

半组合式船用低速柴油机曲轴红套研究

马志鸿, 余云岚

(上海船用曲轴有限公司, 上海 200245)

摘要: 从热能传递角度出发, 从理论上分析了影响曲轴红套质量的基本原因, 进而分析了实际生产中影响红套质量的因素, 并据此提出了改善曲轴红套质量的方法。

关键词: 低速柴油机; 曲轴; 红套; 热传递

中图分类号: TK423.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)05-0037-05

Shrunk Weld Technology for Half Built-up Crankshaft Used on Marine Low-speed Diesel Engine

Ma Zhihong, Yu Yunlan

(Shanghai Marine Crankshaft Co., Ltd., Shanghai 200245)

Abstract: The basic factors which influence the quality of crankshaft shrunk weld is analyzed theoretically from the respect of heat transfer. Then the factors influencing the quality of crankshaft shrunk weld in production are studied. And how to improve the quality is suggested based on the study.

Keywords: low-speed diesel engine; crankshaft; shrunk weld; heat transfer

1 半组合式船用低速柴油机曲轴介绍

船用柴油机曲轴主要分为低速和中高速两大类。船用低速柴油机主要应用于吨位为 5000 吨至数十万吨的大型船舶(如大型散货船、油轮以及各类集装箱船等)的主发动机, 是大型船舶的心脏。低速柴油机曲轴是船用低速柴油机中最核心的部件, 一般单根曲轴的长度为 5~15 m, 重量为 30~200 t, 少数重量达 300 t 以上的船用曲轴是由两根曲轴“串联”而成。

船用低速柴油机曲轴的材料为低碳钢锻件(碳含量<0.5%), 自身长度长, 重量大的特点, 决定了其不可能采用毛坯整体锻造成型方式, 而采用一种由若干零件组合成整轴, 称为半组合式曲轴。此种曲轴主要有四种零件组合而成, 分别为自由端轴颈(shaft piece with flange)、曲臂(crank shrow)、

主轴颈(shaft piece without flange)、输出端轴颈(shaft piece with thrust cam), 将输出端轴颈、自由端轴颈和主轴颈统称为轴颈。如图 1 所示。每根半组合式船用低速柴油机曲轴的四中零件中, 输出端轴颈、自由端轴颈均只有一个, 而曲臂和主轴颈的数量是不同的。图 1 中的曲轴型号为 MAN 7S60MC-C, 其有 7 个曲臂, 6 个主轴颈。将曲臂从前端的自由端(或后端的输出端)开始排序并编号, 则图 1 中的曲臂分别为 1#曲臂、2#曲臂、…、7#曲臂。

曲臂的结构比较复杂, 它有两个曲柄, 曲柄上的孔称为红套孔, 连接曲柄的称为曲柄销, 两个曲柄间的空间称为内开档(见图 2)。若一个曲臂被编号为 4#, 则靠近前端(F 端)的曲柄简称为 4F, 该柄上的红套孔为 4F 孔; A 端亦如此定义, 如图 1。

收稿日期: 2010-06-03

作者简介: 马志鸿, (1982-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为半组合式船用低速柴油机曲轴加工制造技术, E-mail: mazh@shanghai-electree.com。

