

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.11.014

轮毂轴承单元外圈感应淬火工艺优化研究^{*}

张高峰^{1,2}, 唐谊平^{1*}, 宣国军², 黄德杰³, 李 凯², 高 柯²

(1. 浙江工业大学 材料科学与工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江万向精工有限公司, 浙江 杭州 311215; 3. 江西特种电机股份有限公司, 江西 宜春 336000)

摘要:针对轮毂轴承单元在道路使用中,因侧向冲击所引起的滚道压痕会造成车辆行驶过程中存在异响问题,对轮毂轴承外圈零件沟道感应淬火工艺进行了研究。首先,通过调整感应线圈宽度和间距,对轴承外圈沟道淬硬层形状进行了优化;通过调整电源电压与加热时间,得到了合适的淬硬层深度,并基于该方法设计了 4 种工艺方案;然后,采用有限元分析方法,分别对不同工艺方案进行了仿真分析,得到了轴承外圈温度场、淬硬层深度与形状的仿真结果,并且通过工艺实验对仿真结果进行了验证,得到了外圈零件的实际工艺实验结果,同时对有限元与实验结果进行了误差分析;最后,采用路肩冲击试验的方式,验证了工艺优化结果对轮毂轴承抗冲击性能的提升效果。研究表明:感应淬火工艺改进后,外圈内侧沟道接触角处淬硬层深度增加了 0.3 mm,外侧沟道增加了 0.5 mm,同时双沟道淬硬层形状调整成连贯状;仿真结果与工艺试验结果的误差低于 10%;轮毂轴承外圈内侧沟道抗冲击能力平均提高 43.0%,外侧沟道平均提高 21.8%。

关键词:轮毂轴承抗冲击性能;淬硬层深度;淬硬层形状;轴承外圈温度场;路肩冲击试验;材料特性;工艺实验

中图分类号:TH133.33;U463.343;TG156.3

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)11-1596-06

Optimization study of induction quenching process for outer ring of hub bearing

ZHANG Gao-feng^{1,2}, TANG Yi-ping¹, XUAN Guo-jun²,
HUANG De-jie³, LI Kai², GAO Ke²

(1. College of Materials Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Wanxiang Precision Industry Co., Ltd., Hangzhou 311215, China;

3. Jiangxi Special Electric Motor Co., Ltd., Yichun 336000, China)

Abstract: Aiming at the problem of abnormal noise caused by the raceway indentation caused by the lateral impact of the wheel hub bearing unit in road use, the optimization of the raceway induction quenching process for the outer ring of the wheel hub bearing was studied. Firstly, the shape of the outer ring raceway hardened layer was optimized by adjusting the width and spacing of the induction coil, and the power supply voltage and heating time were adjusted to obtain a suitable hardened layer depth. Based on this method, four process schemes were designed. Then, different process schemes were simulated and analyzed by the finite element analysis method, and the simulation results of the temperature field of the outer ring and the depth and shape of the hardened layer were obtained. Further, the simulation results were verified by process experiments, and the actual process improvement effect of the outer ring was obtained. At the same time, the error analysis of the finite element analysis results and the experimental results was carried out. Finally, the impact test of the road shoulder was used to further verify the improvement effect of the process optimization on the impact resistance of the wheel hub bearing. The research results show that after the process improvement, the depth of the hardened layer at the contact angle of the inner raceway of the outer ring increases by 0.3 mm, and the outer raceway increases by 0.5 mm, and the shape of the double raceway hardened layer is adjusted to a

收稿日期:2022-04-12

基金项目:杭州市萧山区重大科技攻关项目(2020111)

作者简介:张高峰(1994-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事轮毂轴承基础技术方面的研究。E-mail:zhanggaofeng@jg.wxqc.cn

通信联系人:唐谊平,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:tangyiping@zjut.edu.cn

coherent shape. The error of simulation results and process test results is less than 10%. The impact resistance of the inner raceway of the outer ring of the hub bearing is increased by 43.0% on average, and the outer raceway is increased by 21.8% on average.

