



天津中德应用技术大学

Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

PMI 泡沫定型工艺参数的优化改进研究

Research on Optimization and Improvement of PMI Foam

Setting Process Parameters

姓 名 贾乙可

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 傅雅宁

职 称 副教授

完成时间 2020 年 5 月 30 日

天津中德应用技术大学
本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

年 月 日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

摘 要

火箭中的整流罩具有良好的透波性和强度，它的半前锥段采用了泡沫夹层结构；由玻璃钢面板、加强板、PMI 泡沫及金属件四部分组成。在以往半前锥段生产过程中，由于其中的 PMI 泡沫定型的一次交验合格率低和返工程度高的情况，造成了产品整体的成型周期长，所以我们要提高 PMI 泡沫一次交验的合格率。

首先我们对 PMI 泡沫定型中存在的问题进行统计，确定对合格率影响较大的缺陷类型，并测量产品的相关数据，其次通过运用过程失效模式、后果分析等方法确定可能造成缺陷产生的原因因素，并采用全因子分析、一般线性模型等方法找到关键的影响因素，最后制定出与之相符合的改进措施，来提高 PMI 泡沫一次交验的合格率。

通过实验的结果可以得到，PMI 泡沫的合格率均已超过百分之 90，同时为整流罩的后续生产步骤节省了很多时间，提高其整个产品的生产效率。

关键词：PMI 泡沫；复合材料；质量改进

ABSTRACT

The fairing in the rocket has good wave permeability and strength. Its half front cone section adopts foam sandwich structure, and consists of four parts: FRP panel, reinforcing plate, PMI foam and metal parts. In the past semi semi conical section production process, due to the low qualified rate and high rework rate of PMI foam forming, the overall forming cycle of the product is long, so we have to increase the pass rate of PMI foam.

First of all, we made statistics on the problems existing in the PMI foam stereotype, identified the types of defects that affect the qualification rate, and measured the relevant data of the products. Secondly, we identified the possible causes of the defects through the use of process failure mode and consequence analysis, and used the full factor analysis and the general linear model to find the key influencing factors. The corresponding improvement measures should be taken to improve the pass rate of PMI foam.

According to the experimental results, the qualified rate of the PMI foam has exceeded ninety percent, and at the same time, it saves much time for the subsequent production steps of the fairing and improves the production efficiency of the whole product.

Key words: PMI foam; Compound material; quality improvement

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 发现问题	1
1.3 缺陷的定义	2
1.4 产品需要达到的目标	2
第二章 测量阶段	4
2.1 测量系统分析	4
2.2 数据收集计划	4
2.3 现有生产能力分析	5
2.4 收集潜在影响因子	5
2.5 FMEA 分析	7
2.6 快速改善	10
2.7 小结	12
第三章 分析阶段	13
3.1 X 因素的检验和数据收集计划	13
3.2 因素的分析	14
3.3 小结	20
第四章 改善阶段	21
4.1 改善阶段计划	21
4.2 改善阶段实验	21
4.3 改善结果分析	25
第五章 标准化阶段	27
5.1 改善措施的标准化的	27
5.2 改善效果验证	27
结论	29
参考文献	30
致谢	31

第一章 绪论

1.1 研究背景

PMI 泡沫的全称叫作聚甲基丙烯酸酯亚胺,是一种轻质高强度的泡沫塑料,在德国首先研制成功并开始了工业化生产,具有密度小、耐高温、抗压和比强度高特点,具有优异的二次加工性能,可加温成形、机械加工成形,具有良好的与其他复合材料粘接及加温加压复合固化等综合性能,多被用于复合材料结构件的夹层材料^[1]。近年来,这种夹层材料在航空航天以及民用等领域大量应用,尤其是美国、日本、德国等一些发达国家。

在国内方面 PMI 泡沫在我们国家运载火箭的整流罩中也有大量的应用,运载火箭整流罩被用于保护卫星及其它有效载荷,以防止卫星受气动力、气动加热及声振等有害环境的影响。为了保证整流罩具有良好的透波性和强度,它的半前锥段就采用了泡沫夹层结构;由玻璃钢面板、加强板、PMI 泡沫及金属件四部分组成。在以往半前锥段生产过程中,由于其中的 PMI 泡沫定型的一次交验合格率低,从而造成了产品整体的成型周期长,所以它成为了影响长征系列运载火箭产能提高的原因之一。

1.2 发现问题

对近几年的 PMI 泡沫定型的一次交验合格率进行统计,采用 P 控制图对 PMI 泡沫一次交验合格率数据的均值和稳定性进行分析,由结果(图 1-1)可知 PMI 泡沫定型的一次交验合格率的均值为 46.06%,稳定性良好,但一次交验合格率偏低。

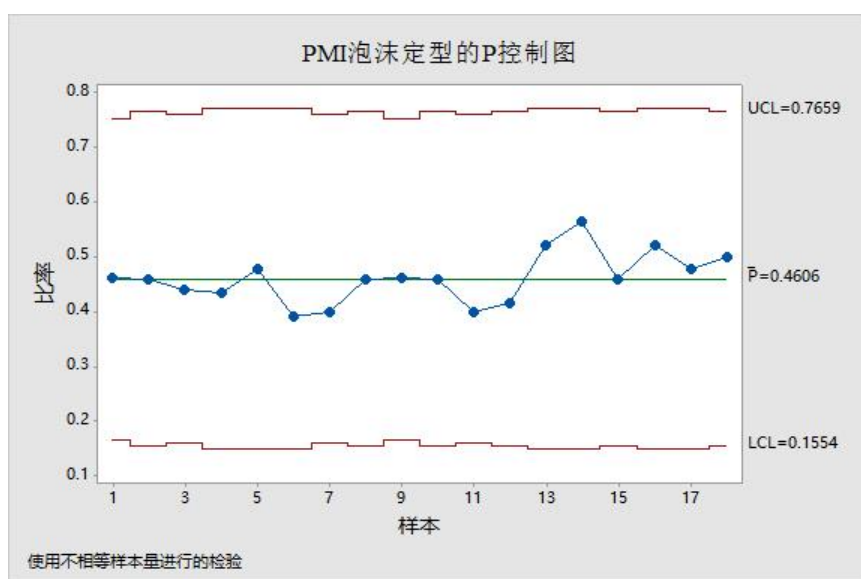


图 1-1 冯卡门结构 PMI 泡沫定型一次交验合格率的 P 图

对历年泡沫定型不合格的产品进行统计，并按照缺陷类型进行分类。采用排列图比较缺陷对泡沫一次交验合格率的影响，由结果（图 1-2）可知，占发生频数总数 80%左右的缺陷是泡沫随型差（间隙大）、下陷尺寸超差、下陷位置超差，因此需要改善的过程关键输出变量为间隙值、下陷尺寸、下陷位置。

