

塑胶瓶盖在巴氏灭菌工况下的密封设计简析

刘保舟，杨吉红，胡昌红，刘杨，凌生愉

(四川省宜宾普拉斯包装材料有限公司，四川 宜宾 644000)

摘要：塑胶瓶盖作为白酒包装中保障密封的核心部件，在常温工况下已形成成熟的设计方案，但巴氏灭菌高温条件下的密封设计缺乏系统性的参考。本文通过分析高温环境对塑胶瓶盖密封性能的影响机制，采用单一变量实验方法，系统考察密封结构参数与材料配方对高温密封性能的影响规律，为巴氏灭菌工况下塑胶瓶盖的密封设计提供参考。

关键词：密封设计；结构参数；材料配方；高温密封性

引用论文：刘保舟，杨吉红，胡昌红，等．凌生愉塑胶瓶盖在巴氏灭菌工况下的密封设计简析[J]．橡塑技术与装备，2026，52(10):63-66．

中图分类号：TQ330.63

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2026)10-0063-04

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.10.012

0 引言

近年来，果酒、米酒、预调酒等低度酒，因口感丰富、场景多元，已成为酒企转型的重要方向。与传统高度白酒无需杀菌不同，低度酒含糖分，灌装后易受微生物污染而变质，因此巴氏灭菌被广泛引入灌装工艺。该工艺在保障生物安全性的同时，给塑胶瓶盖密封系统带来严苛考验，结构或材料设计不当即可能引发漏液。本文从多个层面系统探究高温密封规律，为巴氏灭菌高温下的密封设计提供参考。

1 瓶盖使用工况

瓶盖需经巴氏灭菌高温喷淋，密封性不受其影响，根据酒企常用工艺标准，具体步骤为：升温阶段，60~70℃，喷淋10 min；杀菌阶段，70~80℃，喷淋30 min；③降温阶段，40~50℃，喷淋10 min。

2 瓶盖结构设计介绍

2.1 密封原理

瓶盖依靠内塞外壁与玻璃瓶口内壁的过盈量产生均匀径向压力，同时内塞材料受压变形填满密封界面间隙，阻断液体渗漏。巴氏灭菌工况下，密封核心在于结构经高温处理后仍能保留充足有效过盈量，维持稳定的径向密封压力。

2.2 结构形式选取

瓶盖选用单件式内塞结构。该结构采用单一内塞设计，仅保留内塞与玻璃瓶口密封界面，具备单一部件、唯一失效路径的特点，结构稳定性强，更适配巴氏灭菌高温工况。

2.3 结构方案设计

2.3.1 方案1—下端开口式内塞

密封环上端封闭、下端开口，局部设置鼓包面，鼓包面刚性充足，与玻璃瓶口形成较强的径向压力，见图1。结合上瓶时压盖力，旋盖时手感舒适度^[1]，过盈量选取0.4~0.5 mm。

