

1Cr11Ni2W2MoV不锈钢细长轴加工工艺

陈卫林, 常星星, 李红进, 高茂洋

安徽天航机电有限公司 安徽芜湖 241000

摘要: 以1Cr11Ni2W2MoV马氏体耐热不锈钢细长轴为研究对象, 通过对材料属性进行分析, 采用冷加工与热处理交替的方式来改变材料性能, 进而达到最优的加工状态, 不仅提高了产品加工效率与合格率, 而且降低了刀具的磨损。同时通过热处理淬火后的压力校直、镀铬前后磨削工艺参数优化及冷热循环时效处理等工艺措施, 避免了因材料应力而导致的变形。优化工艺流程, 使工件加工关键尺寸达到设计要求, 并可实现批量生产。

关键词: 不锈钢; 细长轴; 工艺参数; 应力; 磨削; 冷热循环

1 序言

液压伺服舵机是航空飞行器操作系统的关键部件^[1-3], 细长轴是液压伺服舵机中的一种液压控制关键元件, 通过细长轴沿轴向的位移, 分配调整流量大小, 从而控制执行元件的动作, 实现飞行器飞行姿态的控制。为满足其工作环境的高可靠性和工作稳定性要求, 需对其加工过程、方法和工艺参数进行严格控制, 从而保证工件的高精度、高性能要求^[4-6]。

细长轴的刚性较差, 其加工还涉及热处理、表面处理和无损检测等专业领域^[7-9]。工件加工应力大, 淬火弯曲变形及镀铬层厚度不易控制, 尺寸精

度和形状精度不易保证。

2 零件工艺分析

细长轴结构如图1所示, 两端直径小, 属于典型的弱刚性零件。零件材料为1Cr11Ni2W2MoV马氏体耐热不锈钢, 硬度36~40HRC。两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}$ mm外圆和右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}$ mm外圆镀铬。两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}$ mm外圆、右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}$ mm外圆、中间 $\phi 11_{-0.027}^{+0}$ mm密封槽及中间台阶 $\phi 14_{-0.034}^{+0.016}$ mm外圆的尺寸精度均达到IT7级, 两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}$ mm外圆、中间台阶 $\phi 14_{-0.034}^{+0.016}$ mm外圆和右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}$ mm外圆的同轴度要求均为 $\phi 0.015$ mm。由于工件细长, 自身的刚性较差, 因此在车削、磨削以及顶紧力的作用下, 易产生弯曲变形。

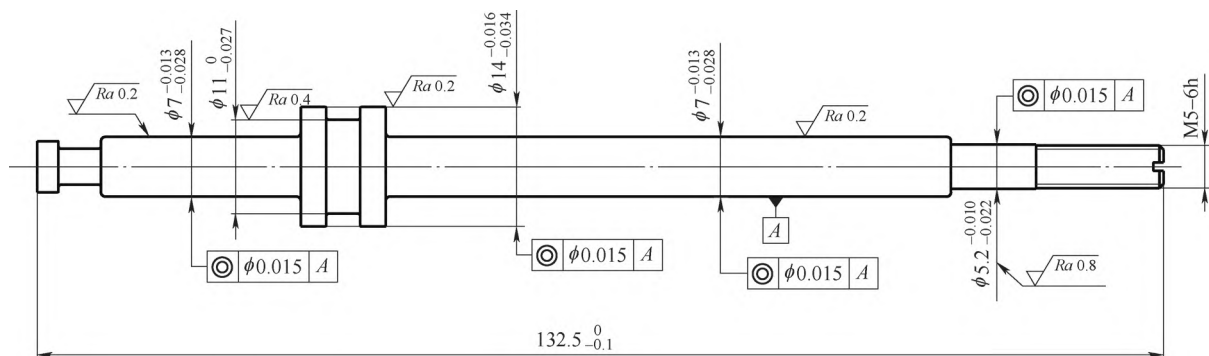


图1 细长轴结构

3 工艺难点分析

(1) 淬火热处理 1Cr11Ni2W2MoV马氏体耐热不锈钢是在12%的Cr钢中添加Mo、W、V等元

素, 使其具有马氏体相变硬化能力。其化学成分见表1。该材料在室温下具有良好的韧性和抗氧化性能, 在海水及海洋气候中耐蚀性较差。增加铬成分

表1 1Cr11Ni2W2MoV马氏体耐热不锈钢化学成分 (质量分数) (%)

