

硬质合金滑动轴承倒圆设计与加工

苏伟, 颜娟

自贡硬质合金有限责任公司 四川自贡 643000

摘要: 针对硬质合金滑动轴承倒圆设计与加工过程中出现的问题进行原因分析, 通过成形砂轮的修整和小圆弧+大圆弧+斜边过渡的设计方法, 解决了砂轮磨损后不能完全倒圆的难题。

关键词: 硬质合金; 轴承; 倒圆; 砂轮; 装配; 加工

1 序言

硬质合金是由难熔金属化合物和黏结金属, 通过粉末冶金工艺制成的合金材料, 具有硬度高、耐磨、强度高、韧性好、耐热和耐腐蚀等一系列优良性能, 广泛应用于耐磨零件。硬质合金滑动轴承作为石油、天然气开采人工举升系统潜油电泵的核心零部件, 主要用于潜油电泵的电动机、离心泵、保护器及分离器轴的旋转支撑、扶正、止推和密封, 被持续推广用于替代复杂工况和恶劣环境下的金属工件。滑动轴承副往往成对使用, 包括滑动轴承外圈(简称“静环”)及滑动轴承内圈(简称“动环”)。

在机械加工中, 倒圆是比较常见的一项加工内容。车、镗、磨、铣和钻等工序都可以完成倒圆的加工。倒圆的主要作用有: ①去尖角、毛刺, 美化外观。②安装导向, 便于装配。③避免锐角对人员及其他零件的划伤, 预防磕碰, 保护工作面。④保护刀具, 延长刀具使用寿命。⑤减少因应力集中而产生的变形开裂现象。

由于不作为直接影响配合的尺寸, 倒圆往往被认为是非关键工序, 因此设计精度与加工过程易被忽略。这种认识上的偏差, 导致较多案例出现因倒圆设计不合理而出现零部件断裂或装配异常的情况。例如通过对自动扶梯在运行过程中突发扶手驱动轴断裂现象进行分析, 发现驱动轴倒圆半径设计为0.5mm, 而GB/T 6403.4-2008《零件倒圆与倒角》附录B中规定, $\phi 70\text{mm}$ 轴类零件的倒圆半径推

荐值为2.0mm。由于倒角半径 r 显著影响应力集中系数, 所以增大倒角半径 r 可以有效减缓应力集中, 提高零件寿命。

GB/T 6403.4-2008规定了一般机械切削加工零件的外角和内角的倒圆、倒角, 但对有特殊要求的倒圆、倒角指导有限。部分论文叙述了棱边应力集中产生危害的案例, 但未见此类设计在硬质合金产品应用过程中的影响。硬质合金滑动轴承副应用于潜油电泵中, 要求具有较高的工作效率, 因此有必要对硬质合金倒圆设计进行严格的分析计算, 同时在加工过程中选择适当的加工方法。

2 出现的问题

海上石油开采主要是在石油开采平台进行作业, 除少数自喷井以外, 大部分都是使用潜油电泵进行作业, 其核心零部件硬质合金滑动轴承副, 同时起到径向与轴向支撑作用。滑动轴承副的装配如图1所示。在某滑动轴承副的设计中, 电动机轴通过键槽传动使滑动轴承内圈(动环)运转, 滑动轴承外圈(静环)安装在叶导轮壳体内, 动环的外圆与静环内孔形成摩擦副, 动环的台背面与静环大端面

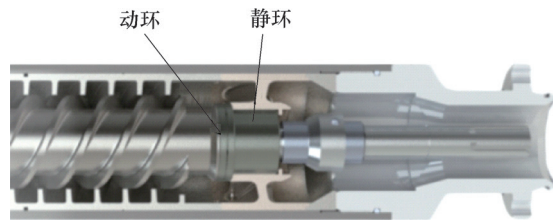


图1 滑动轴承副的装配示意

形成摩擦副。正常运转时，动环的台背面与静环大端面必须紧密贴合，潜水电泵才能稳定运转。

我公司生产某型号潜水电泵用硬质合金滑动轴承副，动环与静环配合使用，要求动环外圆 $R2.5 \sim R2.7\text{mm}$ ，静环内孔 $R2.8 \sim R3.0\text{mm}$ 。动环如图2所示，静环如图3所示。当产品配套装配于潜水电泵的电动机上后，在起动运行过程中，轴承副需要很长时间才能磨合完成达到平稳状态。

