微拱滚筋结构对三片罐罐身抗压强度影响的 试验与仿真研究

巩桂芬^{1a,1b}, 张鼎乾^{1a,1b}, 江轲², 徐尚², 杨楠^{1a,1b}

(1.陕西科技大学 a.轻工科学与工程学院 b.3s 包装新科技研究所, 西安 710021;

2.深圳市大满包装有限公司,深圳 518052)

摘要:目的 在不同微拱滚筋结构下对金属三片罐罐身进行抗压试验与模拟仿真,研究该结构下罐身的 抗压能力。方法 首先,通过金属材料拉伸试验得到材料物理性能参数,并利用 ANSYS Workbench/LS-DYNA 对1、1.5、2 mm 等 3 种向外微拱滚筋结构的三片罐以及直身滚筋罐进行径向压缩仿真 模拟,得到 4 种罐型在相同变形条件下的最大接触力。其次,通过对现有直身滚筋罐和罐身向外微拱滚 筋 1.5 mm 的三片罐进行相同变形条件下的最大接触力。其次,通过对现有直身滚筋罐和罐身向外微拱滚 筋 1.5 mm 的三片罐进行相同变形条件下的径向压缩试验,记录其最大压缩力。最后,对试验数据和有 限元分析结果进行对比分析。结果 3 种幅度的微拱滚筋结构对罐身抗压强度有不同程度的影响,其中 微拱滚筋 1.5 mm 对罐身强度的影响最大,在保证罐身强度和内部容积的同时,可以采用 0.23 mm 厚度 材料替代现有 0.25 mm 厚度材料。结论 金属三片罐罐身在向外微拱滚筋 1.5 mm 后,可以有效提升罐身 的抗压强度,在罐身材料减薄、减量后可以节约 11.42 %的材料使用量,在生产中有着重要意义。 关键词:金属三片罐; 微拱滚筋结构; 抗压强度; 有限元分析

中图分类号: TB482.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)05-0235-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.030

Experiments and Simulations on the Compressive Strength of Three-piece Can Body by Micro-arch Reinforcement Structure

GONG Guifen^{1a,1b}, ZHANG Dingqian^{1a,1b}, JIANG Ke², XU Shang², YANG Nan^{1a,1b}

(1. a. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, b. 3S Research Institute of Novel Packaging Science and Technology, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. Shenzhen Daman Packaging Co., Ltd., Shenzhen 518052, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the compressive test and simulation of metal three-piece can bodies under different micro-arch reinforcement structures, and study the compressive strength of the can bodies under such structures. Firstly, the physical property parameters of the material were obtained through tensile test of metal materials. ANSYS Workbench/LS-DYNA was used to simulate the radial compression of three kinds of three-piece cans with 1 mm, 1.5 mm and 2 mm outward micro-arch reinforcement structures as well as straight-body beaded cans, and the maximum contact force of the four types of cans was obtained under the same deformation conditions. Secondly, radial compression tests were conducted on the existing straight-body beaded cans and the three-piece cans with 1.5 mm micro-arch reinforcement structure under the same deformation conditions, and the maximum compression force was recorded. Finally, the test data and finite element analysis results were compared and analyzed. The compressive strength of the can bodies was affected by the three amplitudes of the micro-arch reinforcement structures, among which the 1.5 mm micro-arch

reinforcement structure had the greatest effect on the strength of the can bodies. On the premise of ensuring the strength of the can bodies and the internal volume at the same time, 0.23 mm thick material could be used instead of the existing 0.25 mm thick material. The metal three-piece can body can effectively improve the compressive strength under the outward micro-arch reinforcement structure of 1.5 mm. After the can body material is thinned and reduced, 11.42% of the material can be saved, which is of great significance for production.

