

电磁感应真空变脉冲工艺对 20CrMnTi 钢渗碳层组织与性能的影响

冯治国¹, 赵驯峰¹, 刘静²

(1. 贵州大学, 贵州 550025; 2. 贵州师范大学, 贵州 550025)

摘要: **目的** 研究真空脉冲渗碳过程中“强渗”与“扩散”脉冲分布占比对 20CrMnTi 钢渗碳层晶粒粗化行为及组织性能的影响。**方法** 采用一种电磁感应真空变脉冲渗碳新方法, 经“原脉冲”、“变强渗”、“变扩散”、“变压力”四种工艺, 制备了组织致密的 20CrMnTi 钢渗碳层。利用 SEM、EBSD、自动显微硬度仪以及 XRD 应力衍射仪等对渗碳层的微观形貌、晶体相变特征、硬度梯度以及表面残余应力进行了深入分析。**结果** 对比分析四种工艺方法, “变强渗”工艺虽使 20CrMnTi 钢渗碳层厚度达到 1450 μm , 但渗碳层中仍存在大量块状 Fe_3C ; “变扩散”工艺使 20CrMnTi 钢渗碳层的 Fe_3C 含量下降到 3.88%, 残余奥氏体含量下降到 7.32%, 厚度达到 1320 μm , 其中表层 0~60 μm 范围内, 硬度提高到 780 $\text{HV}_{0.5}$, 表面残余压应力增加到 -231 MPa。故“变扩散”工艺使渗碳层组织性能最佳。**结论** “变强渗”工艺增加了渗碳前期表层与内部的碳浓度差, 提高了碳原子扩散驱动力, 利于渗碳层生长; “变扩散”工艺在渗碳后期使碳化物进一步溶解, 这利于碳原子向渗碳层内部充分扩散, 降低了渗碳层的碳化物析出和残余奥氏体形成。

关键词: 电磁感应; 真空渗碳; 变脉冲; 强渗-扩散; EBSD; 微观组织

中图分类号: TG156.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0076-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.011

Effects of Electromagnetic Induction Vacuum Transform-pulse on Carburizing Structure and Performance of 20CrMnTi Steel

FENG Zhi-guo¹, ZHAO Xun-feng¹, LIU Jing²

(1. Guizhou University, Guizhou 550025, China; 2. Guizhou Normal University, Guizhou 550025, China)

ABSTRACT: The work aims to study grain coarsening behavior and microstructure on the carburized layer of 20CrMnTi steel by controlling the distribution of “boost” and “diffusion” pulses in the process of vacuum pulse carburizing. An electromagnetic induction vacuum pulse carburizing was used to prepare carburized layers on 20CrMnTi steel through four processes of “original pulse”, “variable boost”, “variable diffusion” and “variable pressure” respectively. Meanwhile, the microstructure, crystal phase transition, hardness gradient and surface residual stress of the carburized layers were analyzed deeply through SEM, EBSD, automatic microhardness tester and XRD residual stress tester. Through the comparison and analysis of four processes,

收稿日期: 2018-07-25; 修订日期: 2018-09-13

Received: 2018-07-25; **Revised:** 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51574096, 51464008); 贵州省优秀青年科技人才培养项目 (黔科合平台人才[2016]5607 号, 黔科合 JZ 字[2014]2003 号)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51574096, 51464008), the Excellent Youth Science and Technology Talent Training Project of Guizhou (Qian Ke He (2016)5607, Qian Ke He(2014)2003)

作者简介: 冯治国 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属表面处理工艺装备及热处理模拟仿真研究。

Biography: FENG Zhi-guo (1978—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface treatment process equipment and heat treatment simulation.

通讯作者: 刘静 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属表面处理与动力学研究。邮箱: liujing_lynn@126.com

Corresponding author: LIU Jing (1979—), Male, Doctor, Professor, Research focus: metal surface treatment and kinetic. E-mail: liujing_lynn@126.com

the thickness of the carburized layer of 20CrMnTi steel reached 1450 μm , but there was still a large amount of massive Fe_3C in the carburized layer after the process of “variable boost”. The Fe_3C , the retained austenite and the thickness in carburized layer of 20CrMnTi steel treated by the “variable diffusion” process decreased to 3.88%, 7.32% and 1320 μm respectively. In addition, the hardness of the carburized layer in the depth of 0 to 60 μm increased to 780 $\text{HV}_{0.5}$ and the surface residual compressive stress increased to -231 MPa. From the results, the “variable diffusion” could provide the optimum structure property. “Variable boost” process increases the carbon concentration difference between the surface layer and the interior during the early stage of carburization and improves the diffusion driving force of carbon atoms, which is favorable for the growth of the carburized layer. Moreover, the “variable diffusion” process further dissolves the carbides in the late stage of carburization, which facilitates the full diffusion of carbon atoms into the interior of the carburized layer and reduces carbide precipitation and formation of residual austenite in the carburized layer.

