

20CrMnMo钢的晶粒度稳定性试验研究

郑长进¹, 于广文²

1. 弗兰德传动系统有限公司 天津 300400

2. 张家港广大特材股份有限公司 江苏张家港 215614

摘要: 从微合金化和锻后热处理优化两个方面, 对20CrMnMo钢在伪渗碳条件下(940℃保温36h)的晶粒度稳定性进行了多组试验。结果表明: 在一定N含量的基础上, 只添加Al的试验材料的晶粒度稳定性明显优于同时添加Nb和Al的试验材料; 通过优化锻后热处理工艺, 将锻后非平衡组织改善为平衡组织, 并消除组织遗传, 可以有效细化晶粒, 提高晶粒度稳定性。

关键词: 20CrMnMo钢; 晶粒度稳定性; 微合金化; 非平衡组织; AlN

Experimental studies on grain size stability of 20CrMnMo steel

ZHENG Changjin¹, YU Guangwen²

1. Flender Ltd., Tianjin 300400, China

2. Zhangjiagang Guangda Special Material Co., Ltd., Zhangjiagang 215614, Jiangsu, China

Abstract: From microalloying and post forging heat treatment optimization, multiple experiments on the grain size stability of 20CrMnMo steel under pseudo carburizing conditions (940℃/36 hours) were conducted in this paper. The experimental results show that, on the basis of containing a certain amount of N, the grain size stability of the test material with only Al added is significantly better than that of the test material with both Nb and Al added simultaneously; By optimizing the post forging heat treatment process, the non-equilibrium microstructure after forging can be improved to a balanced microstructure, eliminating structure heredity, which can effectively refine the grains and improve the grain size stability.

Keywords: 20CrMnMo steel; grain size stability; microalloying; non-equilibrium microstructure; AlN

1 序言

20CrMnMo是一种高级渗碳钢, 常用于制造高硬度、高强度和高韧性的重要齿轮部件。与20CrMnTi钢和17CrNiMo6钢相比, 在相同的渗碳处理条件下, 20CrMnMo钢的渗碳速度快^[1, 2], 接触疲劳性能高^[3, 4], 但弯曲疲劳性能低^[3-5]。细化晶粒是提高弯曲疲劳性能的重要措施。ISO 6336-5: 2016 (E) 《直齿轮和斜齿轮承载能力的计算 第5部分: 材料的强度和重量》中, 对MQ和ME等级

的渗碳钢成品齿轮部件提出了≥5级的细晶粒面积占比≥90%且晶粒最粗不超过3级的要求。然而, 用于工业传动齿轮箱的很多齿轮部件, 由于设计要求的渗层深度较深, 需要在渗碳温度下保持很长时间, 因此很容易造成晶粒长大。为保证齿轮部件在长时间渗碳时晶粒不长大, 所用钢材必须在高温下具有良好的晶粒度稳定性。Al是一种常见的细化晶粒元素, 在钢中主要以AlN形式存在, 当AlN粒子在晶界弥散析出时, 可以阻碍晶界移动、抑制晶粒

粗化。Nb是一种常用的微合金化元素，在钢中可以形成碳氮化物，与Al相比，Nb的碳氮化物具有更高的热稳定性，能够在更高的温度下保持其抑制晶粒长大的能力。在钢中同时添加Nb和Al，期待能结合两者的优势，提高钢材在高温长时间保温时的晶粒度稳定性。以往的研究多集中在高温短时间保温条件下如何保证晶粒不长大^[6-8]，而在高温长时间保温情况下如何保证晶粒不异常长大的研究鲜有报道。本文从微合金化和锻后热处理优化两个方面，对20CrMnMo钢在伪渗碳条件下（940℃保温36h）的

晶粒度稳定性进行了多组试验，并对试验结果进行了初步解释。

2 添加Nb和Al进行微合金化

在钢中添加微量Nb、Al，对20CrMnMo钢进行微合金化，以形成铌的碳氮化物Nb（C，N）、AlN或其复合物AlN-Nb（C，N）等^[9]，这些第二相粒子析出时，能起到钉扎晶界、控制晶粒长大的作用。