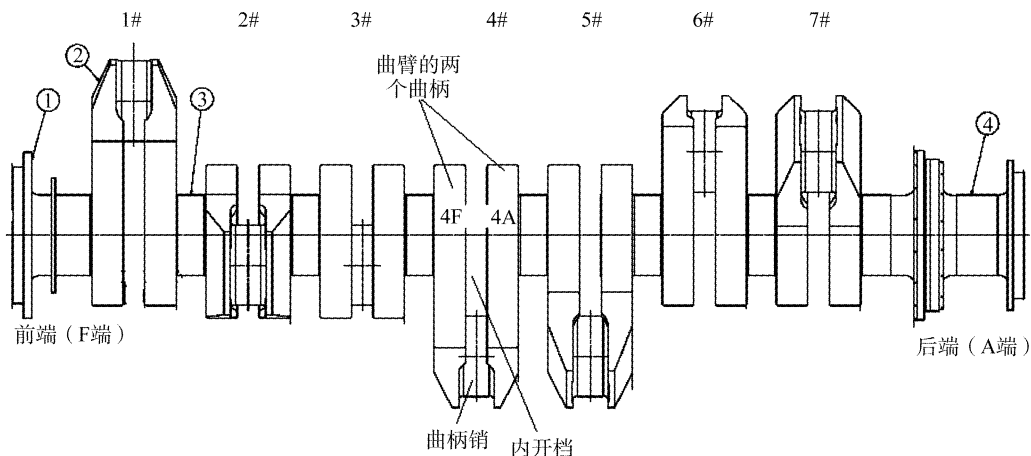


图 1 低速柴油机曲轴组成

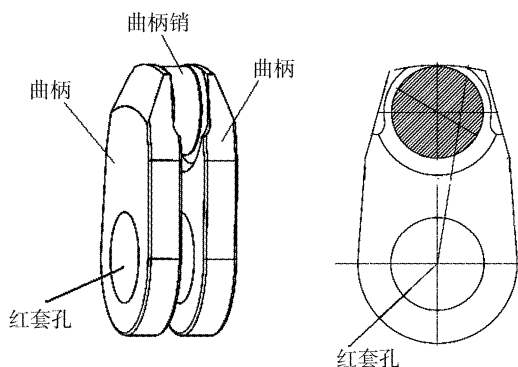


图 2 曲臂的结构

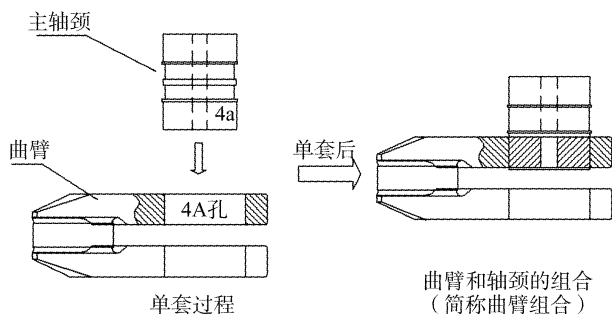


图 3 单套过程及单套后的曲臂组合

2 半组合式船用低速柴油机曲轴的红套

半组合式船用低速柴油机曲轴四种零件的组装是通过轴颈与曲臂的孔之间过盈配合完成的。过盈量视柴油机功率以及曲轴大小(即曲臂和轴颈的大小)而定,一般在 1.5~2.5 mm 之间。

一定程度的过盈装配一般使用冷装和热装两种方法。由于一般的半组合式船用低速柴油机曲轴轴径重量均在 2.5 t、外圆直径均在 $\Phi 600$ mm 以上,所以采用冷却轴径的冷装方法工艺上十分不便且效率低下。因此在通常情况下,装配曲轴零件都选用加热曲臂红套孔的热装方法,称曲轴零件的热装过程为曲轴红套或热套。目前加热方法主要有燃气加热和电磁感应加热两种。

一个主轴颈的两端分别套入两个曲臂的红套孔。一个主轴颈套入第一个红套孔的红套过程称为单套,单套后的曲臂和主轴颈则成为一个曲臂轴颈组合(简称为曲臂组合),如图 3。若曲臂红套孔为 4A 孔,则与之相对应的轴颈称为 4a。

一个曲臂组合的主轴颈套入另一个曲臂的红套孔的过程称为复套。由于自由端轴颈和输出端轴颈仅有一端需要红套,因此它们的红套都是单套。

3 红套质量对曲轴的重要影响

3.1 红套质量影响轴颈的伸出量

红套轴颈在内开档处露出的长度称为轴颈的伸出量,绝大部分曲轴伸出量的设计要求均为 0~1 mm。红套后,轴颈与曲臂的相对位置已经确定,则伸出量就已经确定,因此红套质量决定伸出量。

3.2 红套质量影响曲轴的长度

曲轴的设计要求:相邻曲臂间距的长度公差为 ± 1.5 mm(或 ± 1.0 mm),且曲轴总长公差也为 ± 1.5 mm(或 ± 1.0 mm)。红套后,相邻两个曲臂的相对位置即已确定,则其间距为固定值。因此在轴颈长度和曲臂厚度均按照设计要求制造的情况下,红套的质量对两曲臂间距和曲轴总长能否达到公差要求起到决定性作用。