KEY WORDS: electromagnetic induction; vacuum carburizing; transform-pulse; boost-diffusion; EBSD; microstructure

20CrMnTi 钢是典型的渗碳钢, 通过渗碳淬火可以提高钢表层的硬度和耐磨性, 且渗碳淬火后心部具有强韧性^[1-3], 因此被广泛应用于生产制造齿轮、齿轮轴、齿圈等重载零件^[4-5]。石巨岩等^[6]采用预渗碳加循环渗碳方法对 20CrMnTi 钢进行表面处理, 发现渗碳层中形成了大量弥散分布的粒状碳化物, 其表面硬度达到 1057 $\text{HV}_{0.1}$, 耐磨损性能比常规渗碳提高 20%。康承飞等^[7]通过液相感应渗碳技术对 20CrMnTi 钢进行了渗碳处理, 发现渗碳层的组织主要是针状马氏体。其中, 930 $^{\circ}\text{C}$ 渗碳 10 min 得到的渗碳层厚度为 255 μm , 渗碳层的最高硬度为 810 $\text{HV}_{0.3}$ 。王昊杰等^[8]基于真空低压渗碳炉, 研究分析了不同渗碳工艺参数对 20CrMnTi 钢晶粒粗化行为的影响规律。结果表明, 20CrMnTi 钢的奥氏体晶粒长大规律符合 Beck 关系式, 且奥氏体晶粒随加热温度的升高呈指数形式长大, 温度越高, 晶粒生长指数越大。

上述文献研究表明, 20CrMnTi 钢渗碳层中弥散的碳化物、残余奥氏体的尺寸与分布会影响渗碳层性能。贵州大学金属材料表面处理研究室通过深入分析

20CrMnTi 钢渗碳动力学及渗碳控速机理^[9]发现, 20CrMnTi 钢渗碳过程在渗碳前阶段主要受“表层吸附”控制, 而在渗碳后期, 由于碳原子的扩散路径增加, 是以“内扩散”控速为主。但在渗碳过程中, 如何控制碳含量对 20CrMnTi 钢晶粒粗化行为的影响尚不明确。因此, 本文针对“前阶段碳势不足, 后阶段扩散能力不足”的特点, 提出电磁感应真空变脉冲渗碳方法, 通过调整渗碳过程中“强渗”及“扩散”占比的方法, 研究 20CrMnTi 钢渗碳层晶粒粗化行为、组织演变规律及性能。

1 实验

实验材料为 20CrMnTi 钢, 试样尺寸 $\phi 15 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。实验前, 试样经 600、800、1000、1500、2000、2500、3000 号砂纸依次研磨后, 采用粒度为 W0.25 的抛光剂抛光, 最后进行无水乙醇清洗、吹干等预处理。实验采用课题组自主研发的真空电磁感应渗碳装置^[10], 如图 1 所示。实验时, 渗碳温度为 940 $^{\circ}\text{C}$,

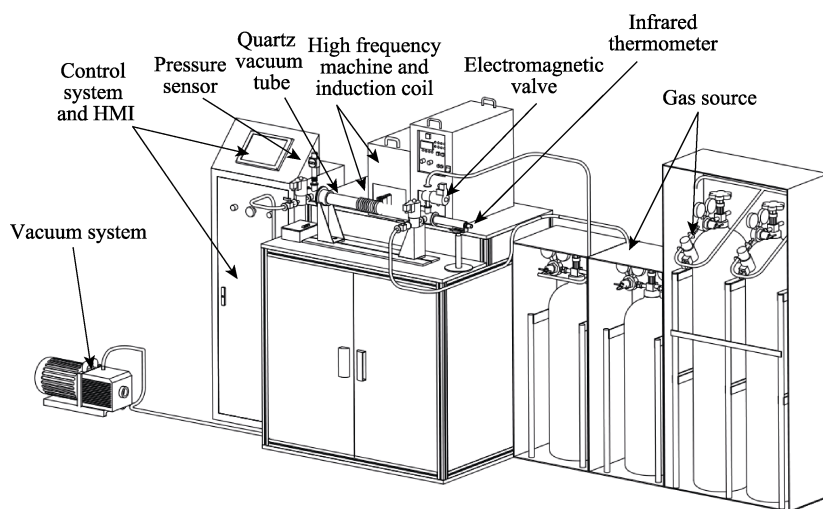


图 1 电磁感应真空渗碳装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic induction vacuum carburizing device

