

20Cr2Ni4钢的渗碳工艺试验

何业增^{1, 2}, 马成飞¹, 李云鹏², 王倩², 宋庆雷², 刘友军², 沈承金¹

1. 中国矿业大学材料与物理学院 江苏徐州 221116

2. 徐州巴特工程机械股份有限公司 江苏徐州 221004

摘要: 20Cr2Ni4钢是一种高Cr、Ni渗碳合金钢,具有良好的淬透性、硬度和心部韧性。采用“渗碳+高温回火+二次加热淬火+低温回火”及“渗碳+直接淬火+冷处理+低温回火”两种工艺对20Cr2Ni4钢进行热处理,并从显微组织、渗层硬度梯度、表面及心部硬度、耐磨性与冲击性能等方面进行对比。结果表明:“渗碳+高温回火+二次加热淬火+低温回火”处理后的试样渗碳效果、表面硬度更好,“渗碳+直接淬火+冷处理+低温回火”处理后的试样则减少了淬火变形与表层氧化脱碳。

关键词: 20Cr2Ni4钢; 渗碳; 热处理

Research on heat treatment process of 20Cr2Ni4 steel

HE Yezeng^{1, 2}, MA Chengfei¹, LI Yunpeng², WANG Qian², SONG Qinglei², LIU Youjun², SHEN Chengjin¹

1. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China

2. Xuzhou But Engineering Machinery Co., Ltd., Xuzhou 221004, Jiangsu, China

Abstract: 20Cr2Ni4 steel is a high Cr, Ni carburizing alloy steel with good hardenability, hardness and core toughness. Two processes of “carburizing + high temperature tempering + secondary heating quenching + low temperature tempering” and “carburizing + direct quenching + cold treatment + low temperature tempering” were used to heat treat 20Cr2Ni4 steel, and the microstructure, hardness, wear resistance and impact toughness were compared. The results show that the carburizing effect and surface hardness of the samples treated by the secondary heating and quenching process are better, while the samples treated by the direct quenching process reduce the quenching deformation and surface oxidation and decarburization, save energy and reduce emissions, and improve the production efficiency.

Keywords: 20Cr2Ni4 steel; carburizing; heat treatment

1 序言

20Cr2Ni4钢为高强度合金渗碳钢,具有很好的淬透性、硬度和心部韧性,常用于重载齿轮及承受冲击载荷较大的齿轮和活塞,以及化工、冶金、矿山机械、电站、船舶与航空等领域^[1, 2]。但由于该材料合金含量高,渗碳淬火后表面残留奥氏体多、硬度低,所以为了提高表面硬度及心部韧性,则需

要采用特殊的热处理方式降低残留奥氏体含量、提高硬度^[3-6]。目前对于一些合金钢的热处理方式有很多种,如黄海清^[7]通过改变渗碳后的高温回火温度和时间来处理18Cr2Ni4WA钢,得出在渗碳后于670℃回火两次是消除渗碳层中残留奥氏体的最有效方法。罗子相等^[8]通过深冷处理有效地增加了18Cr2Ni2MoNbA钢的马氏体含量,使渗碳层的显微

硬度增加,改善了18Cr2Ni2MoNbA钢的耐磨性。综合目前相关的热处理研究,本研究选用20Cr2Ni4钢作为研究材料,采用“渗碳+高温回火+二次加热淬火+低温回火”及“渗碳+直接淬火+冷处理+低温回火”两种工艺进行热处理,旨在探究出最适合的热处理工艺。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料成分

试验材料选用20Cr2Ni4钢,试样形状尺寸为20mm×20mm×20mm的立方块,20Cr2Ni4钢化学成分满足GB/T 3077—2015《合金结构钢》的规定。20Cr2Ni4钢的实际化学成分见表1。

表1 20Cr2Ni4钢的实际化学成分(质量分数) (%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0.214	0.271	0.491	0.001	0.005	1.631	3.579

