

机械加工工艺成本最优化方案分析

张学功
(天津久荣工业技术有限公司 天津 300380)

摘要: 编制机械加工工艺既要考虑成本低,又要保证加工顺利达标是评判工艺成本的一个重要标志,不论是首次编制工艺,还是对已有工艺进行调整都是如此。而实现机械加工工艺成本最优化目标的重点体现在如何保证第一次实施编制的工艺便能实现成本低而质量优的效果。现通过实例进行说明。

关键词: 机械加工; 工艺成本; 优化; 线切割; 偏心; 曲轴

0 引言

机械制造加工企业的规模参差不齐,每个企业投入的实际成本也是天壤之别,有实力的企业注重使用高端的现代化设备,操作人员素质要求高,成本投入大,加工质量及稳定性高,这样的企业普通设备相对较少,甚至是没有;一般实力的企业注重使用普通设备,操作人员素质要求一般,高端设备相对较少,甚至是没有,成本投入少,质量不稳定的因素多。各企业虽实力不同,但对成本的要求都是一致的,那就是通过适合本企业最优化的工艺,来实现低成本、加工省时省力保质优的目的。

编制机械加工工艺要综合考虑多种因素,每种因素都要与当下企业的特点保持一致所编制的工艺才会具有可行性,这些因素包括:设备、原材料、人员、通用工艺、基准、工序集中与分散、热处理、工装卡具、刀具、量具及测量方法、环境、零件转序、包装、存储、运输等对零件质量及成本有影响的因素。

机械加工可行性工艺可能有多种方案,经过分析对比来确认最优化的工艺方案是本文通过实例进行论述的重点。

1 巧用线切割

1.1 平面加工

审图: 零件的加工精度一般,各面形状复杂、变化多样,尺寸较小。

工艺分析: 此件用普通立铣或线切割机床加工都可以。若选用立铣加工,零件六面形状的尺寸变化较大,加工余量大,1件毛坯对应加工1件成活,找正装卡次数及更换刀具频繁,费时费力。若选用线切割,可选用1件16×25×47规格的毛坯切割2件成活,经两次装卡便可完成整个零件外轮廓的加工,找正装卡及加工过程比立铣简单可靠。

核心工艺: 选用线切割机床加工外轮廓。

核心工艺流程: 在线切割机床上用吸铁石吸住16×25×47毛坯25的一侧→切割主视图外轮廓,其中全长42右端面切割至44尺寸→同样形状可连续切割第二件→用吸铁石吸住44右端面→切割俯视图外轮廓尺寸及全长42右端面成。

工艺路线: 备料(2件联体)→球化退火→线切割切割外轮廓→立铣铣俯视图凹台10+0.1 +0.05深2平面→钳序钻攻2-M3孔→真空淬火HRC58~63→检验→入库。

