

大长径比壳体内孔硅橡胶涂层一次涂覆成型工艺研究

唐 星, 肖高权, 刘亮亮, 张亚栋, 罗隆晟, 侯全辉
(湖南云箭集团有限公司, 湖南 怀化 419503)

摘要: 本文以自主研发的涂覆机替代人工喷涂大长径比壳体内孔硅橡胶涂层, 通过正交试验研究了硅胶桶压力、喷枪空气压力、壳体转速、胶液质量配比等对壳体内孔硅橡胶涂层质量的影响及涂层一次成型可能性。结果表明: 硅橡胶喷涂液雾化程度越好, 壳体内孔单位时间单位面积喷涂湿膜厚度越薄, 涂层表面越平整、光滑、致密, 可实现大长径比壳体内孔硅橡胶涂层一次成型, 涂层质量合格, 该工艺参数可用于大长径比壳体内孔硅橡胶涂覆自动化生产。

关键词: 大长径比; 壳体内孔; 硅橡胶涂层; 一次成型

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2026)03-0061-04

Study on Single-Pass Silicone Rubber Coating Technology for Large Length-to-diameter Ratio Shell Inner Bores

TANG Xing, XIAO Gao-quan, LIU Liang-liang, ZHANG Ya-dong, LUO Long-sheng, HOU Quan-hui
(Hunan Yunjian Group Co., Ltd., Huaihua 419503, Hunan, China)

Abstract: This study replaces manual spraying with an automated coating machine for silicone rubber coatings in large length-to-diameter ratio (L/D) shell inner bores. Orthogonal experiments were conducted to investigate the effects of silicone tank pressure, spray gun air pressure, shell rotation speed, and adhesive weight ratio on coating quality, as well as the feasibility of one-time coating formation. Results indicate that improved atomization of the silicone spray liquid reduces the wet film thickness per unit area per unit time on the inner bore surface, resulting in smoother, flatter, and denser coatings. This enables one-time forming of silicone rubber coatings in large L/D shell inner bores with qualified quality. The optimized process parameters can be applied to automated production of silicone rubber coatings for such components.

Key words: large length-to-diameter ratio; shell inner bores; silicone rubber coating; one-time forming

0 引言

某装备为大长径比壳体, 质量约 500 kg, 其内部型腔为深盲孔结构, 长径比约 10, 为隔离壳体金属与其内部装填物, 壳体内孔需厚涂一层防腐能力优异的疏水型硅橡胶涂层^[1]。硅橡胶涂层要求表面平整、厚度 1.0~1.5 mm, 且均匀、层间无气孔、流挂、堆积、漏底、针孔和皱褶等弊病, 以获得良好的隔离缓冲效果。

硅橡胶中 Si—O 键连接的极性基团较少, 导致其与壳体金属粘接性很差^[2]。为增强硅橡胶与壳体金属

附着力, 壳体金属涂覆硅橡胶前需进行喷砂处理, 而后在壳体金属表面薄涂一层底涂液, 表干后进行硅橡胶涂覆, 硅橡胶干燥后即成附着牢固的硅橡胶涂层。大长径比壳体内孔深处人手难以触及, 可视区域及操作空间十分有限, 导致壳体内孔厚涂均匀涂层存在很大难度。工业上大长径比壳体内孔硅橡胶涂覆一般有离心涂覆和喷涂两种方式, 离心涂覆过程壳体高速旋转, 硅橡胶在离心力作用下涂覆至壳体内腔; 喷涂过程人工用长杆喷枪在壳体内腔往复喷涂使硅橡胶涂覆至壳体内腔。上述两种硅橡胶涂覆方式涂覆前均需进行硅橡胶液配制, 本文中硅橡胶液由硅橡胶混炼胶、交联剂、促进剂按比例混匀后, 根据施工方式加乙酸乙酯调至合适黏度后备用, 胶液配好后交联反应即开始, 流动性

收稿日期: 2025-04-14

作者简介: 唐星(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事涂装工艺开发工作。E-mail: tangxing@861china.com。