2.1 晶粒度稳定性试验材料和方法

两种试验材料的化学成分见表1。试验材料的生

表1 试验材料的化学成分（质量分数）

(%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Al	N
试验材料 I	0.20	0.31	1.15	0.010	0.008	1.35	0.26	0.021	0.024	0.0090
试验材料 II	0.21	0.29	1.16	0.009	0.007	1.36	0.28	0.003	适量	适量

产工艺流程：EF电炉熔炼→LF精炼→VD真空脱气→IC模铸→脱模缓冷→钢锭加热→锻造→缓冷。试验材料规格 $\phi 330\text{mm}$ ，锻造比 ≥ 4.0 。分别从两种试验材料（相当于钢锭尾部的一端）的1/2半径处各取1个 $\phi 20\text{mm} \times 25\text{mm}$ 试样（分别编号为1[#]、2[#]），使用实验室电炉先对1[#]、2[#]试样进行正火+回火+调质处理，然后再进行晶粒度稳定性试验。晶粒度稳定性试验方法：将1[#]、2[#]试样一起放到实验室电炉中（装炉温度 $\leq 500^\circ\text{C}$ ），缓慢升温至940℃，保温36h，然后同时出炉进行油淬。试样经磨抛处理后，使用饱和苦味酸溶液腐蚀显示出奥氏体晶粒晶界，选择最差视场，按照ISO 643：2019《钢表面晶粒尺寸的显微测定》中面积法进行晶粒度评估。

2.2 晶粒度稳定性试验结果与分析

试验结果如图1所示。从图1可看出，1[#]与2[#]试样的奥氏体晶粒度存在显著差异。1[#]试样的奥氏体晶粒呈现明显混晶现象，最粗晶粒2级，2~4级粗晶粒面积占比达42%。2[#]试样的奥氏体晶粒明显比1[#]细小且均匀， ≥ 5 级细晶粒面积占比达100%。

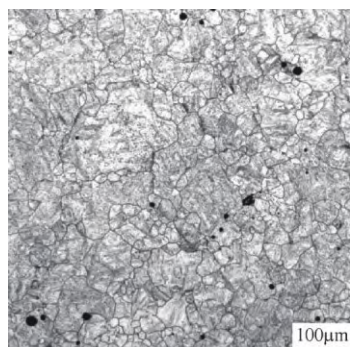
使用透射电镜（TEM HITACHI 800）对1[#]试样两处不同的位置析出的第二相粒子进行检测，并用CrysTBox软件对TEM衍射花样进行标定，以确定物相类型。标定检测显示，析出物主要为三角晶系菱形晶格结构和单斜晶系单斜晶格结构的铌的碳氮化物Nb（C，N），如图2所示。从图2可看出，这些析出物大小不一（从数十纳米到数百纳米），外形呈长细棒状、短细棒状和纺锤状等，且是密集析

出。这样的析出物，起不到对晶界的钉扎作用或钉扎作用很弱，因此1[#]试样的晶粒大小不一、混晶严重。2[#]试样只含有一种强抑制晶粒长大的微合金元素Al以及一定量的N，且Al与N的含量比接近AlN的理想化学计量比，这有利于大量细小的AlN颗粒在晶界弥散析出，起到钉扎奥氏体晶界的作用，从而抑制晶粒长大。依据LIU等^[9]的研究成果，在当加热温度 $< 950^\circ\text{C}$ 时，第二相颗粒AlN的体积分数较高，钉扎晶界作用较强，奥氏体晶粒生长缓慢；当温度升高至 $\geq 950^\circ\text{C}$ 时，AlN第二相颗粒的数量大幅减少，钉扎晶界作用大幅削弱，奥氏体晶粒粗化。2[#]试样中有个别晶粒（5级晶粒）较其他晶粒粗大，这可能是由于在940℃高温下长时间保温过程中，有微量的AlN颗粒的晶界发生溶解（见图3），导致AlN颗粒数量略微减少，钉扎作用有所减弱。