2.2 试验方法

选用两种热处理工艺进行试验,分别为“渗碳+高温回火+二次加热淬火+低温回火”和“渗碳+直接淬火+冷处理+低温回火”。热处理试验在多用渗碳炉中进行,渗碳介质为丙烷和甲醇,淬火介质为快速光亮淬火油。图1a所示为“渗碳+高温回火+二次加热淬火+低温回火”工艺流程。首先将试样进行渗碳(渗碳过程分为强渗阶段、扩散阶段及保温阶段),渗碳结束后试样缓冷,接着进行高温回火工序(温度630℃,时间300min);然后进行加热淬火,淬火温度810℃,保温180min,接着油淬;最后进行两次低温回火工序(温度190℃,时间300min)。为简化描述,将此工艺定义为二次加热淬火工艺。图1b所示为“渗碳+直接淬火+冷处理+低温回火”工艺流程。同样,首先将试样进行渗碳,渗碳结束后即进行淬火;接着进行冷处理,−80℃下保温240min;最后进行两次低温回火工序(温度190℃,时间300min),将此工艺定义为直

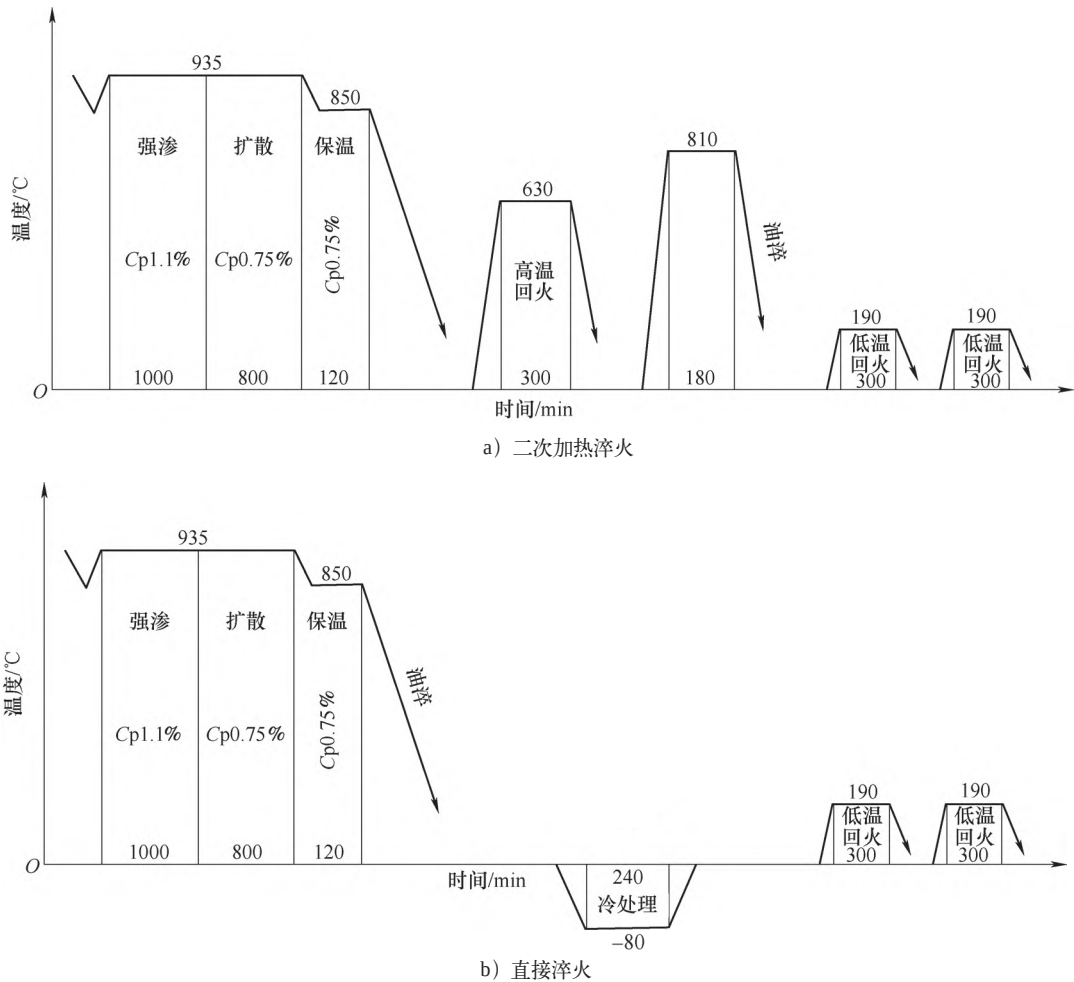


图1 热处理工艺流程

接淬火工艺。

2.3 样品分析

热处理完成后, 试样展现层次变化的组织结构, 使用光学显微镜(OM)观察试样表层和心部的组织结构; 利用THR-150s洛氏硬度计检测两种工艺最终样品的表面硬度和心部硬度, 硬度施加压力150kgf, 载荷时间为5s, 每组工艺的表层硬度及心部硬度均进行5次测量, 并取平均值作为测试结果; 采用VH1102-01-0172显微硬度计检测两种工艺最终样品的实际渗碳层厚度; 使用MMS-2A摩擦磨损机器检测两组样品的耐磨性, 采用GCr15作为对磨副环, 设置转速为400r/min, 载荷为200N, 时间为120min, 每隔30min检测一次样品失重量; 采用JBN-300型冲击试验机对样品的冲击性能进行检测。

