

20MnCr5 齿轮钢氧含量控制及其对钢的疲劳性能影响

曹红福¹, 王毛球², 孙鸿平¹, 何肖飞², 吴韶光¹

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司研究院, 江阴 214429; 2 钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081)

摘要 提出了 100 t EAF-LF-VD-CC-CR 全流程控制齿轮钢氧含量的工艺措施; 研究了 0.000 53% ~ 0.001 45% 氧含量 20MnCr5 齿轮钢的旋转弯曲疲劳性能、断口和夹杂物尺寸。结果表明, 钢中总氧含量越高, 最大夹杂物尺寸也越大, 疲劳强度越低, 当 $[O] \leq 0.001 0\%$ 时, 随 $[O]$ 降低, 疲劳强度升高幅度较小; 试验钢在表层不产生疲劳裂纹的临界夹杂物尺寸为 21 μm , 距表面深度 30 ~ 430 μm 的浅层区域为相对安全区域, 其中的夹杂物很难引起疲劳开裂。

关键词: 氧含量; 20MnCr5 齿轮钢; 疲劳强度; 夹杂物临界尺寸

Control of Oxygen Content in 20MnCr5 Gear Steel and Its Effect on Fatigue Performance of Steel

Cao Hongfu¹, Wang Maoqiu², Sun Hongping¹, He Xiaofei², Wu Shaoguang¹

(1 Research institute, Jiangying Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangying 214429;
2 Special Steel Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The technological measures to control oxygen content of gear steel in 100 t EAF-LF-VD-CC-CR whole process are put forward. The rotary bending fatigue properties, fracture and inclusion size of gear steel 20MnCr5 with oxygen content 0.000 53% ~ 0.001 45% are investigated. The results show that the higher the oxygen content, the larger the size of maximum inclusion and the lower fatigue strength of steel, while $[O] \leq 0.001 0\%$, with $[O]$ decreasing, the fatigue strength of steel decreasing within a narrow range; the critical inclusion size of the test steel without fatigue crack under the surface is 21 μm and the shallow zone 30 ~ 430 μm away from the surface is relatively safe zone, where inclusions are difficult to cause fatigue cracking.

Key Words: Oxygen Content; 20MnCr5 Gear Steel; Fatigue Strength; Critical Size of Inclusion

齿轮作为动力传动的重要机械部件, 在工作过程中齿根受到反复的交变应力和冲击力, 因此, 要求齿轮具有良好的强韧性、耐磨性及很高的承受冲击、弯曲和接触应力。齿轮钢材的质量水平很大程度上决定了齿轮的疲劳性能, 体现齿轮钢质量水平的指标有稳定的淬透性及带宽、纯净度(非金属夹杂物)、成分偏析、组织均匀性等因素。钢中非金属夹杂物除硫化物类型外, 其它类型的非金属夹杂物均与钢中氧有关, 氧含量越高, 钢的纯净度就越差, 因此钢中氧对齿轮疲劳性能有较大的影响。非金属夹杂物对齿轮钢疲劳性能的影响体现在尺寸、数量、类型和形状, 以及与基体的结合能力, 尤其是钢中粗大的硬而脆的非金属氧化物夹杂, 对疲劳性能的影响最大^[1-2]。所以降低钢中的氧含量对提高疲劳性能尤为重要。把氧含量作为齿轮钢的一种简单、直观的指标, 探索 20MnCr5 齿轮钢旋转弯曲疲劳性能、

夹杂物之间的关系是本文研究的目的。

1 试验材料和方法

20MnCr5 钢生产工艺流程: 100 t 电弧炉 → (LF + VD) 精炼 → (300 mm × 340 mm) 连铸 → 连铸坯温送至加热炉 → 轧制, 开轧温度 1 050 ~ 1 100 °C → 钢材下线后修磨、探伤、入库。

