

淬火油含水量 对轴承套圈淬火锥度变形的影响

南京科润工业介质有限公司 袁福东，王涛，朱骅

【摘要】滚动轴承套圈淬火变形是热处理质量控制难点，主要包括圆度变形、锥度变形和尺寸涨大变形。研究了圆锥滚子轴承套圈因淬火油中含水量超标引起淬火锥度变形增大的问题，发现对淬火油除水处理后锥度变形明显改善，分析并提出了影响机理，希望对热处理工作者在实际生产中有借鉴作用。

【关键词】圆锥滚子轴承；锥度变形；淬火油；水分

1 序言

轴承套圈在热处理过程中会产生多种变形，主要包括圆度变形、锥度变形和尺寸涨大变形。其中锥度变形如果过大，将导致热处理后磨削加工的磨削量增加，严重时甚至出现黑皮而造成大量废品，带来经济损失。

众所周知，套圈淬火时产生锥度变形的原因是套圈的两端冷却不均匀、不同步。而导致套圈两端冷却不均匀、不同步的常见原因主要有以下3点：①套圈结构影响：

有资料表明，轴承套圈的热处理锥度变形是在淬火冷却过程中产生的^[1]。据研究^[2]，对于圆锥滚子轴承套圈，薄端和厚端虽在同一冷速条件下几乎同一时刻停止收缩，但两者的收缩量大不相同，这与两端壁厚差有关。且在不同的冷却条件下，这种差值更加明显。

②设备影响：

笔者工作中发现，深沟球轴承外圈在网带炉热处理过程中，当套圈淬火后出油时处于“竖放”（即外圆面接触网带）状态时，锥度变

形较小，甚至没有；处于“平放”（即端面接触网带）状态时，锥度变形最大。这与其它研究者的结论相符^{[2][3]}。

这是因为，当套圈处于“平放”时，一端接触淬火油槽网带，另一端不接触。接触的一端除了受到淬火油的冷却作用外（液体-固体传热），还受到网带的传热作用（金属固体之间传热），因此导致两端冷却产生了不同步性，从而加剧了锥度变形。针对该影响因素，有的网带炉在油槽中配备了二级小网带，使套圈在淬火冷却过程中两端先后与二级小网带和提升网带接触，并进行上下振动，以缩小这种散热不均匀性。

设备网带传热导致套圈两端冷却不均匀的影响机制，对大部分轴承套圈的锥度控制不利，但对于某些轴承套圈却有意外作用。例如对于圆锥滚子轴承，由于两端壁厚不一致，对冷却强度的需求亦不同。因此可以利用这种机制，来加强厚端的冷却效果，从而减小圆锥滚子轴承套圈的淬火锥度变形。

③淬火油流动均匀性和油温均匀性影响：

淬火槽一般都配有淬火油循环搅拌装置，应根据淬火套圈规格合理选用相关参数设置。若配备或选用不当，使得淬火油流动不均匀，导致油槽中不同部位淬火油流速不一致，并使得油槽中不同位置的油温差异过大，都会造成淬火套圈两端冷却不同步，从而导致锥度变形增加。需要注意的是，油槽循环搅拌要求均匀性好，强度并不需要太大，否则很可能会增大椭圆变形。

2 问题

某轴承企业热处理设备为保护气氛网带炉，使用的淬火油为南京科润工业介质股份有限公司的轴承专用淬火油 KR028G。其中型号为

32219 的外圈（材质 GCr15，外径 $\phi 170.5\text{mm}$ ，高度 43.3mm ），热处理锥度变形要求 $\leq 0.20\text{mm}$ ，一直生产正常。某段时间开始套圈淬火锥度变形突然增大，为此，各方进行了详细排查：结果发现设备状态、工艺、材料都与之前相当。将油槽中淬火油送至厂家进行检测，按照 ASTM D6304-16 《卡尔费休库仑滴定法测定石油产品、润滑油和添加剂中水分含量标准方法》进行测量，发现水分超标。找到疑似进水源进行排查防护后，对淬火油做了除水处理，处理后水分含量合格。具体水分含量检测结果见表 1。

表 1 除水前后水分检测结果 ($\leq 0.06\%$ 为合格)
Table 1 Water detection results before and after dewatering ($\leq 0.06\%$ is qualified)

| 油品状态 | 水分/% |
|------|------|
| 除水前 | 0.15 |
| 除水后 | 0.03 |

3 锥度变形改善结果

在除水前后随机各抽取 50 件套圈做对比试验，除水前后套圈的锥度变化的具体数据如图 1 所示，从图 1 中可以看出，除水之前大部分套圈的锥度都 $> 0.20\text{mm}$ ，即使有符合要求的，也基本上是在锥度合格的上限值附近 ($0.16-0.20\text{mm}$)；除水之后，锥度变形得到了明显的改善，均在合格范围之内。

