

工艺与材料

基于频谱谐波技术的振动时效应用研究与实践

王连宏, 吉海叶, 张 芳, 张雪冬, 郭巨寿

(北方通用动力集团有限公司, 山西 大同 037036)

摘 要: 针对某型号柴油机机体存在的微量变形及缸套安装底孔尺寸和主轴承孔同轴度超差的问题, 在对几种时效工艺分析的基础上采用了基于频谱谐波技术的振动时效工艺。介绍了振动时效工艺方案、过程以及最终效果, 并对该时效工艺的经济性做了评估。结果表明: 采用该时效技术不仅解决了机体这种大型薄壁框架式铸件存在的微量变形问题, 且在保证生产周期的前提下节约了大量的人力、物力。目前该技术得到了推广应用。

关键词: 机体; 变形; 振动时效

中图分类号: TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)04-0043-04

Application Research and Practice of VSR Based on Harmonic Spectrum Technology

Wang Lianhong, Ji Haiye, Zhang Fang, Zhang Xuedong, Guo Jushou

(North General Power Group Co., Ltd., Shanxi Datong 037036)

Abstract: To eliminate the micro-deformation of an engine body, and solve the problem that the size of liner installation base hole and the concentricity of the main bearing hole are out-of-tolerance, the vibratory stress relief technology based on harmonic spectrum technology is adopted through the comparison analysis of several aging processes. The VSR process program, procedures, and final effect are introduced and its economical efficiency is evaluated. The results show that the VSR technology could not only eliminate the micro-deformation of engine body, which is a kind of large thin-wall frame casting, but could also save manpower and material resources with the premise of ensuring the production cycle. Now the VSR has been put into application.

Key words: engine body; deformation; VSR

0 引 言

某型号柴油机的机体属于大型薄壁框架式铸件, 材料为高强度铝合金。该种铸件在冷却过程中, 由于发生固态收缩或相变, 以及其几何形状相交处断面厚薄不均, 常会导致外层与内层、厚壁与薄壁固态线收缩率不一致, 从而形成局部残余应力; 再则该机体结构件形状复杂, 刚性相对大, 加工尺寸多、流程长、尺寸精度要求高, 在二次合箱状态下复检缸套安装底孔和主轴承孔尺寸时发现:

个别缸套上支沿孔超差 0.05 ~ 0.675 mm, 缸套下支沿孔超差 0.02 ~ 0.025 mm; 个别主轴承孔全长同轴度超差 $\Phi 0.04$ mm, 主轴承孔相邻同轴度超差 $\Phi 0.02$ mm。此现象影响了柴油机的装配质量和批量生产, 必须解决机体铸件和加工过程中的微应力、应变等问题。

1 时效工艺分析

机体产生上述质量问题的根本原因是: 毛坯铸造残余应力消除不彻底; 机械加工过程中产生的加

收稿日期: 2017-03-02; 修回日期: 2017-03-22

作者简介: 王连宏(1964-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为柴油机先进制造工艺技术, E-mail: sxdwanglianhong@163.com。

工应力造成工件变形。目前,消除大型机体残余应力一般采用热时效(TSR)和自然时效的工艺方法。但柴油机机体属于大型薄壁关键承力件,在进行精加工前如果采用热时效工艺,易使许多已经完成了精加工的丝对孔、螺纹孔产生变形,造成尺寸超差;同时热时效耗能大、成本高、环境污染严重、不易配炉;更重要的是炉温均匀性差,升、降温速度不易控制,易产生二次残余应力、微观裂纹,甚至造成机体报废。如果采用自然时效(NSR)工艺,利用环境温度的季节性变化和时间效应使残余应力释放,一是周期太长,二是占地面积大,特别是对于批产的产品不经济、不理想,无法满足生产进度的要求。

