

# 轮毂锻造机器人欠秩端拾器热-结构耦合分析及优化

申 焱<sup>1</sup>, 张全兵<sup>1</sup>, 邱贝贝<sup>2</sup>, 张 彬<sup>2</sup>, 袁明新<sup>1</sup>

(1. 江苏科技大学 机电与动力工程学院, 江苏 张家港 215600; 2. 连云港杰瑞自动化有限公司, 江苏 连云港 222006)

**摘要:** 为了提高高温环境下轮毂锻造机器人欠秩端拾器夹持的有效性和承载性, 对欠秩端拾器进行了热-结构耦合分析及结构优化。首先, 基于有限元理论将欠秩端拾器所受热力载荷和静力载荷耦合, 得到欠秩端拾器关键部件在耦合力场作用下的热应力分布及应力和应变结果; 然后, 根据所得热应力分布云图, 对欠秩端拾器各指节进行隔热优化设计以及热-结构耦合分析; 最后, 根据隔热结构的等效力结果进行了欠秩端拾器的拓扑结构优化。数值分析表明: 相比优化前的结构, 隔热优化后欠秩端拾器的首、中和末指节在参照节点处的温度分别降低了 33.78%、50.42% 和 35.31%; 拓扑优化后欠秩端拾器的首、中和末指节的质量分别减少了 38.75%、18.63% 和 26.45%, 实现了轮毂锻造机器人欠秩端拾器的耐高温及轻量化的优化目标。

**关键词:** 轮毂锻造; 欠秩端拾器; 热-结构耦合; 隔热优化; 拓扑优化

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.024

**中图分类号:** TP242      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0169-10

## Thermal-structural coupling analysis and optimization on under-rank end picker for hub forging robot

Shen Yi<sup>1</sup>, Zhang Quanbing<sup>1</sup>, Qiu Beibei<sup>2</sup>, Zhang Bin<sup>2</sup>, Yuan Mingxin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;

2. Lianyungang Jerry Automation Co., Ltd., Lianyungang 222006, China)

**Abstract:** In order to improve the effectiveness and load-bearing capacity of clamping for under-rank end picker of hub forging robot in high temperature environment, the thermal-structural coupling analysis and structural optimization of under-rank end picker were carried out. First, the thermal load and static load of under-rank end picker were coupled based on finite element theory, the thermal stress distribution and the stress and strain results of the key components for under-rank end picker under coupling force field were obtained. Then, according to the obtained thermal stress distribution nephogram, the thermal insulation optimization design and the thermal-structure coupling analysis of each finger joint for under-rank end picker were conducted. Finally, according to the equivalent stress results for thermal insulation structure, the topology structure optimization of under-rank end picker was conducted. The numerical analysis shows that compared with the structure before optimization, the temperatures at reference nodes of the first, middle and last knuckles for under-rank end picker after thermal insulation optimization are reduced by 33.78%, 50.42% and 35.31%, respectively, and the masses of the first, middle and last knuckles for under-rank end picker after topology optimization are reduced by 38.75%, 18.63% and 26.45%, respectively, which achieve the optimization objectives of high temperature resistance and lightweight for under-rank end picker of hub forging robot.

**Key words:** hub forging; under-rank end picker; thermal-structural coupling; thermal insulation optimization; topology optimization

轮毂是汽车的重要零配件, 高温、粉尘和振动的恶劣锻造环境使得机器人自动化生产线近年来得到了快速发展<sup>[1]</sup>。轮毂锻件的最高温度达 1250 ℃,

其热传导会造成机器人欠秩端拾器变形进而影响夹持精度; 此外, 欠秩端拾器的质量也会影响锻造机器人的负载能力, 因此, 开展机器人欠秩端拾器的热-结构耦合分析及结构优化对提高耐高温性能和实现轻量化具有重要意义。

在热加工工艺中, 外部环境或锻件内部热量造成的热变形占整个加工误差的 40%~70%<sup>[2]</sup>, 随着 CAE 技术的发展, 基于有限元理论研究热力场对机械结构性能的影响成为热点。Subbarao R 等<sup>[3]</sup>通过改变气压环境研究不同材料活塞在热载荷和结构载

收稿日期: 2021-05-06; 修订日期: 2021-08-05

基金项目: 国家重点研发计划“智能机器人”重点专项(2018YFB1309100); 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2019092)

作者简介: 申 焱(1976-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: shenyi76@163.com

通信作者: 张全兵(1994-), 男, 硕士研究生

E-mail: zqbjust@qq.com

荷耦合作用下的变形情况,确定发动机活塞的最佳材料;Kim Y 等<sup>[4]</sup>通过有限元分析方法研究飞机喷气嘴热-结构耦合特征,并根据分析结果确定绝缘层的最小厚度以保证结构刚度要求;吴卫东等<sup>[5]</sup>通过对采煤机截割部摇臂结构进行热-结构耦合分析,得出了热力作用对结构传动性能的影响规律;李若愚等<sup>[6]</sup>将热载荷和力载荷施加到薄板结构,研究热-结构耦合对薄板结构失稳的影响,发现随给定温度载荷、力载荷的增加或者降低,临界载荷随之增加或者降低,几乎呈线性变化;Kambampati S 等<sup>[7]</sup>将支架所受的热负荷考虑在内,在耦合场分析的基础上进行模型拓扑优化,为拓扑优化设计提供了一种新的方法。从现有研究可以看出,针对高温环境进行的热-结构耦合分析更多集中在热源对结构性能的影响方面,在热耦合分析的基础上作进一步拓扑结构优化的研究还很少。

如上所述,锻造机器人的工作环境恶劣,高温锻件的热辐射和热传导会对机器人欠秩端拾器的结构造成很大影响,进而影响机器人的夹持精度。因此,开展锻造机器人欠秩端拾器的热-结构耦合分析,并根据热分析进行热防护结构设计非常重要;此外,机器人承载的负载有限,因此,在热分析的基础上进一步开展结构拓扑优化,从而实现欠秩端拾器的轻量化对提高机器人的承载能力至关重要。