3.3 红套质量影响曲轴的弯曲程度

理论上红套后轴颈母线应该与曲柄平面垂直,但由于刚套入红套孔的轴颈圆周方向没有办法限制其位移等原因,轴颈属于自由状态,所以很难实现轴颈母线与曲柄平面垂直。每次红套均产生一定的误差,一根曲轴其零件要经过多次的单套和逐次的复套,因此误差不断地积累,最终导致曲轴的直线度受到影响。曲轴的弯曲度过大,会导致曲轴后续加工难度增大,加工效率降低,甚至造成曲轴部分

零件报废。

在实际生产制造中, 以上这些影响往往不是独立的, 而是相互作用的。在不考虑曲轴零件尺寸影响的情况下, 即假定曲轴零件均完全按照设计要求制造, 由于轴颈的母线与曲柄平面不垂直, 必然会造成同一个轴颈伸出量在圆周上不同点的数值不同; 伸出量不同则造成相邻曲臂间的轴颈长度不同, 伸出量会出现局部超差现象; 同时曲臂间距不同且相邻两曲臂的曲柄平面不平行, 造成曲轴长度超差且曲轴弯曲度较大。因此控制红套质量对于曲轴制造是非常重要的。

若想控制红套质量, 必须先分析红套过程中曲轴零件, 即曲臂与轴颈的变化情况。

4 红套过程中曲臂与轴颈的变化

一般的红套分为三个过程, 先将曲臂放置在水平平台上, 加热上曲柄至预定的温度(该温度由过盈量和轴颈尺寸决定), 然后将轴颈套入红套孔; 曲柄冷却将轴颈“锁紧”; 最后曲臂继续冷却至室温。实际制造中为便于调节伸出量, 在制造主轴颈时增加两个工艺台阶, 并在红套时通过均匀放置数块等高垫铁调节。

在整个红套过程中, 曲臂和轴颈经历了一个复杂的热传递和热变形过程。

4.1 轴颈外圆与红套孔内壁接触前的变化

图 4 为红套时, 轴颈刚套入曲臂红套孔的瞬时状态, 此时曲柄已完成加热膨胀过程。由于曲臂处于高温状态, 曲柄的红套孔直径要比轴颈外圆大, 即 $\Phi_{孔} > \Phi_{轴}$; 一般情况下, 曲柄的厚度比轴颈套入处长度要大, 即 $D > L$ 。此时, 轴颈温度仍为室温, 曲柄温度高于轴颈温度, 曲柄向轴颈进行热传递, 即热能先通过空气从曲柄传递到轴颈。

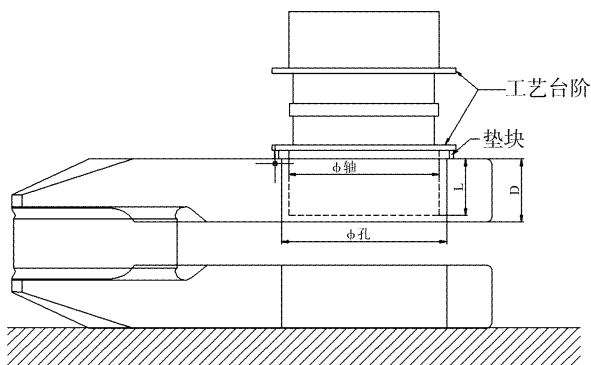


图 4

曲柄温度高于环境温度, 因此一直向外界输出热能, 温度不断地下降, 进而发生收缩变形; 轴颈接受到曲柄传递的热能, 温度升高, 因此轴颈发生膨胀变形, 如图 5。轴颈的径向膨胀和红套孔径向

收缩使轴颈外圆与红套孔内壁逐渐接近。

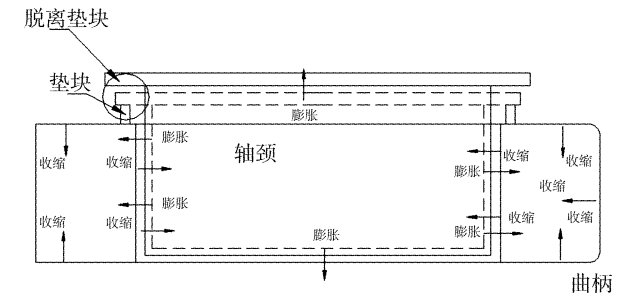


图 5

等高垫块在曲柄加热后轴颈套入前就已经放置在曲柄上, 并且其温度在极短的时间内升至与曲柄相同, 因此可将等高垫块与曲柄视为一体。如图 5 所示, 由于轴颈在轴向发生膨胀, 同时曲柄竖直方向收缩, 因此在某一瞬时, 工艺台阶脱离垫铁, 但轴颈在自身重力的作用下下落, 使台阶重新落到垫铁上, 整体上可将轴颈轴向膨胀完全看作单方向向下的膨胀, 而曲柄也是单方向向上收缩。表面上看, 轴径好像向下“变长”了。

