锤上模锻钳夹式双气缸末端执行器的设计

冯学文[1] 敖煦柯[2] 赵启奔[1] 孟国营[1] 汪爱明[1*] 李祥龙[1] 徐义洋[3]
邱天择[1] 方宇航[1]
1.中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院,北京,100083
2.长沙矿山研究院有限责任公司,长沙,410012
3.北京中煤矿山工程有限公司,北京,100013

摘要:为实现高温锻件的稳定抓取,设计了一种钳夹式双气缸驱动末端执行器。通过运动学、动力学及有限元分析确定了关键结构参数,设计了中封型气动系统及PLC控制系统,并开展了夹持性能试验。试验结果表明,末端执行器两个气缸的最大行程分别为33.1 mm和32.3 mm,最大作用力分别为1178.1 N和752.9 N,调速阀开度在60%时的系统响应性能最佳,对不同位置的锻件具有较好的夹持适应性,能满足锤上模锻锻件自动夹持与复位的需求。

关键词:模锻;机械手;末端执行器;运动学分析;气动控制
中图分类号:TH122
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.010 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Design of a Pincer-type Dual-cylinder End Effector for Hammer Forging

FENG Xuewen[1] AO Xinke[2] ZHAO Qiben[1] MENG Guoying[1] WANG Aiming[1*] LI Xianglong[1]
XU Yiyang[3] QIU Tianze[1] FANG Yuhang[1]
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing, 100083
2.Changsha Institute of Mining Research Co.,Ltd., Changsha, 410012
3.Beijing China Coal Mine Engineering Co., Ltd., Beijing,100013

Abstract: To achieve stable grasping of high-temperature forgings, this paper designs a clamp-type end effector driven by dual pneumatic cylinders. Key structural parameters are determined through kinematic, dynamic, and finite element analyses. A center-closed pneumatic system and a PLC-based control system are developed, and grasping performance experiments are conducted. The two cylinders of the end effector have maximum strokes of 33.1 mm and 32.3 mm, with corresponding maximum driving forces of 1178.1 N and 752.9 N, respectively. The system shows the best dynamic response at a speed control valve opening of 60%. The end effector exhibits good adaptability in grasping forgings at various positions and meets the requirements for automatic grasping and repositioning of hammer-forged workpieces.

Key words: hammer forging; manipulator; end effector; kinematic analysis; pneumatic control

0 引言

锻造技术广泛用于航空航天、高端装备、汽车制造和矿山机械等领域。实际生产过程中,高温锻件易出现移位(粘连或跳出模膛)问题,目前主要依靠工人经验判断及手动复位。这不仅增加了工人劳动强度,导致安全隐患,还难以保证位姿调整精度,直接影响产品质量[1-2]。锤上模锻生产环境恶劣,长期作业严重影响操作工人的身体健康,因此亟须采用机械手实现锻件的自动抓取和复位。

工业机械手末端执行器的夹持方式主要包括吸盘式[3]、磁力式[4]、柔性式[5]和钳夹式[6],其中,钳夹式末端执行器具有高夹持力和较强适应性,适用于重型、复杂形状及高精确定位的工件。目前,末端执行器常用的驱动方式有气动驱动、电机驱动和液压驱动。气动驱动结构简单、响应快、成本低,但精度低且依赖气源;电机驱动精度高、控制灵活,但系统复杂、成本高;液压驱动推力大、可靠性强,但响应慢且存在泄漏风险。针对高温复杂环境,一些研究尝试改进末端执行器结构或驱动方式,如模块化制孔末端执行器[7]、双指回转钳夹式末端执行器[8]。这些方案存在夹持力不均、气缸推力传导不充分、抓取点距重心过远导致锻件

收稿日期:2025-07-17
基金项目:国家自然科学基金(52374167)

变形等问题，难以满足高温锤上模锻生产线移位锻件的自动抓取与复位要求。

因此，笔者设计了一种由夹持机构、驱动机构和支撑机构组成的钳夹式双气缸驱动末端执行器。通过在底部夹持机构设置托举支撑结构，实现锻件的承托与定位。同时利用顶部压持机构施加压紧力，形成上下协同夹持方式，提高锻件抓取过程中的稳定性并避免表面损伤。利用ADAMS和ANSYS对结构进行运动学、动力学及有限元分析验证，搭建了中封型气动系统和PLC控制系统，并开展了实验验证。

1　末端执行器的整体结构及工作原理

1.1　末端执行器的整体结构

模锻过程中，锻件的温度较高，直接抓取锻件本体易导致成品残次率高，所以末端执行器需抓取毛坯锻件的飞边。本文设计的末端执行器安装于新时达SR165型六轴工业机器人末端。关节运动学及动力学参数见表1。

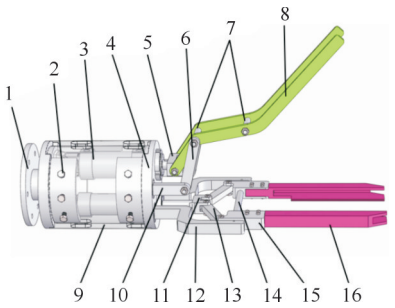
表1　机器人运动学与动力学参数表

Tab.1　Robot kinematic and dynamic parameters

关节	运动学参数		动力学参数	
	最大角速度/((°)·s^{-1})	转动范围(°)	手腕静负荷扭矩/(N·m)	关节负载惯量/(kg·m^2)
J1	100	−165～165		
J2	80	−50～85		
J3	110	−150～80		
J4	150	−360～360	900	84
J5	150	−125～125	900	84
J6	210	−360～360	490	45

通常情况下，刮板横梁的毛坯锻件的飞边厚度为7 mm，总质量为25 kg。基于对夹持目标特性、锤上模锻复位工艺需求及驱动方式的分析，设计图1所示的钳夹式双气缸驱动末端执行器。该末端执行器主要由夹持机构、驱动机构、支撑机构和连接法兰组成，其中，夹持机构包括底部的承拖夹持机构和顶部的压持结构。承托夹持机构用于支撑锻件并对其进行限位，压持机构对锻件上表面施加压紧力，两机构的协同作用提高了夹持稳定性和对不同位置状态锻件的适应能力。经三维模型质量核算与实物称重，该末端执行器的实际质量为32.5 kg，满足机器人负载要求。

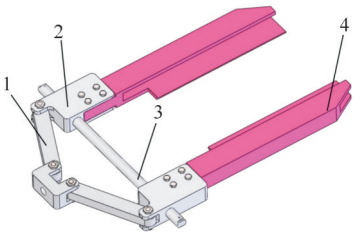
如图2所示，导杆固定在L形支件上，用来约束运动部件的运动方向。滑块与夹持板连接，在气缸驱动力作用下沿导杆作往复运动，驱动夹持板完成夹紧和松开动作。夹持板下方的延长部分形成托板来支撑毛坯锻件的毛边，确保在夹持的过程中不损伤毛坯锻件本体。



