压装工艺原理综述及工艺监控探究

石振龙

联合汽车电子有限公司西安厂MFE3　陕西西安　710117

摘要：压装工艺连接形式简单，在汽车行业应用已久。但查阅相关文献资料都是以单一的案例解决或者设备开发为主，鲜有系统性讲解压装原理、归纳压装工艺知识的资料出现，致使该工艺缺少理论的知识沉淀。近年来由于压装导致的产品质量案例频发。基于此，归纳总结了现有的压装工艺类型，提出七点压装曲线模型，并结合多年压装行业案例给出系统的压装工艺设计要点。

关键词：压装原理；曲线监控；压装类型；压装机构设计；压装问题分析

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.03.004

压装工艺作为传统的连接工艺之一，由于其工艺原理简单，压装设备成本低廉且生产效率高的特点使得其在汽车零部件行业应用广泛。随着工业传感器的高速发展普及，近年来越来越多的压装设备集成了力——位移监控的手段，大大提升了压装工艺过程的质量。同时，数字化压装、自动化压装也成为了研究的热门话题。

文献1研究了如何利用数理统计及曲线拟合来科学合理地设置监控限，在监控质量和误报警率上找到了一个平衡点。文献2研究了压装的零件设计过盈量对于压装质量的影响。文献3研究了电子伺服压机的集成设计及监控策略应用的案例讲解。也有相关文献研究了具体某一产品的压装工艺缺陷降低及问题解决。目前的文献资料都集中在压装零件设计，设备集成，应用案例上，在压装原理、监控策略鲜有机构或厂家能够给出系统性的理论依据及具体可行的操作方案。

压装形成过程及监控特性

1.压装形成过程

压装过程如图1所示，为相互配合的两个零部件从分离开始逐渐以压装面为连接界面开始配合，最终达到压装止点的过程。其理论的力位移曲线如图2所示。

结合实际的压装过程有七个特征点，解释如下：

1）*A*点：零件分离，未有压装力产生，此时的理论压力为0。

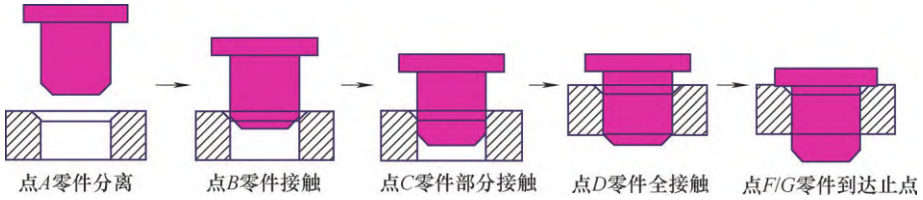

图1　压装工艺过程

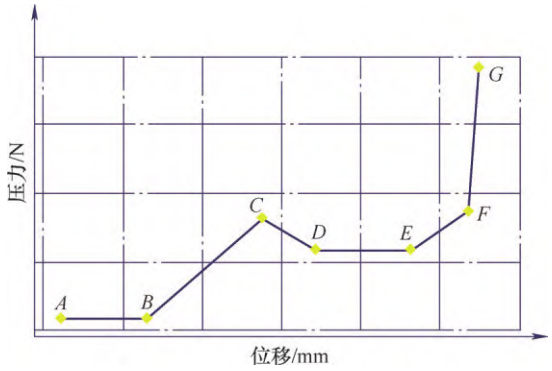

图2　压装七点曲线模型

2）*B*点：零件开始接触，力开始起升，实际过程需要考虑配合零件倒角。

3）*C*点：零件随着配合面积增大，压力出现与压装面积成正比的增大。

4）*D*点：当压装部件配合面积全部结合以后，压装面积不再增大，进而压装配合力也稳定。随着相互配合的位移，此时一些零件会发生挤压变形将部分材料从配合面带出或屈服发生形变产生压力降。

