

# φ63mm滚珠丝杠中频感应淬火工艺试验

孔令飞, 仝威, 安均, 张远

山西航天清华装备有限公司 山西长治 047100

**摘要:** 丝杠副是电动执行系统中的关键核心部件, 尤其对于滚珠丝杠来说, 要求其表面具有高硬度、高耐磨、心部高韧性等优异的综合力学性能。因此, 对产品表面进行中频感应淬火是一道重要工序。分别介绍了φ63mm的GCr15SiMn和GCr15轴承钢滚珠丝杠的中频感应淬火工艺试验过程和结果, 阐述了轴承钢制滚珠丝杠中频感应淬火的技术特点及工艺规律。

**关键词:** 滚珠丝杠; 表面淬火; 中频

## Process testing on medium frequency quenching of φ63mm ball screw

KONG Lingfei, TONG Wei, AN Jun, ZHANG Yuan

Shanxi Aerospace Qinghua Equipment Co., Ltd., Changzhi 047100, Shanxi, China

**Abstract:** The lead screw is the key core components of the electric execution system, especially the ball screw requires the comprehensive mechanical properties of high hardness, high wear resistance and high toughness of the heart, of which the medium frequency surface quenching has become an important process of product production. This paper introduces the medium frequency quenching process test of GCr15SiMn and GCr15 bearing steel ball screw with an outer diameter of 63mm. Through the analysis of the process and results, the technical characteristics and technological rules of surface quenching of bearing steel ball screw are understood.

**Keywords:** ball screw; surface quenching; medium frequency

### 1 序言

滚珠丝杠在工作过程中需要承受较高的交变载荷, 如扭转、弯曲、冲击、疲劳, 同时在转动和滑动部位承受摩擦, 在这些交变载荷的综合作用下, 滚珠丝杠的失效形式主要为疲劳和磨损<sup>[1]</sup>, 因此要求其必须具有较高的韧性、强度、硬度、耐磨性, 以及良好的尺寸稳定性。采用GCr15SiMn和GCr15等轴承钢进行调质或球化退火处理进行预先热处理, 再对其工作部位表面进行中频感应淬火, 是滚珠丝杠材料和热处理工艺的主要选择。

### 2 GCr15和GCr15SiMn轴承钢材料及淬火特点

滚珠丝杠与常用结构钢中频感应淬火相比, 存在较大的不同, 主要体现在材料的中频感应淬火特点上。GCr15是一种传统的高碳铬轴承钢, 具有高淬透性和接触疲劳强度、良好的尺寸稳定性和耐蚀性, 是国产滚珠丝杠常用的材料之一<sup>[2]</sup>。GCr15SiMn是一种高铬、高碳轴承钢, 在GCr15钢的基础上适当地提高了Mn、Si含量, 严格控制了P、S等有害元素含量, 使其弹性极限、淬透性和耐磨性得到了改善, 具有较高的疲劳极限和抗压强度<sup>[3]</sup>。

第一作者: 孔令飞, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为金属材料热处理工艺, E-mail: 63249122@qq.com。

GCr15和GCr15SiMn轴承钢均为过共析钢，其淬火温度范围与亚共析结构钢有着根本的不同。根据《热处理工艺手册》中淬火加热温度范围（见图1），亚共析钢淬火加热温度在 $A_{c3}$ 以上，为单一的奥氏体区，对于表面淬火来说，在不引起晶粒粗大的前提下，允许的淬火加热温度范围较宽。过共析钢的淬火加热温度介于 $A_{c1}$ 和 $A_{cm}$ 之间，为奥氏体和碳化物的两相区。若淬火温度高，则碳化物溶入到奥氏体基体中，不仅碳化物减少，而且奥氏体碳含量增加，淬火后转变的马氏体也更易呈粗针状；若淬火温度低，则可能导致组织转变不完全，硬度和淬硬层达不到要求。因此，过共析钢的淬火加热温度范围相对较窄。轴承钢的 $A_{c1}$ 点并不高（GCr15轴承钢为750~760℃），但淬火温度提高到800~860℃，主要因为铬的碳化物不易溶于奥氏体中<sup>[4]</sup>，由此进一步压缩了轴承钢的淬火温度范围，造成轴承钢对温度变化很敏感的结果，而中频感应淬火因为不能直接设定温度，所以保证中频感应淬火加热温度的准确度和一致性，就需要以严格的过程控制为基础。