1. 法兰连接座　2. 第二驱动气缸　3. 连接筒　4. 基座　5. 顶部铰接座　6. 顶部连接板　7. 固定杆　8. 压板　9. 第一驱动气缸　10. 铰接支件　11. 底部铰接座　12. L形支件　13. 底部连接板　14. 导杆　15. 滑块　16. 夹持板

图1　末端执行器整体结构

Fig.1　Overall structure of the end effector

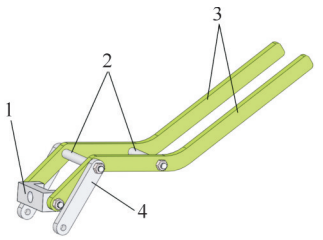


1. 底部连接板　2. 滑块　3. 导杆　4. 夹持板

图2　底部夹持机构三维模型

Fig.2　3D Model of the bottom clamping mechanism

为提高锻件夹持的稳定性，设计了压持机构。如图3所示，铰接支件对称安装于基座两侧，顶部连接板一端与铰接支件铰接，另一端通过螺栓与压板连接。夹持过程中，压板可绕铰接点转动并向下压紧锻件，与底部夹持机构协同作用，实现锻件的稳定夹持。



1. 底部铰接座　2. 固定杆　3. 压板　4. 顶部连接板

图3　顶部压持机构三维模型

Fig.3　3D Model of the top pressing mechanism

驱动机构是末端执行器的核心部分，将控制系统的指令转换为机械运动。夹持机构和压持机构均采用气动驱动。气缸直径的计算公式为

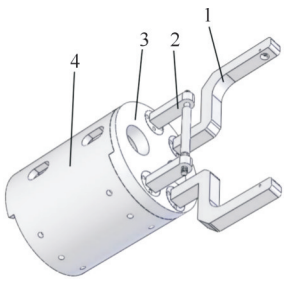
$$D=\sqrt{\frac{4F}{\pi\eta p}}$$

式中：F为驱动力；η为负载率；p为实际需求压力。

选取p=0.6 MPa，η=0.8，可得第一驱动气缸直径D_1=30.4 mm，第二驱动气缸直径D_2=42.2 mm，据此选定第一驱动气缸为费斯托DSNU-40-50-P-A，第二驱动气缸为费斯托

DSNU-50-40-P-A。

如图4所示，L形支件固定在基座，用于安装导杆并支撑承托夹持机构。滑块在导杆约束下往复移动，实现夹持机构的开合。L形支件与基座采用嵌套配合并通过螺栓连接，以提高连接结构的抗剪承载能力和连接刚度。铰接支件安装于基座，为顶部压持机构提供转动支撑。压板通过铰接结构与铰接支件连接，可绕铰接轴在一定范围内转动，实现对锻件上表面的压紧。铰接支件与基座同样采用嵌套配合并通过螺栓固定，以提高连接结构抵抗切向载荷及冲击载荷的能力。连接筒连接基座与法兰连接座，提高支撑机构整体的结构刚度和连接可靠性。连接筒侧壁均布设置的4个椭圆形通孔是气缸气路管线的布置通道。基座安装面有4个圆柱形安装孔和2个通孔，其中，圆柱形安装孔安装L形支件和铰接支件，通孔用于气缸的定位与固定。基座另一端设置与连接筒配合的阶梯式连接面，基座与连接筒通过螺栓连接形成整体结构。



1. L形支件　2. 铰接支件　3. 基座　4. 连接筒

图4　支撑机构三维模型

Fig.4　3D Model of the supporting mechanism

法兰连接机构连接机器人第六轴手腕处的法兰盘与整个夹持器系统，如图5所示。

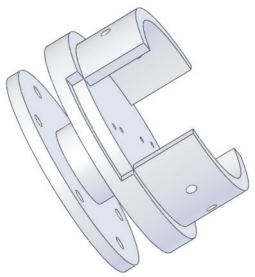


图5　法兰连接机构三维模型

Fig.5　3D Model of the flange connection mechanism

1.2　末端执行器的工作原理

夹持锻件时，末端执行器采用双阶段控制策略。第一阶段，由底部夹持机构承托锻件，并通过两侧夹持板对锻件进行横向限位，实现锻件的初步定位与支撑。第二阶段，压持机构向锻件上表面施加垂向压紧力，与承托夹持机构形成稳定夹持。该夹持方式不仅能提高锻件在抓取和搬运过程中的夹持稳定性，而且可根据锻件厚度变化自动调整压紧位置，校正倾斜或偏转的锻件姿态，防止锻件在搬运过程中发生位移。模锻生产过程中，末端执行器不仅需要完成锻件的抓取与复位，还需满足锻件翻转工艺的要求。锻件正反两面的结构特征不同，两面的夹持方式也不同，因此分别对锻件正面朝上和反面朝上的夹持工况进行分析。

锻件背面朝上时，承托夹持机构与压持机构夹持飞边并向上移动一定高度，然后法兰盘旋转180°，末端执行器向下倾斜45°，将锻件远端对准模膛一侧，最后缓慢放下锻件，完成翻转复位过程，如图6所示。

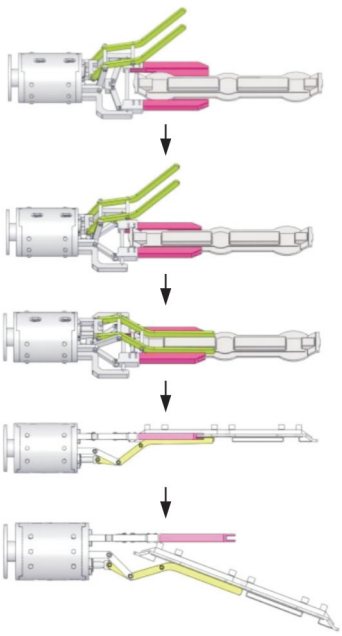


图6　毛坯锻件背面朝上时的夹持步骤

Fig.6　Clamping procedure for the forging blank with the back side facing up

锻件正面朝上时，首先由承托夹持机构承托锻件并完成初步定位，两侧夹持板对锻件进行横向限位；随后压持机构向锻件上表面施加压紧力，并与承托夹持机构形成协同夹持，保证锻件在搬运和翻转过程中的稳定性，如图7所示。

2　末端执行器的仿真分析

2.1　运动学与动力学的仿真分析

采用ADAMS软件对末端执行器进行运动学和动力学分析，验证末端执行器结构设计的合理性和稳定性。将末端执行器三维装配模型导入ADAMS，建立动力学仿真模型。根据实际工况设置重力加速度方向，选择mm、kg、N、s、(°)、Hz