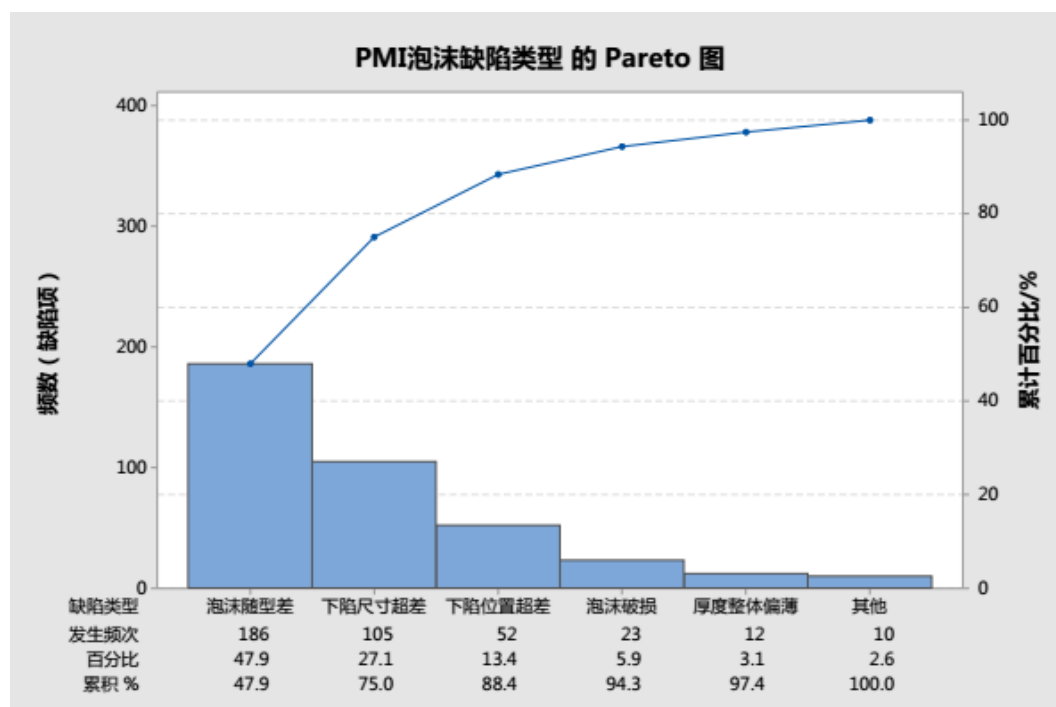


图 1-2 泡沫缺陷 Pareto 图

1.3 缺陷的定义

根据单位方面的要求确定缺陷的认定范围：

- （1）泡沫随性差：泡沫与模具之间的间隙大于 10mm
- （2）下陷尺寸超差：泡沫下陷尺寸不在 1.9-2.1mm 之间
- （3）下陷位置超差：下陷位置与理论线最大偏差超过 6.0mm

1.4 产品需要达到的目标

根据单位的决定为了提高 PMI 泡沫定型一次交验合格率，并结合自身“降本增效”的要求，最终确定本项目的改善目标为冯卡门结构 PMI 泡沫定型一次交验合格率不低于 90%（图 1-3）。

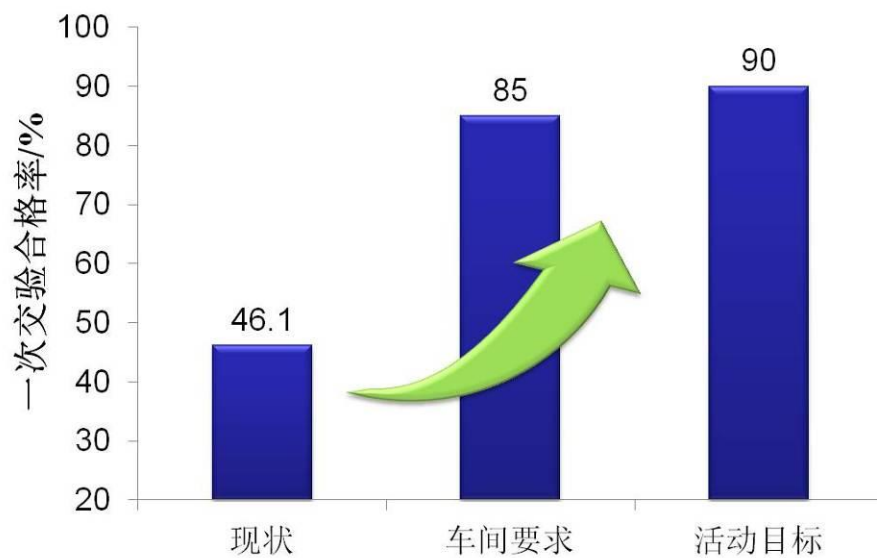


图 1-3 单位要求目标图

第二章 测量阶段

2.1 测量系统分析

2.1.1 测量对象明确

PMI 泡沫定型工艺流程：泡沫原材料准备、泡沫包覆、泡沫加热与压型、泡沫粗修、泡沫进罐整形、泡沫下陷修磨以及交付测量。流程中涉及的测量工序分别为泡沫修磨、下陷修磨以及交付测量三个工序。为确保测量系统的有效性，设计试验收集相关数据进行分析。

2.1.2 测量系统说明

测量对象：泡沫与模具的间隙值、泡沫下陷尺寸、泡沫下陷位置与理论线偏移量

测量工具：游标卡尺

测量方法：以模具内表面为基准，测量泡沫与模具之间的间隙值；以泡沫未修磨区域为基准，测量下陷尺寸；以模具对接桁曲线为基准，测量泡沫与对接桁曲线的最大偏移量；按照《游标卡尺操作规程》完成测量操作。

测量方案：为了验证测量系统的精确度，将定型后的 PMI 泡沫编号，按照随机原则，由三名测量员选定的 10 件产品来进行测量，每人测量两次且并记录结果。

测量结果：根据每个人测量出的结果统计对比发现，测量的准确性较高，能够满足生产的需求。

2.2 数据收集计划

确定测量系统精确性和准确性满足要求后，制定了详细的数据收集计划（表 2-1），并开展数据收集工作。

表 2-1 数据收集计划

怎么使用数据				如何分析和描述数据				
1、过程稳定性分析				1、概率图				
2、过程能力分析				2、直方图				
3、原因分析				3、描述统计				
				4、Pareto 图				
业绩测量指标	运作定义	目的	数据来源	样本大小	数据收集时间	数据收集方法		
泡沫一次交验合格率	一次定型合格的泡沫与总数量之比	建立项目基线	生产原始记录	可统计的历史数据	2019-2020	统计收集时间内全部数据		

2.3 现有生产能力分析

由图 1-3 的结果得到一次交验合格率仅为 46.1%，说明我们现有生产过程控制能力严重不足。

2.4 收集潜在影响因子

2.4.1 因果矩阵分析

我们通过现场生产调查并且开展头脑风暴等形式，建立出项目的因果矩阵（表 2-2），对影响 PMI 泡沫定型一次交验合格率的因子进行筛选和汇总。

表 2-2 项目因果矩阵

序号	工序	数据来源	源于 VOC			总分	比例
		权重	6	8	7		
		输入	下陷精 度	下限位置	泡沫与模 具间隙		
1	PMI 泡沫准 备	原材料批次差 异	0	0	3	21	5.50
2		原材料性质	0	0	3	21	5.50
3	PMI 泡沫包 覆	包覆数量	0	1	1	15	3.93
4	PMI 泡沫加 热	升温速率	0	1	3	29	7.59
5		加热温度	0	1	3	29	7.59
7		保温时间	0	1	3	29	7.59
8	PMI 泡沫压 型	压型时间	0	1	3	29	7.59
9		压型模具间隙	1	1	0	14	3.66
10		模具半径	0	3	3	45	11.78
11	PMI 泡沫粗 修	粗修位置	0	1	1	15	3.93
12	PMI 泡沫下 陷修磨	定位方式	1	3	0	30	7.85
13		修磨方式	3	1	0	26	6.81
14	PMI 泡沫保 存	保存时间	0	1	3	29	7.59
15		存放湿度	0	0	3	21	5.50
16		存放方式	0	1	3	29	7.59
合计			5	16	32	382	100.0 0

2.4.2 影响因子汇总

在因果矩阵基础上,利用 Pareto 对各影响因子进行筛选,结果如图 2-1 所示。., 筛选出了 11 项可能对 PMI 泡沫定型一次交验合格率具有较大影响的因子,采用 FMEA 对各因子可能引起的风险进行识别,确定改善的顺序。

