

油泵齿圈气体氮碳共渗工艺的研究与应用

王彩, 谢立湘, 谭宇亮

株洲齿轮有限责任公司 湖南株洲 412000

摘要: 为了解决油泵齿圈氮碳共渗硬度不足、心部组织不均匀等问题, 通过对制造流程中热加工关键工艺的改进和质量控制, 提高原材料淬透性、晶粒度指标, 以及锻后正火、去应力和调质预备热处理工艺的改进, 优化了基体心部组织、硬度及散差; 氮碳共渗由水冷改进为气冷, 使表面硬度提高、渗层深度增大、变形减小, 产品热处理质量水平得到提高, 一致性得到了保证。

关键词: 油泵齿圈; 氮碳共渗; 45钢

Research and application of oil pump gear ring gas nitrocarburizing process

WANG Cai, XIE Lixiang, TAN Yuliang

Zhuzhou Gear Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China

Abstract: In order to solve the problems such as insufficient nitrocarburizing hardness and uneven core organization of oil pump gear ring, the core organization, hardness and dispersion of matrix were optimized by improving the hardenability and grain size index of raw materials and improving the normalizing, stress relief and tempering preparation heat treatment process after forging by improving the quality control of the key process of hot processing in the manufacturing process; the nitrocarburizing is improved from water cooling to air cooling, so that the surface hardness, the depth of infiltration layer is increased, the deformation is reduced, the quality level of product heat treatment is improved, and the consistency is guaranteed.

Keywords: oil pump tooth ring; nitrocarburizing; 45steel

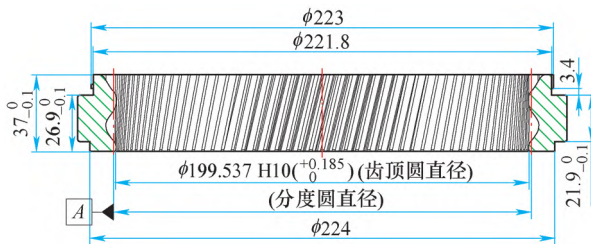
1 序言

某45钢材质的7级精度的油泵齿圈(见图1), 法向模数约1.75mm, 有效壁厚约12mm, 其制造工

艺过程主要为: 下料→锻造→正火→粗车→退火(或调质)→精车→车齿→氮碳共渗等。通过该工艺路线提升齿圈的基体强度和韧性, 一定程度上能



a) 三维模型



b) 规格尺寸

图1 某油泵齿圈三维模型及主要尺寸

提高工件表面的抗疲劳强度和耐磨性。其气体氮碳共渗要求：表面硬度300~400HV5、扩散层深度为0.35~0.50mm。在实际生产中，表面硬度偏低，扩散层非常不稳定，且同一件产品不同部位硬度梯度曲线散差大^[1]。为此，需对其热加工过程，如正火、退火或调质、氮碳共渗等工序进行分析和对比试验，以逐步优化和改善工艺过程。

2 原材料的质量控制

为保证后续工艺过程参数的一致性和可靠性，对原材料进行了约束。采用GB/T 5216—2014《保证淬透性结构钢》中规定的45H钢，其末端淬火曲线^[2]如图2所示。其中， J_3 值以 $\geq 44\text{HRC}$ 为最佳，同时要求奥氏体晶粒度6~8级，材料为本质细晶粒钢，不应有混晶现象^[3]，如图3所示。

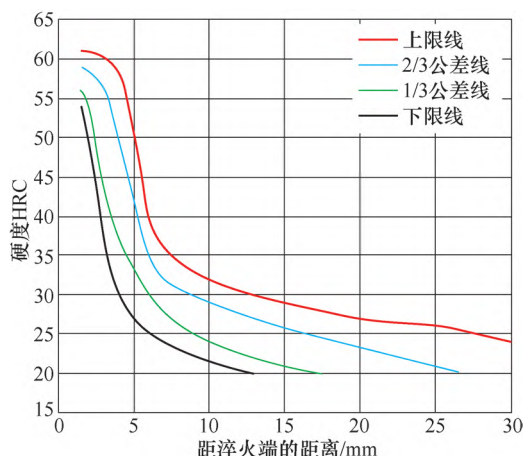


图2 45H钢末端淬火曲线

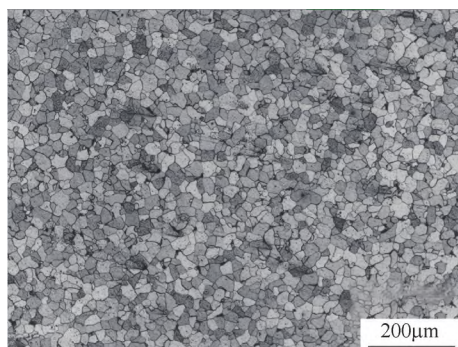


图3 45H钢晶粒度 (100×)