渗碳介质为 C_2H_2 和 CH_4 比例为 1:5 的混合气体, 采用“充气强渗-真空扩散”交替型工艺^[11-12], 即先向装置真空管内充入一定压力的渗碳介质并保持压力, 使试样进入强渗阶段, 随后抽真空进入扩散阶段, 交替进行 8 个强渗-扩散周期, 随后充入 1 atm 的氩气, 降温至 880 °C 并保温 10 min, 之后进行油淬, 经 180 °C 低温回火 2 h, 最后取出试样。

实验采用四种工艺, 其强渗-扩散脉冲时间分布及渗碳压力如图 2 所示。工艺 1: 循环 8 个固定的脉冲, 强渗压力为 -70 kPa, 保压强渗-真空扩散时间分

配为 10 min-5 min (以下称为“原脉冲”)。工艺 2: 循环 8 个强渗时间随循环次数逐步延长的变脉冲, 其中保持强渗压力 -70 kPa 和真空扩散 5 min 脉冲时间不变 (以下称为“变强渗”)。工艺 3: 循环 8 个真空扩散脉冲时间随循环次数逐步延长的变脉冲, 其中保持强渗压力 -70 kPa 和强渗 10 min 脉冲时间不变 (以下称为“变扩散”)。工艺 4: 循环 8 个强渗压力随循环次数逐步减小的变脉冲, 其中保持真空强渗-保压扩散脉冲时间分配为 5 min-10 min, 并始终保持脉冲时间不变 (以下称为“变压力”)。

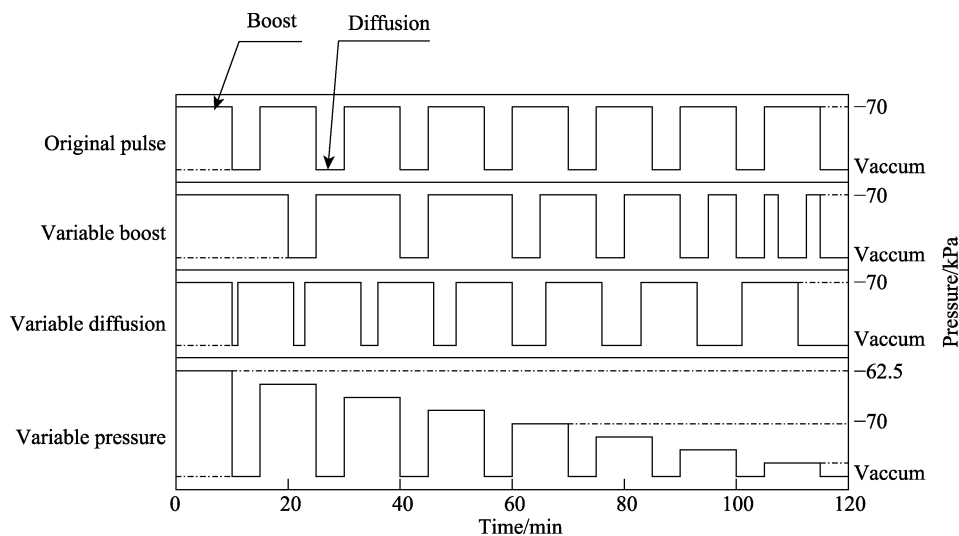


图 2 强渗-扩散脉冲时间以及渗碳压力分布

Fig.2 Distribution of boost-diffusion pulse and carburizing pressure

采用场发射扫描电子显微镜 (Inspect F, 美国) 分析试样渗碳层微观组织形貌和沿渗碳层方向的元素分布。采用 X 射线光电子能谱仪 (EscaLab 250Xi, 美国) 检测渗碳试样表面碳含量。采用电子背散射衍射技术 (Oxford Instruments, 英国) 分析试样渗碳层截面 100 $\mu m \times 100 \mu m$ 面积区域内的残余物相含量及晶体取向。采用射线应力衍射仪 (X-350A, 中国) 分析渗碳层表面残余应力, 测试条件: 靶材 $CrK\alpha$, 管电压 40 kV, 管电流 40 mA。采用自动显微硬度仪 (MHV-2.0, 中国) 对试样截面进行硬度梯度测量, 其中载荷 0.49 N, 间距 70 μm , 保荷时间 15 s。