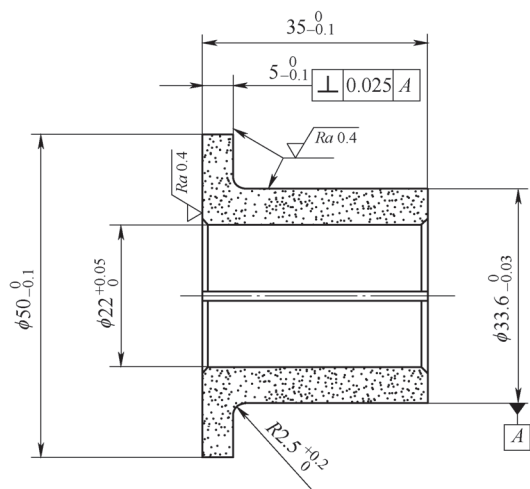


图2 动环

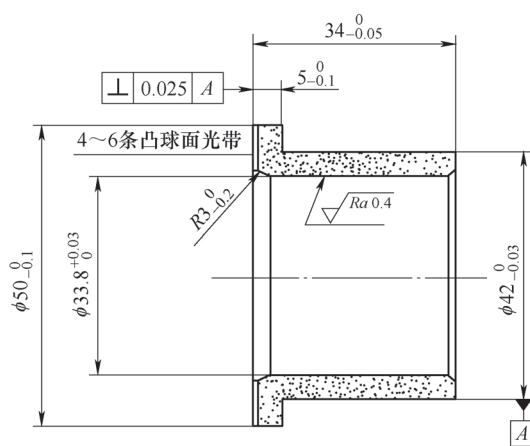


图3 静环

3 分析与讨论

从硬质合金滑动轴承的使用工况看，当动环台背面与静环端面紧密配合时，泵才能达到平稳运转。轴承副需要很长时间才能磨合完成达到平稳状态，表明装配后动环台背面与静环端面未实现紧密配合。造成该现象的原因有两种：一是动环台背面或静环端面的平面度不好，二是动环 R 与静环 R 出现干涉。

如果动环台背面或静环端面的平面度不好，受力面凹凸不平，具有局部高点，其偏差超过最小油膜厚度，会破坏动环台背面或静环端面之间所建立的油膜，两接触端面就会在半干摩擦或干摩擦状态下运行，造成运行不平稳甚至端面损坏。对静环产品按照JB/T 7369—1994《机械密封端面平面度检验方法》进行平面度检测，满足用户设计光带要求，表明造成该现象的原因并非平面度不合格。

使用日本三丰CV-2000轮廓仪随机抽检动环与静环产品， R 尺寸均满足图样要求。但在人工手动相对旋转动、静环时，出现卡滞异响，同时观察到动环的台背面与静环大端面无法贴平，说明动环与静环根部 R 确实发生了干涉，导致潜水电泵起动时阻力很大。

GB/T 6403.4—2008给出了内角、外角分别为倒圆、倒角（倒角为 45° ）的装配形式（见图4）。按照装配关系，静环与动环装配形式设计属于图4b类型，即内角倒圆、外角倒圆。在GB/T 6403.4—2008第5点中指出对于 R 、 R_1 、 C 和 C_1 的确定，内角倒圆、外角倒圆时， $R_1 > R$ 。

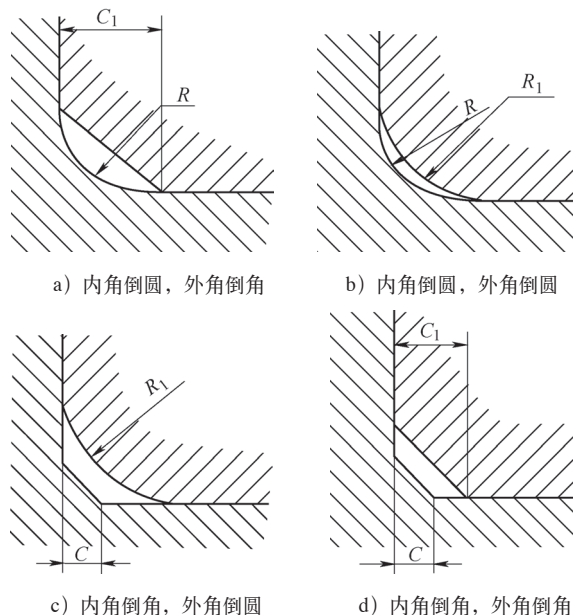


图4 内角、外角分别为倒圆、倒角的装配形式

当动环与静环按照倒角设计，即按照图4d加工时，倒角尺寸的公差能直观表现装配的间隙，如内角 C 尺寸为 2.5mm ，外角 C_1 尺寸为 2.8mm ，则装配间隙为 $C_1 - C = 2.8 - 2.5 = 0.3\text{ (mm)}$ ；当动环与静环按照倒圆设计，即按照图4b加工时，倒圆设计装配间隙如图5所示。由图5可看出，内倒圆 R 尺寸

