

# 一种自适应调整微开模位置的碳纤维复合材料液压机\*

胡振新, 谢洁, 赵庆元  
(天津天锻压力机有限公司, 天津 300142)

**摘要:**介绍了一种自适应调整微开模位置的碳纤维复合材料液压机,该液压机是天锻压力机有限公司根据用户的工艺要求而专门设计、制造的,主要适用于 HP-RTM、HP-CRTM 电池盒盖的复合材料模压工艺,也可适用于 SMC、BMC 等热固性复合材料的模压工艺,广泛使用于卡车高顶等零部件、建筑材料和卫浴洁具等行业中。

**关键词:**自适应调整;微开模;碳纤维;复合材料;液压机

中图分类号: TG315.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-2354(2022)S2-0188-05

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2022.s2.026

## A carbon fiber composite material hydraulic press with adaptive adjustment device

HU Zhen-xin, XIE Jie, ZHAO Qing-yuan  
(Tianjin Tianduan Press Co., Ltd., Tianjin 300142)

**Abstract:** The paper introduces a kind of Carbon fiber composite material hydraulic press with adaptive adjustment device, the hydraulic press is made in accordance with the user's technical requirements by Tianjin tianduan press Co., Ltd. It is mainly suitable for composite material battery box cover molding process (HP-RTM, HP-CRTM), it can also be applied to the molding process of SMC, BMC, widely used in truck high top parts, construction material and sanitary wares.

**Key words:** adaptive adjustment; micro open die; carbon fiber; composite material; hydraulic press

天津市天锻压力机有限公司研制的一种自适应调整微开模位置的碳纤维复合材料液压机(以 YT71S-3500G 为例),是根据青岛某一用户要求的碳纤维复合材料 HP-RTM 工艺制造电池盒盖设计制造的。

随着我国汽车产业的快速发展,国内整车厂家对汽车零件的轻量化制造提出了迫切的需求。根据厂家的需求,研制适合于汽车产业的复合材料轻量化零件的大批量生产设备,突破其中的设备、工艺、模具、产品验证及试验等中的关键技术,生产合格的用于各类汽车的复合材料零部件,成为了汽车产业中重要的一环,具有良好的市场前景。碳纤维复合材料是一种含碳量在 95% 以上的高强度、高模量纤维的新型纤维材料。具有耐高温、

抗摩擦、导电、导热及耐腐蚀等特性。碳纤维复合材料是以碳纤维作为增强材料与树脂复合,制造的先进复合材料。

碳纤维复合材料成型件具有轻质高强、抗疲劳性能好、破损安全性高、耐腐蚀性好等优点,在航空航天、高铁、电子、军工等领域具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。

## 1 HP-RTM 基本工艺流程

HP-RTM 成型工艺(如图 1 所示)是将传统 RTM 技术与模压技术结合的新型技术,能够保证产品质量的同时极大地缩短生产时间,从而降低生产成本。

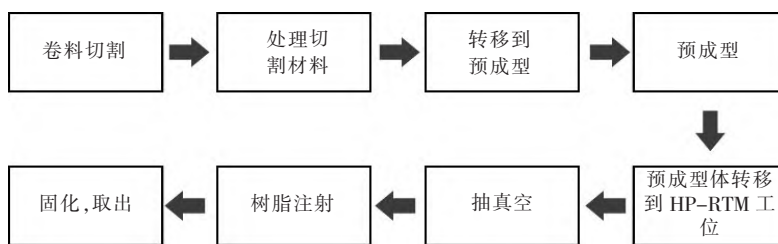


图 1 HP-RTM 成型工艺流程图

\* 收稿日期:2022-05-17;修订日期:2022-07-28

HP-RTM 是指利用高压压力将树脂对冲混合并注入到预先铺设纤维增强材料和预置嵌件的真空密闭模具内,经树脂流动充模、浸渍、固化和脱模,获得复合材料制品的成型工艺。

高压压力:HP-RTM 注胶压力 80 bar(1 bar=100 kpa)。高压注胶的好处是树脂可以更快地达到每个拐角,可提高产品的纤维量,提高产品性能<sup>[2]</sup>。