2 结果及分析

2.1 渗碳层相结构及微观形貌

图 3 和表 1 分别是经四种电磁感应真空脉冲渗碳工艺处理后的渗碳层微观形貌以及试样表面碳含量。由图 3 可知, 渗碳层组织主要为高碳马氏体、碳化物及残余奥氏体的复合组织。由于 20CrMnTi 钢真空脉冲渗碳后期主要是受“活性碳原子内扩散”控制, 渗碳前表层聚集大量碳原子而得不到充分扩散, 表层组织的奥氏体中含碳量大大增加, 从而形成较大的块状碳化物和大量残余奥氏体, 并随着渗碳层深度的增加,

碳浓度下降, 片状马氏体开始逐渐向板条状马氏体转变, 而块状碳化物逐渐减小至消失, 如图 3a 所示。由表 1 可知, “变强渗”试样的表面碳含量略高于“原脉冲”, 图 3b 表明渗碳层组织仍有大量块状碳化物存在, 但块状碳化物尺寸相比图 3a 较小, 表明尽管在渗碳前期加强碳原子的吸附渗入, 能提高试样表层与内部碳浓度差, 以此提高渗碳后期碳原子扩散的驱动力, 但也不能完全避免块状碳化物的析出。图 3c 中, 表层组织在奥氏体晶界中, 基本无明显块状结构的碳化物形成, 相应的表面碳含量仅为 0.56%。其原因在于, 逐步延长真空扩散渗时间, 能促使表层在渗碳前期形成的碳化物进一步溶解, 利于碳原子向渗碳层内部充分扩散, 进而使表面碳含量下降。图 3d 所示的表层组织也存在大量的块状碳化物。实验时, 试样表层有炭黑形成, 可能原因是渗碳过程中碳势浓度过高, 表层形成的炭黑阻止活性碳原子吸附、扩散, 导致表面碳含量相对较低以及较少的块状碳化物析出。

2.2 渗碳层物相分布与晶体相变特征分析

为了研究经调整的吸附、扩散控速机理对渗碳层成分以及组织相变的影响, 进一步分析了“原脉冲”和“变扩散”工艺处理后, 试样渗碳层的物相分布和晶体相变。采用电子背散射衍射 (EBSD) 扫描试样渗碳

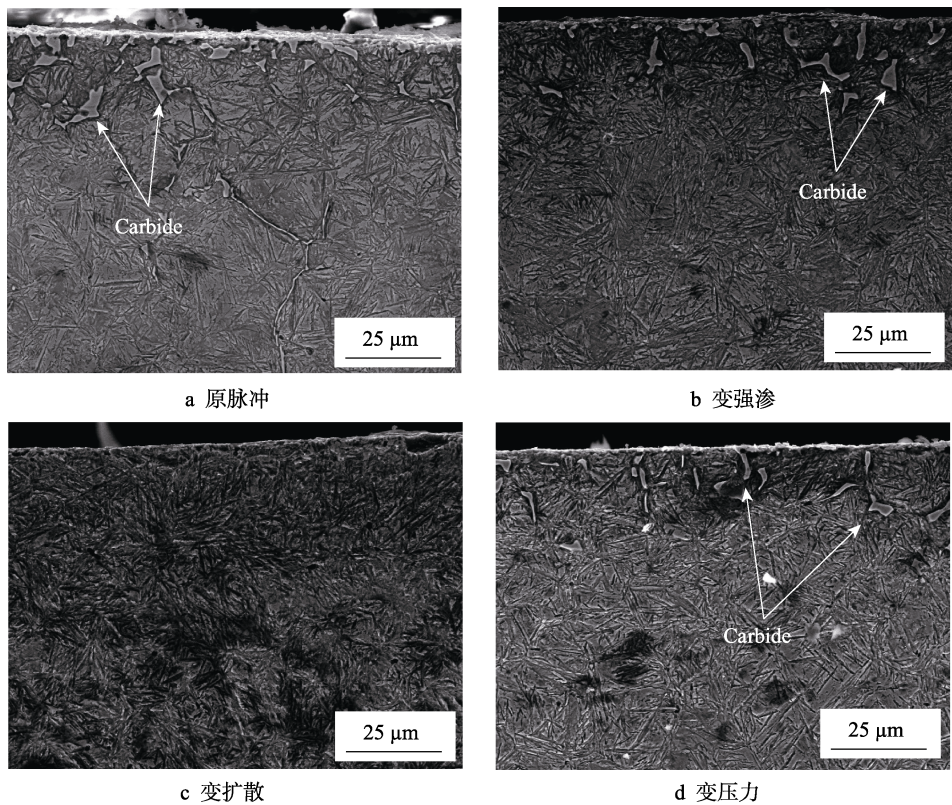


图 3 不同工艺下 20CrMnTi 钢渗碳层微观形貌

Fig.3 Metallographic structure of carburized layer of 20CrMnTi steel under different process: a) original pulse; b) variable diffusion; c) variable diffusion; d) variable diffusion