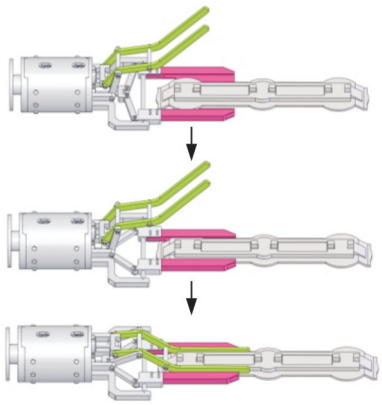


图7　毛坯锻件正面朝上时的夹持步骤

Fig.7　Clamping procedure for the forging blank with the front side facing up

作为长度、质量、力、时间、角度和频率的单位。随后定义各运动副的约束关系及驱动条件，为末端执行器运动学与动力学分析提供仿真环境[9-10]。

根据末端执行器实际运动关系建立约束模型。其中，模膛与地面、基座与固定构件之间采用固定副约束；铰接支件与顶部连接板之间采用转动副约束，以实现压板绕铰接轴的转动；气缸推杆与缸筒、滑块与导杆之间采用移动副约束，以保证运动部件仅沿预定方向进行直线往复运动。通过上述约束关系构建末端执行器的动力学仿真模型[11]。

根据锻件抓取与翻转工艺要求，在ADAMS中对末端执行器的运动过程进行驱动设置。夹持动作由2个气缸推杆的直线往复运动实现，因此在2个气缸推杆上施加平移驱动。锻件翻转动作由机器人末端法兰带动完成，因此在法兰连接座处施加旋转驱动，以模拟机器人带动末端执行器的180°翻转。

为简化机器人本体模型，在法兰连接座后端建立与地面固定连接的圆盘模型，用于等效模拟机器人末端法兰接口。在等效法兰模型上施加平移驱动，实现末端执行器抓取锻件后的提升运动，从而构建完整的抓取、提升及翻转运动过程。为模拟底部夹持机构的夹紧过程，在气缸推杆处施加平移驱动，其驱动函数设为step(time,0,0,2,32.1)，其中，time为仿真时间。该函数表示推杆位移在0～2 s内由0平滑增加至32.1 mm，并在2 s后保持不变，用于模拟气缸推动夹持机构完成夹紧动作的过程。为顶部压持机构添加平移驱动，设置执行器在0～2 s运动的驱动函数step(time,0,0,2,34)。为圆盘添加平移驱动，设置执行器在2～3 s运动的驱动函数step(time,2,0,3,200)。为法兰连接盘添加旋转驱动，提供执行器在3～5 s旋转180°的驱动函数step(time,3,0,5,π)。

以上所有设置完成后，便可仿真分析末端夹持器的夹取过程。其中，0～2s为底部夹持机构和顶部压持机构夹持毛坯锻件的时间，2～3s为执行器夹紧毛坯锻件向上提升200 mm的动作时间，3～5s为执行器提升到位之后旋转180°的动作时间，仿真总时间为5s，仿真步数设为200。设置完毕的仿真模型如图8所示。

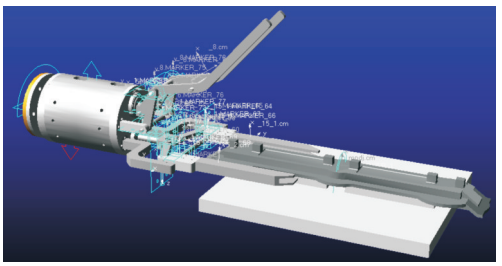


图8　设置完毕的整体仿真模型

Fig.8　Configured simulation model

气缸是驱动末端执行器完成夹持动作的关键执行元件，其行程直接关系到夹持机构能否满足设计要求。因此，通过ADAMS动力学仿真获取气缸推杆的实际行程，并据此进行气缸选型。仿真过程中，在连接筒末端中心建立全局参考坐标系，来测量和分析气缸推杆及相关运动部件的位移变化。第一驱动气缸为承托夹持机构提供动力，夹持时，气缸推杆向Z轴负向运动。0～2 s时，承托夹持机构夹持锻件，第一驱动气缸推杆回退，由图9可知，气缸回退的位移为34 mm。0～5 s中，第一驱动气缸推杆的回退运动平稳，推力在传递过程中稳定，确保了夹持力的均匀分布。

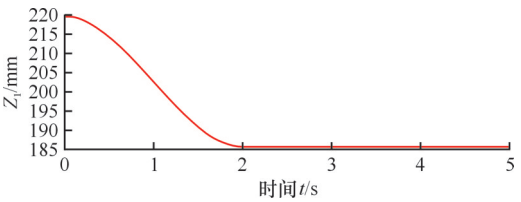


图9　第一驱动气缸推杆在Z向的运动仿真曲线

Fig.9　Simulation curve of the first actuating cylinder rod movement along the Z-axis

第二驱动气缸为压持机构提供动力，压板往下压的过程中，气缸推杆向Z轴正向运动。0～2 s时，压持机构压持锻件，第二驱动气缸推杆推进，由图10可知，气缸推进的位移大小为32 mm。0～5 s中，第二驱动气缸推杆运动平稳，满足设计要求。

第一驱动气缸推杆沿Z轴负方向运动，经传动机构驱动两侧夹持板沿X轴同步向内移动。由

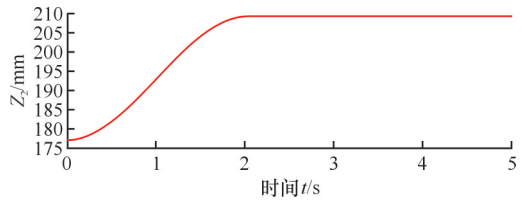


图10 第二驱动气缸推杆在Z向的运动仿真曲线

Fig.10 Simulation curve of the second actuating cylinder rod movement along the Z-axis

图11可知，0～2 s内，两侧夹持板完成闭合运动，实现对锻件的夹持；2～3 s内，夹持板与锻件保持相对固定，并随末端执行器整体提升；3～5 s内，末端执行器完成180°翻转，夹持板运动轨迹随执行器姿态变化而改变。整个运动过程中，夹持板运动连续且无突变，表明机构运动协调性良好，能满足锻件夹持与翻转的工艺要求。

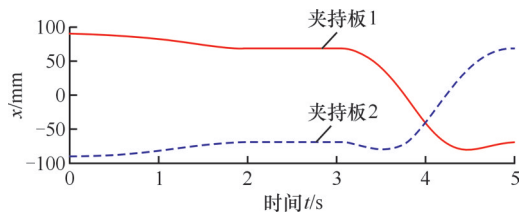


图11 夹持板沿X向的运动仿真曲线

Fig.11 Simulation curves of the two clamping plates moving along the X-axis

第二驱动气缸推杆沿Z轴运动，通过铰接机构驱动压板绕铰接轴转动。由图12可知，0～2 s内，压板完成压紧运动；2～3 s内，压板随末端执行器整体提升；3～5 s内，压板随末端执行器完成180°翻转。监测点Y坐标变化连续平滑，未出现突变或振荡现象，说明顶部压持机构运动稳定，能满足锻件夹持与翻转的工艺要求。