Key words: hub bearing impact resistance; hardened layer depth; hardened layer shape; bearing outer ring temperature field; impact test of road shoulder; material properties; process experiment

0 引言

作为汽车底盘的重要部件,轮毂轴承单元起着承载和传动的重要作用^[1]。

轴承外圈零件结构复杂。通过对沟道区域进行感应淬回火处理,可以使其表层达到较高的硬度,以满足轴承的实际使用需要。有研究人员发现,轴承沟道淬硬层的形状、深度及硬度等特性对于轮毂轴承总成抗冲击性能具有显著的影响^[2]。因此,轮毂轴承沟道感应淬火工艺技术尤为重要。

张根元等人^[3]采用有限元分析方法,对 S45C 材料轴在不同感应淬火工艺条件下的组织与硬度分布进行了分析,并且进行了实际测试,结果发现,实测结果与有限元分析结果接近。许佩宜等人^[4]研究了感应淬火工艺参数对轮毂轴承法兰内圈淬硬层和组织的影响,并且得到了感应淬火的最佳工艺参数。罗利强^[5]研究了轴承外圈整体淬火温度场变化情况,并且对淬火后残余应力分布进行了分析。王荣等人^[6]对曲轴在感应淬火后淬硬层深度与表面残余应力进行了仿真,并且对其进行了实验,结果发现,两者的结果基本一致。臧乐航等人^[7]研究了感应加热温升速度与感应器形状、感应频率和电流密度的关联性。谢建斌等人^[8]基于应用数学转换方法,研究了 45 钢在连续冷却

时,各相变组织的体积百分数。MUHLBAUER A 等人^[9]基于边界元法,研究了三维模型的感应加热仿真分析。TODAKA T 等人^[10]研究了通过优化感应线圈的形状,使工件在感应加热中受热均匀的方法。LUCIA O 等人^[11]研究了电磁感应加热技术未来的发展和应用,结果表明,其加热快/安全/清洁等特点使其在机械领域具有广泛的应用前景。

有很多学者对感应淬火工艺进行了大量的理论与实践研究,但对于轮毂轴承单元沟道感应淬火工艺的研究,以及沟道淬硬层对抗冲击性能影响的相关试验研究则很少。

目前,外圈内外侧双沟道的表层淬硬层沿沟曲率随形分布,深度较浅,且双沟道淬硬层区域相互独立,因此,外圈的抗冲击性能较差。

笔者从工艺实验与台架试验角度,通过有限元仿真分析^[12]与工艺实验相结合的方法,优化外圈感应淬火工艺,优化沟道淬硬层形状与深度,并通过路肩冲击试验对轮毂轴承单元抗冲击性能提升效果进行验证。

1 工艺条件分析与工艺方案设计

外圈零件与感应器及配合示意图如图 1 所示。

其中,外圈零件内径与感应线圈配合示意图如图 1(c)所示。

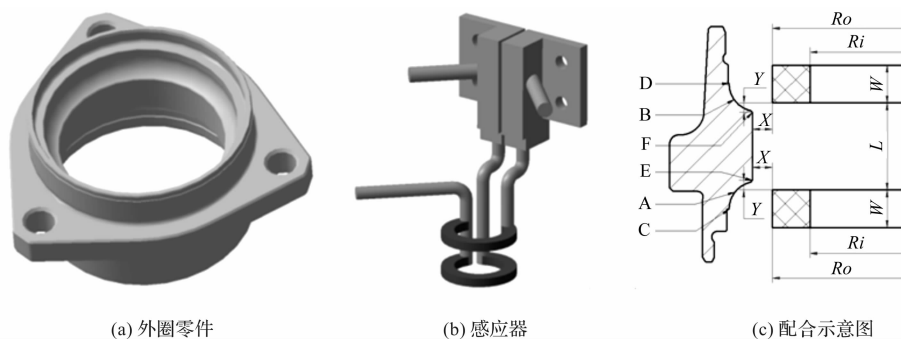


图 1 外圈零件与感应器及配合示意图

X—感应线圈与外圈内径间隙;Y—线圈与外圈沟道挡边轴向间距;L—线圈间距;W—线圈宽度;Ro—线圈外径;Ri—线圈内径;A—内侧接触角位置;B—外侧接触角位置;C—内侧沟底位置;D—外侧沟底位置;E—内侧挡边位置;F—外侧挡边位置

