

大模数内齿式轴承齿部感应淬火研究

李省伟¹, 楚德娜¹, 高秋然², 李玉华¹, 高聪颖²

1. 洛阳轴研科技有限公司 河南洛阳 471000

2. 洛阳轴研所有限公司 河南洛阳 471000

摘要: 主驱动内齿式轴承为大型盾构掘进机关键零部件。虽然我国大型掘进机95%以上的零部件已实现自主研制, 但大型主驱动轴承几乎依赖进口。高承载、高可靠性大型盾构掘进机主驱动轴承的内齿模数较大, 对齿部感应淬火的硬度和硬化层深度技术要求更高。通过齿轮感应淬火感应器设计、淬火工艺研究与实际生产验证, 取得了良好效果。

关键词: 大模数; 主驱动轴承; 齿面齿根感应淬火; 硬化层

Research on induction hardening of tooth of bearing with large modulus internal gear

LI Shengwei¹, CHU Dena¹, GAO Qiuran², LI Yuhua¹, GAO Congying²

1. Luoyang Bearing Research Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China

2. Luoyang Bearing Institute Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China

Abstract: Main drive internal gear bearing is a key component of large shield boring machine, More than 95% of the parts of the large shield boring machine in China have been independently developed, almost depends on imports. The gear modulus of the main drive bearing with high load bearing, high reliability of the large shield boring machine is larger, for which , the hardness and the depth of the hardening layer of the induction quenching on tooth put forward higher technical requirements. This paper through the design of the induction quenching sensor and the quenching process has been studied and verified by actual production, and good results have been achieved.

Keywords: large modulus; main drive bearing; induction quenching of tooth surface and root; hardening layer

1 序言

大型盾构掘进机主驱动轴承为内齿式三排圆柱滚子组合轴承(以下简称内齿式轴承), 工作时需满足复杂工况下的高可靠性要求, 其施工条件复杂, 轴承工作时承受较大冲击载荷, 因此要求轴承具有高可靠性。

高可靠性的一个重要指标是轴承齿部的承

载能力, 因此对内齿式轴承的齿部感应淬火比常规齿部淬火提出了更高的技术要求。此轴承内圈设计模数为25, 硬化层深度要求 $\geq 5.5\text{mm}$, 硬度 $\geq 53\text{HRC}$, 远超常规轴承齿部感应淬火技术要求, 也是轴承领域大型掘进机全面自主化的“卡脖子”问题。

基金项目: 盾构/TBM 关键核心零部件开发及应用项目(TC220H062)。

2 零件技术要求

内齿式轴承材料为42CrMo钢，其局部齿部结构如图1所示。内齿技术参数见表1，齿面、齿根淬火技术要求见表2。

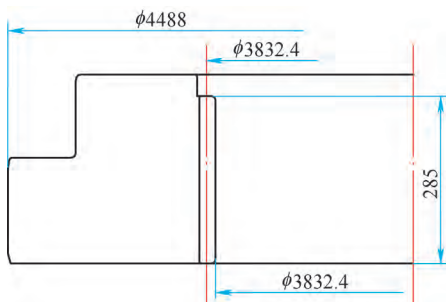


图1 轴承零件局部齿部结构

表1 内齿技术参数

模数 m	齿数 Z /齿	压力角 α / (°)	齿全高 h /mm	齿宽 b /mm
25	153	20	53.75	285

表2 内齿表面淬火技术要求

淬火区域	齿面、齿根
硬度HRC	53~60
淬硬层深度/mm	齿面>5.5; 齿根>3.5
磁粉检测无裂纹	

3 技术难点

此轴承内圈的齿结构设计模数为25，硬化层深度要求 $\geq 5.5\text{mm}$ ，硬度 $\geq 53\text{HRC}$ ，远超常规轴承齿部感应淬火技术要求。感应淬火硬度和硬化层深度是感应淬火关键技术指标，由于齿部的几何形状特点，齿面齿根硬化层深度和硬度的提高，因此感应淬火出现裂纹的风险大幅增加，而裂纹又是热处理的“天敌”。零件硬化区域内有楞存在，而在感应淬火区域内很忌讳有孔、楞、沟、槽等结构存在，这些结构经常是淬火裂纹的根源，但由于零件的功能需要，这些结构又必须存在，导致其淬火工艺难度加大^[1, 2]。对此，本文从原材料化学成分调研为基础，对零件淬火感应器进行优化设计与验证，感应淬火工艺进行试验，试验效果检测与分析，并对工艺进行生产验证，取得了理想的效果。