线切割加工此件是工序集中的典型实例。工序集中是把零件上较多的加工内容集中在一道工序进行,省时省力且高效。

1.2 轴类零件的加工

图2所示为轴类零件的加工。

审图: 外圆锥长且与内圆锥喇叭孔壁厚仅1mm,并有6条开口长槽,各部尺寸细密,尺寸最严的孔 $\phi 12+0.03\ 0$

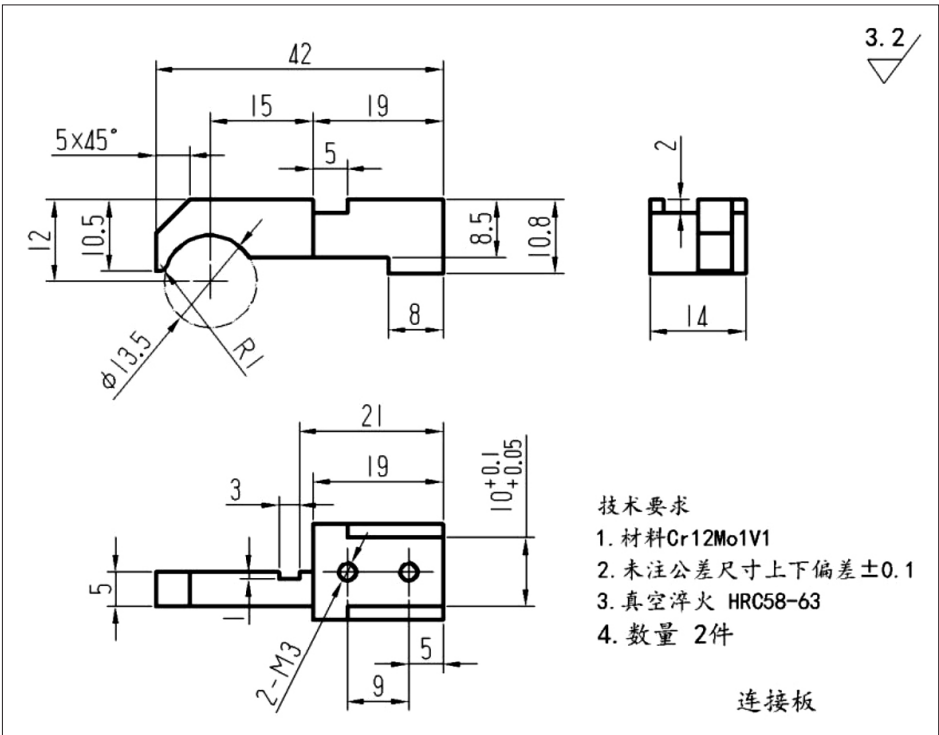


图1 所示为平面加工

在喇叭孔深处，全长两端外圆直径落差大。

工艺分析：选用普通机床加工即可。6 条开口长槽应放最后加工，且不能选用立铣或数铣机床加工，否则会因切削力的作用导致喇叭孔变形而成废品，而选用线切割加工可有效解决这个问题。若车序先加工各外圆成活，再加工各孔的话，由于喇叭孔壁薄，在切削力的作用下易产生震动变形导致壁厚不均匀及粗糙度差而成废品，另外，孔 $\phi 12+0.03\ 0$ 的位置较深，镗孔刀杆长、刚性差，也是此件加工的难点。所以，加工应以解决车序刚性差的问题为重点。

核心工艺：车序先加工内喇叭孔成，后使用工装装卡以提高刚性再加工外圆锥成。镗孔刀杆最大程度的增粗以提高强度，同时，精加工用镗刀要增大主偏角、后角及前角以保证刀具锋利，减小切削力，减少震动。

核心工艺流程：粗车各外圆及孔（圆锥不车出）→卡左端，平全长右端面及局部视图 A 各部尺寸及 17 长度外圆锥成→右端 $\phi 13.6$ 外圆用铜料配做开口弹簧套工装，左端喇叭孔尺寸用加长尼龙棒做锥堵工装（中心孔部位出螺孔，以便拆卸）→右端外圆装入开口铜套，卡盘装卡铜套→平全长左端面，镗圆柱孔、锥孔及 $\phi 12+0.03\ 0$ 孔成→尼龙锥堵装入锥孔，并用后顶尖支撑→车 $\phi 50$ 外圆及外圆锥成。

工艺路线：备料（圆钢 $\phi 53\times 175$ ）→球化退火→车成→钻攻 2-M6 孔→真空淬火 HRC35-38→线切割 6 条开口长槽→镀铬处理→检验→入库。

