

预处理组织对42CrMo钢离子渗氮行为的影响

李子岩, 许鸿翔, 陈生超, 何潇, 郭敬强, 颜世钊, 赵少甫, 卢金生

郑机所(郑州)传动科技有限公司 河南郑州 450001

摘要: 通过正火和调质处理获取42CrMo渗氮钢不同预处理表面显微组织, 利用OM、EDS和显微硬度计对离子渗氮后试样进行分析检测, 并采用便携式显微硬度计对渗氮钢实物进行生产验证。结果表明: 当42CrMo渗氮钢表层存在半脱碳层组织, 与表层正常无脱碳组织试样的显微硬度检测结果相接近, 氮与钢中合金元素结合生成合金氮化物, 占强化机制的主导地位, 然而其表面脆性等级显著下降, 且距表面等间距硬度梯度降低幅度最大。显微组织级别和基体硬度是影响检测离子渗氮后表面维氏硬度的主要因素。

关键词: 渗氮钢; 预处理组织; 离子氮化; 显微组织

The effect of pre-treatment organization on ion nitriding behavior of 42CrMo steel

LI Ziyan, XU Hongxiang, CHEN Shengchao, HE Xiao, GUO Jingqiang, YAN Shidang,

ZHAO Shaofu, LU Jinsheng

ZRIME Gearing Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract: Obtaining the microstructure of different pre-treatment surfaces of 42CrMo nitrided steel through normalizing and quenching and tempering treatment, OM, EDS and microhardness tester were used to analyze and detect the samples after ion nitriding, and a portable microhardness tester was used to verify the actual production of nitrided steel. The results indicate that when there is a semi decarburized layer structure on the surface of 42CrMo nitrided steel, the microhardness test results of the sample with normal non decarburized structure on the surface are similar, and the combination of nitrogen and alloying elements in steel to form alloy nitrides dominates the strengthening effect. However, its surface brittleness level has significantly decreased, and the decrease in hardness gradient at equidistant distances from the surface is the largest. The microstructure level and matrix hardness are the main factors affecting the surface Vickers hardness after ion nitriding detection.

Keywords: nitrided steel; preprocessing organization; ionic nitriding; microscopic organization

1 序言

齿轮作为传动装置的关键零部件, 其产品性能决定设备服役寿命。齿轮表层硬化热处理是提升齿轮抗弯曲和抗疲劳性能的重要手段^[1]。现有的齿轮

表层硬化方法以渗碳淬火、感应淬火和渗氮处理为主, 其中离子渗氮因具有高硬度、微变形、耐磨性及耐蚀性好的特点而广泛应用于高精密参数齿轮^[2]。然而受制于前期热处理质量和机械加工工艺水准,

基金项目: 工信部高质量发展专项项目(2023ZY02004); 郑机所(郑州)传动科技有限公司发展基金(ZJCD04202402)。

第一作者: 李子岩, 工程师, 硕士, 主要研究方向为齿轮材料及热处理工艺, E-mail: zjsly019@126.com。

通信作者: 许鸿翔, 研究员, 主要从事金属材料及热处理工艺研究, E-mail: 13838005005@163.com。

离子渗氮前齿轮表面的真实组织评估易存在误差。表面硬度是齿轮离子渗氮精密热处理的重要指标参数，而离子渗氮齿轮以显微硬度检测为准，受制于齿轮产品尺寸和显微硬度计检测能力等因素，无法实现大件齿轮表面显微硬度检测。现场生产以便携式硬度计检测维氏硬度作为参考数值。便携式硬度计检测受制于硬度计探头型号、齿轮表面粗糙度、基体硬度和有效渗氮层深度等多种因素，导致各厂家无统一评判符合技术要求的标准值。综上所述，目前迫切需要通过探究不同表面预处理组织下离子渗氮处理后显微组织差异，尤其是当表面含有半脱碳层时离子渗氮后显微组织的特点，并进一步通过实物来验证便携式硬度计所检测的不同表面显微组织的离子渗氮工件维氏硬度。

