兹应力及最大剪切应力等指标上比传统模型更接近仿真模型,尤其在最大剪切应力方面,改进模型在3组测试中的相对误差分别比传统模型低59.3%、64.6%和69.1%。试验结果表明,仿真模型和测试试验在相同测点的最小主应力值相对误差分别为9.7%、8.9%、15.7%,且工程化样机能够实现预定功能,验证了所提出模型和设计的可靠性。

参考文献:

[1] 李华玥,文鑫涛,陈雅慧,等. 2020年国外地震灾害及其影响综述[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(3): 583-588.
 LI Huayue, WEN Xintao, CHEN Yahui, et al. Review of Worldwide Earthquake Disasters and the Impacts in 2020[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(3):583-588.

[2] IPHAR M. ANN and ANFIS Performance Prediction Models for Hydraulic Impact Hammers [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27(1):23-29.

[3] KAPICA R. The System of Tracking the Position of the Bucket Excavators Wheel for Prevention of Risk Situations[J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2018;277-287.

[4] SOLOVIEV I, SICOE A. New Persistent Backend for the ATLAS Online Information Service [C]//2014 19th IEEE-NPSS Real Time Conference. Nara, 2014:1-6.

[5] WANG Chunrong, ZHAO Jing, XIA Erdong. Design and Optimization of a Novel Rescue End-effector [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C—Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(3):1032-1044.

[6] ZHAO Jing, WANG Xudong, ZHANG Daqing, et al. Design and Optimization of Clamp-Shear-Grab Integrated Attachment[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(5):296.

(下转第2139页)