

城市轨道交通车辆轮对轴承压装力-位移曲线研究

王明萌¹ 韩树涛¹ 卜峰² 安然¹ 马作为¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术部,130062,长春;
2. 中车长春轨道客车股份有限公司转向架制造中心,130062,长春//第一作者,高级工程师)

摘要 通过对城市轨道交通车辆轮对轴承压装过程进行力学分析和计算,得出轴承压装力与轴颈位移的理论曲线;以曲线参数需求为导向对现有车辆轮对轴承压装制造工艺进行优化,建立了城市轨道交通车辆轮对轴承压装统一的标准曲线评价方法。经实际生产应用验证,表明该曲线评价方法可行。
关键词 城市轨道交通;车辆;轴承;力学分析;压装力-位移曲线

中图分类号 U270.33
DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.02.024

Standardization and Application of Press-fit Curves for Wheelset Bearings of Urban Rail Transit Vehicles

WANG Mingmeng, HAN Shutao, BU Feng, AN Ran, MA Zuwei

Abstract Through the mechanical analysis and calculation of the press-fitting process of the urban rail transit vehicle wheelset bearing, the theoretical curves of press-fitting force and journal displacement were obtained. Guided by the curve parameters demand, the press-fitting manufacturing methods of wheelset bearing was optimized, and a unified standard curve evaluation method for urban rail transit wheelset bearing was established. Through actual manufacturing application verification, the feasibility of the curve evaluation method was approved.

Key words urban rail transit; vehicle; bearing; mechanical analysis; press-fitting curve

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

伴随着城市建设的快速发展,拥有节能环保、快捷高效等特点的轨道交通成为缓解交通压力的首选。城市轨道交通车辆的运行安全是用户需求的核 心,轮对轴承是影响车辆运行安全的关键部件。目前,城市轨道交通车辆轮对轴承压装制造技术依赖操作者技能水平,滞后于相关领域制造技术发展。本文将轴承压装过程中的压装力、位移作为

参数,并将其对应关系绘制成曲线,以此作为产品质量评价依据应用于城市轨道交通车辆产品制造,建立城市轨道交通车辆轴承压装制造技术标准。

1 车辆轮对轴承压装工艺分析

1.1 压装工艺分析

轮对轴承与车轴采用过盈配合,以往轴承组装机 艺多依据国外轴承供应商提供的产品手册,仅以贴合时终止压力、保压时间和轴承游隙作为压装结 论的判定依据。由于部件尺寸检测位置已选定,以 及人工测得尺寸无法覆盖全部过盈配合表面影响, 因此可能存在不满足过盈配合尺寸要求的部位未 被识别,导致利用“贴合时终止压力”判定轴承过盈 配合存在局限性。另外,假设压力示值准确,达到 贴合压力时开始计时保压时间,此时设备液压缸仍 处于压力增大状态,操作者受心理因素影响,可能 会出现保压时间不满足要求或超出保压时间的情况,这对轴承结构部件质量带来隐性影响。根据文 献[1]的论述,压装力与位移可以反映轴承压装过 盈配合,因此本文借助数控设备控制保压时间,采 集压装力-位移曲线来评价压装过程。

1.2 压装设备分析

原轴承压装设备中关键部件液压缸为轴承供应商 提供,液压缸通过连接工装与车轴连接,如图1所示。

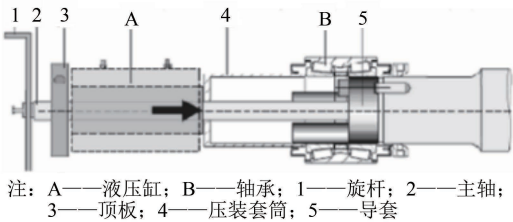


图1 轴承压装工况示意图

对设备和工装存在的问题进行分析。首先,设备缺少定位机构。将轴承沿车轴中心方向水平压入,理想状态是液压油缸、轴承与车轴三者同轴,但

既有设备无对中结构,需靠操作者人工找正,这需要操作者较高技能水平,且效率低下。其次,整体刚性不足。既有轴承压装设备仅通过轮式固定,相对于轴向压装力,设备自身的质量无法完全满足压装刚性需求。再次,工装连接偏差。连接工装通过螺栓与车轴连接,螺纹连接副间隙误差约 0.5 mm。通过定心环将导套与车轴定位,为保证定心环与导套、车轴之间的装配关系,定心环与车轴直径间隙应为 0.3 mm,则导套、轴颈之间同轴度可能偏差 0.8 mm。如果轴承压入过程中存在高度差,则轴承内圈与车轴过盈配合过程会产生切痕,会对轴承运转带来安全隐患。