KEY WORDS: metal three-piece can; micro-arch reinforcement structure; compressive strength; finite element analysis

金属包装容器按结构类型可分为三片罐和两片 罐,其相较于一般的包装具有优良的力学强度、方便 运输、不易破损等优势。随着制罐技术发展,节约材 料进行罐身减薄成为趋势^[1]。

金属基包装材料具有出色的阻隔性能,因此被广 泛用于食品包装应用中^[2-3]。目前在食品金属包装上, 通过在罐身滚筋,增加罐身的强度,也可以通过罐底 结构改进, 增强罐底的抗压强度, 进一步减小罐底的 料厚,其抗压强度主要取决于罐底材料的强度、厚度 及罐底的形状^[4]。在包装设计中,利用板料成形数值 模拟软件 DYNAFORM,结合薄板成形的有限元基本 理论和实际生产状况进行分析。同时也可以利用有限 元分析软件 ANSYS 进行稳定性分析金属两片罐与三 片罐的力学模型^[5],或者其他有限元软件 Pam-Stamp 2G、ABAQUS^[6-8],利用试验与仿真分析相结合的方 式,分析金属包装容器由于局部结构变化造成的稳定 性影响^[9-12]。对于三片罐,侧壁的焊缝在结构上相当 于加强筋的作用,提高了罐体轴向承载能力和稳定 性[13]。在实现金属罐轻量化设计时,对金属罐进行跌 落仿真分析、轴向/径向承压试验、耐压试验等验证 方式[14-15],在保证其强度性能的条件下,对金属罐关 键结构进行优化设计,获得满足结构强度、减少材料 用量的优化结构,降低包装成本,为包装产品轻量化 设计提供理论支持和设计参考[16]。

综上,目前针对金属三片罐罐身径向强度的优化 和改进方法存在局限性。因此,文中主要通过对罐身 进行微拱滚筋的结构改进,利用径向压缩试验和有限 元分析,研究不同微拱滚筋结构下其径向抗压强度的 变化,提升金属罐的罐身强度。该研究对未来金属三 片罐的设计以及材料减薄具有重要意义。

1 试验与仿真

1.1 材料力学性能试验

本试验镀锡铁原材料由深圳市大满包装有限公司提供,对硬度为T4、镀锡量为2.8/2.8 g/m²的镀锡铁进行金属材料拉伸试验,参照GB/T228.1—2021^[17]进行试验,参照GB/T2520—2017^[18]进行取样,共选取镀锡铁纵向(LD)和横向(TD)2种方向试样,每个方向各取寸为250 mm×25 mm的5个哑铃形试样,试样两端夹持头部尺寸为55 mm,厚度为0.23 mm。试验仪器

为万能材料试验机(HD-B604-S),试验前后试样变化如图1所示,最终得到10项有效数据。试样的力-位移曲线如图2所示,对其进行处理得到工程应力-应变曲线和真实应力-应变曲线,如图3所示。通过对应力-应变曲线进行处理,可得到材料的弹性模量为205601MPa,屈服应力为891MPa,材料密度为7.85g/cm³。



图 1 拉伸试样 Fig.1 Tensile test sample

b 拉伸后

a 拉伸前





· 236 ·



1.2 有限元分析

本文使用 ANSYS Workbench/LS-DYNA 对不同 微拱滚筋幅度的金属三片罐进行动力学仿真分析,模 型如图4所示,金属三片罐位于压头与下底板之间。 以 502#型金属罐为例, 罐口内径为 126.5 mm, 罐高 为 172 mm, 罐身厚度为 0.23 mm。三者之间互相接 触, 压头保留竖直方向的移动自由度, 最终得到压头 向下位移 8 mm 时的接触力仿真结果。



Fig.4 Simulation model

根据现有行业内普遍应用的金属滚筋罐,罐身滚 筋选用梯形滚筋, 共4道滚筋。其剖面如图5所示, 滚筋深度 H=1.1 mm, 筋宽度 L=12 mm, 内凹短边 $D=3.5 \text{ mm}_{\odot}$