2 试验材料及方法

试验材料选择42CrMo中碳低合金结构钢，试样尺寸为30mm×20mm×20mm。采用ARL3460直读式光谱仪检测试样化学成分，具体的结果见表1。从表1可看出，试样材料合金元素含量符合GB/T 3077—2015《合金结构钢》要求。

表1 42CrMo钢的化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
标准值	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.58	0.90~1.20	0.15~0.25	其余
实测值	0.43	0.25	0.72	1.10	0.21	其余

表2 各试验方案工艺参数

试验方案	正火工艺参数				调质工艺参数			
	正火温度 /℃	保温时间 /h	回火温度 /℃	回火时间 /h	淬火温度 /℃	保温时间 /h	回火温度 /℃	回火时间 /h
1	880	1.0	650	3.0	835	1.0	580	3.0
2	880	1.0	650	3.0	—	—	—	—
3	880	1.0	650	3.0	835	1.0	650	3.0
4	880	5.0	650	3.0	835	1.0	580	3.0

3 试验结果与分析

3.1 预处理试样显微组织

采用4%硝酸酒精溶液对上述方案试样进行浸蚀，试样显微组织如图1所示。从图1a观察发现，试样1显微组织由回火索氏体+少量铁素体组成，按照GB/T 13320—2007《钢质模锻件 金相组织评级图及评定方法》中图谱规定，评级为2级。图1b试样2的显微组织为典型的混合组织，其主要为回火索氏体+少量回火贝氏体+回火屈氏体。由于试样尺寸因

为获得42CrMo钢不同表面预处理状态，采用4种试验方案，工艺参数见表2。4种方案正火处理后的冷却方式均为空冷，调质淬火后冷却时采用浓度10%水基PAG淬火液，淬火冷却至液温35℃出液，随后进行高温回火后空冷至室温。

采用LDM-150钟罩式离子渗氮炉开展离子渗氮工艺试验，离子渗氮处理前需将方案4试样使用MPJ-25金相试样磨平机将试样表层打磨见光，其余方案试样需每边加工去除2mm，以保证无脱碳层存在。离子渗氮温度为540℃，渗氮时间为36h。渗剂采用热分解氨。根据GB/T 11354—2005《钢件零件渗氮层深度测定和金相组织检验》规定，使用HXD-1000TMC/LCD显微硬度计测定试样有效渗氮层深度，从试样表面垂直向试样心部检测硬度，检测力为0.3kgf（1kgf=9.8N）。使用HV-10B小负荷维氏硬度计检测试样脆性等级，检测力为10.0kgf。根据GB/T 34883—2017《离子渗氮》规定检测试样表面硬度，检测力为5.0kgf。使用DMI-3000M光学显微镜观察渗氮层和预处理显微组织。采用Phenom XL台式扫描电镜对离子渗氮后试样的显微组织和元素分布进行检测。

素，在正火出炉空冷至室温过程中，空冷冷却速度使试样表层实现局部淬火，随着高温回火后转变为以回火索氏体为主的混合组织。图1c试样3组织为回火索氏体组织，对比方案1的回火温度提升70℃，达到650℃，已接近Ac₁相变点温度，相比图1a的显微组织，其碳化物发生明显球化、粗化和聚集。图1d试样4表层为典型的半脱碳组织，其表层存在大量白色铁素体和少量灰色的珠光体组织，由于试样在无保护气氛箱式炉长时间处于高温状态，表层C元