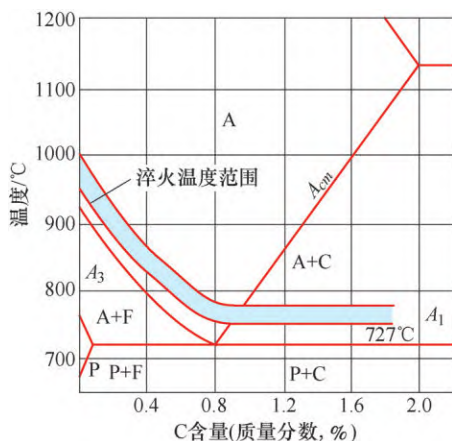


图1 淬火加热温度范围

### 3 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠及技术要求

$\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠的滚道结构尺寸如图2所示。材料选择GCr15或GCr15SiMn轴承钢，预先处理状态为球化退火+调质，滚道深度4.8mm。表面中频感应淬火采用硬开滚道模式，即表面中频感应淬火前为光轴状态，直径方向留余量1mm。

滚珠丝杠的传动功能是通过钢球在滚道内滚动时带动螺母运动的，一般企业所采用的钢球硬

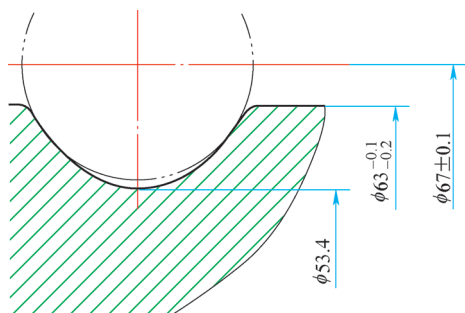


图2  $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠滚道结构尺寸

度为60HRC。基于丝杠耐磨性和长期往复运动的需要，丝杠理想的硬度分布曲线要保证齿底硬化层的表层硬度在58~63HRC<sup>[2]</sup>。因此，确定 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠技术要求为硬度 $\geq 58\text{HRC}$ ；金相组织要求马氏体等级为1~4级，即按JB/T 1255—2014《滚动轴承 高碳铬轴承钢零件 热处理技术条件》执行，由隐晶、细小结晶或小针状马氏体、均匀分布的细小残留碳化物和少量残留奥氏体组成；淬硬层深度 $\geq 5.5\text{mm}$ ，即不低于滚道深度+单边余量，评判采用硬度法，即从表面至硬度58HRC处的距离。

### 4 GCr15SiMn滚珠丝杠试验

GCr15SiMn轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠的中频感应淬火工艺试验（见图3）共进行7次，采用连续淬火、自动喷液方式。



a) 试验过程



b) 工艺参数监控

图3  $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠中频感应淬火试验

#### 4.1 试验条件

1) 感应器：感应器是感应淬火的主要工装，施感导体则是感应器中产生磁场加热零件的部分。 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠中频感应淬火试验用感应器（见图4）的施感导体由 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的方铜管弯制而成，共3圈，其内径为 $74\text{mm}$ ，即施感导体内圆与零件外圆间隙为 $5\text{mm}$ 。

2) 淬火冷却介质： $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠中频感应淬火试验用淬火冷却介质为德润宝F2000淬火液，浓度为 $8\% \sim 10\%$ ，使用温度为 $20 \sim 45^\circ\text{C}$ 。

#### 4.2 试验过程

$\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠各次中频感应淬火试验参数见表1。



图4  $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠中频感应淬火试验用感应器

表1 GCr15SiMn轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠中频感应淬火试验参数

| 试件编号 | 频率/Hz | 淬火冷却介质流量/ (L/min) | 扫描速度/ (mm/min) | 转速/ (r/min) | 电压/V | 电流/A | 功率/kW |
|------|-------|-------------------|----------------|-------------|------|------|-------|
| 1    | 2430  | 34.5 × 2          | 280            | 160         | 397  | 255  | 101   |
| 2    | 2400  |                   | 260            | 160         | 385  | 241  | 63    |
| 3    | 2400  |                   | 260            | 160         | 373  | 236  | 88    |
| 4    | 2400  |                   | 200            | 160         | 324  | 211  | 67.2  |
| 5    | 2300  |                   | 120            | 160         | 263  | 163  | 43    |
| 6    | 2400  |                   | 275            | 160         | 388  | 239  | 92    |
| 7    | 2400  |                   | 100            | 200         | 255  | 156  | 39    |

#### 4.3 检测结果

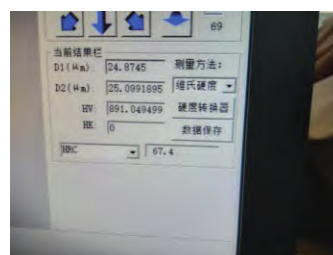
各次中频感应淬火试验后分别切取试样进行硬度梯度检测，如图5、图6所示，金相组织检测如图7所示，检测结果见表2。



