

轮胎动平衡试验机轮辋材料的优化

杭柏林^{1,2}, 张宗凯¹, 朱晓峰¹

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 软控股份有限公司, 山东 青岛 266042)

摘要:对轮辋的受力情况进行理论分析,通过有限元分析软件 Ansys 对轮辋工作时的应力状态进行仿真模拟,在此基础上进行多种材料的强度校核,并对轮辋参数进行优化。结果表明,ZL107 型铝合金可取代现有轮辋材料 7A04 及 40Cr,采用铸造工艺加工,材料的利用率可由 30% 提高到 80%,可减少制造工序并显著降低生产成本。

关键词:轮胎;动平衡试验机;轮辋;受力分析;仿真模拟

中图分类号:TQ330.4+92 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2015)02-0108-05

轮胎动平衡试验机是检测轮胎质量分布及性能的重要设备,可检测出轮胎的静偶不平衡量、上下不平衡量及相位角等,同时可用来指导轮胎的性能改进,使轮胎满足汽车的使用要求,从而达到改善和提高轮胎质量的目的^[1-3]。

轮辋是轮胎动平衡试验机测试系统的重要组成部分,主要用于检测时固定轮胎,具有密封和承压的功能,使用频率较高,轮胎检测周期约为 25 s,其各项性能对轮胎动平衡检测的准确性和设备的正常使用有较大影响。现有的轮辋材料多为 7A04 及 40Cr,40Cr 材料成本低,但质量较大,易造成设备磨损,缩短设备的使用寿命,且不利于工人装卸;7A04 材料质量小,但成本太高,不符合经济性原则。

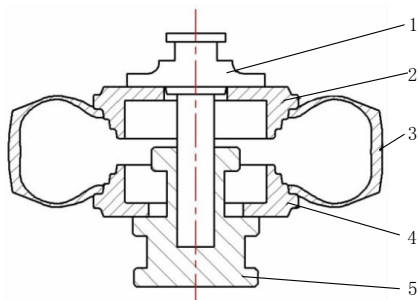
汽车轮辋在实际运转中主要以强度破坏和疲劳破坏为主,其结构受力情况比较复杂,截面上的应力变化梯度也比较大,国内外还没有统一的解析数学或者力学求解方法对此进行精确的描述^[4]。目前有部分高校和企业已对汽车轮辋受力进行了有限元分析^[5],但由于在轮胎动平衡试验中轮胎并不与地面接触,即轮胎处于无负载旋转状态,这些分析方法均不适合本设备。试验轮辋的另一特点是在工作时轮胎会重复地进行装卡和

卸除,由于频繁装卸,轮辋边缘与轮胎胎圈的接触部位会产生磨损,进而影响使用寿命,且充气频率较高,可能对轮辋造成疲劳损害。目前还没有相关文献对此进行报道。本研究根据动平衡试验轮辋的受力特点,针对其强度进行分析,利用有限元模拟技术,对轮辋进行仿真模拟,找出危险区域,并判断强度是否符合要求,在此基础上进行轮辋的优化分析。

1 轮辋受力分析

根据轮胎动平衡试验机的使用情况、工作效率、自动装卸等要求,采用多级轮辋和段宽可调的结构功能设计,实现对多种不同规格轮胎的混装测试^[6],轮胎轮辋组件结构如图 1 所示。以轿车动平衡试验机使用的 12,13 和 14 英寸三级轮辋为例,将轮胎轮辋组件进行如图 2 所示的受力分析。图 2 中,A 和 B 处均为危险区域。

根据轮辋的结构和检测时的工作状态,轮辋

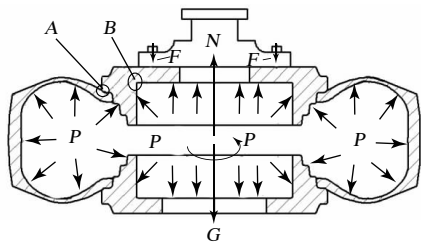


1—上轮辋轴;2—上轮辋;3—轮胎;4—下轮辋;5—下轮辋座。

图 1 轮胎轮辋组件结构

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2012FM007);山东省青岛市科技计划基础研究项目(12-1-4-19-jch)