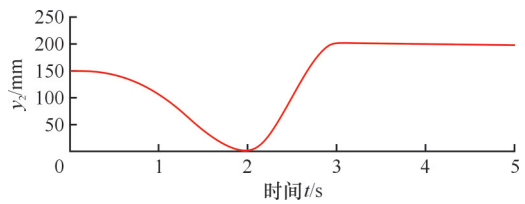


图12 压板在Y向的运动仿真曲线

Fig.12 Simulation curve of the pressing plate moving along the Y-axis

由图13可知，0～2 s内，毛坯锻件处于夹持阶段，其坐标基本保持不变；2～3 s内，毛坯锻件随末端执行器整体提升，Z向位移增加约200 mm；3～5 s内，毛坯锻件完成180°翻转，X向最大位移约为44 mm，Z向坐标变化约为78 mm。由于锻件在部分阶段的某一坐标轴方向上的位移变化较小，因此不对该方向的位移变化规律进行单独讨论。综合各坐标轴方向的位移变化结果可知，毛坯锻件能按照预定路径完成夹持、提升及翻转动作，运动过程中未出现明显偏移，表明其运动轨迹满足预设工艺要求。

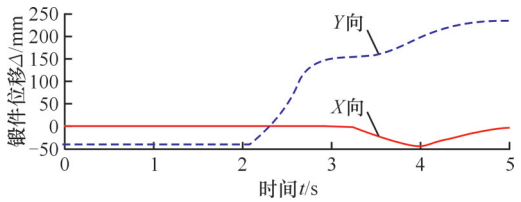


图13 毛坯锻件在X向、Y向的运动仿真曲线

Fig.13 Simulation curves of the forging blank moving along the X and Y axes

运动学仿真结果表明，末端执行器各运动部件均能按预设轨迹完成夹持、提升及翻转动作。

根据气缸工作压力0.6 MPa及结构参数计算得到第一驱动气缸回程的理论输出力为633 N，第二驱动气缸进程的理论输出力为1178 N。动力学仿真中，将位移驱动改为力驱动，并分别向第一驱动气缸、第二驱动气缸施加633 N和1178 N的轴向作用力。其中，第一驱动气缸在0～5 s内持续输出夹持力，第二驱动气缸在2～5 s内输出压持力，以实现承托夹持机构先夹紧、压持机构后压紧的工作过程。仿真载荷施加方式如图14和图15所示。

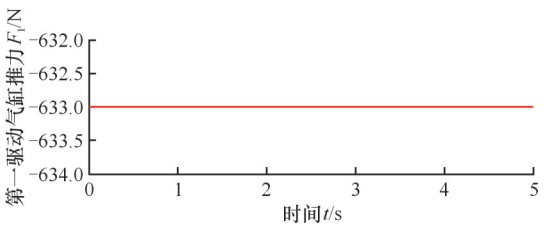


图14 第一驱动气缸推力的力学曲线

Fig.14 Mechanical curve of the thrust force of the first actuating cylinder

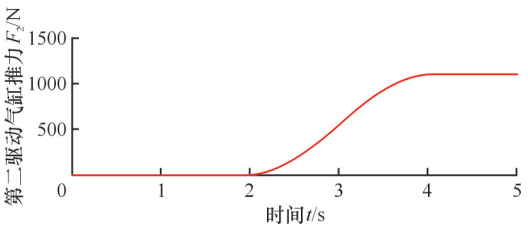


图15 第二驱动气缸推力的力学曲线

Fig.15 Mechanical curve of the thrust force of the second actuating cylinder

为验证气缸选型的合理性，对比力驱动模型与位移驱动模型的仿真结果。由图16可知，第一驱动气缸推杆位移的变化量为33.12 mm，与位移驱动模型得到的32.10 mm基本一致；第二驱动气缸推杆位移的变化量为32.29 mm，与位移驱动模型得到的34.00 mm接近。两种模型的气缸推杆

运动规律及位移变化趋势基本一致，表明所选气缸能满足末端执行器的夹持与压持的位移要求，验证了气缸选型的合理性。

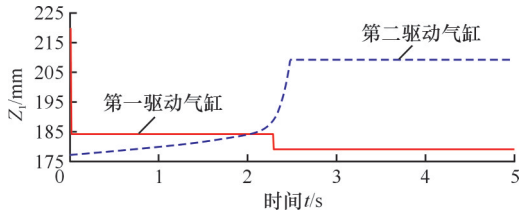


图 16　调整后的驱动气缸在 Z 轴上的运动仿真曲线

Fig.16　Adjusted Simulation curves of actuating cylinder moving along the Z-axis

综上所述，力驱动模型与位移驱动模型得到的推杆位移变化量基本一致，且两者差值远小于预留行程余量。说明所需气缸工作行程满足末端执行器运动要求，同时所选气缸的输出力能满足夹持与压持需求，因此气缸选型合理。

2.2　静力学仿真分析

使用 ANSYS 软件对末端执行器进行有限元分析，确保执行器在静态负载下的应变、应力和变形符合设计要求，能在恶劣条件下正常工作。分别建立底部支撑结构、夹持板、顶部压持机构等关键部件的有限元分析模型，并依据实物加工工艺及装配关系定义接触关系，确保仿真条件贴合真实工况。

底部支撑结构承担锻件并为夹持机构提供支撑，其承载性能直接影响末端执行器的安全性和稳定性，因此，对底部支撑结构进行静力学分析。仿真中，将底部夹持机构安装面设置为固定约束，并将 25 kg 锻件等效为 250 N 载荷施加于支撑结构。材料采用 06Cr25Ni20 不锈钢。仿真结果得到底部支撑结构的总变形、等效应变及等效应力分布。由图 17 可知，底部支撑结构在 250 N 载荷下的最大形变为 62.61 μm；由图 18 可知，最大等效应变为 4.37×10^{-5}；由图 19 可知，最大等效应力为 8.239 MPa。该最大等效应力仅占 06Cr25Ni20 不锈钢屈服强度的 2.99%，表明底部支撑结构具有充足的强度储备，各项指标均满足设计要求，能保证末端执行器在工作过程中的安全稳定运行。

夹持板设置单侧 125N 的载荷，材料为 Inconel 625 镍基高温合金。仿真得到夹持板的总形变、等效应变及等效应力分布云图。由图 20 可知，最大变形出现在夹持板的末端，形变量为 43.5 μm；由图 21 可知，最大等效弹性应变为 2.43×10^{-5}；由图 22 可知，最大等效应力为 4.86 MPa。夹持板结构整体应力水平较低，应力集中区域分布合理，远未达到 Inconel 625 镍基高温合金的屈服极限 414 MPa；同时，夹持板的最大变形和最大等效应变均较小，表明该结构具有较高的刚度。结合应力分析结果可知，夹持板在设计载荷作用下具有足够的强度储备，能满足末端执行器夹持工况下的使用要求。