试验用钢在同一标准要求的同一浇次中选取不同炉号轧制的相同规格钢材(Φ60 mm)。4 炉钢的化学成分控制范围如表 1。

氧含量采用氧氮仪测试。各试验用钢材氧含量

表 1 20MnCr5 钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
0.18 ~ 0.19	0.05 ~ 0.09	1.28 ~ 1.30	0.011 ~ 0.018	0.023 ~ 0.027	1.20 ~ 1.22	0.030 ~ 0.035

分别为: 1# 样 0.000 53%, 2# 样 0.000 82%, 3# 样 0.000 98%, 4# 样 0.001 45%。旋转弯曲疲劳试样的制作及试验设备: 热轧棒材经过改锻成为 $\Phi 25$ mm 小棒, 再经过等温退火: 加热到 910 °C 保温 1 h, 快冷到 650 °C 保温 3 h 后出炉空冷。小棒经车加工制成标准旋转弯曲渗碳试样, 试样在同一炉内进行渗碳淬火处理, 890 °C 强渗 9 h (碳势为 0.95%), 降温到 830 °C 扩散 3.5 h (碳势 0.8%), 油淬, 150 °C 回火 3 h。处理后的渗碳试样, 硬化层深度 0.9 ~ 1.1 mm, 硬度达到 750 ~ 550HV, 芯部硬度 380 ~ 420HV。对渗碳试样再经过粗磨、精磨和抛光后, 加工成直径 8 mm 的圆柱光滑试样。按照 GB/T 4337-2015 标准, 使用日本岛津制作所小野式 H-7SI 旋转弯曲疲劳试验机进行试验, 试验转速为 3 000 r/min, 循环应力特征 $R = -1$, 试验机一直连续运转直到试样断裂或达到 10^7 次, 试验机自动停止。材料的疲劳强度采用升降法测定, 并用分组法测量若干个应力水平的疲劳寿命。

2 20MnCr5 齿轮钢氧含量控制工艺措施

冶炼过程中氧含量及夹杂物的演变和控制, 方宇荣^[3]、刘飞^[4]、孙乐飞^[5]等人从精炼至铸坯夹杂物及氧含量的变化趋势进行了相关的研究。杨文^[6]等人通过研究 Ca 处理, 解决了管线钢 B 类夹杂物。因此氧含量需要从炼钢全流程的各工序进行控制。

研究 20MnCr5 钢冶炼全流程控氧关键工序所采取的工艺措施: 初炼炉配入优质废钢和/或铁水, 当 P 含量、终点 [C] ($\geq 0.05\%$) 及温度符合工艺要求出钢, 钢包加铝铁 (1.0 ~ 1.5 kg/t 预脱氧)、造渣材料及部分合金; 初炼炉出钢后如果钢包下氧化渣应扒渣处理; 精炼过程全程钢包底吹氩搅拌, 采用喂 Al 线及渣面加入粉状脱氧剂相结合的方式脱氧, 精炼渣的流动性良好, 白渣或灰白渣保持 20 min 以上, 总精炼时间 ≥ 45 min, 精炼出钢前全部元素进入目标值要求; 66.7 Pa 高真空下处理保持 10 min 以上, 破空后继续软吹氩时间 ≥ 15 min。在保证精炼钢水纯净度的前提下, 对连铸过程从以下几点措施进行控制:

- (1) 连铸全过程采取保护浇铸措施;
- (2) 保证钢包钢水的顺利开浇, 避免水口烧氧;
- (3) 影响铸坯质量的连浇第一炉与中间包容量对应的部分钢水因过热度大且与空气及耐材接触时间长, 应该单独管理或废弃;
- (4) 对更换钢包时注流冲击的紊流部分钢水采

取措施防止二次氧化或混冲覆盖剂;

- (5) 稳定结晶器液面波动、避免水口结瘤;
- (6) 铸坯头、尾部分的切除长度要足够。

3 氧含量对疲劳性能及夹杂物的影响

3.1 氧含量对疲劳强度的影响

试验采用升降法来测定材料的疲劳极限, 循环周次需要达到 10^7 。有研究认为^[7]: 金属材料在交变载荷下进行疲劳试验时, 疲劳寿命低于 10^7 周次的高应力幅区与在高于 10^7 周次的低应力幅区, 材料疲劳破坏所表现的形式不同, 即分别是由于裂纹萌生于材料的表面破坏及由内部夹杂物或缺陷引起的内部破坏。因此采用交变载荷较低的高周疲劳试验可以作为寻找钢中较大疲劳源夹杂物的重要手段, 即可以体现氧含量对疲劳性能的影响。

