

V形发动机缸套下沉分析与解决方法

□ 中国第一汽车股份有限公司技术中心 / 王勋 杜严 王海龙

铝缸体与缸套材质的收缩速度不同，热装冷却后将会产生一定的相对位置偏差及配合间隙。本文借用专用工装对缸套在常温下进行二次压入定位，基于多项工艺试验，确定合适的拧紧力矩、止口高度尺寸和缸套下沉量，确保缸套与缸体完全无缝贴合。随后经多道工艺对热装过程中加热温度及保温时间的选择，做出详细的分析和选取，并提出配合面异物清理措施以提高装配精度。

在汽车制造领域，发动机是车体的重要核心部件。随着汽车工业的飞速发展，新型发动机的设计和制造成为提升企业竞争力的重要因素。到目前为止，V形系列成为备受关注的新型先进发动机。为了全面掌握V形发动机的制造和装配技术，一汽技术中心试制部自主完成了发动机关键零部件的生产工作，如缸体、缸盖及曲轴等，而缸体和缸套是发动机的重要核心部件。V形发动机缸体结构复杂，加工和装配精度要求高，其关键生产工艺和装配技术成为V形发动机制造过程的难点。本文的研究工作主要集中于V形发动机缸套在缸体中下沉问题的分析和解决方法，探索出一套全新的全铝合金缸体缸套热装及压装工艺技术，全面提高V形发动机的生产效率和制造装配质量，并为后续同类产品的试制工作提供理论和试验指导。

试验条件

本试验在一汽技术中心试制部自主研发、制造和装配完成的V12精品发动机整机上进行。V12发动机缸体属于全铝合金缸体，缸套为合金钢材料，其压装工艺参照国外先进铝合金缸体缸套热压装技术实现。首先将缸体整体加热，然后在铝缸体缸孔中镶入铸铁缸套，即缸体整体加热，缸套在常温状态下装入缸孔。将装配完整的整机运行10h，对发动机各项指标及零部件工作状况进行检测。

试验结果

试验结束后将发动机进行拆卸检查。将缸盖拆下后，缸套法兰上端面表面明显低于缸体上端面，此时缸套出现了下沉问题，如图1所示。

随后对12个缸套圆周上成180°的两点进行下沉量测量并取其平均值，测量结果见表1。

以上测量结果表明，12个缸套在缸体中均出现下沉现象。

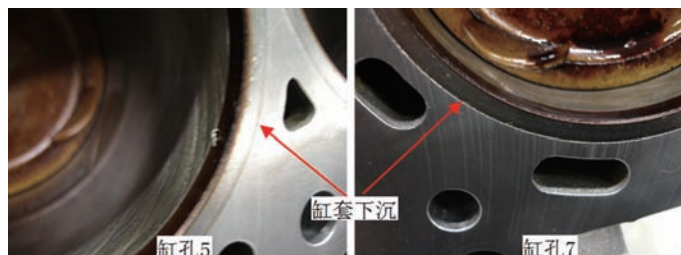


图1 缸套下沉

表1 缸套下沉量测量结果

缸号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
下沉量/mm	-0.06	-0.05	-0.06	-0.08	-0.07	-0.06	-0.09	-0.06	-0.10	-0.06	-0.05	-0.06

试验分析

试制部在国内首次尝试复杂结构、高精度的V12发动机生产制造工作，尚无成熟的生产工艺可借鉴。试制部成员对上述问题再次进行了一系列的分析和试验验证。首先对缸体缸套的加工图样进行复核，其配合关系符合设计要求。在加工过程中，缸孔的加工刀具、使用的夹具及切削参数也符合加工工艺的要求。对加工完成后的同批次零部件进行再次复核，缸体缸套的过盈量，缸体的缸孔尺寸和加工精度，及缸套的尺寸和加工精度均符合设计要求。尤其对缸孔止口处的圆角 $R0.4_{\max}$ 及倒角尺寸 $C0.3^{+0.1}$ 再次核查，如图2所示，其尺寸及加工精度均符合设计要求。

随后对缸套的热装过程进行分析。装配过程采用胶皮锤进行敲击，以使缸套落装到位，目视缸套与缸体顶平面保持水平，保证了缸套装入缸孔后与缸孔止口完全定位。上述检验项目均符合V12的设计和制造要求。

最后，课题组成员根据多年经验，得出如下推断：由于V12发动机缸体和缸套分别由两种不同的材质所组成，缸体加热后完成缸套的安装，在冷却过程中由于两种不同的材料具有不同的收缩率，导致缸套突出缸体上端面。而在随后的精加工表面时并未考虑缸套已向上轻微移动，使得缸套上表面在高度方向上的切削去除量增大，而缸体和缸套轴向未完全定位。在这种情况下，当发动机整机在高温高压下工作时，缸套上端面相对于缸体顶面产生向下的相对位移，导致缸套下沉。