必须指出的是，同时含有Nb和Al两种元素的渗碳钢的第二相粒子析出和奥氏体晶粒长大机理相当复杂，很多方面还有待进一步地研究。对于渗碳温度 $\leq 940^\circ\text{C}$ 且渗碳后进行直接淬火的渗碳钢，只添加Al和N，通过合理调整Al含量和Al/N来控制晶粒度稳定性更简易、更具有实际可操作性。如果改变渗碳后的淬火工艺，同时添加Nb、Al两种元素的渗碳钢，渗碳处理后的奥氏体晶粒度也可能很好。

3 对锻后热处理进行优化

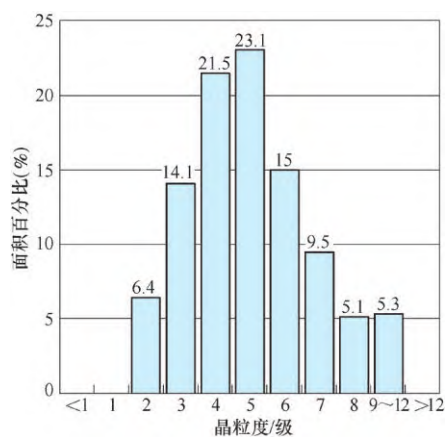
20CrMnMo钢锻造缓冷后通常会得到粗大的非平衡组织，直接加热奥氏体化时，如果加热条件控