图5 检测试样

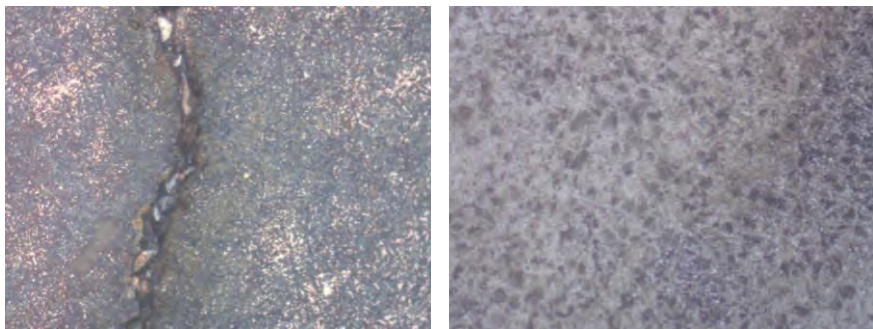


a) 显微硬度计JMHVS-1000-XYZ



b) 实测硬度值

图6 硬度梯度检测



a) 3号试样 (可见裂纹)

b) 7-1号试样 (马氏体4级)

图7 金相组织 (500×)

表2 GCr15SiMn轴承钢制 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠中频感应淬火试验结果

| 试样编号 | 距表面距离/mm |      |      |      |      |      |      |      |      | 淬硬层深度/mm | 金相组织（马氏体）/级 |
|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|-------------|
|      | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 8.5  |          |             |
|      | 硬度HRC    |      |      |      |      |      |      |      |      |          |             |
| 1    | 60.0     | 59.3 | 62.2 | 58.5 | 61.4 | 64.9 | 62.4 | 45.9 | —    | 7.5      | >4          |
| 2    | 58.1     | 59.3 | 60.7 | 60.2 | 58.6 | 63.4 | 60.2 | 57.3 | 50.6 | 7.5      | >4，淬裂       |
| 3    | 55.8     | 57.9 | 56.2 | 61.4 | 64.1 | 54.2 | 48.2 | —    | —    | 5.5      | >4，淬裂       |
| 4    | 59.5     | 59.8 | 57.6 | 61.2 | 59.5 | 52.4 | 49.1 | —    | —    | 5.5      | >4          |
| 5    | 57.6     | 60.0 | 60.0 | 60.5 | 60.7 | 59.3 | 56.7 | 43   | —    | 6.5      | >4          |
| 6    | 54.7     | 57.9 | 59.5 | 57.6 | 60.0 | 57.6 | 57.4 | 41.8 | —    | 6.0      | >4          |
| 7-1  | 66.6     | 67.2 | 67.2 | 66.1 | 66.6 | 67.2 | 63.7 | 64.2 | 61.9 | 8.5      | 4           |
| 7-2  | 63.1     | 62.9 | 63.7 | 64.6 | 65.1 | 67.2 | 64.4 | 60.2 | 55.8 | 8.0      | 4           |

注：1~4号试样为淬火状态时进行的检测；5号、6号试样为回火状态下进行的检测；7号试样分为100℃回火和140℃回火，分别编号7-1和7-2。

#### 4.4 结果分析

1) 由表2试验结果可知，第7次试验检测结果满足 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠中频感应淬火技术要求。

2) 第7次试验结果与之前相比，主要区别为感应器与零件的相对移动速度低，功率也随之较低，即该次淬火总体方案为通过降低移动速度来增加导热时间，以此促进加热层内温度均匀性，同时增加淬硬层深度。

3) GCr15和GCr15SiMn轴承钢淬火的金相组织主要由淬火温度决定，作为过共析钢，理想的淬火金相组织应为马氏体基体上均匀弥散分布着细小球状碳化物，马氏体碳含量不高，即马氏体基体具备一定的韧性，而弥散分布的碳化物则可提高硬度和耐磨性。随着淬火温度的升高，碳化物逐渐溶于奥

氏体基体中，奥氏体及淬火后的马氏体碳含量随之提高，马氏体的显微组织形貌逐渐向针状转变，温度越高，马氏体针状组织越粗大，塑性与韧性急剧降低，加大了淬裂倾向或零件服役过程中产生裂纹的倾向。同时，碳化物逐渐减少，温度高至 $A_{cm}$ 时消失，不再起到提高硬度和耐磨性的作用。

4) 钢在感应淬火加热时，会出现两种淬火加热状态，一种是电流透入深度大于硬化层深度，称为透入式加热；另一种是电流透入深度小于硬化层深度，称为热传导加热。透入式加热和热传导加热对淬硬层的影响比较<sup>[4]</sup>如图8所示。从图8可看出，透入式加热方式的温度梯度相对平缓，且与前述试验结果契合。因此，当进行深淬硬层淬火时，在频率一定的情况下，采用热传导加热方式是增加淬硬层