通过调整感应器矩形线圈结构尺寸,笔者将感应线圈的宽度 W 由 6 mm 加宽至 8 mm,以增加感应线圈的有效感应宽度,从而加宽沟道淬硬层轴向宽度。

在线圈调整时,增加感应线圈宽度 W ,且减小轴向间距 Y ,会使线圈与沟道挡边的最小距离变小。因邻

近效应与尖角效应^[13]影响,会导致温度在挡边尖角处聚集。温度过高会导致该位置组织粗大和热应力集中的问题,甚至产生淬火裂纹^[14]。

因此,在中频感应加热中应保证线圈与挡边最小距离 ≥ 2 mm^[15]。所以,合理调整线圈间距 L (即轴向

间距 Y) 以及淬火工艺参数,如电源电压与加热时间,就成了该工艺方法的关键。

针对感应器结构尺寸与工艺参数对感应加热的影响,笔者设计了以下工艺方案。

感应热处理工艺方案设计如表 1 所示。

表 1 感应热处理工艺方案设计表

参数	线圈宽度 W/mm	间距 Y /mm	感应器 电压/V	加热时 间/s
方案 1 (改进前)	6	3	62	5.4
方案 2	6	2	62	5.4
方案 3	8	2	62	4.5
方案 4	8	1.5	56	5.8

表 1 中,感应线圈与外圈内径的间隙 X 保持为

表 2 SAE1055 材料主要化学成分表(质量分数)

元素	C	Cr	Mn	Si	P	S	Ti	Al	Cu	Ni
含量/%	0.56	0.18	0.84	0.23	0.015	0.003	0.002 3	0.02	0.005	0.020

笔者基于 JMatPro 材料组织性能模拟软件,计算得到该材料相关的电磁热物理参数,如热导率、比热容、电阻率、相对磁导率等。

材料电磁热物理参数如图 2 所示。

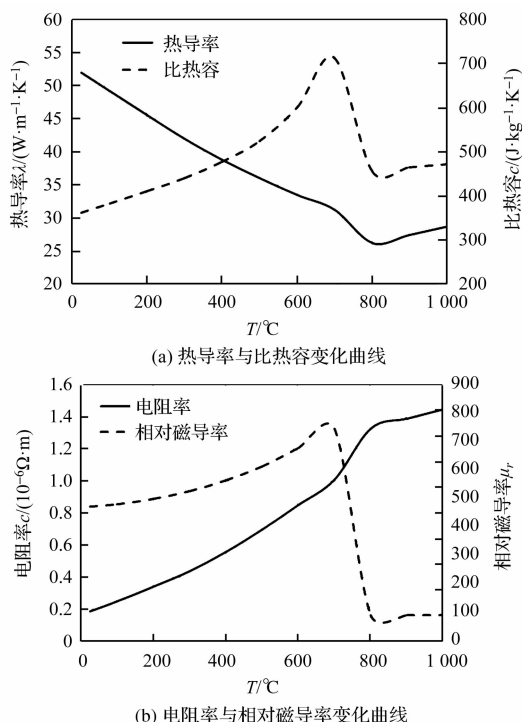


图 2 SAE1055 材料电磁热物理参数

2.2 有限元仿真分析模型建立

考虑到实际外圈零件带凸缘结构,因此在凸缘处的材料厚度较厚,可能对感应加热的透入深度有影响。

笔者对同一外圈的凸缘处与非凸缘处进行对比分

析,以减少漏磁;电源频率 f 保持为 12 000 Hz,以达到合适的透入深度。

笔者对不同的工艺方案采用有限元分析法进行仿真分析,并将分析结果,如淬硬层深度和形状,与工艺实验结果进行对比分析,以得到合适的感应热处理工艺方案。

2 材料特性与有限元分析模型

2.1 SAE1055 材料物理性能

此处的轮毂轴承单元外圈零件采用 SAE1055 碳素结构钢材料。

材料主要化学成分如表 2 所示。

析,以判断该零件不同位置的淬硬层深度是否均匀,从而建立合适的仿真分析模型。

笔者经过对外圈零件两凸缘中间位置(材料薄)和凸缘位置(材料厚)进行轴向剖切分析沟道淬硬层深度后,发现外圈沟道各处的淬硬层深度接近,从而认为该零件的周向感应加热均匀性较好,凸缘结构对感应加热深度影响不大。

