

IV 型储氢瓶内胆电加热滚塑模具集成设计与实验验证

江财明

(温岭市旭日滚塑科技有限公司, 浙江 台州 317511)

摘要: 本文结合 450 L IV 型储氢瓶内胆的结构特性与模具工艺要求, 设计了一套专用电加热滚塑模具系统。该系统包括模具电热丝加热、BOSS 自动锁紧/释放结构、模具抽真空、充氮气和模内冷却及模具定位导向机构等关键技术模块。实验验证表明, 与传统工艺相比, 该模具不仅操作便捷、成型质量稳定可控, 而且显著降低了单位能耗, 提升了生产效率。研究成果为 IV 型储氢瓶内胆模具的设计提供了经验支持和为实现储氢瓶内胆规模化、自动化滚塑成型提供了可靠的技术支撑。

关键词: IV 型储氢瓶内胆; 滚塑成型; 电加热模具

中图分类号: TQ320.5

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)07-0027-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.07.006

0 引言

在全球碳中和目标的驱动下, 氢能作为零碳能源载体, 已成为能源转型的核心赛道。氢能源储运环节作为氢能产业链的“卡脖子”环节, 高效、低成本的储氢运输技术是氢能产业发展中实现大规模用氢的必要保障。在广大科技工作者的共同努力下, 储氢瓶已从最初的全金属结构 I 型气瓶, 发展到了采用全缠绕模式的塑料内胆包裹纤维的 IV 型^[1]。传统 IV 型储氢瓶内胆制造多采用分步成型工艺(如注塑、焊接等), 存在焊接缺陷和渗漏风险。滚塑成型作为一种热塑性高分子材料旋转一体成型技术, 其独特的工艺特性为 IV 型储氢瓶内胆的制造提供了革新路径。当前 IV 型储氢瓶内胆项目在国内正处于研发、小批量试制阶段, 研发成型用的电加热模具和设备主要以进口为主。为实现国产替代进口, 推动滚塑 IV 型储氢瓶产业的发展。笔者针对 450 L IV 型储氢瓶内胆的结构特性与模具成型工艺要求, 创新设计了一套专用电加热滚塑模具系统并进行了工业验证, 取得了一些研究成果, 为后续 IV 型储氢瓶内胆的规模化、自动化滚塑成型加工提供了可靠的技术支撑。

1 产品结构特性及模具成型工艺要求

1.1 产品结构特性

IV 型储氢瓶滚塑内胆结构由直段筒体、圆弧形封头和金属嵌件(BOSS)组成, 如图 1 所示。



图 1 IV 型储氢瓶滚塑内胆结构

本文所研究的 450 L 滚塑储氢瓶内胆长度尺寸含封头 BOSS 凸台为 $2\,140\pm 10\text{ mm}$, 直径为 $\Phi 554.5\pm 5.5\text{ mm}$, 壁厚 $\geq 5\text{ mm}$ 。

1.2 模具成型工艺要求

IV 型储氢瓶滚塑内胆通常采用的原材料为交联聚乙烯或者尼龙材料, 以上两种材料与常规的滚塑原材料 LLDPE 相比, 对模具温度的控温精度及均匀性要求更高。

当储氢瓶滚塑内胆选用尼龙材料时, 为减少滚塑成型过程中塑料因高温环境出现氧化而影响制品的性能, 在塑粉加热成型前需要对模具进行抽真空, 熔融结束后需要充氮气进行保护。

滚塑加热成型完毕后, 产品进入冷却阶段, 会发生自由收缩, 如果 BOSS 的位置不能随制品收缩做相对位移, 将会造成 BOSS 与储氢瓶内胆两端弧形封头脱层或导致弧形封头变形, 产品质量和尺寸精度无法得到保证。

作者简介: 江财明 (1988—), 男, 本科, 高级工程师, 副总工程师, 主要从事滚塑设备、滚塑模具、滚塑制品的研发、技术服务及企业管理。

为提高制品的冷却效率,当模内温度降到一定数值,可以往模具内部加入冷空气,加速制品的冷却。

综合以上核心关键因素及结合实际生产作业需求,将450 L IV型储氢瓶内胆成型模具进行了集成化创新设计,采用铝合金电加热模具并包含以下功能和结构:

- (1) 模具采用分区精密加热控制技术。
- (2) 模具具备BOSS自动锁紧/释放功能。
- (3) 模具具备抽真空、充氮气及模内冷却功能。
- (4) 模具安全定位和锁紧结构设计。
- (5) 模具旋转机构设计。

2 电加热模具设计

2.1 模具电加热设计

储氢瓶内胆模具的加热方式采用电阻丝分区精密控温进行加热,电加热部分设计主要包括电热丝功率计算、电热丝分布设计及精密控温设计。

2.1.1 电热丝功率计算

根据450 L储氢瓶内胆的产品尺寸和壁厚信息,计算得到单个产品的原材料的重量约为17.5 kg,模具铝合金部分的重量约为190 kg。滚塑成型过程中,模具通过电热丝加热,电热丝材料选用镍铬合金(电热转换率按90%),有效热量 $Q_e^{[2]}$ 被模具本身、模内粉料及模内空气所吸收,其中模内空气质量减小,可忽略不计。假设模具设定温度215℃,环境温度25℃,加热时间30~35 min,交联聚乙烯材料的PIAT温度为210℃,根据刘学军老师提出的有效热量计算公式

$Q_e = M_m c_m (T_m - T_{m0}) + M_p c_p (T_p - T_{p0}) + M_p L$, 计算得出该模具的 Q_e 值为42 044 kJ。

模具使用时处于开放环境,通常电热丝加热的传热效率约50%,产品加热成型一炉模具电阻丝的发热量至少需要84 088 kJ。换算成1 h的总发热量应为144 151~168 176 kJ,结合电热丝电热转换率,该模具实际功率应达到44~52 kW。

根据滚塑电加热实验数据统计,产品加热成型电热丝的功率比例约为40%,因此,储氢瓶内胆模具设计功率应为110~130 kW。

2.1.2 电热丝分布设计

为了提高模具温度的均匀性,将模具本体分成9个区域进行控温加热,BOSS结构单独设计为2路控温。模具控温分区设计如图2所示。

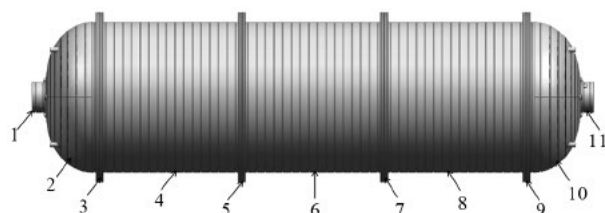


图2 模具控温区域设计

2.1.3 精密控温设计

模具各区域的温度应用PLC控制和PID控制理论,实现分级变功率恒温系统控制^[3]。当温度达到设定值后,电热丝的输出功率根据实际温度进行自动比例调节,控制原理如图3所示。