3 正火工艺的优化

为了获得心部较好的韧性，增强氮碳共渗后齿圈的抗冲击能力，应进一步控制锻后正火硬度及组织的均匀性^[4]。正火组织直接关系着成品基体组

织的抗拉强度、弯曲强度、韧性等力学性能，也是造成氮碳共渗硬度和渗层深异常波动的主要因素之一^[5]。

该油泵齿圈的原正火工艺为：加热到临界温度 $A_{c3} + (50 \sim 100)^\circ\text{C}$ 保温一段时间，然后进行空冷，参照GB 13320—2007《钢质模锻件金相组织评级图及评定方法》，改善前正火组织5级，晶粒不均匀，带状趋势明显，且局部有混晶，如图4所示。

改善后正火组织2级，珠光体+铁素体，晶粒更加均匀，且片层较致密，如图5所示。主要通过对网带炉正火工艺优化，采用适当的大风量、冷热风均匀快速冷却，细化晶粒，得到一致的心部组织和稍高的正火硬度 (180~210HBS)^[6]，正火工艺曲线如图6所示。

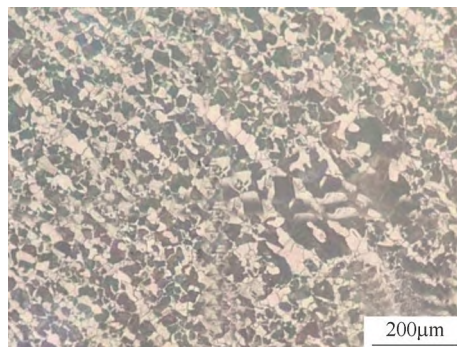


图4 改善前正火组织5级 (100×)

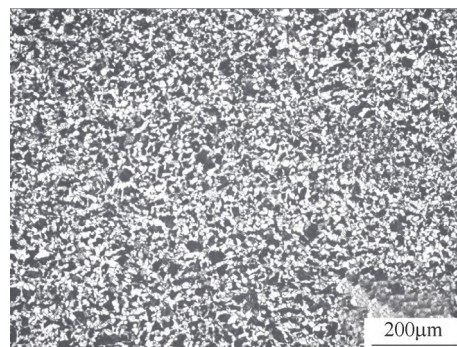


图5 改善后正火组织2级 (100×)

4 粗车后的预先热处理

4.1 去应力退火

当抗拉强度要求 $\geq 600\text{MPa}$ ，即基体硬度 $\geq 180\text{HBW}$ 时，可对粗车坯件进行去应力退火。

油泵齿圈去应力退火工艺为：入炉温度 400°C ，退火温度 $600 \sim 620^\circ\text{C}$ ，根据有效厚度确定保温时间，多用炉保温时间为 $2\text{h} + (\text{有效厚度})$

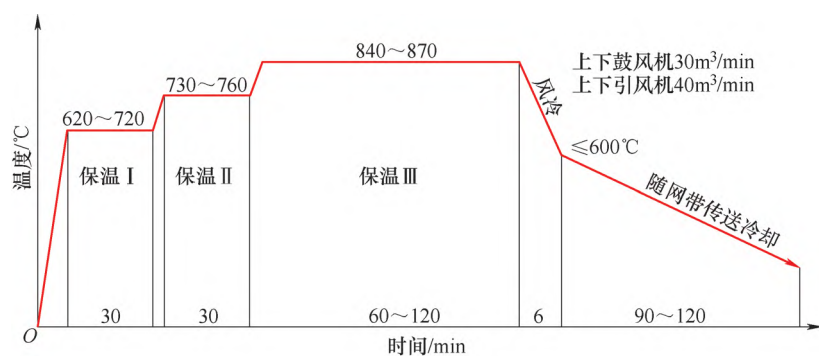


图6 网带炉正火工艺曲线

×1min/2mm)，氮气保护，随炉冷却至400℃以下，再出炉空冷至室温，得到较细的铁素体+珠光体，主要用来消除粗车等机械加工残余应力，减少随后切削加工过程中产生的变形，为后续渗氮处理做准备。去应力退火后油泵齿圈齿部的金相组织为3级，珠光体+铁素体，晶粒碎化，如图7所示。