预先铺设:预先铺设的纤维增强材料是指已经经过剪裁预成型的纤维材料。

预置嵌件:嵌件是指在成型前放置于模具里的零件,材质有金属和非金属,这样使得成型后的制品,嵌件被包入本身的结构中,不可拆卸,是否需要预置嵌件由制品的结构设计决定。

HP-CRTM(成型原理简图)如图 2 所示。

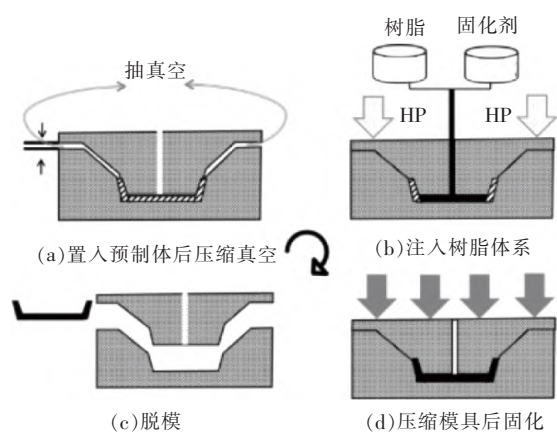


图 2 HP-CRTM 成型原理简图

该工艺是在 HP-RTM 工艺基础上的升级工艺,要求压机具备滑块微开模跟踪闭环管控系统,在注胶时保持上下模腔间隙闭环控制,达到位置控制精度 $\pm 0.1$  mm,最后模腔闭合压缩,达到最终制品的厚度。该成型工艺可将树脂完全挤压到纤维中,提高纤维体积分数,从而影响力学性能和加工性能。

## 2 YT71S-3500G 碳纤维复合材料高精度液压机

HP-RTM 工艺过程中,树脂的充填过程的合模间隙控制,以及压制环节的压力控制等都需要高效、高精度的液压机(图 3)系统保证。同时需要根据注胶工艺、压制工艺的需要,提供适时控制技术,以保证成型过程的连续性<sup>[2]</sup>。

碳纤维复合材料制品的模压加工过程主要包括:温控、抽真空、微开模、模内喷涂、智能压力控制、模具间隙控制、冷却定型等。碳纤维复合材料制品液压机,主要是对预加工好的片状材料进行模压成型,能够实现复杂产品的整形要求。设备具有全自动化配置,从上料、各工位之间的传递、温控、抽真空、微开模、四角调平、比例调压、接料均由自动化实现,极大地提高了生产效率。

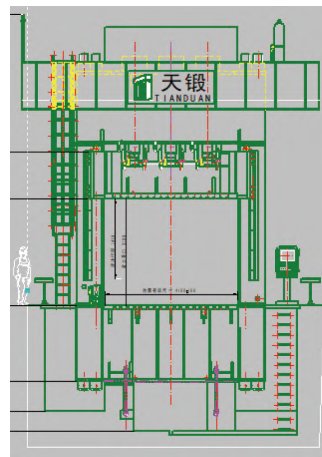


图 3 YT71S-3500G 液压机

### 2.1 YT71S-3500G 碳纤维复合材料高精度液压机技术参数

YT71S-3500G 碳纤维复合材料高精度液压机的主要技术参数如表 1 所示,表中  $v$  为滑块速度。

表 1 YT71S-3500G 液压机主要技术参数

项目	规格	
公称力/kN	35 000	
预压力/kN	11 600	
调平力/kN	5 000	
最大开口/mm	3 200	
滑块行程/mm	2 400	
调平有效行程/mm	120	
工作台有效尺寸/mm	4 000×3 000	
滑块速度/(mm/s)	快下	400
	工作	1~20
	慢速脱模	1~25
	快速回程	400
调平精度/mm	$v=1$ mm/s	$\pm 0.08$
	$v=5$ mm/s	$\pm 0.11$
	$v=10$ mm/s	$\pm 0.15$
	$v=20$ mm/s	$\pm 0.25$
微开模/mm	$\pm 0.1$	

### 2.2 YT71S-3500G 液压机机身结构分析

对 YT71S-3500G 碳纤维复合材料高精度液压机机身部件进行数字化设计并采用有限元分析法对其机身进行强度、刚度分析及优化,研究典型工况下压力机本体及关键零部件(如上横梁、下横梁、滑块等)的变形及应力分布,确定压力机的最优本体机构。