图 5 梯形滚筋剖面 Fig.5 Cross-section of trapezoidal reinforcement

为了便于计算,不保留实物细节,将金属三片罐 的罐盖、罐底、二重卷封结构、焊缝进行简化,将镀 锡铁材料等效为各向同性,通过相关文献查阅,泊松 比设置为 0.3^[19]。在径向压缩时,平放的罐身下半部 分与下板处于绑定状态,不发生相对位移,同时上半部 分罐身与压头为摩擦接触,摩擦系数设置为0.3^[20]。网 格划分单元格尺寸设置为 2.5 mm, 对压头设置向下位 移 8 mm, 分别对直身滚筋罐以及罐身向外微拱滚筋 1、 1.5、2mm 等4种三片罐模型进行分析,如图6所示。





c 1.5 mm微拱滚筋罐

d 2.0 mm微拱滚筋罐

图 6 直身滚筋罐与微拱滚筋罐 Fig.6 Straight-body beaded cans and micro-arch reinforcement cans: a) straight-body beaded can; b) 1.0 mm micro-arch reinforcement can; c) 1.5 mm micro-arch reinforcement can; d) 2.0 micro-arch reinforcement can

1.3 压缩试验

本试验金属罐材料选用硬度为 T4、镀锡量为 2.8/2.8 g/m²、厚度为 0.23 mm 镀锡铁制成的 502# 型金属罐。试验方法部分参照 ASTM D642-20^[21]。 试验仪器为万能材料试验机(HD-B604-S), 压缩试 验压头向下位移速度设置为 5 mm/min, 压头末端为 横截面半径 15 mm 的半圆形圆滑曲面, 如图 7 所示。

本试验共设置直身滚筋罐(对照组)、罐身1.5 mm 微拱滚筋罐(罐身厚度为0.23 mm)2种试验样罐, 两者罐身均为四道筋。将其横向固定在试验机平台 上, 压头向下移动。以罐身在压头作用下变形 8 mm 处为参考点,测试2种罐型在该变形情况下的径向抗 压强度。



图 7 试验机压头 Fig.7 Test indenter

2 结果与分析

2.1 仿真结果分析

通过对厚度为 0.23 mm 直身滚筋罐以及不同幅 度的微拱滚筋罐进行动力学分析。将压头向下移动 8 mm 时(如图 8 所示),得到不同微拱滚筋罐的罐身 在该变形下的接触力,应力云图如图 9 所示。分别在 微拱滚筋 1、1.5、2 mm 条件下,经过压头向下移动, 最终对仿真结果进行拟合汇总,如图 10 所示。1.5 mm 微拱滚筋罐变形 8 mm 时接触力为 480 N,在 3 个结 果中最大。



图 8 下压 8 mm 时不同罐型的变形

Fig.8 Deformation of different cans with 8 mm downward pressure: a) straight-body beaded can; b) 1.0 mm micro-arch reinforcement can; c) 1.5 mm micro-arch reinforcement can; d) 2.0 micro-arch reinforcement can





Fig.9 Stress cloud of different can types under 8 mm deformation: a) straight-body beaded can; b) 1.0 mm micro-arch reinforcement can; c) 1.5 mm micro-arch reinforcement can; d) 2.0 micro-arch reinforcement can



图 10 不问確望仍具致何-位移曲线 Fig.10 Load-displacement curves for simulation of different can types

2.2 压缩试验分析

根据仿真结果,最终得到罐身微拱滚筋 1.5 mm时,其罐身径向强度提升最为明显,因此选用 1.5 mm 微拱滚筋罐的径向压缩试验。对 1.5 mm 微拱滚筋罐 和直身滚筋罐两者试验结果的力-位移曲线进行拟合 汇总,如图 11 所示。两者抗压强度对比如图 12 所示。







试验结果显示,厚度为 0.23 mm 的金属三片罐在 向外微拱滚筋 1.5 mm 的条件下,其抗压强度(接触 力平均值为 474 N)高于 0.23 mm 直身滚筋罐的抗压强 度(接触力平均值为 360 N)。因此,使用微拱滚筋结 构可以有效提高罐身强度,实现金属罐材料减薄。