作者简介:杭柏林(1959—),男,内蒙古通辽人,青岛科技大学教授,硕士,主要从事管控一体化、机电一体化、智能控制及轮胎检测设备的研究与开发。



A—轮辋与轮胎接触部位; B—存在应力集中现象的轮辋拐角位置; N—支持力; G—重力; P—充气压力; F—螺栓预紧力。

图2 轮胎轮辋组件受力分析示意

受重力、支持力、充气压力及外界大气压力、轮胎对轮辋的作用力、螺栓预紧力和离心力共同作用。

通过分析轮辋的结构及受力情况可知,在载荷相同时,14英寸轮辋强度比12和13英寸轮辋更小,更易受到破坏,因此此处仅针对14英寸轮辋进行强度分析。

根据文献[7],轿车动平衡试验机轮胎充气压力为0.2~0.5 MPa,转速为500~800 r·min⁻¹,本研究选取充气压力为0.5 MPa。考虑到轮胎对轮辋的作用力由轮胎的充气压力传递而来,为安全起见,预留出2倍的余量,因此轮胎对轮辋的作用力取值为1 MPa,转速取800 r·min⁻¹。

连接用螺栓规格为M10×50,强度等级为12.9级,可查得扭矩为59.2 N·m,屈服强度极限 σ_s 为1 080 MPa。根据机械设计要求,扭矩T为

$$T \approx 0.2 F_0 d \quad (1)$$

式中 F_0 为预紧力, d 为螺纹公称直径。

由式(1)可求得 $F_0 = 29\ 600$ N。对于一般连接用钢制螺栓,预紧力 F_0 计算如下[8]:

$$\begin{cases} F_0 \leq F' \\ F' = 0.7 \sigma_s A_s \end{cases} \quad (2)$$

$$\quad (3)$$

式中 F' 为极限预紧力, A_s 为螺栓公称应力截面积,其值为55.1 mm²。

由式(2)和(3)可求得 $F' = 41\ 656$ N,满足条件 $F_0 \leq F'$,故预紧力 F_0 的取值是合适的。

2 轮辋力学特性的数值分析

2.1 轮辋的几何模型

从结构上考虑,上轮辋中心孔直径比下轮辋小,则其B处应力集中现象更严重且更易受到破坏,本文仅对上轮辋进行分析,上轮辋实物如图3

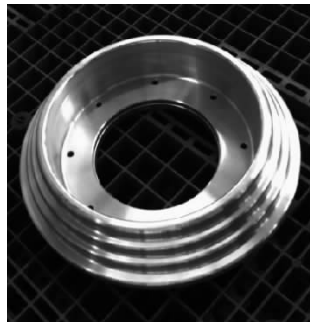
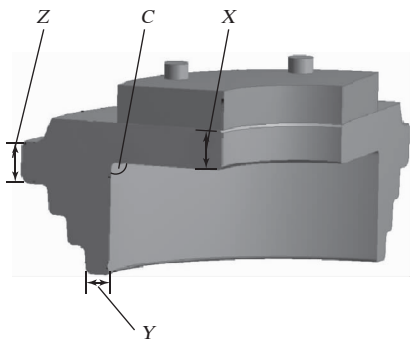


图3 上轮辋实物

所示。利用SolidWorks建立其三维模型。为提高计算效率,对模型进行简化处理,去除一些对结构强度影响很小的圆角、圆孔等特征,这些特征的保留会影响网格的质量并增加计算量。简化后的上轮辋几何模型如图4所示。



X,Y,Z,C—轮辋参数。

图4 简化后的上轮辋几何模型

2.2 轮辋的有限元分析

目前汽车轮辋所用材料多为铝合金或钢材,钢材质量较大,不符合试验轮辋宜尽量轻的要求。为找到合适的轮辋材料,选取几种常用的铝合金,利用Ansys软件对其进行力学特性分析。以7A04材料为例简单介绍分析过程。

7A04材料属性如下:密度为2.9 Mg·m⁻³,弹性模量为72 GPa,泊松比为0.33,屈服强度极限为400 MPa。

建立轮辋的数值模型并划分网格。由于需要对局部网格做细化处理,而细化只能作用在四面体网格单元上,故采用四面体结构。由于模型采用1/4结构,加载时需对其施加对称边界约束[9]。轮辋的3个平移自由度及2个旋转自由度都受到约束,只允许绕轮辋中心轴的转动自由度存在[10]。在试验工况下,轮辋承受的载荷主要有4

