

胚料准备对 FX-4 橡胶密封圈性能影响的研究

王冰雪，徐倩倩，张晓峰*

(成都航利集团，四川 成都 611930)

摘要：本文针对 FX-4 橡胶密封圈坯料准备过程中，显著影响其性能的三道工序进行研究，开展不同参数不同水平的组合验证试验，进行对应的检测项目，确定最优参数组合。

关键词：坯料准备；FX-4；橡胶密封圈；性能

中图分类号：TQ32

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2026)02-0055-04

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.02.011

0 前言

FX-4 橡胶具有优良的耐高温、耐真空性能，并且还耐强酸、耐各种油类、耐臭氧老化性等，综合性能非常优异，是在航空发动机领域应用十分广泛的一种橡胶。

FX-4 橡胶密封圈坯料准备过程涉及坯料软化、坯料薄通、坯料圈成型三道工序。本文针对此三道工序进行研究，开展不同参数不同水平的组合验证试验，进行对应的检测项目，确定最优参数组合。本研究对保证我公司 FX-4 橡胶密封圈生产过程的精准化和产品制造质量的稳定性具有重要意义。

1 试验

1.1 主要设备

炼胶机，XK-250；硫化机，HPC-100D，100 t；微机控制电子万能试验机，CMT4303，1 t；烘箱，WG3006，最高使用温度 300 °C；闪测仪，VX3 200D，分辨率：0.1 μm。

1.2 试样制备

胶料采用炼胶机进行混炼复炼。设置辊距为 1.7/2.85/4 mm，将胶料通过 3/5/7 次进行软化；锁紧辊距进行薄通，薄通 10~15 次；使用乙酸乙酯将胶条两端部分重叠黏接成圈。

混炼胶采用两段硫化，一段硫化采用硫化机，硫化条件为 175 °C，15 min，13 MPa；二段硫化在烘箱中进行，处理条件为 250 °C，8 h。

针对坯料准备（坯料软化、薄通、坯料圈成型）

进行不同参数不同水平的组合验证试验，进行对应的检测项目，详细方案见表 1。

1.3 试验方法

GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》。

GB/T 3452.1—2008《液压气动用 O 形橡胶密封圈第 1 部分：尺寸系列及公差》。

GB/T 531.1—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度试验方法，第 1 部分：邵氏硬度计法（邵尔硬度）》。

2 结果与分析

2.1 坯料软化

坯料软化是复炼工序的准备工序，其目的是降低混炼胶硬度，提升混炼胶整体温度，以提高复炼效果。以往工艺文件中对软化工序的要求仅为“放开辊距，使胶料通过几次，待胶料变软”。为分析辊距和通过次数对胶料变软程度的影响，对辊距和通过次数进行组合验证试验，用邵尔硬度（ShoreA）来评判胶料的软化程度（邵尔硬度越低代表软化程度越好）。每组组合进行三次测试，其结果如表 2 所示。

将每组参数的邵尔硬度值计算平均值，分别对辊距和通过次数对胶料邵尔硬度的影响关系绘制曲线图，如图 1 所示。

从图 1 中可以看出，随着辊距的增加，胶料邵尔

作者简介：王冰雪（1992-），男，汉族，工程师，主要从事材料工程方面的研究。

表 1 研究方案表

序号	工序	参数	试验方案	结果分析	预期目标
1	坯料软化	软化次数	将 3 种次数和 3 种辊距进行两因素水平试验, 共 9 组参数, 45 件试验件, 分别进行数据检测和分析	通过硬度与次数、辊距的相关性趋势图进行最优参数分析	确定最优软化辊距和参数组合
2		软化辊距			
3	坯料薄通	薄通次数	进行 3 种薄通次数的单因素变化试验, 每种参数 5 件试验件, 进行数据检测和分析	通过外观质量进行参数有效性准入评选, 通过薄通次数与硬度变化的趋势图进行最优参数分析	确定最优薄通次数参数
4	坯料圈成型	搭接长度	将 4 种成型圈内径和 3 种搭接长度进行两因素水平试验, 形成 12 组参数组合, 每组 10 件试验件进行数据检测和分析	通过组内有效黏接合格率确定最小搭接长度, 通过扯断力变化趋势确定最佳搭接长度	确定最佳搭接长度