振动时效(VSR)工艺是一种可完全取代 TSR 和 NSR 的工艺,其原理是用振动消除残余应力,可达到 TSR 工艺的同样效果,并在许多性能指标上超过 TSR。其特点是工艺耗能少、生产效率高,在节能减排、提高尺寸稳定性方面具有卓越的表现。用振动时效调整金属构件内部残余应力,稳定工件机加工后尺寸的工艺方法已被国内外普遍采用,特别是在发动机关键承力件、传动件的制造过程中,从铸件、锻件、焊接到机械加工等工序都得到了广泛应用。国内机械加工零部件采用振动时效技术基本解决的是变形量在 1~10 mm 左右的大型薄壁零件和焊接件的应力问题,应用效果显著。但在柴油机机体上采用振动时效工艺技术解决变形问题,尤其是解决变形量在 0.02~0.07 mm 的微小变形方面,国内还没有技术应用的先例。

2 振动时效方案

2.1 工艺路线设计

首先根据机体的材质、结构、毛坯制造的工艺形式和加工过程,对机体残余应力场的分布、尺寸精度要求、二次合箱的工作载荷以及可能的失效原因等进行分析;然后设计振动时效工艺路线及技术方案。

振动时效工艺路线:毛坯振动时效处理—粗加工—精加工前振动时效处理—精加工—合箱。

2.2 工装设计

根据振动时效要求,研制夹具(定位板)如图 1 所示。

根据机体外形尺寸、结构及关键尺寸加工路线,设计适宜性夹具,合理地进行激振器与机体的连接。

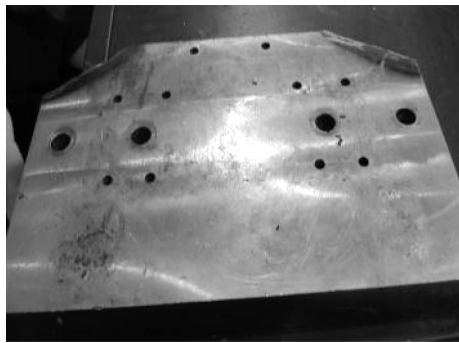


图 1 振动时效夹具(定位板)示意图

2.3 振动时效方案

振动时效方案如图 2 所示:采用两组胶垫将机体支撑起来,并将激振器用夹具固定在机体上,通过扫描对机体进行时效处理。

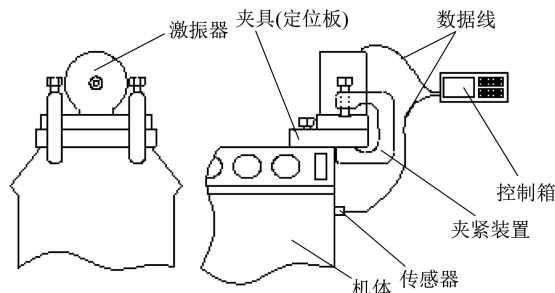


图 2 振动时效方案示意图

2.4 评判方法

对于振动时效效果评判,由于有色金属残余应力测量比较困难,目前尚无比较理想的测量方法,因此根据实际加工情况,在精加工后和放置 15 天后二次合箱,分别检测主轴承孔径、主轴承孔同轴度、缸孔孔径及缸孔圆度,以判断振动时效的效果。采用内径千分尺测量主轴承孔径时,从机体垂直方向起测为 A,顺时针旋转 60°为 B,再顺时针旋转 60°为 C;采用内径千分尺测量缸孔时从机体输出端向传动端排序,左排缸孔为 A,右排缸孔为 B,缸孔上支沿孔垂直方向为 A1 (B1),顺时针旋转 90°为 A2 (B2),缸孔下支沿孔垂直方向为 A1 (B1),顺时针旋转 90°为 A2 (B2)。具体测量部位和测量点如图 3 所示。

3 振动时效过程

在振动时效试验中,采用不同功能的振动时效设备,如非全自动型、自动型,分别对零件的毛坯和半成品进行振动对比工艺试验,发现以下两个方面的问题。

一是非自动型设备调整繁琐,不同零件采取不同的激振点和激振频率,调整精度和准确性受零件

结构和人为因素影响,振动试验后数据检测分析发现,存在个别尺寸超差现象。采用不同于传统模式的振动消除应力专家系统能够实现多种机体一种工艺的目的。其特点是:对激振点、支撑点位置无特殊要求。根据振动时效方案将激振器用夹具固定在机体上,现场装夹如图4所示。在振动处理前,通过扫描自动寻找机体的谐振频率和处理频率,如图5所示;然后控制激振器从寻找到的频率中优选5个谐振频率,频率分析度 ≤ 0.1 Hz,分别对机体进行时效处理,每个谐振频率的分析时间8~10 min,如图6所示。

