

金属表面强化技术论坛

2012年2月24日，以“突破高端齿轮制造”为主题的中国齿轮产业发展大会在天津召开，旨在促进全产业链同步创新，发展抗疲劳制造技术，大幅提升齿轮及其传动装置的使用寿命和可靠性，扭转高端重大装备齿轮传动装置依赖进口的被动局面。会场上，中国工程院院士赵振业在其主题报告“发展抗疲劳制造技术，建设齿轮强国”中强调，抗疲劳制造是高端齿轮的核心技术。

以齿轮为代表的传动零部件工作时受力复杂，对部件整体性能要求较高，一般要求具有强韧性的心部组织和高硬度、耐磨、耐蚀的表面性能。有调查显示，因齿轮表面失效而引起的齿轮传动副失效数量约占齿轮失效总数的74%。可见，提高表面强度已成为提高传动零部件可靠性和延长其使用寿命的有效途径。

为此，本刊在传动零部件制造技术专题中策划了“金属表面强化技术论坛”，将目前应用较广的表面强化技术做一集中地讲解，并在产品推介栏目中对相关工艺所涉及的部分设备和附件作了简要介绍。

论坛主持：李 嘉



南京高精齿轮集团有限公司
朱百智



南京高速齿轮制造有限公司
陈 贺



重庆齿轮箱有限责任公司
谢新莉



北京航空材料研究院
王 强

深层渗碳工艺——缓冲渗碳

南京高精齿轮集团有限公司 (江苏 210012) 朱百智 汪正兵 钮堂松 刘 臻

1. 缓冲渗碳工艺简介

20CrMnMo作为优质渗碳钢,具有淬透性好,韧脆转变温度低,价格比高级优质渗碳钢低等优点。然而,20CrMnMo大模数齿圈进行深层渗碳(层深 $\geq 3.5\text{mm}$)处理后,渗碳层中的碳化物往往呈网块状分布。有资料表明,渗后采用球化退火工艺可改善碳化物分布,但工艺周期长、设备成本明显增加,为了有效解决这一问题,本文设想在深层渗碳的强渗中间过程增加多道扩散工艺,从而控制齿圈表面碳势,以便在渗碳层中获得理想的碳化物分布形态,根据这一思路,我单位设计了缓冲渗碳工艺。

在对不同材料的渗碳淬火工艺进行了10多年的研究基础上,本文对缓冲渗碳与两段渗碳淬火工艺特点进行了对比分析,如附表所示。

缓冲渗碳和两段渗碳工艺对比

方案	缓冲渗碳+淬火回火	两段渗碳+淬火回火
工艺思路	包含多个(强渗+扩散)循环过程,工艺思路复杂	仅包含强渗+扩散两个阶段,工艺思路简单
渗碳保温时间 ^①	较长	较短
质量稳定性	组织形态良好,质量稳定	组织超标风险高,质量不稳定
适用材料	20CrMnMo、17CrNiMo6、17CrNi2Mo、20CrMnTi及8822等碳化物形成元素含量较高的钢种	20CrNi2Mo、20Cr2Ni4、4320、12Cr2Ni4及12Cr2Ni3等碳化物形成元素含量较低的钢种
适用层深范围 ^②	深层渗碳($\geq 3.5\text{mm}$)推荐使用	无层深范围限制

注:①以层深相同为前提。

②对应适用材料。

本文以20CrMnMo大模数齿圈为例,分别采用两段渗碳(强渗、扩散)→球化退火→淬火→回火工艺和缓冲渗碳(强渗、多道扩散)→淬火→回火工艺,并对试验结果进行分析对比,详细阐述缓冲渗碳工艺的推广价值。

2. 试验材料及渗碳工艺

(1) 20CrMnMo大齿圈 模数25,外形尺寸 $\phi 2460\text{mm} \times \phi 1900\text{mm} \times 540\text{mm}$,零件重约8t,20CrMnMo渗碳试棒尺寸 $\phi 40\text{mm} \times 110\text{mm}$ 。

(2) 两段渗碳 采用德国SCHMETZ公司制造的大型井式渗碳炉,工艺曲线如图1所示。炉膛有效尺寸为 $\phi 2800\text{mm} \times 2000\text{mm}$,热处理过程采用计算机在线控制,炉温均匀性为 $\pm 5^\circ\text{C}$,碳势均匀性为0.02%。渗碳后,又对渗碳件及随炉试棒进行了3次球化退火处理。最后,进行了淬火、低温回火处理。