退火温度应严格控制在600~620℃，若退火温度接近 A_1 温度时即球化退火，保温后缓慢冷却，在冷却过程中珠光体中的片层状渗碳体变为球状，基体中出现球粒状珠光体（见图8），即铁素体基体上分布粒状渗碳体组织。去应力退火获得的片状珠光体硬度更高，抗拉强度略高于球粒状珠光体，但塑

性、韧性不如球粒状珠光体。

4.2 调质

当抗拉强度要求 $\geq 800\text{MPa}$ ，即基体硬度 $\geq 240\text{HBW}$ 时，需在粗车后增加一道调质工序，以提升油泵齿圈的基体硬度。

调质工艺为网带炉在840~860℃下保温4h后，采用4%~8%PAG水淬；在距离表面3mm（即该产品有效厚度约1/4位置）区域淬火后的硬度保证在45HRC以上；高温回火温度为560~600℃，实测金相组织如图9所示。调质后组织为回火索氏体+少量铁素体，4级，满足工艺要求。

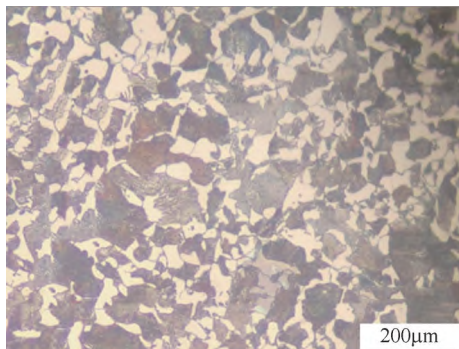


图7 距表面3mm去应力退火组织（100×）

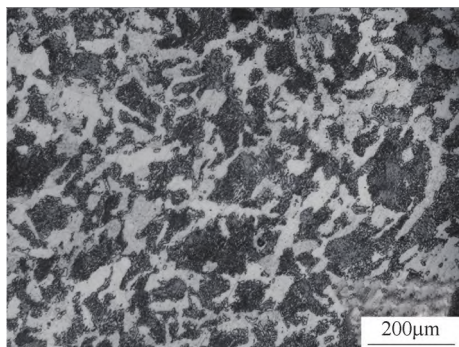


图8 距表面3mm球化退火组织（100×）

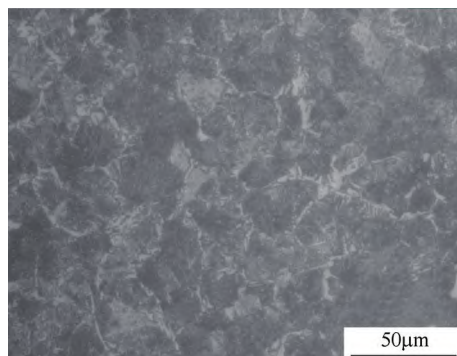


图9 调质组织（500×）

5 氮碳共渗工艺

由于氮碳共渗温度低，碳在 α 相中的溶解度仅为氮在 α -Fe中溶解度的1/20^[7]。因此，45钢经氮碳共渗后，表面最外层可获得5~20 μm 的白亮层，它是由 ϵ 相、 γ' 相和含氮的渗碳体 $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$ 所组成，次表层为0.35~0.50mm的扩散层，它主要是由 γ' 相和 ϵ 相组成^[8]。相对于渗氮，由于氮碳共渗层不存在脆性 ζ 相，故渗层硬而具有一定的韧性，不容易剥落^[9]。同时处理温度低、时间短，工件变形

也小，能显著地提高工件的疲劳强度、耐磨性和耐腐蚀性，且在干摩擦条件下还具有抗擦伤和抗咬合等性能。

5.1 原氮碳共渗工艺

氮碳共渗前先采用超声波清洗机充分清洗待加工的零件，去除热处理前机械加工工序残留在产品上的切削乳化液及盐分。采用 $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ 气体氮碳共渗工艺，如图10所示。入炉后充 N_2 排净炉内空气；升温至 $520 \sim 540^\circ\text{C}$ 并适当均温后，充 $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ 进行氮碳共渗， NH_3 分解率按照强渗、扩散、退氮三阶段调整，获得所要求的渗层深度，随炉缓冷至 130°C 以下出炉。