为2.5mm，外倒圆 R_1 尺寸为2.8mm，则装配间隙最大位置B为 $(R_1 - R) \times (\sqrt{2} - 1) = 0.3 \times 0.414 = 0.12$ (mm)，而不是 $R_1 - R = 0.3$ mm，从位置B至位置A、E，间隙逐渐减小至0mm，可见倒圆设计比常规倒角设计间隙要小得多。

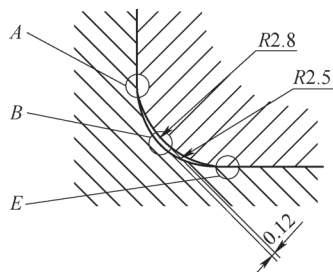


图5 倒圆设计装配间隙示意

在硬质合金滑动轴承加工过程中，由于硬质合金的难加工特性，无法通过车削方式控制轨迹插补成形，往往通过成形砂轮磨削，导致砂轮消耗快，无法形成完整的R形状。在加工静环内孔R时，由于不能采用成形砂轮同时加工产品端面、内孔R及内孔，加工完整的R只存在理论上的可能性，所以为保证内孔R与端面及内孔光滑过渡，内孔R砂轮需要设计为带角度 10° 。静环内圆R成形如图6所示。

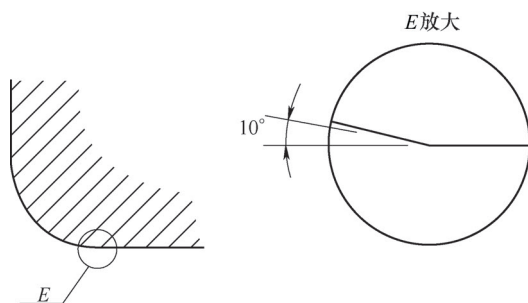


图6 静环内圆R成形示意

成形砂轮角度设计将进一步减小位置E轴向间隙至0.06mm，即当内孔R有0.06mm未加工到位时，静环内孔R与动环外圆R就开始出现干涉，这对成形砂轮磨削要求极高。位置E轴向间隙减小后，静环内圆R成形如图7所示。

因此当硬质合金静环内孔R加工不到位（表现在端面与内孔上长度不够），即R尺寸虽然测量合格，但未达到理论上的完整轮廓R时，现有成形砂轮磨削加工工艺极易导致产品装配时出现干涉。同理，动环外圆R延长线较长时，也会引起R处产生干涉，导致动环台背面与静环端面无法实现紧密配合。

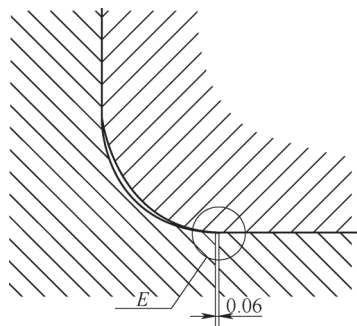


图7 位置E轴向间隙减小后静环内圆R成形示意

4 采取的措施

相关技术文献认为，小圆弧+大圆弧+斜边倒角是目前最适宜的装配倒角形式。当加工动环外圆R时，采用成形砂轮一次性加工外圆满足 $\phi 33.6_{-0.03}^0$ mm、 $R2.5_{-0.1}^{+0.2}$ mm及台背 $5_{-0.1}^0$ mm。为避免砂轮消耗引起R干涉，在修整成形砂轮时，先将砂轮修整成标准R2.5mm，再将砂轮端面及外圆修磨0.1mm，使加工后的动环R形成如图8所示轮廓。正常加工动环外圆时，在保证R2.5~R2.7mm的前提下，控制R在台背宽度及外圆长度为2.0~2.5mm。