及施工性能逐渐变差。具体离心涂覆及喷涂工艺过程如下所述。

离心涂覆工艺过程：将壳体尾端倾斜向上一定角度，然后将配好的硅橡胶液从壳体尾端一次性倒入壳体内孔，通过倾斜、旋转壳体使胶液大致覆盖整个壳体内孔，而后再将壳体吊装至旋转设备上高速旋转以获得均匀的硅橡胶涂层。离心涂覆过程对操作人员技能要求高，人工作业多，胶液黏度较喷涂用胶液高，若胶液配好至壳体离心旋转间隔时间过长，导致胶液流动性变差，极易造成壳体内孔出现局部漏涂、涂层堆积、涂层厚度不均等问题，导致涂层质量不合格，给返工造成很大难度，此外离心涂覆过程壳体高速旋转，亦存在安全风险。

人工喷涂工艺过程：将壳体置于旋转架上，人工用长杆喷枪从壳体尾端伸入壳体内孔喷涂，局部喷涂后旋转壳体然后对相邻位置进行喷涂，不断重复直至整个壳体内孔完全被涂层覆盖且达到相应厚度。人工多次间歇式喷涂，工作量大，喷涂速度及喷涂距离难以持续稳定控制，易导致涂层出现厚度不均、流挂、堆积、针孔和皱褶等弊病，涂层质量不稳定，涂层合格率较低。此外，施工周期长导致胶液易堵塞喷枪，故需频繁更换胶液，施工过程繁琐。

经实际应用分析，硅橡胶人工喷涂与离心涂覆，对操作人员技能要求很高，均存在较大涂层质量不合格风险。喷涂过程少量多次喷涂相对离心涂覆过程一次性投料涂覆，更有利于获得均匀涂层且容错率更高。如何解决喷涂过程人工干预多、间歇式喷涂、喷涂速度及喷涂距离控制不稳定等问题是提升大长径比壳体内孔硅橡胶涂覆质量及实现大批量自动化生产的关键。本文以自主研发的壳体涂覆机替代人工开展大长径比壳体内孔硅橡胶涂层一次涂覆成型工艺。通过优化涂覆机硅胶桶压力、喷枪空气压力、壳体转速、硅橡胶胶液质量配比等，探究大长径比壳体内孔硅橡胶涂层一次涂覆成型工艺可行性，提升壳体内孔硅橡胶涂层质量，降低人工工作量，实现大长径比壳体内孔硅橡胶涂覆大批量自动化生产。

1 试验部分

1.1 试验设备

采用自主研发的壳体涂覆机(非标设备)，喷嘴 2.0 mm，壳体涂覆机由旋转机构、喷涂机构、料桶、电控系统等组成，旋转机构转速范围 0~80 r/min，喷涂机构水平移动速度 0~50 mm/s，喷涂行程 2 500 mm。

1.2 试验样件

为便于观察大长径比壳体内孔涂层质量，本试验采用与大长径比壳体外形及尺寸一致的自制开合式壳体作为样件，样件(长 2 500 mm，外径 300 mm，内部

型腔长 2 100 mm、内径 220 mm，长径比 9.5)由上下两个壳体装配而成，其内部型腔为深盲孔结构。试验样件示意图见图 1。

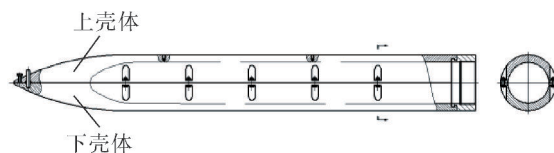


图 1 试验样件示意

1.3 试验原料

试验所用原料及生产厂家见表 1。

表 1 试验原料及生产厂家

原料名称	标准代号	生产厂家
底涂液		
硅橡胶混炼胶	GTC-1-A	西安近代化学研究所
交联剂	GTC-1-B	
促进剂		
工业乙酸乙酯	GB 3728—2007	怀化市怀西化工有限公司

