热处理对曲轴生产过程及材料性能的影响

□ 上海大众动力总成有限公/许俊杰 邢韬

热处理不仅影响了曲轴的力学性能，也对生产过程造成了影响。生产过程中热处理前后的尺寸变化，热处理对刀具材料的要求以及热处理造成的裂纹，都是我们需要的关注的问题。就这些问题从原理上进行分析，找出问题的源头，并在过程中加以控制，从而保证零件的质量。

曲轴作为发动机系统中最为关键的零件之一，其在工作状态时同时受到弯曲载荷与扭转载荷及一定的冲击载荷，通常是在磨损与疲劳的状态下工作的。因此需要根据其材料采取相应的热处理措施，保证其在发动机中的正常工作。

本公司目前主要生产EA211型号为1.6MPI，1.4MPI及1.4TSI的小排量发动机。其中使用的曲轴主要分为铸件（材料为球墨铸铁）及锻件（材料为钢），涉及热处理程序为感应表面淬火及回火。相对于EA111采用圆角滚压来提高圆角处的疲劳强度，EA211采用感应淬火法来处理曲轴的圆角其疲劳强度更优于圆角滚压法。对轴颈面的热处理选用的是半圈式淬火感应器而轴头及法兰使用的是分和式淬火感应器。具体如图1和图2所示。

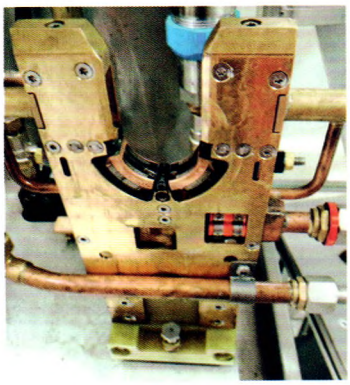


图1 轴径淬火感应器

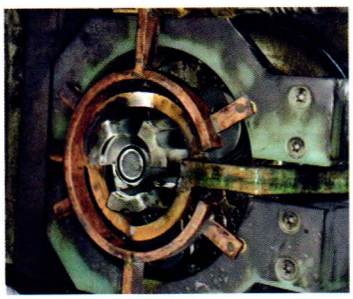


图2 轴头淬火感应器

众所周知，适当的热处理例如淬火过程可以有效地提高曲轴表面的硬度，强度及耐磨性，通过回火可以消除淬火时产生的内应力并且增加曲轴的韧性和强度。但是不正确的热处理过程会带来一系列的问题，影响曲轴的材料性能及机加工尺寸。同时某些不合格的机加工尺寸也会对热处理产生不良影响，两者是互相关联的。热处理对机加工的影响主要可以从三个方面来考虑，即：热处理对机加工尺寸产生的影响，热处理对材料性能产生的影响及热处理对机加工时使用的刀具产生的影响。只有从多个方面着手分析才能较为全面的了解热处理在曲轴机加工中的影响。以下主要针对铸铁曲轴做相关的论述。

热处理对机加工尺寸产生的影响

热处理对机加工尺寸产生的影响可以从曲轴轴向长度及曲轴圆跳动两方面来分析。

1.曲轴轴向长度

通常在制定工艺时为了保证在精加工后轴向长度的尺寸能满足图样的要求，会在粗加工阶段留下几丝或十几丝的余量，其中必须考虑到热处理的影响。

淬火时曲轴的金相结构由铁素体加珠光体转变为马氏体加残余奥氏体，其中马氏体的比体积大于珠光体，在淬火过程中晶格胀大，故零件的长度尺寸发生了变化。热处理造成的尺寸变形量是根据其所用的零件材料、所用的热处理方法、冷却介质等因素确定的。当前曲轴材料为球墨铸铁，所用热处理方法为感应淬火，冷却介质为聚合物淬火剂BW3。

从淬火前后的变形量来看，由于零件受热均匀故零件体积均匀膨胀，各工件轴向长度尺寸的变化基本一致。

当前使用的淬火感应器从Elotherm公司进口，额定使用寿命为40 000根。在淬火感应器达到或接近使用寿命极限时要注意零件的轴向尺寸，轴向尺寸超差不仅会造成后道工序加工困难，也会造成油道孔位置度的超差。另外经过长期的加工后设备状态也可能发生变化，例如曲轴线在油道孔位置度尺寸偏大后对比2014年10月工艺制定时的长度与2015年11月的实际加工长度发现主轴颈1及连杆颈1的轴向长度在淬火后有了偏差，故在AF40将连杆颈1的尺寸由原先的321.86mm改为321.92mm，主轴颈1的尺寸由原先的363.87mm改为363.93mm。更改后油道孔尺寸稳定在中差。故发现类似淬火后轴向长度变化的情况可通过对粗加工尺寸的调整来处理。