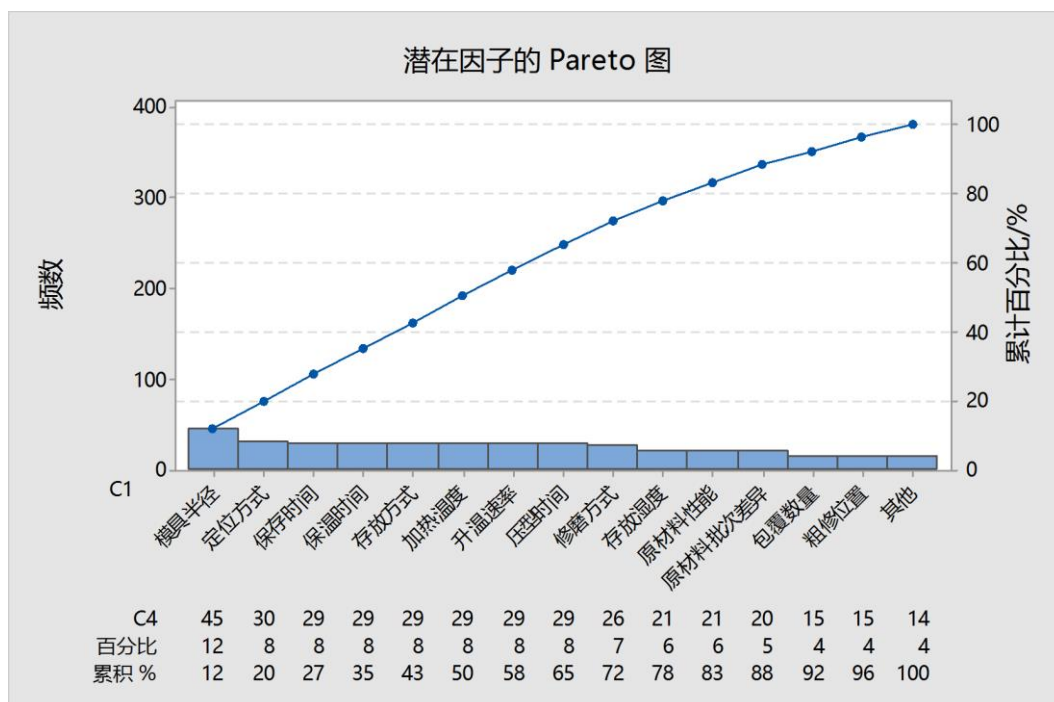


图 2-1 过程因子的 Pareto 图

2.5 FMEA 分析

针对上述 11 项可能的因子开展 FMEA 分析，结果如表 2-3 所示。经筛选确定了 11 个主要影响因素的风险值 (RPN)，根据 RPN 值确定改善方向，其中分值大于 120 的为迫切需要改进的因子，优先级为 A 级；分值为 80~120 之间的为需要改进的因子，优先级为 B 级；其余的为 C 级。

表 2-3 FMEA 分析

过程 步骤 功能	要求	潜在 失效 模式	潜在失 效后果	严 重 度 (S)	分 类	潜在失效起因	现行过程控制				RPN
							预 防 控 制	发 生 频 度 O	探 测 度 控 制	探 测 度 D	
泡沫 准备	原材 料性 能	泡沫 密度 偏大	定型后 泡沫变 形较大, 返工	5	■	泡沫密度较大, 定 型后内应力较大	原材 料复 验	2	称重	5	50
PMI 泡 沫加热	按照 定型 工艺 进行 操作	升温 速率 快	定型效 果差, 返 工	5	▼	降温速率快, 内应 力释放不完全, 造 成泡沫回弹量大	设备 定期 维 护, 运行 正常	5	监测 设备 数据	4	100
		加热 温度 偏低	定型效 果差, 进 行二次 定型	5		温度较低未到达 软化点, 造成内应 力较大		4		4	80
		加热 温度 偏高	二次发 泡, 造成 泡沫报 废	7		温度过高造成泡 沫内部引发剂发 生二次反应		2		4	56
		保温 时间 短	定型效 果差, 返 工	5		内应力释放不完 全, 造成泡沫回弹 量大		3		4	60
PMI 泡 沫定型	泡膜 厚 度、 曲 面 均 满 足 要 求	压型 时间 短	成型效 果差, 返 工	5	▼	残余内应力引起 较大反弹	设置 定型 时间	5	查看 生产 记录	4	100
		模具 半径 偏大	不符 合产 品曲 面要 求, 返工	7		以模具为基准进 行泡沫定型, 造成 泡沫曲面不符合 要求	依据 经验 操作	4	观察 模具 与泡 沫之 间的 间隙	4	112
		模具 半径 偏小	产品 内应 力较 大	5		模具半径较小时, 定型后的泡沫半 径较小, 内应力较 大, 在应力的作 用下出现较大变 形	4	4	80		

(续表 2-3)

PMI 泡沫下陷修磨	下陷位置和精度均满足要求	定位方式不精准	返工,对偏移处重新修磨	5	■	泡沫为双曲面结构,下陷位置难以确定	试拼和修磨交替	7	对所有产品进行全检	5	175	
		下陷修磨精度无法控制	返工,修磨超差位置	5		泡沫为双曲面结构,精度难以控制		7		5	175	
PMI 泡沫保存	泡沫间隙满足要求	存放时间较长,泡沫出现较大反弹	返工,对泡沫重新定型	5	▼	在泡沫内应力随时间逐渐释放的过程中,反弹量逐渐增加	设置最长存放时间	7	查看生产记录	5	175	
		存放湿度大	PMI 泡沫吸湿,返工	5		PMI 泡沫中含有酰胺基基团,吸湿后性能下降						/
		存放方式不合理	泡沫变形量大,返工	4		泡沫局部手里,易产生变形		/		5	4	80

根据各因子改善难易程度、所需要的技能以及产品的特点,整理出泡沫下陷尺寸、下陷位置超差、泡沫与模具的间隙大的失效点和改善方式(表 2-4)。

表 2-4 各因子失效点和改善方式

Y	y	关键失效点	改善方式	快速改善	阶段改善	
PMI 泡沫定型一次交验合格率低	泡沫与模具贴合性差	泡沫密度	阶段改善	泡沫与模具的间隙大(1个): I: 存放方式 下陷位置及尺寸 II: 泡沫下陷定位方式不合理 III: 修磨方式不合理	泡沫与模具的间隙大(8个): A: 泡沫密度 B: 升温速率 C: 加热温度 D: 保温时间 E: 存放环境湿度 F: 压型时间 G: 存放时间 H: 模具半径	
		升温速率				
		加热速度				
		保温时间				
		压型时间				
		模具半径				
		存放时间				
		存放环境温度				
		泡沫存放方式				
		泡沫下陷位置超差				定位基准不合理
	修磨方式不合理	修磨基准不合理				快速改善

2.6 快速改善

2.6.1 下陷位置快速改善

针对泡沫下陷尺寸和位置超差的问题，我们梳理产品的工艺流程，针对流程中的不足进行改进。传统确定泡沫下陷的方式如下：首先完成泡沫的定型，将平面的 PMI 泡沫变成符合冯卡门曲线的双曲面结构，由生产人员将定型后的泡沫放置于冯卡门模具上，根据模具边缘线确定下陷位置（图 2-2）。然而在实际生产中，由于泡沫与模具之间存在间隙，造成下陷位置定位出现较大偏差，影响产品后续组装和产品最终的质量。

下陷位置确定后由我们需要使用 80 目砂轮片将下陷区域多余的泡沫打磨掉，由于泡沫为双曲面结构，且各泡沫与模具之间的间隙值不同，难以找到有效的参考基准，造成下陷深度差异较大，影响产品的交付。



图 2-2 泡沫下陷定位图

为了解决下陷位置偏差大，下陷尺寸超差的问题，由于冯卡门曲面为不可展开的型面，因此我们采用“多点测算，近似展开”的方式，将双曲面下陷位置的确定转变为在平面上确定下陷的位置，不仅避免了泡沫与模具间隙对下陷位置的影响，而且有效的降低了下陷修磨的难度。

