

241~269HBW，超声波探伤要求达到Ⅱ级。曲轴加工精度要求高，主轴从左至右外圆尺寸及其相应的表面粗糙度值分别为： $\phi 450^{+0.53}_{+0.49}$ mm， $Ra=3.2\mu\text{m}$ ； $\phi 480^{+0.173}_{+0.132}$ mm， $Ra=1.6\mu\text{m}$ ； $\phi 500^{+0.070}_{+0.026}$ mm， $Ra=3.2\mu\text{m}$ 。主轴与拐轴平行度 $<0.1\text{mm}$ ，主轴同轴度 $<0.1\text{mm}$ 。

3 加工难点

现有机床加工曲轴过程中，曲轴回转直径接近卧式车床卡盘最大回转直径，曲拐轴与主轴偏心距离大，达到 (610 ± 0.05) mm，旋转处于不平衡状态，需要进行配重。由于装夹安全性差，车床转速低，刀杆伸出长，不便对刀，所以难以保证图样尺寸、表面粗糙度及位置精度要求。轴外圆与曲柄内孔为过盈配合，过盈量0.7mm，装配间隙0.7mm，实际需要曲柄内孔热胀1.4mm，要对曲柄内孔进行红套热装。由于曲柄壁厚不均匀，热胀冷缩会使其发生变形，影响加工精度，因此加工装配过程控制曲柄的热变形显得尤为重要。热装前轴的尺寸全部加工至达到图样要求，为保证装配精度，需对曲柄孔局部加热，而不能将曲轴整体加热，因此必须选用合适的加热方式。由于曲轴制造过程中需要经过多道装配和镗孔工序，反复加热和起吊容易产生变形和累积误差，影响曲轴精度，所以控制曲柄的装配精度同样重要。

4 工艺制定

设备加工过程中出现加工误差流的传递和叠加问题，可利用泰勒公式级数展开及长期的加工经验，通过各工序产生的尺寸误差建立误差间的参数方程，建立制造过程产生加工误差流的因素回归模型，对其进行优化以消除误差。通过线性插补的计算方法，可得出误差理论值与误差预算值之间的偏离趋势，对其进行优化拟合，以此消除对机械加工过程产生的误差。本工艺采取分段加工组合装配的方式，即曲轴热装前，在卧式车床上将所有拐轴、主轴全部加工至达到图样要求；在普通镗床上将部分曲柄内孔加工至达到图样要求，另外部分曲柄内孔直径留余量；多次红套装配，将另外部分曲柄内孔加工至达到图样要求。由于曲柄孔若采用燃气加热，容易造成加热表面积炭和严重氧化，同时污染车间环境，因此选择电阻式履带电热板加热法，该

法操作方便，便于温度控制，并且加热板可以在曲柄上灵活放置，容易达到对称加热。曲柄孔加热时外面用石棉板覆盖，防止热量散失。热装后，用石棉板进行保温，缓慢冷却，防止产生应力及变形。为了防止冷却过程中收缩产生变形，制作专用工装，在轴端增加压盖，保证曲柄与轴台阶定位贴紧，可在曲柄适当位置用重物压住，防止装配过程变形。

5 装配方案

制定曲轴的具体加工工艺路线如下：铸锻毛坯→粗加工→探伤→热处理→探伤→半精加工→精加工→装配→精加工（组合）→总装配→检测。

为实现加工工艺路线，工艺方案实施前需准备及制作装配平台、专用胎具、测量及装配工具。将装配基准平台平面加工精铣，平台底部垫斜铁，调整平台高度，用水平仪找平平台达到要求精度。为了防止轴热装入曲柄后冷却收缩，必须制作工艺压盖，待轴和曲柄热装后用压盖将其压紧。为防止热装过程曲柄水平方向发生位移造成偏差，需要使用方箱等重物压紧以防止曲柄位移。作为热装难点的曲柄孔，使用局部加热的专用履带电热板（见图2）和支撑工具。制备过程需准备千斤顶、百分表及框式水平仪等检测工具，这些仪器配合使用，以调平主轴和拐轴；此外需要拉杆、压板、起吊环和螺栓等工具，用于起吊、压紧曲柄。

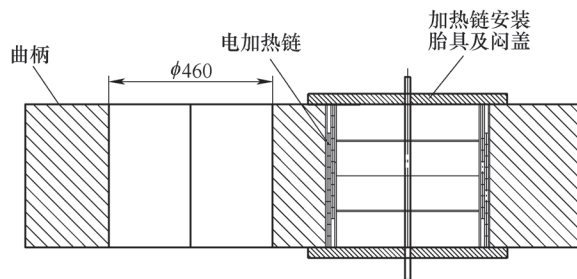


图2 专用履带电热板

曲轴装配详细工艺路线如图3所示。①组合一的装配。曲柄垫等高垫块，找正、垫平、平放曲柄于平台上，加热4#曲柄主轴内孔，测量杆检测其尺寸至合格，将5#主轴竖装到孔内；依主轴自重，使轴肩与曲柄端面贴紧，冷却至室温，再将4#曲柄基准面垫基准块侧立，找正，前后焊接挡块定位，端面压盖螺栓拉紧。之后，加热6#曲柄主轴内孔，测量