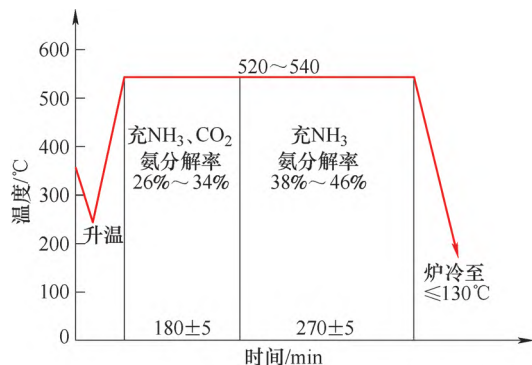


图10 原氮碳共渗工艺

原氮碳共渗工艺生产的产品，零件表面硬度低、渗层深度波动大，硬度曲线散差大。

若采用 50°C 热水水冷，出水时产品表面为瓦青色；水冷会加大变形量，外圆跳动超过 0.10mm ；产品易因水锈而发红。

5.2 优化后的氮碳共渗工艺

氮碳共渗前先采用超声波清洗机充分清洗待加

工的零件后，增加真空碳氢清洗机进行去油清洗，并在 140°C 左右烘干 2h ，确保工件所有表面（含螺孔和通孔等）干净，无铁屑、污物和油脂。

采用 $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{N}_2$ 气体，优化的氮碳共渗工艺如图11所示。入炉后充 N_2 排净炉内空气；升温过程采用阶梯式升温工艺，逐序升温至 $340 \sim 360^\circ\text{C}$ ，均温 60min ，再升至 $470 \sim 490^\circ\text{C}$ 均温 $(60 \pm 5)\text{min}$ ，然后充 $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ 后升至 $520 \sim 540^\circ\text{C}$ 的强渗温度，进行氮碳共渗 $(360 \pm 5)\text{min}$ ，获得所要求的渗层深度。

再优化氮碳共渗工艺增加了高温扩散阶段，在强渗阶段即将结束时，提升温度到 $570 \sim 580^\circ\text{C}$ 均温扩散，致使N元素充分扩散到次表面，优化硬度梯度曲线。

扩散结束后采用高压氮气气冷，氮气压力为 $0.2 \sim 0.4\text{MPa}$ ，氮气流量约为炉膛体积的5倍；冷却延时约 60min 。

降温过程：随炉气冷将炉温下降至 100°C 以下，产品出炉后再空冷至室温，冷却过程通入一直通入氮气或高纯氮，出来后的颜色是银灰色。

5.3 氮碳共渗后的金相组织及硬度

经过上述工艺优化和管控后，该产品氮碳共渗后的表层组织和心部组织均得到明显的改善，具体金相组织如图12、图13所示。

对退火和调质两种状态的产品分别进行10个样件的检测分析，详细数据见表1、表2。从表1、表2可看出，均能很好地满足相关工艺要求。其中，因调质后的基体硬度平均值高约 58HBW ，致使氮碳共渗表面硬度明显提升约 40HV5 。

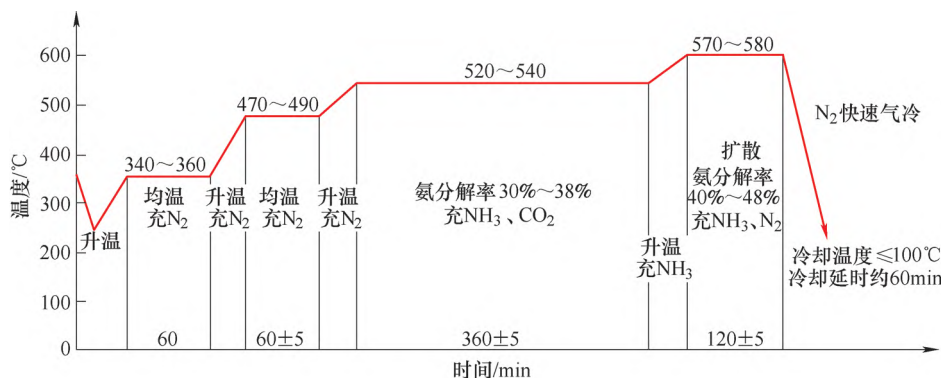


图11 优化后氮碳共渗工艺

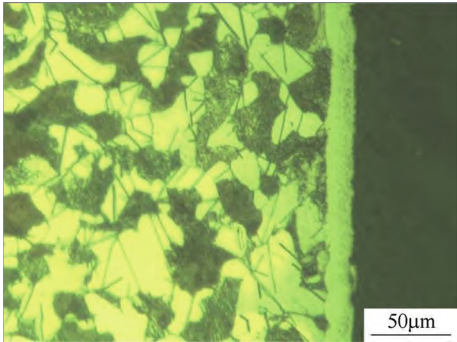


图12 退火后氮碳共渗组织 (500×)