二是合箱后存在精加工尺寸不稳定现象,须要对工艺路线进行优化。通过多轮次工艺试验,优化后工艺路线如下:毛坯振动时效—粗加工机体前后端、缸孔及四周一半精加工结合面—粗加工主轴承孔—二次振动时效—精加工结合面—装配—精加工主轴承孔—精加工缸孔—检验—拆卸—装配—复验主轴承孔和缸孔。

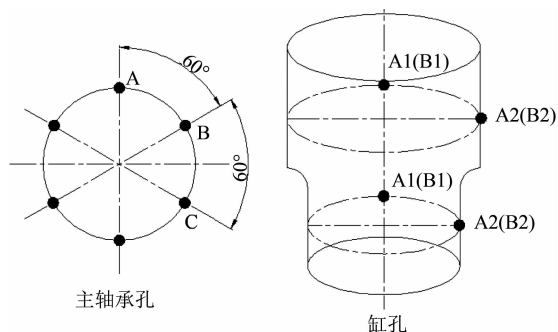


图3 测量部位和测量点示意图



图4 现场装夹应用

4 振动时效效果验证及分析

振动时效效果主要是指机体经振动时效后残余应力消除、均化、抗变形能力提高程度以及尺寸精度稳定化程度。根据产品使用特点,主要进行机体的精度稳定性检验。精加工后和放置15天后二次

合箱检测主轴承孔径、主轴承孔同轴度、缸孔孔径及缸孔圆度,具体数据见表1和表2。

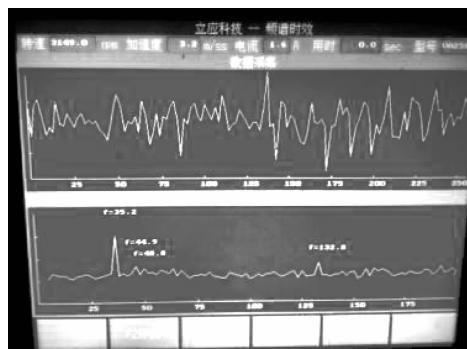


图5 扫描谐振频率过程



图6 振动时效过程

设计要求主轴承孔孔径公差为0~0.025 mm,公共基准同轴度为 $\Phi 0.03$ mm,相邻基准同轴度为 $\Phi 0.02$ mm;缸孔上支沿孔径公差为0~0.025 mm,下支沿孔径公差为0~0.025 mm。由表1可看出:振动时效后的机体,精加工后,主轴承孔孔径、同轴度及缸孔孔径全部满足要求;放置15天后二次合箱检测,主轴承孔孔径、同轴度及缸孔孔径全部满足要求。经批量生产验证,振动时效后的机体质量稳定,抗变形能力得到提高,高精度尺寸合格率达到100%。

5 经济性评价

与热时效和自然时效相比,振动时效具有以下优点:(1)成本低。由于无须使用大型热时效炉等设备,因此可节约投资费用300万元,节约能源消耗95%。(2)周期短。比热时效节约时间10倍以上,比自然时效节约时间1000倍以上。(3)质量稳定。比热时效提高了30%以上。(4)抗变形能力强。比热时效提高了30%~75%以上。(5)绿色环保。在低频下可实现高刚性、高固有频率零件的时效处理,选取频率都在6000 ($r \cdot \min^{-1}$)以下,振动噪声小。