5）*E*点：产品在保持配合面积不变，进一步滑动，其配合力也保持稳定。

6）*F*点：产品在到达机械止点时，由于带出的材料积聚到行进面，此时压装力会出现一定增大。

7）*G*点：最终达到压装止点，压装力急剧增加。

其中，由于压装部件的设计，其在到达压装止点前不会出现全配合阶段，因而一些压装过程没有特征点*D*、*E*；有些压装要求压倒指定深度距离止点有一定距离，因而不会出现特征点*F*、*G*。但对于压装工艺的力位移曲线模型一定具有上述七点特征。

对于同一压装过程具有多处的压装配合位置时，上述理论曲线依然适用，只是多个上述过程的曲线叠加。

2.压装过程监控

不同的压装过程有不同的特性及其失效，实际生产过程对于曲线的监控应该考虑的失效见表1。

表1　压装过程的监控

特征点	阶段	监控要点及可能失效
AB	空压阶段	窗口类型Unibox，设定压力，位移限，可防止设备压力，位移传感器故障零漂。此阶段监控的越长越好，特别对对于电子压机可以放置设备意外撞车损坏
*B*点	韧入点	识别压装对不中造成的失效，重点关注位移，推荐根据理论倒推设置，需要考虑倒角。压力根据零件特性设置，建议不高于50N
CDE	配合阶段	窗口类型NoPass，监控此阶段的配合力上限，防止不合格零件压装，比如零件高度、直接、粗糙度超差等
EF	落座阶段	窗口类型LINEY，监控配合力防止漏压，多压，压裂等异常情况。注意此阶段由于出现压装蠕动力和位移传感器易出现蠕动现象造成误报警不宜采用unibox监控窗口
G	终止阶段	窗口类型Unibox，监控终止力及位移，防止压装不到位及压力超差引起的缺陷。 注意实际生产中，由于大压力的压装此处产品的位移往往出现0.5mm左右的波动，如对压装止点位移要求严格，建议使用末端的斜率监控，或者设定合理的力下线与*EF*的窗口形成合理的压力差

压装类型及特点

常见的压装按照连接件的材料硬度可以分为刚性压装、柔性压装和过渡压装，具体如下。

1.刚性压装

刚性压装一般是为了获得较高的连接强度，会选用强度较高且具有一定延展性不易碎裂的金属（见图3）。对过盈量及压装面表面粗糙度一般具有极高要求。

其压装配合力可以通过仿真计算得出，具有很高的理论一致性。但由于其高硬度，其压装配合力与过盈量强相关。考虑到批量生产的能力，实际过盈量一

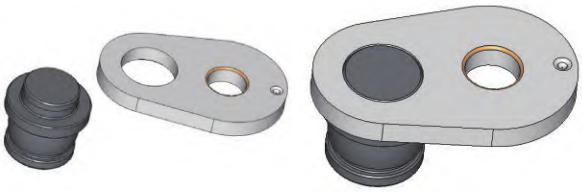

图3　厚壁金属孔轴压装

般≥0.05mm。而这个范围内的配合力波动会从几百牛到几万牛不等（见图4），其配合力很难评价。一般采用压力控制，位移监控的压装控制逻辑，主要监控拐点特征。

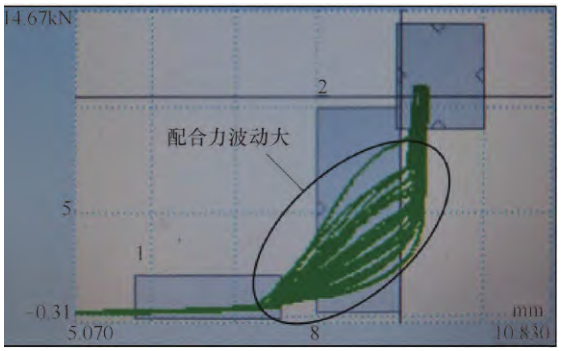

图4　刚性压装曲线

2.柔性压装

柔性压装一般是为了获得密封性或者低强度的紧固功能，一般密封会选用柔性密封圈作为压装配合的中间连接体（见图5），或者是选用易变形的薄壁零件，显著特点是会产生弹性变形压力曲线形成压力降。