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	W	Mo	V
0.10~0.16	≤0.60	≤0.60	≤0.020	≤0.030	10.5~12.0	1.40~1.80	1.50~2.00	0.35~0.50	0.18~0.30

使铁素体含量增加,会降低材料抗拉强度和硬度。在铬含量一定的条件下,碳含量的增加会使淬火后的硬度增加、塑性下降。

根据细长轴的技术要求,需对零件进行淬火+回火处理,从而保证工件的强度指标。因零件细长,故热处理易发生弯曲变形,增加了后续加工的工作量。

(2) 同轴度要求 工件两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}$ mm外圆的同轴度要求均为 $\phi 0.015$ mm,表面粗糙度值 $Ra=0.2\mu\text{m}$;右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}$ mm外圆的同轴度要求为 $\phi 0.015$ mm,表面粗糙度值 $Ra=0.8\mu\text{m}$ 。由于镀前镀后均需磨削加工,工件的刚性差,故对加工方法及工艺参数有着更高的要求。

(3) 镀铬层厚度 两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}$ mm外圆和右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}$ mm外圆需镀硬铬,镀铬层厚度 $20\mu\text{m}$,尤其是台阶根部位置的镀铬层厚度不易控制,对工件镀铬前有更高要求。由于零件刚性差、镀前顶紧力不易控制、磨削应力大及前后基准变化等,因此难以保证镀铬层的厚度要求。

4 制定工艺方案

根据工件的结构形状、技术要求、材料特性及设备等因素,结合现有的生产资源,在产品研制阶段制定工艺路线为:粗车削外形→淬火+回火→半精车削外形→镀前磨削外圆→车削螺纹→去除加工应力→磁力探伤→加厚镀铬→研磨中心孔→磨削镀铬外圆→磨削镀铬密封槽→磨削中间密封槽→车削抛光圆角→去除工艺夹头→制一字槽→化学钝化→镀铜处理→涂油入库。

(1) 毛坯的粗车削、半精车削加工 粗加工采用一夹一顶的装夹方式,主要是去除表面加工余量。半精车削加工采用两顶装夹方式,以保证与后面的基准统一。

(2) 热处理淬火 提高工件的综合力学性能,热处理固溶淬火后抗拉强度 $\sigma_b \geq 1080\text{MPa}$,断后伸长率 $\geq 15\%$,断面收缩率 $\geq 55\%$,U形缺口试样冲击功 $\geq 690\text{kJ/m}^2$ 。入炉前对工件进行清洗,竖直摆放于炉膛中,减少零件因热处理而导致的弯曲变形。

因工件粗加工后内部应力过大,故热处理后的弯曲程度也不相同。

热处理采用炉温均匀性在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 的电炉。固溶淬火前,需对工件进行预热处理(正火+高温回火),正火温度 $(1010 \pm 10)^\circ\text{C}$,保温130min,空冷;高温回火温度 $(740 \pm 10)^\circ\text{C}$,保温180min,空冷。淬火温度 $(1010 \pm 10)^\circ\text{C}$,保温130min,油冷。回火温度 $660 \sim 690^\circ\text{C}$,保温180min,空冷。淬火与回火的时间间隔 $\leq 240\text{min}$ 。

(3) 磨削外圆 镀铬前后的两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}$ mm和右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}$ mm外圆采用斯图特S31万能内外圆磨床进行磨削加工,此工序非常重要,是保证同轴度指标和镀铬层厚度的关键。需要对两端基准进行研磨,以保证基准的统一。为保证外圆镀前尺寸及位置精度要求,应对磨削加工参数、砂轮、顶紧力及磨削液等进行严格控制。