2 三维空间尺寸零件的加工

图 3 所示为三维空间尺寸零件的加工。

审图：由 $\phi 48$ 无缝管焊接成尺寸

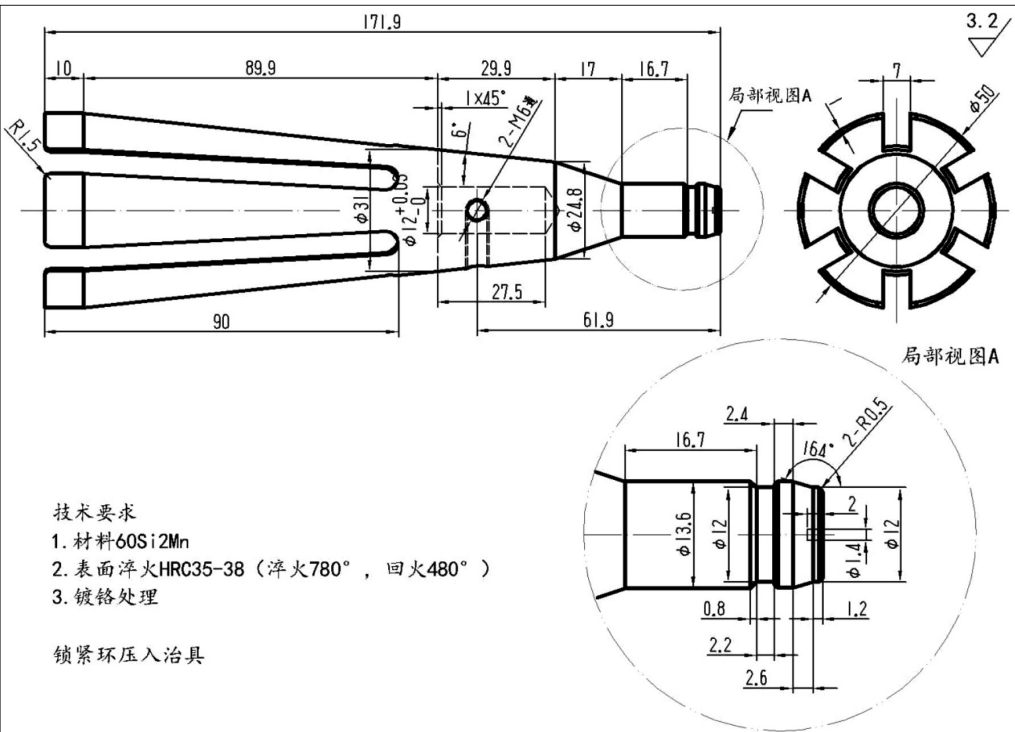


图 2 轴类零件加工

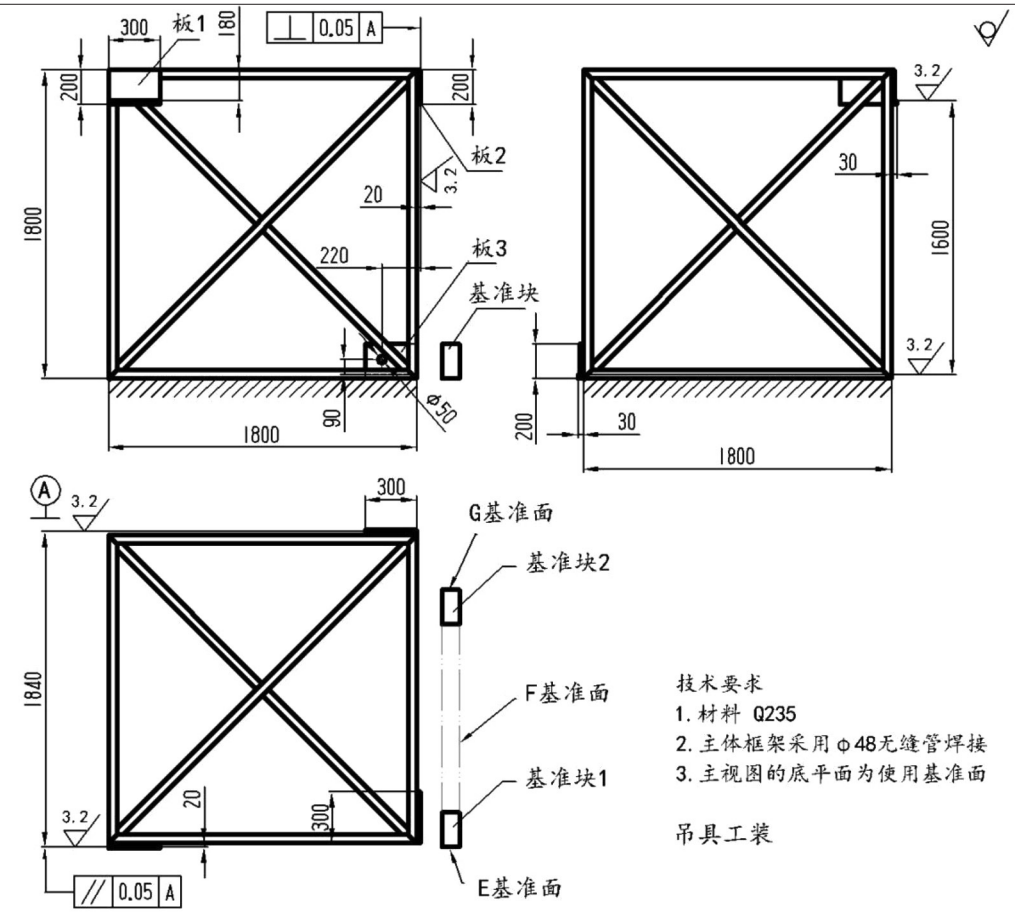


图 3 三维空间尺寸零件加工

1800mm×1800mm×1800mm 的立体主框架上焊有三块 30mm×200mm×300mm 的钢板，加工要保三维空间形位公差；主视图的底平面为使用基准面；图中的 1600mm、1840mm、 $\phi 50$ 孔及其位置尺寸 220mm×90mm 形成了三维空间尺寸。

工艺分析：三维空间形位公差及尺寸的控制加工，首先想到的是选用数控龙门铣加工中心，可一次装卡实现空间三面加工达到图纸的要求，能配置此设备的单位，一般都会配置一定加工能力的镗床，而有镗床的单位，不一定能配置此设备，所以，若能在镗床上实现三维空间尺寸及形位公差的控制，便能使此件具有通用的加工能力，实现工艺成本最优化。

