

中文摘要

储氢，作为氢能源产业的中间部分，有着举足轻重的作用。以树脂为内衬的IV型储氢气瓶相比以铝为内衬的III型储氢气瓶其制造成本更低、重量更轻、使用时间更长，故成为新能源汽车等领域使用的重点。IV型储氢气瓶树脂内衬中含有金属瓶口，通过注塑的方式将树脂内衬与金属瓶口成型在一起，由于金属瓶口的存在，导致了树脂内衬结构的复杂性。在注塑成型过程中树脂内衬会产生欠注、翘曲变形等成型问题，影响其成型质量进而影响储氢气瓶的使用寿命。因此，在注塑之前对其成型过程进行模拟，从模拟结果中预测在实际生产过程中可能出现的成型问题。根据所出现的问题，优化注塑过程中的工艺参数，使注塑出的树脂内衬达到成型质量要求。

本文以IV型储氢气瓶树脂内衬(简称注塑件)为研究对象，利用 Moldflow 对注塑过程进行模拟，通过多指标工艺参数优化的方法优化成型工艺参数。研究内容分为以下几个方面：

(1) 首先将注塑件的三维模型导入 Moldflow 中，对模型进行浇口位置分析与设置，浇注系统建立，从而进行初始的注塑成型模拟，得到初始状态下的模拟结果。

(2) 之后分别以注塑件速度/压力切换时的压力下的充填量为试验指标，以熔融塑料进入模具型腔中的温度、熔融塑料进入模具型腔所需要的压力、补充熔融塑料所需要的压力、补充熔融塑料所需要的时间等工艺参数为试验因素，设计正交试验。以翘曲变形量、体积收缩率、第一主方向型腔内残余应力为试验指标，在上述四个试验因素的基础上加入补料完成之后冷却注塑件的时间、模具温度等共六个试验因素，设计 Taguchi 正交试验。并对两次正交试验的结果进行极差、方差分析。

(3) 最后采用两种多目标工艺参数优化的方法，以注塑件的各个试验指标都趋向于优化即注塑件的综合性能最高时为试验指标，优化注塑成型过程中温度、压力、时间等方面的工艺参数。对两种优化方法下的试验指标结果进行对比，得出最佳工艺参数组合，并进行注塑实验。对注塑完成之后注塑件的轮廓度进行测量，结果显示：注塑件的轮廓度为 0.4475mm 与模拟所得的翘曲变形量 0.4978mm 相近，表明通过优化在注塑过程的一些工艺参数进而达到优化注塑件的性能的方法是可行的。

关键词：IV型储氢气瓶树脂内衬；注塑成型模拟；多指标工艺参数优化；注塑实验；轮廓度

ABSTRACT

Hydrogen storage, as an intermediate part of the hydrogen energy industry, plays a pivotal role. The resin-lined type IV hydrogen storage vessel has lower manufacturing cost, lighter weight and longer service life than the aluminum-lined type III hydrogen storage vessel, so it has become the focus of energy vehicles and other fields. The resin liner of type IV hydrogen storage vessel contains a metal bottle mouth, which is connected with the resin liner and the metal bottle mouth by injection molding. Due to the existence of metal bottle mouth, the structure of resin liner is complicated, and the forming problems such as short shot and warping deformation occur in the process of injection molding, which affect the forming quality of resin liner and then affect the service life of hydrogen storage vessel. Therefore, the molding process was simulated before injection molding, and the possible forming defects in the actual production process were shown from the simulation results. According to the problems, some process parameters that can be controlled and adjusted in the injection process are optimized, so that the resin liner can meet the molding quality requirements.

In this paper, the resin liner of type IV hydrogen storage vessel(referred to as injection parts) Moldflow was used to simulate the injection molding process and optimize the molding process parameters by multi-objective process parameter optimization method. The research content is divided into the following aspects:

(1) Firstly, the three-dimensional model of injection parts was imported into Moldflow, gate position analysis and setting of the model were carried out, and the pouring system was established, so as to conduct the initial injection molding simulation and obtain the simulation results in the initial state.