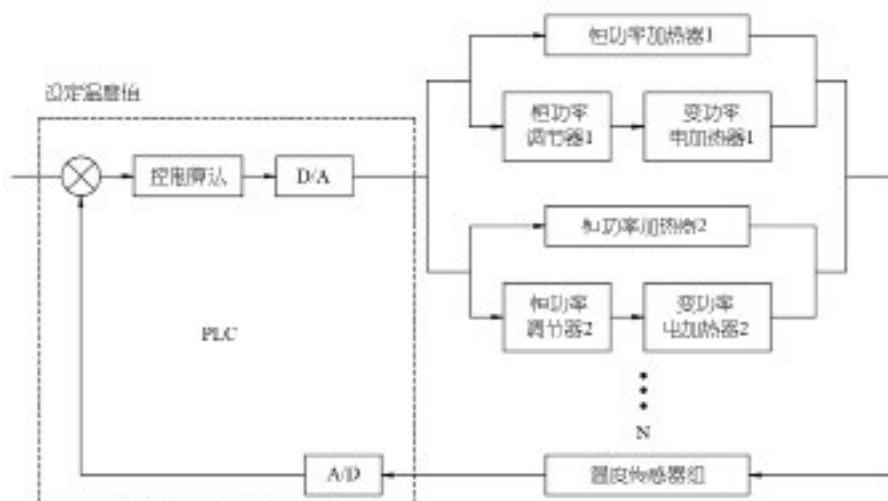


图3 分级变功率恒温系统控制原理

2.2 模具 BOSS 自动锁紧 / 释放结构设计

为了避免储氢瓶内胆在冷却收缩阶段受收缩力的影响, 导致 BOSS 与储氢瓶圆弧形封头之间产品脱层或应力集中的缺陷, 模具设计时, 考虑将一端的 BOSS 设计为固定结构, 另外一端的 BOSS 设计为自动锁紧 / 释放结构, 如图 4 所示。其中 BOSS 自动锁紧工作原理是通过两个气缸分别驱动活塞杆上的楔块往模具中心运动, 并与 BOSS 连接件的楔形面顶紧, 实现 BOSS 自动锁紧, 当制品冷却到结晶温度时, 两个气缸同时带动斜滑块后退, BOSS 连接件与 BOSS 一起会随产品冷却收缩往模具内做轴向移动。

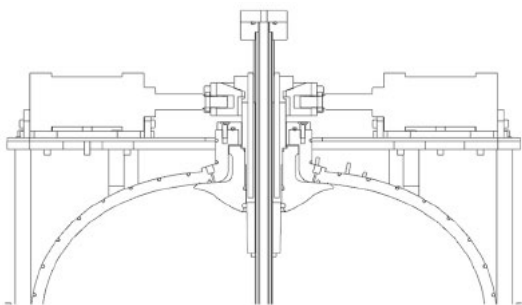


图 4 BOSS 自动锁紧 / 释放结构

2.3 模具抽真空、充氮气及模内冷却功能设计

为实现电加热模具抽真空的功能, 在模具的合模法兰上设计了密封槽结构及抽真空孔位(如图 5 所示), 以及 BOSS 与模具圆弧封头配合处设计了密封结构(如图 6 所示)。充氮气和模内冷却功能通过在 BOSS 固定件上安装通气管, 在通气管上安装气管接头及模具外围气路得以实现。

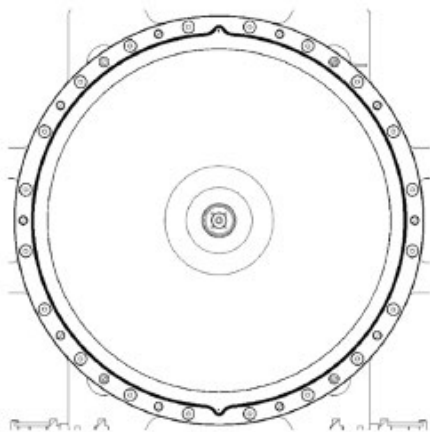


图 5 合模法兰密封槽结构及抽真空孔位

2.4 模具安全定位和锁紧结构设计

对于滚塑氢气瓶内胆模具, 拆装时其中一端的封

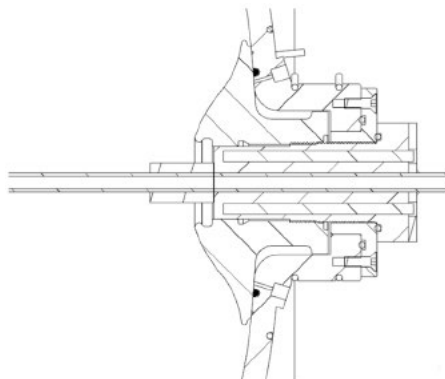


图 6 BOSS 与模具封头之间密封结构

头需要平移打开, 另外一端的封头需要平移后再旋转一定角度打开, 然后从开口处取出滚塑气瓶内胆产品。为实现快速、安全、高效拆装模具, 本模具采用合模位置独立定位销结构(如图 7 所示)和滑轨导向机构设计(如图 8 所示)。

