

分体式落料剪切系统的研究设计

李 刚¹, 李晓博¹, 朱珊珊¹, 司建玺¹, 南文虎², 王有良²

(1. 新乡天丰机械制造有限公司, 河南 新乡 453000; 2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为解决同一系列不同宽度板材切断时需用多副切断刀具的问题, 研究了一种可适应多种宽度板材切断的分体式剪切装置, 解决传统剪切模式带来的刀具多、刀具更换频繁的问题。采用理论设计计算与试验相结合的方法, 对分体式剪切系统进行了研究, 建立了分体式剪切装置的三维模型, 分析计算了重要结构件的强度和刚度。根据剪刀的功能及动作要求, 设计了相应的高低压液压系统及电气保护装置。在制造的试验机上, 测试了系统的各项功能动作指标及生产效率, 检测了剪刀的剪切质量。测试结果表明: 分体式剪切系统实现了一副剪刀切断多种宽度板材的功能, 其生产效率和剪切质量达到了设计要求。

关键词: 分体式剪切装置; 高低压液压系统; 电气保护装置; 剪切质量; 刀具

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.022

中图分类号: TH69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 09-0177-07

Research and design on split blanking and shearing system

Li Gang¹, Li Xiaobo¹, Zhu Shanshan¹, Si Jianxi¹, Nan Wenhui², Wang Youliang²

(1. Xinxian Tianfeng Machinery Manufacturing Co., Ltd., Xinxian 453000, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to solve the problem of using multiple sets of cutting tools when cutting the same series of plates with different widths, a split shearing device that could adapt to cutting plates with various widths was studied to solve the problems of multiple cutting tools and frequent tool replacement caused by traditional shearing modes, and the split shearing system was studied by the method of combining theoretical design calculation with test. Then, a three-dimensional model of split shearing device was established, and the strength and stiffness of critical structural components were analyzed and calculated. Furthermore, according to the function and action requirements of cutting tool, the corresponding high and low pressure hydraulic system and electrical protection device were designed. On the manufactured test machine, the various functional action indicators and production efficiency of the system were tested, and the shearing quality of cutting tool was tested. The test results show that the split shearing system realizes the function of using a pair of cutting tool to cut plates with various widths, and its production efficiency and shearing quality meet the design requirements.

Key words: split shearing device; high and low pressure hydraulic system; electrical protective devices; shearing quality; cutting tool

随着仓储货架的快速发展, 立柱横梁产品的市场需求越来越大, 且向着多元化方向发展。对于 Σ 和 C 型板材, 该板材的特点为横截面两侧轮廓相同, 中间水平部分长度不同, 根据中间部分长度的变化, 可扩展为多种规格板材。传统剪刀设计为: 每种规格板型设计一种剪刀, 换板型时, 需更换剪刀。这就导致剪刀成本增高, 整线板型切换时间加长。为了适应该类产品切断, 需设计一种可根据板材宽度变化调节相对位置的分体式落料剪刀, 用于

切除板材横截面两侧的轮廓。当生产不同宽度的同一规格型材时, 两套剪芯仅需调整相对应的位置即可完成对同一规格、不同宽度板材的剪切。板材中间部分提前切出长方孔, 用于适应分体式剪刀, 同时便于剪刀向板材内认口, 实现板材精准剪切^[1-2]。

1 剪切系统的工作原理及结构设计

1.1 工作原理

本文研究的分体式落料剪切系统为停机剪切。当板材需切断的位置随主机移动到落料剪刀上刀正下方时, 板材随主机停止在该位置。该状态下, 剪切上刀在油缸的推动下以低压低速模式缓慢下落, 剪切上刀刀柄的认口部分缓慢向下插入板材预切口,

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-07-12

基金项目: 甘肃省科技基金资助项目 (21JR7RA228)

作者简介: 李 刚 (1986-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: lgmuy@ sina.com

若剪切上刀与板材的位置存在微小偏差,剪切上刀刀柄的认口部分与板材之间产生一个沿板材移动方向的侧向作用力,在该侧向力的作用下,可推动两台压力机组在自动对刀滑板上移动,以适应剪切上刀与板材预切口的相对位置。当剪切上刀刀柄认口部分完全落入板材预切口内时,压力机上侧的三位检测开关接收到反馈信号,剪切上刀完成认口动作,剪切油缸切换为高压快速工作模式,带动落料剪刀上刀完成对板材的快速剪切;当剪切上刀刀柄认口部分未能完全落入板材预切口内时,压力机上侧的三位检测开关的中位开关无法接收到反馈信号,系统发出故障报警信号。导向认口结构见图 1。