4.2 轴颈与红套孔接触至“锁紧”过程中的变化

轴颈外圆与红套孔内壁逐渐接近到接触时, 曲柄的温度仍远高于轴颈的温度, 因此曲柄仍然向轴颈传递热能, 轴颈有径向膨胀趋势, 红套孔有径向收缩趋势, 所以在垂直于接触面方向上产生了相互挤压的应力, 同时在接触面上产生克服轴颈重力的摩擦力。当在接触面上的摩擦力等于轴颈重力时, 称为曲臂与轴颈间“锁紧”, 如图 6。

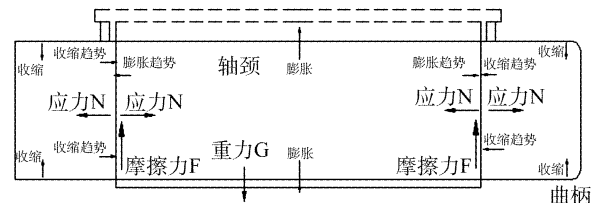


图 6

轴颈接触红套孔后, 曲柄上的热能不再通过空气而是通过轴颈的表面直接进行传递。轴颈从开始接触红套孔到锁紧状态的过程是非常短暂的。从接触到锁紧前, 工艺台阶依然与垫铁接触, 轴颈与曲柄的形变情况与轴颈接触红套孔前相似。根据导热定律: 傅立叶定律 $\delta Q = -\lambda \delta S \frac{\partial t}{\partial d}$, 导热速率 δQ 与导热系数 λ 、导热面积 δS 、和温度梯度 $\frac{\partial t}{\partial d}$ 成正比 ($-$ 表示导热相向, 即热传递方向与温度梯度方向相反)。在接触的瞬时, 热传导的导体相同, 即导热系数 λ 相同, 且接触面积, 即导热面积 δS 也相同, 所以导热速率 δQ 与温度梯度 $\frac{\partial t}{\partial d}$ 成正比。对于

厚度足够小(即厚度趋近于 0)的轴颈接触表面,红套孔与曲轴表面的温度梯度 $\frac{\partial t}{\partial d}$ 趋近于无穷大,因此导热速率 δQ 趋近于无穷大,那么轴颈与红套孔的接触面在无限小的时间内达到相同的温度,即轴颈的接触表面与红套孔内壁每一个瞬时都处于热平衡状态。因此轴颈接触表面与红套孔内壁同步放热收缩,那么应力 N 将不会减小,所以一旦轴径达到锁紧状态后将一直处于锁紧状态。轴径非接触表面与轴颈内部仍处于受热膨胀趋势。

4.3 轴颈“锁紧”后至红套结束过程中的变化

当曲柄和轴颈的温度都等于室温的时候,标志着整个红套过程的热能传递结束了。从轴颈“缩紧”直至红套结束的过程中,轴颈先经过受热膨胀,当轴颈温度等于曲柄温度时,开始放热收缩;曲柄始终处于放热收缩,直至两者温度等于室温。

当不考虑中间过程,实际上曲柄从温度 $T_{\text{曲柄}}$ 降至室温 t ,轴颈从温度 $T_{\text{轴颈}}$ 降至室温 t 。因为 $T_{\text{曲柄}} > T_{\text{轴颈}} > t$,所以曲柄与轴颈都是一个放热收缩的状态。由于曲柄的温度变化量 $\Delta T_{\text{曲柄}}$ 大于轴颈温度变化量 $\Delta T_{\text{轴颈}}$,并且金属热形变量与温度变化量成正比关系,因此曲柄的收缩量比轴径收缩量大。由于轴径始终处于“锁紧”状态,所以轴颈上的工艺台阶脱离等高垫铁,出现间隙,同时伸出量也变大了。表面上好像轴径向上、向下都“变长”了。