2.曲轴径向圆跳动

由于曲轴在发动机运行过程中的工况较为恶劣，从实际出发对主轴颈的径向圆跳动有着较高的要求。径向圆跳动过大会影响发动机的性能可能导致曲轴主轴瓦磨损及主轴颈磨损，并可能导致发动机噪声和抖动增大，进而会影响其它部件并导致严重磨损。

影响曲轴主轴颈径向圆跳动的主要因素有：曲轴应力释放造成的变形；机械外力作用下的曲轴变形；精加工定位误差造成的轴颈对定位基准的跳动超差。

工艺中对曲轴经过车削→铣削→淬火→回火后的主轴颈跳动要求分别如图3～图6所示。

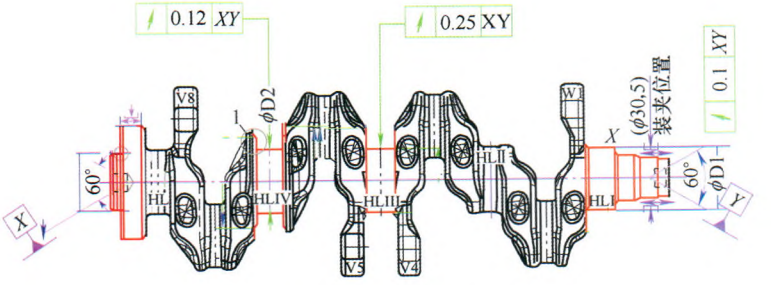


图3 车削后跳动要求

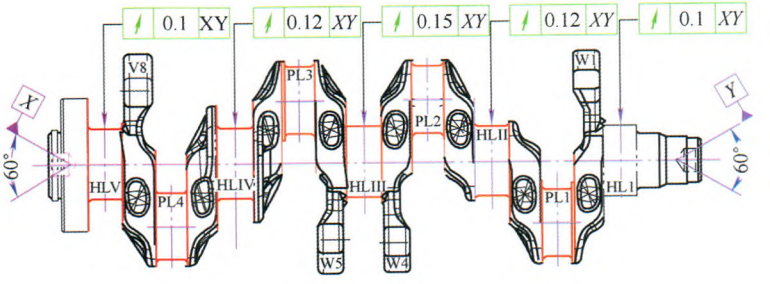


图4 铣削后跳动要求

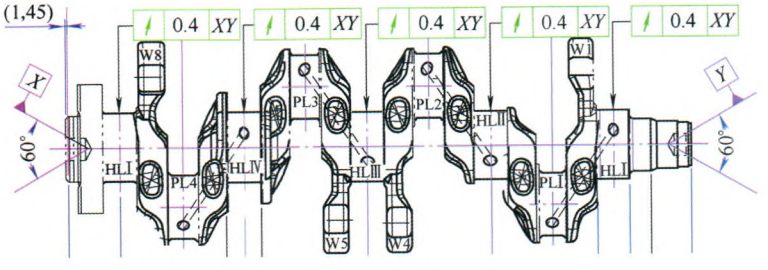


图5 淬火后跳动要求

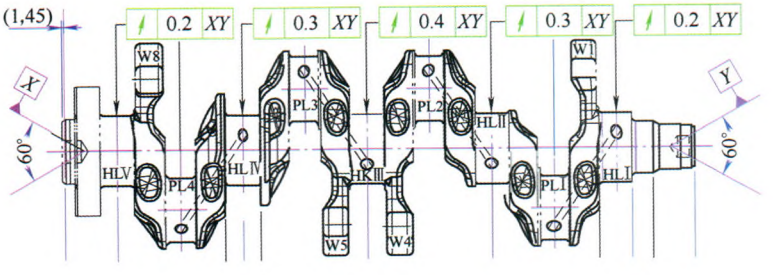


图6 回火后跳动要求

结合实际加工经验及工艺中的要求，可以看出，越靠近轴颈中心即主轴颈3的位置跳动越大，淬火后跳动增大，回火后跳动有所减小。这是由于曲轴轴身较长且自身质量较大在车削及铣削时受到尾架对中心孔施加的定位力在加工过程中发生了轴向上的挠性弯曲，因此径向圆跳动增大。在淬火过程中由于材料相变导致晶粒体积变化，曲轴产生内应力导致跳动增大，回火后内应力得到释放故跳动相应减小。