3 结果和讨论

3.1 显微组织分析

图2所示为二次加热淬火工艺处理之后最终样品的表层和心部的显微组织。从图2a~c可看出, 首先试样经过渗碳及高温回火后, 渗碳层中的残留奥氏体发生分解, 并析出碳化物, 后续进行二次加热淬火, 发生切边相变, 奥氏体转变为马氏体, 最后进行低温回火, 残留奥氏体减少, 马氏体转变为回火

马氏体。因此, 试样表层组织主要由高碳马氏体及少量残留奥氏体组成, 从图2d~f可看出, 试样心部组织主要为低碳板条状马氏体, 因为离表层越远, 含碳量越低, 并且 M_s 点较高, 热处理过程中马氏体转变更完全^[9]。

图3所示为直接淬火工艺处理之后最终样品的表层和心部位置的显微组织。从图3中可看出, 两种工艺所得试样组织形貌类似, 其表层组织均由高碳马氏体及一些残留奥氏体组成, 心部组织由低碳板条马氏体组成。由于从表层至心部碳含量逐渐减少, 在渗碳淬火过程中表层的碳含量增加, 形成高碳组织, 表层获取最多的固溶碳, 从而原始 γ 相淬火切变相变困难, 因此, 试样表层主要为密集分布的片状马氏体, 并且表层碳含量过高, 致使 M_s 点降低, 则渗碳淬火冷却至室温时马氏体转变不完全, 保留了一部分残留奥氏体, 后续冷处理则进一步发生切边相变, 使残留奥氏体进一步转化为马氏体。试样心部组织则主要由板条状马氏体组成。对比二次加热淬火工艺和直接淬火工艺试样显微组织, 可看出二次加热淬火试样表层残留奥氏体要低于直接淬火试样, 这是由于二次加热淬火工艺中的高温回火工序减少了渗碳层中的残留奥氏体的量, 以及后续的二次加热淬火过程得到了更多的稳定碳化物和马氏