核心工艺：选用旋转工作台面积 $\geq 2000\text{mm}\times 2000\text{mm}$ ，并有足够走刀行程的镗床，便能实现此件的加工。实际加工选用的是 T6216D 落地镗床。因主框架是由无缝管焊接而成，不能在主框架上加工辅助基准面。因此，在主框架右边放置一整条基准块或两块基准块（基准块 1 和基准块 2），两块基准块放置距离的总长度与整条基准块的总长度相同，基准块总长度形成的 E、F、G 基准面位置以能实现三块板的加工和测量为准。

工艺流程：将主框架底平面置于旋转工作台并找正，按图放置好基准块后用压板压紧→精加工 F 基准面，加工板 2 成，实测并记录 F 面与板 2 加工面的距离 H1→旋转工作台，找正 F 基准面，加工板 1 成，同时记录刀具在 Y 轴方向加工板 1 的坐标，精加工 E 基准面与板 1 加工面同平面→旋转工作台，找正 F 基准面，精加工 G 基准面，调整铣刀与 G 基准面的距离(=1840-基准块总长度)加工板 3，可保证 1840mm 尺寸，同时将加工板 1 时刀具的 Y 向坐标位置向下移动 1600mm 的距离即可加工完成板 3 与板 1 间 1840mm×1600mm 的空间尺寸，镗床主轴中心从 F 基准面水平移动 H1+220、垂直移动 90mm 的坐标距离，便可钻镗 $\phi 50$ 孔成。

测量方法如下：

(1) 将百分表用磁力表座固定在镗床主轴上，分别旋转工作台，找正 F 基准面后，即可测量三块板的平行度及垂直度，同时可测量各板间及板与基准块间的距离精度，测量精度值可达到 0.01mm；

(2) 以工作台平面作为基准，用高度尺实测板 1 与板 3 加工面的高度差求得

1600mm 尺寸；

(3) 实测基准块 E 面与 G 面间的总长度+板 3 加工面与 G 基准面的实测距离，求得 1840mm 的尺寸；

(4) $\phi 50$ 孔的 90 中心高度用高度尺实测；

(5) 实测 $\phi 50$ 孔中心与 F 基准面的距离 -F 面与板 2 加工面的实测距离 H1，求得 220mm 的水平尺寸。在加工机床上进行测量检验可最大程度的达到测量基准与加工基准的统一，从而减少因测量方式不同造成测量值间的误差。

由此可见，加工基准的选择及应用是整个加工过程的灵魂。

3 偏心零件的加工

3.1 偏心套零件的加工

图 4 所示为偏心套零件的加工。

审图：外圆 $\phi 158$ ，与其同心的台阶孔 $\phi 150$ 深 1.5mm，通孔 $\phi 114$ 与外圆有偏心距 e，共 3 种偏心距 e=5、e=3、e=0 同用此图，总厚度 3mm；数量合计 8 件；切割中心通过外圆中心。

工艺分析：选用最大偏心距 e=5 时的无缝管毛坯料 (GB/T 17395-2008)，毛坯规格的选择有两种方式 (见图 5)。

(1) 图 5 左图表示的是以外圆 $\phi 158$ 中心为基准，偏心孔与外圆同心时的最小成活尺寸为 $\phi 104$ ，选无缝管毛坯的规格为 $\phi 168\times \phi 100\times 70$ (8 件联体)，选用此规格的加工路线为：平端面→先加工外圆 $\phi 158$ (8 件联体加工) 及台阶孔 $\phi 150$ →留量切断→加工另一端面→加工偏心孔 $\phi 114$ 。此方式在外圆 $\phi 158$ 联体加工成活后，每加工完 1 件 $\phi 150$ 的台阶孔就得切断，再掉头单件加工偏心孔 $\phi 114$ ，掉头后由于实际装卡量小，找正不方便，使用