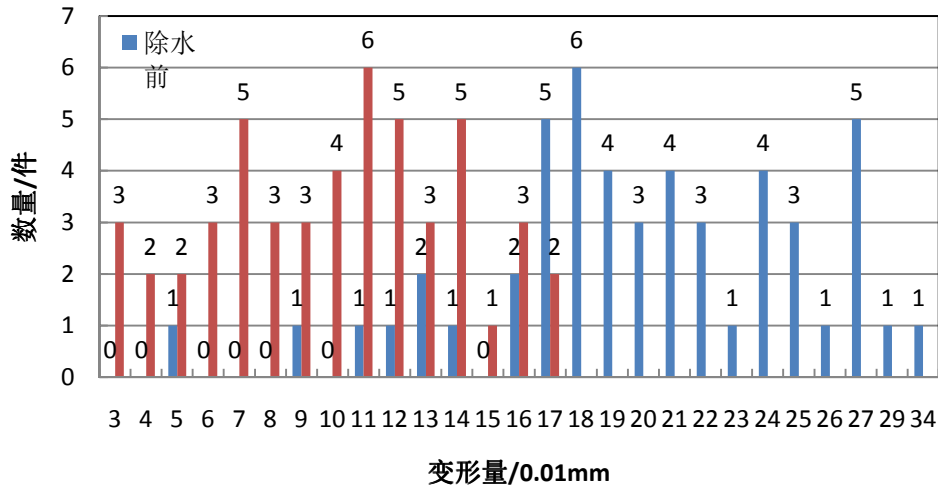


图1 除水前后锥度变形数据对比

除水前后锥度变形分布情况如表2所示：对水分超标的淬火油除水后，淬火产品锥度变形平均值从 0.199 降到 0.098mm，最大值从 0.34mm 降到 0.17mm，合格率从 54%提高到 100%，轴承套圈产品淬火锥度变形明显好转。

表2 除水前后的锥度变形分布
Table 2 Distribution of taper deformation before and after water removal

| 槽油状态 | 平均值/mm | 最大值/mm | 合格率/% |
|------|--------|--------|-------|
| 除水前 | 0.199 | 0.34 | 54 |
| 除水后 | 0.098 | 0.17 | 100 |

4 分析与讨论

4.1 淬火冷却过程三阶段

轴承套圈在淬火油中的冷却过程可分为三个阶段：蒸汽膜冷却阶段、沸腾冷却阶段、对流冷却阶段，如图2所示。

a. 蒸汽膜冷却阶段：当红热套圈浸入淬火油后，淬火油会受热发生汽化并立即在套圈表面形成一层蒸汽膜，套圈的热量主要通过蒸汽膜的辐射和传导来传热，此时套圈冷却速度缓慢，直到套圈表面所提供的热量不能足以维持形成蒸汽膜所需要的热量时，蒸汽膜破裂，开

始转入沸腾阶段。

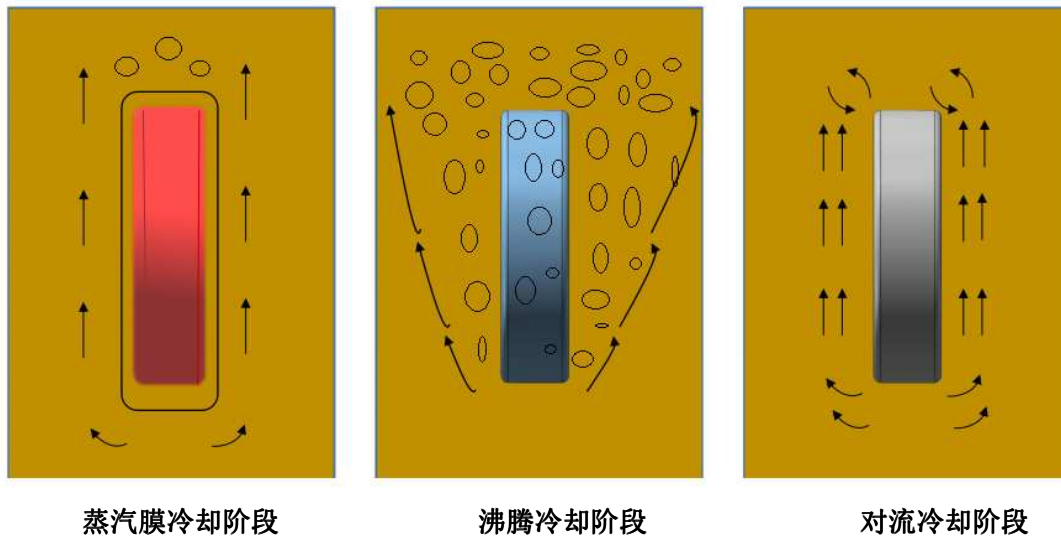


图2 淬火冷却过程不同阶段示意图

蒸汽膜阶段向沸腾阶段转变的温度，称为淬火油的特性温度。特性温度与淬火油的配方和物理性能有关，淬火油的特性温度高，说明淬火套圈可在较高的温度下进入快速冷却阶段。淬火油与套圈的相对运动，如油品搅动、套圈的振动等都可使蒸汽膜提前破裂。当同一套圈上不同位置的尺寸形状不一致时，其蒸汽膜的厚度也不同，从而导致蒸汽膜破裂的时间不一致，最终使得套圈不同部位冷却不一致、不均匀。因此一般希望蒸汽膜阶段越短越好，以提高冷却均匀性^[4]。