## 1 欠秩端拾器热分析技术路线

为研究温度场和静力场对欠秩端拾器工作性能的影响,以欠秩端拾器各关键零部件为分析对象进行热-结构耦合分析,且耦合表达式为:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{R} = \mathbf{R}^m + \mathbf{R}^h \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为整体刚度矩阵; $\mathbf{N}$ 为整体位移矩阵; $\mathbf{R}$ 为总体载荷; $\mathbf{R}^m$ 为机械载荷; $\mathbf{R}^h$ 为热载荷。

为了有效开展欠秩端拾器热-结构耦合的分析,文中采用顺序耦合方法<sup>[8]</sup>进行计算,具体的技术路线如图1所示。首先,针对欠秩端拾器依次进行热分析和静力分析;然后,将热载荷、结构载荷施加到欠秩端拾器有限元模型;最后,得到欠秩端拾器的耦合分析结果。

## 2 欠秩端拾器热-结构耦合分析

### 2.1 前处理

#### 2.1.1 欠秩端拾器模型的建立

轮毂锻造生产线的锻件外形如图2所示,其材

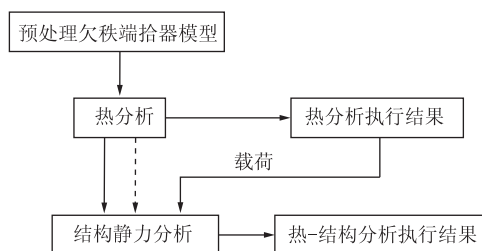


图1 热-结构顺序耦合分析流程图

Fig. 1 Flow chart of thermal-structural sequential coupling analysis



图2 轮毂锻件

Fig. 2 Hub forgings

料为一种高性能工具钢 S40CVS-HB。在实际生产中,会有多种尺寸的轮毂锻件,最大外径为 $\Phi 190$  mm,最大重量约为2.5 kg。

为了突破机器人对多尺寸轮毂锻件的自适应夹持,提高机器人的夹持自适应性、稳定性和安全性,基于欠秩原理设计了欠秩端拾器,并与弹簧连杆合成轮毂锻造机器人的欠秩耦合端拾器,如图3所示。锻造机器人的原型为连云港杰瑞自动化有限公司的JARI-CP-30,其负载能力为30 kg,运动范围为1800 mm;图3b所示欠秩端拾器驱动气缸的原型为宁波贝克韦尔的RH-EZ-200A,单爪行程为20 mm,开/闭力最大值为2900 N/2700 N,夹爪的许可长度为240 mm,物理重量为5.0 kg,夹持的许可重量为6.0 kg。欠秩端拾器包括驱动机构、夹持机构和耦合机构,其中:夹持机构由左右对称安装的三关节两指组成,每个指结构又包括首指节、中指节和末指节;耦合机构由首指节弹簧连杆和中指节弹簧连杆组成。在驱动气缸作用下,驱动连杆通过首指节传动块推动首指节传动连杆转动,直至首指节接触锻件,首指节夹持骨运动被约束,首指节弹簧连杆被拉伸;同样,中指节转动块带动中指节运动,直

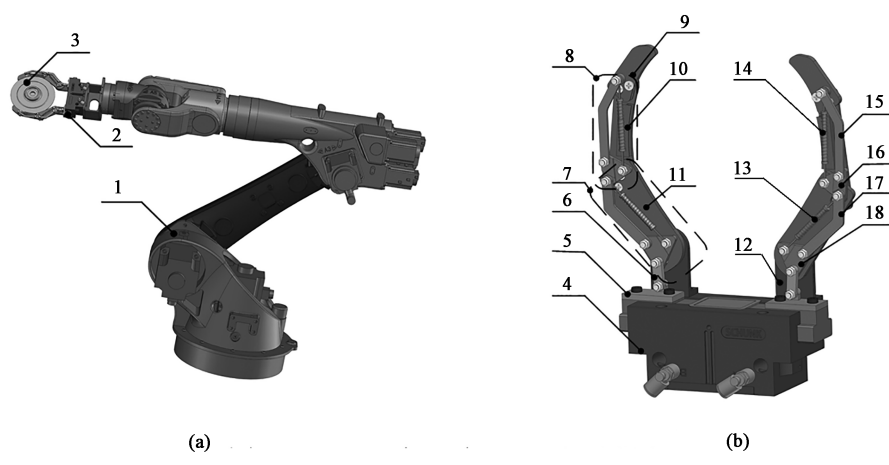


图 3 轮毂锻造机器人 (a) 及欠秩耦合端拾器 (b)

1. 机器人 2. 欠秩耦合端拾器 3. 碟状轮毂 4. 驱动气缸 5. 驱动滑块 6. 驱动连杆 7. 首指节 8. 中指节  
9. 末指节夹持骨 10. 中指节夹持骨 11. 首指节夹持骨 12. 支撑臂 13. 首指节弹簧连杆 14. 中指节弹簧连杆  
15. 中指节传动连杆 16. 中指节传动块 17. 首指节传动连杆 18. 首指节传动块

Fig. 3 Hub forging robot (a) and under-rank coupling end picker (b)

至中指节夹持骨接触锻件，中指节弹簧连杆被拉伸；接着末指节夹持骨接触锻件，最终实现单一驱动气缸作用下有效控制多自由度欠秩端拾器对轮毂锻件的自适应包络夹持。

2. 1. 2 材料选择及材料属性选择

由于锻件温度最高达 1250 ℃，选择能耐高温材料 06Cr25Ni20 钢作为欠秩端拾器端指节的主体材料，该材料可在 1300 ℃ 以下反复加热，常应用于炉、喷嘴和燃烧室等设备制造<sup>[9]</sup>，其力学性能和物理性能参数如表 1 所示。

表 1 耐热钢 06Cr25Ni20 的性能参数

Table 1 Performance parameters of heat-resistant steel 06Cr25Ni20

参数	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	热导率/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	热膨胀系数/(×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	屈服强度/MPa	泊松比	比热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> )
数值	7.98	21.5	17.5	206	0.3	480

