

轴承压装工艺对变速箱总成装配质量的影响

李 凯 寄 龙

陕西法士特汽车传动集团有限责任公司 陕西 西安 710077

摘 要：轴承压装是变速箱总成装配过程中的关键工序，其工艺质量直接决定变速箱的运转精度、振动噪声水平、传动效率及服役寿命。本文从轴承压装工艺的基本原理出发，系统分析了压装力控制、压装速度、定位精度、温度条件以及压装曲线监测等工艺参数对变速箱装配质量的影响机制。研究表明，压装工艺不仅影响轴承与轴颈及箱体孔之间的配合状态，还通过轴系预紧力、轴承游隙、同轴度等中间变量对总成装配质量产生深远影响。合理的压装工艺能够有效避免轴承偏载、卡滞、损伤及轴向定位失准等问题，从而保障变速箱总成的综合性能。本文进一步提出了压装工艺优化的若干方向，以期变速箱装配工艺改进提供理论参考。

关键词：轴承压装；变速箱总成；装配质量；压装力；过盈配合

引言

变速箱作为汽车及工程机械动力传动系统中的核心部件，其总成装配质量直接关系到整机的动力性、经济性、可靠性与舒适性。在变速箱的数千个装配零件中，轴承扮演着支撑旋转轴系、承受径向与轴向载荷、保证齿轮副正确啮合的关键角色。轴承装配质量的好坏，尤其是轴承压装工艺的合理与否，在很大程度上决定了变速箱总成的最终品质。轴承压装是指将轴承以一定的压力安装到轴颈或箱体轴承孔中的过程，通常采用过盈配合以实现可靠的径向定位和轴向固定。这一过程看似简单，实则涉及弹性变形、接触力学、热膨胀、摩擦学等多学科交叉问题。实际生产中，因压装工艺不当而导致的轴承早期失效、变速箱异响、换挡卡滞乃至总成报废等质量问题屡见不鲜。近年来，随着变速箱向着高功率密度、低噪声、长寿命方向持续发展，对轴承压装工艺的要求也日益提高。

1 轴承压装工艺的基本特征与质量控制要素

1.1 压装原理与配合类型

轴承压装的基本原理在于利用轴向压力克服配合面间的摩擦力，使轴承内圈与轴颈（或外圈与箱体孔）产生相对位移，从而完成装配。变速箱中常用的配合方式主要包括过盈配合、过渡配合和间隙配合，其中过盈配合应用最为广泛。基于厚壁圆筒弹性力学理论，压装力与过盈量呈非线性关系，当接触应力超过配合材料屈服极限的0.6倍时，塑性变形比例显著增加，其力-位移曲线将呈现明显的非线性拐点，这一特征对工艺监控具有重要指示意义。从力学角度看，压装过程本质上是配合表面微观不平度在压力作用下被逐渐压平、材料发生弹性及局部塑性变形的过程。压装力随压入行程的变化曲线反映了

配合状态的演变规律，是判断压装质量的重要依据。

1.2 压装工艺的主要控制参数

轴承压装工艺的质量控制涉及多个参数的综合管理。压装力是最直观的控制指标，其大小取决于过盈量、配合直径、配合长度、摩擦系数及材料特性等因素，摩擦系数通常在0.08~0.15之间，受表面粗糙度和润滑状态影响显著。压装速度一般控制在2~8mm/s范围内，速度的变化会改变配合面的动态摩擦系数——速度每提高一倍，摩擦系数约降低8%~12%，同时较快的速度会加剧摩擦生热，可能诱发配合面的局部灼伤或材料粘着^[1]。压装行程的准确控制决定了轴承轴向定位的精度，要求重复定位精度优于 $\pm 0.015\text{mm}$ 。此外，压装时的温度条件、压装工装的导向精度（工装同轴度一般要求不低于0.02mm）、轴承与配合件的清洁度等因素亦不可忽视。

1.3 压装质量评价体系

综合评价压装质量应从力-位移曲线的形态特征（重点关注起始爬升段、平稳压入段和终压过渡段的斜率变化）、压装后的轴向位置精度、轴承旋转灵活性、启动扭矩以及压装后的游隙变化等多个维度进行。理想的压装过程应当表现为压装力平稳上升、曲线光滑无突变、最终轴向尺寸准确且轴承旋转无阻滞。

2 压装工艺对轴系配合精度的影响

2.1 压装力对配合面微观形貌的作用机制

压装力的施加使配合表面的微凸体发生压溃和展平，实际接触面积逐渐增大。适当的压装力能够使配合面达到良好的接触状态，提高连接刚度；但压装力过大时（超过理论计算值的120%以上），配合面可能产生严重的犁沟效应或材料堆积，甚至引发配合表面的冷焊或