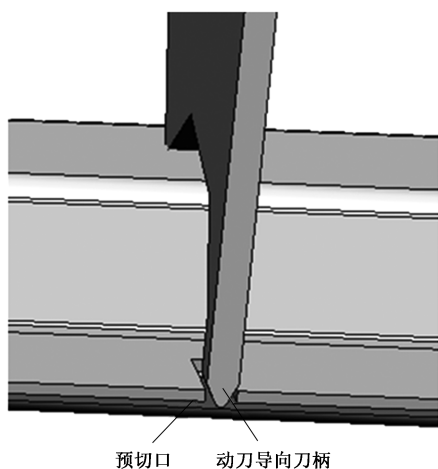


图 1 动刀导向认口结构

Fig. 1 Recognition structure of moving knife guide

1.2 整体结构设计

由两台压力机、分体式剪刀、剪刀位置调节机构、自动对刀机构、液压系统、剪切保护系统等组成整体结构,见图 2。

分体式剪刀由上刀固定板、上刀、导柱导套 2、下刀及下刀座、下模板组成。上刀通过压条固定在上刀固定板上,下刀及下刀座固定在下模板上。导柱导套 2 安装在上刀固定板与下模板之间,用于保证上刀与下刀之间的运动导向。

压力机由机架、三位检测开关、开关保护装置、剪切油缸、导柱导套 1、氮气弹簧、上压板组成。压力机通过导向压条固定在自动对刀机构滑板上,通过剪刀位置调节机构调节其在滑板上的相对位置。剪切油缸固定在机架上,通过开关保护装置上的压块与上压板连接。上压板与机架之间由 4 根导柱导套 1 定位,保证上压板上、下移动的平稳度。上压板与机架上板之间设置有氮气弹簧,氮气弹簧向下的推力小于剪切上刀刀柄认口部分对板材的破坏力。

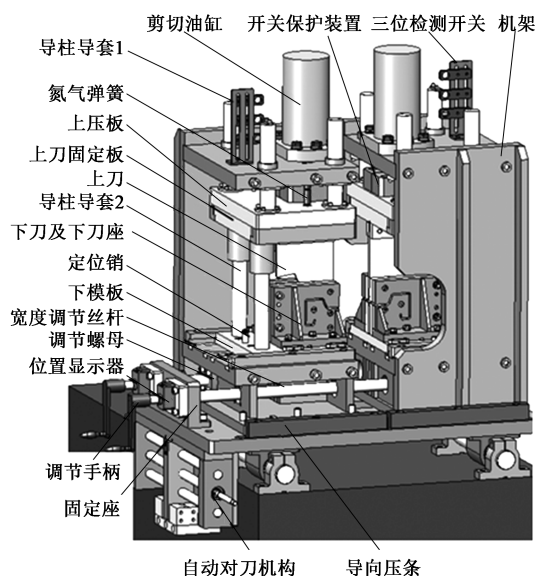


图 2 整体结构图

Fig. 2 Overall structure diagram

当剪切油缸完全退回后,氮气弹簧为压缩状态,给上压板一个向下的作用力,在低压低速模式下,可让开关保护装置内的压块与剪切油缸端头连接法兰的上表面始终贴合,见图 3。上压板下侧设置有导向定位条,机架下侧安装有导向定位条及快速定位销,便于分体式剪刀快速装入压力机内。

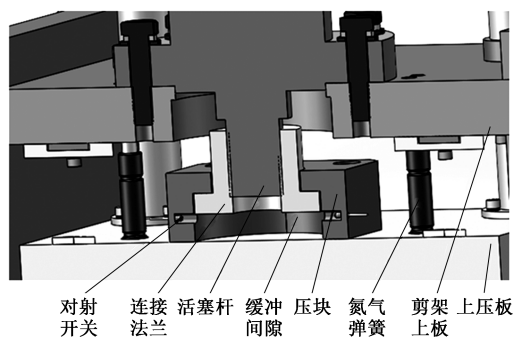


图 3 开关保护装置结构图

Fig. 3 Structure diagram of switch protection device

开关保护装置由对射开关、连接法兰、活塞杆、缓冲间隙、压块、氮气弹簧组成。该装置通过安装在压块上的对射开关监测由连接法兰、压块、上压板组成的缓冲间隙,保护剪切上刀的认口动作。当油缸活塞杆缩回时,安装在上压板与剪架上板之间的受压缩的氮气弹簧,始终给两者一个反向的作用力,让两者保持向相反方向运动的趋势,通过固定在上压板上的压块与连接在活塞杆端头的连接法兰接触,传递油缸的拉力,使上压板与剪架上板之间保持一定间距,从而使上压板与连接法兰之间保持