2. 1. 3 划分网格

有限元网格划分质量的高低直接影响分析结果的精度<sup>[10]</sup>。受热力和静力载荷影响较大的首、中、末指节的分析结果要求尽可能精确，为此将三指节的单元格大小划分为 1 mm；将受耦合载荷影响相对较小的首、中指节弹簧连杆，以及首、中指节传动连杆的单元格大小划分为 2 mm；将驱动气缸单元格大小划分为 3 mm。此外，各构件的网格类型设置为六面体，螺钉等零件采用自由网格。求解得出具体网格划分结果为：节点数为 1468904，单元格数量为 966550，网格平均质量为 0.8235，符合网格划分的质量要求。欠秩端拾器的网格划分结果如图 4 所示。

2. 1. 4 施加载荷

基于顺序耦合分析法，欠秩端拾器的边界条件包括热力边界条件和夹持力边界条件两部分。

热力边界条件为：设定欠秩端拾器的初始夹持温度为环境温度 22 ℃，与轮毂件接触端面的温度为

1250 ℃。考虑实际夹持工况，设定夹持时间为 5 s。

夹持力边界条件为：欠秩端拾器对锻件稳定包络夹持时，各指节的夹持力几乎相等，设定首指节、



图 4 欠秩端拾器有限元网格划分

Fig. 4 Finite element meshing of under-rank end picker



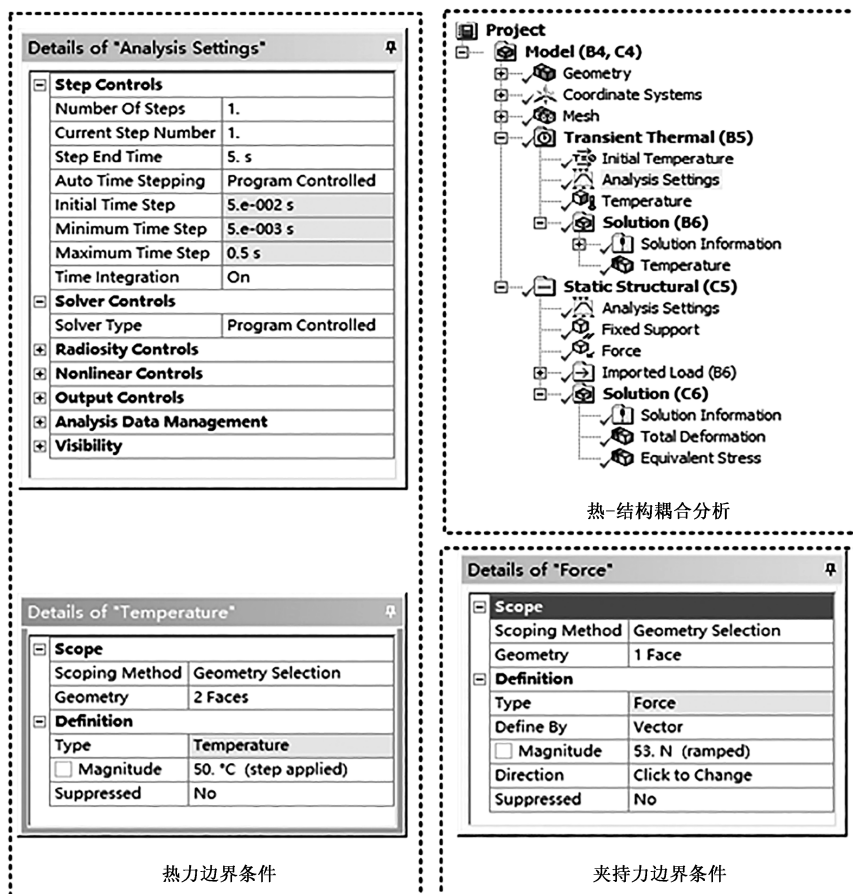


图 5 热-结构耦合边界条件设定

Fig. 5 Setting of thermal-structural coupling boundary conditions

中食指和末食指夹持力分别为 53、55 和 56 N。

热-结构耦合分析边界条件设置如图 5 所示。

## 2.2 求解及热-结构耦合仿真结果分析

基于前处理结果,利用 ANSYS Workbench 分别对欠秩端拾器进行热力场和热-结构耦合场分析。

### 2.2.1 热力场分析

经求解,可得出欠秩端拾器在高温轮毂锻件热力场作用下的热应力分布云图。图 6 为轮毂锻件与欠秩端拾器在接触 5 s 后的热应力分布云图。

由图 6 可以看出,在欠秩端拾器夹持高温锻件 5 s 时,其所受热应力主要集中在各指节与锻件的接触处,热应力由接触面向远离锻件一侧逐渐减小。而欠秩端拾器的传动机构及驱动气缸受热的影响较小,其中,末指节连接孔 MA 处、中食指凹槽 ZA 处和首指节凹槽两端 SA 及 SB 处受热应力的影响较大,最高温度均可达到 1250 °C,因此,上述位置需作进一步的热防护处理。

### 2.2.2 热-结构耦合场等效应力分析

将所受热应力作为载荷加载到静力场,从而可

得热-结构耦合作用下各指节的等效应力情况,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,在热应力和静载荷作用下,各指节所受耦合等效应力与所受热应力的分布存在较大相似性,这也说明在夹持过程中热应力对欠秩端拾器各指节的影响较大。欠秩端拾器末指节的等效应力主要集中于所在视图的左下孔 MA 处,其等效应力最大值为 216.87 MPa;中食指所受等效应力体现在接触面 ZF 及各连接孔 ZC、ZE、ZD 附近,最大等效应力在连接孔 ZE 处且为 207.48 MPa;首指节所受等效应力主要集中于与轮毂锻件的接触端面及接触面临近孔 SA、SC 处,其中最大等效应力位于所在视图上端孔 SC 附近且为 264.54 MPa。