为了验证上述推断，课题组成员将已经装入缸套并且顶平面精加工完

成的缸体重新进行加热再冷却，即对装配后的缸体缸套进行二次加热试验。试验结束后，缸套已突出缸体的上表面（见图3a）。随后沿缸套圆周进行高度方向上的四点测量并取其平均值，如图3b所示。表2得出各个缸套在高度方向上的相对位移变化量，证实了二次加热后缸套的上移现象。

本次试验验证热装过程是影响缸套在实际使用过程中出现下沉问题的主要影响因素。经分析认为，热装后缸套在轴向没有完全定位是导致缸套下沉的主要原因。本文将针对如何确保缸套与缸体无缝贴合并保证缸套热装质量，提出详细全面的解决方案。

解决方案

1. 二次压入

缸体缸套热装结束后，由于缸体缸套两种材质的收缩速度不同，缸体冷却后产生一定的相对位置偏差。二次压入是指热装工艺结束后，设计专用工装在常温下对缸套进行保压定位。这种方法确保了缸套和缸体在常温下的无缝结合，不仅提高了压装质量，而且确保了发动机整机的可靠性。为了顺利实施二次压入试验，课题组需重新设计专用工装，选取合适的压紧力，保证缸孔止口加工精度，并对缸套在



图2 缸孔止口处的圆角及倒角尺寸核查

表2 缸套在高度方向上的相对位移变化量及其平均值 (单位: mm)

缸号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a	0.026	0.012	0.009	0.036	0.009	0.046	0.052	0.03	0.03	0.013	0.028	0.037
b	0.035	0.013	0.01	0.05	0.01	0.05	0.06	0.07	0.04	0.019	0.035	0.028
c	0.008	0.01	0.013	0.035	0.013	0.035	0.02	0.03	0.05	0.016	0.007	0.009
d	0.019	0.015	0.014	0.046	0.016	0.046	0.05	0.08	0.04	0.01	0.035	0.045
平均值	0.022	0.013	0.014	0.042	0.012	0.044	0.045	0.042	0.039	0.014	0.026	0.031

缸体中的下沉量进行检测。

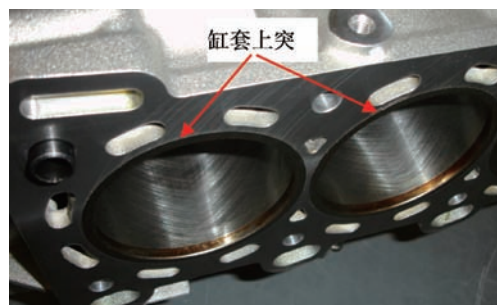
(1) 专用工装设计。专用工装的设计如图4a所示，将压块置于工装上表面，借用缸体上表面缸盖螺栓孔将工装压在缸套上表面，施加一定压力使缸套定位。在二次压装过程中，其使用方法如图4b所示。

(2) 压紧力控制。工装螺栓的压紧力在二次压入过程中是影响缸套下沉量的重要因素。参照缸盖装配要求，工装螺栓拧紧力有着严格要求。综合考虑压力变化范围和

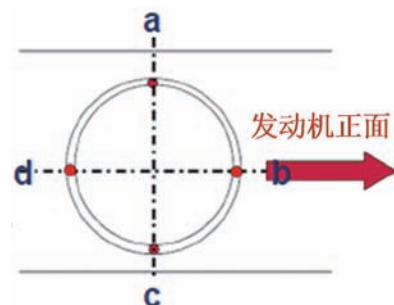
工装使用工艺的合理性，我们将螺栓拧紧力矩分别设定为 $(40 \pm 2) \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $(60 \pm 2) \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $65 \pm 2 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，并保压10min。经检测，缸套相对缸体顶平面均有一定的下沉（见图5）。当螺栓拧紧力矩大于 $(60 \pm 2) \text{ N}\cdot\text{m}$ 时，各缸套下沉量保持不变，并且与发动机热试后下沉量基本一致。此时表明在 $(60 \pm 2) \text{ N}\cdot\text{m}$ 的拧紧力矩下，缸套和缸体在常温下已达到无缝结合要求。随后，经整机装配后台架性能和可靠性验证， $(60 \pm 2) \text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩完全满足缸体压装缸套的设计要求和性能。