咬合。这种微观损伤虽然肉眼难以察觉,却会在变速箱运转过程中逐渐扩展,成为微动磨损的源头,并显著降低配合面的摩擦学耐久性。

2.2 过盈配合的稳定性与保持力矩

轴承内圈与轴颈之间的过盈配合必须提供足够的保持力矩,以防止轴承在运转过程中因轴向载荷而发生蠕移。压装工艺通过控制实际过盈量来实现这一目标。然而,过盈量并非越大越好——过大的过盈量会增加轴承滚道的周向拉应力(按厚壁圆筒理论,内圈周向应力与过盈量近似呈线性关系),减小轴承内部游隙,甚至导致轴承滚道产生微塑性变形,反而降低轴承的旋转精度和疲劳寿命。通常要求压装后内圈滚道的胀大量不超过原始游隙的60%~70%,以保证轴承具备足够的残余游隙。

2.3 压装偏移与同轴度偏差的传递规律

压装过程中若工装导向不良或受力不均,轴承可能发生倾斜偏移,造成轴承轴线与轴颈轴线不重合。同轴度偏差会直接导致轴承运转时的附加径向载荷(其大小与偏差量及轴系刚度呈正比),并通过轴系传递至各齿轮副,引起齿面接触不良、载荷分布不均和噪声增大^[2]。这种偏差在总成装配完成后往往难以直接检测,却持续影响着变速箱的运行品质,尤其在高速工况下,偏差激发的离心力效应将大幅放大振动响应。

3 压装工艺对轴承游隙与预紧状态的影响

3.1 游隙变化的物理本质

轴承内部游隙是影响其承载性能和运转精度的重要参数。压装过程中,轴承内圈因过盈配合而周向胀大,外圈因压入箱体孔而周向收缩,两者共同导致径向游隙减小。工程经验表明,径向游隙的减小量约为配合过盈量的0.70~0.80倍(视内外圈壁厚比及材料泊松比而异)。对于CN组标准游隙(通常为20~40 μm),当压装后残余游隙低于5~8 μm 时,轴承运转温升将急剧上升,摩擦力矩可能增加数倍。若压装工艺控制不当使游隙减小量超出允许范围,将导致轴承运转温度升高、摩擦力矩增大,严重时引发滚动体的卡滞与早期疲劳失效。

3.2 预紧力的形成与控制

在锥轴承或角接触球轴承的压装中,轴向压装行程直接决定轴承的预紧力大小。轴系轴向刚度通常表现为每微米轴向位移对应200~500N的预紧力变化,该刚度特性直接影响压装终止行程的控制精度。预紧力过低(低于设计值80%),轴系刚性不足,齿轮啮合时产生过大的轴向窜动;预紧力过高(超过设计值120%),则轴承发热严重,摩擦力增大,传动效率下降,甚至引发滚道压痕。压装工艺需要在准确控制轴向尺寸的基础上实现预

紧力的精确设定,这对压装行程的伺服控制分辨率和重复定位精度提出了很高要求。

3.3 游隙不均与轴承偏载

压装过程中若轴承圆周方向受力不均匀,会导致轴承内外圈不同心或倾斜,从而使滚动体载荷分布不均。部分滚动体承受过大载荷(峰值可能达到平均载荷的2~3倍),而另一些则几乎不受力,这种偏载状态会加速轴承的疲劳剥落,也是变速箱产生周期性振动(频率通常与滚动体通过频率相关)的常见原因之一。

4 压装工艺对齿轮副啮合质量的影响

4.1 轴系轴向窜动对齿面接触的影响

轴承压装位置不准确所导致的轴系轴向定位偏差,会改变齿轮副的啮合位置。当齿轮副未能实现全齿宽接触时(接触印痕偏出一侧超过齿宽的15%),齿面接触应力显著增大(局部应力可增大50%以上),局部磨损加剧^[3]。对于斜齿轮而言,轴向定位偏差还会改变齿轮的螺旋角啮合条件,使传动误差增大,影响传动的平稳性和噪声辐射水平。

4.2 轴系刚度变化对传动精度的影响

合理的轴承压装预紧能够提高轴系的支撑刚度,减小齿轮啮合时的弯曲变形和扭转变形,从而保证传动比的恒定性。反之,若压装预紧不足,轴系刚度偏低(可能降低20%~30%),齿轮在交变载荷作用下将产生较大的角位移误差,导致传动精度下降和振动加剧。对于高精度变速箱,齿侧隙的稳定性也受到轴系刚度的间接调制,进而影响换挡过程的平顺性。

4.3 振动噪声的传递放大效应

轴承压装不良所引入的振动激励(如轴承滚道变形引起的通过频率振动、滚动体载荷不均引起的自激振动)通过轴系传递至齿轮副,与齿轮啮合频率振动相互耦合,产生复杂的调幅调频现象。这种振动不仅在总成内部传递,还通过变速箱壳体辐射为空气噪声,直接影响乘坐舒适性。尤其在纯电动变速箱中,由于缺少发动机背景噪声的掩蔽效应,轴承压装缺陷引发的啸叫声尤为突出。