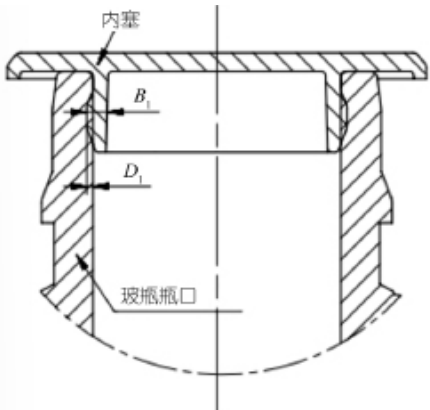


图1 结构方案1

作者简介：刘保舟（1993—），男，工程师，主要从事塑胶瓶盖研究及设计方面的工作。

2.3.2 方案 2—下端封口式内塞

密封环下端封口、上端开口，该结构整体刚度均匀，密封面与玻璃瓶口形成更均匀的径向压力分布，见图 2。过盈量同取 0.4~0.5 mm。

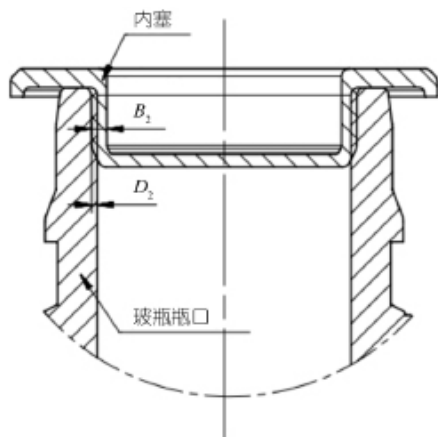


图 2 结构方案 2

3 内塞材料选型

巴氏灭菌过程长期维持高温工况，要求内塞材料同时具备耐热变形能力与尺寸回弹能力，高温下不软化、不塌陷，高温受压变形后冷却能自主回弹复原，维持有效过盈量。

3.1 PP 基材

PP（聚丙烯）属于高结晶度聚烯烃材料，耐温性能优良^[2]、弯曲模量大，

高温下不会出现整体软化、坍塌。但 PP 刚性强、无柔性弹性结构，长时间受高温挤压后冷却无回弹恢复能力，过盈量损耗严重；且材质硬、形变小，无法填满玻璃瓶口的细微凹凸面，不能单独用于巴氏灭菌密封。

3.2 TPE 弹性体

以 SEBS 为基材的苯乙烯类热塑性弹性体 TPE[3]，具备优异的压缩回弹性能，材料质地柔软，可形变填满玻璃瓶口的细微凹凸面，形成连续密封界面，并且内部弹性网络可储存压力势能，冷却后释放回弹力，带动材料恢复尺寸。但纯 TPE 材料耐温性较差，在高温下易软化塌陷，弹性储能持续耗散，失去回弹能力，不能单独用于巴氏灭菌高温工况。

3.3 PP+TPE 复合材料

PP+TPE 复合材料可实现性能优势互补，PP 作为基材提供耐高温的刚性骨架支撑，TPE 提供高回弹、高贴合的柔性特征。两种材料按合理配比混合改性后，

找到结构刚性与回弹性能平衡点，克服单一材料缺陷，是适配巴氏灭菌理想的密封材料。

4 温度作用下材料衰减机理

4.1 常温状态分子运动特征

常温状态下，高分子长链处于稳定缠绕卷曲状态，受挤压后分子链仅发生轻微调整，分子链无明显滑移和解缠结，受力卸载后发生小幅度变形。

4.2 高温状态分子运动特征

在高温状态下，分子链活化能大幅降低，链段运动能力显著增强，受挤压后分子链解缠结与构象重排，原本卷曲的链段舒展滑移，受力卸载后产生较大幅度甚至永久性塑性变形。

5 巴氏灭菌全过程密封机制分析

5.1 升温阶段

内塞整体温度持续上升，分子链段运动能力增强，分子间作用力轻微削弱，刚性短暂下降、柔性提升。宏观表现为内塞密封环均匀热膨胀，径向接触压力小幅度提升。

5.2 杀菌阶段

该阶段是密封性能不可逆衰减的主要工序。长时间高温使分子链由卷曲逐步向舒展、滑移转变，弹性储能不断耗散，可逆弹性逐步转化为不可逆塑性成分，该部分形变无法随降温恢复。宏观表现为密封环逐步蠕变，径向接触压力缓慢下降。

5.3 降温阶段

降温使分子链运动逐渐冻结，错位滑移状态被固定于材料内部，已产生的分子结构损伤无法修复。宏观表现为密封环永久变形，过盈量明显衰减，径向接触压力显著低于初始状态。

6 密封实验

6.1 实验变量

6.1.1 PP 基材

选取市面上常见的 3 种 PP 原料，热变形温度与弯曲模量呈正相关趋势，见表 1。

表 1 3 种 PP 基材相关性能参数

PP 原料种类	热变形温度 /℃	弯曲模量 /MPa
PP1	70~75	400~500
PP2	90~95	600~700
PP3	105~110	900~1 000

6.1.2 PP/TPE 比例

PP/TPE 比例设 8:2、7:3、6:4、5:5 四个梯度。

6.1.3 密封环厚度

径向过盈量统一为 0.4~0.5 mm,密封环厚度设 0.9 mm、1.2 mm、1.5 mm 三个梯度。

6.2 实验方案

采用单一变量控制法,按“PP 基材 →PP/TPE 比例 → 密封环厚度”顺序逐级筛选。每组实验按照第 1 节巴氏灭菌工艺操作,完成后将酒瓶倒置放入负压设备,负压 50 kPa 保压 30 min,每组 200 件,统计漏液数量并测量过盈量衰减值。