4 影响齿部感应淬火质量因素分析

4.1 感应器结构对齿部的感应淬火硬化层分布的影响

中等以上模数齿轮主要是采用单齿沿齿沟逐齿

扫描淬火，而单齿沿齿沟淬火对感应器与齿轮之间的耦合间隙很敏感，若感应器与齿轮耦合不当，则会造成沿齿沟加热不均匀，进而导致硬化层分布不良，造成早期失效，因此感应器要严格仿照内齿式轴承齿部的几何尺寸进行设计与制作。

4.2 材料化学成分对齿部感应淬火硬度的影响

材料淬火硬度主要取决于材料的碳当量，受齿轮的感应淬火、回火工艺影响，当材料碳含量满足产品的热处理硬度要求后，就需要根据产品的几何尺寸设计合适的感应器，选择合理的感应加热与冷却参数。

4.3 中频感应淬火扫描速度对齿部感应淬火硬化层深度的影响

中频感应淬火硬化层深度受感应加热深度与冷却影响，感应加热的透热深度受感应淬火频率影响，热传导深度主要受扫描速度与加热功率影响。为了得到理想的硬化层深度与硬度组合，需要设计合理的淬火工艺参数。

内齿式轴承齿面和齿根中频感应淬火的硬度、硬化层深度是决定其是否具有高可靠性的重要指标，为使轴承内圈的齿面和齿根的淬火质量满足技术要求，针对上述影响因素，对感应器的结构以及中频感应淬火工艺参数进行了研究。

5 相关研究与生产试验

5.1 材料化学成分调整

通过查阅相关资料，并与锻件生产厂家沟通，为了更好地满足产品技术要求，对材料化学成分进行了微调，主要调整材料C含量（质量分数），从标准的0.38%~0.45%提高到0.41%~0.48%（见表3）。

5.2 感应器及工装设计

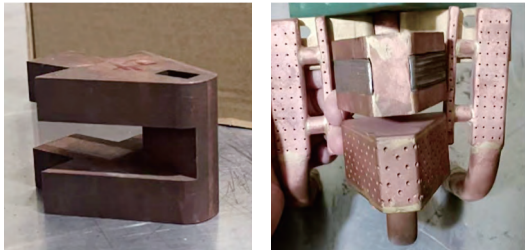
此产品齿部感应淬火技术要求远超常规产品技术要求，根据以往产品加工经验，此产品加工时使用功率预计能达到80kW左右，因此对此感应器按照负载功率100kW进行设计与制作，设计与制作的感应器结构如图2所示。

(1) 设计更好承载能力的感应器加热体 为了提高感应器额定加热功率，感应器有效加热体材料选择纯铜（ $w_{\text{Cu+Ag}} > 99.70\%$ ），此感应器的有效加热部分，增加了的壁厚尺寸，制作采用更为精确的线

表3 内齿式轴承化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	Ni	P	S	Cu	Ti	N	O	H
标准值	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.90~1.2	0.15~0.25	0.015~0.040	≤0.30	≤0.015	≤0.01	≤0.25	≤0.003	≤0.007	≤0.002	≤0.0015
调整后	0.41~0.48	0.17~0.37	0.60~0.80	1.0~1.2	0.15~0.25	0.015~0.040	≤0.30	≤0.015	≤0.01	≤0.25	≤0.003	≤0.007	≤0.002	≤0.0015

注：标准值执行GB/T 3077—2015《合金结构钢》规定。



a) 感应器有效加热体 b) 成品齿淬火感应器

图2 感应器结构设计

切割工艺进行加工，保证了加工尺寸偏差在0.1mm以内，这样可充分保证感应器在加工过程中齿廓热区均匀稳定。

(2) 选用质量更佳的焊接材料 感应器加热体采用线切割工艺制作完成后，与机床底座采用焊接方式组合在一起，焊接的质量与焊接材料会影响感应器承载能力与可靠性，为了保证焊接质量，以及焊接后更好的导电性能，感应器的焊接选用电导率更好的银焊条（含银量约45%）。

(3) 采用质量较好的导磁材料 感应器有效加热体采用的是仿形设计，而在加工产品过程中，想要得到理想的均匀仿形加热区，选择导磁体也尤为关键^[3]，导磁体在感应器中的作用为驱流，让磁感线在需要加热的零件区域更为集中，最终感应器在沿齿沟方向获得均匀的加热区域，也提高感应器的效率。综合多种参数，本产品选用性能优良，厚度为0.35mm的无取向硅钢片，经过仿形线切割加工后，装卡到感应器加热体部分。

