

一种煤矿用铺底机器人液压机械臂的研究

翟正成 陶三宝
(南京科工煤炭科学技术研究有限公司 江苏 南京 210018)

摘要: 本文针对一种煤矿用铺底机器人, 研究和设计全液压结构驱动的机械臂, 实现铺底模块的快速安装和回撤。针对煤矿巷道路面实际工况, 研究和模拟仿真机械臂关键部件夹爪机构与模块结构的配合, 确保机械臂运行稳定、安全可靠, 并满足快速施工的需求。

关键词: 液压; 铺底模块; 夹爪

0 引言

煤矿巷道是煤矿井下生产系统的最基本单元, 提供运输通道是巷道之于矿井生产的重要功能之一, 目前我国煤矿巷道路面结构主要分为水泥混凝土路面、沥青路面和复合型路面三种, 多以水泥混凝土路面为主。一方面, 国内煤矿及非煤矿山井下混凝土路面施工仍以人工摊铺为主, 主要工艺与地面类似。近年来, 井下施工机械发展较快, 但用于路面结构施工的专用设备相对缺乏。另一方面, 复合材料铺底模块在服役期较短的巷道路面逐步得以应用, 并以其轻质高强、施工简单、环保并可循环等优点, 取得了较好的应用效果, 但其在人工铺设过程中, 效率低、劳动强度大, 难以满足高效施工要求, 并存在一定的安全隐患。

为此, 基于煤矿生产现场的需求, 开展巷道自动化铺底技术和装备研究可以解决超大工作量、大型巷道的路面结构高效施工需求, 提高施工效率, 进一步促进复合铺底材料在国内大型煤矿的推广应用。

1 设备整体结构和功能

研究一套集铺底模块运搬、安撤、底板快速平整于一体的快速铺底技术与装备, 辅以自动化控制技术, 实现铺底模块自动化安全高效施工。该设备作为一种远程操控的自动化铺底作业装备, 集仿生技术、通信控制技术、传感技术、机电液一体化技术、机械臂运动控制技术于一体, 属于特定领域的技术集成。

铺底设备主要由机械本体系统(底盘及车架、铲板、储箱)、动力系统(防爆柴油机)、液压系统、传感与电液比例控制系统、无线通信系统、卡爪组件、照明系统等部分组成, 如图 1 所示。

液压机械臂作为模块安撤的直接执行机构, 是设备开发的关键结构之一, 本文重点介绍满足安撤工况的机械臂设计与研究。机械臂组成和功能如下: 大臂

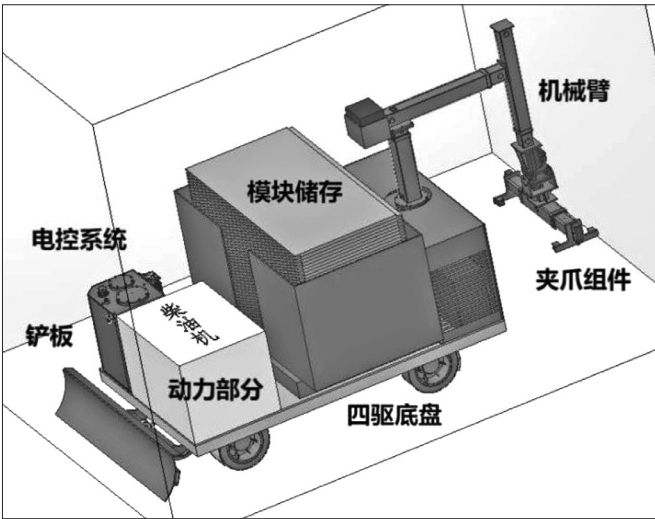


图 1 铺底设备示意图

总成用于模块的转移和放置, 采用升降和两段伸缩臂结构, 基臂底部可以升降、水平旋转、俯仰、伸缩。小臂总成根据作业需求绕大臂总成旋转, 头部安装夹爪组件。夹爪组件采用液压马达、减速器、绝对值编码器、液压卡具进行抓取模块, 可以完成模块水平($\pm 90^\circ$)旋转, 卡具开合抓取自锁。机械臂设置有绝对值编码器, 保证臂关节与卡爪组件配合控制, 满足模块规格尺寸大小不一条件下, 进行空间多维度运动作业。

2 机械臂设计

2.1 设计依据和性能要求

液压机械臂主要功能是抓取和转移大小为 $2\text{m} \times 1\text{m} \times 25\text{mm}$ 复合材料模块进行铺底作业, 考虑井下巷道工况, 设计时还存在一些特殊性: (1) 煤矿井下空间狭小, 最大限度紧凑布局, 缩小机构体积; (2) 在与模块配合作业中, 具有较高的精度要求, 而液压卡爪作业时伴随脉动, 通过设计减小振动带来的冲击, 提高安撤的效率。