每组用于不同级别氧含量的旋转弯曲疲劳试验钢的试样数量不少于 12 个, 设定应力载荷的增减幅度一般为预计条件疲劳极限的 3% 左右。首先进行预试验, 预试验加载应力根据抗拉强度的 70% 左右确定。试验第一根试样的应力水平略高于预计的条件疲劳极限, 根据结果是否通过 10^7 试验, 确定后续每一支试样的应力水平。根据试验结果, 实验钢氧含量对疲劳强度的影响如图 1。由图 1 所示结果分析不同氧含量钢的旋转弯曲疲劳强度可以看出, 如果以氧含量 0.001 0% 为分界线, 则氧含量在 0.001 0% 以下时试验钢的疲劳强度比试验钢 [O] > 0.001 0% 的疲劳强度高出了 218 ~ 239 MPa。即随着氧含量的降低, 疲劳强度得到了提高, 氧含量 < 0.001 0% 时, 疲劳强度可以达到 1 000 MPa 级别, 且降低趋势减缓, 而在 [O] > 0.001 0% 时疲劳强度则急剧降低。因此, 从提高齿轮钢的疲劳寿命并兼顾生产成本考虑, 为发挥材料的潜能, 对高要求齿轮钢将钢中 [O] 含量控制 $\leq 0.001 0\%$ 具有重要意义。

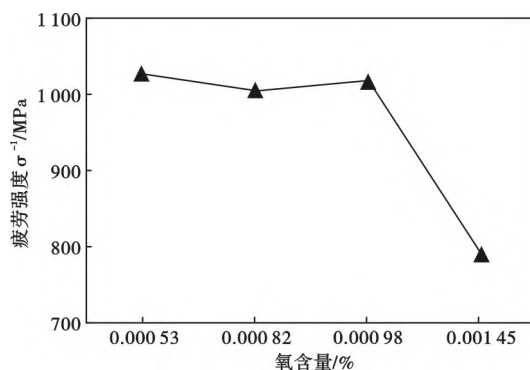


图 1 氧含量对 20MnCr5 钢疲劳强度的影响

Fig. 1 Effect of oxygen content on fatigue strength of 20MnCr5 steel

3.2 疲劳断口观察与分析

观察出现断裂的试样发现,起裂试样均由表面或近表面处,向内部扩展。疲劳裂纹主要产生在夹杂物与基体的分离区域,断裂源的这些内部夹杂物多呈球形或簇形,在循环应力的作用下,夹杂物与基体更易于分离。经 EDX 分析,试样的旋转弯曲疲劳

断口处的夹杂物主要为 Al, Mg, Ca 的氧化物夹杂物、或氧化物与硫化物两者复合而成的夹杂物。从疲劳断口的夹杂物看,氧含量为 0.00145% 的多个试样断口夹杂物均呈尺寸较大的簇状。图 2(a、b、c) 为部分循环应力下疲劳断口的夹杂物形貌。