杆检测合格后，将其水平装入5[#]主轴上，再将端面压盖螺栓拉紧，压板压紧，冷却至室温。将组合一整体上镗床，按5[#]轴外圆及曲柄侧面基准面找正，分别镗4[#]、6[#]曲柄拐轴内孔至达到图样精度要求。需要注意的是，4[#]曲柄侧立找正后，其前后左右各方向要用焊接挡块固定。为防止曲柄在热装后位置有窜动，在其缓慢冷却过程中，用压盖和螺栓压紧4[#]、6[#]主轴端面。②进行组合二、组合三的装配。3[#]、7[#]拐轴竖立在平台上，将轴承加热，装到拐轴上，依轴承自重，端面与轴肩贴近，缓慢冷却至室温。使用加热的工装对4[#]、6[#]内孔均匀加热，外部覆盖石棉保温。测量杆检测合格后，将拐轴和轴承整体水平装到对应的曲柄上，用千斤顶调整3[#]和7[#]拐轴水平，防止冷却的过程中因拐轴自重致使拐轴下挠。同样，为防止曲轴在冷却过程中轴向窜动和径向扭转，用压盖和螺栓压紧4[#]、6[#]拐轴内侧端面。③进行组合四、组合五的装配。分别将组合一、组合二、组合三及2[#]、8[#]曲柄装配在一起。加热2[#]、8[#]曲柄拐轴内孔，检测内孔尺寸合格后，将2[#]、8[#]曲柄装入，用端面压盖螺栓把紧。用方箱压紧2[#]和8[#]曲柄，防止曲柄冷却过程中，相对拐轴轴向移动和径向转动。待缓慢冷却至室温，将组合一、组合二、组合三、组合四和组合五整体上镗床，分别镗曲柄2[#]、8[#]主轴内孔至达到图样精度要求。④进行组合六、组合七的总装配。分别加热2[#]和8[#]曲柄的主轴内孔，检测合格后，将1[#]轴和9[#]轴水平装配至达到图样要求，内侧端面压盖、螺栓拉紧，外端用千斤顶调平主轴，待冷却后整体起吊至龙门

铣床，检测各尺寸精度，直至整套设备符合图样要求。

为了给曲轴确定合理的热装温度，根据公式 $t_n = (\Delta_1 + \Delta_2) / (\alpha d_f) + t$ ，其中 t_n 为拐轴与曲柄配合热装时加热的理论温度； Δ_1 为过盈量； Δ_2 为热装最小间隙； α 为热膨胀系数； d_f 为拐轴与曲柄装配时，配合的轴与孔的公称直径； t 为室温。由过盈量 $\Delta_1=0.7\text{mm}$ 、热装最小间隙 $\Delta_2=0.68\text{mm}$ ，可计算出拐轴与曲柄配合热装时的加热温度为328℃。

组合件合套装配时，依据曲轴零件之间的相互位置，在组合件端面上划十字中心线，热装时要求中心线必须对齐。加热过程中，在轴承外面用石棉与履带链隔开，防止轴承升至较高的温度。仔细核对配合件根部圆角、端面倒角，相关尺寸精度和位置精度不相互干涉，之后进行热装，复查配合尺寸，不允许有任何失误。装配过程中，组合一的主轴与曲柄装配采用曲轴立式放置，便于起吊装配；零件依靠自重，使曲柄与轴台阶面自动贴合压紧。其余各组合部分采用曲柄竖直，依次从中间向两边水平装配，并使用方箱、螺杆和压板紧固，挡块固定，以减小累积误差。

6 结束语

采用组合装配分段加工方式，将大型零件加工转换为小型零件加工；将复杂的曲轴车削加工转化为简单的镗床加工；曲柄内孔留工艺余量，装配后加工，修正了装配累积误差，使得曲轴整体精度得到保证；基准统一，保证了装配精度；用履带电热板加热，便于温度控制，并且加热板可以在曲柄上