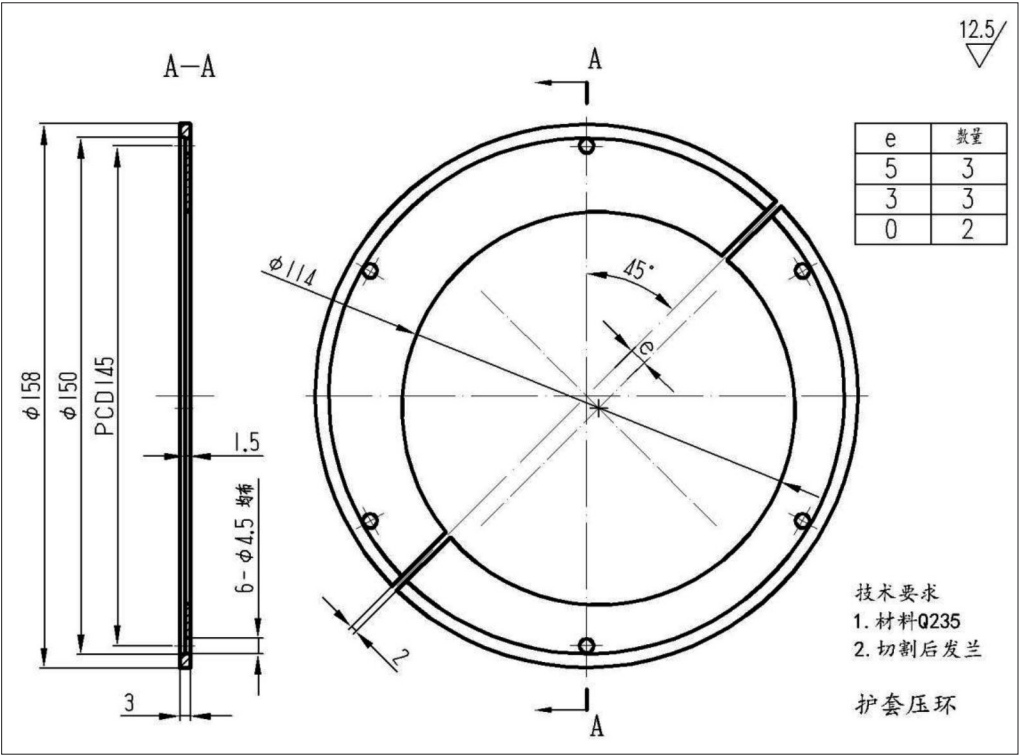


图 4 偏心套零件加工

专用软卡爪装卡会好一些，同时偏心孔加工余量大，加工刚性也差。

(2) 图 5 右图表示的是以孔 $\phi 114$ 中心为基准，偏心外圆与孔同心时的最大成活尺寸为 $\phi 168$ ，选无缝管毛坯的规格为 $\phi 168 \times \phi 108$ (孔最大可选 $\phi 112$) $\times 70$ (8 件联体)，选用此规格的加工路线为：平端面→先镗孔 $\phi 114$ (8 件联体加工)→车偏心外圆 $\phi 158$ (同偏心距多件联体加工)及阶台孔 $\phi 150$ →留量切断→加工另一端面。此方法的特点是通孔及偏心外圆均可实现多件联体加工，装卡量大，找正方便，加工刚性强，加工顺畅。

核心工艺：以图 5 右图孔 $\phi 114$ 中心为基准选用无缝管毛坯规格，实现通孔和偏心外圆的多件联体加工。

工艺路线：按图 5 右图尺寸选用无缝管毛坯→8 件联体镗孔 $\phi 114$ →相同偏心距多件联体四爪装卡车偏心外圆 $\phi 158$ ($e=5$ 时外圆余量小，见光即可)，车阶台孔 $\phi 150$ →留量切断→磨切断端面 (省去车序因装卡余量小不利加工端面的麻烦)→钳序划线切割位置线，划钻 $6-\phi 4.5$ 孔→线切割→发兰→检验→入库。

3.2 曲轴加工

图 6 所示为曲轴加工。

审图：①曲轴 4 拐颈直径为 $\phi 80 \pm 0.03$ ，外圆表面粗糙度 $Ra0.8$ ，曲拐两侧端面粗糙度 $Ra1.6$ ；②左、中、右三处主轴颈直径为 $\phi 115 \pm 0.035$ ，外圆表面粗糙度 $Ra0.8$ ，阶台端面粗糙度 $Ra1.6$ ；③最右端主轴颈直径为 $\phi 80 \pm 0.02$ ，外圆表面粗糙度 $Ra0.8$ ，阶台端面粗糙度 $Ra1.6$ ；④其余位置粗糙度 $Ra3.2$ ，6 处最大外圆直径为 $\phi 194.4$ 处阶台直径为 $\phi 140$ ，每处曲拐两侧的外圆止口直径为 $\phi 120$ ，深 1mm；⑤曲轴的中间及右侧各有一键槽且同方向；⑥全长 1019 的左端面有三个中心孔，主轴颈中心孔与全长右端面的中心