个;充气压力、轮胎对轮辋的作用力、轮辋紧固时的螺栓预紧力、轮辋旋转时产生的离心力。

2.3 仿真结果分析

轮辋的应力分布和变形分别如图 5 和 6 所示。

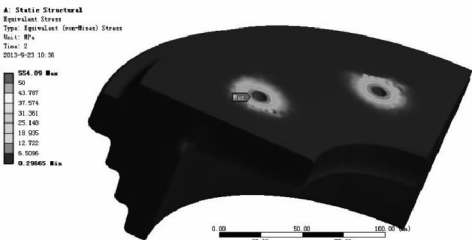


图 5 轮辋应力分布

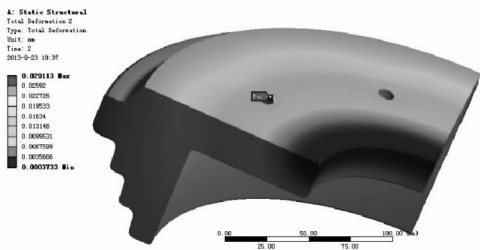


图 6 轮辋变形

由图 5 可知最大应力 554 MPa 出现在螺栓与轮辋的接触面附近,超过了 7A04 材料的屈服强度极限,材料发生塑性变形。但根据机械设计应力-应变曲线可知,此处实际最大应力值应小于软件中按弹性力学计算出的理论应力值,即实际最大应力小于 554 MPa,因此不能直接用此值来判断材料是否被破坏。此类分析通常采用位移法进行有限元分析,即以节点位移为未知量,按几何关系直接确定各单元应变。设计要求螺纹孔处的变形量低于 0.3 mm,超出该值可认为此处受到破坏^[11]。由图 6 可知,螺纹孔处最大变形量为 0.029 mm,低于设计允许的 0.3 mm,能够满足强度要求,实际情况也表明螺纹孔处未受到破坏。螺栓预紧力只对螺纹孔周围应力有影响,对轮辋其他位置几乎没有影响,因此在后续分析中可将螺栓预紧力做简化处理。

轮辋受到间歇重复载荷的作用,以每条轮胎测试时间为 25 s 计算,若机器保持运转,轮辋一年受到 1 261 440 次循环载荷作用,因此需对其进行疲劳分析。根据无限寿命疲劳设计方法,对于应力幅和平均应力不随时间变化的稳定交变应力

状态,零件的工作应力应小于其疲劳极限。其中疲劳极限的定义是应力交变循环大至无限次而试样仍不破损时的最大应力。若符合上述条件,则说明零件不会发生疲劳破坏。

选取 6 种材料轮辋的疲劳极限及分析所得的危险区域应力如表 1 所示。其中 A356 (即 ZL101A)是汽车轮辋用材料,其余材料也为常用的铝合金。

表 1 几种材料的疲劳极限及危险区域应力

材 料	疲劳极限/MPa	A 处应力/MPa	B 处应力/MPa
7A04	147	4	14.45
2A12	76	4	14.51
2024	108	4	14.51
5052	18	3.98	14.34
A356	25	3.98	14.28
ZL107	34	3.98	14.34

表 1 中材料的疲劳极限根据文献^[12]计算求得。由表 1 可知,6 种材料轮辋的危险区域 A 和 B 处最大应力均小于其自身的疲劳极限。因此可认为在设计寿命内轮辋都是安全的,不会发生疲劳破坏。

3 轮辋的优化

由图 5 可知,除局部应力集中区域,轮辋的其余部位应力值较低,且远小于材料的疲劳极限,具有轻量化的潜能。

根据有限元仿真分析的结果,结合轮辋的使用和成本要求,从轮辋的材料选择、材料的利用率、强度、加工工艺、结构参数、成本等方面进行优化分析。

3.1 材料与工艺优化

材料的耐磨性需通过摩擦磨损试验进行测定,通常情况下,硬度越高,耐磨性越好^[13]。

除了材料本身,加工工艺对生产成本也有很大影响。现有轮辋加工工艺为板材下料,轮辋成品强度及刚度等性能较好,但生产工序较多,成本较高^[14],根据工艺要求,下料时使用 400×400×110 的铝板,材料利用率不足 50%,浪费比较严重。将加工工艺改为铸造,以提高材料的利用率,且工艺成本也会降低。除下料和粗加工外,铸造工艺过程与板材下料基本一致。6 种材料中