一定间距,在压块内形成一个缓冲间隙。

当油缸带动剪切上刀以低压低速模式下落时,在氮气弹簧的作用下,连接法兰与上压板之间始终保持着缓冲间隙,对射开关处于信号接通状态;剪切上刀完成认口动作后,三位检测开关的中位开关信号接通,屏蔽对射开关信号,液压站转换为高压高速模式,连接法兰快速下落,与上压板接触,推动剪切上刀快速下落,完成剪切。若剪切上刀未能插入板材的预切口内,上压板下行过程中遇到板材对剪切上刀的阻力,上压板停止下落,三位检测开关的中位开关无信号反馈,而油缸端头连接法兰在油缸的作用下继续下落,随着连接法兰下落,逐渐填充缓冲间隙,导致对射开关信号被阻挡,对射处于信号断开状态,控制程序发出报警信号,液压停止向剪切油缸供油,系统处于保护状态。

剪刀位置调节机构由两根宽度调节丝杆、两个调节螺母、两个位置显示器、两个调节手柄、固定座组成。该机构用于调节两台压力机在型材宽度方向的相对位置。固定座固定在自动对刀机构滑板上,宽度调节丝杆一端固定在固定座上,另外一端与调节螺母连接,两个调节螺母分别固定在两个压力机剪架上。通过每个调节手柄可分别单独控制宽度调节丝杆旋转,从而带动两台压力机的移动,实现剪刀相对宽度的调节,见图4。

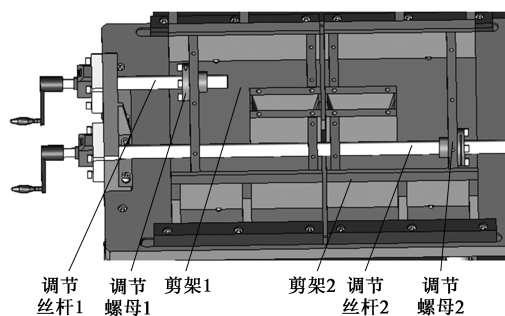


图4 位置调节机构结构图

Fig.4 Structural diagram of position adjustment mechanism

自动对刀机构由支撑座、圆柱滑轨、滑板、调节丝杆、导向杆、调节螺栓、垫片、弹簧、调节板、固定座、调宽座组成。该机构用于剪切上刀下落时自动对刀。剪切完成后,刀具自动回到设定位置。支撑座与固定座均固定在工作台上,滑板通过圆柱滑轨与支撑座连接,调节板与滑板通过螺钉连接固定。导向杆两端固定在调宽座上,中间部分通过导套与调节板连接,调节丝杆两端固定在调宽座上,螺纹部分与调节板连接,通过丝杆可微调调节板上

的标尺位置。固定座上安装有调节螺栓、垫片、弹簧,调节板两侧与安装在固定座内的弹簧接触。通过调节螺栓可调节每个弹簧的预压力,让调节板两侧的弹簧压力处于平衡状态,使调节板处于固定座中间位置。该弹簧调节装置,亦可调节自动对刀机构的刚度,从而调节其灵敏度,见图5。