3.3 氧含量对夹杂物尺寸的影响

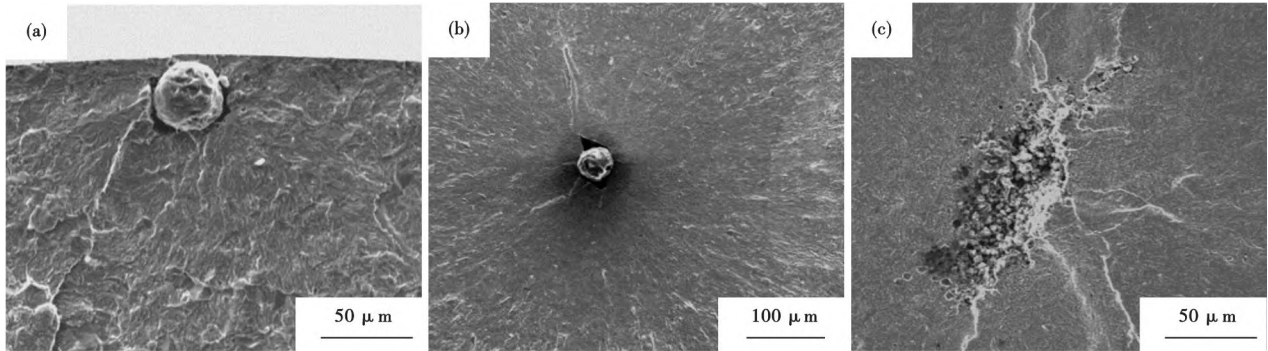


图 2 典型疲劳断口的夹杂物形貌:(a) 0.000 53% [O], 表面夹杂起裂(深度 10 μm , $\sigma_a = 1\ 220\ \text{MPa}$, $N_f = 0.25 \times 10^6$); (b) 0.000 82% [O], 内部夹杂起裂(深度 620 μm , $\sigma_a = 940\ \text{MPa}$, $N_f = 7.9 \times 10^6$); (c) 0.001 45% [O], 内部夹杂起裂(深度 1 060 μm , $\sigma_a = 820\ \text{MPa}$, $N_f = 6.3 \times 10^6$)

Fig. 2 Inclusion morphology of typical fatigue fracture mode: (a) Inclusion cracking at surface with 0.000 53% [O], (10 μm depth, $\sigma_a = 1\ 220\ \text{MPa}$, $N_f = 0.25 \times 10^6$); (b) Inclusion cracking, inside, with 0.000 82% [O], (620 μm depth, $\sigma_a = 940\ \text{MPa}$, $N_f = 7.9 \times 10^6$); (c) Inclusion cracking, inside, with 0.001 45% [O], (1 060 μm depth, $\sigma_a = 820\ \text{MPa}$, $N_f = 6.3 \times 10^6$)

对不同氧含量钢试样的疲劳断口分析,在疲劳源起裂的方式中夹杂物引起的断裂占比达到 52% ~ 78%。氧含量高,夹杂物引起的开裂比例高且大尺寸夹杂物的比例也高。[O] < 0.001 0% 的试样疲劳断口夹杂物的尺寸在 22 ~ 105 μm , 而 [O] 含量为 0.001 45% 的试样疲劳断口夹杂物尺寸在 21 ~ 162 μm 。图 3 所示为氧含量与试样断口上平均夹杂物尺寸之间的关系。可见夹杂物尺寸随氧含量的升高呈现逐渐增加的趋势,其中含氧量为 0.001 45% 的试样疲劳断口夹杂物的最大尺寸达 162 μm , 夹杂物尺寸 50 μm 以上的比例达到 69%, 而 [O] < 0.001 0% 的试样夹杂物尺寸超过 50 μm 比例为 28% ~ 35%。随着钢中总氧含量的降低,夹杂物尺寸变化趋于稳定。

还研究了试验钢循环应力与夹杂物尺寸之间的关系,结果如图 4 所示。从图 4 的趋势可看出,随着夹杂物尺寸的增大,在对试样施加较小的循环应力时就会出现疲劳断裂。从试样断口分析的夹杂物组成上看,氧化物类夹杂大多数为粒状或球形,在受到应力时不易变形,并在该处产生应力集中,并导致裂纹的萌生和扩展,是在金属中形成显微裂纹源的根本原因。在疲劳试验中,裂纹扩展造成金属的疲劳

损坏^[8]。钢中的氧含量越高,夹杂物级别越高、夹杂物尺寸越大,形成疲劳裂纹源的几率也就越高。而随着内部夹杂物尺寸增大,疲劳裂纹将优先从内部夹杂物处萌生,由此造成钢中氧含量高疲劳强度就会降低,所施加的循环应力降低的趋势越明显。