5 试加工结果分析

按照前述工艺流程及要求加工8件产品,热处理后零件产生弯曲变形,依次用记号笔标记,检测零件热处理后外圆轴向圆跳动量(见图2), $\phi 7\text{mm}$ 外



a) 零件实物



b) 检测

图2 零件外圆轴向圆跳动检测

圆长端轴向圆跳动量为 $0.52 \sim 0.92\text{mm}$ ， $\phi 7\text{mm}$ 外圆短端轴向圆跳动量为 $0.45 \sim 0.62\text{mm}$ 。

由于热处理淬火温度达 1000°C 并采用常温油冷，故产生的热应力和冷应力超出工件材料的屈服强度，工件产生一定的塑性变形，导致形状发生变化，产生弯曲变形、扭曲变形。经过大量试验发现，半精加工留有的余量仅 0.6mm ，多数零件因余量不足而无法加工。

镀铬后磨削两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}\text{mm}$ 和右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}\text{mm}$ 外圆，尺寸精度、表面粗糙度和同轴度均满足设计要求，镀铬层厚度存在超差现象， $\phi 7\text{mm}$ 圆柱镀铬层厚度为 $9 \sim 18\mu\text{m}$ ， $\phi 5.2\text{mm}$ 圆柱镀铬层厚度为 $16 \sim 22\mu\text{m}$ 。

采用超声测厚仪对两端 $\phi 7_{-0.028}^{+0.013}\text{mm}$ 外圆和右端 $\phi 5.2_{-0.022}^{+0.010}\text{mm}$ 外圆镀铬层厚度进行检测，存在超差现象。根据磨削受力分析，切削力朝砂轮相反方向产生反作用力，由于细长轴零件的刚性较差，中间部位变形增大，切削力反而减小，因此中间产生“腰鼓形”，即出现常说的“让刀”现象。

6 工艺方案优化

工件热处理淬火+回火后，冷、热应力导致的变形不可避免，且变形程度也不同。根据设计要求，必须进行热处理。为减少热处理后变形给后续加工带来的质量风险，对热处理工件进行压力校直，如图3所示。



图3 压力校直

具体工艺方法为：首先将工件安装在两端顶尖上支撑，转动工件找出跳动最高点；其次在工件两端采用支撑块进行支撑，在工件的最高点位置设置支撑压头，对其施加压力，校直行程通过施加的压力大小确定；最后通过百分表检测卸载后的最大残余变形量。

工件经过压力校直后，内部应力较大，需在 4h 内对其进行消除应力回火处理。回火温度 $600 \sim 660^\circ\text{C}$ ，保温 240min ，空冷。

调整磨削工艺参数，使用纵向磨削法，采用乳化液充分冷却。选用白刚玉砂轮，粒度80目，主轴转速 150r/min ，砂轮线速度 35m/s ，砂轮修整速度 200mm/min ，半精磨余量 0.01mm ，精磨余量 0.005mm ，粗磨进给速度 0.06mm/min ，半精磨进给速度 0.02mm/min ，精磨进给速度 0.01mm/min ，光磨时间 5s 。

两项装夹工件时，应充分考虑顶尖力的大小，稍用力能转动即可。若顶紧力过大，则磨削时产生弯曲变形；若顶紧力过小，则工件的形状误差增大。

$1\text{Cr}11\text{Ni}2\text{W}2\text{MoV}$ 马氏体耐热不锈钢加工时，切削应力大，温度高，导热性能差，加工表面易产生硬化现象，特别是磨削加工后存在较大的磨削应力。可采用去应力回火方法，消除磨削应力，回火温度 $180 \sim 220^\circ\text{C}$ ，保温 240min ，空冷。通过去应力回火减少工件变形量及应力腐蚀，使材料内部应力重新达到平衡，从而起到消除应力的作用。半精磨余量 0.03mm ，精磨余量 0.01mm ，粗磨进给速度 0.1mm/min ，半精磨进给速度 0.05mm/min ，精磨进给速度 0.02mm/min 。砂轮修整速度 200mm/min 。