### 2.2.3 热-结构耦合场应变分析

欠秩端拾器夹持轮毂锻件时受热-结构耦合场的作用会发生一定形变,图 8 为欠秩端拾器各指节在热-结构耦合作用下的应变分布。

由图 8 可以看出,各指节在耦合场的作用下均发生不同程度的应变。其中,末指节所产生的应变由

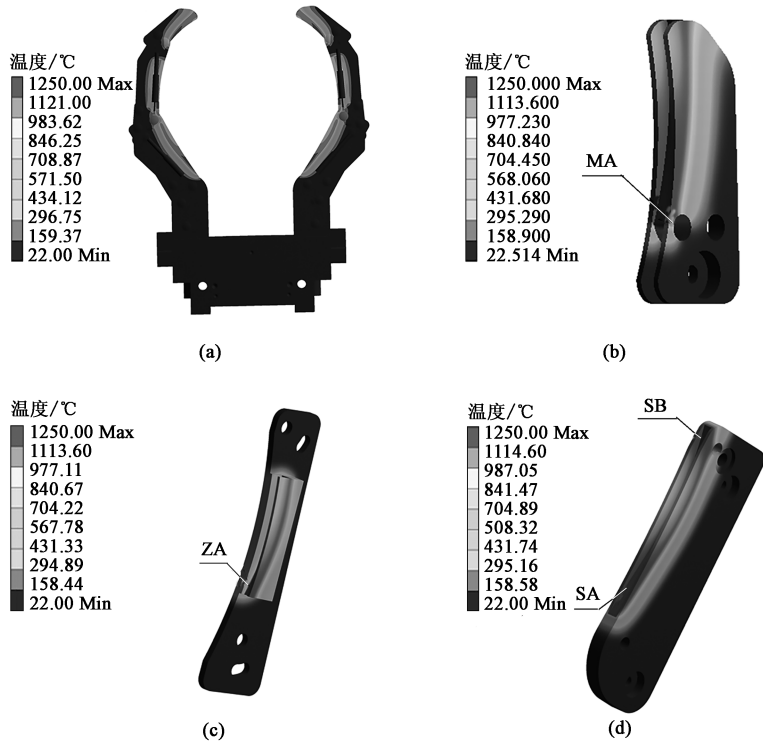


图 6 欠秩端拾器及各指节受热应力场作用云图

(a) 欠秩端拾器整体 (b) 末指节 (c) 中指节 (d) 首指节

Fig. 6 Cloud diagrams of under-rank end picker and each knuckle under thermal stress field effect

(a) The whole under-rank end picker (b) Last knuckle (c) Middle knuckle (d) The first knuckle

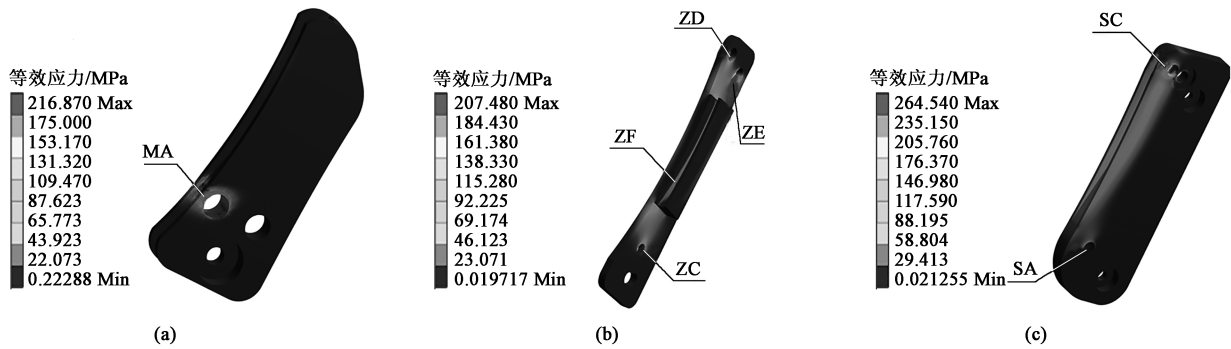


图 7 欠秩端拾器各指节受热-结构耦合作用等效应力云图

(a) 末指节 (b) 中指节 (c) 首指节

Fig. 7 Equivalent stress cloud diagrams of each knuckle for under-rank end picker under thermal-structure coupling effect

(a) Last knuckle (b) Middle knuckle (c) The first knuckle

指节顶端至根部逐渐减小，在顶端 MB 处应变最大，为 0.031；首、中指节的应变主要集中于与锻件接触的凹槽 ZF、SD 部分并向远离接触面一端减小，其中首、中指节的最大应变分别为 0.007 和 0.0026。

由上可知，已有设计的各指节仍存在局部受热应力过大、受等效应力过于集中的现象，且在持续高温工作环境下易出现结构失效现象。为了改善欠秩端拾器结构的受力<sup>[11]</sup>，在热-结构耦合分析基础上对隔热及拓扑结构进行优化。

### 3 欠秩端拾器关键零件隔热结构研究

#### 3.1 隔热结构优化设计

隔热层可有效减缓物体间的热传递速度，且在高温下保持优良的机械强度和抗高压能力<sup>[12]</sup>。考虑到刚性陶瓷的隔热性能优良、力学性能良好<sup>[13]</sup>，设计时选择隔热性能更好的材料 TZ-3Y 做隔热层，其材料参数如表 2 所示。

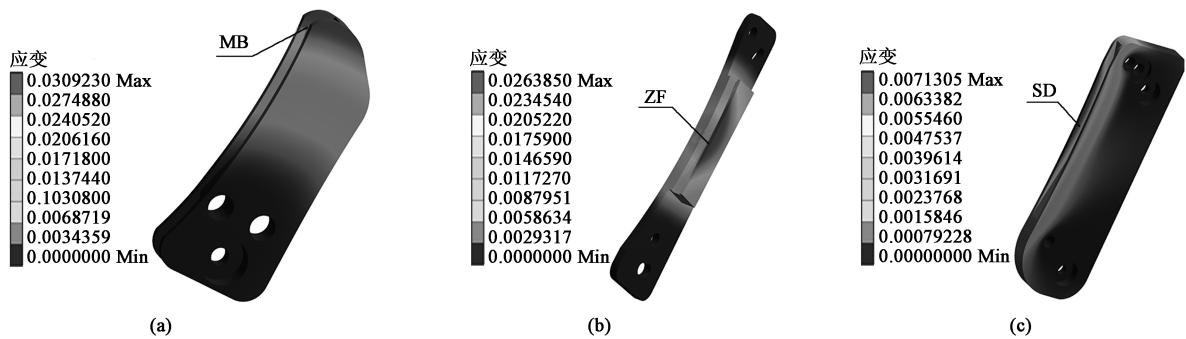


图 8 欠秩端拾器各指节受热-结构耦合作用应变云图

(a) 末指节 (b) 中指节 (c) 首指节

Fig. 8 Strain cloud diagrams of each knuckle for under-rank end picker under thermal-structure coupling effect