2.3 仿真模型可靠性分析

本研究共进行 2 次实物试验, 第 1 次实物试验为 现有厚度 0.23 mm 的直身滚筋罐径向压缩试验, 该试 验结果主要为后续进行仿真分析时验证仿真分析结 果的可靠性, 以及作为后续研究的对照组数据。

通过直身滚筋罐径向压缩试验与直身滚筋罐动力 学仿真分析结果对比(如图 13 a 所示)可知,试验结果 最大接触力为 360 N,仿真结果最大接触力为 368 N。将 1.5 mm 微拱滚筋罐的试验与仿真结果对比(如图 13b 所示),试验结果最大接触力为 474 N,仿真结果最大 接触力为 480 N。两者的试验与仿真的载荷-位移曲线结 果基本一致,因此仿真分析的可靠性得到验证。





建立与实际试验尺寸、参数相同的 1.5 mm 微拱 滚筋罐模型进行静态压缩仿真,在罐身压缩 8 mm 后 与实物试验变形进行对比(如图 14 所示),两者变形 情况具有一致性。



a 试验结果

b 仿真结果

图 14 1.5 mm 微拱滚筋罐试验与仿真罐身变形对比 Fig.14 Comparison of test and simulation of body deformation of 1.5 mm micro-arch reinforcement cans: a) test results; b) simulation results

由表1可知,直身滚筋罐和1.5 mm 微拱滚筋罐 的试验与仿真结果相对误差均控制在3%以内,进一 步证明了仿真模拟的可靠性。在仿真与试验结果共同 验证下,金属三片罐罐身在微拱滚筋1.5 mm 情况下, 罐身强度提升最为明显。

表 1 直身罐与微拱 1.5 mm 微拱滚筋罐试验与 仿真数据比较

Tab.1 Comparison of test and simulation data between straight-body beaded cans and 1.5 mm micro-arch reinforcement cans

类型	试验结果/N	仿真结果/N	误差/%
直身滚筋罐	360	368	2.22
1.5 mm 微拱滚筋罐	474	480	1.26

2.4 包装材料使用量对比

微拱滚筋罐首先通过胀型工艺实现罐身微拱,再 对其进行滚筋工艺最终实现罐身的微拱滚筋结构。在 等量内装物的前提下,罐身微拱后内部容积增大,同 时罐身强度也得到提高,进而对罐身材料进行减量、 减薄。

通过胀型和滚筋工艺实现生产制造,以罐高 172 mm、502 #型金属罐为例,现有普通工艺生产单 个金属罐其罐身材料使用面积为70188.8 mm²,胀型工 艺生产单个金属罐其罐身材料使用面积为67572 mm², 在材料使用量上减少2616.8 mm²。

通过罐身微拱滚筋,提升了金属罐罐身强度,若 采用厚度为 0.23 mm 的材料替代目前市面上 0.25 mm 厚的材料,经过计算材料的质量变化,最终单个金属 罐的材料使用量可减少 11.42 %。

