

丝杠加工的隐形壁垒：热处理及热变形解决方案

——人形机器人专题（六）

 作者：光大环保电新 殷中枢、黄帅斌

2024年3月7日

 证券研究报告

- 丝杠加工中的热处理工艺及设备
- 热处理带来的形变及解决方案
- 工艺升级，兼顾效率与精度
- 投资建议
- 风险分析



表1: 热处理工艺

目的	工艺	应用场景
预备热处理	退火和正火	退火和正火用于经过热加工的毛坯。含碳量大于 0.5%的碳钢和合金钢，为降低其硬度易于切削，常采用退火处理;含碳量低于0.5%的碳钢和合金钢，为避免其硬度过低切削时粘刀，而采用正火处理。退火和正火尚能细化晶粒、均匀组织，为以后的热处理做准备。退火和正火通常安排在毛坯制造之后、粗加工之前进行。
	时效处理	时效处理主要用于消除毛坯制造和机械加工中产生的内应力。对于一般精度的零件，在精加工前安排一次时效处理即可。精度要求较高的零件(如座标镗床的箱体等)，应安排两次或数次时效处理工序。简单零件一般可不进行时效处理。除铸件外，对于一些刚性较差的精密零件(如精密丝杠)，为消除加工中产生的内应力，稳定零件加工精度，常在粗加工、半精加工之间安排多次时效处理。有些轴类零件加工，在校直工序后也要安排时效处理。
	调质	调质即是在淬火后进行高温回火处理，它能获得均匀细致的回火索氏体组织，为以后的表面淬火和渗氮处理时减少变形做准备，因此调质也可作为预备热处理。由于调质后零件的综合力学性能较好，对某些硬度和耐磨性要求不高的零件，也可作为最终热处理工序。
最终热处理	淬火	淬火有表面淬火和整体淬火。其中表面淬火因为变形、氧化及脱碳较小而应用较广，而且表面淬火还具有外部强度高、耐磨性好，而内部保持良好的韧性、抗冲击力强的优点。为提高表面淬火零件的机械性能，常需进行调质或正火等热处理作为预备热处理。其一般工艺路线为:下料—锻造—正火(退火)—粗加工—调质—半精加工—表面淬火—精加工。
	渗碳淬火	渗碳分整体渗碳和局部渗碳，局部渗碳时对不渗碳部分要采取防渗措施(镀铜或镀防渗材料)。由于渗碳淬火变形大，且渗碳深度一般在0.5~2mm之间，所以渗碳工序一般安排在半精加工和精加工之间。其工艺路线一般为:下料—锻造—正火—粗、半精加工—渗碳淬火—精加工。
	渗氮处理	渗氮是使氮原子渗入金属表面获得一层含氮化合物的处理方法。渗氮层可以提高零件表面的硬度、耐磨性、疲劳强度和抗蚀性。由于渗氮处理温度较低、变形小、且渗氮层较薄(一般不超过0.6-0.7mm)，渗氮工序应尽量靠后安排，为减小渗氮时的变形，在切削后一般需进行消除应力的高温回火。

热处理的作用是改善行星滚柱丝杠副各零件的材料性能、切削性能以及消除残余应力。热处理工艺可分为两大类：预备热处理和最终热处理。

预备热处理的作用是改善丝杠切削性能、消除残余应力以及为最终热处理做准备，主要工艺包括调质、退火、正火、时效处理等；最终热处理的作用是提高螺纹的表面硬度以及耐磨性。

资料来源：机械工程师微信公众号



根据郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》：

- 1) 丝杠表面热处理采用感应淬火，硬化层深度 1.5~2.0mm；
- 2) 螺母表面热处理采用渗碳淬火，硬化层深度 1.0~1.4mm；
- 3) 滚柱和内齿圈整体进行调质处理，调质硬度 HB235，齿面氮化处理，齿面硬度不低于 HV600，硬化层深度 0.4~0.5mm。

表2：丝杠加工中的热处理工艺

部位	热处理工艺	出发点
丝杠表面	感应淬火	感应淬火后丝杠表面性能提高，心部具有较高韧性；硬化层深度 1.5~2.0mm
螺母表面	渗碳淬火	可以得到高的疲劳强度、硬度及耐磨性，使其能够承受较大的冲击载荷；硬化层深度 1.0~1.4mm
滚柱和内齿圈	整体进行调质处理	使滚柱和内齿圈在较大的动载荷作用下，能很好地承受弯曲和扭转力的作用，且硬度和耐磨性也显著提高
	齿面氮化处理	避免其在热处理过程中发生较大热变形，又能使其具有优异的耐磨性、耐疲劳性和耐腐蚀性