为使网格划分和节点迭代计算过程大为简化,对机身结构进行 1/4 建模分析,采用 Fixed Support 命令完全约束 4 个地脚螺栓处的自由度,主缸柱塞分别按照满载全压施加反向载荷,8 个拉杆处分别施加预紧力,受力模型如图 4 所示。经过分析后应力分布如图 5 所示,机身变形分布如图 6 所示,结论为满足使用要求<sup>[3]</sup>。

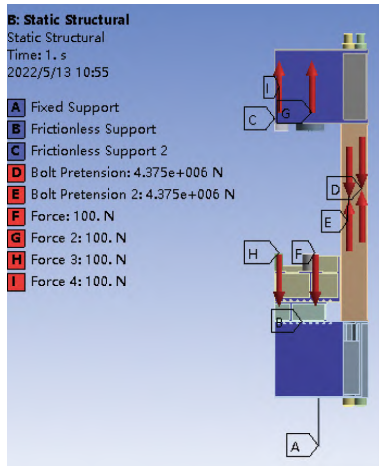


图 4 YT71S-3500G 液压机身受力模型

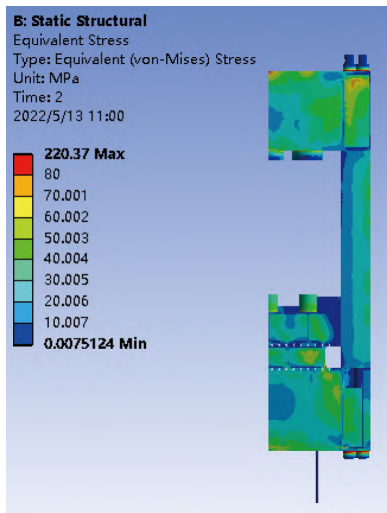


图 5 YT71S-3500G 液压机应力

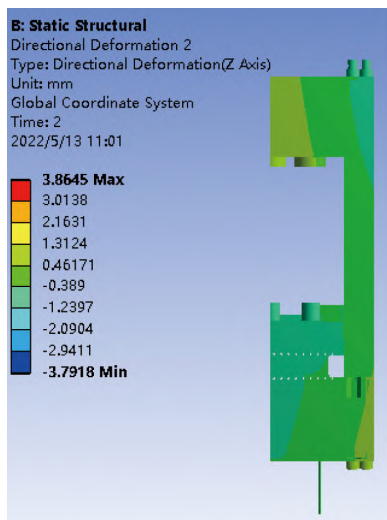


图 6 YT71S-3500G 液压机身变形

### 2.3 微开模(模内喷涂)控制系统

微开模控制系统基于四角调平系统开发及应用,该装置安装在压机工作台的 4 个角上。它为压机滑块在负载运动时提高精度保持性提供了更为可靠的保证;压机的开模动作也由该系

统完成。微开模系统是由 4 个伺服调平油缸、控制阀组、位移传感器、压力传感器、伺服比例阀、来自系统的动力源和电气控制装置组成的一套闭环控制系统。

微开模系统即压机在合模和开模时,4 个伺服油缸起调平(平衡)控制四角位置的作用(如图 7 所示),并且满足一些特殊工艺需求,如模内喷涂等。

模内喷涂(微开模):压机在加压(调平)过程中,根据料的情况,可能需要 0~3 次的排气(微开模),加压到需要的压力后,主缸降压,靠近喷嘴侧的四角调平缸先开模,打开较小开度后就可以进行喷涂,然后四角调平系统根据需要让涂料在模内流动下,压机再重新合模加压。