3 结语

本文利用有限元仿真分析了 3 种不同微拱滚筋

结构对罐身的影响,通过对现有直身滚筋罐和1.5 mm 微拱滚筋罐实物静态压缩试验,通过两者结果对比分 析验证了仿真的可靠性以及微拱滚筋结构可以提升 罐身抗压强度。结合试验结果以及实际生产应用,罐 身在1.5 mm 微拱滚筋时对其强度影响最大。该结构 下有效提升罐体强度的同时也可以减少11.42 %的材 料使用量,在未来实际生产中具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘连喜,刘建兵.中国金属包装产业及包装材料的发展现状及趋势[J].河北冶金,2015(7):76-79.
 LIULX,LIUJB. Development Situation and Trend of Metal Package Industry and Package Mateirals at Home[J]. Hebei Metallurgy, 2015(7): 76-79.
- [2] DESHWAL G K, PANJAGARI N R. Review on Metal Packaging: Materials, Forms, Food Applications, Safety and Recyclability[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(7): 2377-2392.
- [3] CAIAZZO F C, BRAMBILLA L, MONTANARI A, et al. Chemical and Morphological Characterization of Commercial Tinplate for Food Packaging[J]. Surface and Interface Analysis, 2018, 50(4): 430-440.
- [4] 杨小俊,李小飞,陈将军.金属两片罐罐底结构对其承压能力的影响[J].包装工程,2007,28(11):1-2.
 YANG X J, LI X F, CHEN J J. Effect of the Bottom Configuration on the Compressive Strength of Metal Two-Piece Can[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(11):1-2.
- [5] JACA R C, GODOY L A. Wind Buckling of Metal Tanks during Their Construction[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(6): 453-459.
- [6] CERETTI E, BRAGA D, GIARDINI C, et al. Optimisation of Can Bottom Geometry by Means of Simulations[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 89-92.
- [7] 陈彩锐, 宋敏, 付翠霞, 等. 基于包装结构评价有限 元分析在酸奶瓶型优化中的应用[J]. 包装与食品机 械, 2017, 35(5): 30-32.
 CHEN C R, SONG M, FU C X, et al. Evaluating Packaging Structure Based on Finite Element in the Application of the Yogurt Containers Shape Optimization[J]. Packaging and Food Machinery, 2017, 35(5): 30-32.
- [8] LEWANDOWSKI M J, GAJEWSKI M, GIZEJOWSKI M. Numerical Analysis of Influence of Intermediate Stiffeners Setting on the Stability Behaviour of Thin-Walled Steel Tank Shell[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 90: 119-127.

- [9] SHIN D, CHOI S, JANG G W, et al. Finite Element Beam Analysis of Tapered Thin-Walled Box Beams[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 102: 205-214.
- [10] GAO B J, QI Y, LI Y, et al. Finite Element Analysis of the Limit Load of Pipe Bend with Local Wall-Thinning Defect under Complex Loads[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 208: 105141.
- [11] DAEHN R C, BLUM J J. Failure Analysis of Three-Piece Steel Aerosol Cans[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2004, 4(4): 58-67.
- [12] SÁNDOR Á. Shell Element for Constrained Finite Element Analysis of Thin-Walled Structural Members[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 105: 135-146.
- [13] 刘娜,杨庆生. 基于有限元 ANSYS 的金属罐稳定性分析[C]// 北京力学会第18届学术年会论文集. 北京: 北京理工大学, 2012.
 LIU N, YANG Q S. Stability Analysis of Metal Tanks Based on Finite Element ANSYS[C]// Proceedings of the 18th Annual Conference of Beijing Mechanics Society. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012.
- [14] HAN G Z, CAI L X, BAO C, et al. Novel Ring Compression Test Method to Determine the Stress-Strain Relations and Mechanical Properties of Metallic Materials[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 109.
- [15] LI E K, YANG D, YIN F L, et al. Design of Integrated Metal Packaging Container Performance Parameter Detection Device[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 452: 022026.
- [16] YIN Z Q, SU T D, HE M. Gas Packaging Container Based on ANSYS Finite Element Analysis and Structur-

al Optimization Design[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1187(3): 032089.

- [17] 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
 Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [18] 国家标准化管理委员会. 冷轧电镀锡钢板及钢带: GB/T 2520—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017. Standardization Administration of the People's Republicof China. Cold-reduced Electrolytic Tinplate: GB/T 2520—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [19] 李玉金.易开盖三片罐的轻量化设计与实现[D].济南:山东大学,2014:59.
 LI Y J. Lightweight Design and Implementation of Easy-to-Open Three-Piece Tank[D]. Jinan: Shandong University, 2014:59.
- [20] 尹宗勋,高炳军,董俊华. 薄壁圆筒局部限制失稳的 试验及有限元研究[J]. 燕山大学学报, 2018, 42(1): 29-33.

YIN Z X, GAO B J, DONG J H. Experimental and Finite Element Study on Local Confined Buckling of Thin-Wall Cylinder[J]. Journal of Yanshan University, 2018, 42(1): 29-33.

[21] American Society of Testing and Materials International. Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Ship Containers, Components, and Unit Loads: ASTM A. D642[S]. P A, USA: West Conshohocken, 2010.