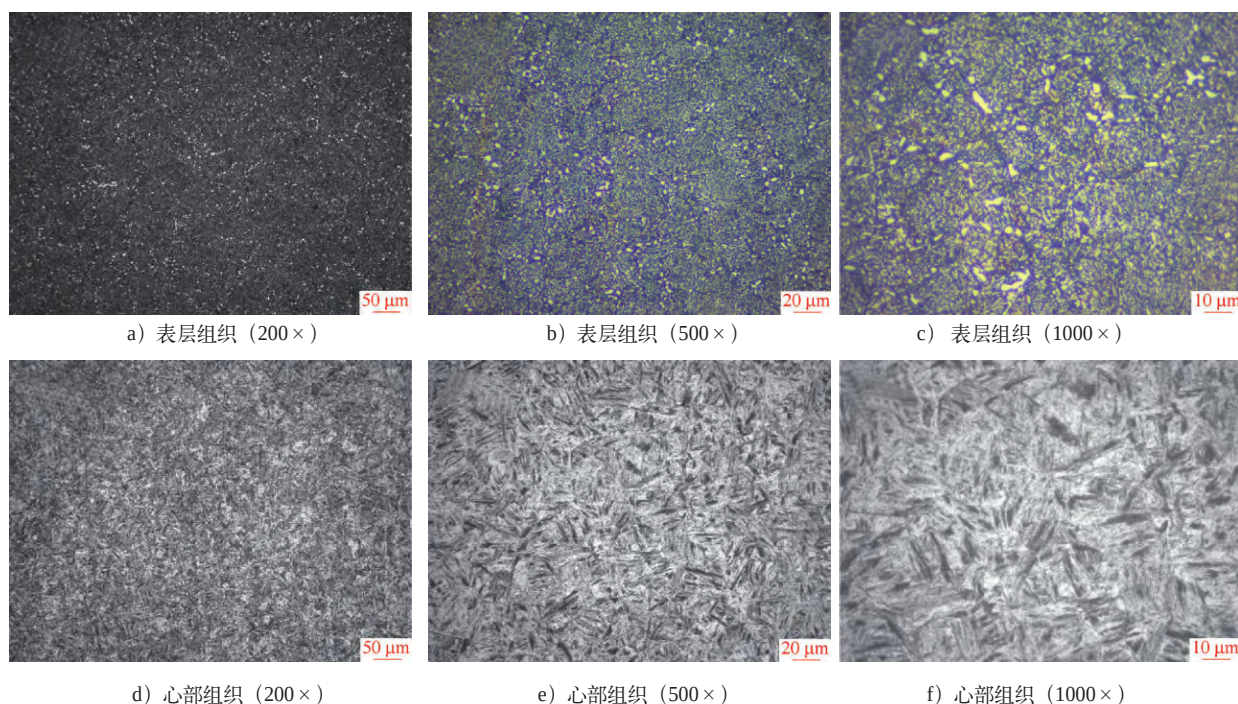


图2 二次加热淬火所得试样组织

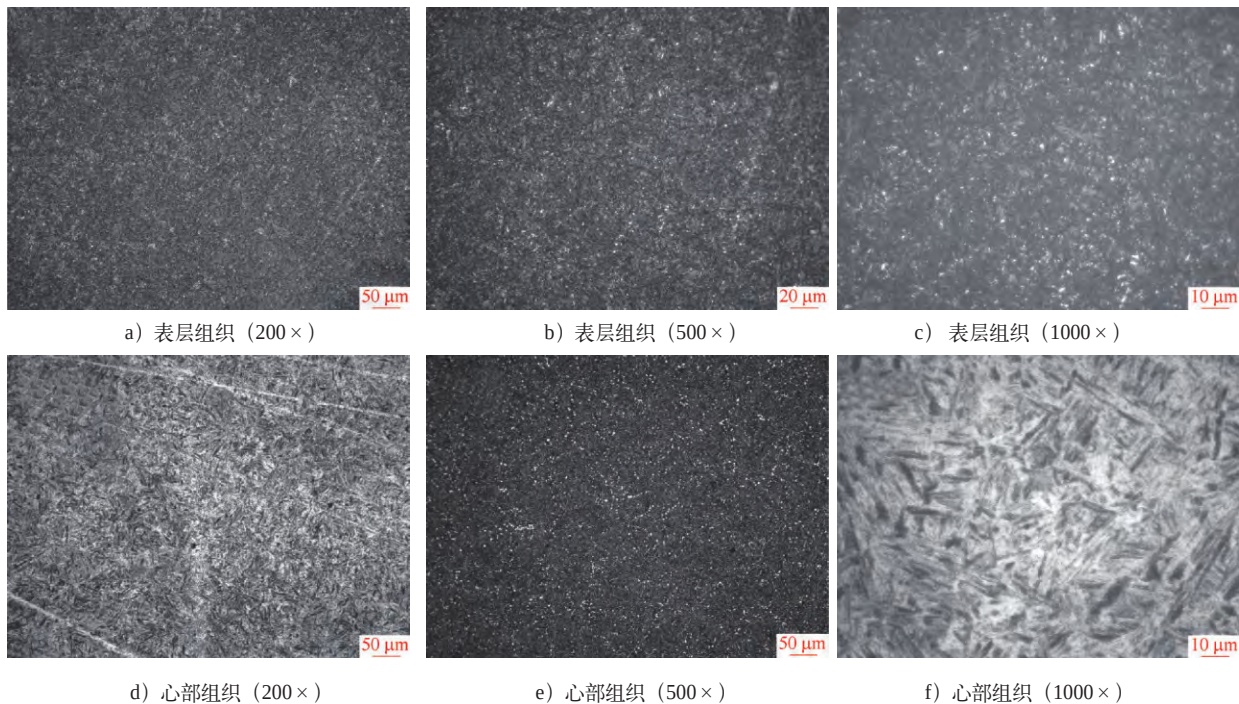


图3 直接淬火所得试样组织

体组织，减少了残留奥氏体含量。

两种工艺下样品所检测的显微组织结果见表2。对照GB/T 25744—2010《钢件渗碳淬火回火金相检验》，可以得出二次加热淬火工艺所得试样渗碳层组织马氏体等级为2级、残留奥氏体等级为2级、碳化物等级为2级、心部组织等级为1级。直接淬火所得试样渗碳层组织马氏体等级为4级、残留奥氏体等级为4级、碳化物等级为2级、心部组织等级为1级。

表2 两种工艺的显微组织检测结果 (级)

组织	显微组织等级	
	二次加热淬火	直接淬火
马氏体+残留奥氏体	2	4
碳化物	2	2
心部组织	1	1

3.2 渗碳层硬度梯度分析