(4) 设计制作感应器冷却喷淋装置 影响中频感应淬火质量的两个关键因素：一是设计合理的感应器加热，得到理想的仿形加热区域；二是合适的冷却装置，在热量比较聚集区域需要喷出更多的淬火液带走热量，实现淬火，而在蓄热量较少的区域设计相对少一些的喷淋水量刚好实现淬火，并避免激冷出现淬火裂纹。这就需要设计仿齿廓形装冷却装置，保证每个部位都能冷却得恰好合适。该感

应器创新设计了可以调节直冷与背冷的两路冷却装置，具有更广的适用范围。

5.3 热处理工艺研究

(1) 增加预热工序 增加预热工序的目的是为了减少加工应力，缩小工件初始温度与淬火温度的温差，减小感应加热快速加热产生的热应力，防范感应淬火裂纹风险。具体工艺为，在齿淬火加工前，现在炉内预热零件至100℃，再将产品调装到淬火机床上进行淬火加工。

(2) 工艺试验验证 确保产品加工一次性合格，具体工序如下。

1) 提前验证设备可靠性。

2) 感应器制作完成后，采用扫描式淬火加工。根据上述分析，感应淬火频率一定后，加热功率和扫描速速是影响淬火硬化层深度的主要参数，冷却液的喷淋方式与喷淋流量是影响淬火硬度与淬火裂纹产生的关键参数。根据以往生产经验选定淬火的频率为5kHz，淬火冷却液选用PAG聚二醇水基淬火液，浓度选用10%~12%，由于本产品感应器设计了两路独立冷却，冷却方式采用先背冷后直冷的方式进行试验，设计了9组感应淬火参数进行验证，具体加热参数见表4。

表4 齿部感应淬火试验工艺参数

序号		功率/kW	频率/kHz	扫描速度/(mm/s)
1	A	65	5	3.0
	B	65		3.5
	C	65		4.0
2	A	68		3.0
	B	68		3.5
	C	68		4.0
3	A	72		3.0
	B	72		3.5
	C	72		4.0

6 结果与分析

6.1 无损检测结果

对每组工艺试验进行硬度、硬化层深度、磁粉检测，结果见表5。

表5 齿部感应淬火试验无损检测数据

工艺 编号		齿轮检测项目及数据			
		项目	齿廓左侧	齿廓左侧	齿根
1 [#]	A	硬度HRC	53.4	54.3	53.1
		深度/mm	4.3	4.1	3.1
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
	B	硬度HRC	54.5	55.1	54.1
		深度/mm	4.1	4.0	3.3
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
	C	硬度HRC	54.5	55.1	53.9
		深度/mm	3.8	3.9	3.2
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
2 [#]	A	硬度HRC	53.5	54.5	53.5
		深度/mm	5.2	5.2	3.6
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
	B	硬度HRC	54.3	55.1	54.1
		深度/mm	5.0	5.1	3.4
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
	C	硬度HRC	53.5	53.1	52.9
		深度/mm	4.9	4.8	3.4
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
3 [#]	A	硬度HRC	53.4	54.3	54.1
		深度/mm	6.1	6.0	4.9
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
	B	硬度HRC	54.5	55.1	54.9
		深度/mm	5.5	5.6	4.3
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹
	C	硬度HRC	54.5	55.1	54.9
		深度/mm	5.2	5.1	4.2
		磁粉检测	无裂纹	无裂纹	无裂纹

6.2 切样检测结果

根据无损检测结果，第三组工艺参数可以满足产品技术要求，其中A更适合于生产加工。于是对本组工艺参数加工的齿进行切样检测，并对金相组织评级，切样后的宏观照片如图3所示，齿面与齿根金相组织如图4、图5所示。金相组织评级为5级，晶粒度为8级，符合产品热处理技术要求。



图3 齿部切样宏观形貌

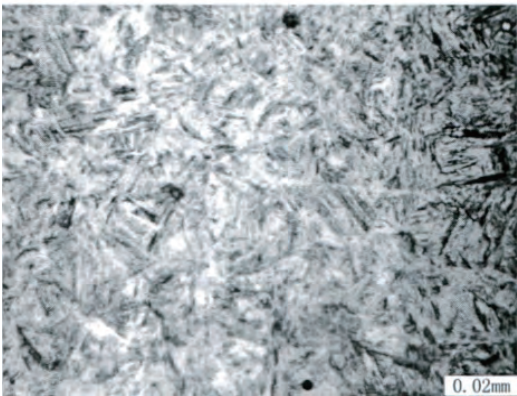


图4 金相组织

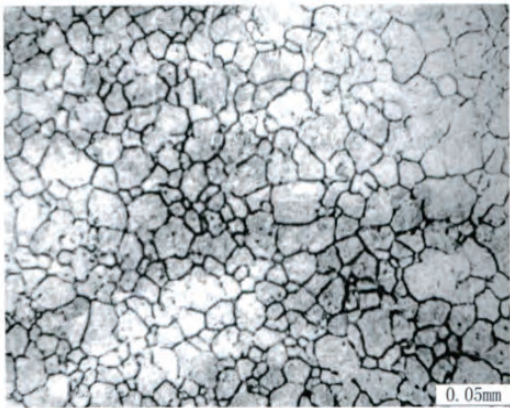


图5 晶粒度

(下转第63页)