孔同轴，上下两个偏心中心孔分别是 A-A 及 B-B 视图曲轴拐颈的中心孔，其位置尺寸为 $48 \pm 0.02 \times 5^\circ \pm 1'$ ；全长右端面无曲轴拐颈中心孔；⑦其余工艺要考虑的内容技术要求另有说明。

工艺分析：主轴颈与曲拐颈在全长两端面各需要 3 个中心孔曲轴才能加工，最左端外圆直径 $\phi 115$ 端面可以实现，最右端外圆 $\phi 80$ 直径过小无法形成曲拐中心孔，解决方案——

(1) 右端使用辅助工装卡具形成的曲拐中心孔，同时

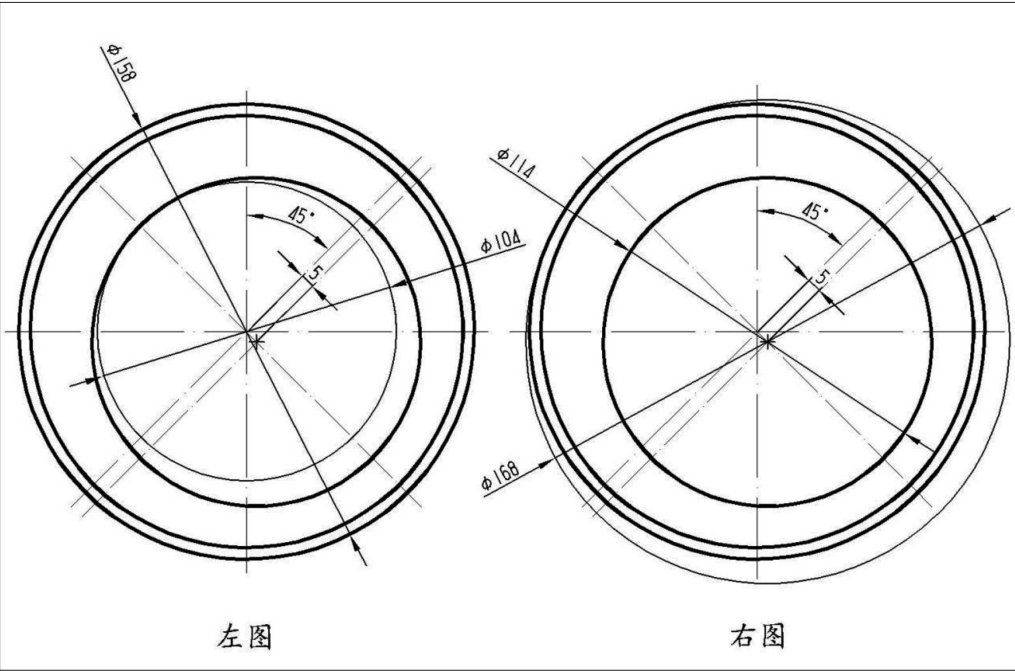


图 5 选用最大偏心距 $e=5$ 时的无缝管毛坯料，毛坯规格选择方式

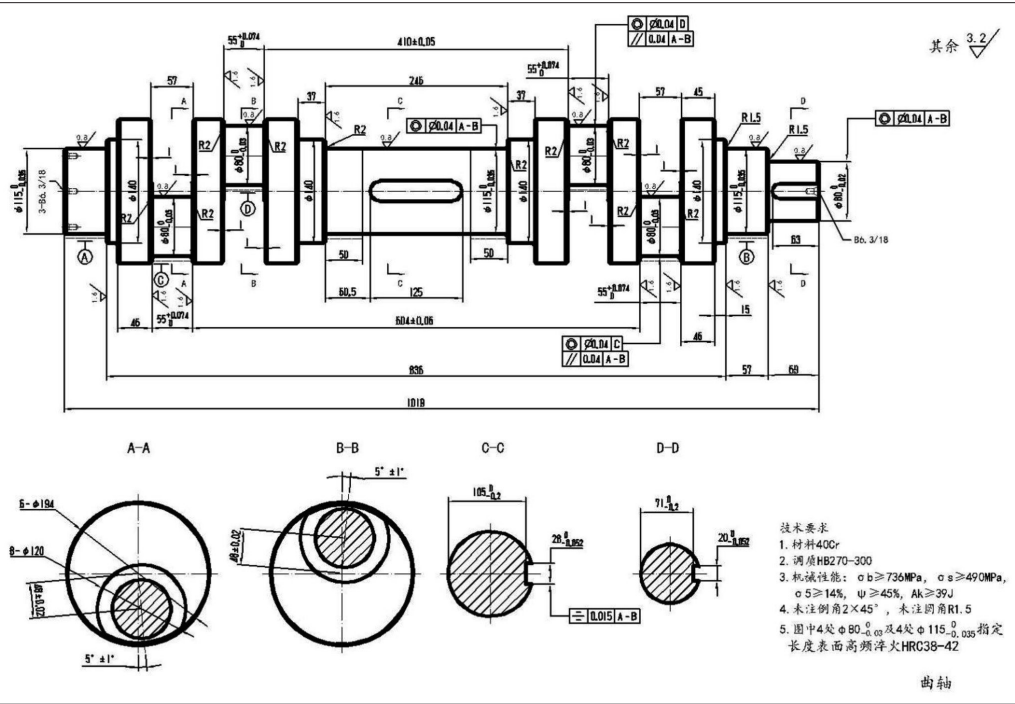
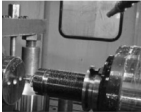