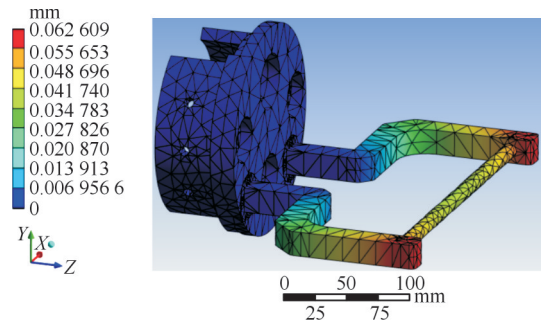


图 17　底部支撑结构的总形变云图

Fig.17　Total deformation cloud diagram of the bottom supporting structure

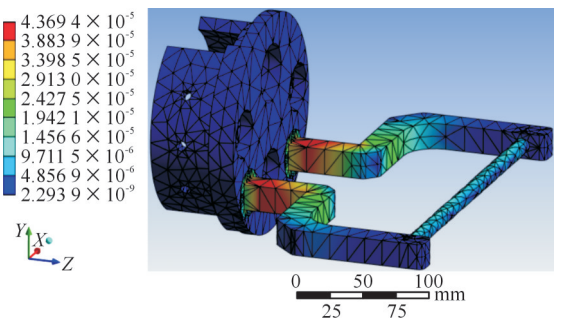


图 18　底部支撑结构的等效应变云图

Fig.18　Equivalent strain cloud diagram of the bottom supporting structure

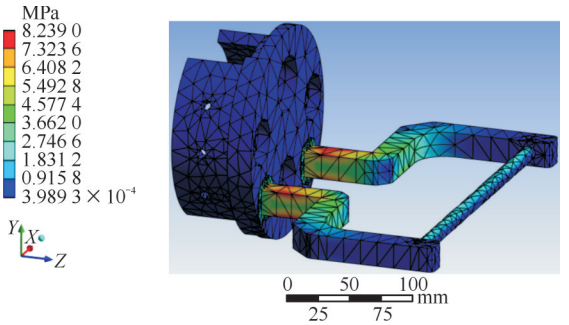


图 19　底部支撑结构的最大等效应力

Fig.19　Maximum equivalent stress of the bottom supporting structure

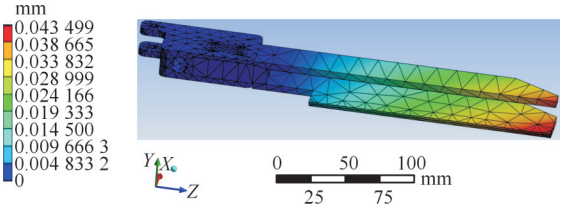


图 20　夹持板的总形变云图

Fig.20　Total deformation cloud diagram of the clamping plate

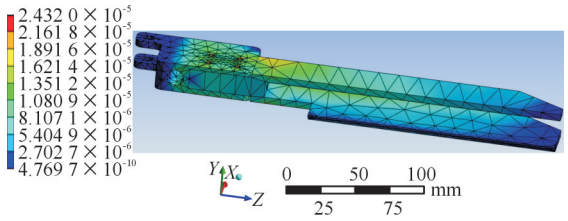


图21 夹持板的等效应变图

Fig.21 Equivalent strain diagram of the clamping plate

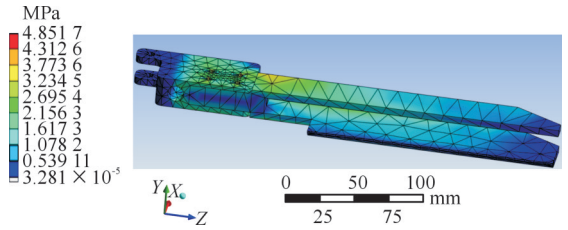


图22 夹持板的等效应力图

Fig.22 Equivalent stress diagram of the clamping plate

对顶部压持机构施加250 N的载荷，压板材料设为Inconel 625镍基高温合金，其余材料为06Cr25Ni20不锈钢。仿真得到顶部压持结构的总形变云图、等效应变图和等效应力云图。由图23可知，顶部压持机构在250 N载荷作用下的最大形变为71.8 μm；由图24可知，最大等效应变约为2.35×10^{-4}，主要分布在连接板与压板连接的内侧。由于最大形变量仅为71.8 μm，远小于锻件夹持过程中的允许误差，因此结构变形对夹持稳定性的影响可以忽略，表明顶部压持机构具有较好的结构刚度，能满足实际工况下的使用要求。由图25可知，最大等效应力为46.8 MPa，远小于所选材料Inconel 625镍基高温合金的屈服强度414 MPa，因此，顶部压持机构的强度安全性和受力合理性均满足工程使用需求。

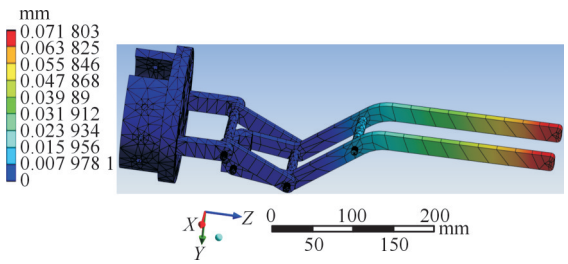


图23 顶部压持机构的总形变云图

Fig.23 Total deformation cloud diagram of the top pressing mechanism

3 末端执行器气动控制系统的开发

3.1 气动控制系统设计

图26所示的末端执行器气动控制系统具备稳定控制与状态监测功能[12]。将S7-1200 PLC作为控制核心，依据预设逻辑指令控制各执行元件；夹持动作通过PLC控制的4V230C-08三位五通电磁阀切换气流方向。气动部分包括气缸、传感器、气源、气管、接头等组件。