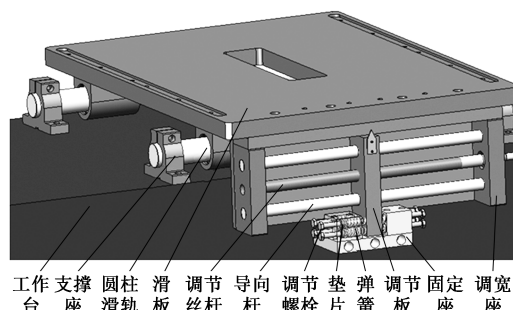


图5 自动对刀结构图

Fig.5 Structure diagram of automatic tool setting

2 液压系统设计

2.1 系统动作功能要求

液压系统需具备两种工作模式:低压低速模式和高压高速模式,两种模式分别用于剪切上刀认口阶段和认口完成后快速剪切阶段。液压系统每次开机后,先启动低压慢速回路,油缸低压低速缓慢下落,带动落料剪动刀缓慢下落,动刀刀柄认口部分缓慢落入板材预切口内,然后油缸快速下落并快速返程,完成一个剪切行程。动刀慢速下降过程中,若动刀刀柄认口部分未能顺利落入预切口内,动刀下行阻力加大,油缸腔体内的压力升高,导致供油压力增大,油路上的保护回路打开,完成油路泄压,起到保护剪刀和板材的作用,使两者不被破坏。卸荷单向阀与工作油缸之间无其他元件,可更准确地检测油缸压力变化,减少管路及各阀处的压力损失,造成的压力误差。完成一个剪切动作后,无泄漏阀关闭快速回路,蓄能器开始补油^[3-4]。

2.2 液压系统工作原理

如图6所示(其中,A1、A2与B1、B2为油缸无杆腔与有杆腔的进出油口),系统工作时,电磁溢流阀8上的电磁铁通电,使电磁溢流阀由卸荷状态转换为工作状态,实现对系统额定压力的控制。管式单向阀7防止油液倒流,保护液压泵。二位电磁阀19用于控制蓄能器的放油。叠加液控单向阀13用于油缸的保压,避免油缸自动下落。流量控制

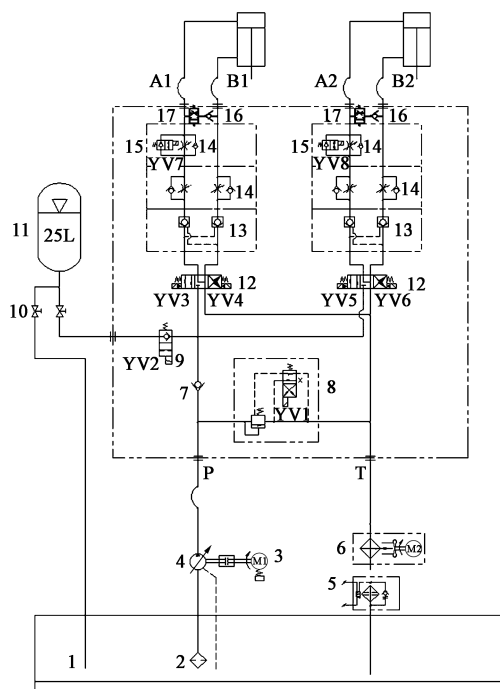


图 6 液压原理图

1. 油箱 2. 吸油滤油器 3. 电机 4. 柱塞泵 5. 回油过滤器
6. 风冷却器 7. 管式单向阀 8. 电磁溢流阀 9. 二位电磁阀 1
10. 截止阀 11. 蓄能器 12. 电磁换向阀 13. 叠加液控单向阀
14. 流量控制阀 15. 二位电磁阀 16. 可调节单向阀
17. 二位电磁阀 3

Fig. 6 Hydraulic principle diagram

阀 14 用于调节系统的供油速度^[5-8]。

(1) 当落料动刀认口时，液压系统开启低压低速回路模式，油缸活塞杆慢速伸出：油泵启动、二位电磁阀 1 9 关闭，蓄能器内的油不能进入油缸，流量控制阀 14 调整系统最大流速，与二位电磁阀 1 9 集成的流量控制阀 14 调节油缸慢进速度，二位电磁阀 3 17 与可调节单向阀 16 连通油缸的进出油回路，当油缸活塞杆伸出遇到一定阻力后，可调节单向阀 16 打开，（二位电磁阀 2 15 处于导通状态）供油管路的油直接通过回油管流回油箱，油缸活塞杆无法继续伸出，对系统起到保护作用。

(2) 当落料剪刀快速剪切时，液压系统开启高压高速回路模式，油缸活塞杆快速伸出：当落料剪刀上刀完成认口后，油缸开始快速下落模式。二位电磁阀 3 17 截止，油缸供回油回路不再导通，二位电磁阀 2 15 处于完全打开状态，二位电磁阀 1 9 一打开，由蓄能器 11 快速向油缸供油，实现油缸快速下降^[3]。