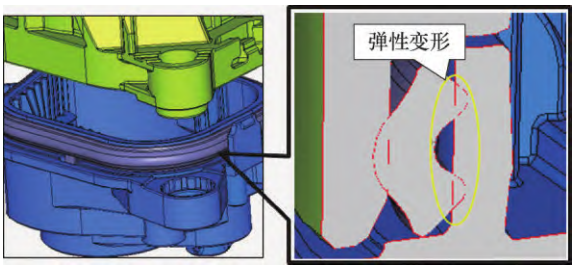

图5　橡胶密封圈压装

其压装过程一般是最柔软的零件受挤压后发生变形，相对硬度较高的零件保持形状，压装配合力对过盈量的波动不是很大，但终止位移却波动较大。因此一般采用位移控制，压力监控的压装控制逻辑，主要监控曲线形状（见图6）。

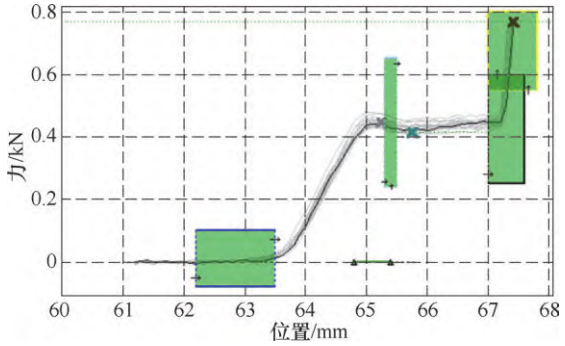

图6　柔性压装曲线

3.过渡压装

过渡压装是介于刚性压装与柔性压装之间，是为了紧固不受力的小零件。例如pressfit工艺，金属与开放边缘塑料零件的压装，显著的特点是压装会产生一定程度的塑性变形（见图7），压装曲线形成压力降（见图8）。一般根据装配需求可选择位移控制也可选用压力控制，主要监控压力降。