图4所示为两种工艺处理之后最终试样的显微硬度梯度结果，相对应于显微组织结构，渗碳淬火处理为20Cr2Ni4钢表层至心部引入了梯度分布的硬度特性。

从图4可看出，热处理工艺使20Cr2Ni4材料从表层到心部形成硬度的梯度分布。通过渗碳淬火过

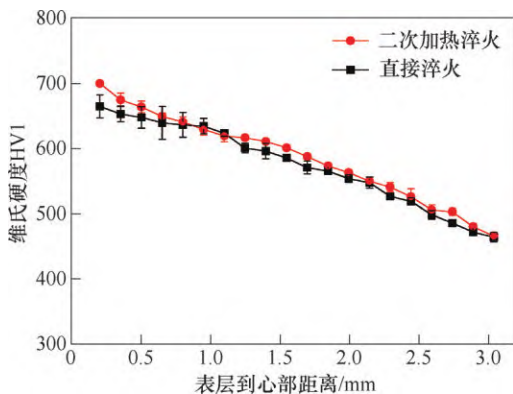


图4 两种工艺最终样品的显微硬度梯度曲线

程，奥氏体转化成富含高饱和固溶碳的马氏体，其中固溶强化和相变强化作用显著，表层呈现高硬度，且从表层到心部，硬度逐渐减小。

从试样表面到维氏硬度值为550HV1处的垂直距离为渗碳淬火硬化层深度，从图4中可看出，二次加热淬火试样硬化层深度为2.14mm，直接淬火试样硬化层深度2.07mm。对比两种工艺试样的硬化层深度，二次加热淬火试样的硬化层深度要比直接淬火试样深0.07mm。并且从图4中显微硬度曲线看出，二次加热淬火试样显微硬度相同下的深度普遍要高于直接淬火试样，这是由于二次加热淬火使得碳原子进一步扩散，均匀并且平衡组织，使得该工艺下所得试样强度更高。