3 有限元分析

本文研究的压力机架为 C 型开口结构，该结构

承载性能略差，需合理设计其结构，增加压力机架的强度和刚度。

3.1 受力分析

压力机架上板承受油缸固定座给其向上的拉力，下板承受剪切定刀向下的压力，两力大小相等、方向相反。已知，板材为 Q345 钢，抗拉强度为 510 MPa，抗剪切强度为抗拉强度的 0.8 倍，板材厚度为 3 mm；采用落料剪刀切断时，板材与切刀刃口同时接触时的最大长度为 16.99 mm，见图 7。由以上条件可计算，其最大剪切力 $F = 510 \times 0.8 \times 3 \times 16.99 \times 1.3 \text{ N} = 27034 \text{ N}$ 。

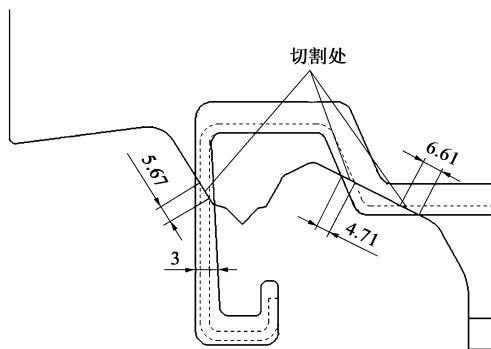


图 7 刀具剪切板材示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shearing plate by cutting tools

3.2 有限元模型建立

采用 Simulation 软件建立压力机架的有限元分析模型，需简化结构，建立主要受力构件模型。各板材零件之间建立完全结合的接触对^[9-10]。

(1) 材料属性：压力机架各板材的材质均为 45 钢，弹性模量 $E = 2.0 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ ，密度 $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2) 划分网格：由于压力机架组成板材的厚度较大，本模型全部按照实体单元划分网格。有限元模型如图 8 所示。

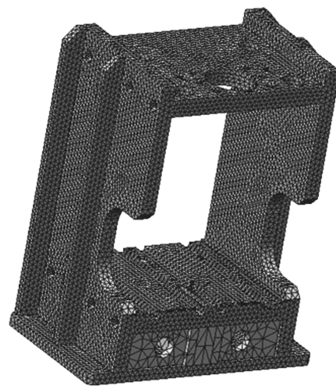


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

3.3 静力学分析

(1) 施加约束与载荷

机架底面全约束固定,压力机架上板螺纹孔处添加 27034 N 的向上拉力,下板与定刀片结合处添加 27034 N 的向下压力^[11-12],约束及负载如图 9 中箭头所示。

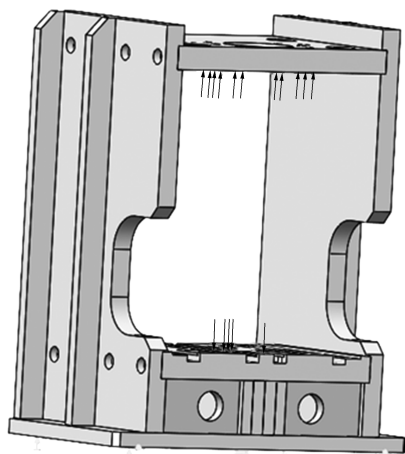


图 9 约束及加载

Fig. 9 Constraint and loading

(2) 静力学分析

从图 10 可知,压力机架大部分区域的应力为 0~15 MPa,机架的最大应力为 62 MPa,在机架上板油缸安装处的最外侧,最大应力远小于 45 钢的屈服应力 355 MPa,机架不会发生塑性变形,机架强度可满足使用要求。

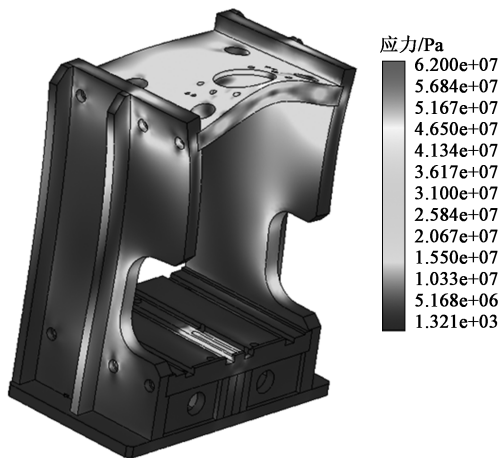


图 10 应力云图

Fig. 10 Stress nephogram

从图 11 可知,压力机架的大部分区域位移为 0~0.08 mm,机架的最大位移为 0.17 mm,发生在机架上板油缸安装处的最外侧,机架上侧 4 个透孔为导柱导套安装处其变形量为 0.08 mm 左右,导柱