资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》

表3：丝杠一般工艺流程

序号	丝杠（滚柱丝杠）	滚柱（滚柱丝杠）	丝杠（滚珠丝杠）
1	丝杠毛坯	滚柱毛坯	丝杠毛坯
2	预备热处理	预备热处理	预备热处理
3	校直	校直	校直
4	加工端面及中心孔	加工端面及中心孔	加工端面及中心孔
5	粗车	粗车	粗车
6	高温时效并检验	高温时效并检验	高温时效并检验
7	加工端面及修中心孔	加工端面及修中心孔	加工端面及修中心孔
8	半精车	半精车	半精车
9		滚齿	
10	铣	铣	铣
11	粗磨	粗磨	粗磨
12	感应淬火并检验	表面氮化并检验	感应淬火并检验
13	研中心孔	研中心孔	研中心孔
14	粗磨	粗磨	粗磨
15	探伤	探伤	探伤
16	高温时效并检验	高温时效并检验	高温时效并检验
17	研中心孔	研中心孔	研中心孔
18	半精磨	半精磨	半精磨
19	低温时效并检验	低温时效并检验	低温时效并检验
20	铣键槽	铣键槽	铣键槽
21	磨端部螺纹	磨端部螺纹	磨端部螺纹
22	研中心孔	研中心孔	研中心孔
23	精磨并全面检验	精磨并全面检验	精磨并全面检验
24	入库	入库	入库

资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》、郑红《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》



表4：热处理基本工艺分类

序号	工艺类型	概述及作用	工艺细分
1	整体热处理	对工件进行穿透加热，以改善整体的强度、硬度、塑性和韧性	分为退火、正火、淬火、回火、调质等8小类，其中退火、正火、淬火、回火是最常用的热处理方法
2	化学热处理	是改变工件表层化学成分、组织和性能的金属热处理工艺，将工件放在含碳、氮或其它合金元素的介质中加热，保温较长时间，使工件表层渗入碳、氮、硼等元素，以提高工件硬度、耐磨性等	分为渗碳、渗氮、碳氮共渗等7小类
3	表面热处理	是只加热工件表层，以改变其表层力学性能的金属热处理工艺，使工件具有外部强度高、耐磨性好，而内部保持良好韧性、抗冲击力等优点	分为表面淬火和回火、物理气相沉积等5小类，其中表面淬火因为变形、氧化及脱碳较小而应用较广

资料来源：丰东股份招股说明书（公司现已更名为金财互联）

表5：热处理基本工艺分类（四把火）

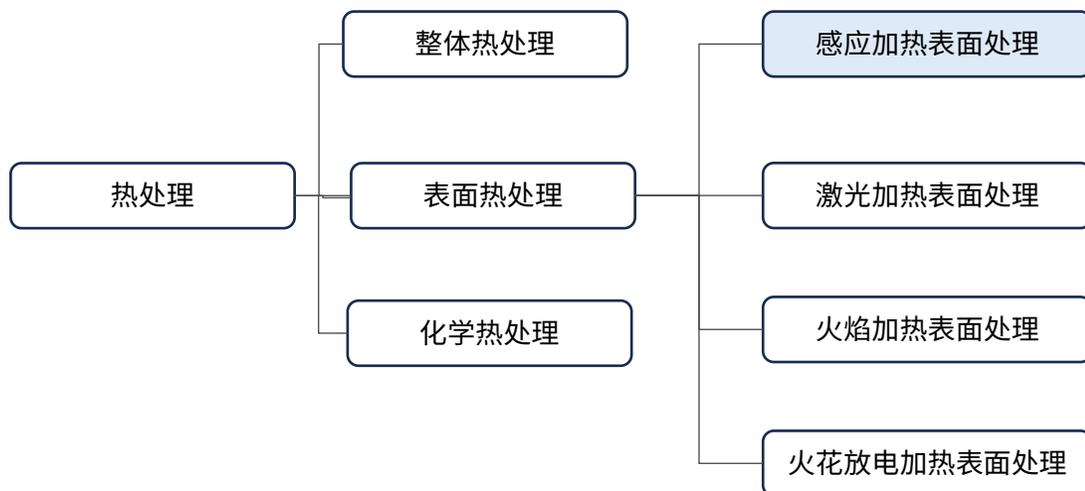
工艺	介绍
退火	退火是将工件加热到适当温度，根据材料和工件尺寸采用不同的保温时间，然后进行缓慢冷却的热处理工艺
正火	将工件加热到适宜的温度保温后在空气中冷却的热处理工艺；正火的效果同退火相似，只是得到的组织更细，常用于改善材料的切削性能
淬火	将工件加热保温后，在水、油等淬冷介质中快速冷却的热处理工艺；最常见的有水冷淬火、油冷淬火、气冷淬火等
回火	将淬火后的工件在高于室温而低于650°C的某一适当温度进行长时间的保温，再进行冷却的热处理工艺