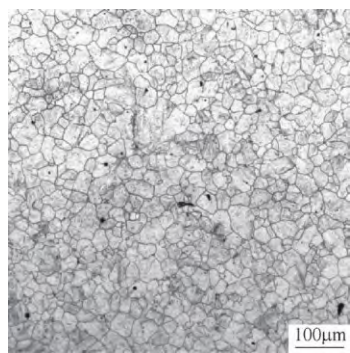
a) 1[#]试样奥氏体晶粒度原始照片



b) 1[#]试样奥氏体晶粒晶界重构图



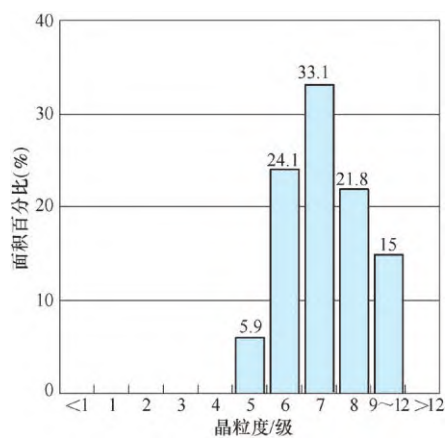
c) 1[#]试样奥氏体晶粒面积分布



d) 2[#]试样奥氏体晶粒度原始照片

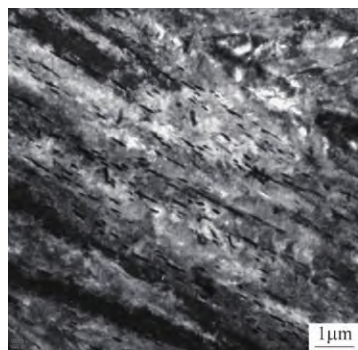


e) 2[#]试样奥氏体晶粒晶界重构图

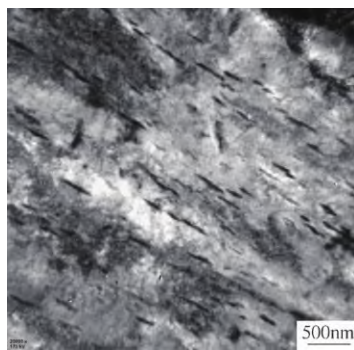


f) 2[#]试样奥氏体晶粒面积分布

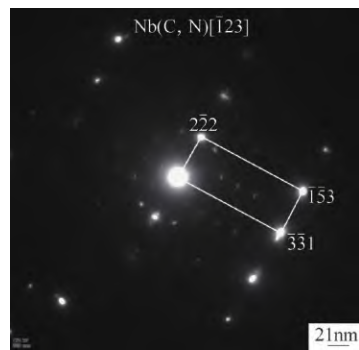
图1 试验材料的奥氏体晶粒度结果



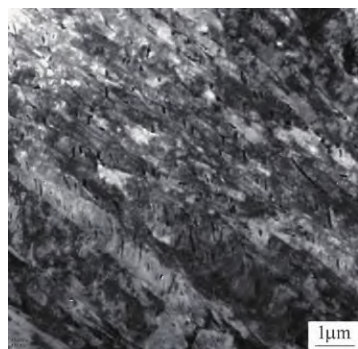
a) 位置1处的TEM照片 (10000×)



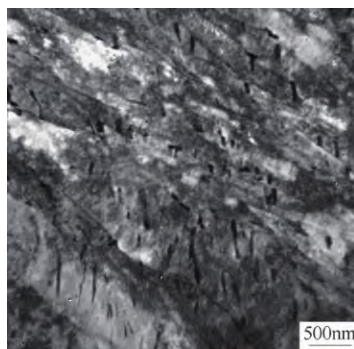
b) 位置1处的TEM照片 (20000×)



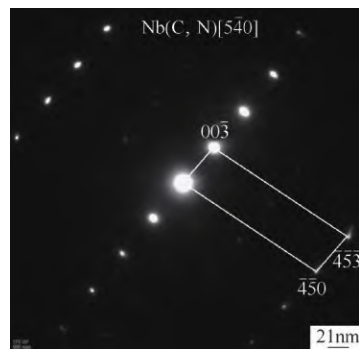
c) 位置1处的衍射花样



d) 位置2处的TEM照片 (10000×)



e) 位置2处的TEM照片 (20000×)



f) 位置2处的衍射花样

图2 1[#]试样两处不同位置的析出物和衍射花样

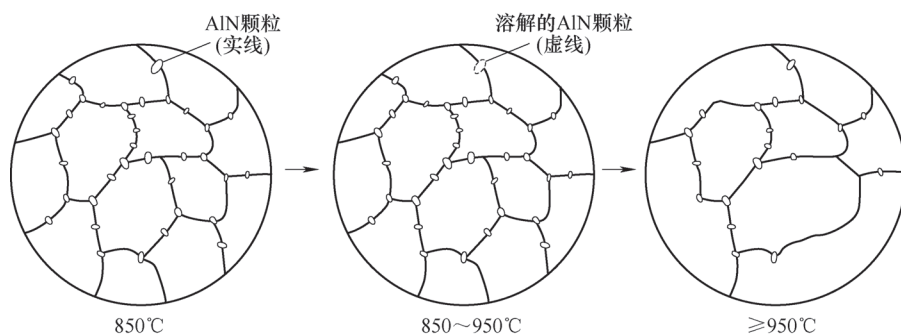


图3 奥氏体粗化和混晶结构发展过程

制不当,则很容易发生组织遗传现象,导致新形成的奥氏体晶粒粗大。通过合理优化钢材的锻后热处理,改善钢材的金相组织,消除组织遗传,可以有效地细化晶粒。

3.1 晶粒度稳定性试验材料和方法

从试验材料Ⅱ(未做锻后热处理,相当于钢锭尾部一端)的1/2半径处再取2个 $\phi 20\text{mm} \times 25\text{mm}$ 试样,其中一个试样(编号Ⅱ-1[#])不做热处理,另一个试样(编号Ⅱ-2[#])做等温退火处理。先用金相显微镜检测Ⅱ-1[#]、Ⅱ-2[#]试样的金相组织,然后对Ⅱ-1[#]、Ⅱ-2[#]试样一起进行晶粒度稳定性试验并检测奥氏体晶粒度。