5 实际生产中影响红套的因素

上述从理论角度分析了红套过程中,三个重要节点状态的曲轴零件变化情况以及变化的原因。而在实际生产制造中,很难达到理论状态,仍然有很多因素对整个红套质量产生不利影响。

因为红套过程中,加热曲臂的目的是为了让红套孔胀大,因此一般的红套加热过程都以红套孔为加热的中心,因此可认为在加热过程中,图 7 中曲柄的 A、B、C、D 侧接受的热能相同。

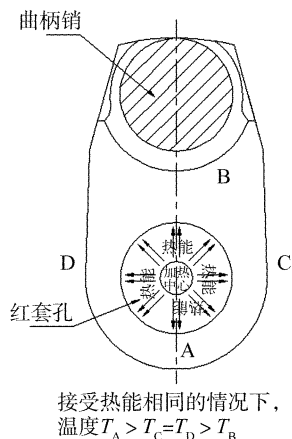


图 7

5.1 曲柄不规则形变

如图 7 所示,由于曲柄的几何形状不规则,A 侧的受热体积明显小于 B 侧,因此在接受到相同热能的情况下,A 侧比 B 侧的温度要高,但 C 侧与 D 侧的温度相差不大,即具体的温度分布应该为 $T_A > T_C = T_D > T_B$ (越靠近曲柄销的区域温度越低),因此会出现形变 A > 形变 C = 形变 D > 形变 B。

在图 8 中,曲柄受热后发生膨胀形变,但由于温度不均,致使 $L_1 < L_2 < L_3$,而且曲柄上表面不再是平面,而是呈凹面;同时,内开档也出现类似曲柄的变化,造成曲柄由加热前形态 a 经形态 b 最后变成形态 c,出现“抬头”现象。

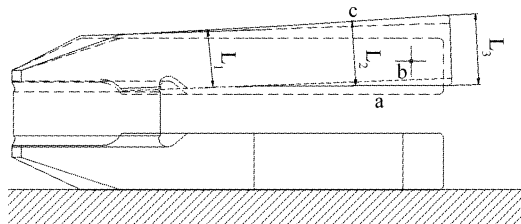


图 8

红套时由于曲柄上表面呈凹形,使放置在曲柄上平面的等高垫铁构成的平面不可能与曲柄上平面平行,导致当轴颈工艺台阶放在垫铁上时,轴颈的母线不与曲柄上平面垂直,造成角度误差。虽然在曲柄冷却至室温时,曲柄发生的形变会恢复,但正如前面介绍的,曲柄温度还没有恢复室温时,轴颈已经被“锁紧”,因此这个误差在曲柄冷却后仍不能消除。

由于红套时,轴颈只能在重力的作用下垂直下落,但由于曲柄出现“抬头”现象,因此在轴径下落过程中,很容易将红套孔 a、b 两个区域表面损坏(见图 9),甚至在红套孔内壁上“撞”出凹坑,并使轴径卡住。

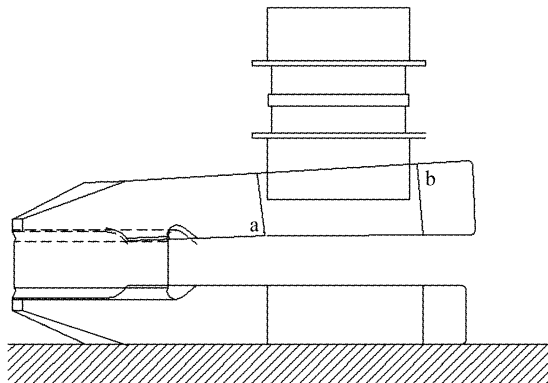


图 9

5.2 加热后红套孔的不规则形变

与曲柄出现“抬头”现象的原因类似,由于曲柄加热后,温度分布不均,加热后的红套孔就会

呈现不规则圆形。在图 10 中, 圆 a(虚线) 为加热前红套孔形状, 由于 $T_A > T_C = T_D > T_B$, 则加热后红套孔不会成为圆 b(虚线) 而会成为非规则圆 c(实线), 且加热后的红套孔在 M 点处形变最小, N 点处形变最大。

设计要求曲臂上两个红套孔的同心度一般为 0.03。而红套时, 当轴颈套入红套孔后, 轴颈的中心线很难与加热后的红套孔中心线重合, 这会使与同一个曲臂红套的两个轴颈的中心线不重合。一根曲轴由数个曲臂组成, 若均出现这种情况, 将会影响曲轴的直线度, 造成曲轴弯曲。