7A04, 2A12, 2024 和 5052 为变形铝合金, 不适合铸造加工, A356 和 ZL107 为铸造铝合金。

3.2 设计参数优化

若选用 A356 和 ZL107 型铝合金制作轮辋, 其加工工艺为铸造, 而铸造下料时并非使用铝板进行加工, 因此可通过优化设计参数进一步降低成本。由表 1 可知, 铝合金材料的密度、弹性模量和泊松比差别不大, 其危险截面处应力变化不大, 可以 ZL107 为例进行轮辋设计参数优化。

轮辋和轮胎的装配关系是固定的, 其接触部位的形状和尺寸都有相关的国家标准和行业标准, 如图 4 所示, X, Y, Z 及 C 处圆角总共 4 个尺寸为参数优化的主要部分。

X, Y, Z 处原尺寸分别为 26, 15.5 和 27 mm, C 处圆角半径为 3 mm。考虑到铸造工艺及美观问题, 将其最小尺寸定为 20, 10 和 22 mm, 为了使应力分布更均匀, 将 C 处圆角半径变为 9 mm。

对优化后的轮辋再进行仿真模拟, 结果如表 2 所示。A 和 B 处应力均小于疲劳极限, 且与最初设计相比应力分布更加均匀。按最小尺寸计算, 优化后的轮辋模型质量由 14.14 kg 变为 12.24 kg, 减小了 13.44%。

表 2 不同参数下危险区域的应力

项 目	编 号			
	1	2	3	4
X/mm	20	26	26	20
Y/mm	15.5	10.0	15.5	10.0
Z/mm	27	27	22	22
A 处应力/MPa	4.42	4.75	4.26	4.71
B 处应力/MPa	15.44	11.90	14.06	14.39

3.3 成本核算及材料优选

将 6 种铝合金制成的轮辋进行成本核算。其中 A356 和 ZL107 制得的为经过设计参数优化后的轮辋, 其加工工艺为铸造, 铸造模具成本在 1 500 元左右, 但模具能长期使用, 适合批量生产, 可不计在总成本之中。不同材料轮辋的成本如表 3 所示, 该成本并不包含管理费等相应费用。

由仿真结果分析可知所选材料均符合强度要求。将 6 种材料的其他参数进行综合对比, 如表 4 所示。

结合表 3 和 4 对材料进行对比分析。7A04

表 3 不同材料轮辋成本的评估

材 料	原材料成本/元	加工成本/元	总成本/元
7A04	4 287	1 620	5 907
2A12	2 935	1 598	4 533
2024	2 894	1 585	4 479
5052	1 794	1 585	3 379
A356	279	568	847
ZL107	383	603	986

表 4 不同铝合金材料轮辋的综合优化参数

材 料	成本/元	硬度/HB	原材料	材料利用率/%
7A04	5 907	150	板材	30
2A12	4 533	145	板材	30
2024	4 479	145	板材	30
5052	3 379	70	板材	30
A356	847	100	铸件	80
ZL107	986	118	铸件	80

等板材下料的轮辋, 材料利用率低, 成本相对较高; 5052 材料硬度太低, 耐磨性偏低; 2024 和 2A12 材料性质类似, 价格差异也不大, 但 2024 材料加工性能比 2A12 材料稍好, 若选择 2024 替代现有材料, 其可在一定程度上降低成本, 但不会提高材料的利用率; 同为铸铝的 ZL107 材料在整体性能上优于 A356 材料。综合考虑, 可选择 ZL107 替代现有轮辋材料, 在满足使用要求的情况下, 可大幅度提高材料的利用率。

4 结语

本工作基于对轮胎动平衡试验机轮辋受力、使用状态与要求的分析, 利用有限元分析软件 Ansys 对轮辋工作时的应力状态进行仿真模拟, 在此基础上进行多种材料的强度校核, 并对轮辋参数进行优化。结果表明, 采用 ZL107 型铝合金可替代现有轮辋材料 7A04 及 40Cr, 并采用铸造工艺, 使材料的利用率由 30% 提高到 80%, 减少了制造步骤, 显著地降低了生产成本。本工作为轮辋的材料选择、工作状态分析、强度校核提供了一套完整的理论基础与方法, 使轮辋的设计由经验型向有科学依据型转变。

参考文献:

[1] 杭柏林, 孟鹏, 东野广俊. 不同厂家轮胎动平衡试验机测量结果分析[J]. 橡胶科技市场, 2006, 4(12): 10-13.
[2] 杭柏林, 高国威, 蒋珍, 等. 轮胎动平衡实验机力多变量测量

- 方法与同步逻辑的开发[J]. 石油化工设备, 2011, 40(4): 28-30.
- [3] 都强, 杭柏林. 轮胎动平衡试验机及其控制系统[J]. 橡胶工业, 2006, 53(1): 41-45.
- [4] Kocabicak U, Firat M. Numerical Analysis of Wheel Cornering Fatigue Tests[J]. Engineering Failure Analysis, 2001, 4(8): 339-354.
- [5] 刘延昌. 铝合金轮毂的造型设计及有限元分析[D]. 锦州: 辽宁工学院, 2006.
- [6] 都强. 轮胎动平衡试验机算法解算和控制方法的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2005.
- [7] GB/T 25158—2010, 轮胎动平衡试验机[S].
- [8] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [9] 陈艳霞, 陈磊. ANSYS Workbench 工程应用案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [10] 曲文君. 基于 Pro/E 的低压铸造铝合金轮毂的设计与静力学分析[J]. 制造业自动化, 2009, 31(7): 161-163.
- [11] 陈玉发. 铝合金车轮的有限元分析与疲劳寿命预测[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [12] 马少俊, 胡本润, 刘建中, 等. 金属材料疲劳极限估算的多参数经验公式[J]. 机械强度, 2010, 32(6): 993-996.
- [13] 张瑞平. 金属工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [14] Tsumura Kazuo, Ueki Naoshige, Nemota Nobuyuki. Development of One Piece Forge Aluminium Wheels for Passenger Cars[J]. Sumitomo Metals, 1996, (11): 48-49.

收稿日期: 2014-08-25

Optimization of Material for Rim of Tire Dynamic Balance Tester

HANG Bai-lin^{1,2}, ZHANG Zong-kai¹, ZHU Xiao-feng¹

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Mesnac Co., Ltd, Qingdao 266042, China)

Abstract: In this study, the forces on the tire rim were analyzed. By using finite element analysis software Ansys, the stress state of the tire rim was simulated. Based on this, the material strength was evaluated and the parameters of rim were optimized. The results showed that, existing rim material 7A04 and 40Cr could be replaced by aluminum alloy ZL107, and the utilization ratio of material was improved from 30% to 80% by using casting process. After the optimization, the number of manufacturing steps and production cost were significantly reduced.

Key words: tire dynamic balance tester; rim; force analysis; simulation

“合成橡胶用防老体系的研究”项目通过验收

中图分类号: TQ333; TQ330.38⁺2 文献标志码: D

2014年11月19日, 由北京橡胶工业研究设计院承担的“合成橡胶用防老体系的研究”项目通过中国石油化工股份有限公司(中石化)科技部组织的验收。

欧盟 REACH 法规出台后, 对化学品应用设置了最新的规定以及限制条件。在合成橡胶的开发与应用中, 其抗氧化体系的选择及开发更显得尤为重要。基于此, 北京橡胶工业研究设计院开展了合成橡胶用防老体系研究, 旨在确定出用于溶液聚合合成橡胶的符合欧盟 REACH 法规且具有优良防老化性能的抗氧化体系。

该项目通过文献查阅和市场调研, 依据抗氧化剂的种类与主要品种、复配原则、产品结构对合成

橡胶性能的影响, 设计和优化了性价比高的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)用环保型抗氧化体系, 为 SBS 现用的非环保型抗氧化体系的替换提供了参考, 并为顺丁橡胶(BR)、溶聚丁苯橡胶(SSBR)抗氧化体系的选择提供了试验依据; 研究了 SBS 抗氧化体系的选择, 提出了合成橡胶选择抗氧化体系的一般性指导原则以及一系列针对不同胶种表征抗氧化体系优劣的检测方法, 同时提出了抗氧化剂对溶剂油的污染性检测可行性办法。研究表明: 所选择抗氧化体系可满足 SBS 生产的环保、工艺、成本以及产品性能的系列要求, 所选择的抗氧化剂对溶剂油不会造成污染。所选抗氧化体系用于 BR 和 SSBR 生产, 以较少用量即可达到较理想的防护效果, 且体系热稳定性、经济性均较好。

(本刊编辑部 冯涛)