表 2 软化程度试验

试验编号	辊距 /mm	通过次数 / 次	胶料邵尔硬度	试验编号	辊距 /mm	通过次数 / 次	胶料邵尔硬度
1	1.7	3	48	24	2.85	5	38
2	1.7	3	46	25	2.85	5	37
3	1.7	3	50	26	2.85	7	49
4	1.7	3	47	27	2.85	7	48
5	1.7	3	44	28	2.85	7	50
6	1.7	5	43	29	2.85	7	47
7	1.7	5	47	30	2.85	7	49
8	1.7	5	39	31	4	3	58
9	1.7	5	50	32	4	3	59
10	1.7	5	39	33	4	3	61
11	1.7	7	48	34	4	3	60
12	1.7	7	40	35	4	3	58
13	1.7	7	50	36	4	5	58
14	1.7	7	47	37	4	5	57
15	1.7	7	31	38	4	5	60
16	2.85	3	51	39	4	5	53
17	2.85	3	50	40	4	5	54
18	2.85	3	55	41	4	7	58
19	2.85	3	51	42	4	7	57
20	2.85	3	50	43	4	7	60
21	2.85	5	42	44	4	7	53
22	2.85	5	39	45	4	7	56
23	2.85	5	43				

硬度显著增加；随着通过次数的增加，邵尔硬度先下降后增加，通过 5 次 < 通过 7 次 < 通过 3 次。所以基于以上胶料软化工序试验验证分析，结合软化工序对胶料硬度降低的作用和生产效率，确定软化工序精准化工艺参数如下：辊距 1.7 mm；通过次数 5 次。

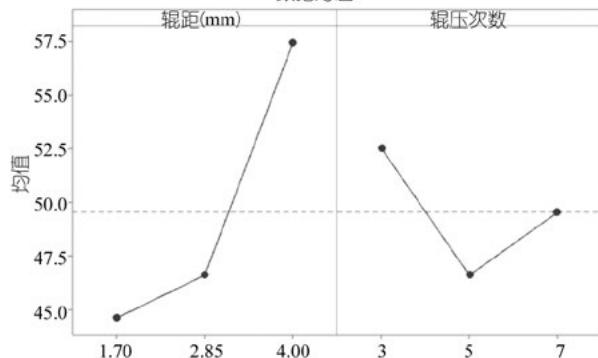
邵尔硬度 主效应图
数据均值

图 1 辊距和通过次数对胶料邵尔硬度的影响

2.2 坯料薄通

坯料薄通的目的是通过机械剪切力的作用，使胶料的大分子链发生断裂，并与空气中的氧发生反应生成稳定的过氧化物基团，降低分子量。参考北京航空材料研究所橡胶制品工艺对薄通的要求是：待胶料变软后锁紧辊距进行薄通，薄通次数 10~15 次。

从原理上分析，薄通时辊距越小，薄通效果越好，但综合考虑设备安全使用的因素，用于 FX-4 橡胶复炼的设备 XK-250 的使用说明书对于辊距调试条款的要求为：正常调试时，左、右辊距调节间隙限制在 0.2~20.0 mm 范围。薄通工序试验验证的辊距设定为左、右辊距调节间隙分别为 0.2 mm，即两辊之间辊距为 0.4 mm。

对于薄通次数指标设计，在工艺要求的范围内，分别设定薄通次数为 10 次，13 次和 15 次。流动性越好对抗力越差，邵尔硬度值越低。所以，薄通后出片

进行邵尔硬度检测以表征胶料的流动性。在此基础上，薄通后进行坯料表面外观检查，验证薄通次数对外观质量的影响，验证结果如表 3 所示。

表 3 薄通次数试验

试验编号	薄通次数 / 次	胶料邵尔硬度 / 度	外观质量
1	10	56	合格
2	10	55	合格
3	10	54	合格
4	10	54	合格
5	10	48	合格
6	13	35	合格
7	13	36	合格
8	13	37	合格
9	13	41	合格
10	13	36	合格
11	15	45	合格
12	15	43	合格
13	15	49	合格
14	15	46	合格
15	15	43	合格