2.6.2 下陷尺寸快速改善

由于人工修磨存在修磨周期较长，重复返工次数较多以及精度控制差等问题。经过小组讨论，采用数控机床对泡沫的下陷进行修磨（图 2-3）。



图 2-3 泡沫下陷机加工示意图

泡沫下陷修磨完毕后，对泡沫进行加热定型。为了避免在定型过程中泡沫出现偏移，在定型模具前端增加挡块（图 2-4）。



图 2-4 泡沫热定型及定型效果示意图

为了验证改善效果，在施加外压的条件下对下陷的位置尺寸和下陷尺寸进行复测（图 2-5）。两种规格的泡沫下陷位置尺寸和下陷尺寸均满足要求，可见改善效果明显。



图 2-5 下陷位置复测

此外，为了降低因保存方式不当引起的变形，制作了相应的物品存放架（图 2-6 图 2-7）。

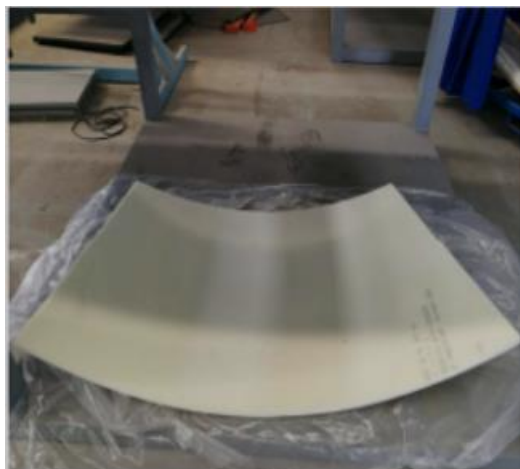


图 2-6 改善前



图 2-7 改善后

为了验证快速改善的实际效果，对已交付的 2 套产品的质量进行跟踪评价，结果如表 2-5 所示。

表 2-5 产品数据统计

生产数量	合格数量	合格率/%	缺陷类型					
			泡沫随型差	厚度整体偏薄	二次发泡	下陷尺寸超差	泡沫破损	下陷位置超差
12	9	75.00	3	0	0	0	0	0
11	7	72.73	4	0	0	0	0	0
10	7	70.00	3	0	0	0	0	0
12	9	75.00	3	0	0	0	0	1

2.7 小结

在本阶段中，确定了测量系统的准确度和精确度；并对现有的生产能力进行分析，发现过程能力严重不足；采用 Process Mapping 和因果矩阵进行分析查找可能的原因，并采用 Pareto 图确定了 11 项影响较大的因子；通过 FMEA 分析确定了改进的顺序，并完成快速改善项目，解决了泡沫下陷位置尺寸和下陷尺寸超差的问题，以及制作泡沫存放架减少因放置方式不合理造成的变形。由于泡沫与模具之间的间隙较大，对组装工序造成了较大的影响，因此如何降低泡沫与模具的间隙值成为了后续工作的重点。

第三章 分析阶段

3.1 X 因素的检验和数据收集计划

在上一个阶段的基础上，针对筛选出的 7 个可能的关键制定了 X 因素检验的实施计划，如表 3-1 所示。

表 3-1 数据收集计划

N O	小 Y	焦点 问题	X 与 (小 Y) 的关系	分析工具	数据记录			
		(X' s)			X 数据 类型	样品数	数据 场所	记录方 法
1	泡 沫 与 模 具 之 间 的 间 隙 值	泡沫 密度	泡沫密度对泡沫间隙值是 否有显著影响	方差分析	离散	6~8	206 厂房	现场测 试数据
2		模具 半径	模具半径对泡沫间隙值是 否有显著影响	DOE	连续	5~6		现场测 试数据
3		升温 速率	不同升温速率对泡沫间隙 值是否有显著影响		连续	5~6		
4		加热 温度	加热温度差异对泡沫间隙 值是否有显著影响		连续	5~6		
5		保温 时间	保温时间的长短对泡沫间 隙值是否有显著影响		连续	5~6		
6		压型 时间	压型时间的长短对泡沫间 隙值是否有显著影响		连续	5~6		
7		存放 时间	不同模具半径定型后的泡 沫存放时间的长短对间隙 值是否有显著影响	散点图+ 一般线性 回归模型	离散	5~6		现场测 试数据
8	存放 环境 湿度	泡沫存放环境湿度对泡沫 间隙值是否有显著影响	一元线性 回归	离散	5~6	现场测 试数据		

3.2 因素的分析

3.2.1 泡沫密度方差分析

根据生产要求, PMI 泡沫密度的要求值为 $110 \pm 10 \text{kg/m}^3$, 由于泡沫的批次之间存在差异, 导致泡沫的密度不一致。泡沫密度的差异可能导致泡沫的定型效果不同; 为了便于研究泡沫密度对定型效果的影响, 根据生产要求将泡沫分为三个等级 (表 3-2), 采用方差分析对不同泡沫密度下的定型效果 (表 3-3) 进行统计分析。

表 3-2 泡沫密度等级

密度等级	高	中	低
密度对应范围	115~120	105~115	100~105

表 3-3 不同泡沫密度下的定型效果

序号	密度等级			备注
	高	中	低	
1	21.77	22.26	21.16	样本定型完毕后 放置 24 天后测 量泡沫与模具之 间的间隙
2	20.37	21.10	19.58	
3	20.48	20.13	19.58	
4	22.78	23.30	21.84	
5	20.78	20.82	20.55	
6	22.54	23.60	21.82	
7	22.87	21.15	19.94	
8	20.87	21.01	20.29	

首先采用等方差分析对三组数据的方差是否相等进行验证, 建立原假设 $H_0: \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$; 备择假设 $H_1: \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 至少一个不相等。结果如图 3-1 所示, Levene 检验的 P 值为 0.844; 多重检验的 P 值为 0.726 均大于 0.05, 可知无法拒绝原假设, 因此三种密度下间隙值的方差不存在明显差异。

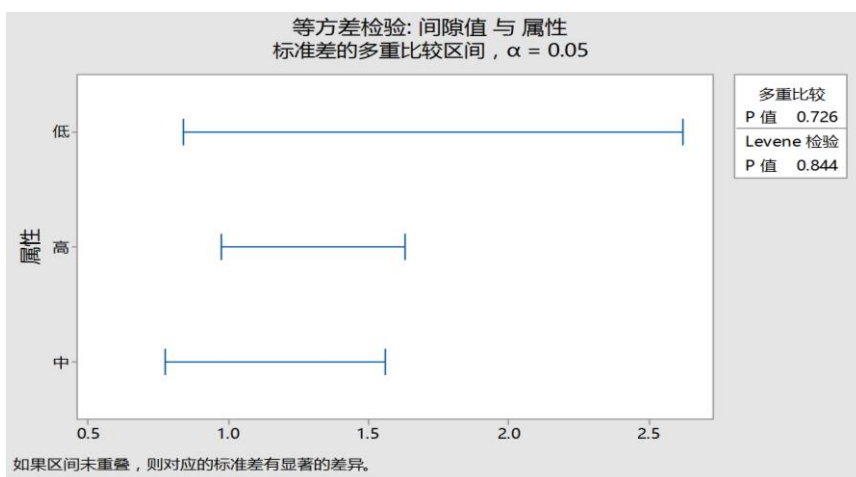


图 3-1 等方差检验

由箱线图可知不同密度的泡沫的间隙值存在交集，不存在明显的差异；采用单因子对三种规格的泡沫间隙进行分析，建立原假设 $H_0: \mu_1=\mu_2=\mu_3$ ，备择假设 $H_1: \mu_1、\mu_2、\mu_3$ 至少一个不相等；由图 3-2 和表 3-4 可知 P 值为 0.116 大于 0.05，无法拒绝原假设，可见三种间隙值的均值不存在明显差异。

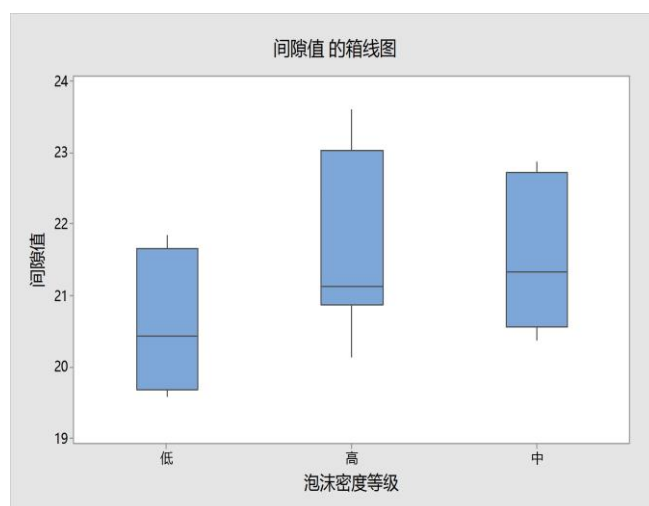


图 3-2 单因子分析

表 3-4 针对此分析假定的相等方差

因子信息					
因子	水平数	值	/	/	/
属性	3	低, 高, 中	/	/	/
方差分析					
来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
属性	2	5.618	2.809	2.39	0.116
误差	21	24.684	1.175	/	/
合计	23	30.302	/	/	/