3.4 影响疲劳寿命的临界夹杂物尺寸

图 4 的结果表明,夹杂物尺寸越小,疲劳极限越高。分析产生疲劳破坏试样断口的夹杂物临界尺寸与其距试样表面深度之间的关系,可得出图 5 的结果。采用反推方法估算夹杂物临界尺寸,在图 5 中对试验钢产生疲劳失效的两个最小数据点用直线相

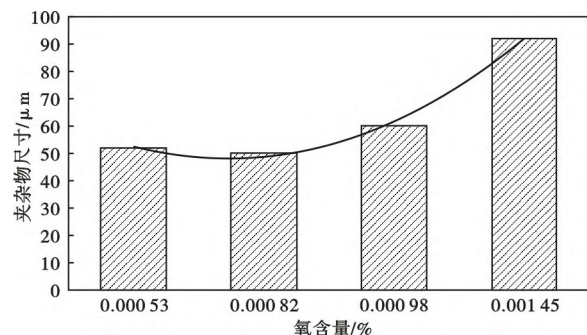


图 3 氧含量对 20MnCr5 钢疲劳断口夹杂物尺寸的影响
Fig. 3 Effect of oxygen content on size of inclusions in 20MnCr5 steel at fatigue fracture

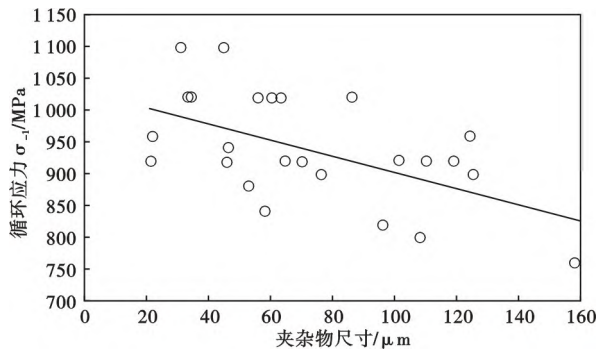


图 4 20MnCr5 钢中夹杂物尺寸对钢出现疲劳断裂施加循环应力值的影响

Fig. 4 Effect of inclusion size in 20MnCr5 steel on adding cyclic stress value at fatigue fracture occurring

连(直线 a 表示),反向延长至纵坐标轴,纵向截距可视为夹杂物的临界尺寸。从图 5 中可以看出,该直线 a 以上,不同夹杂物尺寸的试样均有断裂,而直线以下,没有发生疲劳开裂。由此试验钢的夹杂物临界尺寸可以视为 21 μm 。即当试验钢夹杂物尺寸 $\geq 21 \mu\text{m}$ 时,可能成为疲劳裂纹源;当试验钢的夹杂物尺寸 $< 21 \mu\text{m}$ 时,则不构成 10^7 次疲劳寿命的疲劳裂纹源。

在图 5 中试样产生疲劳失效夹杂物的最小深度的点 30 μm 处(直线 b 表示)和距离深度 430 μm 处的数据(直线 c 表示)反向延伸至横坐标轴,可以看出图 5 中 b 与 c 线之间的深度区域没有发现夹杂物引起试样疲劳断裂,而此部分正处于渗碳热处理产生的硬化层和表层压应力深度 30 ~ 430 μm 的浅层区域。文献[9-11]对渗碳后试样的表面残余压应力分布、应力场的总深度与渗碳层深度的关系、疲劳裂纹产生前与交变载荷中拉应力的作用及对钢的疲劳性能产生的影响进行了试验研究。因为试样表面经过渗碳处理后表层能获得高的强度和残余压应力,而它的存在可以部分抵消加载在试样材料表面的载荷,对齿轮疲劳强度的提高起到很大效果。所以试样经表面强化后因疲劳强度的提高在强化层区