素与空气中O元素结合产生 CO_2 和CO并逸出至空气中，故显微组织从内至表其C含量逐渐降低^[3]。当距离表面超过 $180\mu\text{m}$ 后，该处与心部显微组织无明显差异。



a) 试样1



b) 试样2



c) 试样3

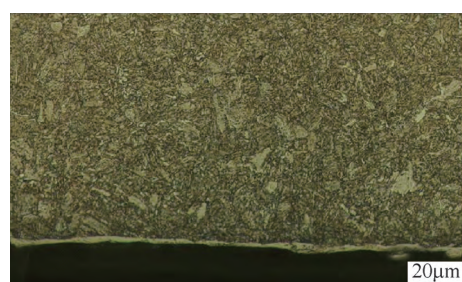


d) 试样4

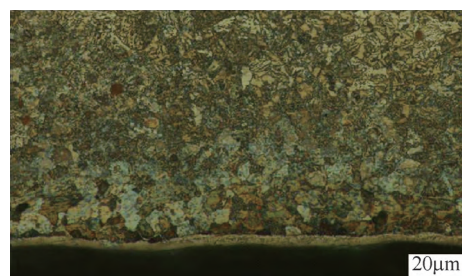
图1 预处理试样显微组织

3.2 离子渗氮试样显微组织

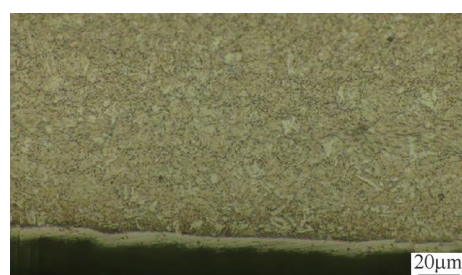
图2所示为经离子渗氮处理后各方案试样的显微组织。从图2可观察到，试样渗层外表面平整，由表及里分别为白亮层、过渡层、扩散层和基体。其中试样2和试样3的白亮层厚度最为致密和均匀，对比试样1可确认随着回火温度的升高，白亮层厚度的增



a) 试样1



b) 试样2



c) 试样3



d) 试样4

图2 离子渗氮后试样显微组织

加趋势明显。试样1~试样3中白亮层与过渡层存在明显的分界线，而试样4表层存在较多铁素体，与白亮层间的分界线不明显，但可观察到试样表面存在贯穿白亮层的微裂纹。表明当试样表层存在着脱碳现象时，表层的氮浓度远超其余试样，过多的N原子与Fe原子反应结合可能会造成渗层表面应力集中现象，致使白亮层存在微裂纹。此外4组试样均没有观察到明显脉状渗氮物组织，原因在于离子渗氮处理过程中以热分解氨作为渗剂，通过控制流量和分解炉温度，氨气分解率较低，使得炉膛氮势稳定在不易生成渗氮物的水平值。

各试样渗氮层的检测结果见表3。试样有效渗氮层深度按照GB/T 11354—2005《钢铁零件 渗氮层深度测定和金相组织检验》中规定的方法,有效渗氮层深由大到小的顺序为试样2>试样4>试样3>试样1。由于试样2采用正火+高温回火处理,其心部显微组织以回火索氏体+回火屈氏体为主,其心部显微平均硬度为254.5HV0.3,按照以心部硬度+50HV作为界限值,试样2的有效渗氮层深度远超过其余试样。另外,试样表层含有脱碳层的表面硬度值达到最高,主要原因是大量N原子在高压电场作用下轰击进入试样表层,N原子占据C原子缺失位置,并与Fe原子生成各类 Fe_xN 化合物,使渗层表面硬度达到最高值。而过多的N原子存在表层,无法及时向内部扩散,当表面N浓度达到11.1%以上时,白亮层的最表面生成以 Fe_2N 为主的高氮高脆 ξ 相,当 ξ 相与 ϵ 相的含量存在差异且由前者在白亮层中占主导地位时,将致使试样表层脆性等级显著下降。

表3 各试样渗氮层检测结果

方案序号	渗层深度/mm	表面硬度HV0.3	脉状渗氮物级别/级	脆性级别/级
1	0.42	629.2	1	1
2	0.63	552.3	2	2
3	0.45	541.4	1	2
4	0.51	641.3	1	3