(2) Then, taking the filling amount under the pressure of the speed/pressure switch of injection parts as the test index, the process parameters such as the temperature of the molten plastic entering the mold cavity, the pressure required for the molten plastic entering the mold cavity, the pressure required to supplement the molten plastic and the time required to supplement the molten plastic were selected as the test factors to design the orthogonal test. Taking warpage deformation, volume shrinkage and residual stress in the cavity in the first main direction as test indexes, the Taguchi orthogonal test was designed by adding six factors

on the basis of the above four test factors, such as the cooling time of injection parts after the completion of replenishment and mold temperature. The results of two orthogonal experiments were analyzed by range and variance.

(3) Finally, two multi-objective process parameter optimization methods were used to optimize the process parameters of temperature, pressure, time, etc. which could be controlled during the molding process, taking each test index of injection parts tended to optimize, that mean the highest comprehensive performance of injection parts as the test index. Under the two methods of optimization results of the test index is compared, the experiment in injection molding process parameters combination are obtained, and the injection molding experiment. After the injection molding, the profile tolerance of the injection molding was measured. The results showed that the profile tolerance of the injection molding was 0.4475mm, which was similar to the warping deformation obtained in the simulation of 0.4978mm. The results show that it is feasible to optimize the performance of injection parts by optimizing some process parameters in the injection process.

Key words: The resin-lined type IV hydrogen storage vessel; Injection molding simulation; Multi-objective process parameter optimization; Injection molding experiment; Profile tolerance

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 IV型复合材料储氢气瓶国内外研究现状	2
1.2.1 国外研究现状	2
1.2.2 国内研究现状	2
1.3 注塑成型简介	3
1.3.1 注塑成型过程	3
1.3.2 注塑成型工艺条件	5
1.3.3 注塑成型 CAE	6
1.4 注塑成型国内外研究现状	7
1.4.1 国外研究现状	7
1.4.2 国内研究现状	8
1.5 本文的主要研究内容	9
1.5.1 课题研究的意义	9
1.5.2 课题研究的主要内容	9
1.5.3 拟解决的问题	10
1.6 本章小结	10
第二章 塑料注塑成型理论与注塑成型模拟	11
2.1 塑料注塑成型流变学原理	11
2.1.1 连续性方程	11
2.1.2 动量方程	12
2.1.3 能量守恒方程	12
2.1.4 本构方程	13
2.1.5 状态方程	13
2.2 Moldflow 简介	13
2.3 注塑成型模拟分析前处理	14
2.3.1 模型导入	14
2.3.2 网格划分	15
2.3.3 材料的选择及工艺性能	16

2.3.4 浇口位置分析.....	17
2.3.5 浇注系统的建立.....	17
2.4 初始条件下注塑成型模拟.....	18
2.4.1 充填时间.....	18
2.4.2 速度/压力切换时的压力.....	19
2.4.3 流动前沿温度.....	19
2.4.4 熔接线.....	20
2.4.5 体积收缩率.....	20
2.4.6 第一主方向型腔内残余应力.....	21
2.4.7 翘曲变形.....	21
2.5 本章小结.....	22
第三章 基于 Taguchi 正交试验工艺参数优化.....	25
3.1 Taguchi 试验简介.....	25
3.1.1 正交试验.....	25
3.1.2 正交试验数据分析方法.....	26
3.2 欠注分析与正交试验设计.....	28
3.2.1 欠注产生的原因分析.....	28
3.2.2 正交试验设计及结果.....	29
3.2.3 欠注极差与方差分析.....	30
3.3 注塑件充填过程中压力变化.....	32
3.4 优化工艺可行性验证.....	32
3.5 Taguchi 正交试验设计.....	34
3.5.1 正交试验设计及结果.....	34
3.5.2 信噪比 S/N 试验设计及结果.....	35
3.5.3 翘曲变形量信噪比极差与方差分析.....	37
3.5.4 体积收缩率信噪比极差与方差分析.....	40
3.5.5 第一主方向型腔内残余应力信噪比极差与方差分析.....	43
3.6 本章小结.....	46
第四章 多指标工艺参数优化研究.....	49
4.1 多指标工艺参数分析方法.....	49

