

小规格半钢子午线轮胎胎圈气泡成因分析及控制方法研究

谭苗，任乔伟，李小明，杨姣，杜凡

(陕西延长石油集团橡胶有限公司，陕西 咸阳 712000)

摘要：针对半钢子午线轮胎，二次法成型中，小规格胎圈气泡高发问题，系统分析成因并提出改进方案。通过调整胎圈材料分布、胎侧正包量、钢丝圈结构、内衬层宽度、硫化钢圈尺寸及钢丝圈缠棉纱线等措施，显著降低气泡发生率至1%。验证表明，钢丝圈缠棉纱线为最优方案，可有效提升轮胎外观质量。

关键词：半钢子午线轮胎；胎圈气泡；内衬层；胎侧；钢丝圈；棉纱线

中图分类号：TQ336.1

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2025)12-0059-04

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.12.012

随着我国汽车工业的快速发展，人均汽车保有量的增加，轮胎需求量有突飞猛进的增长。同时人们对轮胎的安全性关注度提高。轮胎生产过程中的质量问题要逐渐减小，对质量问题的改善，各种新材料的开发给轮胎设计研发提供了多种选择。

2024年半钢子午线轮胎产量同比增长约5%~8%，受益于新能源汽车需求拉动，据国家统计局公布的数据，子午线轮胎产量8.19亿条，增长8.6%亿条。据中橡协轮胎分会统计，子午线轮胎产量8.14亿条，增长8.4%，其中，半钢胎6.75亿条，增长11.4%。

在半钢子午线轮胎中，成型二次法机台生产小规格时，易出现胎圈气泡不良问题。据NHTSA数据显示，气泡会导致轮胎脱圈事故发生率，其中0.3%的胎圈失效与气泡相关。

二次法成型机成型分为一段成型和二段成型。一条轮胎由一段和二段共同完成，因此称为一组。一段成型包括供料架供料、机械扣圈、胶囊反包、压合等，其工艺质量要求严格控制各胶部件的尺寸、重量和接头精度，各部件配对使用重量按规定位置相互错开，提高轮胎的均匀性能。二段成型是将带束层、冠带条及胎面用供布架压贴在成型鼓上贴合，用夹持环传递到无胶囊机头上成型，后压辊压实。

针对胎圈气泡问题，我公司分别通过调整内衬层宽度、合理优化过渡层与气密层极差、调整胎侧正包

量、调整胎圈部位材料分布及钢丝圈结构、改进成型预复合后压辊位置、改进成型扣圈盘尺寸、优化硫化钢圈尺寸、钢丝圈缠棉纱线等措施进行改进，其中钢丝圈缠棉纱线方案取得良好效果，使小规格轮胎胎圈气泡发生率降低到1%左右，可有效提升轮胎外观质量。