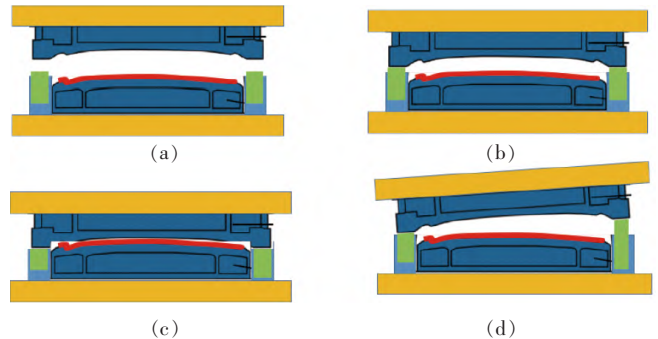


图 7 微开模分项动作示意图

### 2.4 自适应调整微开模位置装置

因为每一台压机要适用于多种工件的成型压制,所以每个工件就对应一个模具,进而每个模具的厚度都是不一样,传统的解决办法为设备制造厂制作厚度不同的垫块 20,30,50,100 mm,来保证每个模具均能够在此压机中使用,这样每更换一次模具均需要操作工人依靠人工搬运的形式来完成,并通过人工计算出需要的垫块厚度来找到与模具厚度一致的平衡点。为减轻人力劳动并实现生产过程全自动化智能化,进而提高生产效率,将原来人工搬动垫块调节不同高度模具下的合模位置改为电动调节的方式,以适应不同高度的模具,自动调节合模位置。

自适应调整装置如图 8 所示,通过电机+减速机控制齿轮旋转,电动调节垫块的位置,通过旋转编码器控制齿轮旋转圈数,确定垫块伸出高度,来使用模具高度。结构紧凑,减少了各种规格垫块的制造成本及人力劳动的成本。当更换完所需要的模具后,客户仅需要通过一个按键设定,螺杆自动伸出,找到合模位置就可以完成,大大提高了生产效率。

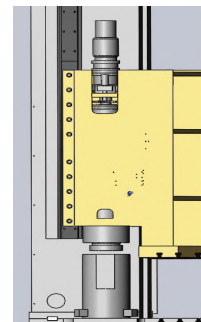


图 8 自适应调节装置

## 2.5 模具真空系统

随着行业对碳纤维复合材料制品制件的要求越来越高,设备厂提出将复材模具增加抽真空接口,对在生产阶段中片材预压、预热时产生的气体进行抽真空,增强原材料的流动性及提高产品质量。

该线真空系统控制简介如下:

(1)采用双真空泵,真空系统具有独立的控制系统,可以做到两台泵单独工作,也可以同时工作(可以选择双泵工作、单泵工作),可以自行控制真空罐内真空压力。

(2)具备自动工作状态与手动工作状态。

(3)每个真空泵和缓冲罐中间安装两片式不锈钢球阀进行隔离,用于检修或者维护时体系的继续工作。

(4)在真空泵和缓冲罐制件配置过滤器,并且要求过滤器内容物方便更换。

(5)真空泵入口装置带4~20 mA信号输出的真空计,可将真空度信号传输给甲方HMI进行显示。

(6)真空泵管路连接处密封性优良,安全可靠。

真空系统在压机上的应用如图9所示。

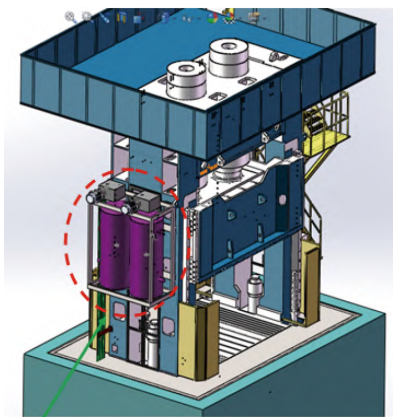


图9 真空系统在压机上的应用

## 2.6 高压RTM工艺下的滑块定位控制系统

精确微开模的四角调平控制系统,包括总控运动控制器,其中总控运动控制器的I/O端子分别与调平缸双向压力传感器、位移传感器、控制调平缸双向运动的高频率响应流量控制伺服阀连接,检测滑块位置的位移传感器,其中位移传感器通过以太网与PLC实现数据交互。闭环控制压机主缸压力上的电液伺服控制卡,输入接口与PLC模拟量模块连接,电液伺服控制卡的输出接口与压机主伺服电机驱动器连接,并在压力环控制的基础上开发出位置环控制,用于为压机提供动力源的伺服驱动泵组。伺服驱动泵组提供流量稳定且能无极调节液压油,用于驱动压机滑块的下行加压及回程动作。