曲轴在各工位受力变形的方向如图7～图9所示，其中AF20，AF30的受力变形方向一致，若AF60即淬火时的变形方向与它们一致，那么变形量在同一方向累加这就导致了各档主轴颈尤其是靠近中心的主轴颈3变形量加大，进而导致跳动超差，为了避免这一情况应设法使AF60的变形量与其他工位相反。

淬火时不同区域的电压强度以及开始淬火的接通角度都是可以调节的，连杆的初始放置位置与AF20，30相同，都是连杆颈1,4向上，那么为了避免淬火变形量导致的变形累加，应尽量在曲轴旋转至相反位置时开始加热。故我们将曲轴的加热起始角度由60°更改至120°（见图10），更改后变形量减少，使用Q-das系统对主轴颈3的跳动进行分析查看单值进程图发现跳动基本小于0.4mm即公差的80%，故可认为长期加工中主轴颈3跳动合格且稳定（见图11）。

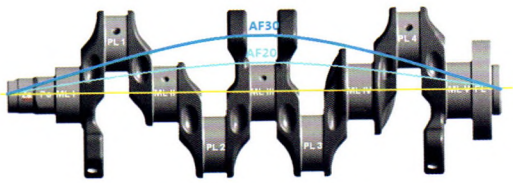


图7 AF20及30变形方向

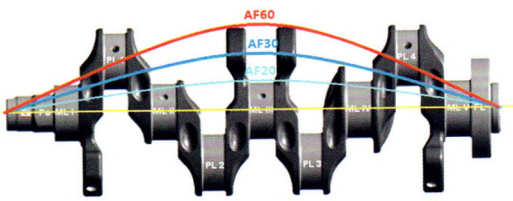


图8 变形量累加

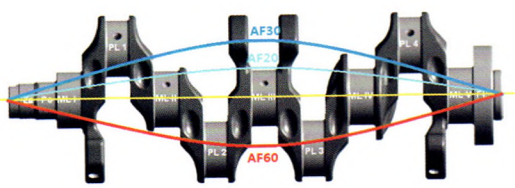


图9 变形量抵消

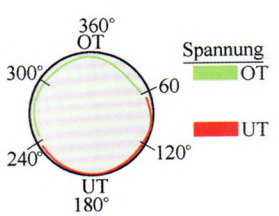


图10 淬火角度

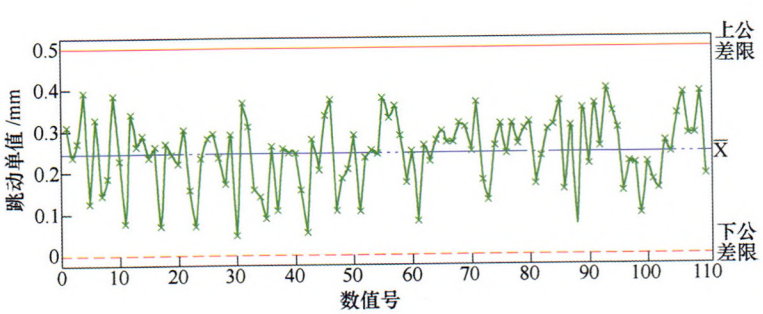


图11 跳动单值进程图

热处理对机加工刀具产生的影响

AF120工位曲轴大法兰处需要加工螺栓孔，加工顺序为先打底孔再切削螺纹，螺栓孔用于装配线安装飞轮时进行螺栓拧紧。其中底孔钻刀具材料为硬质合金钢，丝锥材料为高速钢。同一把底孔钻可以加工1.6MPI（铸件）和1.4TSI（锻件）曲轴。在加工中发现，同一把底孔钻可以正常加工1.6MPI的工件，但在加工1.4TSI工件时底孔钻发生了断裂。

法兰加工的尺寸要求及底孔钻规格如图12和图13。为了分析断刀原因，我们放慢了加工时的速度，以此找到断刀的时机，经过试验，我们发现底孔钻是在其加工行程走到底，在退刀的时刻发生断裂的。