小规格轮胎易发生胎圈气泡的原因，因为小规格轮胎的特殊点，在于胎圈曲率半径小，易造成材料在胎圈部位的堆积。

胎圈气泡导致我公司轮胎废品率较高，气泡废品率每降1%，年产百万条轮胎可节省成本200万元左右。

1 胎圈气泡特征

1.1 胎圈气泡示意图

AUB (BBB)：成品胎胎圈部位半部件层间气泡。图1示出了胎胚时帘布与内衬层间气泡、图2示出了成品胎层间气泡。

BBB：成品胎胎趾部位表皮气泡。图3示出了成品胎表皮气泡。

1.2 胎圈气泡分类

胎圈气泡示意图见图1~3。

作者简介：谭苗（1991-），女，工程师，学士，主要从事轮胎结构设计工作。

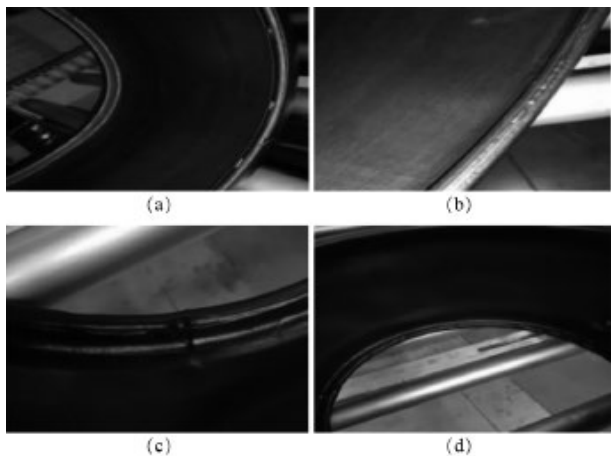


图1 胎侧帘布-内衬层间形貌

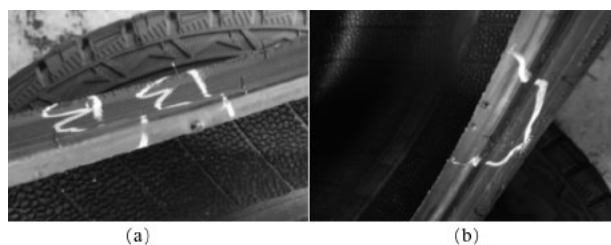


图2 成品胎 BBB



图3 成品胎 AUB (BBB)

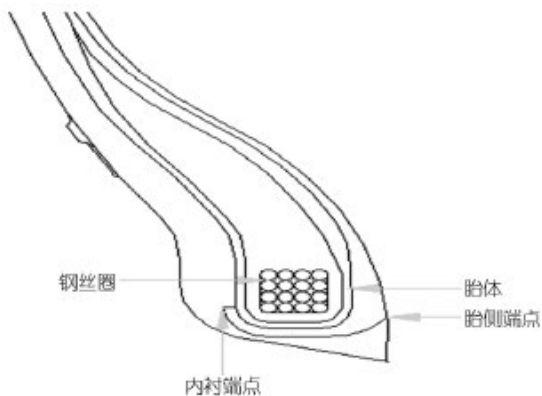


图4 胎圈部位半部件材料分布图

2 原因分析

图4示出了胎圈部位半部件材料分布图。

通过多方验证及调查，确定如下两方面因素导致半钢子午线轮胎胎圈气泡高发。

2.1 成型气体残留原因

成型阶段，内衬与胎体间气体残留的主要原因：反包胶囊压力不足 ($< 0.2 \text{ MPa}$)、过渡层与气密层差级设计失配 (原 270 mm/240 mm 导致界面堆积)、胎侧帘布褶皱，使气体受困于高黏度胶料界面。