4.1.1 综合评分法	49
4.1.2 灰关联分析法	49
4.2 基于综合评分法的多指标工艺参数优化研究	49
4.2.1 单项评价指标评分	50
4.2.2 综合加权评分	50
4.2.3 工艺参数优化结果分析	51
4.3 基于灰色关联度多指标工艺参数优化研究	54
4.3.1 灰色关联分析	54
4.3.2 工艺参数优化结果分析	57
4.4 本章小结	61
第五章 注塑成型实验验证	63
5.1 注塑实验	63
5.1.1 注塑机简介	63
5.1.2 试模试验	64
5.2 三坐标测量仪测量注塑件轮廓度结果分析	66
5.3 本章小结	67
第六章 结论与展望	69
6.1 结论	69
6.2 展望	69
参 考 文 献	71
致 谢	77
攻读学位期间发表的学术论文目录	79

第一章 绪论

1.1 引言

由于不可再生化石燃料的过度使用带来了日益严重的环境污染和能源危机。在全球能源向以减少环境污染、可持续利用等的条件为基础的趋势下，氢作为石油和天然气等传统能源最发达的替代品之一^[1-2]，具有长时间无限制使用，对环境友好无污染等优点，基于以上特点，对于氢能源产业的研究是非常重要且具有意义的。氢能源产业大体可由三部分组成，即生产氢气、运输氢气、利用氢气等。其中运输氢气作为氢能源产业的中间部分^[3]，起着“承上启下”的作用。

经济、高效和安全的储氢是氢经济发展的关键^[4]。高压气态储氢即通过高压压缩的方式存储处于氢气临界温度以上的气态氢，具有释放率高，填充速度快、温度适应范围广等优点^[5-6]，在汽车领域的运用十分的广泛且有较好的发展前景。高压储氢容器最开始为由纯钢制的I型全金属气瓶；之后发展了II型、III型、IV型储氢气瓶。他们的不同点在于内衬材料的选择上，II型储氢气瓶的内衬为钢，III型储氢气瓶的内衬为铝，IV型储氢气瓶的内衬为聚合物，相同点在于内衬的外层都包裹着纤维树脂复合材料^[7-8]。35MPa 压力下内衬为铝的III型储氢气瓶在车辆高压储氢系统中使用范围最广，由于研发时间早、研究范围广且研究分析比较全面，III型储氢气瓶目前已成为最为成熟的储氢技术。对于使用时间较长、范围较广的III型气瓶，国内外学者对其结构设计、强度分析、冲击损伤、使用寿命等进行了系统的分析研究^[9]。然而，铝内衬的成本较高且存储质量不能满足车辆行程范围的要求^[10]。基于此，众多专家学者将研究重点转向70MPaIV型储氢气瓶。



图 1.1 高压储氢容器的四个发展阶段

Fig. 1.1 Four stages of development of high pressure hydrogen storage vessel

70MPa IV 型复合材料储氢气瓶以其质量轻、耐腐蚀性好、安全性好、成本低、使用寿命长等特点受到了广泛关注。IV型复合材料储氢气瓶是由最里面的聚合物内衬、在内衬表面缠绕的碳纤维层、防止气瓶受到损伤而设置的保护层等三部分组成。内衬主要起密封作用，防止内部储存的高压气体泄漏，内衬外面包裹的碳纤维层是承担气瓶受力的主要部分。

国外专家学者对于 IV 型储氢气瓶的结构设计、生产过程、使用安全等作了大量的分析研究，日本等国家的 IV 型储氢气瓶已经可以满足汽车在工作中的使用要求。我国对于这种能够满足汽车工作需要且对环境无污染的 IV 型储氢气瓶的研究起步较晚，但越来越多的学者、高校汽车企业等加入了 IV 型瓶的研究，取得较为可观的研究成就^[11]。