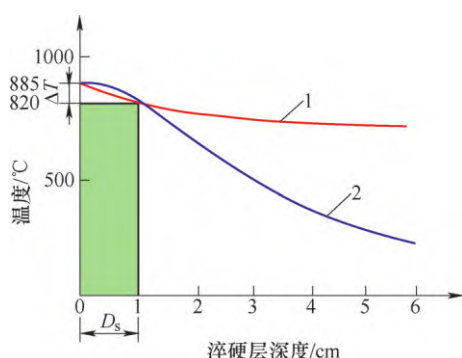


图8 透入式加热和热传导加热对淬硬层的影响比较

1—热传导加热 ( $t=10\text{s}$ ,  $\Delta t_1=65^\circ\text{C}$ ,  $\eta=9\%$ )

2—透入式加热 ( $t=4\text{s}$ ,  $\Delta t_2=65^\circ\text{C}$ ,  $\eta=21\%$ )

的有效方法。

## 5 GCr15SiMn和GCr15轴承钢对比试验

### 5.1 试验过程

采用相同参数分别对GCr15SiMn和GCr15轴

承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠进行中频感应淬火工艺试验 (见表3), 中频感应淬火后, GCr15SiMn轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠切取1个试样进行检测, GCr15轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠则在丝杠的两端和中间各切取1个试样进行检测。

### 5.2 检测结果

各试样分别进行硬度梯度检测、金相组织检测, 结果见表4。

### 5.3 结果分析

1) 从表4可知, 在工艺参数相同的情况下, GCr15SiMn轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠淬硬层比GCr15轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠淬硬层深约1mm。

2) GCr15SiMn轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠淬硬层深度比GCr15轴承钢深的原因, 应是Si、Mn元素能进一步提高钢的淬透性, Si还能提高轴承钢的回火

表3 GCr15SiMn和GCr15轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠对比试验工艺参数

| 频率/Hz | 功率因数 (%) | 扫描速度/(mm/min) | 转速/(r/min) | 电压/V | 电流/A | 功率/kW |
|-------|----------|---------------|------------|------|------|-------|
| 2400  | 40.5     | 70            | 200        | 213  | 122  | 26    |

表4 GCr15SiMn和GCr15轴承钢制 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠对比试验结果

| 取样          | 距表面距离/mm |      |      |      |      |      |      |      | 淬硬层深度<br>/mm | 金相组织（马氏体）<br>/级 |
|-------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|-----------------|
|             | 1        | 2    | 3    | 4    | 4.5  | 5    | 5.5  | 6    |              |                 |
|             | 硬度HRC    |      |      |      |      |      |      |      |              |                 |
| GCr15SiMn   | 61.1     | 63.7 | 62.4 | 59.5 | —    | 61.0 | 53.5 | 50.4 | 5~5.5        | 3               |
| GCr15-1（左端） | 62.0     | 60.0 | 61.2 | 61.2 | 56.5 | 54.6 | —    | —    | 4~4.5        | 3~4             |
| GCr15-2（中间） | 63.4     | 63.1 | 61.9 | 61.4 | —    | 55.5 | —    | —    | 4~4.5        | 3~4             |
| GCr15-3（右端） | 63.6     | 61.4 | 61.8 | 57.9 | —    | —    | —    | —    | ≈4           | 2               |

抗力, 而试验对滚珠丝杠淬硬层深度的评判又是以硬度法为准。

## 6 结束语

1) GCr15SiMn和GCr15轴承钢 $\phi 63\text{mm}$ 滚珠丝杠的中频感应淬火应以严格的过程控制来保证淬火质量和结果的一致性。

2) 在感应淬火频率一定的情况下, 采用较低移动速度来增加导热时间, 即采用热传导加热方式是增加淬硬层深度的有效方法。

3) 淬硬层深度要求较深时, 滚珠丝杠材料选用GCr15SiMn轴承钢比GCr15轴承钢更有利于保证淬硬层深度。

### 参考文献:

- [1] 汪雅琪, 沈超明, 朱治愿. GCr15SiMn 轴承钢的组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (24): 121-123.
- [2] 闫野, 盖玉洪, 李保民, 等. GCr15钢滚珠丝杠倾斜感应器淬火的质量分析[J]. 热处理技术与装备, 2014, 35 (1): 17-20.
- [3] 雷日扬. 热处理工艺对机床滚珠丝杠用GCr15SiMn轴承钢性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36 (8): 2003-2006.
- [4] 沈庆通, 梁文林. 现代感应热处理技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

MW 20240928