5 压装热效应与尺寸链累积效应

5.1 压装摩擦热的产生与温升影响

压装过程中配合面的摩擦做功产生热量,使轴承和配合件温度升高。钢材线膨胀系数约为 $11.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,当轴承与轴的温差达到20 $^{\circ}\text{C}$ 时,直径为60mm的配合副过盈量变化约0.014mm,足以改变配合性质(由过盈配合转为过渡配合甚至间隙配合)。温升导致材料热膨胀,改变实际过盈量,进而影响压装力的变化趋势。对于大尺寸

轴承或高速压装工艺（速度大于6mm/s），这种热效应更为显著。若冷却后收缩不均匀，可能产生残余应力，影响轴承的尺寸稳定性。

5.2 热膨胀对轴向定位精度的影响

变速箱总成装配通常在室温下进行，但实际工作温度远高于室温（可达80~120℃）。压装时建立的轴向定位精度和预紧状态在工作温度下会因各零件的热膨胀系数差异而发生变化^[4]。压装工艺若未考虑热态尺寸链的补偿问题，可能导致热态下游隙完全消失或预紧力剧增（预紧力增量可达设计值的30%~50%），引发热咬合故障。

5.3 尺寸链中各环节的公差分配

轴承压装并非孤立的工序，而是变速箱总成尺寸链中的重要一环。轴颈尺寸、轴承宽度、箱体轴承孔位置度、调整垫片厚度等多个尺寸要素通过压装环节最终决定轴系的轴向位置和预紧状态。各组成环的公差分配需遵循等精度或等公差等级原则，压装工艺的稳定性（工序能力指数Cpk通常要求不低于1.33）决定了尺寸链封闭环的变动范围，进而影响整机装配质量的一致性。

6 压装工艺的系统优化策略

6.1 力-位移曲线的在线监控与判定

现代压装技术普遍采用压装力与位移的实时监控系统。实际生产中常设置力梯度（ dF/dS ）的上限与下限阈值，若实时梯度超过设定值的 $\pm 15\%$ 则触发报警，提示可能发生偏斜、材料异常或配合尺寸超差。通过对力-位移曲线的特征点（起始点、线性段斜率、非线性拐点、峰值点及终止保压段）进行模式识别，可以及时判断压装是否出现异常。压装终止后还常设置1~3s的保压阶段，以释放配合面的弹性后效变形，确保轴向位置的稳定可靠。

6.2 压装参数的匹配与自适应控制

不同型号、不同尺寸的轴承对应着不同的最优压装参数组合。建立压装参数数据库（涵盖压装力阈值、速度曲线、终止位置补偿值等），根据不同工况自动匹配压装速度、终止压力和保压时间等参数，是提升压装柔性和质量水平的发展方向。引入基于力反馈的自适应控制技术，能够根据实时信号动态调整压装策略，以应对来料尺寸一致性波动（如轴颈尺寸在公差带内漂移）带

来的影响。

6.3 清洁度与润滑条件的协同管理

配合面的清洁度直接影响摩擦系数的稳定性，颗粒污染物（大于5 μm 的硬质颗粒）可能嵌入配合面造成划伤或局部应力集中。同时，压装用润滑剂的种类（如二硫化钼润滑脂、防锈油等）和涂布量（通常控制在0.1~0.3g/cm²）对力-位移曲线的形态有显著影响——润滑过量可能导致压装力偏低而影响保持力矩，润滑不足则可能引发压装力突增和表面拉毛。将清洁度管理和润滑管理纳入压装工艺的整体控制体系，有助于减小压装质量的批次波动。

7 结语

轴承压装工艺作为变速箱总成装配中的关键环节，其对装配质量的影响是全方位且深层次的。本文从配合精度、游隙与预紧状态、齿轮啮合质量以及热-尺寸链效应等多个维度系统分析了这一影响机制，揭示了压装工艺不仅是一个简单的压力装配过程，更是影响变速箱综合性能的重要变量。当前，随着汽车产业对变速箱噪声、振动与平顺性要求的不断提升，以及新能源变速箱对高转速、高转矩密度的特殊需求，轴承压装工艺面临着更高精度的挑战。未来的工艺发展应着力于压装过程的数字化监控、参数的自适应调整以及全生命周期质量追溯，以实现从经验依赖型向数据驱动型的转变。本文所梳理的影响框架可为变速箱装配工艺设计及质量控制提供理论参考，也期待相关研究在量化建模和在线检测技术方面取得进一步突破。

参考文献

- [1]王建国,张明辉.过盈配合压装力计算及影响因素分析[J].机械工程学报,2022,58(14):187-195.
- [2]刘志强,陈晓东,李华.汽车变速箱轴承压装质量监控技术研究进展[J].汽车技术,2023(6):42-49.
- [3]赵宏远,孙立军.轴承预紧力对变速箱振动噪声特性的影响[J].振动与冲击,2024,43(3):156-163.
- [4]周明德,吴海涛,郑刚.基于压装曲线的轴承装配缺陷在线识别方法[J].中国机械工程,2023,34(18):2210-2218.