1.4 试验样件涂覆工艺流程

试验样件内孔硅橡胶涂覆工艺流程：清洁→涂底涂液→上件→加料→喷硅橡胶→下件→固化。涂覆前人工先用工业乙酸乙酯对样件内孔进行清洁，而后人工刷涂底涂液，底涂液静置 30 min 表干后将试验样件吊装至壳体涂覆机旋转机构上件位，按比例配好硅橡胶液并加入壳体涂覆机硅胶料桶，设置涂覆机参数后启动壳体涂覆机，壳体涂覆机旋转机构带动壳体匀速旋转，壳体涂覆机喷涂机构开始在试验样件内孔往复喷涂硅橡胶，涂覆过程示意图见图 2，涂覆过程结束后将壳体吊装下件，壳体内孔硅橡胶涂层自然固化。

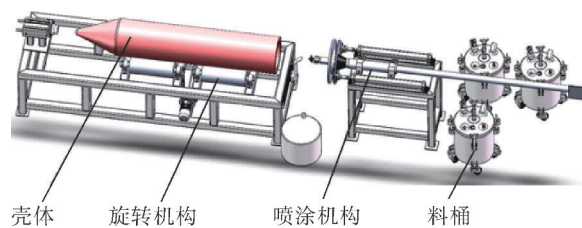


图 2 涂覆过程示意

1.5 正交试验

1.5.1 正交试验方案

根据前期单因素试验结果，壳体涂覆机硅橡胶压力(涂覆机硅胶桶空气压力)、喷枪空气压力(喷涂硅橡胶时空气压力)、壳体转速及喷枪移动速度、胶液质

量配比(硅橡胶喷涂液质量配比)对壳体内孔涂覆质量均有影响。壳体涂覆机硅橡胶压力与喷涂硅橡胶流量呈正相关;喷枪空气压力越大,硅橡胶雾化颗粒越小,对壳体内孔壁面冲击力也越大;胶液质量配比与硅橡胶喷涂液施工性能有关;壳体转速及喷枪移动速度与壳体内孔单位面积单位时间喷涂硅橡胶厚度有关,壳体转速或喷枪移动速度越快,壳体内孔单位面积单位时间喷涂硅橡胶厚度越薄,更有利于获得均匀涂层及喷涂液溶剂挥发。

故本试验对硅橡胶压力、喷枪空气压力、胶液质量配比、壳体转速及喷枪移动速度对大长径比壳体内孔硅橡胶涂层质量影响进行研究。以硅胶桶压力、喷枪空气压力、壳体转速、胶液质量配比为试验因素开展正交试验,以筛选最佳涂覆工艺参数。正交试验因素见表2,试验中采用 $L_9(3^4)$ 正交表,见表3。壳体转速 n 最小取值 50 r/min,为使硅橡胶涂层完全覆盖壳体内孔,喷枪移动速度 v (mm/s)、壳体转速 n (r/min) 和喷幅 d (mm)之间需满足 $v \leq nd/60^{[3]}$,根据前期单因素试验结果,喷枪喷涂在试验样品内孔喷幅 d 约为 65 mm,故按上式计算,喷枪移动速度 ≤ 54 mm/s,因试验用壳体涂覆机喷枪移动速度上限为 50 mm/s,故试验中喷枪移动速度定为 50 mm/s。

表2 正交试验因素水平表

水平	因素			
	硅胶桶压力 /MPa	喷枪空气压力 /MPa	壳体转速/ (r·min ⁻¹)	胶液质量配比 ¹
1	0.35	0.35	50	100:10:0.25:49.6
2	0.40	0.40	60	100:15:0.38:51.9
3	0.45	0.45	70	100:20:0.5:54.2

注:①为硅橡胶混炼胶:交联剂:促进剂:乙酸乙酯。

表3 正交试验正交表

试验号	因素				水平组合
	A (硅胶桶压力)	B (喷枪空气压力)	C (壳体转速)	D (胶液质量配比)	
1	1	1	1	1	A1B1C1D1
2	1	2	2	2	A1B2C2D2
3	1	3	3	3	A1B3C3D3
4	2	1	2	3	A2B1C2D3
5	2	2	3	1	A2B2C3D1
6	2	3	1	2	A2B3C1D2
7	3	1	3	2	A3B1C3D2
8	3	2	1	3	A3B2C1D3
9	3	3	2	1	A3B3C2D1