(a) Last knuckle (b) Middle knuckle (c) The first knuckle

表 2 隔热材料 TZ-3Y 的性能参数

Table 2 Performance parameters of thermal insulation material TZ-3Y

参数	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	热导率/( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	热膨胀系数/( $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	屈服强度/MPa	泊松比	比热容/( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )
数值	7870	18.73	15	232	0.3	677

根据热应力云图对欠秩端拾器进行隔热结构优化,各指节的结构优化结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,隔热优化后各指节分别由隔热结构和支撑结构组成。其中,末指节中 MP1 部分、中指节中 ZP1 部分以及首指节中 SP1 部分为隔热结构,均采用隔热性能及力学性能较好的材料 TZ-3Y;

末指节中 MP2 部分、中指节中 ZP2 部分以及首指节中 SP2 部分为支撑结构,其受热应力的影响较小,故该结构仍采用原有材料。为了进一步减小热应力场对欠秩端拾器各指节的影响,可在欠秩端拾器易产生失效的部分,如末指节与锻件的接触面 MC 和 MD 处以及首指节下端孔 SA 和 SE 处增加纳米陶瓷隔热涂层。

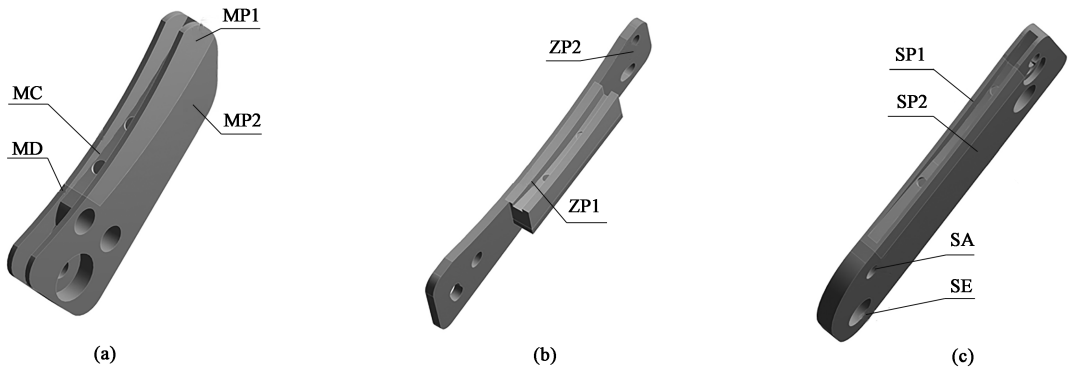


图 9 欠秩端拾器各指节隔热优化后结构

(a) 末指节 (b) 中指节 (c) 首指节

Fig. 9 Structure of each-knuckle for under-rank end picker after heat insulation optimization

(a) Last knuckle (b) Middle knuckle (c) The first knuckle

3.2 改进的隔热结构优化分析

选取各指节易失效处的某一有限元单元为温度变化观测点。改进后,欠秩端拾器关键部件的热应力云图及观测点温度变化如图 10 所示。

由图 10 可以看出,经隔热结构优化后,各指节受热应力场的影响程度明显变小,其高温热应

力分布范围也相应变小。末、中、首指节的观测点 ME、ZG、SF 处的温度由未进行隔热优化前的 339.3、424.8 和 548.5  $^{\circ}\text{C}$  降低至 219.5、210.6 和 363.2  $^{\circ}\text{C}$ ,所受热载荷分别降低 35.31%、50.42% 和 33.78%。由此可知,隔热结构优化可有效降低欠秩端拾器所受的热力载荷,从而有助于提高欠秩