外圈滚道淬硬层均匀性检测结果如图 3 所示。

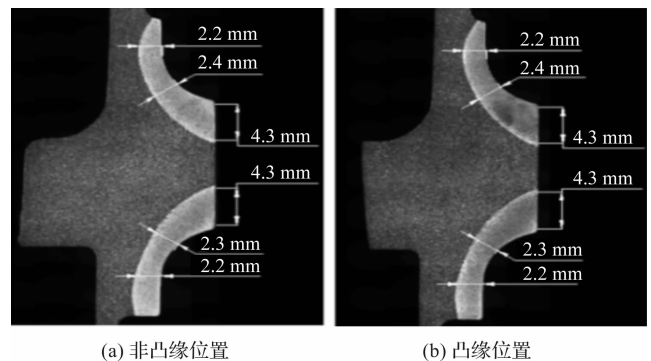


图 3 外圈滚道淬硬层均匀性检测图

由此可见,在有限元仿真模型中采用中心轴对称的二维简化模型是合理的。

轮毂轴承单元外圈零件有限元分析模型如图 4 所示。

2.3 有限元网格划分与边界条件

在感应热处理过程中,外圈滚道与内径表层在感应加热与淬火时,对温度分析的精确度要求较高,因此,在进行网格划分时,对滚道与内径表层网格要求更精细,而外表面网格在保证轮廓形状的基础上可划分较粗,以减少网格数量,提高计算结果的精确度和效率。

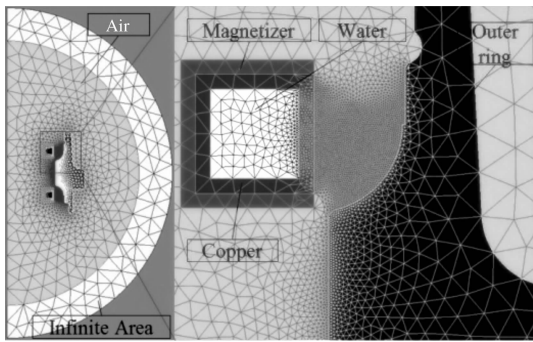


图 4 轮毂轴承单元外圈有限元仿真模型

考虑到在加热时,空气与工件表面存在辐射换热和对流换热边界条件,笔者取辐射换热系数为 $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,对流换热系数 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。笔者取环境温度和外圈初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.4 感应淬火组织转变与淬火深度判定

外圈材料原始组织为均匀分布的珠光体 + 铁素体组织,滚道表层组织经过感应加热转变为奥氏体组织。

在淬火液对外圈表面充分冷却的条件下,温度在 AC_3 临界温度以上的区域,淬火后为 100% 马氏体 M 组

织,为完全淬硬层;加热温度在 AC_1 温度以下区域,淬火后不发生组织转变;在 AC_3 到 AC_1 温度之间区域,淬火后为马氏体 M + 珠光体 P + 铁素体 F 组织区域,取 AC_3 和 AC_1 中间温度 T 处为产生 50% 马氏体 M 组织的位置,判断为有效淬硬层深度^[16]。

笔者基于 JMatPro 材料模拟软件分析可得, AC_3 、 AC_1 温度点分别为 $776.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $735.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

考虑感应加热的特殊性,感应加热速率较快,会造成临界温度 AC_3 、 AC_1 略变高 $30 \text{ }^\circ\text{C} \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$,因此,笔者取有效淬硬层深度的加热温度 T 为 $790 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 数值分析与工艺验证结果

3.1 数值分析结果

根据工艺设计方案与有限元分析方法,针对轮毂轴承外圈模型进行感应加热过程仿真分析,笔者对外圈零件感应加热温度场进行模拟,并基于感应淬火组织转变与淬硬层深度判定原则,对外圈内外侧滚道淬硬层深度与形状进行了对比分析。