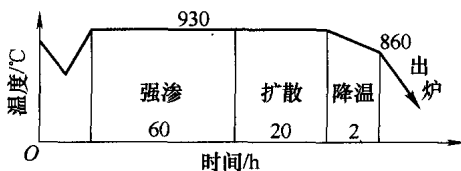


图1 大模数齿圈两段渗碳工艺曲线

(3) 缓冲渗碳 缓冲渗碳工艺过程曲线如图2所示,该工艺所选用的设备与两段渗碳工艺相同。缓冲渗碳后,也进行了淬火回火处理。

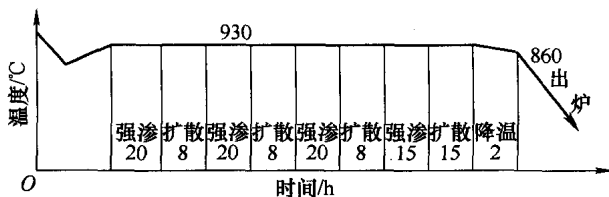
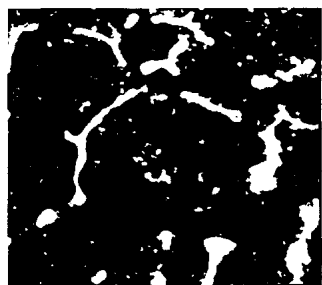


图2 大模数齿圈缓冲渗碳工艺曲线

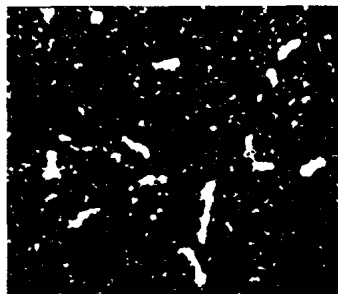
3. 工艺结果与分析讨论

(1) 组织形态 大模数齿圈同炉试棒经不同渗碳+淬火回火处理后, 渗碳层(距表面0.3mm)金相显微组织如图3所示。



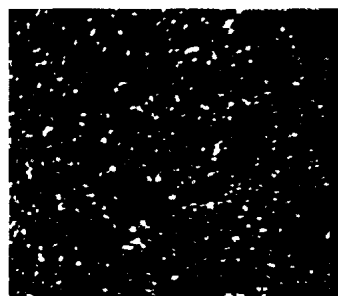
400×

(a) 深层渗碳



400×

(b) 深层渗碳+球化退火



400×

(c) 缓冲渗碳

图3 不同渗碳工艺的渗层组织

由图3a可知, 经两段渗碳+淬火回火工艺处理后, 20CrMnMo渗层组织由回火马氏体+残留奥氏体+网状、块状碳化物组成。形成网状、块状碳化物的原因有: ①由于20CrMnMo含有碳化物形成元素Cr、Mn和Mo, 使零件表面吸碳能力增强, 提高了奥氏体中的碳浓度。②在相同体积条件下, 与齿轮(轴)类零件相比, 因齿圈类零件表面积较小, 活性碳原子更容易吸附于零件表面, 这也大幅增加了奥氏体中的碳浓度。③深层渗碳强渗阶段的中后期, 由于渗层内浓度梯度减小, 活性碳原子扩散驱动力减弱, 不易向内部扩散而更趋向于在渗层表面

富集。因此, 渗层表面的碳浓度容易超过临界值, 碳化物首先在奥氏体的晶界上析出, 呈网状分布。随着时间的延长或碳浓度进一步提高, 网状碳化物可能向晶内长大, 碳化物也可能单独在晶内析出, 呈角状、块状分布。

由图3b可知, 经两段渗碳+球化退火+淬火回火工艺处理后, 20CrMnMo渗层组织由回火马氏体、残留奥氏体、小块状碳化物组成。由此可见, 在 $A_{c1} \pm 50^\circ\text{C}$ 的条件下, 角状、块状碳化物的尖角部分溶解于基体中, 使碳化物呈小块状、球状。

由图3c可知, 经缓冲渗碳+淬火回火工艺处理后, 20CrMnMo渗层组织由回火马氏体、残留奥氏体以及弥散分布于回火马氏体基体上的细颗粒状碳化物组成。这说明, 缓冲渗碳获得了理想的碳化物分布形态。缓冲渗碳对碳化物形态的改善作用的原因有: ①在深层渗碳中增加多道扩散过程, 可有效降低零件表面碳势, 使奥氏体中碳原子的浓度不易超过临界值。②如果在渗碳过程中已经形成网状碳化物, 但形成的时间很短, 碳化物不致长大, 在这种情况下, 及时进行扩散, 网状碳化物能够重新溶解。③与 $A_{c1} \pm 50^\circ\text{C}$ 球化退火相比, 在 930°C 进行扩散(碳浓度0.8%), 碳化物溶解的驱动力要大得多。因此, 由图3b和图3c对比可知, 缓冲渗碳比球化退火工艺更能有效改善碳化物的分布形态。