3) 施加于模具的压力对淬火的畸变和磨削余量均有较大的影响, 压力增大时可以获得较小的畸变和较大的外径磨削余量, 因此在模压淬火压床设计时应考虑预留足够的压力冗余, 同时设备的主要受力机构应具备足够的强度, 以保证整体设备的持久精度。对于工件而言, 经模压感应淬火后外径磨削余量趋于一致, 散差减小, 应注意外径余量与滚道余量、模具尺寸和施加压力的匹配设计, 压力的选择应综合考虑外径余量和滚道余量的平衡关系, 在提升整体生产效率和产品质量的同时, 避免出现磨削黑皮报废。

6 结束语

SAE5120 钢制轴承套圈渗碳淬火后畸变较大, 采用新开发的矫形模压感应淬火设备可以通过改变矫形压力。淬火液浓度等工艺参数将圆度畸变从 0.4mm 减小到 0.12mm 以内, 而且绝大部分在 0.06mm 附近, 这样给磨削余量优化留下了很大的空间, 进而优化轴承套圈的加工工艺, 达到提质增效的有益效果, 对行业有很大的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册 (第1卷: 工艺基础) [M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 邢振平. GCr15 钢套圈模压淬火规律探讨[J]. 机械工人 (热加工), 2004 (11): 18-22.
- [3] 陈国民. 对齿轮热处理畸变控制技术的评述[J]. 金属热处理, 2012, 37 (2): 1-13.
- [4] 易亮, 朱百智, 蒋运东, 等. 风电用齿圈感应淬火裂纹的防控研究: “第13届中国热处理活动周”论文集[C]. 北京: 中国机械工程学会热处理学会, 2020.
- [5] 张光荣. 控制畸变的模压淬火技术与装备[J]. 金属热处理, 2012, 37 (7): 138-141.
- [6] 闫满刚. 模压式感应淬火和回火技术及装备工艺[J]. 金属热处理, 2010, 35 (3): 129-131.
- [7] TOTTEN G E, BATES C E, CLINTON N A. Handbook of quenchants and quenching technology (Volume 4F) [M]. USA: ASM International, 2024.

MW 20240316

(上接第57页)

6.3 生产验证

根据感应淬火试验得到的第三组A参数, 进行产品加工, 经过淬火、回火处理后, 检测齿面齿根硬度、硬化层深度、磁粉检测均达到了产品技术要求, 大模数、高要求的齿部感应淬火技术, 取得了实质性的突破。

7 结束语

1) 通过仿形设计、线切割制作的感应器, 避免了齿部处的电流密集及过热、过烧等现象, 甚至淬火裂纹的产生, 实现了硬化层仿齿廓形状均匀分布, 硬化层深度超过了6mm。

2) 通过感应器间隙大小及加热功率、扫描速度等工艺参数的调整, 使得齿部感应淬火的淬硬层深度得到有效的控制, 分布均匀, 继而提升了淬火质量。

3) 感应器设计互相独立的两路冷却液的设计,

能够充分保证齿轮的冷却均匀性, 进一步确保了淬火质量的控制, 且调整简单可靠, 易于实施, 质量稳定, 效率高, 具有较好的应用推广价值。

4) 优化后的工艺参数, 满足了齿部所需的淬火硬度、淬硬层深度以及淬火均匀性, 且热后变形小, 达到了产品设计要求, 提高了产品质量。

参考文献:

- [1] 梁朋涛, 李志强, 汤晓敏, 等. 汽车传动轴凸缘的感应淬火工艺研究[J]. 金属加工 (热加工), 2019 (8): 55-57.
- [2] 孔春花, 曹淑芬, 蔡安克, 等. 车辆零件热处理技术及应用实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 124-129.
- [3] 朱会文, 胡晓平, 许建芳. 导磁体在汽车零件感应加热中的应用技术[J]. 热处理, 2003, 18 (3): 36-42.

MW 20240408