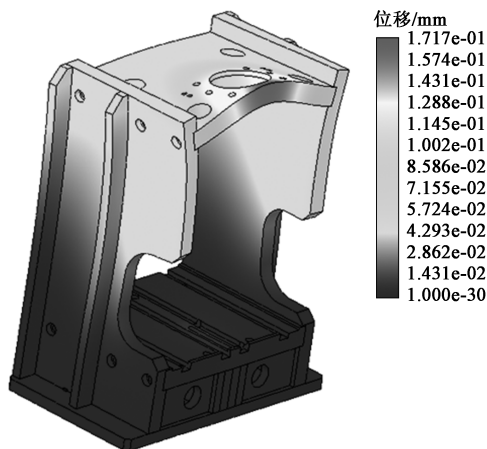


图 11 位移云图

Fig. 11 Displacement nephogram

导套安装处的允许变形量远大于该变形量,故机架刚度可满足使用要求。

4 生产应用

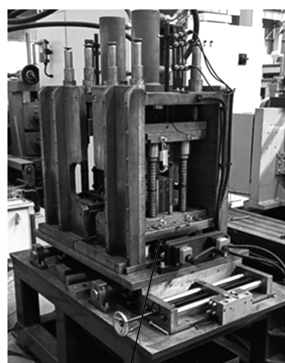
本文研究设计的产品已完成加工装配调试,并成功应用于客户生产线。分体式剪刀实物及所加工产品实物见图 12。

4.1 产品使用情况

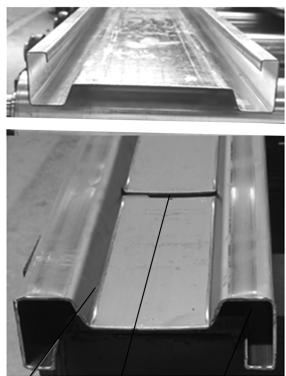
该设备上各功能元件使用良好,剪切油缸动作灵敏,剪刀剪切动作顺畅,剪刀位置调节机构旋转阻力小、调节方便,安全保护开关及液压保护回路响应及时。所剪切的板材的切断面质量良好,板材切断面剪切光亮带平滑,撕裂带无明显尖角、凹坑等缺陷。产品理论要求切断面剪切毛刺不大于 0.5 mm,实际切断面剪切毛刺为 0.3 mm。切断后板材切断面的理论轮廓尺寸允许变形量为 ± 0.6 mm,切断面的实际轮廓尺寸误差为 0.2 mm。经实际生产使用验证,该分体式剪刀的剪切质量达到了设计要求,满足了客户产品的精度要求^[13]。

4.2 生产效率

冷弯成形主机成形速度 $v = 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,分体式落料剪切系统为停机剪切机制,即剪切时成形主机需停止,单个剪切周期用时 $t_1 = 2.5 \text{ s}$,其中动刀认口时间为 0.8~1.0 s,剪刀剪切动作往返时间为 1.5 s,废料切除宽度为 13 mm。冷弯成形主机生产 1 根型材,需驱动板料向行走的长度 L 为单根料长 $L_{\text{根}}$ 加废料厚度,即 $L = L_{\text{根}} + 0.013 \text{ m}$,可计算单根料成形用时为 $t_2 = L/v$ 。可知生产一根型材所用时间 $T = t_1 + t_2$,从而根据不同的产品长度可计算出相应的



分体剪刀实物
(a)



型材产品实物 预切口 切断面效果
(b)

图 12 分体式剪刀 (a) 与产品 (b) 实物图

Fig. 12 Physical pictures of split cutting tool (a) and product (b)

生产效率, 见表 1。

表 1 生产效率

Table 1 Production efficiency

料长/m	生产速度/(m · min ⁻¹)	生产效率/(根 · min ⁻¹)
1	10.77	10.77
2	13.95	6.98
4	16.4	4.10
6	17.4	2.90
8	17.9	2.24

由表 1 可知, 生产的板料越短, 停机次数越多, 每分钟的生产效率越低, 生产的板料越长, 整个生产线的速度越大, 生产效率越高, 当板料长度大于 6 m 后, 生产线速度趋于稳定。