## 2.7 微开模工作描述

首先,如图10所示,在滑块第一次下压至零点吨位时(通常以模具密封圈压实合模到底为准),同时采集滑块和调平油缸的合模位置,再根据人机交互界面预设的微开模间隙高度,由此可推算出调平缸和滑块的目标位置,例如,滑块和调平缸的合模位

置分别为0.05 mm和0.02 mm,预设的微开模间隙为1 mm,那么滑块目标位置为 $0.05+1=1.05$  mm。

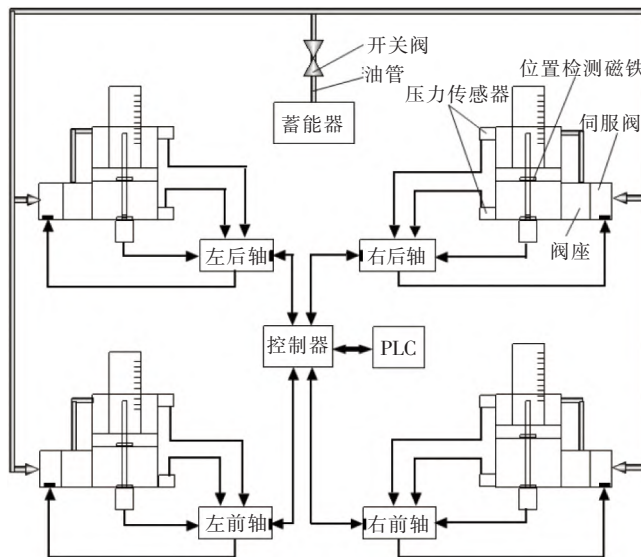


图10 四角位置同步闭环控制系统

其次,主缸吨位降至微开模吨位(一般取压机满吨位的5%且不超过最大调平吨位时),再采集滑块压力降之后的瞬时位置,例如由压降之前的0.05 mm变为压降之后的0.07 mm,此时滑块只需再提高 $1.05-0.07=0.98$  mm,便可到达目标位置,由此调平缸的目标位置为合模时的位置加上滑块需要提高的高度,即 $0.02+0.98=1$  mm。

最后,确定调平缸目标位置后,利用四角调平位置闭环控制定位功能,同步驱动四个调平油缸并托举滑块微开模,当调平缸到达目标位置时,滑块位置也恰好到达需要的工艺参数位置,之后进入下一工艺动作环节。

## 2.8 高压注射阶段电液伺服压力闭环控制卡的工作原理

如图11所示,为目前电液伺服压机上广泛采用闭环控制卡及其与PLC之间的连接图,用于精确控制压机主缸加压压力,控制精度可达 $\pm 0.1$  MPa。QV1模拟量输出通道0~10 V,对应0~27.5 MPa的压力调节范围,接入板卡AI1压力给定通道。QV2模拟量输出通道0~10 V,对应0至驱动器内设置的电机最大转速,接入板卡AI0流量给定通道。主缸压力传感器4~20 mA回路信号通过串联250  $\Omega$ 电阻,在电阻两端可形成1~5 V的电压信号,对应压力量程为0~40 MPa,接入控制卡AI3压力反馈通道。

控制卡输出通道AO0连接伺服驱动器,信号范围0~5 V,用以调节伺服转速。控制卡内置压力闭环控制算法,例如,设定10 MPa,滑块加压过程中,电机以设定转速运行,当压力接近10 MPa时,电机转速逐渐减少,实际压力到达10 MPa后,转速为0,当压力降低,即反馈值小于目标值,此时会再次触发转速输出,直至达到目标值,因此所谓压力闭环,实际就是各个通道信号比较及输出的过程,即AI1为目标压力,AI3为实际压力,AI0为最大转速输出,AO1为实时输出。