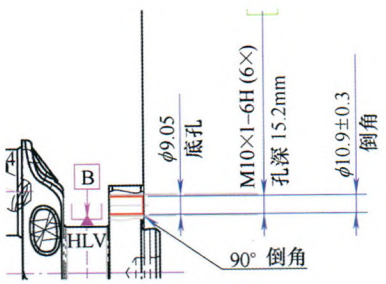


图12 法兰孔工艺要求

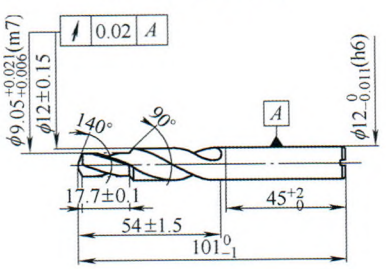


图13 底孔钻要求

对此我们需要分析在加工过程中钻头的受力情况，其计算公式为：

钻孔时的切削力

$F_f=309Df^{0.8}K_p$

式中 F_f——轴向切削力（N）；

D——钻头直径（mm）；

f——每转进给量（mm）；

K_p——修正系数，查表。

钻孔时的切削力矩$M=0.21D^2f^{0.8}K_p$

M——切削力矩（N·m）

D——钻头直径（mm）；

f——每转进给量（mm）；

K_p——修正系数，查表。

分析其原因，底孔钻材料为硬质合金钢，供应商为德国Guehring，经查询其硬度为1620[HV30]，按照主轴转速2460r/min，进给速度394mm/min，钻穿15.2mm约需要时间2.3s。根据公式，可以计算其所受切削力的力大小。

查表可得钢件和铸铁的修正系数分别为0.75和0.6，计算得每转进给量为f=0.16mm/r，故可以计算得出：

钢件：切削力F_f=484N，切削力矩M=2.98N·m。

铸铁：切削力F_f=387N，切削力矩M=2.38N·m。

由于在加工过程中其他参数没有发生变化，只有工件的材质及硬度发生了变化，故其应为事故的主要原因。

图14圆圈内为钻孔过程中涉及到的热处理区域。由图14可知，钻头断裂的位置正是在此区间内。由于使用的是相同的刀具并且工件加工尺寸相同，所以对于不同材料，单位切削力不同，而铸铁的单位切削力是小于钢件的。这即是导致加工钢件时刀具断裂的主要原因。

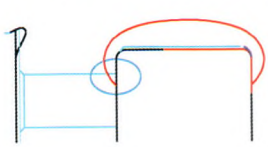


图14 钻孔涉及热处理区域

为了避免刀具的断裂，在不改变刀具材质的前提下我们考虑降低刀具断裂处的硬度。为此我们针对主轴颈5靠近法兰侧的淬火感应器进行了结构调整，使他的淬火区域避开了刀具断裂点处（见图15及16）。经实验淬火感应器调整后未发生过刀具断裂的现象。针对更改过的曲轴做脉冲实验与台架试验，曲轴脉冲实验合格且曲轴在发动机中运行正常。

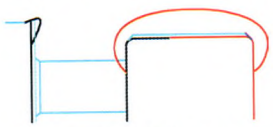


图15 淬火区域更改前

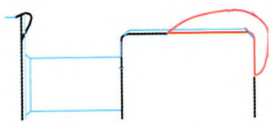


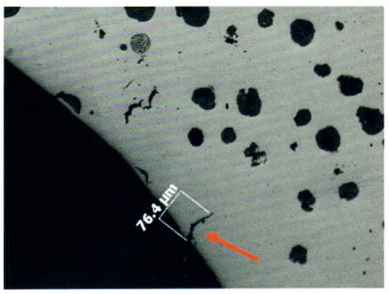
图16 淬火区域更改后

热处理对材料性能产生的影响

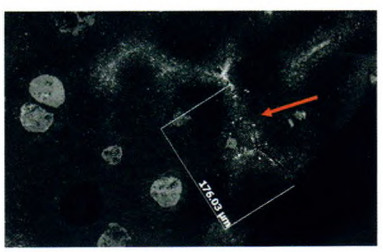
热处理过程中常会出现一些异常的工件，例如在热处理过程中设备报警导致机床停止运行而没有加工完毕的工件，或者由于后道机床损坏而不得不下料的工件。对于这种状态的工件是需要注意的，某些情况下这种工件可能带有缺陷。

通常淬火与回火的热处理步骤是连续进行的，淬火后应立即回火避免出现延迟裂纹。淬火后的零件，若长时间放置在室温环境下，可能导致延迟裂纹的产生。在生产线的加工过程中曾有数根工件因某些原因导致其放置在室温中超过8h以上。我们选取其中的一根工件送入实验室进行金相分析，结果发现了微观裂纹（见图17）。