5 结论

(1) 本文设计的分体式落料剪切系统有效地解决了传统剪切刀具数量多、成本高、更换耗时长的问

题, 降低了单元机的成本, 提高了设备的利用效率。

(2) 设计的自适应认口机构解决了停机自动剪切问题。设计的位置调节机构, 解决了一副刀具适应不同宽度板材的问题。设计的电气开关的联动控制解决了液压系统高低压快慢速回路的快速切换问题, 同时保护了系统的安全性。设计的液压系统原理简单、元件少、操作简单, 同时避免了传统的高低压双系统设计造成的成本高的问题。一套液压系统实现了高低压切换, 快慢速切换。为该落料剪刀停机自动认口剪切的应用提供了保障。安全保护回路的应用, 为落料剪切装置提供了安全保护。

(3) 有限元计算验证了机架的强度和刚度, 为压力机架的设计制造提供了理论依据。

(4) 该分体式落料剪切系统已成功应用于生产线, 解决了板材柔性加工切断的技术难题。

参考文献:

- [1] 小奈弘, 刘继英. 冷弯成型技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Ona H, Liu J Y. Cold Bending Forming Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] 任再青, 张伟. 便捷式飞机液压系统清洗车的设计 [J]. 信阳师范学院学报, 2018, (4): 658-660.
Ren Z Q, Zhang W. Design of a convenient aircraft hydraulic system cleaning vehicle [J]. Journal of Xinyang Normal University, 2018, (4): 658-660.
- [3] 何寥, 闫红宾, 史辉云, 等. 某举升液压系统设计改进 [J]. 液压气动与密封, 2022, (6): 75-78.
He L, Yan H B, Shi H Y, et al. Design improvement of a certain lifting hydraulic system [J]. Hydraulic Pneumatic and Sealing, 2022, (6): 75-78.
- [4] 袁承训. 液压与气动传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Yuan C X. Hydraulic and Pneumatic Transmission [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [5] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 液压传动与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Editorial Committee of Mechanical Design Manual. Mechanical Design Manual: Hydraulic Transmission and Control [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [6] 谷珂珂, 张新风. 液压系统的设计计算及校核 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2020, (8): 45-47.
Gu K K, Zhang X F. Design calculation and verification of hydraulic systems [J]. Tractors and Agricultural Transport Vehicles, 2020, (8): 45-47.
- [7] 王晓东, 马颖. 无人机起落架液压系统设计 [J]. 装备制造技术, 2020, (8): 86-89.
Wang X D, Ma Y. Design of hydraulic system for unmanned aerial