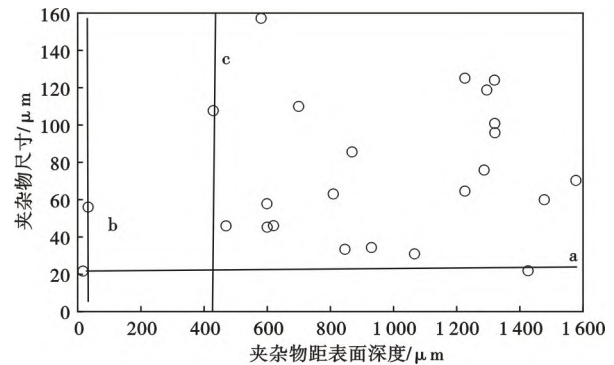


图 5 试验 20MnCr5 钢裂纹源夹杂物尺寸与距表面深度的关系

Fig. 5 Relation between inclusion size of inclusion and crack source inclusion position depth from surface of test 20MnCr5 steel

存在一个降低疲劳开裂的相对安全区域,此深度区域的夹杂物很难引起疲劳开裂。

4 结论

(1) 炼钢生产中需全流程控氧。在保证低氧含量的纯净精炼钢水的同时,连铸过程中应采取工艺措施避免钢水的二次污染。

(2) 随着 20MnCr5 试验钢氧含量的降低,疲劳强度得到较大幅度的提升,氧含量 $< 0.001 0\%$ 时钢的疲劳强度比氧含量 $> 0.001 0\%$ 时高 200 MPa 以上。为发挥材料的潜能,对高要求齿轮钢将钢中 [O] 含量控制 $\leq 0.001 0\%$ 具有重要意义。

(3) 试验钢的旋转弯曲疲劳断口处的夹杂物主要为含 Al、Mg、Ca 的氧化物夹杂物或氧化物与硫化物两者复合而成的夹杂物。

(4) 根据断口分析钢中总氧含量高,夹杂物的数量就多,夹杂物尺寸就越大,同时施加的循环应力降低的趋势越明显。结果还表明,试验钢不产生疲劳裂纹的临界夹杂物尺寸为 21 μm 。距表面深度 30 ~ 430 μm 的浅层区域为相对安全区域,其中的夹杂物很难引起疲劳开裂。

参考文献

- [1] 惠卫军,董瀚,陈思联. 非金属夹杂物和表面状态对高强度弹簧钢疲劳性能的影响[J]. 特殊钢,1998,19(6):8-14.
- [2] 项程云. 合金结构钢[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 方宇荣,陈正权. 120 t BOF-LF-VD-CC 流程冶炼的 20CrMnTi 齿轮钢氧含量和夹杂物特性[J]. 特殊钢,2020,41(6):64-67.
- [4] 刘飞,岳峰,刘佳伟,等. 100 t LD-LF-RH-CC 流程冶炼 60Si2Mn 弹簧钢非金属夹杂研究[J]. 特殊钢,2020,41(4):15-18.
- [5] 孙乐飞,吴义超,王学林,等. 120 t BOF-LF-CC 炼钢过程 60 钢洁净度的试验研究[J]. 特殊钢,2019,40(3):13-18.
- [6] 杨文,李超,张立峰,等. 优化钙处理工艺减少管线钢 B 类夹杂物[J]. 中国冶金,2018,28(1):70-75.
- [7] 李伟,鲁连涛. 超长寿命双重 S-N 曲线模型的研究[J]. 中国铁道工程科学,2008,29(3):101-104.
- [8] 金相分析技术[M]. 上海:上海科技文献出版社,1984.
- [9] 杨庆祥,赵言辉,许志,等. 渗碳及渗碳喷丸齿轮轮齿弯曲疲劳极限的定量分析[J]. 机械工程学报,2004,40(7):34-39.
- [10] Zającz M, Tkacz-Sniech K, Danielewski M. Modeling of Vacuum Pulse Carburizing of Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258: 646-649.
- [11] Benedetti M, Bortolamedi T, Fontanari V, et al. Bending Fatigue Behaviour of Differently Shot Peened A16082 TS Alloy[J]. Int. J. Fatigue, 2004, 26: 889-897.