1.2 IV型复合材料储氢气瓶国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

Park G 等以优化IV型储氢气瓶的复合层厚度为目标，通过响应面法、网格理论、有限元模拟优化内衬凸台段的形状，进而获得了最佳复合层厚度^[12]。Julie Pepin 等以减压试验和数值模拟相结合的方法，用于确定导致 IV 型储氢容器中内衬坍塌的影响因素。通过减压实验结果表明，内衬/复合材料界面与内衬自由表面之间的压差是导致内衬坍塌的主要因素^[13]。Qiao guo Wu 等以 HDPE 内衬复合压力气瓶为研究对象，对内衬的预充压力方面进行了分析并建立有限元模型，基于失效准则和退化准则对建立的有限元模型进行了渐进损伤，得出气瓶的破裂压力^[14]。Yu Sun 等全面研究了IV型储氢罐的内衬材料为填充层状无机成分（LIC）的 PA6 和改性 PA6 时内衬在不同温度压力时的氢渗透性能、机械性能等。研究结果表明，LIC/PA6 可以在较高的温度下结晶，结晶速度更快，阻氢渗透性能更好，拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量优于 PA6^[15]。Ming Zhang 等根据储罐失效分析的关键参数即爆裂压力、损伤状态、疲劳寿命等，以材料性能退化方法（MPDM）、连续损伤力学（CDM）为理论基础，综述了复合高压储氢罐的失效行为的分析方法和预测的模型^[16]。Qian Zhang 等对 70MPa IV 型储氢容器的拱顶厚度分布通过三次样条函数、可变极半径进行模型的预测，利用最大应变和应力准则对纤维铺层进行评估；同时通过缠绕张力的变化来计算施加在衬里上的压缩压力，研究结果表明在 70MPa 的内压下，最大应变和应力均不大于屈服强度，填充氢气时的适当内部压力范围为 0.11-0.15MPa^[17]。

1.2.2 国内研究现状

虽然我国对 IV 型瓶的研究起步较晚，但众多学者对IV型储氢气瓶的内衬、外层碳

纤维缠绕、气瓶的结构设计进行了多方面的研究。

赵保嶝等人以气-固渗透理论为基础,从内衬材料本身及所处外部条件两方面描述了内衬氢渗透产生的原因,并对国内外内衬材料氢渗透性的测试方法进行了总结^[18]。徐亮等人对储氢气瓶气密实验过程进行了模拟,模拟结果表明在气瓶充气过程中,瓶内气体的温度会不断升高,瓶口处的进气温度低于气瓶末端位置处的温度,为验证模拟的效果,通过运用热电偶及红外热像仪对模拟结果进行实验验证,实验的结果表证了模拟的准确性^[19]。时中猛等人建立了碳纤维复合材料气瓶在受到紫外线照射下老化的使用寿命预测模型,利用荧光紫外灯人工加速老化的方法模拟气瓶在使用过程中因受到自然光中的紫外线,运用扫描电子显微镜和 X 射线光电子能谱对紫外线辐射碳纤维材料进行表征,结果表明紫外老化对表层纤维具有明显的损伤作用^[20]。胡正云等人将非测地线缠绕分为在一定拐点、角度两种情况下进行分析,得到两种情况下的滑移系数,同时运用试验验证了测地线与非测地线两种工艺的预测爆破压力,实验表明,非测地线缠绕工艺能够提高气瓶的爆破压力^[21]。孟祥武等人以缠绕张力、刮胶板和滚胶筒之间的间隙、缠绕后处理为试验因素,设计了正交试验,探究与国产 T700S 碳纤维相匹配的树脂体系,为国产碳纤维的应用提供了参考^[22]。

综合上述分析,国内外大多数专家学者的研究重点在IV型气瓶树脂内衬生产完成后的后续工作,例如内衬的密封性,内衬上的纤维铺层的方式、纤维缠绕,气瓶的使用安全、寿命等。但对于内衬的成型方式及成型中可能出现的问题,研究较少。

1.3 注塑成型简介

1.3.1 注塑成型过程

树脂广义上是指用作塑料基材的聚合物或预聚物,是塑料的主要成分。塑料是现代全球经济几个领域中使用最广泛的材料之一,以其便宜、化学稳定性好、耐腐蚀、对环境污染小等特点,在人们的日常生活中以及其他领域应用广泛。塑料较为广泛的成型方式有:注塑成型、吹塑成型、挤塑成型、滚塑成型。

注塑成型,首先将在实验中所需要的材料通过料斗倒入注塑机的料筒中,之后料筒周围的加热装置会将材料进行融化,融化后的材料在螺杆或柱塞的推动从喷嘴中注入已经合模的模具中,最后经过持续的送料、施加压力压实熔料、冷却、从模具中脱离出来等过程形成与模具相同形状的成型件。