淬火后的马氏体加残余奥氏体组织，是一种不稳定的组织，如果碰到适宜的条件，会随时发生转变，引起零件形状和尺寸的变化进而造成尺寸的不稳定。零件淬火后有较大的热应力和组织应力存在，如果不及时消除这些应力，就会进一步扩展。而这种应力又往往分布在尖角、缺口、孔眼等部位，形成应力集中。应力的集中和扩展，会



（a）裂纹图像（100倍）



（b）裂纹图像（200倍）

图 17

使零件变形和开裂，所以应当及时消除应力。因此为了稳定组织，稳定尺寸，及时消除内应力，避免变形和裂纹的产生；为了调整组织，使零件具有良好的加工性能和使用性能，就必须将淬火后的零件及时地进行回火。

实际生产中出现过未及时回火并在生产线检测合格直到送往装配线才发现淬火裂纹的例子（见图18）。

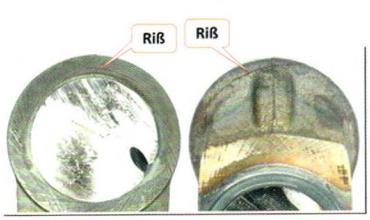


图18 裂纹图像

淬火后多长时间应该回火这应与材料本身的淬火特性有关，合金元素含量、零件尺寸、冷却速度都会影响淬火应力，淬火应力大则越要尽早回火避免开裂。另外室温不同对淬火与回火的时间间隔要求也不同，原则上室温越低越需要尽快回火。并且淬火介质不同，对时间间隔的要求也不同。油淬工件4h内应回火，而水淬火工件要求3h内回火，考虑就是水淬后工件硬度较高，产生的内应力较大。此外零件的结构形式不同对淬火与回火的时间间隔要求也不同，通常形状越复杂零件越应及时回火。就曲轴而言放置在空气中的时间不宜超过4h，否则就有出现淬火裂纹的风险。

但要注意过回火也是不行的。除了内应力释放材料膨胀导致的裂纹外，要考虑到由于工件同时受到冷却时向内收缩的内应力且这个力的方向与马氏体体积膨胀的内应力方向相反，故过度回火会变相提高冷缩导致的内应力进而造成裂纹，工件受力及裂纹图片如图19和图20所示。

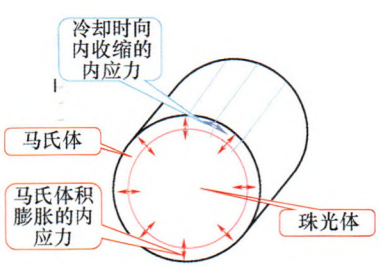


图19 工件受力

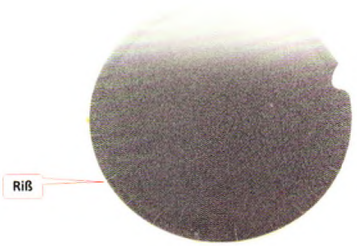
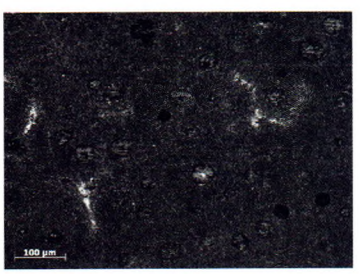


图20 裂纹图像

针对过回火我们在生产线做了相关的试验，回火时要求曲轴在330°的高温下保温至少128min。我们将数根曲轴在回火炉中保温超过6h，将其取出进行探伤并测量其硬度、深度及金相组织。回火后要求硬度为56±3HRC，实际测得硬度平均为54HRC，偏下差。探伤结果未发现裂纹。实验室挑选3处位置测量淬火层深及金相组织，结果深度合格，金相组织合格（见图21）。



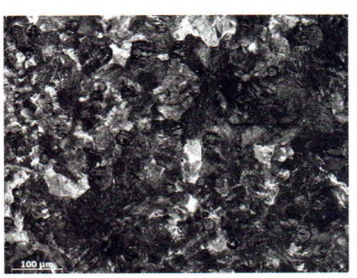


图21 金相组织

实际证明延长回火时间会导致硬度的下降，但控制在一定时间内可以保证淬硬深度及金相组织的合格。针对球墨铸铁曲轴，回火时间控制在6h以内可以保证零件的质量。

结语

本文通过曲轴实际生产过程中发现的与热处理有关的案例，从原理上着手分析其产生的原因及其对实际加工造成的影响，并提出相应的解决措施。争取从源头解决问题并在相应的过程中进行控制，避免问题的重复发生。AUTO1950