各方案感应加热温度场对比结果如图 5 所示。

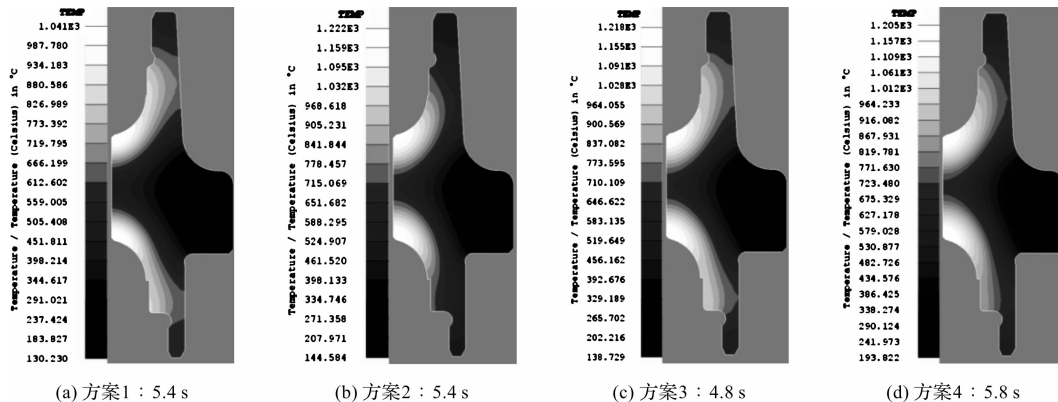


图 5 各方案感应加热温度场对比图

有限元仿真分析结果统计如表 3 所示。

表 3 感应淬火有限元仿真分析结果统计表

分析项目	淬硬层深度/mm					
	内侧接 触角	外侧接 触角	内侧 沟底	外侧 沟底	内侧 挡边	外侧 挡边
方案 1 (原始状态)	2.2	2.4	2.2	2.3	4.2	4.3
方案 2	3.0	3.3	1.6	2.0	5.3	5.2
方案 3	2.8	3.1	2.7	2.9	5.5	5.5
方案 4	2.8	3.0	2.1	2.4	双沟道连贯	

结合图 5 和表 3 有限元分析结果可得:

(1) 单调整轴向间距 Y ,会造成滚道沟底处深度太浅,而不符合淬硬层深度设计要求。如方案 1 与方案 2 对比可见,方案 2 的外圈沟底深度不大于 2 mm ,深度

不达标;

(2) 在增加线圈宽度后,通过调整轴向间距 Y ,可有效调整沟道淬硬层形状,使内外侧双沟道达到连贯状态,如方案 3 和方案 4 对比结果;

(3) 外圈沟道挡边处因邻近效应与尖角效应对热量的集聚效果,因此,挡边处温度最高。若外圈沟道挡边处与感应线圈间距太近,会造成挡边尖角附近温度过高,从而使淬火马氏体组织粗大。

3.2 工艺实验与结果分析

基于改进结构尺寸后的感应器与感应加热工艺参数,如感应电压、加热时间、冷却时间等,笔者对外圈零件进行了工艺实验验证;之后,对试验件开展金相分析,包括外圈淬硬层形状、深度、金相组织、表面硬度等。

淬火后外圈零件淬硬层与金相组织如图 6 所示。

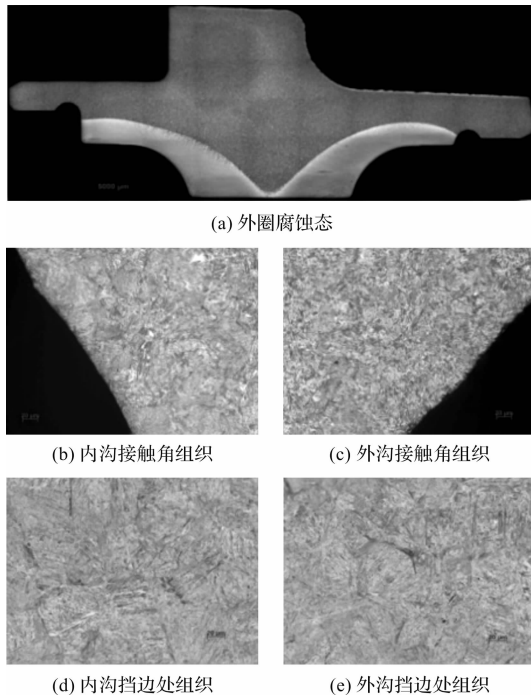


图 6 改进后外圈沟道组织图

改进前后外圈沟道金相分析结果如表 4 所示。

表 4 改进前后外圈沟道金相分析结果表

状态	检测位置	检测项目			
		组织 / 级	硬度 / HRC	深度 / mm	误差 / %
改进前 (方案 1)	A	4	61.2	2.4	9.1
	B	4	61.8	2.4	0
	C	4	61.2	2.3	4.5
	D	4	61.6	2.1	9.5
	E	4	61.8	4.3	2.3
	F	4	61.5	4.3	0
改进后 (方案 4)	A	4	61.1	2.7	3.7
	B	4	61.6	2.9	3.4
	C	4	61.0	2.1	0
	D	4	61.0	2.3	4.3
	E	3	61.5	连贯	/
	F	3	61.3	连贯	/