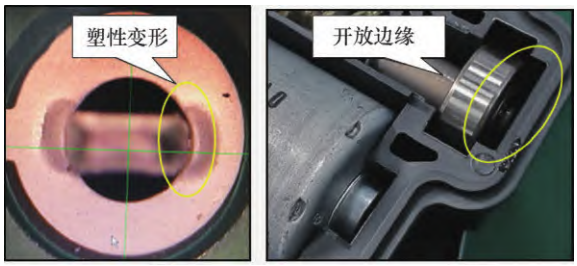

图7　过度压装

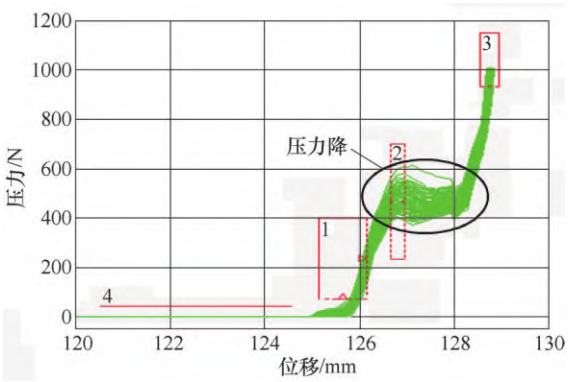

图8　过度压装曲线

4.监控策略推荐

对于不同压装类型其压装过程存在一些细节差异，故而需要在监控窗口的设定上进行一些特殊的考虑。结合实际的压装缺陷探测，推荐如图9所示的监控

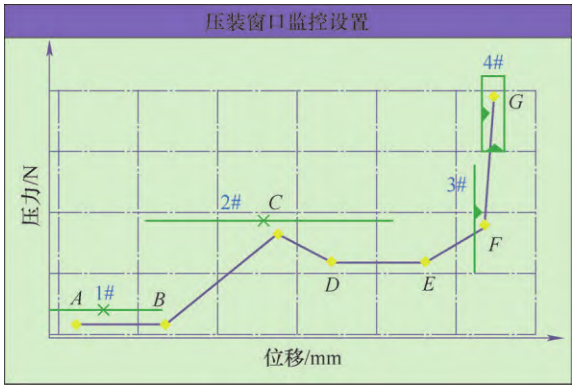

图9　压装监控窗口

窗口策略供参考。窗口设定方法见表2。

表2　压装窗口设定

序号	类型	设定要点
1#	Nopass	*X*左侧尽可能的早，自由段监控，但需要考虑设备起动加速度的压力； *X*右侧需要考虑零件设计的倒角，一般取双侧倒角的均值； *Y*轴力取决于压装零件是否易损，一般不大于50N
2#	Nopass	对于刚性压装此监控可省略 柔性及过度配合监控此段识别压装异常变形缺陷 *X*左侧从对中韧入后，右侧则为配合力稳定后，建议距离尽量靠近*E*点
3#	LineY	监控零件配合力，对于过度配合需要考虑最小配合力防止出现压裂缺陷
4#	Unibox	刚性配合，需要与3#装口结合设定，要求此段的*Y*轴出现明显的压力抬升，以防止较大配合力的零件没有压入导致的漏失别

注：1.压头的自重及感应最小力矩需要被关键验证。

2.对于不能够设定Nopass类型的仪器可以用unibox替代，方法为将其设为不进不出，*Y*轴最大最小值设为接近一条直线。

压装机构设计

完整的压装系统包括压装零件、硬件、软件三部分组成。软件一般由外部PLC编程实现或由近年来的集成控制策略的电子伺服压机内部实现，本文不做具体的陈述。

1.压装零件

压装基体：指压装过程中的静止部件，产品设计需考虑定位，压装受力等因素。

压装零件：指压装过程中移动的零件，设计需要考虑内壁面在压头上的定位及固定方式，压装过程中压头对内壁面的支撑，受力面的支撑面积等因素。

2.硬件

1）压装定位座：指定位压装基体的机构，需要提供基体零件的定位，需要考虑压装的位置度、垂直度，对于刚性接触压装至关重要。

2）夹持机构：指将装配基体固定在定位座的机构，主要作用为压装前的零件位置归正，及压装后压头举升时防止将零件带起。此部分可以独立设计，也可以与压装运动部件设计在一起，但注意如果设计在一起需要考虑加持机构产生的力不能够作用于力矩传感器，从而避免对于压装过程的干扰。现实应用中有不少案例由于这点考虑不周导致压装质量问题没法得到有效的探测。

3）支撑机构：压装时压力会施加到零件的配合受力周边，为减小零件的变形会增加对零件局部受力面的支撑。在压装力不大时，这部分有时候会与定位座设计合并设计成一个机构。

4）锁止机构：为了避免压装的冲击对于支撑部件的冲击，或者压装力很高时对于支撑机构的损坏，增加锁止机构来为压装提供稳定可靠支撑。现实应用中，长时间的使用下锁止机构出现卡滞、磨损、表面异物等会导致支撑不稳，导致压装监控出现突变报警。

5）压头机构：压头是固定压装零件的机构，作用之一是为压装零件提供姿态定位，其垂直度、与定位座的相对位置度决定了压装过程的对中性。与零件压装的受力面原则为那里受力支撑那里。例如轴承的压装，轴承内圈受力支撑内圈，外圈受力支撑外圈，否则会损坏轴承自身的装配结构。此外，如果是环形零件压装，压头还为零件提供辅助支撑，保证保证过程零件不产生溃缩变形的作用。故而其配合间隙需要验证合适。过大则压装后无法顺利脱出，过小则会使压装后零件变形。