(3) 加工精度控制。缸体缸孔的止口尺寸精度是影响缸套二次压入下沉量的主要因素。对高度方向上的止口尺寸 h （见图6）有着严格要求。加工过程中其工艺控制尺寸为 $h=5.5^{+0.02}_0 \text{ mm}$ ，以保证压装后缸套下沉深度在设计范围之内。

(4) 压装后检测控制。我们对二次压装后的部件进行严格检测发现，

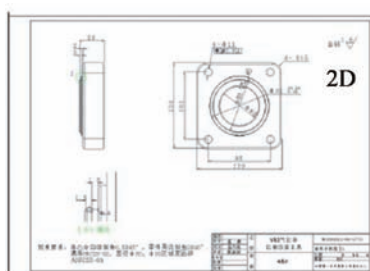


(a) 缸套上突现象

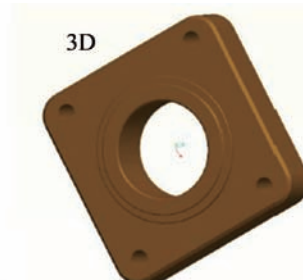


(b) 缸套相对位移量测量方法示意图

图 3



(a) 专用工装设计



(b) 使用方法

图 4

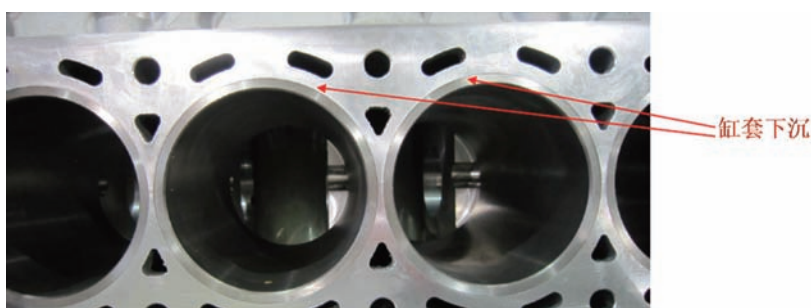


图5 二次压入后缸套下沉



图6 止口高度尺寸示意

当缸套下沉量处于0.05~0.09 mm时，缸套与缸体实现了无缝结合。在此情况下，二次压入措施成功实施，产品判定为合格。

2. 热装温度控制

V12发动机缸体是由全铝合金材料构成，热装温度影响着铝基材料的性能。另外，由于温度的变化，使缸体的热装间隙及加工基准发生微小偏移，造成机械加工过程的精度误差。可见，热装温度是缸套热装工艺中的重要影响因素。在生产过程中，需要对合适的加热温度做出详细的探讨试验工作。当全铝缸体在加热到200℃以上时会出现回火等一系列非设计允许变化。当缸体加热温度采用145℃较低值时，缸体缸孔直径增加量明显不足，缸套安装需要用工装外力支持，这可能造成加热情况下的缸体零件发生变形破坏。

在不改变铝合金材料组织结构的前提下，我们将缸体加热温度分别设定为145℃、150℃、155℃、160℃和165℃，缸体保温时间参考国际先进V系发动机制造商的成功案例，确定在20~25min。经过多轮的工艺改进，当缸体加热温度设定为165℃时，既能保证缸孔有足够的热胀量，又不会对缸体的热变形和金相组织结构产生影响。缸套压装只需人力导向即可，既省时又经济，且不会产生惯性冲击，对零件在加热状态下的变形保护起到很好的作用。

图7为改进后采用合适加热温度（165℃）的热装工艺实例。由于加热温度不能太高，故缸体降温较快，所以需在出炉后较短时间内完成12个缸孔的缸套热装。课题组成员经过30多台发动机的实际压装试验，实践证明如果在1min内完成缸套的热装，便可以防止缸孔收缩过快现象的出现，

以保证顺利完成热装。

3. 清洁度控制

在缸套与缸体进行装配的过程中，如果配合表面存在异物，会直接影响装配质量。较高的清洁度是提高缸套缸体装配精度的保障。为此，在热装前需对缸套、缸孔及其各配合表面用酒精仔细擦拭清理，如图8所示。

总结

技术中心试制部首次自主完成了V形12缸发动机关键零部件的加工和装配工作。针对整机测试过程中出现的缸套下沉问题，成功探索出一套全新的全铝合金缸体缸套热装及压装工艺技术。本课题成功突破了缸套热装及压装技术难题，为后续同类产品试制开发奠定了工艺技术基础。试制部填补了国内V形发动机制造和装配领域的空白，推动了技术中心自主技术发展的步伐。



图7 改进后的热装过程实例



图8 缸套、缸孔及其配合表面清理