吹塑成型,通过挤出机挤出熔融管状材料后,熔融材料被吹塑模具包裹,然后吹到熔体的中间,使熔体靠近模具的内壁,并冷却以形成塑件的形状

挤出成型，是将熔融材料通过具有一定界面形状的模具挤出并冷却以获得成型件。

滚塑成型，是将粉末或液体材料添加到模具中，并使其围绕两个相互垂直的轴旋转，在模具上均匀加热和使用，然后冷却以获得成型件。表 1.1 为塑料成型方式的优缺点对比。

表 1.1 为塑料成型方式的优缺点对比

Table 1-1 compares the advantages and disadvantages of plastic molding methods

	注塑成型	吹塑成型	挤塑成型	滚塑成型
优点	成型件精度高、可靠性高、尺寸稳定性高，成型周期短	成型件表面光滑，具有良好的抗冲击性，生产效率	生产效率高，设备成本低	生产成本低，原料利用率高，成型件壁厚均匀
缺点	生产成本高，不适合单件小批量生产	成型件容易产生飞边	成型件致密性差	成型件尺寸精度差，成型周期长

注塑成型也称注射成型，可以用来生产形状复杂的塑料成型件，是目前塑料加工中采用的最为普遍的方法，具有应用面广、生产操作容易、成型周期短、生产效率高

等优点。注塑成型工艺过程可分为注塑前期的预处理阶段、注塑成型过程、成型件脱模后的后处理等三个阶段^[23-24]。为保证注塑生产过程的顺利进行以及确保成型件的质量达到要求，需要对注塑所需要的塑料的颗粒大小是否均匀、是否有杂质等进行检验。同时根据所选材料的工艺性能对材料进行干燥除湿处理。本文注塑件成型所选用的塑料为 PA6，PA6 最为明显的缺点即吸水性非常高，影响成型件的质量，因此在注塑成型前对 PA6 利用真空烘箱进行干燥处理。

在注塑成型过程中，经过预处理后的固体塑料颗粒在根据其工艺特点设定的料筒温度下加热融化，在温度以及注塑机柱塞或螺杆的转动压力下，固体塑料颗粒融化为具有黏性的粘流液态。之后通过注塑机柱塞或螺杆的推动将液态塑料注射到一定温度的模具中，塑料注入模具中受到冷却，塑料的黏性增大，柱塞或螺杆的推力需持续增大才能将浇口位置附近的熔料推入到模具中。

为提高成型件的性能和尺寸稳定性，通常在注塑完成后进行后处理。成型件常见的后处理方式有退火处理、调湿处理。由于塑料在注塑机料筒内在塑化的过程中受热不均匀以及在模具中冷却速度不同导致成型件存在内应力，内应力的存在会使含有金属嵌件的成型件在之后的储存和使用中表面容易产生裂纹、熔接线，力学性能下降，

故进行退火处理、调湿处理等。

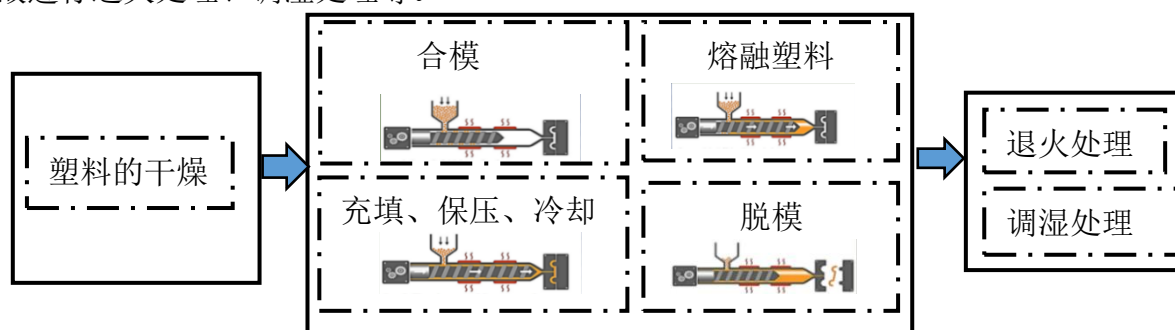


图 1.2 注塑成型过程流程图

Fig. 1.2 Flow chart of injection molding process

1.3.2 注塑成型工艺条件

生产出符合设计要求的高质量的注塑件涉及的因素有很多，比如注塑机设备、模具结构、生产的原材料、操作工人的熟练程度等，在这些因素确定之后，注塑过程中的一些工艺参数则成为了成型件质量变化的较为重要的条件^[25]。这些较为重要的工艺参数包括温度、压力、时间等三个方面。