3.3 有效渗氮层硬度梯度

各方案试样离子渗氮后的显微硬度梯度如图3所示。从图3可看出,显微硬度随着距表面距离的增加而逐渐降低。试样3调质处理时高温回火(650℃)的硬度最低,其余两种方案的硬度值相接近。此外等间距的显微硬度降幅中,试样4表层含脱碳层降幅最大,试样3硬度梯度降幅最小,其余两个试样相接近。

若渗氮层硬度梯度越陡,则表明渗氮层的内应力越大,且抗疲劳性能会越差^[4]。在受外力影响下,化合物层与扩散层、扩散层与基体间交界处容易产生疲劳裂纹。含脱碳层硬度梯度最陡的结果也与表3中脆性等级最大的结果相一致。而对于高温回火(650℃)试样显微硬度远低于其他三者的原因是其回火温度已接近 A_{c1} 相变点,碳化物发生球化、粗化和聚集等现象,并且 α 相发生回复和再结晶,使晶粒内部和晶界处位错密度降低,最终导致其显微硬度值最低^[5]。

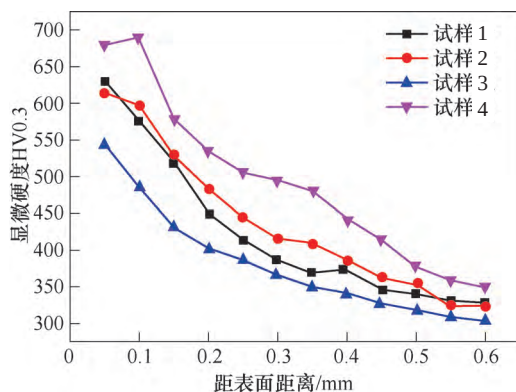


图3 各方案试样显微硬度梯度

方案4试样各检测位置的显微硬度如图4所示(红色数字为相对应检测位置的硬度值,HV0.3)。结合图3和表3的显微硬度数值可确认,即使存在脱碳层时,也不影响离子渗氮后的表面显微硬度,且表面显微硬度和扩散层对应位置显微硬度也要大于正常处理试样方案一的显微硬度数值。按照离子渗氮后强化机理,离子渗氮后的表面显微硬度由合金渗氮物、碳化物的弥散强化及碳原子的固溶强化共同发挥作用。但存在脱碳层时,表层中的C元素易产生极大损失,其贡献作用大幅度削弱。存在脱碳层时各处位置硬度高于常规硬度的具体原因应是C、N原子占据 α -Fe和 γ -Fe的相同间隙位置,C元素的减少为N元素提供更多位置,N元素与合金元素结合生成大量弥散的合金渗氮物,而合金渗氮物的强化效果远超合金碳化物,因此即使试样表面存在脱碳层时,其表面显微硬度和扩散层各位置的显微硬度仍然超过正常处理试样的显微硬度。

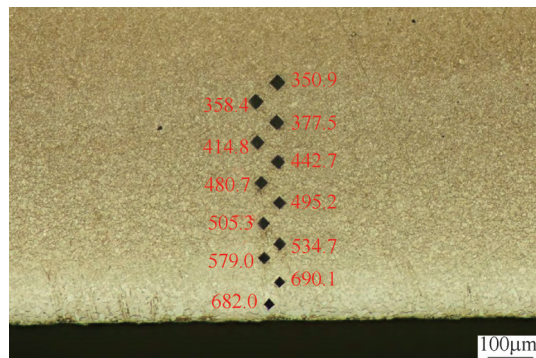


图4 方案4试样各检测位置显微硬度

3.4 表层元素浓度分布与EDS能谱分析

检测方案试样4截面N、C元素浓度分布如图5所示。据图5a中N、C元素衍射峰强度而言,N元素峰

值整体高于C元素，而C元素局部位置峰值过高，原因在于即使前期在无保护气氛箱式炉长时间高温正火，试样靠近表层位置为半脱碳状态，C元素存在局部偏析现象，致使衍射峰突出。对图5中A、B两处位置进行EDS能谱检测，结果见表4。