注:误差分析计算方法为:误差% = ABS(仿真结果 - 试验结果)/试验结果 × 100

分析图 6 与表 4 可得:

(1) 感应器改进与工艺参数调整后,外圈零件沟道接触角位置淬硬层深度显著增加,双沟道淬硬层形状调整为连贯状;

(2) 工艺优化后,外圈内侧沟道接触角处淬硬层深度增加 0.3 mm,外圈外侧沟道接触角处淬硬层深度增加 0.5 mm,内外侧沟道沟底淬硬层深度无明显变化;沟道表面硬度无显著变化;挡边处马氏体组织略有

长大,但仍符合 3-7 级使用要求;

(3) 由试验结果与有限元分析误差对比结果可得,沟道接触角与沟底位置淬硬层深度误差在 10% 以内,这表明有限元分析结果与实际工艺验证结果较吻合,也证明了有限元分析结果的合理性与可行性。

4 工艺优化效果试验与评价

笔者针对改进前后轮毂轴承单元开展路肩冲击试验,以验证沟道淬硬层改善前后对抗冲击能力的提升效果。

试验样品选取同批次内圈、法兰零件按照同样的游隙要求进行装配,保证试验影响因素的均一性。

笔者根据万向集团企业试验规范开展路肩冲击试验,试验条件为加载半径 300 mm,加载弯矩分别为 2.55 kNm (M1)、3.40 kNm (M2)、5.10 kNm (M4)。

试验后,笔者对改进前状态(方案 1)和改进后状态(方案 4)的轮毂轴承进行拆解并开展沟道接触角位置表面检查与压痕深度测量。

冲击试验后沟道接触角位置压痕分析结果如表 5 所示。

表 5 冲击试验后沟道接触角位置压痕分析结果表

弯矩水平	状态	接触角压痕深度/ μm		压痕深度降比 / %	
		外圈内侧	外圈外侧	外圈内侧	外圈外侧
M1 (2.55 kNm)	方案 1	1.32	1.04		
	方案 4	0.52	0.84	-60.6	-19.2
M2 (3.40 kNm)	方案 1	2.24	2.36		
	方案 4	1.17	2.07	-47.8	-12.3
M3 (5.10 kNm)	方案 1	5.21	7.21		
	方案 4	3.41	4.90	-34.5	-32.0

注:压痕深度降比计算方法为:降低比% = (方案 4 - 方案 1)/方案 1 × 100

改进前后外圈沟道压痕深度与弯矩关系趋势,如图 7 所示。

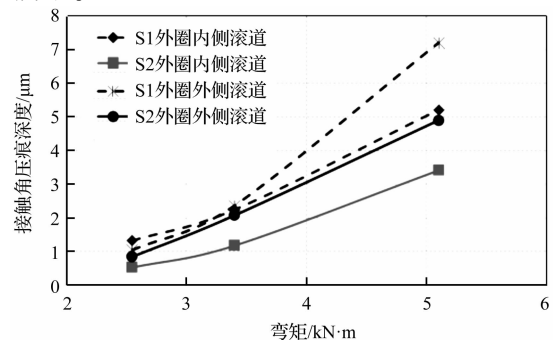


图 7 改进前后外圈沟道压痕深度与弯矩关系曲线分析表 5 与图 7 结果可得:

(1)随着弯矩水平的增加,外圈内外侧沟道接触角位置压痕深度随之增加;同时,改进后外圈零件沟道接触角位置压痕深度较原始状态更小,表明外圈沟道的抗冲击载荷能力有了显著的提升;