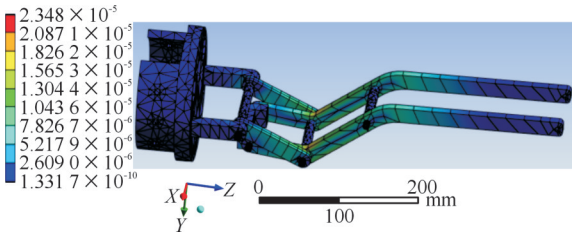


图24 顶部压持机构的等效应变图

Fig.24 Equivalent strain diagram of the top pressing mechanism

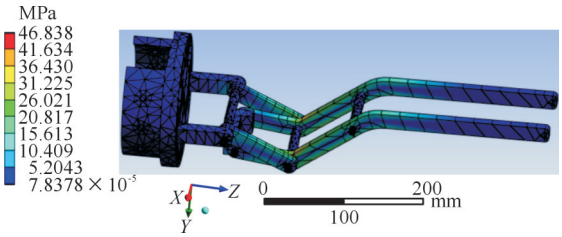


图25 顶部压持机构的等效应力图

Fig.25 Equivalent stress diagram of the top pressing mechanism

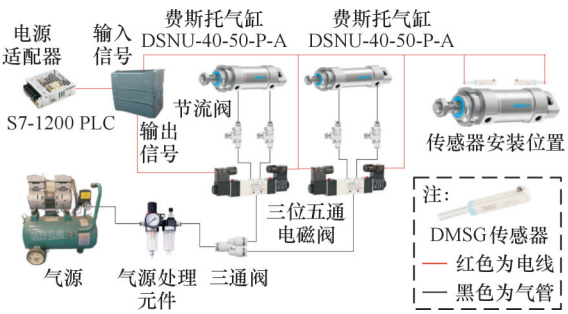


图26 气动控制系统硬件连接图

Fig.26 Hardware connection diagram of the pneumatic control system

3.2 气动控制系统仿真分析

为验证所设计气动控制系统的可行性，采用FluidSim建立双气缸气动控制模型，并对系统动态响应特性进行仿真分析[13]。该控制系统用于协调底部夹持机构与顶部压持机构的动作顺序，实现锻件的稳定夹持。

建立双气缸气动控制回路后，设置系统参数。仿真气源的压力设为0.8 MPa，气源处理单元调压后的工作压力0.6 MPa满足气缸要求。单向节流阀开度设置为55%。为实现两气缸的顺序动作控制，建立电气控制回路模型。通过电磁换向阀、行程开关及控制元件的协同作用，实现承托夹持机构先夹紧、压持机构后压紧的控制逻辑。

3.3 气动与电气回路联动仿真结果

为验证气动-电气联动控制方案的可行性，对末端执行器控制系统进行联合仿真分析。为便于

分析SB1闭合后的控制逻辑，仅保留与第一驱动气缸动作相关的气动与电气控制回路，其联动仿真效果如图27所示，启动按钮SB1闭合后，继电器K1得电，其常开触点闭合，使电磁换向阀线圈1YA得电。电磁换向阀换向后，压缩空气进入第一驱动气缸工作腔，驱动气缸推杆运动，从而带动底部夹持机构完成锻件夹紧动作。

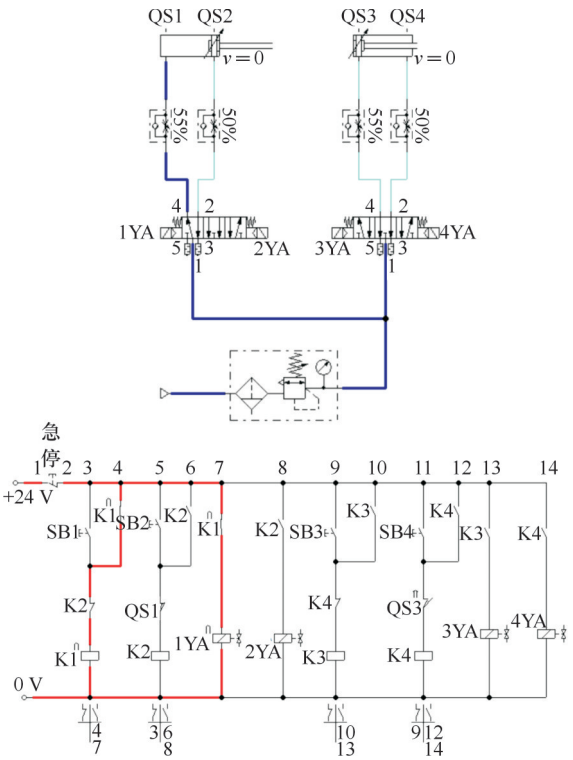


图27　SB1闭合时第一气缸的联动仿真结果

Fig.27　Co-simulation result of cylinder 1 when SB1 is activated

底部夹持机构完成夹紧动作后，按下按钮SB2，如图28所示，继电器K2得电并接通电磁换向阀线圈2YA，电磁换向阀换向后压缩空气进入第二驱动气缸工作腔，驱动顶部压持机构下压，对锻件施加压紧力。顶部压持机构与底部夹持机构协同作用，提高了锻件夹持过程中的稳定性。

两驱动气缸的控制逻辑一致，本文选取一个进行分析。联动仿真结果表明，气动-电气控制系统能实现各执行元件的协调动作，保证底部夹持机构和顶部压持机构按照预设顺序完成夹紧与压紧动作，验证了控制方案的可行性。

4　实验验证

4.1　气动控制实验平台

末端执行器通过螺栓固定安装在SR165型机械臂上，机械臂的控制柜和示教器负责机械臂的控制与调试，PLC作为核心控制单元处理信号逻辑，气动元件提供执行器的动力来源。

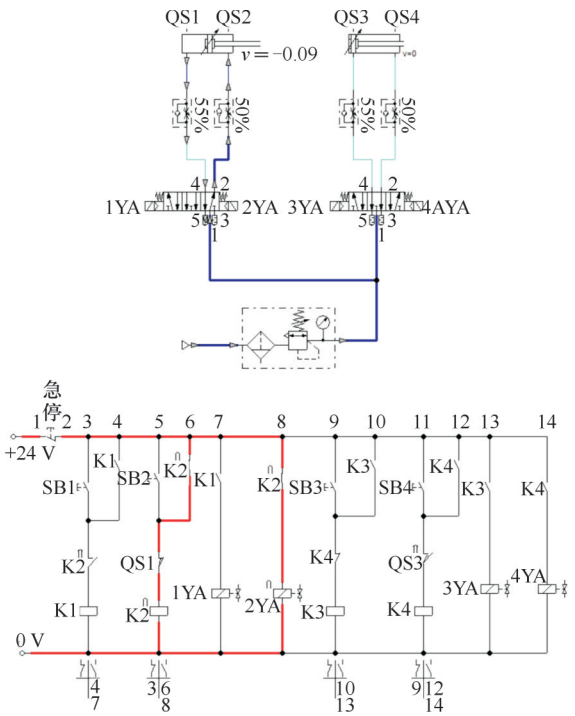


图28　SB2闭合第一气缸的联动仿真结果

Fig.28　Co-simulation result of cylinder 1 when SB2 is activated

4.2　调速阀开度的影响实验

通过调整调速阀的开度，测量末端执行器地张开和闭合时间。开度10%、30%、50%、70%、100%下，测量末端执行器的张开时间和闭合时间。记录气缸运动行程，并计算执行器动作完成的平均时间。分析实验数据，寻找最优调速阀开度。由表2可知，调速阀开度60%的响应速度比较合适，且张开和闭合时间相近。