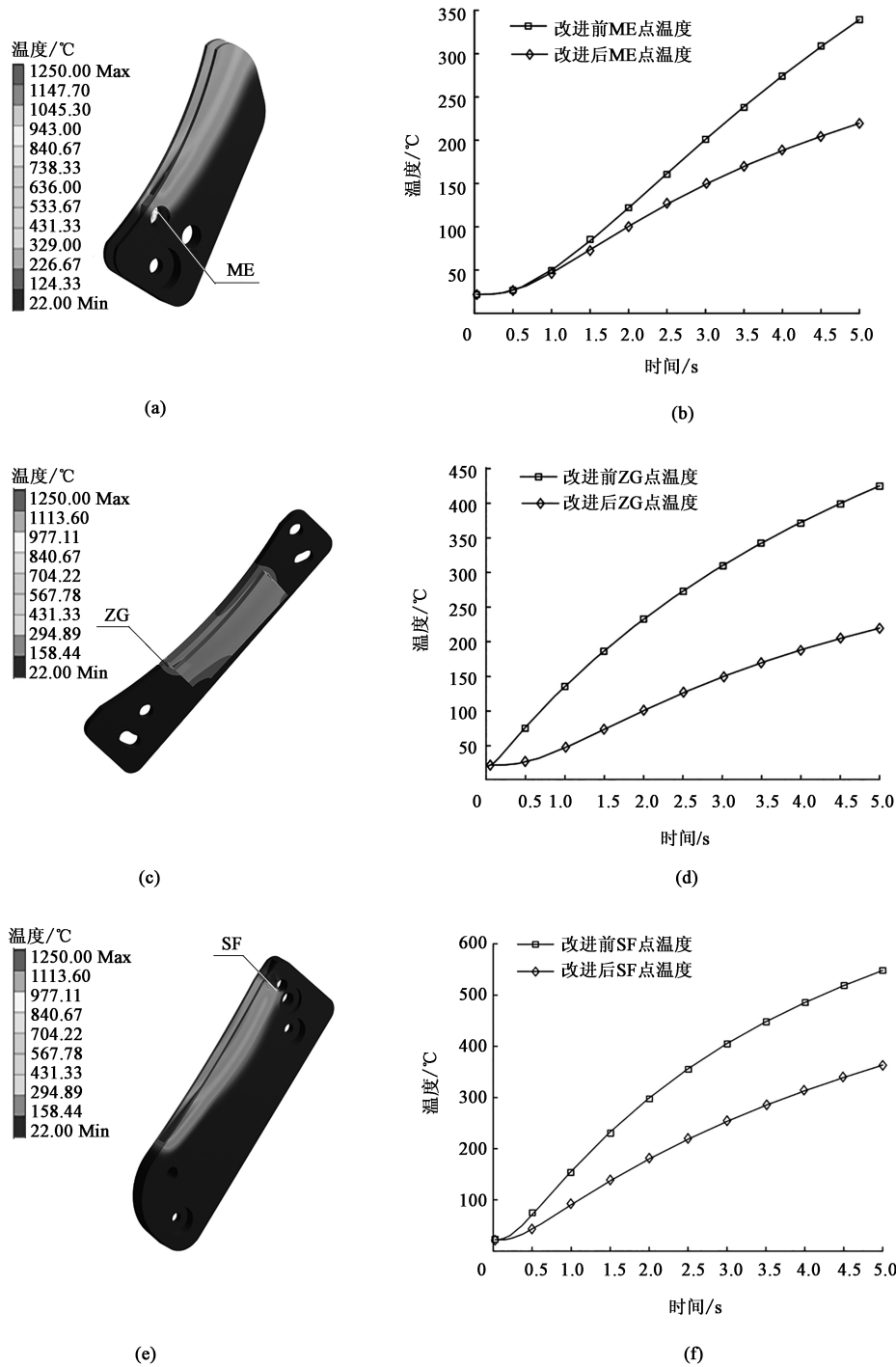


图 10 欠秩端拾器关键部件热应力云图及参照节点温度变化曲线

(a) 末指节隔热结构热应力云图    (b) 末指节隔热结构温度变化    (c) 中指节隔热结构热应力云图    (d) 中指节隔热结构温度变化  
(e) 首指节隔热结构热应力云图    (f) 首指节隔热结构温度变化

Fig. 10 Thermal stress cloud diagrams of key components for under-rank end picker and temperature change curves of reference nodes

(a) Thermal stress cloud diagram of thermal insulation structure for last knuckle    (b) Temperature change of thermal insulation structure for last knuckle  
(c) Thermal stress cloud diagram of thermal insulation structure for middle knuckle    (d) Temperature change of thermal insulation structure for middle knuckle  
(e) Thermal stress cloud diagram of thermal insulation structure for the first knuckle    (f) Temperature change of thermal insulation structure for the first knuckle

端拾器的使用寿命及耐用极限。

然后，可以得到经隔热结构优化后的欠秩端拾器各指节在热-结构耦合场下的等效应力分布，

如图 11 所示。

由图 11 可以看出，经隔热优化的欠秩端拾器各指节在热-结构耦合作用下，其等效应力也相应减

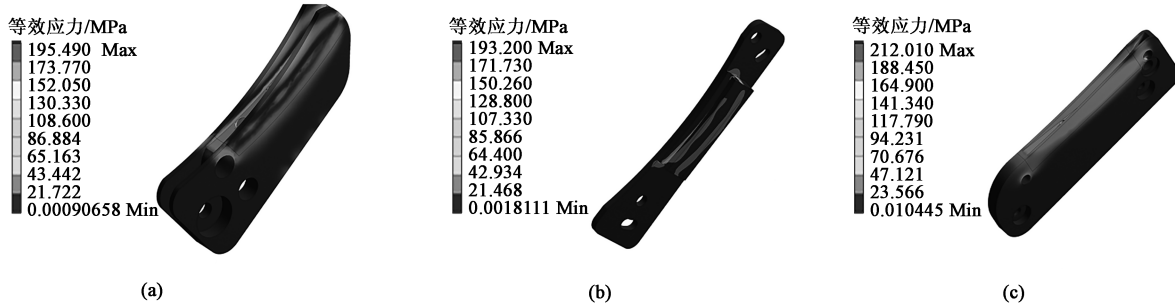


图 11 隔热结构优化后各指节在热-结构耦合场下的等效应力云图

(a) 末指节 (b) 中指节 (c) 首指节

Fig. 11 Equivalent stress cloud diagrams of each knuckle under thermal-structure coupling field after insulation structure optimization

(a) Last knuckle (b) Middle knuckle (c) The first knuckle

小, 首、中、末指节的最大等效应力分别减少 9.86%、7.36% 和 19.86%。将上述分析结果进一步作为拓扑结构优化的依据, 从而达到结构轻量化的目标, 以提高欠秩端拾器的夹持能力。

## 4 欠秩端拾器关键零部件拓扑优化设计

### 4.1 拓扑结构理论基础

在连续体拓扑优化方法中, 变密度法是常用的方法之一<sup>[14]</sup>。文中通过该方法改变欠秩端拾器结构的总体刚度, 使材料的分布达到最优<sup>[15]</sup>, 从而实现结构轻量化的目标。拓扑优化的模型可以表示为:

$$\begin{cases} \text{Min/Max } f(\eta_i) \\ \text{s. t. } 0 < \eta_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \\ c_j < c_j \leq \bar{c}_j \quad (j = 1, 2, 3, \dots, m) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\text{Min/Max}(\eta_i)$  为寻求最小拓扑单元体积表达式;  $f(\eta_i)$  为拓扑单元体积表达式;  $\eta_i$  为每个有限单元  $i$  内部伪密度;  $n$  为单元数;  $m$  为约束数;  $c_j$  为第  $j$  个约束;  $\bar{c}_j$  为第  $j$  个约束的下限值;  $\bar{c}_j$  为第  $j$  个约束的上限值。