表 1 主轴承孔检测数据

精镗瓦孔后从机体输出端向传动端排序主轴承孔							
孔径 $\Phi 152_{-0}^{+0.025}$ 从机体垂直方向起测 A, 顺时针旋转 60° 测 B, 再顺时针旋转 60° 测 C				主轴承孔形位公差检测			
测量点位	A	B	C	建立基准 Y	建立基准 Z	公共基准 同轴度 $\Phi 0.03$	相邻基准 同轴度 $\Phi 0.02$
1	$\Phi 152.015$	$\Phi 152.012$	$\Phi 152.011$	0.000	0.000	$\Phi 0.000$	
2	$\Phi 152.016$	$\Phi 152.015$	$\Phi 152.014$	0.001 9	-0.006 1	$\Phi 0.013$	$\Phi 0.008$
3	$\Phi 152.019$	$\Phi 152.017$	$\Phi 152.019$	0.002 5	-0.003 9	$\Phi 0.009$	$\Phi 0.007$
4	$\Phi 152.019$	$\Phi 152.015$	$\Phi 152.015$	-0.000 7	-0.007 7	$\Phi 0.016$	$\Phi 0.007$
5	$\Phi 152.011$	$\Phi 152.008$	$\Phi 152.012$	0.001 3	-0.006 6	$\Phi 0.013$	$\Phi 0.005$
6	$\Phi 152.016$	$\Phi 152.012$	$\Phi 152.013$	0.001 8	-0.001 2	$\Phi 0.006 4$	$\Phi 0.005$
7	$\Phi 152.018$	$\Phi 152.015$	$\Phi 152.014$	0.000	0.000	$\Phi 0.000$	
放置 15 天后从机体输出端向传动端排序主轴承孔							
1	$\Phi 152.017$	$\Phi 152.005$	$\Phi 152.005$	0.000	0.000	$\Phi 0.000$	
2	$\Phi 152.018$	$\Phi 152.003$	$\Phi 152.003$	0.010 8	0.000 6	$\Phi 0.022$	$\Phi 0.015$
3	$\Phi 152.017$	$\Phi 152.010$	$\Phi 152.007$	0.009 2	0.010 0	$\Phi 0.027$	$\Phi 0.010$
4	$\Phi 152.017$	$\Phi 152.010$	$\Phi 152.004$	0.005 7	0.009 9	$\Phi 0.023$	$\Phi 0.003$
5	$\Phi 152.005$	$\Phi 152.000$	$\Phi 152.000$	0.004 0	0.012 1	$\Phi 0.026$	$\Phi 0.007$
6	$\Phi 152.014$	$\Phi 152.008$	$\Phi 152.003$	-0.002 1	0.009 2	$\Phi 0.001 9$	$\Phi 0.010$
7	$\Phi 152.003$	$\Phi 152.005$	$\Phi 152.014$	0.000	0.000	$\Phi 0.000$	

表 2 缸套安装孔检测数据

精镗缸孔后从机体输出端向传动端排序缸孔						
测量点位	1	2	3	4	5	6
A1	$\Phi 172.015$	$\Phi 172.016$	$\Phi 172.017$	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.017$	$\Phi 172.015$
A2	$\Phi 172.012$	$\Phi 172.017$	$\Phi 172.017$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.018$
A1 - A2 / 2	0.001 5	0.000 5	0.000	0.001	0.001 5	0.001 5
B1	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.022$	$\Phi 172.025$
B2	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.016$	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.017$	$\Phi 172.020$
B1 - B2 / 2	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001 5	0.002 5
A1	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.018$	$\Phi 170.015$	$\Phi 170.017$	$\Phi 170.022$
A2	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.018$	$\Phi 170.018$	$\Phi 170.020$
A1 - A2 / 2	0.00	0.000	0.001	0.001 5	0.000 5	0.001
B1	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.022$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.015$	$\Phi 170.016$	$\Phi 170.020$
B2	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.018$	$\Phi 170.015$	$\Phi 170.017$	$\Phi 170.022$
B1 - B2 / 2	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000 5	0.001
放置 15 天后从机体输出端向传动端排序缸孔						
A1	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.015$	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.015$
A2	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.017$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.018$
A1 - A2 / 2	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001 5
B1	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.015$	$\Phi 172.015$	$\Phi 172.014$	$\Phi 172.020$
B2	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.015$	$\Phi 172.018$	$\Phi 172.020$	$\Phi 172.015$
B1 - B2 / 2	0.000	0.001	0.000	0.001 5	0.003	0.0025
A1	$\Phi 170.015$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.018$	$\Phi 170.010$	$\Phi 170.016$	$\Phi 170.010$
A2	$\Phi 170.018$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.012$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.014$
A1 - A2 / 2	0.0015	0.000	0.001	0.001	0.0020	0.002
B1	$\Phi 170.010$	$\Phi 170.013$	$\Phi 170.012$	$\Phi 170.010$	$\Phi 170.010$	$\Phi 170.010$
B2	$\Phi 170.015$	$\Phi 170.020$	$\Phi 170.018$	$\Phi 170.010$	$\Phi 170.016$	$\Phi 170.010$
B1 - B2 / 2	0.0025	0.003 5	0.003	0.000	0.003	0.000