资料来源：丰东股份招股说明书（公司现已更名为金财互联）

整体热处理是指对工件进行穿透加热，以改善整体的强度、硬度、塑性和韧性。表面热处理和化学热处理主要解决零件的表面强化问题，是金属材料整体热处理的补充和完善，三者相互配合，可全面达到零件多种多样的使用性能要求。其中退火、正火、淬火、回火是最常用的热处理方法，俗称“四把火”。



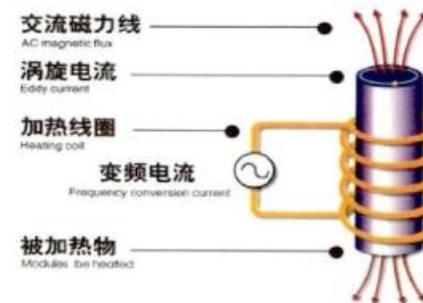
图1：热处理工艺分类图



资料来源：升华感应公开转让说明书

表面感应加热淬火是滚珠丝杠改善表面耐磨性的重要热处理工艺之一。该工艺主要是利用电磁感应原理，以涡流形式将丝杠表面快速加热至淬火温度，而后急剧冷却，形成一定厚度的表面淬硬层，而心部仍保持原有的组织形态。因此，可以满足滚珠丝杠表层具有高硬度、耐磨性而心部则具有高强韧度配合的综合力学性能要求。目前，国内精密滚珠丝杠采用的感应加热淬火工艺并不完善，普遍存在淬硬层浅、硬度梯度分布不合理、变形大等问题，这是制约其定位精度等可靠性指标提升的重要因素之一。

图2：感应加热原理示意图

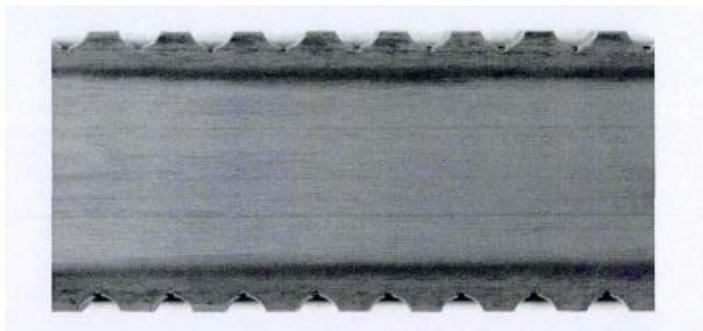


资料来源：闫野《精密滚珠丝杠表面感应加热淬火工艺研究》

根据感应电流频率的不同，感应加热淬火可分为高频淬火（30-1000kHz）、中频淬火（小于10kHz）和低频脉冲淬火（约27MHz）三类。与传统热处理相比，感应加热淬火具有如下优点：（1）加热速度快，热损失小，热效率高。（2）表面氧化脱碳少，淬火变形很小。（3）缺口敏感性低，而冲击韧性、耐磨性和疲劳强度高。（4）淬硬层深度易于控制。（5）生产率高，废品率低，易于实现机械自动化生产。



图3：丝杠淬硬层剖面显示



资料来源：黄娟《滚珠丝杠关键制造工艺优化及精度控制方法研究》

按照使用频率的不同，感应淬火分为超高频、高频、中频和工频四种，淬硬层的深度取决于感应电流进入丝杠表面的深度 h ，其又取决于感应电流的频率 f ，可表示为：

$$h = \frac{20}{\sqrt{f}} (800^{\circ}\text{C})$$

高频感应加热的电流频率为200~300kHz，淬应层深度可达1.0~2.0mm，对于行星滚柱丝杠来说，其螺纹牙高度为0.8mm，因此采用高频感应加热淬火来满足其表面热处理性能要求。

国内滚珠丝杠在热处理加工中普遍存在淬硬层浅、硬度分布不合理、组织均匀性差、耐磨性差等缺点，在滚珠丝杠传动系统运行过程中通常发生以磨损、接触疲劳为主的表面损伤失效。这是由于淬火过程中没有对滚道形成有效的淬硬深度和合理的硬度梯度所致。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/187005163110006050>