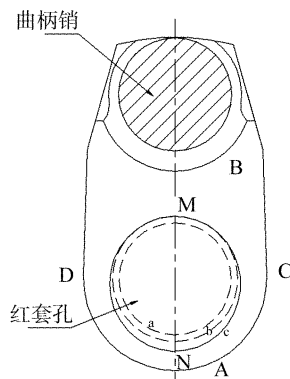


图 10

5.3 轴颈与红套孔内壁的不完全接触

由于红套时, 很难在轴颈的径向方向上对其的位置进行限制, 因而轴颈在红套孔中的位置无法固定, 即轴颈套入红套时(未接触红套孔前), 轴颈与红套孔内壁的距离很难控制。若图 11 轴颈在红套孔内的位置, A 侧距离大于 B 侧距离, $L_A > L_B$, 当不考虑 A、B 两侧温度差别时, 根据傅立叶定律 $\delta Q = -\lambda \delta S \frac{\partial t}{\partial d}$, B 侧轴颈吸收热量的速率比 A 侧轴颈快, 所以 B 侧温度上升速率比 A 侧快, 因此 B 侧膨胀速度比 A 侧快, 那么轴颈 B 侧接触到红套孔内壁的瞬间, A 侧尚未接触, 此时称轴颈与红套孔内壁不完全接触, 假设先后接触的时间差为 t 。因为轴颈表面接触红套孔后每一时刻, 轴颈表面都与红套孔内壁达到热平衡(本文 4.2 中已经说明), 因此可近似地理解为曲柄上的热能通过轴颈表面传递到轴颈与红套孔的较近的非接触区域内的点 a、b(假设 a、b 两点相对于曲柄上表面的距离相等)。因此在接触时间差 t 内, b 通过媒介铁吸收热能, 而 a 通过媒介空气吸收热能。由于相同环境下, 铁的导热系数是空气的数百倍, 因此在时间 t 内, b 点吸收的热能要远高于 a, 那么 b 点的温度要高于 a 点的温度, 同样, b 附近区域的温度 T_b 高于与之对应的 a 附近区域的温度 T_a 。但轴颈缩紧前 a、b 两点相对于曲柄的距离不变(前文已经论证过)。

轴颈接触红套孔后很短的时间内达到缩紧状态, 这时 $T_b > T_a$ 。由于轴颈已经进入缩紧状态, 因此轴颈在垂直方向上不会发生相对于曲柄的位移, 那么当轴颈与曲柄都冷却至室温时, 轴颈 b 附近区域的温度变化量 ΔT_b 大于 a 附近区域的温度变化量 ΔT_a , 因此, b 附近区域的收缩形变量大于 a 附近区域的收缩形变量, 所以轴颈总体表现出向 B 侧倾斜。



图 11

所以, 造成轴颈倾斜的根本原因是轴颈与红套孔内壁的不完全接触。

6 削弱红套过程中不利影响的措施

根据前面分析, 影响曲轴红套质量的不利因素主要有: 曲臂和红套孔的不规则形变以及轴颈与红套孔内壁的不完全接触。理论上是无法彻底消除这些不利影响的, 但可以采取一系列的办法削弱影响。可以运用有限元分析软件分析曲臂和红套孔的不规则形变, 针对某一些型号的曲轴寻找一定的形变与温度(或加热过程的升温曲线)的规律, 从而达到通过控制温度调整红套误差角度的目的; 进而综合考虑一根曲轴完整的数次红套过程, 借调每次红套误差的角度, 从而削弱不利影响。另外可以设计工装辅具, 限制轴颈红套时的自由度, 最大程度减小轴颈与红套孔内壁不完全接触的面积。

7 结束语

我国涉入船用低速柴油机曲轴制造领域较晚, 制造技术还不成熟。在我国大力发展造船产业的今天, 船用曲轴也逐渐被人熟悉和重视。曲轴的红套是整个半组合式船用曲轴制造过程中不容忽视的重要环节之一, 希望本文能为从事曲轴制造技术研究的人员提供解决问题的思路。

参考文献

- [1] 虚拟仿真在船用大型柴油机曲轴红套中的应用[J]. 上海电气学报, 2004(2).
- [2] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] MAN 质量控制标准 0743168-6.2[R].