总结：通过箱线图和单因子分析可知，泡沫密度不是影响泡沫间隙的显著因素

3.2.2 定型工艺参数 DOE 分析

定型阶段是将软化后的泡沫放置模具中，施加外力将泡沫由平面结构变成双曲面结构的过程。在该过程中泡沫由可展开的型面转变为不可展开型面，会导致泡沫内部应力增加。在该过程中泡沫的升温速率、加热温度、保温时间影响泡沫的软化程度，而模具半径以及压型时间对泡沫的内应力产生不同程度的影响。设计部分因子试验对各因素的显著性进行分析。通过表 3-5 得到结果如表 3-6 所示

表 3-5 DOE 的实验数据

标准序	运行序	中心点	区组	模具半径	升温速率	加热温度	保温时间	压型时间	间隙值
14	1	1	1	大端	20	210	120	30	1.94
13	2	1	1	小端	20	210	120	60	3.92
10	3	1	1	大端	20	190	120	60	2.24
1	4	1	1	小端	20	190	60	60	5.11
16	5	1	1	大端	40	210	120	60	1.26
9	6	1	1	小端	20	190	120	30	5.52
11	7	1	1	小端	40	190	120	60	4.86
15	8	1	1	小端	40	210	120	30	4.56
18	9	0	1	大端	30	200	90	45	2.44
4	10	1	1	大端	40	190	60	60	2.12
17	11	0	1	小端	30	200	90	45	4.72
20	12	0	1	大端	30	200	90	45	2.51
7	13	1	1	小端	40	210	60	60	5.33
3	14	1	1	小端	40	190	60	30	5.64
19	15	0	1	小端	30	200	90	45	4.69
5	16	1	1	小端	20	210	60	30	5.03
8	17	1	1	大端	40	210	60	30	1.39
6	18	1	1	大端	20	210	60	60	2.24
2	19	1	1	大端	20	190	60	30	3.36
12	20	1	1	大端	40	190	120	30	2.46

表 3-6 定型工艺参数对泡沫间隙值的影响分析

因子回归:间隙值与模具半径, 升温速率, 加热温度, 保温时间, 压型时间, 中心点					
方差分析					
来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
模型	15	43.0849	2.87233	1256.35	0.000
线性	5	8.3955	1.67910	734.43	0.000
模具半径	1	4.9729	4.97290	2175.13	0.000
升温速率	1	0.1892	0.18922	82.77	0.001
加热温度	1	1.9881	1.98810	869.59	0.000
保温时间	1	0.7482	0.74823	327.27	0.000
压型时间	1	0.4970	0.49703	217.40	0.000
2 因子交互作用	9	1.7418	0.19353	84.65	0.000
模具半径*升温速率	1	0.7056	0.70560	308.63	0.000
模具半径*加热温度	1	0.0702	0.07022	30.72	0.005
模具半径*保温时间	1	0.0676	0.06760	29.57	0.006
升温速率*加热温度	1	0.0196	0.01960	8.57	0.043
升温速率*保温时间	1	0.0380	0.03803	16.63	0.015
升温速率*压型时间	1	0.2162	0.21622	94.58	0.001
加热温度*保温时间	1	0.0841	0.08410	36.79	0.004
加热温度*压型时间	1	0.3844	0.38440	168.14	0.000
保温时间*压型时间	1	0.1560	0.15603	68.24	0.001
4 因子交互作用	1	0.3277	0.32768	143.33	0.000
升温速率*加热温度*保温时间*压型时间	1	0.3277	0.32768	143.33	0.000
误差	4	0.0091	0.00229		
弯曲	1	0.0026	0.00264	1.22	0.350
失拟	1	0.0036	0.00360	2.48	0.256
纯误差	2	0.0029	0.00145		
合计	19	43.0940			
模型汇总					
S	R-sq	R-sq (调整)		R-sq (预测)	
0.0478147	99.98%	99.90%		98.27%	

由结果可知模具半径、升温速率、加热温度、保温时间、压型时间对应的 P 值均小于 0.5, 具有统计显著性, 因此为显著影响因素。此外 R-sq、R-sq (调整)、R-sq (预测) 三者接近, 且均大于 90%, 因此模具半径、升温速率、加热温度、保温时间、压型时间是影响冯卡门结构 PMI 泡沫定型阶段的显著性因素。

3.2.3 存放时间一般线性模型分析

半前锥段产品为冯卡门双曲面结构, 不同位置处的泡沫的半径均不相同。根

据研究历史数据发现，不同半径泡沫存放不同的时间后间隙值逐渐增加，且存在一定的差异。为了更加全面的考察存放时间对不同泡沫半径间隙值的影响程度，首先采用散点图对收集的 7 种不同半径的泡沫在不同存放时间下的间隙值进行分析，由图 3-3 可知，随着存放时间的延长，泡沫的间隙值逐渐增加；不同泡沫半径的间隙值存在较大的差异，泡沫半径与存放时间对间隙值的影响可能存在交互作用；当存放时间超过 15 天，泡沫间隙值增长速度出现减缓。

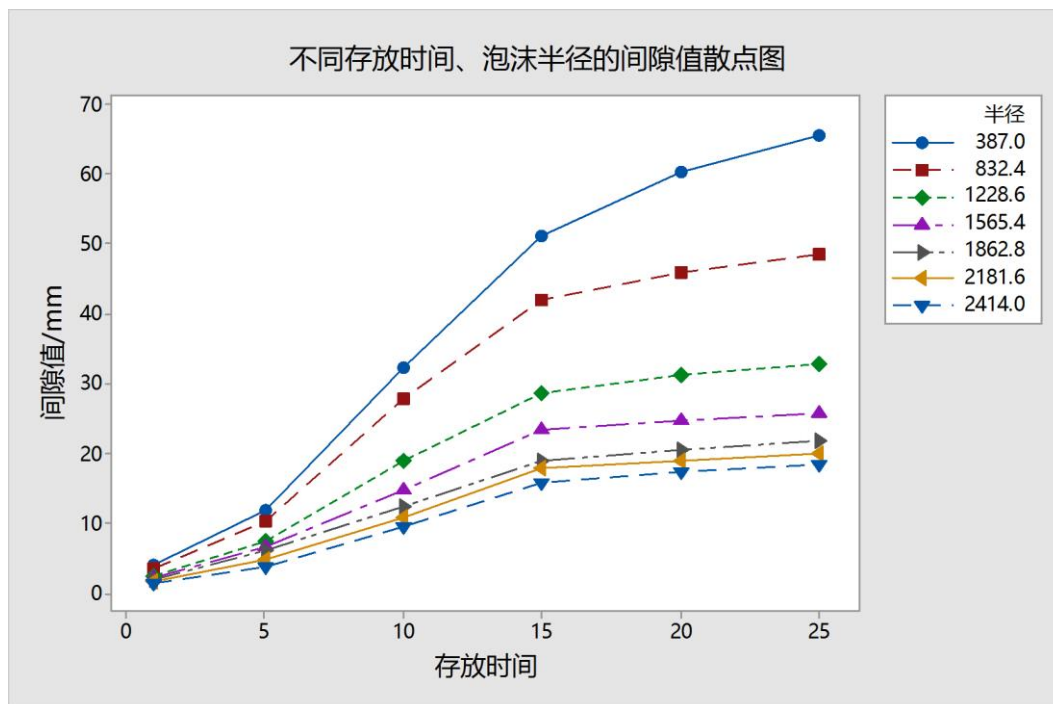


图 3-3 存放时间对不同泡沫半径的间隙值的影响分析

由于不同的泡沫半径在相同的存放时间下的间隙值存在较大的差异，为了有效的评估泡沫半径、存放时间以及两种可能的交互作用对间隙值的影响，采用一般线性模型对数据进行分析，结果如表 3-7 所示。