针对存在的不足进行逐项针对性改进:加装伺服系统控制压装力和保压时间;同时加装压力、位移等传感器;通过工控机控制压装过程,并记录相关参数以便输出压装曲线。

2 车辆轮对轴承压装理论分析

2.1 装配结构受力分析

对于与高铁同源技术的城市轨道交通车辆轮对轴承,其部件结构和压装判定标准与高铁车辆的相同。通过总结归纳高铁制造经验,本文在压装过程过盈量最大、最小情况下,进行轴承组件配合面间的力学分析,形成压装力与位移标准曲线。轮对轴承一般由内圈、间隔环、滚珠和外圈等部件组成,轴承内圈参与过盈配合,间隔环与车轴轴颈之间为间隙配合,因此选取轴承内圈和车轴轴颈配合进行分析。不同于理想过盈配合,轴承内圈厚度不足,由过盈配合产生的作用力将传递至轴承内圈使其变形,轴承压装完毕可视为平衡状态,如图 2 所示。

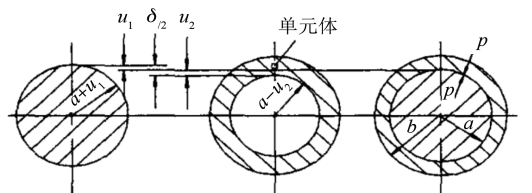


图 2 截面单元体受力模型
注: a——轴颈与轴承内圈结合面半径(考虑车轴刚性及过盈配合形变趋势,此处直径应参考车轴外径); b——轴承外圈平均直径(外圈多锥形面); p——内力

图 2 截面单元体受力模型

轴承压入后形变几何关系为^[2]:

$$\frac{\delta}{2} = |u_1| + |u_2| \quad (1)$$

式中:

δ ——压装过盈量;

u_1 ——轴颈挤压形变量;

u_2 ——轴承内圈径向形变量。

对轴承内壁进行受力分析,在单元体上取法向、切向应力分析,得单元体力平衡表达式:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \quad (2)$$

式中:

σ_r ——径向应力;

σ_t ——周向应力;

d ——单元体直径;

r ——分析单元距离轴承内圈圆心半径。

压装后车轴、轴承内圈应力形变结束,同样在单元体上按照应力产生应变进行分析。法向应变 $\varepsilon_r = du_2/dr$;切向应变 $\varepsilon_t = u_2/r$; ε_t 对 r 求一阶导数,并代入式(2)得:

$$\frac{d\varepsilon_t}{dr} - \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_t}{r} = 0 \quad (3)$$

图 3 为过盈配合表面边界。取轴承内圈和轴颈配合面单元,不考虑反向摩擦阻力,根据广义胡克定律代入公式(3)整理后得:

$$\frac{d\sigma_t}{dr} - \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} - \gamma \left(\frac{d\sigma_t}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} \right) = 0 \quad (4)$$

式中:

γ ——材料的泊松比。

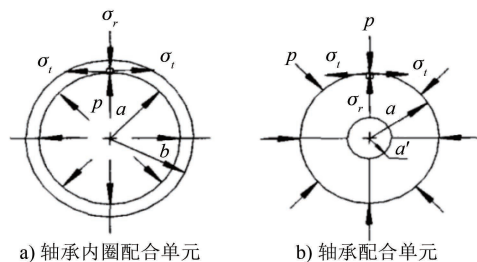


图 3 过盈配合表面边界

通过分析过盈配合模型、内力 P 与过盈量之间关系,利用过盈配合边界处确定的积分常数,已知 $\varepsilon_t = u_2/r$,由广义胡克定律可得:

$$u_2 = \frac{ap}{E} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \gamma \right) \quad (5)$$

同理,

$$u_1 = -\frac{ap}{E} (1 - \gamma) \quad (6)$$

$$\text{则可得 } p = \frac{E(b^2 - a^2)}{4ab^2} \delta$$

压装力 $P_{\text{压}}$ 与位移的关系为:

$$P_{\text{压}} = PS\delta = \frac{\pi E(b^2 - a^2)}{2b^2} \delta \mu x \tag{7}$$

式中:

- E ——材料的弹性模量;
- S ——接触面积;
- x ——位移;
- μ ——摩擦系数。

综上所述,随着轴承不断压入,轴颈与轴承过盈配合接触面积不断增大,压装力随之增大,由此可计算出某一位置时刻压装力值。

2.2 压装力-位移曲线

本文推导出的轮对轴承压装力与位移的数学关系,引证了压装力的变化过程可充分反映轴承压入的过盈配合过程。将压装力-位移曲线作为标准应用于实际生产,需要标准图像进行对比。当轴颈、轴承结构和材质选定后,式(7)中仅过盈量和位移量为变量,其他参数为常数, μ 暂按 0.08 计算。最大过盈量时,以 $P_{\text{max}}-x$ 表示最大过盈量曲线,以 $P_{\text{min}}-x$ 表示最小过盈量曲线,由此便可用压装力-位移对应关系曲线表示出 $P_{\text{压}}$ 的变化范围,如图 4 所示的阴影部分。

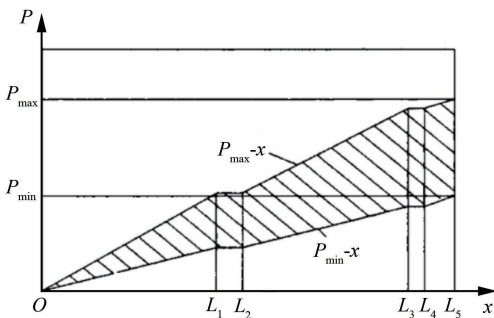


图 4 压装力-位移($P_{\text{压}}-x$)曲线标准

假设上述过程为理想过盈配合,不考虑摩擦阻力、轴承承受重力等因素,则 OL_1 段曲线表示防尘板端滚子轴承压力位移曲线;由于间隔圈为间隙配合,过盈量为 0,则 L_1L_2 区域为间隔环压入段;当轴端面段 L_2L_3 区域压入时,随着过盈配合长度增大,压力-位移又呈现上述趋势; L_3L_4 段为要求保压段,此时由压装设备伺服机构控制液压缸压力输出,实际生产中取 OL_4 段压装力-位移曲线即可。实际压装曲线应满足图 4 所示阴影部分区域,配合部位可能出现瞬时跃升情况。

3 车辆轮对轴承压装力-位移曲线应用验证

根据上述轴承压装力-位移曲线的规律,选取 100%低地板有轨电车项目转向架轮对进行应用验证。通过图纸所示的各部计算尺寸,并经过轴颈轴承压装模型的压装力-位移数学关系公式(7)计算得出相关数据,如表 1 所示。

表 1 100%低地板有轨电车转向架轴颈轴承配合各部计算尺寸表

轴颈轴承内圈参数	参数值
a/mm	70
b/mm	90.4
μ	0.08
δ/mm	0.051~0.101
$E/(\text{kN}/\text{mm}^2)$	206
x/mm	117.8
$P_{\text{压}}/\text{kN}$	43.9~86.9

表 1 中的 $P_{\text{压}}$ 为理论计算值。实际生产中, $P_{\text{压}}$ 不仅提供轴向驱动力,同时还克服摩擦阻力及轴承滚珠、外圈等重力作用,故 $P_{\text{压}}$ 实际值往往大于理论计算值,须在一定范围内对理论值予以修正,此值可取用设计部门轴承组装技术规范中提供的贴合压力范围作为判定标准。经过对比,上述理论计算数值符合设计规范要求,曲线标准判定准确。

4 结语

对既有工艺要素进行升级改造,将先进的轴承压装制造工艺应用于城市轨道交通车辆生产,并形成完整统一的执行标准,可提高车辆的制造工艺水平。

本文根据压装力-位移数学关系,得出了压装力的计算方法及压装曲线的波动范围,提出轴承压装过程标准适用于城市轨道交通车辆轮对轴承压装的可行性。同时,实现了对轴颈、轴承过盈配合全过程数据量化监控,能够充分保证轴承压装的质量。

实际生产过程中,压装力-位移曲线往往与理论曲线有较大差异,但总体呈上升趋势。随着压装力的变化呈现波动,可能出现压力陡升或陡降情况,但表征的压力值满足范围要求。对于压装力-位移曲线波动的陡升陡降过程与标准对比判定是后续仍需深入研究的课题。

参考文献

[1] 胡宏伟.轴承压装力-位移曲线作轴承压装合格判定的可行性分析[J].机车车辆工艺,2010(6): 1.
[2] 上海交通大学力学教研室.工程力学(下)[M].上海:上海科学技术出版社,1978: 287-308. (收稿日期:2019-08-25)