(2) 硬度梯度与零件齿面硬度 大模数齿圈同炉试棒经不同渗碳+淬火回火处理后, $\phi 40\text{mm}$ 试棒硬度梯度曲线如图4所示。

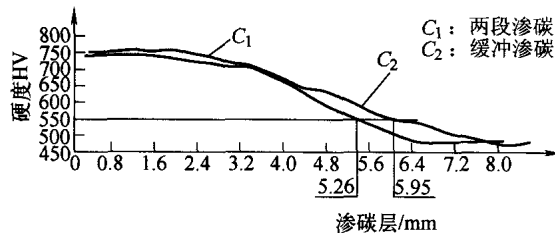


图4 渗碳层内的硬度梯度曲线

由图4可知, 两段渗碳工艺获得渗层表面硬度约为750HV, 心部硬度约为480HV, 渗层的有效硬化层深为5.26mm/550HV; 缓冲渗碳工艺获得渗层表面硬度约为740HV, 心部硬度约为480HV, 渗碳层的有效硬化层深为5.95mm/550HV。与 C_1 相比, C_2 的硬度梯度分布更为合理, 从而保证了渗层表面有足够的残余压应力, 渗层内部也不致有较大的残余拉应力, 这使渗层的抗冲击能力进一步提高。

快速气体渗氮工艺： 高温渗氮和稀土催渗

南京高速齿轮制造有限公司（江苏 211100） 陈 贺 叶小飞 刘 臻

常规气体渗氮扩散速度慢，工艺时间较长。如大模数风电内齿圈获得0.5mm渗氮层，一般需要50h，甚至更长的时间。较长时间的渗氮一方面造成生产效率的降低，另一方面会造成零件畸变的增加，从而降低齿轮的精度等级，影响产品质量。因此，应积极寻求解决措施，提高生产效率。

一、高温渗氮及其质量控制

1. 高温渗氮简介

以提高表面硬度和强度为目的的常规气体渗氮工艺温度一般在520℃左右，高温渗氮是指采用更高的工艺温度（一般在540~580℃），在相同的氮分解率下，提高钢件表面的吸氮能力和氮原子的扩散能力，因而提高了渗氮速度。高温渗氮最高工艺温度一般根据零件畸变情况和预备热处理温度进行选择。

2. 高温渗氮的优缺点

采用高温渗氮具有以下优点：①提高氮在 γ

相和 γ 相中的扩散速度，大幅缩短渗氮时间，提高渗氮效率。②可以降低能源消耗。③降低因渗氮时间过长导致表面硬度下降的风险。

采用高温渗氮工艺的缺点包括：①渗氮温度高，合金氮化物聚集长大速度快，渗氮层表面硬度下降明显。②采用高温渗氮，工件变形倾向加大。容易降低工件的精度等级，甚至需要增加精加工处理。③对工件的预备热处理要求较高，要求具有较高的回火温度，以及充分的去应力处理。

3. 应用案例

以风电增速箱内齿圈表面处理为例介绍高温渗氮工艺的应用，内齿圈基本信息如表1所示。

表1 内齿圈基本信息

材料	模数	外径/mm	齿宽/mm	渗氮层深/mm
42CrMo	16	2300	420	≥ 0.6

零件预备热处理为调质，回火温度580℃左右，调质后零件硬度在290HBW左右。预备热处理温度至少需比氮化温度高28℃，氮化最高工艺温度

对两种不同工艺处理后的零件齿部进行了硬度测试，测试结果表明，经两种不同工艺处理后，零件齿面硬度接近，在59HRC左右，这足以保证齿面有足够的接触疲劳强度。

(3) 工艺运行时间对比 两段渗碳+球化退火+淬火回火工艺运行总时间为259h，缓冲渗碳+淬火回火工艺运行总时间为156h。这充分说明，缓冲渗碳工艺极大地缩短了工艺周期、降低了制造成本。

4. 结语

(1) 对于20CrMnMo大模数齿圈的深层渗

碳，采用两段渗碳工艺，容易导致渗层表面形成网状和块状碳化物。而采用缓冲渗碳工艺，可在渗层表面获得弥散分布的细颗粒状碳化物，有效改善了渗层中的碳化物形态。

(2) 缓冲渗碳+淬火回火工艺使渗层内硬度梯度变化合理，齿圈齿面硬度达到59HRC左右，满足了高速重载齿轮的使用要求。

(3) 缓冲渗碳+淬火回火工艺明显缩短了工艺周期，大幅降低了制造成本。 MW

(20120310)