表 1 不同渗碳工艺下 20CrMnTi 钢的表面碳含量
Tab.1 Surface carbon contents of 20CrMnTi steel under different carburizing processes

Process	Original pulse	Variable boost	Variable diffusion	Variable pressure
C/wt%	0.87	0.88	0.56	0.66

层，获得的相分布和相含量如图 4 和表 2 所示。由图 4 的物相分布可知，20CrMnTi 钢渗碳层主要为体心结构的马氏体、面心立方结构的残余奥氏体以及 Fe₃C 化合物组成的复合组织。图 4a 是“原脉冲”试样渗碳

层的相分布，其含有大面积的面心立方结构残余奥氏体，含量为 24.52%。图 4b 是“变扩散”试样的物相分布，通过加强扩散过程后，渗碳层富集碳原子的扩散更充分和均匀，残余奥氏体形成量明显比前者少很多，含量仅为 7.32%。少量细小均匀的残余奥氏体，对渗碳层的组织与性能有一定的益处^[13-14]。由图 4a、b 中可知，未分解的残余奥氏体在渗碳层最表层的含量要比次表层较少，主要是由于表面脱碳、内氧化或碳化物的析出，导致奥氏体含碳量降低^[15]。图 4a 中渗碳层最表层组织中出现不连续粗大块状的碳化物，

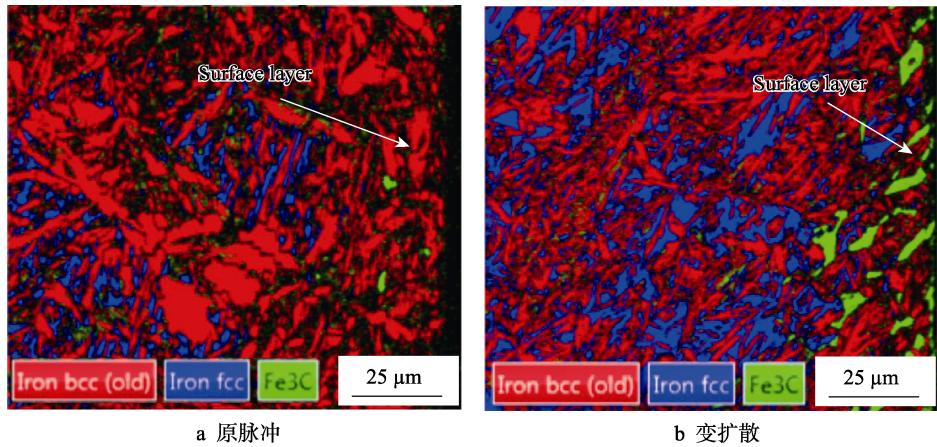


图 4 渗碳层表层物相分布

Fig.4 Phase distribution of carburized layer: a) original pulse; b) variable diffusion

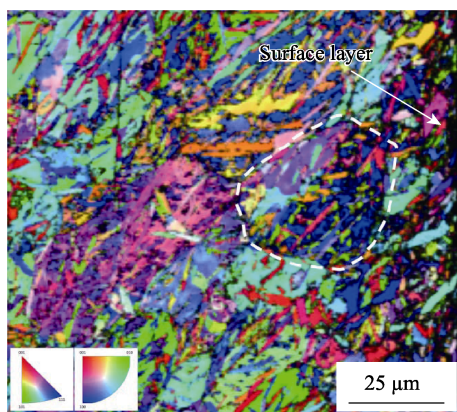
表 2 渗碳层物相百分比
Tab.2 Phase percentage of carburized layer

Process	Iron bcc (old)/%	Iron fcc /%	Fe ₃ C /%	Zero solutions/%
Original pulse	41.35	24.52	5.75	28.38
Variable diffusion	48.33	7.32	3.88	44.97

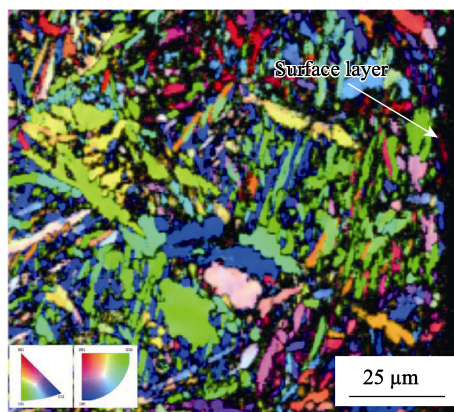
Fe₃C 百分比为 5.75%。与之相比, 图 4b 中碳化物大多为细小颗粒且分布数量明显减小, Fe₃C 含量下降至 3.88%。由此表明, “变扩散”工艺有助于减少残余奥氏体的形成以及 Fe₃C 等碳化物的析出。