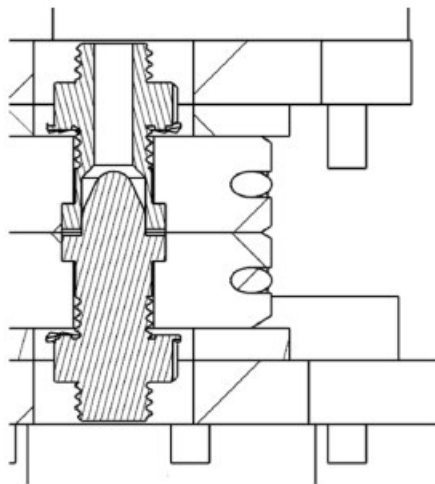


图 7 模具定位结构

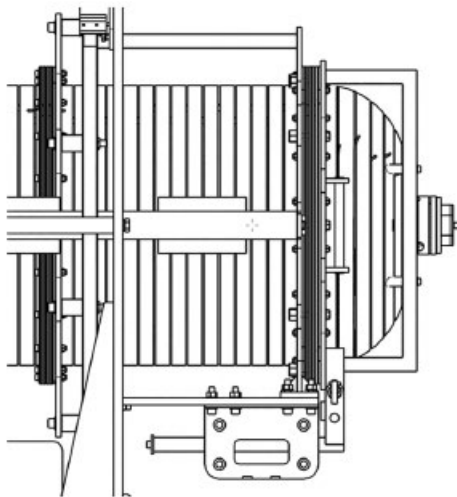


图 8 滑轨导向机构

2.5 模具旋转机构设计

为了实现模具快速更换及多功能一体化集成设计, 模具设计了独立的支撑架, 支撑架上设计有回转支撑, 回转支撑通过螺丝与支撑架连接固定, 模具主体通过螺丝与回转支撑连接, 回转支撑通过电机减速机驱动实现旋转, 如图 9 所示。

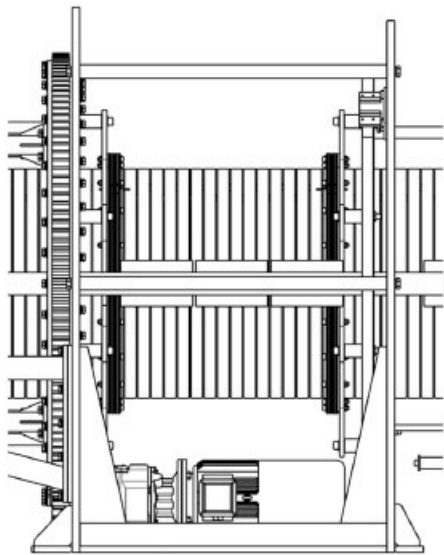


图 9 模具旋转机构

2.6 完整模具结构

设计完成后的最终模具结构图图 10 所示, 该模具的特点是模具硬件集成了导电通讯装置、气动装置、

旋转驱动装置、开合模定位导向装置、加热装置及测温系统等一体化结构, 模具安装到摇摆平台上通电后就可以加工, 具备操作简便, 温控精准等优势。

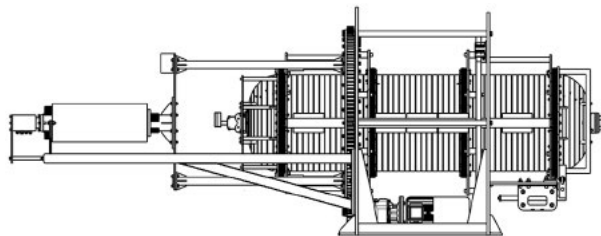


图 10 模具整体结构

3 实验验证

模具根据设计完成制造后进行了实验测试, 材料分别选用 LLDPE 和 XLPE 各进行两次实验, 实验参数及结果数据如表 1 所示。

3.1 实验说明

说明:

(1) 实验环境温度 25℃。

(2) 实验序号 1 和 2 采用的原材料为 LLDPE, 投料重量为 25 kg。

(3) 实验序号 3 和 4 采用的原材料为 XLPE, 投料重量分别为 20 kg 和 22 kg。

BOSS 自动释放温度: 实验 1:210℃; 实验 2、3、4:220℃。

表 1 实验参数及结果数据

实验序号	BOSS 预热时间 /s	BOSS 预热温度 /℃	封头预热时间 /s	封头预热温度 /℃	直段设定温度 /℃	PIAT/℃	加热丝输出功率 设定比例 /%	实际加热总时间 /s	能耗 / (kW·h)
1	600	230	0	/	190	175	65	2 250	19
2	600	230	0	/	200	175	65	1 780	17
3	600	240	0	/	215	208	65	1 377	19
4	1 000	230	600	200	215	208	50	2 400	21