图 6 曲轴加工

表 曲轴加工路线工艺

序号	工序	工序内容	设备	加工示意图
1	备料	锯下料 40Cr 圆钢 $\phi 210 \times 1030$	锯床	
2	铣	V 型铁找正, 铣端面见光, 钻各中心孔	卧式加工中心	
3	粗车	曲拐不车, 最右端 $\phi 80\ 0\ -0.02$ 不车, 其余外圆各留量 8mm, 划曲拐轴向位置线, 各台阶根部 R3 圆角, 倒角 $2 \times 45^\circ$	普通车床	
4	粗洗	粗铣各曲拐颈见方, 各单面留量 8mm, 槽宽 50mm	立式数控铣床	
5	粗车	粗车曲拐直径至 $\phi 92$, 根部 R3 圆角	普通车床	
6	调质	HB270 ~ 300		热处理
7	铣	V 型铁找正, 铣端面见光, 钻各中心孔	卧式加工中心	
8	精车	车曲拐止口 $\phi 120$ 成, 车曲拐 $\phi 80$ 至 $\phi 81.5$, 最右端外圆 $\phi 80\ 0\ -0.02$ 不车, 车 $\phi 115$ 至 $\phi 116$ (两端直径同), $\phi 194$ 至 $\phi 196$, $\phi 140$ 至 $\phi 142$, 根部 R3, 倒角 $2 \times 45^\circ$	普通车床	
9	淬火	4 处曲拐 $\phi 80\ 0\ -0.03$ 及 4 处 $\phi 115\ 0\ -0.035$ 指定表面长度高频淬火 HRC38 ~ 42		热处理
10	精铣	V 型铁找正, 铣全长 1019 两端面成, 钻两端面主轴颈及曲拐颈中心孔成	卧式加工中心	
11	精磨	磨两端外圆 $\phi 115$ 至相同直径见光; 磨中间部位外圆 $\phi 115\ 0\ -0.035$ 成, 磨 4 处曲拐 $\phi 80\ 0\ -0.03 \times 55 + 0.074\ 0$ 并抛光成	曲轴磨床	
12	车	车外圆 $\phi 194$ 及 $\phi 140$ 成, 最右端外圆 $\phi 80\ 0\ -0.02$ 留量 0.5mm, 倒角成	普通车床	
13	精铣	铣各键槽成	立式加工中心	
14	钳	中间部位外圆 $\phi 115$ 处装“抱套”件		
15	精磨	磨外圆 $\phi 196$ 及 $\phi 140$ 见光; 磨 4 处淬火部位外圆 $\phi 115\ 0\ -0.035$ 及“抱套”外圆及端面成; 磨右端外圆 $\phi 80\ 0\ -0.02$ 成	曲轴磨床	

(下转第 75 页)

启动悬挂系统调节连接拉杆外伸至 6.5m 左右。主小车载锁紧插销位置距离船尾 10.2m, 当托管架与船底部铰点安装完毕后, 利用拉杆调节工装将拉杆调整成倾斜 5 度, 高度稍高与托管架顶部铰点。调整起重机吊钩同时通过铰孔上装配的辅助对中件完成拉杆与托管架的铰点对中, 再利用拉杆调整工装下放拉杆, 以配合校中。校中结束后, 启动液压穿轴工装将销轴插入铰孔内, 然后拆除穿轴工装, 安装封盖板。

松开拉杆调节工装, 启动悬挂系统使托管架的全部载荷从起重机上转移至悬挂系统上, 关闭船尾铰点锁轴板。拆除起吊锁具完成托管架安装。

3 液压穿轴工装

该液压穿轴工装改变了传统上使用单摆式撞锤撞击的压力方式, 采用液压推进方式, 大大减低了销轴安装难度, 节省了大量的时间和成本。

该工装主要由起吊装置、固定装置、液压油缸、液压装置、电力驱动装置、油箱等组成。销轴与推进油缸采用螺纹连接, 使用前预先将销轴放入工装内并与之连接, 再用起重机吊装并安装至销轴铰点处, 待销孔中对中结束后, 操作人员启动该设备, 将销轴推入轴孔内, 即完成销轴安