欠秩端拾器稳定包络夹持时, 各指节拓扑优化是在满足结构合理的前提下以减少柔度为目标, 此时优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \lambda = \text{Min } f(\eta_i) \\ \text{s. t. } 0 < \eta_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \\ V \leq \alpha V_0 \quad (0 < \alpha \leq 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为欠秩端拾器各指节柔度;  $V$  为欠秩端拾器各指节优化后的体积;  $\alpha$  为缩减体积百分比;  $V_0$  为欠秩端拾器各指节优化前的区域体积。

### 4.2 欠秩端拾器夹持指结构拓扑优化及分析

基于以上拓扑理论, 对欠秩端拾器各指节进行结构拓扑优化。为保证良好的隔热效果及安装的安全可靠, 优化时排除隔热结构及零件各孔; 为达到轻量化设计且不改变隔热机构, 设定首、中、末指节的质量分别保留 75%、80% 和 65%; 迭代最高次数为 100, 收敛公差最小为  $10 \times 10^{-3}$ 。欠秩端拾器各指节的拓扑优化结果如图 12 所示, 其中 MH、ZJ、SH 所标示区域为高伪密度体, MF、MG、ZI、SG 所示区域为拓扑优化保留的区域。

由图 12 可以看出, 欠秩端拾器各指节的拓扑优化结果服从热-结构耦合场下的等效应力分布。其中, 末指节根部 MF 及 MG 处、中指节顶端 ZH 及根部 ZI 处、首指节远离夹持面一端 SG 处为去除部分; 末、中、首指节的质量由  $4.31 \times 10^{-2}$ 、 $8.75 \times 10^{-2}$  和  $16 \times 10^{-2}$  kg 降至  $3.17 \times 10^{-2}$ 、 $7.12 \times 10^{-2}$  和  $9.78 \times 10^{-2}$  kg, 分别减少了 26.44%、18.74% 和 39%。

为了验证拓扑优化的有效性, 下面对优化后的结构进行热-结构耦合分析, 结果如图 13 所示。各指节的质量及应力变化情况如表 3 所示。由图 13 及表 3 可以看出, 拓扑优化后, 欠秩端拾器指节在减轻质量的同时, 其所受最大等效应力不同程度增加, 各指节受力均增大。其中, 欠秩端拾器末、中、首指节的最大等效应力分别增大 4.53%、13.98% 和 6.45%, 但仍在材料的耐受范围内, 符合设计要求。

## 5 结论

(1) 基于有限元理论, 将热应力场和静力场耦合, 可以得到热-结构耦合条件下机器人欠秩端拾器各指节的热应力分布及应力、应变情况。



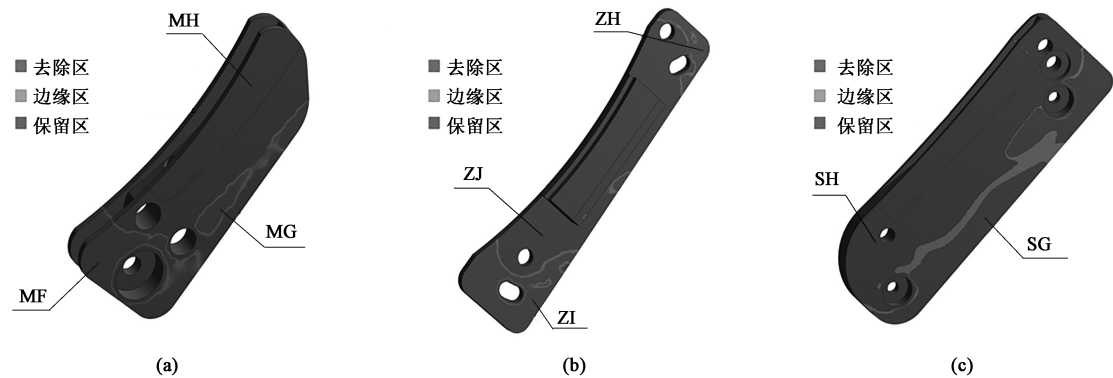


图 12 欠秩端拾器关键部件拓扑优化伪密度云图

(a) 末指节 (b) 中指节 (c) 首指节

Fig. 12 Pseudo-density cloud diagrams of topological optimization for key components of under-rank end picker

(a) Last knuckle (b) Middle knuckle (c) The first knuckle

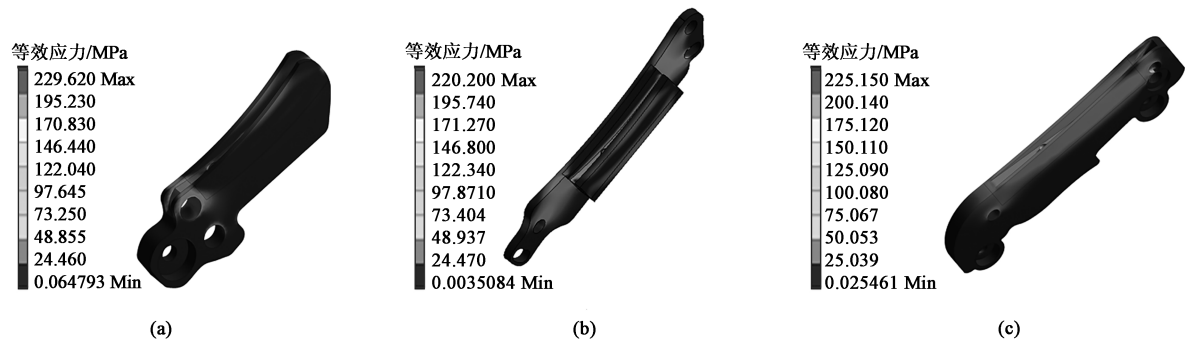


图 13 拓扑结构优化后各指节在热-结构耦合场下的等效应力云图

(a) 末指节 (b) 中指节 (c) 首指节

Fig. 13 Equivalent stress cloud diagrams of each knuckle under thermal-structure coupling field after topology structure optimization