(2)根据压痕深度降比计算方法可得,在不同弯矩水平下,外圈内侧沟道压痕深度降比最大为 60.6% (M1 弯矩水平),平均降比为 43.0%;外圈外侧沟道压痕深度降比最大为 32.0% (M4 弯矩水平),平均降比为 21.8%。

该结果表明,外圈内侧沟道抗压痕能力平均提升 43.0%,外圈外侧沟道平均提升 21.8%。

5 结束语

笔者采用有限元分析与工艺实验相结合的方法,研究了感应器结构尺寸与电源设备参数对感应淬火的影响,通过调整感应器尺寸与电源参数,优化了外圈沟道淬硬层深度与形状,进一步通过路肩冲击试验,验证了轮毂轴承单元外圈抗冲击性能提升效果。

研究结论如下:

(1)通过调整感应线圈宽度与间距可以有效调整外圈沟道淬硬层形状,通过调整电源电压与加热时间可以有效提高淬硬层深度;

(2)工艺优化后,实验结果表明,外圈内侧沟道接触角淬硬层深度增加 0.3 mm,外侧接触角深度增加 0.5 mm,内外侧沟道淬硬层形状连贯,表层组织符合要求;感应淬火工艺实验结果与仿真结果误差在 10% 以内;

(3)轮毂轴承单元外圈零件内侧沟道抗冲击性能提升 43.0%,外侧沟道提升 21.8%,抗冲击性能提升明显。

在后续的研究工作中,笔者将就轮毂轴承单元中其他零件的感应淬火技术进行研究。

参考文献 (References):

- [1] 邓四二,贾群义. 滚动轴承设计原理[M]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [2] 张高峰,黄德杰,靳阳,等. 侧向冲击对轮毂轴承性能影响的试验研究[J]. 机电工程,2021,38(7):879-885.
- [3] 张根元,奚小青,张维颖. 感应淬火工艺参数优化和组织硬度分布预测[J]. 材料热处理学报,2013,34(6):174-179.
- [4] 许佩宜,顾剑锋. 三代轮毂轴承法兰内圈的感应淬火工艺[J]. 金属热处理,2015,40(10):68-72.
- [5] 罗利强. 汽车轮毂轴承淬火残余应力的建模与仿真[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2010.
- [6] 王荣,钟盛,胡超凡,等. 曲轴感应淬火及残余应力的仿真与试验研究[J]. 热加工工艺,2018,47(2):231-236.
- [7] 臧乐航,邓四二,张文虎. 双列球轴承中频感应淬火数值模拟[J]. 材料热处理学报,2018,39(1):137-144.
- [8] 谢建斌,程赫明,何天淳,等. 1045 钢淬火时温度场的数值模拟[J]. 甘肃工业大学学报,2003(4):33-37.
- [9] MUHLBAUER A, MUIZNIEKS A, LESSMANN H J. The calculation of 3D high-frequency electromagnetic fields during induction heating using the BEM [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 1993,29(2):1566-1569.
- [10] TODAKA T, ENOKIZONO M. Optimal design method with the boundary element for high-frequency quenching coil [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 1996,32(3):1262-1265.
- [11] LUCIA O, MAUSSION P, DEDE E J, et al. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2014,61(5):2509-2520.
- [12] SADEGHIPOUR K, DOPKIN J A, LI K. A computer aided finite element experimental analysis of induction heating process of steel [J]. **Computers in Industry**, 1996,28(3):195-205.
- [13] AIELLO G, ALFONZETTI S, RIZZO S A, et al. Optimization of the shape of an induction heating device in the presence of skin effect in the coils [J]. **COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, 2019,39(2):525-531.
- [14] 霍晓磊,李崇崇,史亚妮,等. 沟道位置不对称四点接触球轴承滚道表面淬火工艺研究[J]. 热处理技术与装备,2018,39(1):49-51.
- [15] 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.
- [16] 陆鹏. 半轴感应淬火工艺分析及仿真与实验研究[D]. 成都:西南交通大学机械工程学院,2018.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

张高峰,唐谊平,宣国军,等. 轮毂轴承单元外圈感应淬火工艺优化研究[J]. 机电工程,2022,39(11):1596-1601.

ZHANG Gao-feng, TANG Yi-ping, XUAN Guo-jun, et al. Optimization study of induction quenching process for outer ring of hub bearing [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(11):1596-1601.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>