通过表 3 可以看出，不同的薄通次数下胶料的外观质量均合格，证明 10 次、13 次和 15 次的薄通次数对胶料的外观质量不会造成影响。通过表 3 绘制薄通次数对胶料邵尔硬度的影响关系，如下图 2 所示。

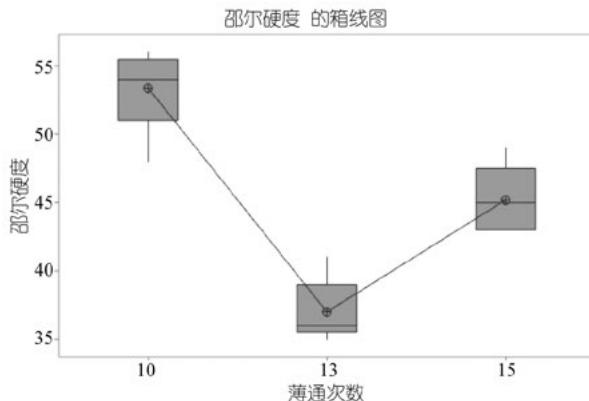


图 2 薄通次数对胶料邵尔硬度的影响

从图 2 中可以看出，随着薄通次数的增加，胶料邵尔硬度先下降后增加，薄通 13 次 < 薄通 15 次 < 薄通 10 次。综合考虑到工艺中对 FX-4 薄通次数 10~15 次的要求、薄通次数对外观质量的影响和胶料邵尔硬度值的变化趋势，确定最佳薄通次数为 13 次。

通过软化工序和薄通工序试验验证，确定最优参数如下：设置辊距 1.7 mm，使胶料通过 5 次；锁紧辊距 0.4 mm，薄通 13 次。

2.3 坯料圈成型

为分析搭接长度对黏接效果的影响，选用成圈后内径 10 mm、20 mm、40 mm 和 60 mm，使用乙酸

乙酯辅助黏接搭接，搭接长度选用 3 mm、5 mm 和 7 mm，成圈后内径和搭接长度相互排列组合进行验证试验，每组试验方案黏接 10 件以降低异常波动影响，用每组参数有效黏接合格率和拉断力指标反映黏接效果，计算每组试验方案的有效黏接合格率，如下图 3 所示：

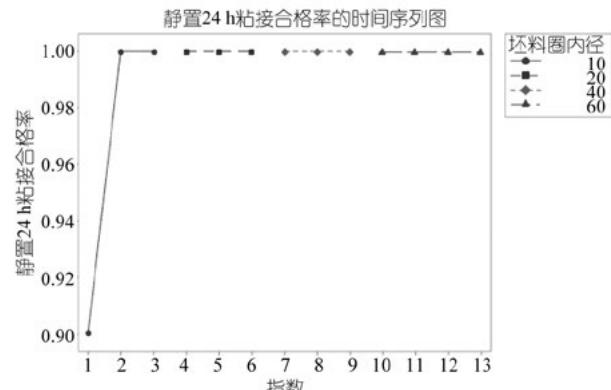


图 3 不同试验方案下有效黏接合格率趋势图

从图 3 中可以看出，成圈后试验组 $\Phi 10$ mm、 $\Phi 20$ mm、 $\Phi 40$ mm 和 $\Phi 60$ mm 搭接长度为 3 mm 时，有效黏接合格率分别为 90%、100%、100% 和 100%，搭接长度为 5 mm 和 7 mm 时，有效黏接合格率均是 100%。

绘制搭接长度对拉断力的影响关系如下图 4 所示：

从图 4 可以看出， $\Phi 10$ mm 试验组在搭接长度为 7 mm 时的拉断力最高； $\Phi 20$ mm 试验组对于不同搭接长度拉断力无明显变化； $\Phi 40$ mm 试验组在搭接长度为 5 mm 时的拉断力最高，到 7 mm 时拉断力略微下降， $\Phi 60$ mm 试验组对于不同搭接长度拉断力呈现整体上升的趋势，到 7 mm 时拉断力最高。搭接长度为 3 mm 和 5 mm 时拉断位置为搭接区，搭接长度为 7 mm 时拉断位置为非搭接区。这是因为搭接长度为 7 mm 时，搭接区域的强度已高于坯料条自身的强度，所以出现坯料条被拉细直至断裂的现象。