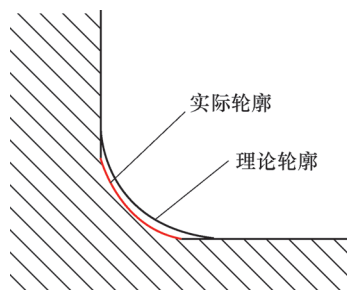


图8 动环R形成的轮廓

当加工静环内圆R时，无法采用成形砂轮一次性加工内圆满足 $\phi 33.8_{-0.03}^{+0.03}$ mm、 $R3_{-0.2}^0$ mm及台背 $5_{-0.1}^0$ mm。内孔R需要采用成形砂轮单独加工，同时为保证内孔R与端面及内孔光滑过渡，内孔R砂轮需要设计为角度 10° 。控制内孔R的关键在于保证去除足够的尺寸，这需要严格的检验，正常加工静环内孔R，在保证R (3 ± 0.1) mm前提下，R在端面宽度及内孔长度为2.5~3.0mm。

按照新工艺加工的产品，动环与静环能够实现端面贴平，在潜油电泵起动运行过程中，能通过短时间磨合达到稳定运行状态。

5 结束语

在产品的设计过程中，由于倒圆、倒角对于设计

人员来说,往往被认为是微不足道的问题,但是在零件使用和装配过程中,却因为这些小问题而影响了产品质量,所以倒圆、倒角不容忽视。硬质合金的难加工特性,使其不能像车削钢件那样达到完整倒圆。通过对装配原理的分析,制定合理的加工手段,可避免出现装配干涉,满足使用要求。

参考文献:

- [1] 石泉江. 某汽轮发电机组复速级第二级动叶片断裂故障分析[J]. 舰船科学技术, 2013, 35 (3) : 64-68.
- [2] 彭勇, 裴自力. 出油阀座裂纹原因分析及改进措施[J]. 内燃机, 2012 (2) : 52-54.
- [3] 佟文伟, 王理, 张开阔, 等. 某型航空发动机散热器支架断裂失效分析[J]. 航空发动机, 2011, 37 (6) : 43-44, 62.
- [4] 陈礼顺, 杜锐锋, 刘新灵. 棘轮离合器疲劳裂纹原因分析[J]. 失效分析与预防, 2014, 9 (1) : 39-

42, 47.

- [5] 王慧, 廖为, 孙国峰, 等. 自动扶梯扶手驱动轴断裂原因分析[J]. 理化检验 (物理分册), 2016, 52 (1) : 39-42.
- [6] 曹凤梅. 倒圆、倒角对产品质量的影响[J]. 成功 (教育版), 2012 (22) : 290.
- [7] 全国机器轴与附件标准化技术委员会. 零件倒圆与倒角: GB/T 6403.4—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] 王贵成, 洪泉, 李钦奉, 等. 精密零件棱边质量的标准[J]. 航空制造技术, 2006 (9) : 82-85, 97.
- [9] 于学全, 邵大鹏, 倪红军, 等. 孔口倒角工艺及刀具研究[J]. 铁道机车车辆, 2011 (31) : 374-378.
- [10] 章志慧. 圆锥滚子轴承套圈装配倒角的设计[J]. 轴承, 2011 (12) : 11-14.

MW 20210827

(上接第37页)

500mm, Y轴行程为450mm, Z轴行程为500mm, 工作台尺寸为600mm×500mm, 定位精度和重复定位精度分别为0.005mm和0.01mm, 刀库容量为20把刀, 换刀方式为机械手换刀。

4 加工效果验证

组合排布的加工方式在批量加工中得到了很好的应用。批量加工15000件产品, 检测合格率为99%, 加工质量得到了很大的提升。加工效果如图3所示。



图3 加工效果

用传统方法加工一件成品需要25min, 采用组合排布方法加工一组(28件)成品只需要135min, 加工效率得到了有效的提升。

5 结束语

采用组合排布加工的工艺方法, 有效解决了定位块产品的装夹和变形难题, 降低了操作人员的劳动强度, 加工质量完全满足图样要求, 产品合格率达到99%以上。该方法适用于类似小型零件的大批量加工, 可大幅提高加工效率, 降低生产成本。

参考文献:

- [1] 芦书荣, 周培, 沈枫, 等. 机械设计基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2020.
- [2] 丁仁亮. 金属材料及热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] 刘力. 机械制图[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [4] 胡榕华. 公差配合与测量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [5] 赵长明, 刘万菊. 数控加工工艺及设备[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [6] 宋广庆, 肖庆和. 机械制造与质量控制技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.

MW 20210806