b. 沸腾冷却阶段：蒸汽膜破裂后，套圈直接与淬火油接触，淬火油在套圈表面产生沸腾现象，套圈的热量被油品迅速吸收，散热速度加快，冷却速度达到最大值。套圈表面的温度迅速减低，当套圈表面温度低于液体沸点时，沸腾阶段结束。

c. 对流冷却阶段：当套圈表面温度低于液体沸点时，进入对流冷却阶段，此时套圈与淬火油之间的传热方式主要以对流传导方式进行。GCr15 材料的 Ms 点是 202°C ^[5]，处于 KR028G 等绝大多数淬火油的对流冷却阶段，因而为了更好的控制变形，通常希望该阶段的冷却速度

尽量慢，以减小马氏体转变带来的组织应力。

4.2 含水量超标对蒸汽膜的影响

采用符合 ISO9950 (GB/T30823) 标准的冷却特性测试仪 KR-SQT 对上述除水前后的 KR028G 淬火油进行冷却性能测试，冷却曲线对比如下图 3 所示。

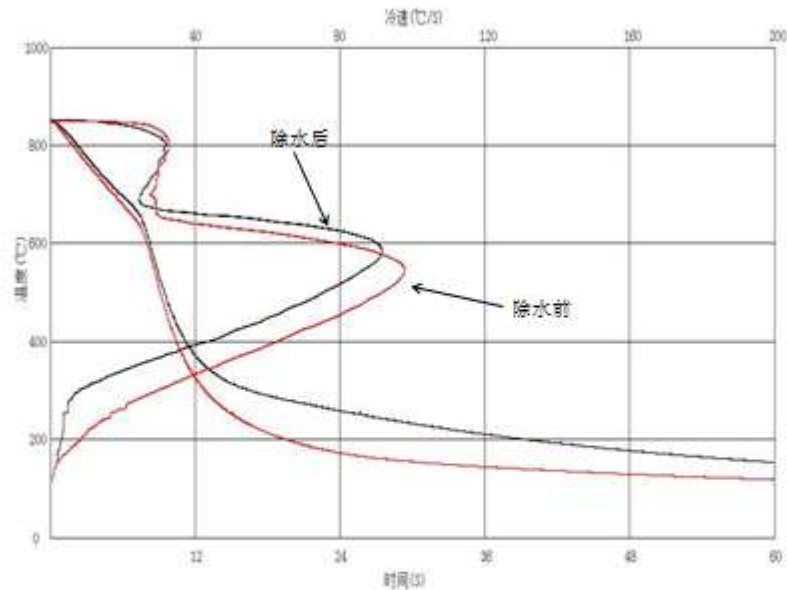


图 3 除水前后淬火油冷却性能曲线对比

Figure 3 Comparison of quenching oil cooling performance curves before and after water removal

从上图 3 可见：除水前的淬火油由于水分含量超标，导致特性温度降低、蒸汽膜阶段延长。如前文所述，蒸汽膜阶段越长，同一套圈上不同部位冷却的同步性和均匀性越差，因而造成套圈淬火锥度变形加剧。

4.3 含水量超标对冷却均匀性的影响

淬火油与水是不互溶的，因此水在油品中的分布很难完全均匀。由于淬火油的密度要比水的密度小，所以通常从淬火油槽底部到表面，油中的水分含量依次降低。而由图 3 可知，水分含量增加会使得淬火油最大冷速和低温冷速均增加，表 3 中给出了除水前后最大冷速和低

温冷速测量结果。正是由于水分会直接影响油品冷却速度，而水分本身在油中分布不均匀，因此导致套圈淬火冷却不均匀，造成淬火锥度变形增加。

表 3 除水前后 300℃冷速测试结果
Table 3 300 °C cooling rate test results before and after water removal

| 槽油状态 | 最大冷速/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ | 300℃冷速/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|------|--|--|
| 除水前 | 97.8 | 29.9 |
| 除水后 | 91 | 8.2 |

5 结束语

淬火油中含水量增多会延长套圈淬火时的蒸汽膜阶段，加上水分在油中分布不均匀导致套圈冷却不均匀，因而影响了淬火套圈的锥度变形。这是生产中遇到锥度变形问题时，应注意和分析的一项重要因素。

【参考文献】

- [1] 杨健. 轴承套圈热处理锥度变形的探讨[J]. 轴承, 2005, (10):31-33.
- [2] 李广志. 圆锥套圈热处理的锥度形变分析[J]. 轴承, 1993, (12):16-19.
- [3] 吕永江. 轴承外圈淬火锥度变形分析[J]. 轴承, 2002, (5):27-28.
- [4] 余瀚森. 淬火冷却过程中蒸汽膜现象的解读[J]. 金属加工(热加工), 2019, (8):61-65.
- [5] 樊东黎. 热处理技术数据手册(第3版第4卷)[M]. 机械工业出版社, 2006:614.