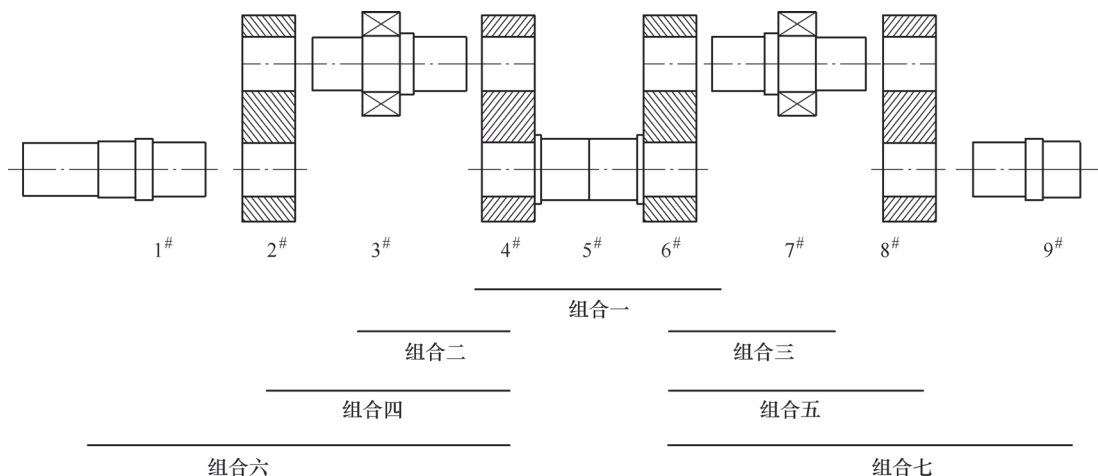


图3 曲轴装配详细工艺路线

灵活放置, 容易达到对称加热, 较好地控制加热引起的零件变形。

大型组合式曲轴的工艺研究, 使组合式曲轴加工不再依赖于曲轴专用机床, 为组合曲轴加工解决了一个关键难题, 不仅降低了制造成本, 缩短了制造周期, 而且提高了大型冷轧管机产品的市场竞争力。

参考文献:

- [1] 甄雪松. 普通机床加工误差分析[J]. 现代制造技术与装备, 2016 (2): 134-135.
- [2] 杨红娟. 大型正向前上料短行程铝挤压机液压系统[J]. 重型机械, 2020 (1): 1-7.
- [3] 李杨. 航空发动机叶片加工变形控制方法[J]. 科技创新与应用, 2020 (8): 106-107.
- [4] 林磊. 机械制造加工工艺合理化的机械设计制造分析[J]. 机械装备研发, 2020 (2): 135-136.
- [5] 曹旺萍. 基于UG NX的奖杯零件多轴数控加工[J]. 工艺与技术, 2020 (5): 62-63.
- [6] 刘小勇. 难加工材料大深径比微小孔高效加工技术研究[J]. 航天制造技术, 2020 (1): 38-41.
- [7] 张敏. 大口径周期轧管机组的发展现状与生产应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2017 (8): 31-35.
- [8] 郑国强. 新型周期式轧管机组[J]. 山西冶金, 2013 (3): 70-72.
- [9] 徐迎春. 大直径皮尔格轧管机组喂料器的设计与开发[J]. 冶金设备, 2009 (2): 79-80.
- [10] 李麒麟. 通用机床加工大型单拐曲轴的工艺分析[J]. 现代冶金, 2018 (3): 48-50.
- [11] 成海涛. 轧管工艺技术[J]. 热轧无缝钢管实用技术, 2020 (1): 77-83.
- [12] 李长穆. 国内外无缝钢管生产发展综述[J]. 钢管, 1988 (2): 51-59.
- [13] 曹国英. 机械制造过程中的热处理工艺分析[J]. 机电技术应用, 2019 (10): 149.
- [14] 李淑娟. 多工序公差综合优化方法的研究[J]. 西安理工大学学报, 2020 (16): 88-91.
- [15] 徐玉山. 修配法解装配尺寸链的简易计算[J]. 西安矿业学院学报, 1995 (6): 152-156.
- [16] 张磊. 基于半参数回归模型的制造过程加工误差流建模与分析[J]. 机械工程学报, 2013 (8): 180-185.
- [17] 李豪杰. 火炮膛线缠角误差对空炸引信定距精度影响及补偿方法[J]. 北京理工大学学报, 2018 (4): 371-375.
- [18] 曹杰. 基于制造公差的复杂机械产品精准选配方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019 (3): 1-13.
- [19] 蒋平. 多工序制造过程加工误差的传播分析和控制[J]. 数学的实践与认识, 2013 (10): 124-129.
- [20] 赵岩. 持续运行下机械加工制造的综合误差控制技术[J]. 机械设计与制造工程, 2018 (9): 100-104.
- [21] 郭庆荣. 硬质合金圆孔拉线模镶套过盈量计算及模套外径尺寸的确定[J]. 电线电缆, 1991 (4): 54-60.

MW 20210819

专家点评



本例中的曲轴制造工艺, 采用组合装配、分段加工方式, 将复杂的曲轴整体加工转换为简单的零件加工; 曲轴热装前, 在卧式车床上将所有拐轴、主轴加工至达到图样要求; 在普通镗床上将部分曲柄内孔加工至达到图样要求, 部分曲柄内孔留有余量; 自中心向两端循序渐进, 红套装配后, 再加工曲柄内孔至达到图样要求。依次修正装配中的热变形和累积误差。

文章结构严谨、图文清晰, 具有创新性和实用性。工艺方案的改进切实可行地解决了大型曲轴加工的关键难题, 降低了制造成本。