3.2 实验结果

(1) 实验 1: 制品取出冷却到位后, BOSS 与塑料出现略微分层现象。

(2) 实验 2: 制品效果良好。

(3) 实验 3: 制品内表面没有流平, 有凸出的颗粒现象, BOSS 与封头连接过渡位置出现一些小气泡。

(4) 实验 4: 制品内表面较光滑, BOSS 与封头连接过渡位置气泡缺陷得到改善。

实验获得的 450 L IV 型储氢瓶滚塑内胆如图 11 所示。

通过 450 L IV 型储氢瓶内胆滚塑电加热模具实验



图 11 450 L IV 型储氢瓶滚塑内胆

数据及结合实际获得的产品质量情况可得到以下结论:

(1) 采用电加热模具进行制品生产, 可以对模具

进行精确分区加热控制,与传统滚塑成型加热方式相比,能耗可以降低 50% 以上。

(2) 对于使用电加热模具来生产常规材料滚塑制品,能耗约 0.65~1 kWh/kg。

(3) 对于 LLDPE 成型加工,随着加热设定温度的提高,成型时间可以明显缩短,能耗也可以降低。

(4) 电热丝输出功率的大小决定了制品的成型效率,输出功率越大,制品成型时间越短,但对于 XLPE 材料来说,会导致制品内表面未流平先固化的现象。

(5) 对于 XLPE 材料滚塑成型,降低电热丝功率输出百分比有助于制品内表面流平及交联度的提高。

(6) 提高封头的模具设定温度,有助于改善 BOSS 与封头塑料结合处的气泡缺陷。

(7) 模具局部进行预加热,对改善制品壁厚有显著的效果。

4 结束语

本文解析了 450 L IV 储氢瓶内胆滚塑电加热模

具,结合制品结构和模具工艺,提供了模具电加热电热丝功率计算方法,分析了滚塑氢气瓶内胆 BOSS 结构自动锁紧/释放关键技术以及说明了模具抽真空、充氮气及模内冷却功能、模具安全定位和锁紧结构、模具旋转驱动装置等关键模具结构设计。根据模具设计数据,制造出了相应的模具实物和进行了相关的实验验证,得出了一些符合实际生产的一些结论,为氢气瓶电加热模具的设计和制品成型工艺探索提供了有力指导,有助于其他模具设计工程师在设计该类型模具时进行进一步优化和提高设计效率,具有重要的意义和价值。

参考文献:

- [1] Wu Jinying, Wang Rui, Liu Ruisheng, et al. The Development Status of Composite Materials and Winding Process of Type IV Hydrogen Storage Cylinder [J]. International Journal of Automotive Manufacturing and Materials. 2025, 4(1), 4.
- [2] 刘学军. 直接电加热滚塑工艺的传热分析 [J]. 中国塑料, 2022, 36(7): 109-114.
- [3] 彭秀英, 陈亚. 基于 PID 控制的电加热杀青机分级变功率恒温控制系统研究 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2 332-2 333, 2 336.

Integrated design and experimental verification of electric heating rolling mold for type IV hydrogen storage bottle inner tank

Jiang Caiming

(Wenling Rising Sun Rotomolding Plastic Technology Co. LTD., Taizhou 317511, Zhejiang, China)

Abstract: In this paper, a special electric heating rotational molding mold system is designed by combining the structural characteristics of the 450 L type IV hydrogen storage cylinder liner and the requirements of the mold process. The system includes key technical modules such as mold electric heating wire heating, BOSS automatic locking/releasing structure, mold vacuum pumping, nitrogen filling, mold cooling, and mold positioning and guiding mechanism. Experimental verification shows that compared with traditional processes, this mold is not only easy to operate and has stable and controllable molding quality, but also significantly reduces unit energy consumption and improves production efficiency. The research results provide empirical support for the design of the IV type hydrogen storage bottle inner liner mold and reliable technical support for achieving large-scale and automated rolling molding of the hydrogen storage bottle inner liner.

Key words: IV type hydrogen storage cylinder liner; plastics rotomolding; electric heating mold

(R-03)