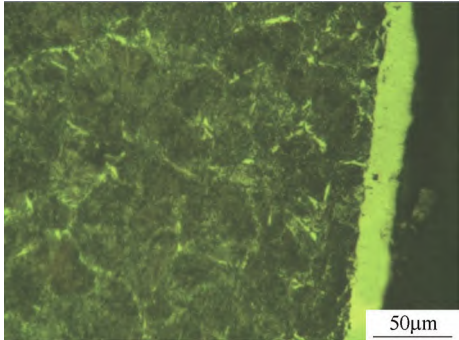


图13 调质后氮碳共渗组织 (500×)

表1 油泵齿圈退火后氮碳共渗试样检测结果

样件 编号	渗层 疏松 /级	脉状 氮化物 /级	化合层 深度 /μm	渗层 深度 /mm	表面 硬度 HV5	心部 硬度 HBS
1	1	1	0.013	0.47	326	181
2	1	1	0.013	0.47	328	184
3	1	1	0.013	0.47	315	182
4	1	1	0.014	0.48	309	187
5	1	1	0.014	0.48	293	189
6	1	1	0.014	0.48	296	186
7	1	1	0.010	0.50	281	182
8	1	1	0.011	0.50	285	186
9	1	1	0.011	0.50	290	183
10	1	1	0.011	0.50	287	184
平均值	1	1	0.012	0.485	301	184
要求值	≤2	≤2	8~20	0.35~0.50	≥280	170~210

表2 油泵齿圈调质后氮碳共渗试样检测结果

样件 编号	渗层 疏松 /级	脉状氮 化物 /级	化合层 深度 /μm	渗层 深度 /mm	表面 硬度 HV5	心部 硬度 HBS
1	1	1	0.012	0.44	336	236
2	1	1	0.008	0.45	328	246
3	1	1	0.008	0.45	332	236
4	1	1	0.013	0.47	335	239
5	1	1	0.011	0.40	340	239
6	1	1	0.014	0.50	374	244
7	1	1	0.014	0.50	341	247
8	1	1	0.014	0.50	360	244
9	1	1	0.013	0.40	340	243
10	1	1	0.010	0.50	333	247
平均值	1	1	0.012	0.463	341	242
要求值	≤2	≤2	8~20	0.35~0.50	≥300	220~260

6 结束语

综上所述, 45钢油泵齿圈通过以下措施, 可以获得更好的力学性能。

1) 选取淬透性更好的45H钢(如 J_3 值 $\geq 44\text{HRC}$, 奥氏体晶粒度6~8级), 并以较快的风速正火冷却, 获得细小的珠光体+铁素体(金相组织 ≤ 3 级, 正火硬度180~210HBS), 可以减少甚至消除预先热处理基体组织对氮碳共渗硬度波动的影响。

2) 对粗车坯件进行去应力退火, 可进一步增加韧性, 消除机械加工应力, 减小后续变形; 粗车坯若采用调质处理, 较正火组织可以显著提升氮碳共渗的表面硬度。

3) 氮碳共渗冷却前适当提升保温温度, 且配合较快的气冷速度, 可在不增大变形的前提下提升氮碳共渗表面硬度, 获得更好的硬度梯度, 提升齿面接触疲劳强度和耐磨性。

参考文献:

[1] 毛喆, 尹中秋, 胡剑锋, 等. 气体氮化的常见问题及改进措施[J]. 热处理技术与装备, 2022 (8): 50-53.

[2] 余金科, 赵俊平, 牛恩来, 等. 气体渗氮工艺新进展及在汽车零部件上的应用[J]. 金属加工 (热加工), 2022 (5): 1-4.

[3] 裴自力, 孙飞. 中碳合金钢的新型气体氮化工艺研究[J]. 热加工工艺, 2021 (10): 137-140.

[4] 赵步青, 徐利建, 胡会峰, 等. 45钢的热处理及表层改性[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (5): 1-4.

[5] 杨遵道. 钢铁类零件表面渗氮后渗氮层深度的测定方法对比[J]. 热加工工艺, 2017 (16): 145-147.

[6] 罗兴壮, 杨跃标, 朱超云, 等. 正火冷却工艺对管线钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2019 (5): 196-199.

[7] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册 (第2卷): 典型零件热处理[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2013.

[8] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉. 热处理工程师手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[9] 王中雅. 渗氮/氮碳共渗工件表面脆性的产生机理与排除措施[J]. 新技术新工艺, 2012 (4): 82-84.

MW 20240807