3.3 形变量分析

对比两种工艺所得试样，将工件分别进行形变量检测，每组试样的初始体积和热处理之后的体积均进行3次测量，并取平均值为最终结果。其中，体积测试采用密度天平遵照GB/T 3850—2015《致密烧结金属材料与硬质合金 密度测定方法》中相关标准进行测量，体积计算公式为

$$V=(m_1-m_2)/\rho_{\text{水}}$$

式中 m_1 ——试样空气下质量 (kg)；

m_2 ——试样在水中的表现质量 (kg)；

$\rho_{\text{水}}$ ——水的密度 (kg/m^3)。

两种热处理工艺前后试样的形变率见表3。从表3可看出，两种工艺均会使试样的体积变大，主要是因为产生组织应力，淬火后奥氏体切变相变为马氏体，即产生膨胀，体积变大。二次加热淬火试样的变形量相比于直接淬火试样的变形量更高，说明二次加热淬火工艺中的高温回火及淬火工序使得试样的体积变化更大。一方面是因为高温回火工序及二次加热淬火工序使得试样的升温及冷却的次數明显增多，则容易导致试样的畸变量更高；另一方面是由于二次加热淬火工艺会导致更多的奥氏体转变成马氏体，从而体积再次膨胀，体积变大。

表3 两种工艺热处理前后形变率

工艺	初始体积 / cm^3	热处理后体积 / cm^3	变形率 (%)
二次加热 淬火	7.908	8.052	1.82
直接淬火	7.912	7.980	0.86

3.4 表面及心部硬度分析

不同热处理工艺为20Cr2Ni4表层和心部带来了不同的强化效果，在固溶强化、相变强化等共同作用下，材料表层保持高硬度。两种工艺热处理后洛氏硬度测试结果见表4。从表4可看出，二次加热淬

表4 两种工艺热处理后洛氏硬度测试结果 (HRC)

工艺	表层硬度	表层平均 硬度	心部硬度	心部平均 硬度
二次加 热淬火	60.4、61.0、 60.8、60.6、 60.7	60.7	44.7、44.8、 44.8、43.9、 44.5	44.5
直接 淬火	59.4、58.2、 58.6、59.0、 58.8	58.8	43.6、44.6、 43.9、44.6、 44.8	44.3

火样品表层硬度平均值为60.7HRC，直接淬火样品表层硬度平均值为58.8HRC。二次加热淬火试样的表面洛氏硬度比直接淬火要高1.9HRC，这与显微硬度的结果比较吻合，是由于晶粒细化和碳化物析出导致。同样，从表4可看出，二次加热淬火样品的心部硬度平均值为44.5HRC，直接淬火样品的心部硬度平均值为44.3HRC，两种工艺所得心部硬度差距不大，说明两种热处理工艺对心部组织的硬度影响不大。从检测结果来看，两种热处理工艺所得样品心部硬度与表面硬度配合还是较为理想的。

3.5 耐磨性分析

摩擦磨损试验之后将两种工艺试样的磨损失重量进行对比，以此来比较两种工艺对试样耐磨性的影响。图5所示为两种热处理工艺最终样品的摩擦磨损损失重量对比结果。

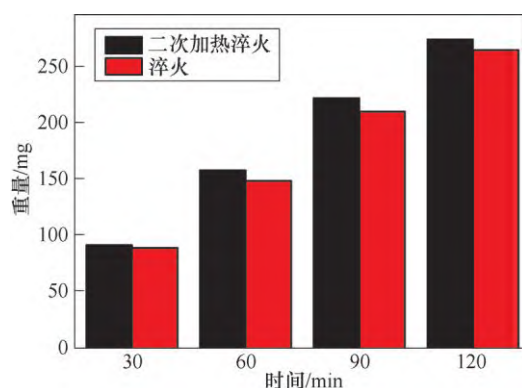


图5 两种工艺最终样品摩擦磨损损失重量对比结果

二次加热淬火工艺及直接淬火工艺试样，经过热处理后，试样在固溶强化、相变强化及析出强化共同作用下，材料表层强度得到大幅提升。从图5可看出，两种工艺试样在经过30min、60min、90min和120min的摩擦磨损之后，试样的失重量相差不大，且在相同时间段的磨损量差距也很小，二次加热淬火试样的磨损量在每个阶段相较于直接淬火试样要稍高一些。从检测结果可得出，两种热处理工艺对样品耐磨性能的影响差距不大。