6）监控单元：指采集力及位移信号的装置。现在的伺服压装机构都有集成。采用气缸压装的也可集成外置的模块。但需注意力采集机构的安装间隙，需要保证空压状态传感器不受力，但在压装时一旦受力可

（下转第60页）

直观理解零件之间的关系和配合情况，评估和验证零件质量。

智能尺寸规划平台的优势

1）提高效率：通过智能化测点设计和离线程序仿真，测点布置和测量程序编制效率显著提升，减少人工操作的复杂性和错误率。

2）标准化与一致性：平台实现了测点布置的100%标准化和唯一继承性，确保了不同层级测点的一致性，便于质量追溯和问题定位。

3）优化资源配置：智能路径规划优化测量路径，避免资源浪费，提升测量设备的利用率。

4）数据管理与分析能力：提供统一的数据管理平台，打破信息孤岛，实现数据的高效传递与分析，支持企业与供应商间的协同。

5）可视化与实时监控：通过可视化展示和实时监控，帮助用户快速识别质量问题和调整生产工艺，提升产品质量管理的效果。

6）支持持续改进：通过过程能力分析，企业能够及时掌握生产动态，优化工艺，推动持续改进，提高市场竞争力。

结语

综上所述，智能尺寸测量规划平台的开发为汽车行业在测点设计、测量程序编制和数据管理提供了创新的解决方案。其高效的工作流程和强大的数据分析能力，不仅提升了生产效率和质量控制水平，也为企业在激烈的市场竞争中保持优势奠定了基础。面对未来的挑战，持续推广和优化这一平台将是提升行业整体竞争力的关键。

参考文献：

[1] 叶立渊，吴海，苑永强，等.汽车冲压件数字化智能测量技术方案的探讨[J].锻造与冲压，2021（10）：49-53.

[2] 朱伟华，任强.重视测量数字化，增强智能网联汽车产业协同价值[J].汽车与驾驶维修（维修版），2023（3）：22-23，28.

[3] 李明，胡敏，龙从林，等.尺寸工程的现状与发展[J].汽车工艺与材料，2023（3）：1-8. DOI:10.19710/J.cnki.1003-8817.20220318.

[4] 王俊杰，王浩，卢亚军.白车身尺寸检测技术及数据应用研究[J].企业科技与发展，2015（8）：39-41，44.

[5] 阚天水.基于CATIA的汽车测点批量开发的研究与应用[J].汽车实用技术，2021，46（10）：118-120. DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2021.010.035.

AUTO1950

（上接第55页）

以等效地显示压装力。安装间隙过小易使压力传感器受冲击损坏，安装间隙过大，在刚韧入时传感器无法压缩受力对韧入过程监控失效。实际使用过程中还得考虑压头机构的自重如果平衡，一般而言压头机构重达200N左右，如果不平衡掉对于初韧要求较高的压装过程监控便是失效的，极易产生无法探测的质量问题。

结语

本文从压装原理开始论述，总结描述了压装的七点曲线模型。总结分类了压装的三种类型：刚性压装、柔性压装、过渡压装，并对每种压装的压装特性及其压装控制策略进行综述。系统化地综述了压装工艺从零件设计到软件、硬件集成设计的要点，并结合实际工艺经验给出防范措施。

参考文献：

[1] 路翔飞，焦永钢，李晓敏，等. 基于曲线拟合和统计算法的发动机压装工艺监控限的计算与应用[J]. 工艺材料，2022（7）：53-55.

[2] 由博. 过盈连接压装质量影响因素研究[J]. 内燃机与配件，2021（19）：137-138.

[3] 周强，马维鹏. 数字压力装配单元研究与应用[J]. 汽车工艺师，2022（1-2）：74-76.

AUTO1950