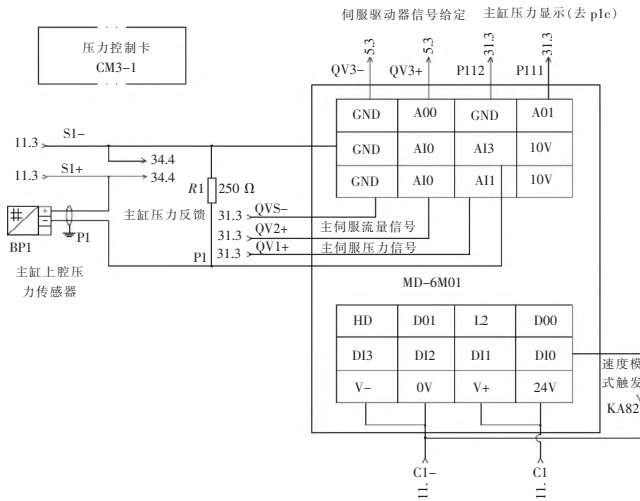


图 11 压力闭环连接图

2.9 压力闭环基础上的位置闭环

如图 12 所示,为基于压力环的位置闭环接线图,与压力闭环大致相似,区别在于控制卡 AI3 反馈输入通道来自于 PLC 的模拟量输出通道,这里的反馈实际上是滑块的位置,因滑块位移尺已与 PLC 总线连接,且不需要全程进行位置控制,在此对滑块实时位置在需要范围内通过模拟量输出通道的转化后接入到了控制卡反馈通道,例如,将滑块位置-0.75~2 mm 范围(此范围可完全覆盖微开模工艺需要的间隙范围)转化为 0~10 V 电信号,发送至控制卡,作为反馈值。

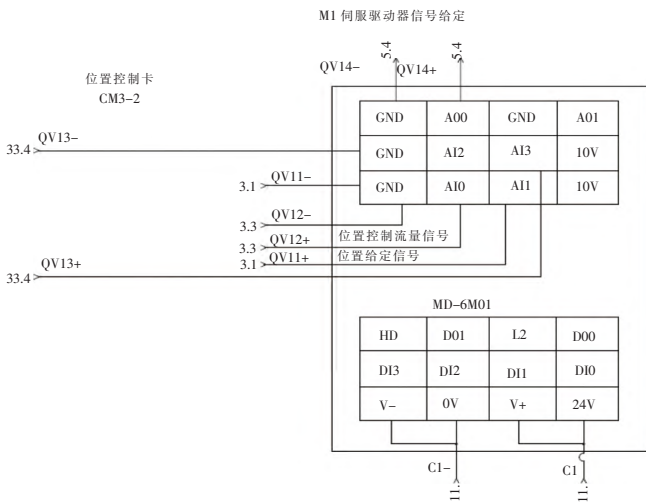


图 12 位置闭环连接图

在高压注射过程中,当注射力逐渐增大直至超过滑块自身质量及微开模吨位带来的备压时,滑块势必会形成被向上反顶趋势,即滑块位置变大,由于已将滑块位置转化为电信号发送给了控制卡作反馈,通过程序运算,将滑块位置的变大转化为反馈值的减小,此时控制卡触发信号输出给伺服驱动器,带动伺服泵组给主缸提供压力,直至将滑块位置加压至位置目标值,形成闭环控制。

3 结论

(1)碳纤维复合材料以其独特、卓越的理化性能,广泛应用在火箭、导弹和高速飞行器等航空航天产业,对于今后的发展具有极为广泛的前景。

(2)HP-RTM 工艺在国际上已经有相对广泛的应用,国内还处于发展探索阶段,相比较其他复合材料成型工艺有着充模快,浸润效果好,气泡少,降低孔隙率的优点,使用高活性树脂,其固化时间短,生产效率有很大提高,使用内脱模剂,制件表面效果好,厚度和形状偏差小。

(3)碳纤维复合材料压机的自适应调整四角调平位置功能,达到了国际领先的水平,大大提高了生产效率。

参考文献

- [1] 赵振辉,刘延利. 现代工业玻璃钢复合材料及成形技术[J]. 英才高职论坛,2007(3):52-57.
- [2] 益小苏,杜善义,张立同. 复合材料手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [3] 天津市锻压机床厂. 中小型液压机设计计算[M]. 天津:天津人民出版社,1997.

作者简介:胡振新(1985—),男,高级工程师,学士,研究方向:液压机结构设计机器自动化生产线设计。E-mail:18649122930@163.com