表 3-7 存放时间对间隙值影响的一元线性模型分析

方差分析					
来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
半径	1	3.9	3.95	0.18	0.671
存放时间	1	3966.4	3966.41	184.35	0.000
半径*存放时间	1	1253.5	1253.52	58.26	0.000
误差	38	817.6	21.52		
合计	41	10964.9			
模型汇总					
S	R-sq	R-sq (调整)		R-sq (预测)	
4.63852	92.54%	91.95%		90.89%	

若由结果可知存放时间、存放时间与泡沫半径的交互作用对应的 P 值分别为

0.000 和 0.000 均小于 0.05，具有统计明显性，因此为显著影响因素；而半径的 P 值为 0.671 大于 0.05，不具备统计显性，因此对间隙值无明显影响。此外 R-sq、R-sq（调整）、R-sq（预测）三者接近，且均大于 90%，因此存放时间、存放时间与泡沫半径的交互作用是影响间隙值的关键因素。

总结：通过散点图和一元线性模型可知，存放时间、存放时间与泡沫半径的交互作用是影响泡沫间隙的显著因素

3.2.4 环境湿度对间隙值影响的双样本 T 检验

PMI 泡沫中的酰亚胺基不与水分子反应，但是水分子能够进入泡沫中与泡沫之间形成范德华力，对 PMI 泡沫起到增塑的作用，导致材料由脆性向韧性转变，降低了泡沫内部的应力，从而影响泡沫的间隙值。为了考察泡沫存放环境是否为关键因子，选择 5#泡沫作为研究对象，放置于不同湿度等级的环境中存放 25 天后测量泡沫的间隙值，试验结果如表 3-8 所示。

表 3-8 不同湿度等级下泡沫间隙值统计表

湿度等级	间隙值/mm					湿度范围
	1	2	3	4	5	
低	22.44	21.22	21.92	22.09	23.16	湿度范围: 20~30%
高	22.12	21.25	20.75	21.88	21.00	湿度范围: 60~80%

采用 MINITAB 软件采用双样本 T 检验对数据进行分析，首先采用概率图(图 3-4)对两组数据的正态性进行了分析，低湿度和高湿度下样本对应的两组数据的 P 值分别为 0.854、0.564 均大于 0.05，因此两组数据符合正态分布。

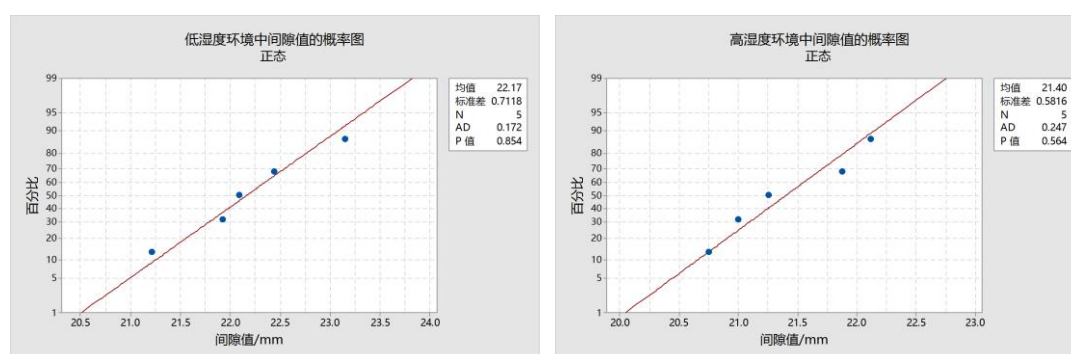


图 3-4 正态性检验

采用 F 检验对两组数据的方差进行对比，结果如图 3-5 所示 F 检验的 P 值为 0.705 > 0.05，无法拒绝原假设，因此两组数据的方差相等。

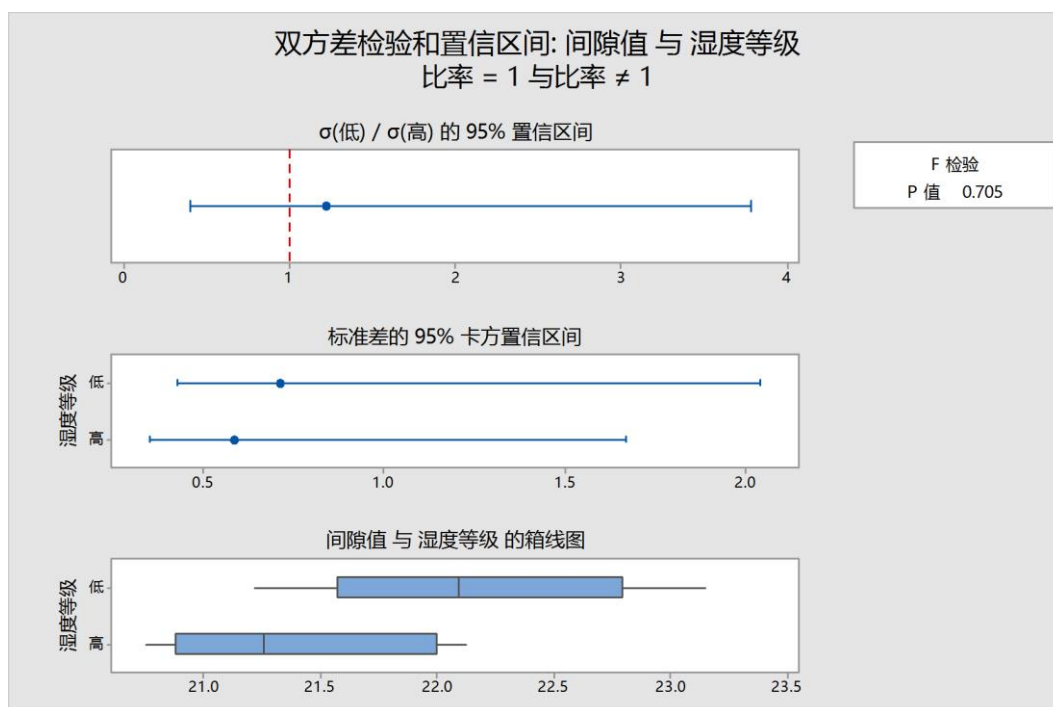


图 3-5 双方差检验结果

采用双样本 T 检验对两组数据进一步分析，结果如表 3-9 所示，其中双样本 T 检验 P 值为 $0.100 > 0.05$ 接受原假设，两组数据的均值不存在显著差异。

表 3-9 双样本 T 检验

双样本 T 检验和置信区间：间隙值，湿度等级				
间隙值	双样本	T		均值标
湿度	N	均值	标准差	准误
低	5	22.167	0.712	0.32
高	5	21.403	0.582	0.26
差值= μ (低) - μ (高)				
差值估计值: 0.763				
差值的 95% 置信区间: (-0.184, 1.711)				
差值=0 (与≠) 的 T 检验: T 值=1.89 P 值=0.100 自由度=8				
两者都使用合并标准差=0.6500				

由双样本 T 检验可知泡沫存放环境湿度对泡沫的间隙值无明显的影响，因此环境湿度为非显著因子。

3.3 小结

经这阶段的试验和分析结果，可以得到影响泡沫间隙值的关键因子包括 8 项，分别为加热温度、保温时间、定型时间、存放时间、弧面半径，为了降低存放时间，我们开展了精益分析，识别泡沫定型的瓶颈工序和可改善项。在后续改善阶段的工作中，将对这些关键因子进行逐一改善。

第四章 改善阶段

4.1 改善阶段计划

进入改善阶段，首先对筛选出的关键因子进行了梳理。泡沫定型的施工是一个连续的过程，从泡沫加热至泡沫交付的多个工序决定了泡沫的定型效果，根据工艺过程（图 4-1）对关键因子的发生顺序进行排序。