胎侧与内衬间气体残留的主要原因：后压辊位置及压力不匹配 ($< 0.15 \text{ MPa}$)、胎侧正包量设计失配，正包量不足导致微气囊形成。

2.2 硫化气体残留原因

轮胎胎趾宽度设计不合理，钢圈宽度设计不合理，使胎趾与钢圈宽度不匹配；胎趾部位胶料堆积造成，使胶料过度压缩阻隔气体逸散。

3 解决措施

为解决在成型二次法生产时，小规格轮胎易发生的胎圈气泡问题，分别对导致胎圈气泡高发的 2 个因素进行改善，主要从以下 7 方面进行了验证。

3.1 钢丝圈结构调整

钢丝圈结构调整方案：方形 5×4 结构 → 方形 4×5 结构 → 六角 5-6-5 结构 → 六角 4-5-4 结构。

3.2 内衬层厚度调整

内衬由 A 料 (厚度 1.2 mm) 调整为 B 料 (厚度 1.4 mm)。

3.3 过渡层与气密层极差调整

图5、图6示出了过渡层与气密层宽度变化，宽度由 270 mm/240 mm 调整为 250 mm/270 mm。

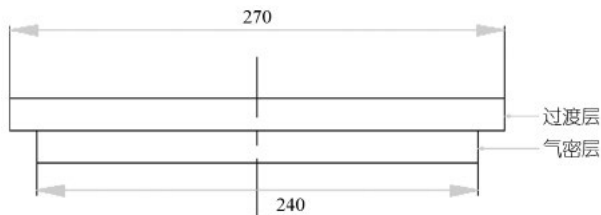


图5 过渡层宽度 270 mm，气密层宽度 240 mm

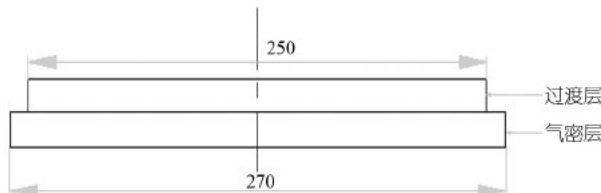


图6 过渡层宽度 250 mm，气密层宽度 270 mm

3.4 胎侧正包量调整

在保证无其他外观不良情况下，胎侧正包量适当调整。

3.5 扣圈盘尺寸调整

扣圈盘尺寸由 1 286 mm 调整为 1 281.5 mm，适当减小 BIC（钢丝圈周长）使圈口部位胶料减少，有助于排气。

3.6 硫化钢菱宽度调整

钢菱内径：由 16" 调整为 14"，钢菱宽度：由 15 mm 调整为 13.5 mm。

3.7 钢丝圈缠棉纱线调整

（1）钢丝圈缠绕棉纱线，棉纱线缠绕形成毛细通道，促进界面气体在硫化过程中沿纱线间隙逸散，同时减少胶料局部堆积（图 7~ 图 9）。

棉纱线直径 < 0.3 mm 时，通道效应不足（表 1：10%），棉纱线直径大于 0.5 mm 时，影响钢丝圈刚性（疲劳寿命下降 15%）。选择直径 0.4 mm 左右棉纱线，缠绕间距 50 mm 左右。通过相近规格四次小批量及扩大验证，均无胎圈气泡发生。

图 7 示出了缠棉纱线的钢丝圈、图 8 示出了缠棉纱线的胎圈、图 9 示出了棉纱线缠绕间距。

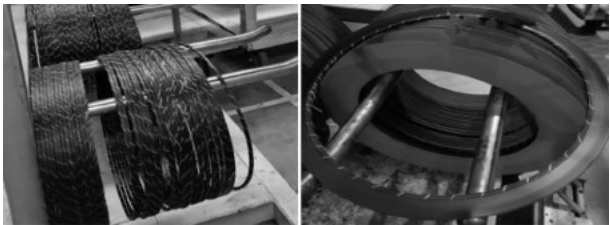


图 7 缠棉纱线的钢丝圈 图 8 缠棉纱线的胎圈

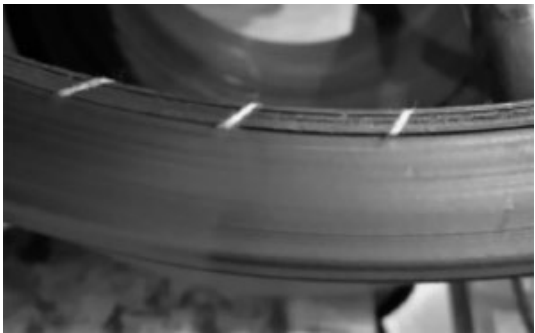


图 9 棉纱线缠绕间距约 50 mm

（2）表 1 示出了棉纱线物理性能参数对照信息。对不同材料吸水率和抗拉强度进行对比。

表 1 棉纱线物理性能对照表

材料	吸水率 /%	抗拉强度 /MPa
棉纱线	8.5	320
尼龙 66	4.2	850
涤纶	0.4	1 100

棉纱线是一种纺织材料，通常由棉花纤维经过纺纱工艺加工而成。根据纱线的粗细和用途，棉纱可以分为不同的类别，如细纱、中纱和粗纱等。棉纱吸水率是一个非常重要的指标，它会影响纺织品的质量和性能。通过表 1 可以看出，三种材料对比，棉纱线的吸水率更好，尼龙 66 次之，涤纶最差。织物透气性是指织物两侧存在压差时，空气从织物的孔隙透过的性能。根据所需纺织品透气性需求，通过透气性预测，在投入生产之前便可准确进行织物的规格设定。因此织物的透气性预测对于纺织品的生产及使用具有指导意义。材料的吸水率越好，材料的空间排布合理，则其排气性能越好。

（3）棉纱线排气机理分析

Washburn 方程（又称 Lucas-Washburn 方程）描述了液体在毛细管中渗透的行为。根据该方程，液体的渗透速率与孔隙的面积、压差、孔隙半径、液体黏度和孔隙长度等因素有关。具体来说，渗透速率与面积和压差成正比，而与孔隙半径的平方和液体黏度成反比。该方程在纳米科学和纳米技术研究中有着广泛应用，能够帮助了解纳米材料的孔隙结构和表面性质。该公式对轮胎中的胎圈气泡同样适用，式中可看出气体迁移高度与表面张力、纱线间距、接触角、胶料黏度及压差等因素相关，与表面张力、纱线间距、接触角、压差正相关，与胶料黏度负相关。