1.5.2 涂覆样件制备

按上述工艺流程在室温下进行涂覆样件的制备,操作步骤如下:操作人员用长杆洁具蘸乙酸乙酯伸入试验样件内孔,擦拭多次将内孔擦拭干净,自然干燥后用长杆羊毛刷蘸底涂液在试验样件内孔涂一层底涂液,室温自然干燥 30 min 后,底涂液达到表干状态。按表 2~3 各组胶液质量配比依次称取硅橡胶混炼胶、交联剂、促进剂、乙酸乙酯配制 1 500 g 硅橡胶喷涂液(单枚试验样件内孔硅橡胶喷涂量),用气动搅拌机将硅橡胶喷涂液搅拌均匀(底部无沉淀块),搅拌完成后静置 10 min 使硅橡胶液中气泡溢出,然后将硅橡胶喷涂液放置于壳体涂覆机料桶中并封盖,将试验样件吊装至壳体涂覆机旋转机构上件位,试验样件头端在远离喷枪端,按表 2~3 对壳体涂覆机进行参数设置,参数确认无误后启动壳体涂覆机,涂覆机旋转机构带动壳体匀速旋转,喷涂机构伸入试验样件内孔进行往复喷涂,1 h 后硅橡胶喷涂完成,喷涂机构停止喷涂并返回原位,壳体继续在旋转机构上旋转 2 h,然后将试验样件从涂覆机上吊装下件,硅橡胶涂层室温自然晾干 72 h 后,涂层达到实干状态,涂覆样件制备完成。

1.5.3 涂层检验

将涂覆样件拆成上下壳体并平放至地面,采用目视检查上下壳体硅橡胶涂层外观,观察表面是否平整、厚度均匀、无流挂、堆积、漏底、针孔和皱褶等疵病。

用刀片从上下壳体内表面分别切 1 块涂层,观察涂层切片截面是否存在气孔,然后用外径千分尺(精度 0.001 mm)在涂层切片上选 3 点计算涂层切片厚度(3 点厚度均值)。

2 结果与讨论

图 3 为不同试验组涂层切片截面外观照片,图 4 为不同试验组壳体涂层外观照片,表 4 为不同试验组壳体涂层检验结果汇总。

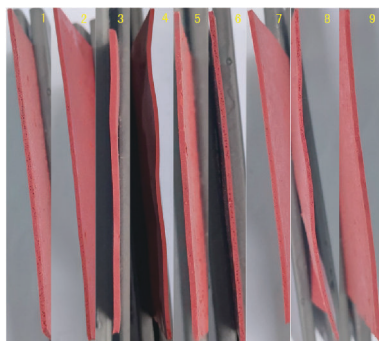


图3 不同试验组涂层切片截面外观照片

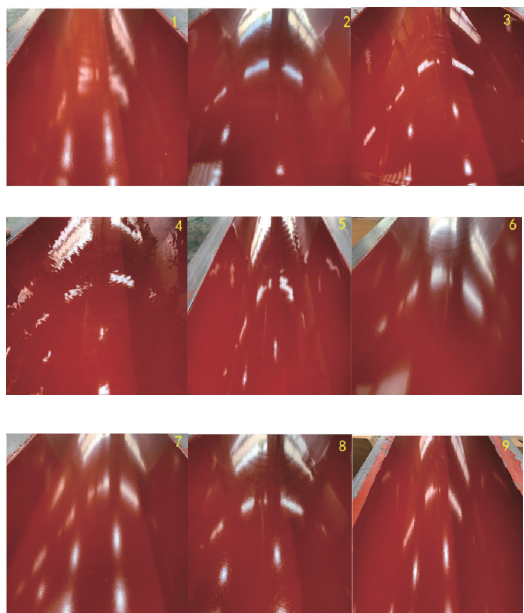


图4 不同试验组壳体涂层外观照片

表4 不同试验组壳体涂层检验结果

试验号	壳体表面涂层外观	涂层切片截面外观	上壳体涂层切片厚度/mm	下壳体涂层切片厚度/mm
1	表面不平,存在大量针孔	气孔较多	1.016	1.008
2	表面平整,存在轻微针孔	气孔较少	1.025	1.026
3	表面平整光滑,厚度均匀,无流挂、堆积、漏底、针孔和皱褶	无气孔	1.182	1.185
4	表面皱褶,无针孔	无气孔	1.224	1.490
5	表面平整光滑,存在轻微针孔	气孔极少	1.157	1.159
6	表面平整,存在大量针孔	气孔较多	1.003	1.006
7	表面平整,存在大量针孔	气孔极少	1.142	1.141
8	表面平整,存在大量针孔	气孔较多	1.083	1.075
9	表面不平,存在轻微针孔	无气孔	1.062	1.067