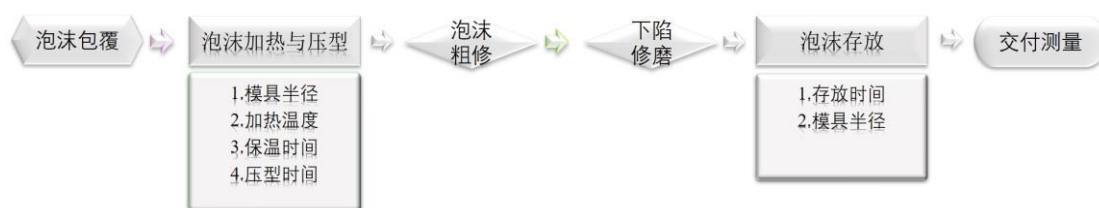


图 4-1 工艺过程

泡沫定型的不同工序之间相互独立，不同工序内的关键因子之间不存在相互影响，一个工序的改善结果可以在后续试验中直接实施和验证，因此依照工序对关键因子的排序结果制定相应的改善方案（表 4-1）。

表 4-1 改善方案

执行顺序	因子名称	改善方案
1	模具半径	最优值
2	升温速率	
3	加热温度	
4	保温时间	
5	压型时间	
6	存放时间	精益改善
7	泡沫曲率	

4.2 改善阶段实验

4.2.1 泡沫加热与压型工序因子改善和试验验证

根据本阶段分析结果可知，该模型能够很好满足我们的要求，根据问题的要求，优化目标数据望小型的。结合实际生产情况，在 7 中不同规格的泡沫中，半径越小，泡沫间隙越大。采用响应优化器查找最优值，优化结果如图 4-2 所示。

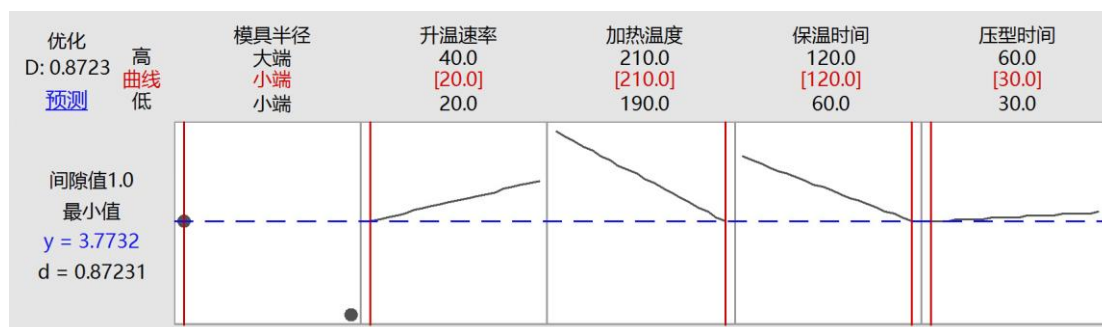


图 4-2 最优解

由结果可知最优间隙值为 3.77mm，在最优值时升温速率为 20℃/h，加热温度为 210℃，保温时间为 120min，压型时间为 30min。

为验证改善的效果，项目成员按照升温速率为 20℃/h，加热温度为 210℃，保温时间为 120min，压型时间为 30min 的要求进行 5 次试验，定型完毕后存放 24h 时泡沫的间隙值如表所示，五次试验的平均值为 3.55mm（表 4-2），落在了 95% 置信区间内（表 4-3），可见模型正确，预测可信。

表 4-2 加热温度、保温时间最优解的验证试验

序号	模具半径/mm	升温速率℃/h	加热温度/℃	保温时间/min	压型时间/min	间隙值/mm
1	小端	20	210	120	30	3.52
2	小端	20	210	120	30	3.54
3	小端	20	210	120	30	3.65
4	小端	20	210	120	30	3.49
5	小端	20	210	120	30	3.62

表 4-3 最优解验证试验预测结果

因子回归：间隙值 1.0 与模具半径，升温速率，加热温度，保温时间，压型时间，中心点			
变量		设置	
模具半径		小端	
升温速率		20	
加热温度		210	
保温时间		120	
压型时间		30	
拟合值	拟合值标准误	95% 置信区间	95% 预测区间
3.77325	0.0663403	(3.58906, 3.95744)	(3.54620, 4.00030)

根据以上试验结果分析可知，改善方法有效。项目小组结合实际情况，最终修订泡沫定型工艺为加热温度为 210℃，升温速率 20℃/h，保温时间 120min，压

型时间 30min。

4.2.2 泡沫存放的精益改善

根据上阶段分析结果可知，在泡沫存放阶段中存放时间对间隙有着较大影响。

由该回归方程可知，存放时间越长，间隙值越大。由于泡沫的半径为顾客要求值，无法更改，因此通过对存放时间的优化来降低泡沫的间隙值。

在实际生产中，顾客要求泡沫交付时必须齐套。产品成型周期越长对于已定型完毕的泡沫，较长的存放时间会导致部分泡沫间隙过大无法交付。例如泡沫半径最大的 7# 存放时间 20 天时，泡沫间隙值达到 11.84mm，超过了设计要求值。因此现有的泡沫生产周期较长，不利于泡沫间隙值的控制。

为了降低存放时间对泡沫间隙值的影响，由小组成员开展精益分析，识别瓶颈工序，明确改善点，缩短泡沫的定型周期。

通过对定型工序的现状进行分析，识别出的改善点（表 4-4）如下：

表 4-4 现状改善点汇总表

序号	改善工序	改善内容
1	泡沫加热工序	现有的设备每次只能加热一块泡沫限制了泡沫加热的效率，需要对设备进行优化实现多块泡沫共同加热。
2	泡沫压型工序	当前现场只有一台冷压机，只能安装一种型号的定型模具，需要对定型方式进行优化实现多个模具的并行操作
3	下陷修磨	人员对下陷进行修磨，需要多次测量，导致效率低下，精度难以控制。
4	泡沫试拼	泡沫的外形尺寸需要修磨试拼，效率低下。

为了及时得到改善效果，小组成员制定改善计划表，保障改善活动的顺利进行。

表 4-5 改善计划表

序号	改善点	对策	目标	措施	地点	备注
1	加热设备效率低	实现多块泡沫共同加热	6h 内加热数量 ≥ 4	在加热设备中增加旋转云梯	206	图 4-3
2	冷压机效率低，换模时间长	采用抽真空的方式进行压型	30min 单次泡沫加热数量 ≥ 4	1. 在定型阴模上包覆真空袋，留有一个开口； 2. 将保温完毕后的泡沫迅速放置于真空袋中，在进行密封，操作时间 $\leq 20s$ ； 3. 抽真空加压	206	图 4-4
3	定型后下陷修磨精度低	调整工序顺序，先修磨下陷再定型	单件修磨时间 $\leq 3h$ 下陷深度 $2 \pm 0.1mm$	外协加工	206	图 4-5
4	泡沫粗修，试拼	标准化作业	单块泡沫切割时间 $\leq 25min$	根据不同尺寸的泡沫制作切割样板。	206	



图 4-3 烘箱增加旋转云梯



图 4-4 抽真空定型



图 4-5 泡沫下陷加工及成品

通过上述改善活动，泡沫的生产周期明显缩短。对实际改善效果进行对标分析，确认改善效果。

表 4-6 改善效果对比

工序名称	目标	改善前生产能力	改善后生产能力	目标达成情况
加热工序	6h 内加热数量 ≥ 4	1 块/6h	7 块/6h	目标达成
压型工序	30min 单次泡沫加热数量 ≥ 4	1 块/30min	7 块/30min	目标达成
下陷修磨工序	单件修磨时间 ≤ 3 h 下陷深度 2 ± 0.1 mm	单件修磨时间 6h; 下陷深度 1.5~2.8mm	单件修磨时间 1h 下陷深度 1.9~2.0mm	目标达成
泡沫粗修工序	单块泡沫切割时间 ≤ 25 min	单块泡沫粗修时间 45min	单块泡沫切割时间 20min	目标达成