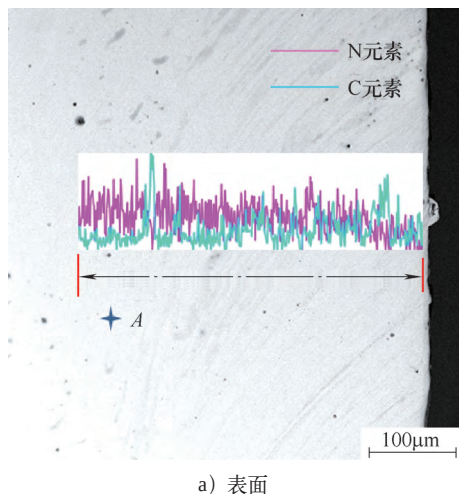
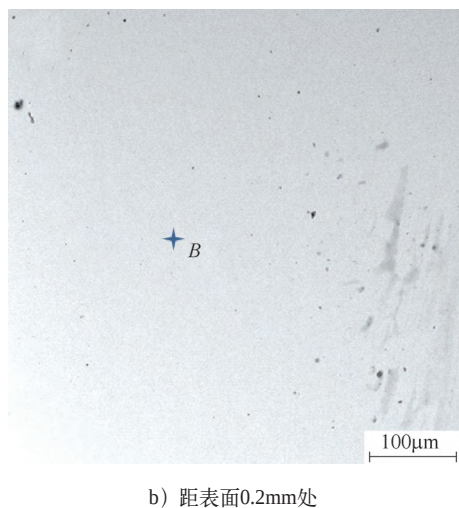


图5 试样4横截面元素分析结果

表4 试样4横截面不同位置EDS检测结果
(质量分数) (%)

元素	N	C	Cr	Fe
位置A	1.17	0.36	1.17	97.31
位置B	0.95	0.41	1.02	97.62

对比表4中位置A和位置B的EDS检测结果，发现次表层C含量低于42CrMo钢的下限值，且在距表面0.2mm处N含量下降了0.22%。对比图4的显微硬度数据，试样在距表面0.2mm处的显微硬度已显著下降，而此处位置C含量相对次表层有所回升，再次验证离子渗氮过程中强化机制起主导作用的N与

合金化合物之间所形成的第二相强化，其强化作用超过C元素所产生的强化效应。

4 生产验证

为验证不同渗氮钢均存在上述试验特性，以42CrMo钢圆柱试样作为研究对象，尺寸为 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，重量约为12.3kg，符合便携式硬度计检测最低重量要求5kg的规范。采用ARL3460直读式光谱仪检测试样，其合金元素含量见表5。

表5 42CrMo钢的化学成分(质量分数) (%)

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
标准值	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.58	0.90~1.20	0.15~0.25	其余
实测值	0.42	0.20	0.56	1.10	0.20	其余

从表5可发现，各合金元素含量均在GB/T 3077—2015规定的42CrMo钢范围内，因此可以确认试样圆柱材质为42CrMo钢，且圆柱材质尺寸与试验成分相接近。

圆柱实物相较于上述试验试样，其有效尺寸显著增加，结合现场实际生产，将圆柱试样正火处理和淬火处理的保温时间延长1h，同时将高温回火的保温时间延长2h。其余处理方法与上述试验试样相一致。采用TIME 5310便携式硬度计对距外圆1/3处的端面，沿圆周方向每隔60°检测3个数值后取其平均值，结果如图6所示。