6.3 PP 基材筛选

PP/TPE=8:2,密封环厚度 0.9 mm,过盈量 0.4 mm,两种方案同步实验,结果见表 2。

表 2 PP 基材筛选实验结果

实验序列	结构方案	PP 基材	过盈量衰减平均值 /mm	漏液数量
1	方案 1	PP1	0.36	86
2	方案 1	PP2	0.30	52
3	方案 1	PP3	0.33	71
4	方案 2	PP1	0.34	78
5	方案 2	PP2	0.28	43
6	方案 2	PP3	0.31	65

结果表明:两种方案 PP2 均为最优基材。

6.4 PP/TPE 比例筛选

固定基材为 PP2,密封环厚度 0.9 mm,4 种 PP/TPE 比例同步实验,结果见表 3。

表 3 PP/TPE 比例筛选实验结果

实验序列	结构方案	PP/TPE 比例	过盈量衰减平均值 /mm	漏液数量
2	方案 1	8:2	0.30	52
7	方案 1	7:3	0.23	23
8	方案 1	6:4	0.26	35
9	方案 1	5:5	0.29	37
5	方案 2	8:2	0.28	43
10	方案 2	7:3	0.25	29
11	方案 2	6:4	0.22	15
12	方案 2	5:5	0.26	27

结果表明:方案 1 最优比例 7:3,方案 2 最优比例 6:4。

6.5 密封环厚度筛选

方案 1 采用 PP/TPE=7:3,方案 2 采用 PP/TPE=6:4,基材为 PP2,3 种壁厚同步实验,结果见表 4。

表 4 密封环厚度筛选实验结果

实验序列	结构方案	密封环厚度 /mm	过盈量衰减平均值 /mm	漏液数量
7	方案 1	0.9	0.23	23
13	方案 1	1.2	0.21	11
14	方案 1	1.5	0.17	0
11	方案 2	0.9	0.22	15
15	方案 2	1.2	0.19	0
16	方案 2	1.5	0.15	0

结果表明:方案 1 密封环厚度取 1.5 mm;方案 2 密封环厚度可以取 1.2 或 1.5 mm,考虑到上瓶力及开盖力,方案 2 选取 1.2 mm。

7 结论

(1) 方案 1 推荐参数:过盈量 0.4~0.5 mm,密封环厚度 1.5~1.6 mm,PP 原料热变形温度 90~95 ℃,弯曲模量 600~700 MPa,PP/TPE=7:3;

(2) 方案 2 推荐参数:过盈量 0.4~0.5 mm,密封环厚度 1.2~1.3 mm,PP 原料热变形温度 90~95 ℃,弯曲模量 600~700 MPa,PP/TPE=6:4;

(3) 相同条件下,方案 2 密封性优于方案 1,其下端封口结构提供底部刚性支撑,过盈量衰减更小,密封效果更优。

(4) 热变形温度并非越高越好。热变形温度高则高温抗塌陷能力强,但弯曲模量同步升高会抑制回弹,降低尺寸恢复能力与玻璃贴合适配性。

(5) PP/TPE 比例需平衡刚性支撑与弹性恢复。PP 占比高则抗塌陷强但回弹差;TPE 占比高则回弹好但高温易塌陷。

(6) 密封环壁厚增加可提升弹性储备总量,增强尺寸恢复能力,抵消高温形变带来的过盈损耗,但需同时考虑到上瓶力和开盖力。

参考文献:

[1] 胡昌红,潘亚军,王选伦.白酒包装塑胶瓶盖的密封结构设计简析[J].橡塑技术与装备,2019,45(16):55-58.
[2] 吕振兴,杜艳红,徐颖,等.组合式防伪瓶盖密封性探究[J].中国包装,2022,42(11):18-22.
[3] 胡水仙,陈建华,白子文.热塑性弹性体(TPE)简述(上)[J].山西化工,2014,34(3):39-43.

A Brief analysis of the sealing design of plastic bottle caps under pasteurization conditions

Liu Baozhou, Yang Jihong, Hu Changhong, Liu Yang, Ling Shengyu

(Sichuan Yibin Plus Packaging Material Co. LTD., Yibin 644000, Sichuan, China)

(R-03)

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)