表2　不同开度调速阀结果

Tab.2　Results for throttle valves at different opening degrees

	调速阀开度/%				
	20	40	60	80	100
张开时间/s	0.35	0.28	0.22	0.18	0.15
闭合时间/s	0.40	0.32	0.26	0.21	0.18

4.3　不同位置夹持锻件的稳定性实验

末端执行器在不同位置的夹持能力和稳定性受抓取角度、位置及重力影响。记录并分析位置对夹持效果的影响，可为优化末端执行器的控制策略提供参考。

末端执行器抓取锻件的角度从0°逐渐向下倾斜到64°(可满足实际工况的需求)，如图29所示。末端执行器抓取锻件的转角从0°逐渐变为180°，以模拟出现锻件翻转的情况。如图30所示，末端执行器可以稳定夹持锻件旋转180°。

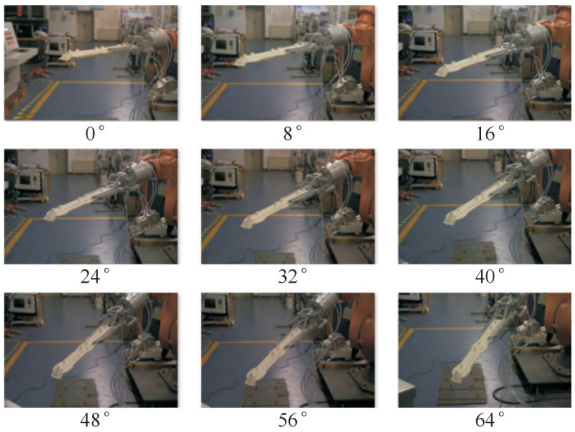


图29 不同倾斜角度抓取锻件

Fig.29 Grasping forgings at different inclination angles

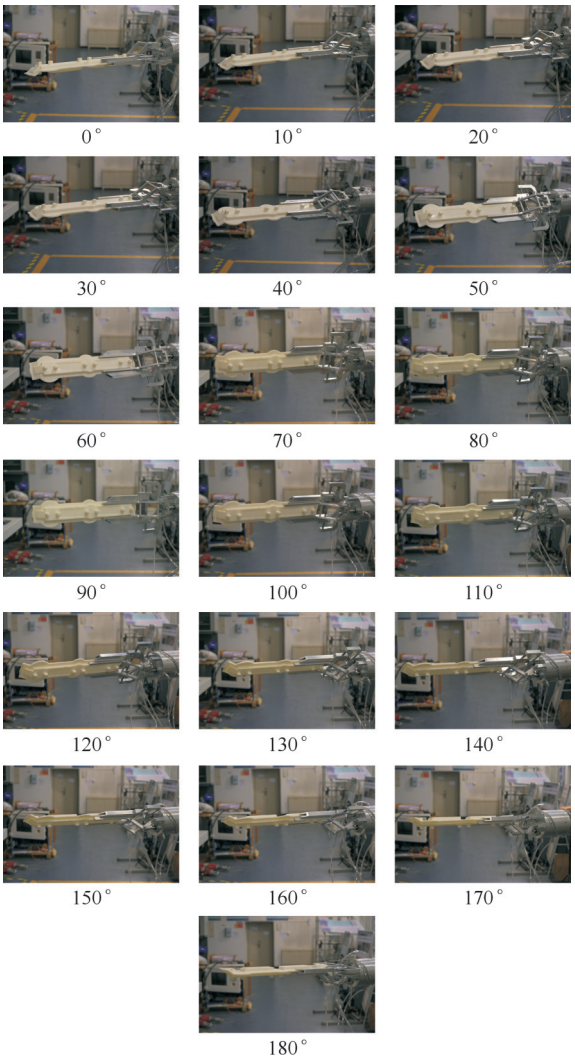


图30 不同旋转角度抓取锻件

Fig.30 Grasping forgings at different rotation angles

5 结论

1)针对高温锻件自动夹持与复位需求，设计了钳夹式双气缸驱动末端执行器。该执行器由夹持机构、驱动机构、支撑机构和法兰连接机构组成，通过底部夹持与顶部压持的协同作用实现锻件的稳定夹持与可靠定位。

2)ADAMS仿真结果表明，两气缸推杆的位移变化量分别约为32 mm和34 mm；在0.6 MPa工作压力下，两气缸的理论输出力分别为633 N和1178 N，满足末端执行器夹持与压持动作要求。有限元分析结果表明，底部支撑结构在设计载荷下的最大形变为63 μm，最大等效应变为4.37×10^{-5}，最大等效应力为8.24 MPa；夹持板在设计载荷下的最大形变为43.5 μm，最大等效应变为2.43×10^{-5}，最大等效应力为4.85 MPa；压持机构在载荷250 N的最大形变为71.8 μm，最大等效应变为2.35×10^{-4}，最大等效应力为46.8 MPa，验证了关键受力结构满足刚度和屈服强度的要求。

3)基于FluidSim建立了气动-电气联合控制模型，并开发了基于PLC的末端执行器控制系统。实验结果表明，该控制系统运行稳定，能实现末端执行器各执行机构的协调动作，满足移位锻件自动夹持与复位的控制要求。

参考文献：

[1] 叶洋，汪爱明. 煤矿刮板锻件锤上模锻生产线机器人化技术改造及其关键问题[J]. 煤矿机电，2023，44(1)：42-47.
YE Yang，WANG Aiming. Robotization Technology Transformation and Key Issues of the Hammer Forging Production Line for Scraper Forgings in Coal Mines[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology，2023，44(1)：42-47.

[2] 夏云，汪爱明，叶洋，等. 锤上模锻智能化发展现状及其关键技术[J]. 锻压技术，2024，49(4)：1-14.
XIA Yun，WANG Aiming，YE Yang，et al. Development Status and Its Key Technologies on Intelligentization in Hammer Die Forging[J]. Forging & Stamping Technology，2024，49(4)：1-14.

[3] 桓源，任工昌，王乐，等. 吸盘式皮革抓取搬运机器人的设计与仿真分析[J]. 中国皮革，2023，52(5)：34-39.
HUAN Yuan，REN Gongchang，WANG Le，et al. Design and Simulation Analysis of Suction Cup Leather Grasping and Handling Robot[J]. China Leather，2023，52(5)：34-39.

[4] 刘腾飞，王战中，孙国翔，等. 汽车防撞梁电磁手爪研发[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2020，33(1)：87-92.
LIU Tengfei，WANG Zhanzhong，SUN Guoxiang，et al. Research and Design of Electromagnetic Claw of Automobile Anti-collision Beam[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition)，2020，33(1)：87-92.

[5] YE Muhan. A Flexible Mechanical Claw Design Based on Fin Ray Effect[J]. International Journal of Frontiers in Engineering Technology，2023，5(10)：97-103，

[6] CHEN Fei，CARBONARI L，CANALI C，et al. Design of a Novel Dexterous Robotic Gripper for In-hand Twisting and Positioning within Assembly Automation[J]. Assembly Automation，2015，35(3)：259-268.