1. 温度

注塑过程中需要控制的温度主要有料筒温度、喷嘴温度、模具温度。

(1) 料筒温度

从注塑机料斗的末端到喷嘴的前端都属于料筒温度的分布段。料筒温度有 5-6 个加热段，料筒温度的选择与塑料的特性、成型件的壁厚、塑料中是否含有填充物等有关。料筒温度决定着塑料的熔体温度，直接影响充填过程及注塑件的质量。料筒温度高，熔体的黏度降低，注塑机设定的压力小，熔体在模具中的流动性增加，减少了欠注、熔接线等成型缺陷产生的可能。反之，料筒温度低，熔体的流动性降低，产生各种成型缺陷。

(2) 喷嘴温度

喷嘴温度过高，在注塑机的喷嘴位置处，熔料容易漏出，喷嘴温度的设置不能太低，如果温度太低，熔融塑料会在料筒中凝成固体状，进而将注塑机的喷嘴堵住，影响注塑成型。

(3) 模具温度

模具温度对熔融塑料的流动性、注塑件的表面质量和内在性能具有很大的影响。模具温度提高可以提高熔融塑料在型腔中的流动性能、结晶度升高，提高了注塑件表面的光洁程度。但是，较高的模具温度会使脱模后的注塑件体积收缩率增大、翘曲程度增大，所需要的冷却时间加长，成型周期变长，效率降低。

2.压力

注塑过程中的压力主要包括注射压力和保压压力

(1) 注射压力

熔融塑料之所以能够从注塑机的料筒经过喷嘴到达模具型腔中所依靠压力的即为注射压力。注射压力的大小与注塑机的类型、塑料的种类、注塑件的壁厚、模具结构的设计、模具温度等因素有关。

(2) 保压压力

在充填阶段完成之后，需要对模具中已经充填的熔料进行再次补料，补料所需要的压力即为保压压力。保压压力对成型件的成型质量有很大影响，保压压力设置的太大，熔料补充的太多，成型件可能会溢料进而产生毛边等问题，同时对原材料也造成了一种浪费；保压压力设置的太小，型腔中所需的熔料没有补充完全，则成型件会产生充填不足等问题。因此设置合适的保压压力，才能生产出符合产品质量要求的成型件。

3.时间

完成一次注塑过程所需要的时间由充填时间、保压时间、冷却时间组成。

(1) 充填时间

充填时间是从活塞在注塑机油缸内开始移动算起，直到模具型腔内完全充满熔融塑料为止。

(2) 保压时间

保压时间即保压压力对型腔中的熔料进行补料的时间。保压时间的长短与成型件的重量有关。保压时间在完成一次注塑所需要的时间中占据较大的比例，影响成型件的成型质量。保压时间设置的太短，则在进行补料的压力会迅速降低，导致熔料回流，引起成型件的表面产生缩痕等成型缺陷。保压时间设置的太长，补料的压力也会持续存在，容易在模具型腔中产生过大的残余应力，使得注塑件脱模困难，表面产生划痕。

(3) 冷却时间

冷却时间在一次注塑成型过程中所用的时间中所占的比例较大，冷却时间的长短取决于成型件的厚度、熔体温度、模具温度的设置等多方面因素。

1.3.3 注塑成型 CAE

注塑是一个重要的生产过程，注塑制品占有塑料制品的 33%左右^[26]，塑料所制造的产品已经从之前的广泛应用于生活到现在已经可以运用到各个领域。对于注塑成型来说，成型件的尺寸稳定性高、可靠性高，但对于成制件成型质量的把控大多依靠

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/076103123143010202>