图 5 为采用电子背散射衍射 (EBSD) 对试样渗碳层扫描获得的 IPF 取向图。从图 5a 选取的白色边框标记区域可以明显解析出, 该区域为渗碳层内一个

独立的原奥氏体组织, 在原奥氏体晶界内约有 3~5 个小区域, 每个区域代表原奥氏体中形成的一个马氏体域, 域内的马氏体板条接近平行排列并具有相近的取向。其次, 从图 5a 中可以看出, 存在大量平行于取向介于<101>和<111>之间(粉色)的板条马氏体组织, 相邻晶粒取向的变化较小。在受到外力的情况下, 晶粒与晶粒之间难以协调变形, 易发生断裂。表明“原脉冲”渗碳工艺获得的渗碳层具有明显的原奥氏体晶界, 且马氏体组织是在原奥氏体晶粒内形成的, 同时, 扫描渗碳层区域内存在大量相同取向的晶粒。与之相比, 由图 5b 中可知, 整个扫描区域, 晶粒的取向杂乱、分布无规律且颜色对比度高, 表层为相互交替穿插的相对细小的组织, 次表层为相互交替穿插的大尺寸马氏体条, 无明显原奥氏体晶界。



a 原脉冲



b 变扩散

图 5 渗碳层截面质量衬度图及取向图

Fig.5 Contrast and orientation figures for cross section mass of carburized layer: a) original pulse; b) variable diffusion

2.3 渗碳层硬度分布

图 6 为 20CrMnTi 钢经不同电磁感应真空脉冲渗碳工艺处理后的渗碳层硬度分布曲线。由图可知, “原脉冲”工艺试样的渗碳层厚度为 1200 μm; “变强渗”工艺试样由于碳原子的充分渗入, 渗碳层厚度增加至 1450 μm。其次, “原脉冲”和“变强渗”工艺试样的表面硬度均在 670 HV_{0.5}左右, 并随渗碳层由表及里, 先小幅下降, 后上升至硬度峰值。其原因为, 渗碳层硬度分布主要取决于淬火后马氏体的碳含量、碳化物和残余奥氏体的含量。由图 4 可知, 20CrMnTi 钢渗碳淬火后, 其表层存在大量块状碳化物和残余奥氏体分布, 块状碳化物以及试样次表层比最表层含较多的残余奥氏体, 从而使表层一定范围内的硬度小幅下降, 而大量滑移特征的残余奥氏体导致表层 0~60 μm 范围内的硬度值整体偏低^[16]。“变扩散”工艺试样的硬度分布与前二者的差异主要在于, 表层 0~60 μm 范围内硬度值提高至 780 HV_{0.5}左右, 未出现下降, 而是小幅上升就达到硬度峰值, 渗碳层厚度也增加至 1320 μm。主要原因为, 经过加强扩散环节的渗碳层残余奥氏体

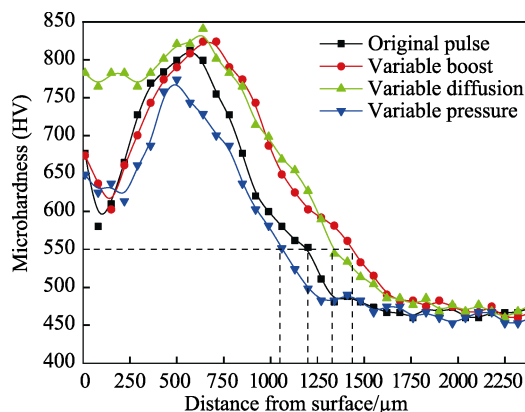


图 6 不同工艺渗碳后 20CrMnTi 钢截面硬度分布曲线
Fig.6 Sectional hardness distribution curves of 20CrMnTi steel under different carburizing processes

量减少, 并且不连续、细小弥散分布的碳化物起到了弥散强化作用, 表层 0~60 μm 范围内硬度值得到显著地提高; 而足够的扩散周期使碳原子扩散路径延长, 渗碳层厚度进一步增加。此外, “变扩散”工艺试样的表层硬度值并不是最大值, 说明此工艺的强渗-扩散占比还需要进一步优化。“变压力”工艺试样的表层硬