回火后对工件尺寸的稳定作用不大，若要保证零件在长期使用过程中尺寸稳定，则需要通过高低温循环时效和冰冷处理，达到尺寸稳定的效果。高温 $160 \sim 180^\circ\text{C}$ ，保温 2h ；低温时使用固态干冰（ -78°C ）、液氮（ -195°C ）对零件进行冷却，保温 1h 。高低温循环 ≥ 2 次。

工件加工周期较长，涉及工序较多，虽通过去应力回火、高低温循环时效等方法减少了内部应力，但因工件刚性较差，若工序周转摆放不当，也会引起变形，故在整个制造过程中，均采用竖直或吊置方式，以减少其变形。

7 结束语

本文以 $1\text{Cr}11\text{Ni}2\text{W}2\text{MoV}$ 马氏体耐热不锈钢材料细长轴加工为例进行工艺研究，首先解决零件的弯曲变形和刚性不足问题。通过采取热处理淬火后压力校直、镀铬前后磨削工艺参数优化及冷热循环时效处理等工艺措施，优化工艺流程设计，确保工

件关键尺寸达到设计要求，满足了批量生产需求，提升了加工效率。

参考文献：

- [1] 肖清, 谢俊超, 花靖. 船用电动伺服舵机性能仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38 (6) : 118-121.
- [2] 张浩宇. 电动舵机液压伺服加载系统设计与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [3] 冷骏. 400kN·m舵机液压系统的设计与仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [4] 王新阁, 孟庆迪, 李堂经. 基于模糊控制的飞机液压伺服系统研究[J]. 机床与液压, 2009, 37 (5) : 87-89, 95.
- [5] 王世涛, 董海迪. 导弹电动舵机控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11) : 116-121, 147.
- [6] 徐翊翔. 基于神经网络的电动伺服舵机故障识别方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [7] 刘浪. 细长轴加工切削稳定性及尺寸精度分析与研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
- [8] 张明艳, 张化平, 马延斌. 装夹方式对细长轴零件车削加工精度影响的分析[J]. 机械制造, 2022, 60 (1) : 56-58, 48.
- [9] 丁鹏飞, 王昌利, 黄贤振, 等. 细长轴车削加工误差可靠性灵敏度分析[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (5) : 693-699.

MW 20240307

专家点评



不锈钢细长轴的加工难点主要是淬火弯曲变形、镀铬层厚度控制和外圆同轴度要求。作者结合现有的生产资源，通过冷加工与热处理相互配合的方法，改善材料加工性能，解决了零件的弯曲变形和刚性不足问题。通过淬火后压力校直、磨削工艺参数优化及冷热循环时效处理等工艺改进措施，确保细长轴的关键加工尺寸。

细长轴加工流程涉及冷加工、热处理、表面处理、压力校直和无损检测等多项专业领域，其工艺方法具有很好的实用性。

《金属加工（冷加工）》“工匠故事”栏目征稿

为传承老一辈工匠的优良传统，彰显新时代工匠的拼搏精神，《金属加工（冷加工）》开设“工匠故事”栏目，文章内容以倡导和弘扬“工匠精神”为主题，以解决生产技术难题为主线，言之有物、物为所用，用多种形式来呈现和讲述创新技艺、传承工匠精神的匠心故事。

(1) 报道对象 在生产实践中作出突出贡献的高级技师、技能大师、劳模、技术大咖等均可为主要报道对象，可以写自己或写别人，以解决技术难题为主线。

(2) 主要内容 以融入技术的多种形式，记录那些具有倡导和弘扬“工匠精神”的行业人物

及故事，突出言之有物、物为所用，以利传承与激励。

(3) 栏目格式 具体栏目格式请扫描二维码查看。



(4) 投稿网址 <http://tougao.mw1950.cn>

(5) 栏目联系 曹胜玉 13683585307 (同微信)