试验结果显示: 试验样件内孔硅橡胶涂层厚度均在 1.0~1.5 mm, 满足涂层质量要求, 除试验组 4 外, 其余组上下壳体涂层厚度接近, 涂层厚度均匀。

试验组 3 涂层质量最佳, 涂层表面平整光滑、无流挂、堆积、漏底、针孔和皱褶等疵病, 涂层切片截面无气孔, 结构致密, 满足涂层质量要求。试验组 3 工艺参数: 胶液质量配比为硅橡胶混炼胶: 交联剂: 促进剂: 乙酸乙酯=100:20:0.5:54.2、硅胶桶压力为 0.35 MPa、喷枪压力为 0.45 MPa、壳体转速为 70 r/min、喷枪移动速度为 50 mm/s。

试验组 1、试验组 6、试验组 8 工艺参数中壳体旋转速度一致(壳体转速为 50 r/min), 涂层表面均存在大量针孔, 涂层切片截面气孔较多, 说明壳体旋转速度较慢时, 壳体内孔单位时间单位面积喷涂湿膜厚度过高, 导致湿膜中溶剂难以及时溢出, 涂层表干后, 在后续干燥过程中, 涂层内部溶剂逐渐挥发导致涂层表面及内部出现大量气孔, 导致结构不够致密。

试验组 4 样件内孔涂层表面出现皱褶现象, 涂层厚度不均, 其与试验组 3 相比, 胶液质量配比一致, 硅胶桶压力较大, 而喷枪空气压力较小, 故试验组 4 硅橡胶喷涂液雾化程度较差, 雾化颗粒较大, 喷涂后导致涂层表面不平。

试验组 7 样件内孔涂层表面存在大量针孔, 而试验组 2 涂层表面仅存在轻微针孔, 其与试验组 2 相比, 胶液质量配比一致, 壳体转速较快, 硅胶桶压力较大, 而喷枪气压较小, 导致硅橡胶喷涂液雾化程度较差, 造成喷涂液雾化颗粒较大, 比表面积小, 溶剂挥发慢, 涂层表干后, 内部溶剂溢出造成针孔。

综上, 硅橡胶压力、喷枪空气压力、胶液质量配比、壳体转速及喷枪移动速度等参数必须选取合适, 方可获得符合质量要求的涂层; 硅橡胶喷涂液雾化程度越好, 试验样件内孔单位时间单位面积喷涂湿膜厚度越薄, 涂层表面越平整、光滑、致密。

3 结语

本文开展了大长径比壳体内孔硅橡胶涂层一次涂覆成型工艺研究, 通过正交试验研究了硅胶桶压力、喷枪空气压力、壳体转速、胶液质量配比等对大长径比壳体内孔硅橡胶涂层质量的影响。结果表明: 硅橡胶喷涂液雾化程度越好, 壳体内孔单位时间单位面积喷涂湿膜厚度越薄, 涂层表面越平整、光滑、致密(无气孔)。按试验组 3 工艺参数喷涂, 涂层表面平整光滑, 厚度均匀, 层间无气孔、无流挂、堆积、漏底、针孔和皱褶等疵病, 满足涂层质量要求, 该工艺适用于大长径比壳体内孔硅橡胶涂层(1.0~1.5 mm)一次涂覆成型。目前该工艺已应用于大长径比壳体内孔涂覆, 并实现了自动化, 效果良好。

参考文献:

- [1] 邹汝青. 硅橡胶用底涂液的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [2] 张军. 硅橡胶用底涂剂的研究进展[J]. 现代化工, 2007(S2): 82-87.
- [3] 顾益庆. 生物可降解支架涂层制备及体外释放性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.