装工作。
为减少海上安装时受海浪的影响, 每个铰点处均设置球形轴承, 在穿插销轴前, 销轴前端安装导向装置, 在销轴推进过程中可利用导向装置的锥度自动纠偏, 在实际操作中该装置起到了重要作用, 大大降低了销轴的安装难度, 缩短了销轴安装时间。

4 结语

烟台 5000T 起重船托管架安装为公司首次, 该托管架的顺利安装证实了该工艺方案的可行性和高效性, 为后续起重铺管船托管架安装奠定了理论和实践基础。随着国家海洋战略的不断深入, 铺管船作为管道铺设的重要海洋工程装备将具有广阔的市场前景, 而托管架是实现其铺管功能的主产品, 拥有一套成熟、科学的托管架安装工艺是实现托管架设计目标的重要保障。

参考文献:

[1] 郁海飞, 杨建华. 铺管船托管架制造工艺解析 [J]. 中国机械, 2021(08): 126-128.

作者简介: 袁伟 (1985.02-), 男, 汉族, 湖北黄冈人, 本科 (工学学士在读), 工程师, 研究方向: 船舶安装工艺及港机产品。

(上接第 72 页)

保证曲拐中心孔位置 $48 \pm 0.02 \times 5^\circ \pm 1'$, 此方案成本高;

(2) 全长 1019 右端面增长 1 个曲拐中心孔的长度且增长部分的外圆端面能打曲拐中心孔, 且不影响整个曲轴的加工, 此方案材料及加工成本增高; ③利用曲轴自身的特点加工, 右端主轴颈外圆 $\phi 80 \pm 0.02$ 在曲拐成活前加工至与最左端外圆 $\phi 115$ 相同的直径, 直至 4 个曲拐成活后再加工至 $\phi 80 \pm 0.02$ 尺寸成活, 此方案成本与质量双保证。

核心工艺: ① 40Cr 圆钢是市场上较为常见的一种原材料, 性能稳定, 采购周期短, 规格及价格相对稳定, 所以曲轴毛坯选用 $\phi 210 \times 1030$ 的 40Cr 圆钢加工。②全长右端外圆 $\phi 80 \pm 0.02$ 在曲拐成活前加工至与最左端外圆 $\phi 115$ 相同的直径, 便于右端面打曲拐中心孔, 同时保证加工过程中两端主轴颈外圆的中心孔同轴, 便于工序间加工质量的保证, 直至 4 个曲拐成活后再加工至 $\phi 80 \pm 0.02$ 尺寸成活。③两端面 3 对中心孔加工精度的保证及曲轴各序加工的找正是重点。④加工曲拐时动平衡要有保证, 以求加工过程和质量的稳定, 如车床四爪卡盘平衡块的使用。⑤各曲拐使用精度高, 所以在磨序加工的同时要进行表面抛光以提高加工质量。

中心孔加工找正的原则: 将两端主轴颈中心孔的连线作为坐标系的 Z 轴, 始终与两端面的 xy 平面垂直, 两端

面对应曲拐颈中心孔的连线始终平行于 Z 轴, 且两端面对应曲拐中心孔的位置与 X 轴及 Y 轴的距离保持相同。

曲轴加工路线工艺见下表。

4 结语

通过上述实例总结出编制机械加工工艺要经历 4 个重要的阶段:

(1) 审图。读懂图纸, 充分了解图中的特点信息;

(2) 工艺分析。对图纸信息进行分析, 在考虑成本及加工能力的前提下确定重点内容加工的可行性方案, 方案可能不唯一, 多选方案综合比较;

(3) 确定核心工艺。通过工艺分析, 多方案对比, 明确低成本且重点内容加工不易出现质量问题的最优工艺方案作为工艺核心, 可制订核心工艺流程;

(4) 编制工艺文件。明确了核心工艺, 便可按图纸制订完整的工艺路线, 编制正式的机械加工工艺文件了。

经过这 4 个阶段, 可最大程度的提高机械加工工艺编制的质量, 使第一次实施编制的工艺实现低成本且高质量成为可能, 从而实现工艺成本最优化的目标。

参考文献:

[1] 陈家芳, 顾霞琴. 典型零件机械加工工艺与实例 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.3.