3.6 冲击性能分析

通过夏比冲击试验来检测试样的冲击性能，两种热处理工艺最终样品的冲击吸收能量测试结果见表5。

从表5可看出，与组织相对应，试样心部韧性得到提升，两种工艺下试样心部组织均为板条状马氏

表5 两种工艺最终样品的冲击吸收能量 (J)

工艺	冲击吸收能量	平均值
二次加热淬火	72、68、74	71.3
直接淬火	69、72、71	70.7

体，板条马氏体的晶格畸变相对较小，内部含有大量高密度的位错等缺陷，从而赋予了材料较好的韧性。此外，板条马氏体主要通过小角度晶界相互接触，进一步增强材料的韧性。二次加热淬火工艺处理后得到的样品冲击吸收能量平均值为71.3J；直接淬火工艺处理后得到的样品冲击吸收能量平均值为70.7J。两种工艺的冲击吸收能量差距并不大。从检测结果可知，两种工艺对于试样冲击性能的影响差距不大。

4 结束语

本研究采用“渗碳+高温回火+二次加热淬火+低温回火”及“渗碳+直接淬火+冷处理+低温回火”两种工艺对20Cr2Ni4钢进行热处理，并从显微组织、渗层硬度梯度、表面及心部硬度、耐磨性、冲击性能等方面进行对比，得到如下结论。

1) 二次加热淬火工艺与直接淬火工艺对比，二次淬火工艺处理所得试样表面硬度更高，硬化层深度更深。

2) 直接淬火工艺所得试样表面硬度亦能超过58HRC，该工艺可以减少加热和冷却的次数，减少

变形。

3) 两种工艺所得试样表面耐磨性能、心部硬度以及冲击性能相近。

参考文献：

[1] 赵少甫, 许鸿翔, 王红伟, 等. 提高20Cr2Ni4A钢齿轮渗碳淬火硬度的试验研究[J]. 金属热处理, 2021, 46 (7) : 120-125.

[2] 付海峰, 李俏, 徐跃明. 重载齿轮热处理及应用[J]. 金属热处理, 2020, 45 (3) : 178-185.

[3] 薛维华. 20CrNi2Mo钢热处理工艺及性能研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.

[4] 许鸿翔, 王红伟, 蒲江涌, 等. 20Cr2Ni4钢渗碳淬火弧齿锥齿轮磨削烧伤的检测与分析[J]. 金属热处理, 2022, 47 (11) : 271-275.

[5] 赵杰, 李艳, 郑俊涛. 20Cr2Ni4钢制打击罩硬度异常分析[J]. 理化检验 (物理分册), 2019, 55 (12) : 850-852, 858.

[6] PANG L, LIU G C, LU J P. 2015 Iop Conference Series: Materials Science & Engineering [C]. Bristol: IOP Publishing, 2015.

[7] 黄海清. 18Cr2Ni4WA渗碳钢的热处理工艺研究[J]. 热处理, 2007 (4) : 49-52.

[8] 罗子相, 刘克, 杨兵, 等. 深冷处理对18Cr2Ni2MoNbA钢耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47 (10) : 164-168.

[9] 张天宇. 18Cr2Ni4W渗碳层强韧化处理与疲劳磨损行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.

MW 20240826

《金属加工（热加工）》2024年第10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
伊达新技术电源（昆山）有限公司	1925	封二
北京金威焊材有限公司	1161	封三
恒进感应科技（十堰）股份有限公司	1468	封底

单位名称	查询编号	位置
昆山京群焊材科技有限公司	5123	前彩1
北京中孚悦达真空科技有限公司	5378	前彩2
慕尼黑华南激光展	8039	V