(a) Last knuckle (b) Middle knuckle (c) The first knuckle

表 3 欠秩端拾器各指节拓扑优化对比

Table 3 Topology optimization comparison of each knuckle for under-rank end picker

拓扑优化对象	质量/ ( $\times 10^{-2}$ kg)	质量优化 比例/%	最大应力/ MPa	最大应力优化 比例/%
末指节	优化前 4.31	26.45	219.67	4.53
	优化后 3.17		229.62	
中指节	优化前 8.75	18.63	193.20	13.98
	优化后 7.12		220.20	
首指节	优化前 16.00	38.75	212.00	6.45
	优化后 9.8		225.68	

(2) 基于热-结构耦合作用下欠秩端拾器的受热及静力载荷情况，开展轮毂锻造机器人欠秩端拾器的隔热结构优化，可以明显提升欠秩端拾器的隔热性能。

(3) 基于热-结构耦合作用下欠秩端拾器的应力情况，开展轮毂锻造机器人欠秩端拾器的拓扑结

构优化，在满足结构性能条件下，可以达到轻量化目标。

(4) 高温环境下锻造机器人欠秩端拾器的隔热结构优化有助于提高欠秩端拾器的使用寿命，而进一步进行拓扑结构优化，可以在满足力学性能的基础上减轻欠秩端拾器的质量，提高机器人的承载能力。

参考文献：

[1] 刘仁明. 链轨节自动化锻造生产线平移夹爪的研制 [J]. 煤矿机械, 2020, 41 (4): 41-43.  
Liu R M. Development of translation clamping claw for chain link automatic forging production line [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41 (4): 41-43.  
[2] Liu J F, Zhang P. Thermo-mechanical behavior analysis of motorized spindle based on a coupled model [J]. Mechanical Engineering, 2018, 10 (1): 1-12.  
[3] Subbarao R, Gupta S V. Thermal and structural analyses of an internal combustion engine piston with suitable different super alloys [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22 (4): 2950-2956.  
[4] Kim Y, Sun J K. Design and thermo-structural analysis of 2D ex-

- haust nozzle with multiple composite layers [J]. Composite Structures, 2020, 254 (15): 252-263.
- [5] 吴卫东, 李杰, 杨志新, 等. 采煤机截割部摇臂结构热固耦合及传动影响分析 [J]. 煤矿机械, 2020, 41 (12): 73-74. Wu W D, Li J, Yang Z X, et al. Analysis of thermo-mechanical coupling and transmission influence of rocker arm structure of shearer cutting part [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41 (12): 73-74.
- [6] 李若愚, 王天宏. 薄板热力耦合的屈曲分析 [J]. 应用数学和力学, 2020, 41 (8): 877-886. Li R Y, Wang T H. Thermo-mechanical buckling analysis of thin plates [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2020, 41 (8): 877-886.
- [7] Kambampati S, Gray J S, Kim H A. Level set topology optimization of structures under stress and temperature constraints [J]. Computers & Structures, 2020, 235 (15): 365-376.
- [8] 邓小雷, 盛泽枫, 张江林, 等. 基于不规则元胞的主轴温度-结构场耦合热拓扑优化设计方法 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2020, 54 (1): 23-32. Deng X L, Sheng Z F, Zhang J L, et al. Thermal topology optimization design method of spindle under temperature-structure field coupling condition based on irregular cell [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2020, 54 (1): 23-32.
- [9] 姚红红, 邹德宁, 周雨晴, 等. 固溶温度对 06Cr25Ni2 奥氏体耐热钢微观组织和力学性能的影响 [J]. 上海金属, 2017, 39 (6): 22-25. Yao H H, Zou D N, Zhou Y Q, et al. Effect of solution temperature on microstructure and mechanical properties of 06Cr25Ni20 austenitic heat-resistant steel [J]. Shanghai Metals, 2017, 39 (6): 22-25.
- [10] 苟建平, 侯力, 吴阳, 等. 基于有限元法的变双曲圆弧齿线齿轮啮合刚度分析 [J]. 机械传动, 2020, 44 (10): 104-110. Gou J P, Hou L, Wu Y, et al. Analysis of meshing stiffness of variable hyperbolic arc gear based on finite element method [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44 (10): 104-110.
- [11] 徐德衍. 铁道车辆热铆连接的有限元分析 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 118-128. Xu D Y. Finite element analysis on hot riveting connection for railway vehicles [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 118-128.
- [12] 兰青, 刘俊. 轮毂锻造液压机垫板隔热保温结构优化 [J]. 机械设计, 2020, 37 (S1): 223-225. Lan Q, Liu J. Heat insulation structure optimization of the pad of wheel hub forging hydraulic press [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37 (S1): 223-225.
- [13] 张同钢, 王优强, 徐彩虹, 等. 水润滑动静压陶瓷轴承的热弹流润滑分析 [J]. 机械传动, 2017, 41 (10): 17-22. Zhang T G, Wang Y Q, Xu C H, et al. Analysis of the thermal elastohydrodynamic lubrication of water-lubricated hybrid ceramic bearing [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41 (10): 17-22.
- [14] 侯庚, 张迎辉, 葛宰林, 等. 大型矿用电铲推压减速箱体拓扑优化及影响分析 [J]. 机械传动, 2018, 42 (4): 67-70. Hou G, Zhang Y H, Ge Z L, et al. Topology optimization and impact analysis of crowd reducer box of large mining electric excavator [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42 (4): 67-70.
- [15] 殷剑, 黎诚, 金康, 等. 铝合金汽车前下摆臂成形工艺的有限元模拟与优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 74-82. Yin J, Li C, Jin K, et al. Finite element simulation and optimization on forming process of automobile front lower sway arm for aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 74-82.

欢迎关注“锻压技术杂志”微信公众号

@杂志动态 @行业信息 @企业宣传



• 锻造 • 冲压 • 钣金 • 模具 • 加热 • 标准化 •