度值、硬度峰值均劣于前者, 渗碳层厚度仅有 1050 μm , 其可能原因是, 碳势过高使试样表面形成炭黑, 阻碍了活性原子渗入, 造成同一渗碳层深度的碳质量分数比其他工艺相对较低。

2.4 表面残余应力分析

工件经热处理在表面形成的残余压应力, 可以改善工件表面的性能, 使工件的抗接触疲劳性、耐磨性等得到提高^[17]。为此, 利用 XRD 应力测定仪对“原脉冲”工艺和“变扩散”工艺试样表面残余应力进行测试分析。经测试, “原脉冲”工艺试样的表面残余应力达到 33 MPa, 表征为残余拉应力; “变扩散”工艺试样的表面残余应力达到-231 MPa, 表征为残余压应力, 较前者表面残余应力增加了 260 MPa。其可能原因是, 渗碳层的表层组织分布了较多的块状碳化物和残余奥氏体, 表明在奥氏体发生相变转化为体心立方马氏体的过程中, 渗碳层表层组织的马氏体相变量较少, 而次表层马氏体相变量较多, 使得表层体积相对于次表层收缩, 进而表面残余应力呈拉应力^[18], 如图 3a 所示。而对比图 3c 可知, 经“变扩散”工艺后, 渗碳层表层组织无明显碳化物和残余奥氏体, 即表层组织在淬火过程中, 奥氏体具有完全转变为马氏体的倾向, 马氏体相变的体积膨胀效应使得表面产生了较大的残余压应力, 可以提高 20CrMnTi 钢的疲劳性、耐磨性等^[19]。

3 结论

1) 通过电磁感应真空变脉冲渗碳方法, 调整渗碳过程中“强渗”及“扩散”脉冲分布占比, 能够有效控制 20CrMnTi 钢在渗碳过程中的碳化物、残余奥氏体的尺寸与分布, 提高 20CrMnTi 钢渗层性能。

2) “变强渗”工艺增加了渗碳“强渗”期表层与内部的碳浓度差, 提高了碳原子扩散驱动力, 使得 20CrMnTi 钢渗碳层厚度最佳, 达到 1450 μm , 但渗碳层中组织存在大量块状 Fe_3C 。

3) “变扩散”工艺在渗碳“扩散”期使碳化物进一步溶解, 这利于碳原子向渗碳层内部充分扩散, 使得 20CrMnTi 钢渗碳层中 Fe_3C 含量下降到 3.88%, 残余奥氏体含量下降到 7.32%, 有效控制了 20CrMnTi 钢渗碳层中 Fe_3C 、残余奥氏体分布。同时, 渗碳层厚度达到 1320 μm , 渗碳层 0~60 μm 范围内, 硬度提高至 780 $\text{HV}_{0.5}$, 残余压应力提高为-231 MPa。因此, 相比其他三种工艺方法, 通过“变扩散”工艺获得的渗碳层综合组织性能较好。

参考文献:

[1] 王扬亚, 赵程. 奥氏体不锈钢低温渗碳硬化处理后的

化学亮化处理[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 106-110.

WANG Yang-ya, ZHAO Cheng. Chemical brightening treatment of austenitic stainless steel after low-temperature plasma carburizing[J]. Surface technology, 2016, 45(1): 106-110.

[2] LI Z, FREBORG A M, HANSEN B D, et al. Modeling the effect of carburization and quenching on the development of residual stresses and bending fatigue resistance of steel gears[J]. Journal of materials engineering & performance, 2013, 22(3): 664-672.

[3] 周梦飞, 赵程. AISI 316L 奥氏体不锈钢低温离子-气体渗碳工艺优化[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 159-164.

ZHOU Meng-fei, ZHAO Cheng. Process optimizing about low temperature ion-gas carburizing of AISI 316L austenitic stainless steel[J]. Surface technology, 2017, 46(2): 159-164.

[4] LYU Y, LEI L, SUN L. Influence of different combined severe shot peening and laser surface melting treatments on the fatigue performance of 20CrMnTi steel gear[J]. Materials science & engineering A, 2016, 658: 77-85.

[5] 郑盼, 商剑, 张越. 稀土添加量对 20CrMnTi 钢表面碳氮复合渗层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 167-172.

ZHENG Pan, SHANG Jian, ZHANG Yue. Effects of rare earth content on microstructure and properties of composite carbon-niobiumizing coatings prepared on 20CrMnTi steel[J]. Surface technology, 2018, 47(7): 167-172.

[6] 石巨岩, 于静, 田晓青, 等. 20CrMnTi 钢超饱和渗碳工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(12): 147-149.