2.2 设计方案分析及确定

液压机械臂工作方式：主臂可在安撤方向和后方模块储存箱范围内自由旋转；到达模块上方时，横向和纵向伸缩臂的臂架伸展，卡爪组件下降，当下降到一定高度后，末端执行器卡爪张开，到达合适位置后夹紧模块，然后臂架携带卡爪和模块上升，高度超出模块放置仓后停止上升，主臂回转，实现模块的铺设或回收。考虑承载特性、制造周期和成本等因素，选用连杆机构完成整体臂架系统的设计，选用液压驱动方式的圆柱坐标型机械臂。

2.3 主要构件的设计

采取按组设计的方式对其主要构件进行设计，根据功能和结构大致分为机座结构、臂架结构、夹爪组件三个部分，回转驱动装置和液压缸直接查找标准进行选型，转动关节只起连接作用，选用结构较为简单的销轴，也不再单独设计。

2.3.1 夹爪组件

夹爪组件主要包含卡爪、爪部液压缸和调整液压缸。为实现对模块的抓取，模块采用搭接配合，边缘有4个通孔用于跟其他模块连接固定，孔径36 mm。铺底模块两侧一定距离内减薄1/2的厚度，表面覆盖防滑纹。两块铺底模块连接时，模块的边缘搭接在一起，厚度正好为模块的厚度，然后由配套改制膨胀螺栓连接固定。

考虑爪部液压缸的行程和空间，尽可能地减小臂、板连接件的尺寸，设计轻量化。结构形状利用软件建立三维模型（图2），在保证夹紧状态下具有足够的横向距离（使臂获得足够大的动力力臂，降低动力消耗），而又不影响伸缩油缸在安装架上滑行的前提下，反复验证各关键尺寸，依据力矩平衡原理，选型最大额定拉力为3kN的W140L-1CA50B型液压缸。

2.3.2 臂架结构

机械臂依据底板尺寸安装在中间位置，为确保在机械臂空载转动时夹持器能够完全转出车厢底板，臂杆之

间承载要具有足够的刚度和强度，满足最大臂展和末端工作范围要求，节臂间的接触方式采用线面接触，伸缩臂的壁厚不太大，局部摩擦应力的敏感度较大，因此在伸缩臂之间放置滑轨。利用三维建模软件建立模型反复检查，经计算驱动力臂与角度变化的关系，再完成液压缸选型，反复校验后获得臂杆基本尺寸。

2.3.3 机座组建

机座组件包括主臂固定架、连接法兰、回转驱动和机座。回转驱动装置采用市场上的成品，其他构件的尺寸依照回转驱动装置的尺寸来确定。倾覆力矩和轴向载荷是回转驱动装置选型的关键参数，出于安全考虑，设计回转驱动装置所受倾覆力矩计算时，机械臂和工件自重均选设计要求的上限。计算倾覆力矩和轴向载荷，通过查找回转驱动制造企业产品样本手册，获得了该企业所生产回转驱动装置的承载曲线，最终选用WD9-61-RH-REV.A型回转驱动装置。

2.3.4 工程液压缸选型

由于单作用缸只能单方向提供动力，为了满足负载的需要，伸缩液压缸采用双作用液压缸。液压马达根据工况进行选取，该机械臂的重量相对较大，转动惯量较大，因此液压马达的速度相对低一些，计算后选用NHM系列液压马达NHM6-700，其特点是低速大转矩。

2.4 安撤工法

抓取铺底模块时，调整抓盘姿态，将4个机械抓手对准铺底模块边缘的4个通孔，缓慢放下抓盘，将4个抓手插入铺底模块中间位置预留的4个孔中，然后液压缸工作，依靠两个双向液压缸提供的压力，利用机械抓手与铺底模块孔壁的摩擦力将模块抓起，通过转向油缸微量调整铺底模块的角度，对齐放置在已经铺设好的模块边缘，然后向下缓慢移动抓盘放下铺底模块，铺设到位后液压缸泄压，收回机械抓手，最后人工将用螺栓将叠放铺设好的两块铺底模块固定连接。回收工序与安装工序相反。