- vehicle landing gear [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2020, (8): 86-89.
- [8] 李海龙, 武世龙, 石壮. 金属屑压块机液压系统设计 [J]. *机床与液压*, 2021, (19): 85-87.
- Li H L, Wu S L, Shi Z. Hydraulic system design of metal chip pressing machine [J]. *Machine Tool and Hydraulic*, 2021, (19): 85-87.
- [9] 李刚. 行星轮轴的有限元分析及轮齿的齿向修形 [J]. *机械传动*, 2013, (1): 51-53.
- Li G. Finite element analysis of planetary gear shafts and tooth alignment modification [J]. *Mechanical Transmission*, 2013, (1): 51-53.
- [10] 曹立宏. 基于 ANSYS 的极坐标机床平旋盘轴的有限元分析 [J]. *机电一体化*, 2012, (3): 48-52.
- Cao L H. Finite element analysis of polar coordinate machine tool flat disc shaft based on ANSYS [J]. *Mechatronics*, 2012, (3): 48-52.
- [11] 曹立宏. 极坐标数控机床平旋盘底座的有限元分析 [J]. *科学技术与工程*, 2012, (9): 2041-2044.
- Cao L H. Finite element analysis of the flat disc base of polar coordinate CNC machine tools [J]. *Science and Technology and Engineering*, 2012, (9): 2041-2044.
- [12] 吴琳. 汽车门内饰板设计及有限元分析 [J]. *汽车应用技术*, 2023, (1): 82-85.
- Wu L. Design and finite element analysis of automotive door interior panels [J]. *Automotive Application Technology*, 2023, (1): 82-85.
- [13] Liu W J, Liu Q, Ruan F, et al. Springback prediction for sheet metal forming based on GA-ANN technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187-188: 227-231.
-
- (上接第 148 页)
- Li G Q, Zhang J W, Li Y S, et al. Force compliance study of hydraulic control system of operating operator [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28 (7): 1538-1546.
- [6] 刘军毅, 方秀荣. 大型锻造液压操作机钳架缓冲方法的研究 [J]. *现代制造工程*, 2017, (3): 145-149.
- Liu J Y, Fang X R. Study on the cushioning method of clamp frame of large forging hydraulic operator [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2017, (3): 145-149.
- [7] 赵春玲, 薛飞, 史青, 等. 双向缓冲缸对锻造操作机行走机构特性影响的分析研究 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2018, 53 (4): 27-30.
- Zhao C L, Xue F, Shi Q, et al. Analysis of the influence of bidirectional buffer cylinder on the walking mechanism characteristics of forging operator [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2018, 53 (4): 27-30.
- [8] 高惠敏. 锻造操作机缓冲装置的配置 [J]. *重型机械*, 2010, (S2): 249-251.
- Gao H M. Configuration of the forging operator buffer device [J]. *Heavy Machinery*, 2010, (S2): 249-251.
- [9] 徐明, 胡国良, 傅新. 锻造操作机液压缓冲系统建模与仿真研究 [J]. *机床与液压*, 2015, 43 (11): 137-139, 151.
- Xu M, Hu G L, Fu X. Modeling and simulation of hydraulic buffer system [J]. *Machine Tool and Hydraulic Pressure*, 2015, 43 (11): 137-139, 151.
- [10] Fu G Z, Xiang D K, Chao A, et al. Multi-field co-simulation research on suspension system of forging manipulator based on virtual prototype technology [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 905: 97-101.
- [11] 董蒙, 栾希亭, 梁俊龙, 等. 气囊式蓄能器吸收脉动的动态特性分析 [J]. *液压与气动*, 2019, (5): 109-116.
- Dong M, Luan X T, Liang J L, et al. Analysis of dynamic characteristics of absorption pulsation in air bag accumulator [J]. *Hydraulic and Pneumatic*, 2019, (5): 109-116.
- [12] 王成龙, 邱志伟, 曾庆良, 等. 一种多孔式液压缓冲器的设计与缓冲特性研究 [J]. *机床与液压*, 2018, 46 (9): 93-96.
- Wang C L, Qiu Z W, Zeng Q L, et al. Study on the design and buffer characteristics of a porous hydraulic buffer [J]. *Machine Tool and Hydraulic Pressure*, 2018, 46 (9): 93-96.
- [13] 周政, 何忠韬. 多孔式液气缓冲器单自由度动力学分析 [J]. *铁道车辆*, 2011, 49 (5): 11-13, 47.
- Zhou Z, He Z T. Single-degree-of-freedom kinetic analysis of the porous liquid-gas buffer [J]. *Railway Vehicles*, 2011, 49 (5): 11-13, 47.
- [14] 柳俊析, 马彪, 李和言, 等. 基于吸收压力冲击的蓄能器参数设计及其仿真研究 [J]. *车辆与动力技术*, 2009, (2): 6-11.
- Liu J X, Ma B, Li H Y, et al. Design and simulation study of accumulator parameters based on absorbing pressure shock [J]. *Vehicle and Power Technology*, 2009, (2): 6-11.
- [15] 江琳. 液压蓄能器的应用 [J]. *流体传动与控制*, 2006, (6): 27-28.
- Jiang L. Application of hydraulic accumulators [J]. *Fluid Drive and Control*, 2006, (6): 27-28.
- [16] 丁响林, 阚玉锦, 苏进. 可调式液压缸缓冲装置设计及其缓冲过程研究 [J]. *佳木斯大学学报: 自然科学版*, 2019, 37 (4): 655-657, 676.
- Ding X L, Kan Y J, Su J. Study on the design and buffering process of adjustable hydraulic cylinder [J]. *Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition*, 2019, 37 (4): 655-657, 676.
- [17] 杨晓波, 刘艳妍, 杨晋, 等. 平行连杆式操作机悬挂系统刚度与阻尼参数研究 [J]. *中国机械工程*, 2016, 27 (23): 3130-3135.
- Yang X B, Liu Y Y, Yang J, et al. Study on stiffness and damping parameters of parallel link operator suspension system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27 (23): 3130-3135.
- [18] 胡春幸, 侯玉亮, 铁瑛, 等. 基于遗传算法的碳纤维增强树脂复合材料层合板单搭胶接结构的多目标优化 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38 (6): 1847-1858.
- Hu C X, Hou Y L, Tie Y, et al. Multi-objective optimization of single-bonding structure of carbon fiber reinforced resin composite laminate based on genetic algorithm [J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 38 (6): 1847-1858.