$$h = \sqrt{\frac{\gamma d \cos \theta}{4 \eta} t}$$

式中： h —气体迁移高度；
 γ —表面张力；
 d —纱线间距；
 θ —接触角；
 η —胶料黏度；
 t —压差。

4 改善效果

对二次法两个小规格进行试验，胎圈气泡发生率对比数据如下。

表 2 示出了 165/55R15 MOZZO 4S 规格胎圈气泡改善方案；表 3 示出了 165/40R16 MOZZO 4S 规格胎圈气泡改善方案。

165/55R15 改善前胎圈气泡发生率为 37%。改善后，根据表 2 可得，钢丝圈缠棉纱线方案，可有效降

表 2 165/55R15 MOZZO 4S 规格胎圈气泡改善方案

规格	改善方案	气泡 发生率
165/55R15	内衬减窄 10mm、内衬差级调整	30%
	胎圈部位刷外喷涂	35%
	胎侧加厚（胎圈部位加厚）	7.5%
	换低三角胶胎圈	12.5%
	钢丝圈上缠棉纱线（棉纱线直径约 0.1 mm）	10%
	钢丝圈上缠棉纱线（棉纱线直径约 0.4 mm）	0
	钢丝圈上缠棉纱线扩大验证	0

低胎圈气泡发生率。

表 3 165/40R16 MOZZO 4S 规格胎圈气泡改善方案

规格	改善措施	气泡 发生率
165/40R16	钢丝圈结构调整	2.7%
	胎侧正包量调整	7%
	扣圈盘尺寸调整	10%
	钢圈内径、钢菱宽度调整	34.1%
	钢丝圈上缠棉纱线（棉纱线直径约 0.4 mm）	0
	钢丝圈上缠棉纱线扩大验证	0

165/40R16 改善前胎圈气泡发生率 17%。改善后，根据表 3 可得，上述方案可减小胎圈气泡发生率，未能彻底解决；过度减窄钢圈宽度反而增加胎圈气泡发生率，反证气体逸散空间的重要性。

结合表 2、表 3 结果，钢丝圈缠棉纱线方案效果最佳，棉纱线有助于排气，主要取决于棉纱线的毛细作用增强界面气体逸散通道。

5 结语与讨论扩展

5.1 结语

胎圈气泡的成因集中于成型阶段气体残留（内衬

/ 胎体界面、胎侧 / 内衬界面）及硫化阶段胎胚 - 钢圈匹配不良。在 7 项改进措施中：

（1）钢丝圈缠绕棉纱线（直径 $0.4\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ ，间距 $50\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ ）是核心方案，通过建立毛细排气通道使气泡发生率趋近于 0%；

（2）辅助措施：六角 4-5-4 钢丝圈结构减少应力集中；扣圈盘尺寸调至 $1\ 281.5\text{ mm}$ （BIC 减小 4.5 mm ）可降低胶料冗余；

（3）需规避钢圈过度缩窄（如宽度 13.5 mm 时气泡率提升至 34.1%，表 2）。

该方案经 165/55R15、165/40R16 规格批量验证，胎圈气泡发生率稳定控制 $\leq 1\%$ 。

5.2 讨论扩展

5.2.1 多方案失效分析

钢圈减窄负面案例：宽度 13.5 mm 时胎趾压缩应变超限。

5.2.2 棉纱线方案优势

轮胎的全生命周期验证：对缠绕棉纱线轮胎进行路试验证，轮胎行驶 5 万 km 后棉纱线降解程度 $< 3\%$ 。轮胎钢丝圈缠绕棉纱线时，单胎增加 0.8 元成本，废品率下降节省 37 元 / 条，综合来看，轮胎钢丝圈缠绕棉纱线可节省轮胎成本。

5.2.3 工业 4.0 应用展望

后期实现工业 4.0 时，同步实现胎圈智能缠绕棉纱线，机器实现视觉实时监控纱线间距（精度 $\pm 0.1\text{ mm}$ ）。基于张力传感器数据预警缠绕异常。

Analysis of the causes of bead bubbles in small-sized semi-steel radial tires and research on control methods

Tan Miao, Ren Qiaowei, Li Xiaoming, Yang Jiao, Du Fan

(Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Rubber Co. LTD., Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: In response to the high occurrence of small-sized bead bubbles in the secondary building process of semi-steel radial tires, this study systematically analyzes the causes and proposes corresponding improvement measures. By adjusting the distribution of bead materials, the amount of sidewall overlap, the structure of the steel bead, the width of the inner liner, the size of the vulcanized steel bead, and adopting measures such as wrapping cotton yarn around the steel bead, the occurrence rate of bubbles has been significantly reduced to 1%. Verification results show that wrapping cotton yarn around the steel bead is the optimal solution, effectively enhancing the appearance quality of the tire.

Key words: semi-steel radial tire; bead bubble; inner liner; sidewall; steel bead; cotton yarn

(R-03)