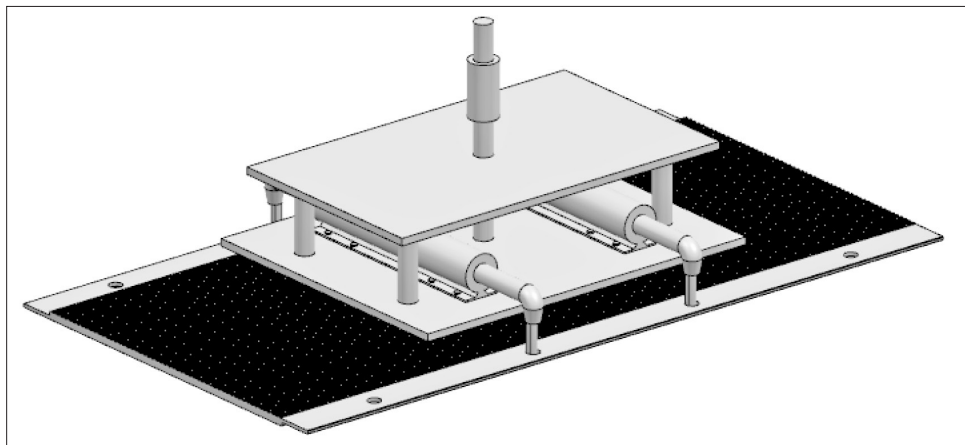


图2 夹爪组件抓取示意图

3 模型仿真研究分析

3.1 机械臂组件受力静分析

机械臂伸出时为最大受力状态，设置材料为碳钢，底端为固定载荷，依据配重块重量施加配重载荷117kgf，在机械臂头端施加130kgf，以模拟实际受力状况。

机械臂 von mises 应力分析（图3）结果：最大应力点达到 $7.737 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ，位于竖直悬臂上端安装孔边缘，远小于其屈

服强度 $2.20594 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，结论为：安全。

机械臂合位移分析（图 4）结果：最大合位移 6.971 mm ，位于伸出态的机械臂末端。

机械臂 ESTRN（图 5）对等应变分析结果：对等应变是各方向位移量的合位移，应变是指长度的变化 δ_L 与原始长度 L 之比，最大为 2.786×10^{-4} ，即 0.0002786 mm 。

3.2 夹爪和模块结构静力分析

3.2.1 变形分析

机械臂夹取铺底模板时，接触处和铺底模块基本无 z 向位移，由此可判断机械臂可依靠摩擦力夹取起铺底模块。单独观察机械爪、橡胶垫、铺底模块的变形图如图 6 所示。由图 6 可知：机械臂除随液压缸的柱塞向内平移 2 mm 外，基本无其他变形；橡胶垫的接触部分最大位移为 3.444 mm ；铺底模块孔处基本未发生变形，边缘处受重力影响下垂 4.082 mm 。夹具与铺底模块的接触处铺底模块变形较小，可忽略不计。

3.2.2 应力分析

当载荷作用后，机械臂夹取时的大应力仅存在于用于固定液压机的螺栓处。因此推断产生此应力的原因为固定液压机螺栓过小，在承重时造成较大应力，考虑将此处螺栓改为较大号螺栓进行改进尝试。单独观察机械爪、橡胶垫、铺底模块的应力：机械爪的最大应力为 28.84 MPa ，位于弯头处；橡胶垫的最大应力为 5.168 MPa ，位于橡胶垫与铺底模块的接触处；铺底模块的最大应力为 13.39 MPa ，位于孔洞边缘。总结可知，关键部位的应力均在可接受范围之内。

4 结语

本文设计研究全液压结构

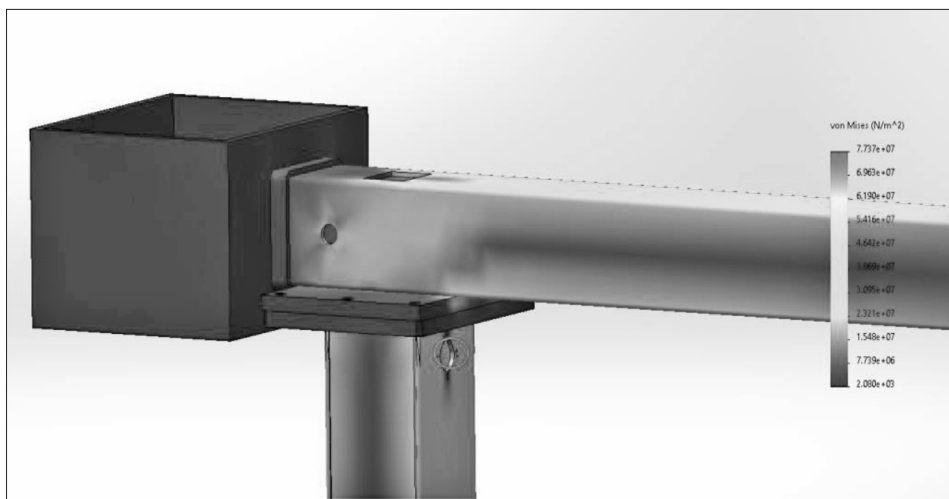


图 3 应力危险点放大图



图 4 合位移分析结果



图 5 对等应变分析结果

（下转第 19 页）

查阅相关资料可知锡青铜材料寿命在 $10^5 \sim 10^7$ 时构件表面已有疲劳裂纹产生,故按照寿命为 10^5 估算,可以得出:

壁厚 3mm、刹紧间隙为 0.1mm 的刹紧装置在油压为 12MPa 的工作状况下,使用寿命为 $10^5 \times (62/311) / 7200 \approx 2.8$ 年,(注:7200 为刹紧套 1 天刹紧 20 次,按 360 天/年,1 年刹紧 7200 次)。

改进后,壁厚 2.5mm、刹紧间隙为 0.1mm 的刹紧装置在油压为 12MPa 的工作状况下,使用寿命为 $10^5 \times (62/198) / 7200 \approx 4.3$ 年,(注:7200 为刹紧套 1 天刹紧 20 次,按 360 天/年,1 年刹紧 7200 次)。

由此可知,通过上述结构的改进可以使刹紧装置的使用寿命提升约 53.6%。

5 结语

五轴联动高速加工机床以高切削速度、高进给速度、

高加工精度为主要特征,双摆角万能铣头 A/C 轴锁紧时的刹紧装置对机床精度和机床加工性能有着及其重要的作用。本文采用有限元分析的方法指导刹紧装置结构优化,具有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社. 2007.
- [2] 聂毓琴. 孟广伟. 材料力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

作者简介: 闫丽俊 (1984.01-), 女, 汉族, 山西吕梁人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械设计; 肖新倩 (1986.08-), 女, 汉族, 山东聊城人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械设计。

(上接第 14 页)

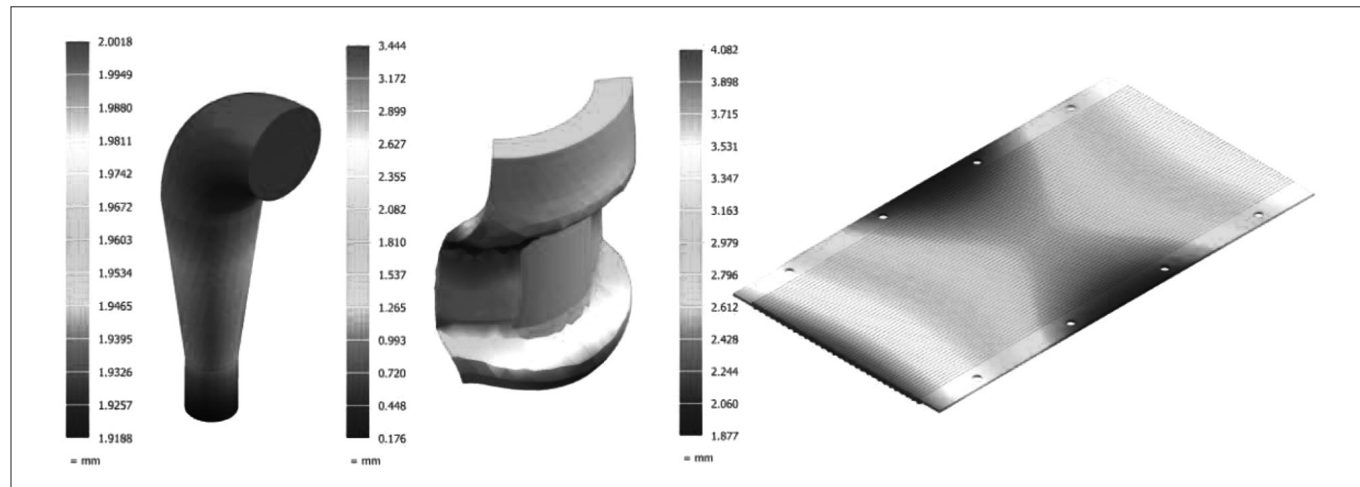


图6 机械爪、橡胶垫、铺底模块位移图

驱动的快速安装和回撤机械臂,针对煤矿巷道路面实际工况,设计研究机械臂关键部件夹爪机构与模块结构的配合,解决运行稳定、快速完成铺底模块的安撤,以满足快速安全施工需求。设计完成后,经三维建模、变形分析及应力分析,确定该设备设计合理,满足煤矿巷道快速施工的需求。

基金项目: 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项重点项目 (2020-ZD006)。

参考文献:

- [1] 王文亮. 煤矿巷道沥青路面阻燃技术研究现状 [J]. 山西建筑, 2014(24): 164-165.
- [2] 杨晓敏. 车载液压机械臂结构分析及设计 [J]. 山西建筑, 2016(33): 115-116.
- [3] 王成龙. 煤矿钻锚机器人自动布网单元研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2019.

作者简介: 翟正成 (1986-), 男, 汉族, 江苏扬州人, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山生产工艺、矿山机械设计。