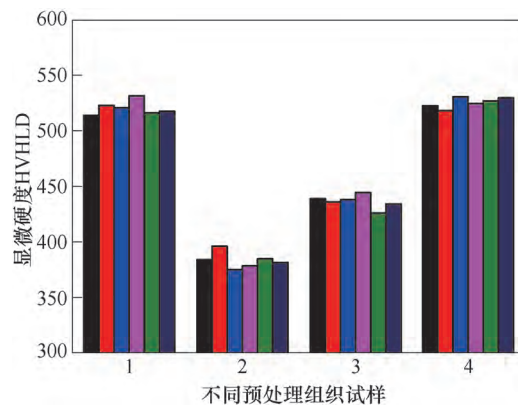


图6 离子渗氮后圆柱实物端面维氏硬度结果

注：横坐标1~4代表4个试验方案，每个方案的6个柱状图代表同一个圆柱试样(直径100mm)平面、距外圆1/3处、沿圆周方向每隔60°共6个检测点的硬度平均值。

从图6可看出,方案1正常处理和方案4表面含有脱碳层的实物端面硬度均超过500HVHLD,方案2采用正火处理的圆柱端面硬度<400HVHLD,并且各位置的硬度分散性最大,而方案3提高回火温度时的圆柱实物端面硬度介于400~450HVHLD。结合表3试样显微硬度检测结果,可以确认当试样表面含有脱碳层时,检测得到的表面显微硬度数值无异常,但在试样表层渗氮层和基体组织之间存在以铁素体为主的不完全脱碳层,其将影响综合力学性能。综合上述圆柱实物检测结果,确认影响离子渗氮便携式硬度计检测的表面硬度的主要因素为基体显微组织级别和基体表面硬度。

对离子渗氮而言,其有效渗氮层深度较浅(<1mm),渗层内的N浓度由表向内呈梯度变化的非均质硬化层^[6]。便携式硬度计以冲击回弹原理来实现数值检测,当离子渗氮处理后表面类似硬质“蛋壳”,若携式硬度计碳化钨探头击穿渗氮层时,则无法形成有效回弹,而当无法击穿时,基体硬度也无法形成有效支撑作用。因此便携式硬度计所检测到维氏硬度值与真实硬度值存在差异,仅可适用实际现场生产参考数值。

5 结束语

1) 42CrMo渗氮钢前期预处理存在不完全脱碳层时,经离子渗氮后不影响表面显微硬度的检测,

氮与合金元素结合所形成的合金渗氮物占强化效果的主导地位。

2) 经离子渗氮后,在表层存在不完全脱碳层时,表层等间距显微硬度梯度降低幅度最大,脆性等级显著下降,存在渗氮层剥落的风险。

3) 采用正火处理方式和过高的调质回火温度所获得的离子渗氮预备热处理显微组织,经离子渗氮后不同表面硬度检测方式均受到影响。

参考文献:

- [1] 卢金生,李宝奎. 齿轮的精密热处理及抗疲劳制造探讨[J]. 机械传动, 2019, 43 (3): 170-175.
- [2] 焦中庆. 42CrMo汽车转向泵齿轮离子渗氮工艺[J]. 金属加工(热加工), 2009 (23): 28-30.
- [3] 李双喜,孙启峰,王鑫,等. 38CrMoAl钢表面离子渗氮层剥落原因分析[J]. 金属热处理, 2019, 44 (2): 223-226.
- [4] 林丽华,曹维涤,鲁晓平,等. 离子渗氮层的组织形态与疲劳性能[J]. 金属热处理学报, 1986, 7 (1): 35-46.
- [5] 房双强,陈茂涛,张进. 调质预处理对32Cr3Mo1V钢渗氮层的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41 (4): 146-149.
- [6] 秦向群,顾敏,晏汝平,等. 里氏硬度计对大型渗氮件表面硬度检测适用性探讨[J]. 金属热处理, 2000 (1): 44-46.

MW 20240509

《金属加工(热加工)》2024年第6期广告目次

单位名称	查询编号	位置
易孚迪感应设备(上海)有限公司	1492	封面
北京金威焊材有限公司	1161	封二
伊达新技术电源(昆山)有限公司	1925	封三
恒进感应科技(十堰)股份有限公司	1468	封底