所以综合考虑成圈后有效黏接合格率和搭接强度，确定最佳搭接长度为 5 mm。

3 结论

通过试验验证，生产 FX-4 橡胶密封圈的坯料准备阶段最优参数如下：设置辊距为 1.7 mm，将胶料通过 5 次进行软化；锁紧辊距至 0.4 mm，薄通 13 次；使用乙酸乙酯搭接坯料圈，搭接长度为 5 mm。

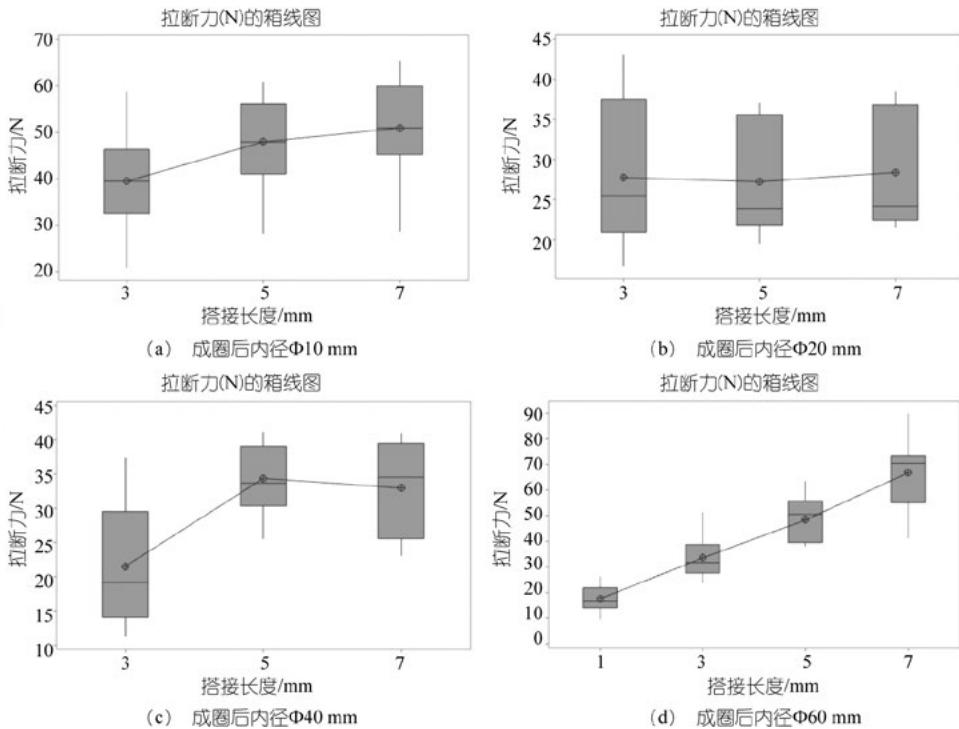


图 4 搭接长度对拉断力的影响关系图

参考文献 :

- [1] GB/T 528—2009, 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定 [s].
- [2] GB/T 3452.1—2008, 液压气动用 O 形橡胶密封圈, 第 1 部分:

尺寸系列及公差 [s].

- [3] GB/T 531.1—2008, 硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度试验方法, 第 1 部分: 邵氏硬度计法 (邵尔硬度) [s].

Study on the influence of raw material preparation on the performance of FX-4 rubber sealing rings

Wang Bingxue, Xu Qianqian, Zhang Xiaofeng*

(Chengdu Hangli Group, Chengdu 611930, Sichuan, China)

Abstract: This article focuses on the three processes that significantly affect the performance of the FX-4 rubber sealing ring during its preparation. Combination verification tests with different parameters and levels are conducted, and corresponding testing items are performed to determine the optimal parameter combination.

Key words: billet preparation; FX-4; rubber sealing ring; performance

(R-03)