(下转第 54 页)

表 1 缸盖硬度与气阀硬度对应情况

缸号及缸盖号	阀	缸盖是否磨损	缸盖阀面硬度/HB	阀面硬度平均值/HB	磨损量/mm	阀与缸盖阀面硬度差/HB
14008#A3 (1501062)	国产阀	未磨损	235.5	354.6	0	119
14008#A3 (1501062)	国产阀	磨损	231.5	367.1	1.4	136
14008#A4 (进口缸盖)	国产阀	磨损	203.3	371.3	1.2	168
15002#A3 (1412084)	进口阀	磨损	204	359.5	0.34	156
15002#B6 (1501040)	进口阀	磨损	239	360	0.36	121
15002# B6 (1503071)	进口阀	磨损	239	351.5	0.10	113

试验用滑油为 CD30 (GB11122-2006), 按照 GB/T11122-2006 检测润滑油理化指标及 Na 含量, 并检测磨损金属的含量, 各项指标均满足标准要求。可以排除滑油油品问题是导致缸盖气阀座面异常磨损的原因。

3.3 试验验证

2015 年 10 月, 开始使用 MTU 公司指定的燃油添加剂, 按要求浓度加入燃油中, 经 5 台柴油机试验, 拆检气阀间隙均正常, 阀座异常磨损故障消除。

3.4 磨损机理及添加剂作用

在磨损开始阶段, 摩擦系数是主要因素。高摩擦系数使缸盖阀座与气阀接触面温度升高, 导致缸盖阀座表面磨损和舌状变形, 局部材料转移, 形成粘性磨损。

燃油中的 S 与添加剂在阀座表面形成‘摩擦突变层’, 燃烧时还会形成燃烧残余物, ‘摩擦突变层’和形成的燃烧残余物均能减小摩擦系数, 简称‘低摩擦系数的吸附层’, 其能隔离金属磨损

助剂, 并能避免材料转移, 可有效避免缸盖排气阀座的磨损。

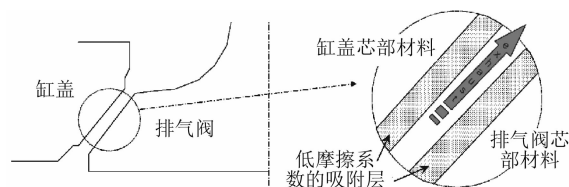


图 4 磨损机理示意图

4 结 论

综合分析, 燃油中硫含量过低, 尤其是对无硬化处理的该型柴油机阀座, 气阀反复拍击并伴随局部高温高压, 阀座与阀盘表面存在的微凸点从金属表面剥落, 并氧化形成更硬更耐磨的微颗粒, 这些微颗粒嵌入阀座表面, 进一步增加接触面的粗糙度, 加剧排气阀座磨损。

因此, 所用燃油不满足要求, 含硫量较低, 未添加抗磨剂是造成该型柴油机缸盖磨损的原因。

(上接第 46 页)

6 结 论

通过采用基于频谱谐波的振动时效技术, 不仅解决了柴油机机体微量变形的难题, 使产品质量得到了有效控制, 而且在保证生产周期的前提下节约了大量的人力和物力。目前该振动时效技术在公司所有型号柴油机的大型壳体件制造中得到了推广应用, 为企业创造了较大的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 覃敬, 闫普选, 黄天环, 等. 振动时效技术的应用与研究 [J]. 热加工工艺, 2013 (22): 9-12.
- [2] 陈具足. 振动时效工艺及应用 [J]. 金属热处理, 1992 (4): 52-53.
- [3] 赵新, 李斌. 振动时效技术在石油机械制造中的应用 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2007, 29 (3): 111-114.
- [4] 赵长喜. 频谱谐波振动时效消除应力技术的应用研究 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (4): 511-514.