[7] 张健，霍凤伟，付佳. 机器人制孔末端执行器的设计及静动力学分析[J]. 有色设备，2024，38(3)：64-69.
ZHANG Jian，HUO Fengwei，FU Jia. Design and Static & Dynamic Analysis of Robotic Drilling End Effector[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment，2024，38(3)：64-69.
[8] 夏云，敖燉柯，李祥龙，等. 锤上模锻工业机械手末端执行器[J]. 锻压技术，2024，49(12)：137-147.
XIA Yun，AO Xinke，LI Xianglong，et al. Industrial Manipulator End Effector for Hammer Die Forging[J]. Forging & Stamping Technology，2024，49(12)：137-147.
[9] VAHEDI A，JAMALI A. Constraint Optimization of Nonlinear McPherson Suspension System Using Genetic Algorithm and ADAMS Software[J]. Journal of Vibration and Control，2022，28(21/22)：3140-3151.
[10] 谭励，余煌，杜小强，等. 基于稳定夹持的类球形果实采摘末端执行器优化设计与试验[J]. 机械工程学报，2026，62(3)：353-365.
TAN Li，YU Huang，DU Xiaoqiang，et al. Optimal Design and Experiment of Picking End-effector for Spheroid Fruits Based on Stable Grasping[J]. Journal of Mechanical Engineering，2026，62(3)：353-365.
[11] 周敏，黄捷，杨祥. 约束条件下冗余驱动并联机构结构参数的优化[J]. 机械设计与制造，2025(1)：313-319.
ZHOU Min，HUANG Jie，YANG Xiang. Optimization of Structural Parameters of Redundant Drive Parallel Mechanisms under Constraint Conditions[J]. Machinery Design & Manufacture，2025(1)：313-319.
[12] 潘志方，林飞. 砖坯码垛机械手爪气动系统设计[J]. 山东工业技术，2015(19)：191-192.
PAN Zhifang，LIN Fei. Design of Pneumatic System for Brick Palletizing Manipulator Gripper[J]. Journal of Shandong Industrial Technology，2015(19)：191-192.
[13] 袁小会，蔡逸飞. 基于FluidSIM的装配机器人气动回路设计及分析[J]. 机械工程师，2025(1)：78-81.
YUAN Xiaohui，CAI Yifei. Design and Analysis of Pneumatic Circuit for Assembly Robot Based on FluidSIM[J]. Mechanical Engineer，2025(1)：78-81.

（编辑　张　洋）

作者简介：冯学文，女，1995年生，博士研究生。研究方向为锤上模锻相对位姿识别、机械手控制、智能制造。发表论文12篇。E-mail：fxuewen1010@126.com。汪爱明*（通信作者），男，1982年生，教授、博士研究生导师。研究方向为煤矿机械智能化及智能制造、设备故障诊断及预知性维护、AI视觉识别、机械手控制、转子动力学。发表论文30篇。E-mail：wam_master@163.com。

本文引用格式：
冯学文，敖燉柯，赵启奔，等. 锤上模锻钳夹式双气缸末端执行器的设计[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1614-1623.
FENG Xuewen，AO Xinke，ZHAO Qiben，et al. Design of a Pincer-type Dual-cylinder End Effector for Hammer Forging[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(7)：1614-1623.

（上接第1613页）

[22] GAO Zhenrong，NIE Weiming，WANG Haixin，et al. Enhancing Mechanical Performance and High-temperature Lubrication Enabled by MoS_2/WB_2 Nanolayered Films[J]. Composites Part B：Engineering，2024，275：111350.
[23] HEREDIA-CANCINO J A，RAMEZANI M，ÁLVAREZ-RAMOS M E. Effect of Degradation on Tribological Performance of Engine Lubricants at Elevated Temperatures[J]. Tribology International，2018，124：230-237.
[24] JOHANSSON S，NILSSON P H，OHLSSON R，et al. Experimental Friction Evaluation of Cylinder Liner/Piston Ring Contact[J]. Wear，2011，271(3/4)：625-633.
[25] LIU Cong，YIN Yanguo，TONG Baohong，et al. Tribological Properties of MoS_2 Powder-lubricated Interface[J]. Industrial Lubrication and Tribology，2021，73(6)：839-845.
[26] YI Meirong，QIU Jiaxun，XU Wenhu. Tribological Performance of Ultrathin MoS_2 Nanosheets in Formulated Engine Oil and Possible Friction Mechanism at Elevated Temperatures[J]. Tribology International，2022，167：107426.
[27] HUA Xijun，TIAN Zhixiang，XIE Xuan，et al. Tribological Behavior and Abrasion Resistance Mechanism of Laser Micro-bulge Texturing Surface under Full Oil Lubrication[J]. Tribology Transactions，2020，63(4)：726-735.
[28] XIAO Jinkun，WU Yuqing，ZHANG Wei，et al. Friction of Metal-matrix Self-lubricating Composites：Relationships among Lubricant Content，Lubricating Film Coverage，and Friction Coefficient[J]. Friction，2020，8(3)：517-530.
[29] ZHOU Long，SUN Guang hua，GUO Ying ying，et al. Effects of Ring Pack Friction Heat on Temperature Fields of Piston Set-liner[J]. International Journal of Automotive Technology，2020，21(6)：1569-1578.
[30] YAGI K，NISHIDA K，SUGIMURA J. Influence of the Heat Transfer Field on Anomalous Lubricant Film Formation in Elastohydrodynamic Lubrication Conditions[J]. Tribology Letters，2021，69(3)：114.
[31] HE Dongqing，HE Chao，LI Wensheng，et al. Tribological Behaviors of *In-situ* Textured DLC Films under Dry and Lubricated Conditions[J]. Applied Surface Science，2020，525：146581.
[32] DREVA K，MORINA A，YANG Liuquan，et al. The Effect of Temperature on Water Desorption and Oxide Formation in MoS_2 Coatings and Its Impact on Tribological Properties[J]. Surface and Coatings Technology，2022，433：128077.

（编辑　张　洋）

作者简介：樊玉杰，女，1979年生，教授、硕士研究生导师。研究方向为金属材料的表面改性和摩擦性能。获发明专利授权12件。发表论文20余篇。E-mail：fanyujie@just.edu.cn。刘芳华*（通信作者），女，1972年生，教授、硕士研究生导师。研究方向为多体动力学控制、机器人技术、柔性传感器。获国家发明专利10项、软件著作权3项。发表论文10余篇。E-mail：cylfhua@163.com。

本文引用格式：
樊玉杰，郝梦杰，杜宇辰，等. 基于摩擦状态的缸套表面区域划分[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1603-1613.
FAN Yujie，HAO Mengjie，DU Yuchen，et al. Surface Region Division of Cylinder Liner Based on Friction State[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(7)：1603-1613.