SHI Ju-yan, YU Jing, TIAN Xiao-qing, et al. Study on supersaturated carburization process for 20CrMnTi steel[J]. Hot working technology, 2010, 39(12): 147-149.

[7] 康承飞, 樊新民. 20CrMnTi 钢液相感应渗碳[J]. 热处理, 2015, 30(4): 9-12.

KANG Cheng-fei, FAN Xin-min. Liquid induction carburizing of 20CrMnTi steel[J]. Heat treatment, 2015, 30(4): 9-12.

[8] 王昊杰, 郝浩腾, 王昭东, 等. 渗碳工艺参数对常见渗碳钢晶粒粗化行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(3): 177-185.

WANG Hao-jie, HAO Hao-teng, WANG Zhao-dong, et al. Effect of carburizing process parameters on austenitic grain coarsening behavior of common carburizing steel[J]. Transactions of materials & heat treatment, 2017, 38(3): 177-185.

[9] 颜志斌. 20CrMnTi 钢真空碳氮复合渗工艺与渗碳层特性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018: 23-29.

YAN Zhi-bin. Study on vacuum carbon and nitrogen composite infiltration process and characteristics of 20CrMnTi steel[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018: 23-29.

[10] 冯治国, 赵驯峰, 刘静, 等. 电磁感应真空快速渗碳自动化设备: 中国, 201711492410.2[P]. 2017-12-30.

FENG Zhi-guo, ZHAO Xun-feng, LIU Jing, et al. Elec-

- tromagnetic induction vacuum rapid carburizing automation equipment: China, 01711492410.2[P]. 2017-12-30.
- [11] ZAJUSZ M, TKACZ-ŚMIECH K, DANIELWSKI M. Modeling of vacuum pulse carburizing of steel[J]. Surface & coatings technology, 2014, 258: 646-651.
- [12] 彭以超, 张麦仓, 杜晨阳, 等. 服役态 Cr35Ni45Nb 合金高温真空渗碳行为及相演化机理研究[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 11-20.
- PENG Yi-chao, ZHANG Mai-cang, DU Chen-yang, et al. High temperature vacuum carburization behaviors and phase evolution mechanisms of Cr35Ni45Nb alloy under service condition[J]. Acta metallurgica sinica, 2015, 51(1): 11-20.
- [13] 王爱华, 彭云, 肖红军, 等. 690MPa 级低合金高强钢熔敷金属冲击断裂行为研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 73-80.
- WANG Ai-hua, PENG Yun, XIAO Hong-jun, et al. Impact fracture behavior of deposited metal of 690 MPa level high strength low alloy steel[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(2): 73-80.
- [14] 冯瑞, 张美汉, 陈乃录, 等. 应力松弛对应变诱发马氏体相变影响的有限元模拟[J]. 金属学报, 2014, 50(4): 498-506.
- FENG Rui, ZHANG Mei-han, CEHN Nai-lu, et al. Finite element simulation of the effect of stress relaxation on strain-induced martensitic transformation[J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50(4): 498-506.
- [15] 戚正风. 碳钢过冷奥氏体的转变[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(4): 1-14.
- QI Zheng-feng. Transformation of supercooling austenite in carbon steel[J]. Transactions of materials & heat treatment, 2017, 38(4): 1-14.
- [16] 于玉城, 王振玲, 王树城, 等. 稀土加入量对 20[#] 齿轮用钢渗碳层组织及耐磨性能的影响[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 12-14.
- YU Yu-cheng, WANG Zhen-Ling, WANG Shu-cheng, et al. Effects of the rare-earth addition on the carburizing layer structure and wear-resisting property of 20[#] steel used as the gear[J]. Surface technology, 2011, 40(2): 12-14.
- [17] DÍAZ N E V, SCHACHERL R E, ZAGONEL L F, et al. Influence of the microstructure on the residual stresses of nitrided iron—Chromium alloys[J]. Acta materialia, 2008, 56(6): 1196-1208.
- [18] RETI T, 黄星, 张云. 渗碳、碳氮共渗及表面硬化零件的残余应力[J]. 国外机车车辆工艺, 2005(2): 5-16.
- RETI T, HUANG Xing, ZHANG Yun. Residual stress of carburized, carbonitrided and surface hardened parts[J]. Foreign locomotive & rolling stock technology, 2005(2): 5-16.
- [19] 黄建洪. 微观组织对钢抗磨料磨损性能的影响[J]. 金属热处理, 2008, 33(10): 1-11.
- HUANG Jian-hong. Effect of microstructure on abrasive resistance of steels[J]. Heat treatment of metals, 2008, 33(10): 1-11.