通过本次精益改善，有效的提高了泡沫的成型效率，成型周期由 38 天减少至 10 天。

4.3 改善结果分析

采用 FMEA 对上述改善措施进行风险分析，确保在实施过程中风险受控，避免出现不可控现象。由分析结果（表 4-7）可知，改善措施的风险较小，满足实施的要求。

表 4-7 改善措施的风险分析

过程 步骤 功能	要求	潜在失效 形式	潜在失 效后果	严重 度 (S)	分 类	潜在失效起因	现行过程控制				RPN		
							预防 控制	发生 频度 O	探测 度控 制	探测 度 D			
PMI 泡沫 加热	按照 定型 工艺 进行 操作	升温速率 超过 20℃ /h	定型效 果差， 返工	5	▼	降温速率快，内 应力释放不完 全，造成泡沫回 弹量大	设备 监控， 增设 双岗	4	监测 设备 数据	3	60		
		加热温度 低于要求 温度	定型效 果差， 进行二 次定型	5		温度较低未到达 软化点，造成内 应力较大					3	3	45
		加热温度 高于要求 温度	二次发 泡，造 成泡沫 报废	7		温度过高造成泡 沫内部引发剂发 生二次反应					2	3	56
		保温时间 低于 60min	定型效 果差， 返工	5		内应力释放不完 全，造成泡沫回 弹量大					3	3	45
PMI 泡沫 定型	泡沫 厚度、 曲面 均满 足要 求	压型时间 短	定型效 果差， 返工	5	▼	残存内应力引起 较大反弹	定型 时间 不少 于 30min	3	查看 生产 记录	4	60		
PMI 泡沫 保存	泡 沫 间 隙 满 足 要 求	存放时间 较长，泡 沫出现较 大反弹	返工， 对泡沫 重新定 型	5	▼	在泡沫内应力随 时间逐渐释放的 过程中，反弹量 逐渐增加	放置 时间 不超 过 5 天	3	查看 生产 记录	5	75		

经改善阶段试验，对影响泡沫间隙值的关键因子进行了优化，优化后的因子水平如表 4-8 所示。

表 4-8 各参数最优解

执行顺序	因子名称	优化结果
1	升温速率 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$	20.0
2	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	200.0
3	保温时间/min	60.0
4	压型时间/min	30.0
5	存放时间/day	5.0

第五章 标准化阶段

5.1 改善措施的标准化

根据改善的成果，对员工的工艺文件进行了修改，并新增了部分工艺文件。如表 5-1 所示。

表 5-1 标准化内容

文件名称	更改方式	主要内容	控制对象
原始记录表	新增	对下陷位置和尺寸设置双岗，对泡沫下陷位置和下陷尺寸进行测量记录。	下陷修磨
工艺流程	修改	对泡沫加热工序中设置检验点，明确加热参数：泡沫定型温度 200℃，保温时间 60min	加热工序
	新增	泡沫保温结束后，迅速取出泡沫放置于真空带内，抽真空压型 30min，按照降温速率为 26.58℃/h 的要求进行逐步降温至室温。	压型工序
	修改	调整工艺工序，泡沫下陷修磨—泡沫加热—泡沫压型—泡沫测量交付	整体
作业指导书	新增	泡沫切割标准化作业	切割工序

5.2 改善效果验证

为了验证上阶段改善的实际效果，对生产的 10 批次的产品一次交验合格率进行统计分析。结果表明泡沫的一次交验合格率有了显著提高，且生产过程稳定。

表 5-2 改善效果验证结果

序号	生产数量	合格数量	合格率/%	缺陷类型					
				泡沫随型差	厚度整体偏薄	二次发泡	下陷尺寸超差	泡沫破损	下陷位置超差
1	12	11	91.67	0	0	0	0	1	0
2	11	11	100.00	0	0	0	0	0	0
3	10	10	100.00	0	0	0	0	0	0
4	13	12	92.31	0	0	0	1	0	0
5	12	11	91.67	1	0	0	0	0	0
6	11	10	90.91	0	0	0	0	0	1
7	11	11	100.00	0	0	0	0	0	0
8	12	12	100.00	0	0	0	0	0	0
9	14	13	92.86	0	0	0	0	1	0
10	11	10	90.91	0	0	1	0	0	0

结 论

我们为了解决产品合格率低的问题，对其中主要出现的 3 大缺陷进行分析改善，用来减少缺陷的产生，从而来提高产品的合格率，第一通过快速改善的方式，用最省时间经历的方式，对目标进行一个初步的改善，通过制作产品存放的货架来降低 PMI 泡沫的变形程度，降低它与模具之间的间隙值，通过采用数控机床进行加工打磨来减少人为打磨而产生的误差，同时也减少产品的生产周期，变相的提高了生产的效率。

然后开始对产品进行阶段性改善，通过分析和实验确定了需要改善的方向为产品定型的工艺参数和产品的存放时间，通过系统的模拟分析以及后续的生产实验的过程，确定了一个最优的方案，将泡沫定型工艺为加热温度为 200℃，升温速率 20℃/h，保温时间 60min，压型时间 30min，这样可以使泡沫的定型之后的间隙值达到要求，最后通过增加烘箱云梯，提高烘箱的利用率，采用真抽真空定型和制作样板等方式来缩短产品的成型周期，来减少存放时间对间隙值大小的影响。

经过这一系列的改善之后，PMI 泡沫的合格率都超过百分之 90，成功达到了要求水平。

参考文献

- [1] 赵锐霞、尹亮、潘玲英.PMI 泡沫夹层结构在航天航空工业的应用[J].宇航材料工艺,2001 (02) : 1-7
- [2] 刘伟、马义中.6 σ 质量改进的理论基础研究[J].河南大学学报,2005, 35 (01) : 19-22
- [3] 黄家康.复合材料成型技术及应用[M].化学工业出版社, 2016: 36-44
- [4] [美]小威廉·卡丽斯特,大卫·来斯威什.材料科学与工程基础[M].化学工业出版社,2016: 99-104
- [5] 魏化震、李恒春、张玉龙.复合材料技术[M].化学工业出版社, 2018: 16-19
- [6] 肖力光、赵洪凯.复合材料[M].化学工业出版社, 2016: 11-25
- [7] 唐见茂.高性能纤维及复合材料[M].化学工业出版社, 2013: 35-41
- [8] Uwe Lang.PMI 泡沫芯材夹层结构无损检测 (NDT) 的新方法[C].SAMPE, 2008
- [9] Hermann Seibert.Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures[J].Reinforced Plastics,2006 (1) : 44-48
- [10] Hermann Seibert.Technical Presentation on ROHACELL[C].China Composites, 2005

致 谢

四年的时光总是很短暂的，我们每个人都要步入社会或者是继续去深造去追求自己的理想或者是抱负。回想起刚来大学的时光，发现时间总是过得很快，我们都经历了很多的事情，获得了很多的成长，回顾这些年我们有好多事情需要我们去感谢，首先感谢在学校辛苦教导我们的老师，他们为了我们的成长付出了很多，为了能让我们去学习更多的知识，老师们经常备课到深夜，为了我们明天能够更好的去学习知识，教会我们很多的新知识，教会我们学习的方法，引导我们的价值观，让我们有一个良好的认知，使我们受益终生。感谢这些年来一起奋斗过的好室友，我们在学习过程中相互帮助，一起成长。当然也要感谢学校，感谢学校为我们提供这些学习的设备，感谢学校的一草一木，那些都是我们青春的记忆，为我们的生活添加了许多美好的点缀，让我们拥有了一个鸟语花香的学习环境，感谢我亲爱的傅老师，她对我们的毕业设计有问必答，有了问题及时的去和她询问，老师总是很快的给我们解答问题，为我们分享一些学习资料，老师对我的学习很是费工夫，再次感谢我的毕设老师。我会永远记得这四年的时光，祝大家都能追求到自己理想和目标！未来可期！