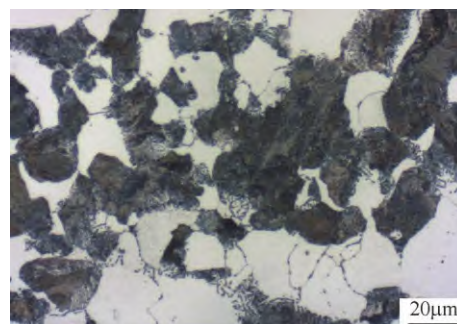
3.2 晶粒度稳定性试验结果与分析

两个试样的金相组织如图4所示。Ⅱ-1[#]试样是锻造缓冷状态,金相组织粗大,为粒状贝氏体+沿晶分布的较大的条块状铁素体;Ⅱ-2[#]试样是等温退火后的状态,金相组织得到了完全的改善,为均匀的珠光体+铁素体,这类组织是典型的平衡组织。

两个试样经晶粒度稳定性试验后的奥氏体晶粒度如图5所示。从图5可看出,Ⅱ-1[#]试样混晶严重,存在多个异常长大的晶粒,最粗晶粒0级,0~1级粗晶占比达41.6%。Ⅱ-2[#]试样的晶粒细小且相对均匀,≥5级的细晶粒面积占比达到100%。出现上述结果的原因包括:一是组织遗传,试样在缓慢升温到奥氏体化温度并长时间保温时,由于新生成的奥氏体与锻造后粗大的原奥氏体保持着严格的位相关系,导致部分新奥氏体晶粒长大恢复成旧的粗大的原奥氏体大小^[10];二是一部分析出的AlN第二相粒子在高温长时间保温时发生粗化或溶解,不能再钉扎晶界(脱钉),导致长大趋势大的晶粒择优长大,形成混晶^[11],且在加热保温过程中非平衡组织钢中的AlN脱钉比平衡组织钢要严重的多。由于



a) Ⅱ-1[#]试样锻造缓冷态(500×)



b) Ⅱ-2[#]试样等温退火态(500×)

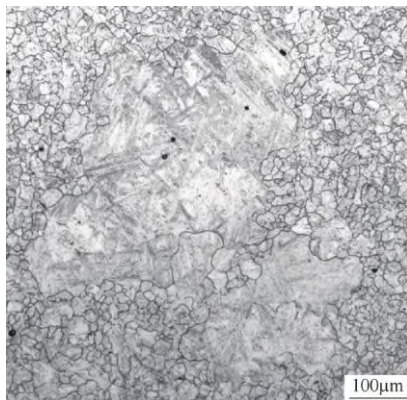
图4 20CrMnMo钢的金相组织

Ⅱ-1[#]试样是锻造缓冷状态,原始组织粗大,组织遗传严重,且AlN脱钉严重,所以出现多个粗晶;Ⅱ-2[#]试样经过了适当的热处理,得到了均匀的平衡组织,消除了组织遗传,且AlN脱钉很弱,因此晶粒细小且均匀。从上述结果可以看到,20CrMnMo钢即使只进行适当的预备热处理,而不再进行最终热处理,也能获得很好的晶粒度稳定性。

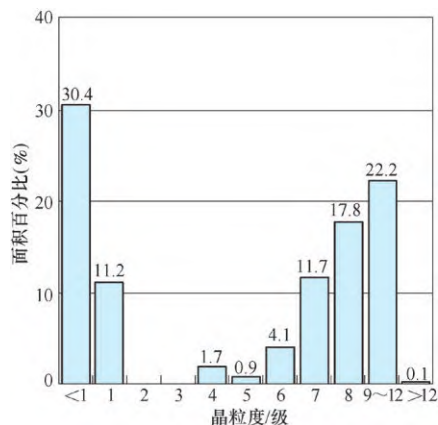
4 结束语

1) 20CrMnMo钢在伪渗碳条件下(940℃保温36h),在含有一定量N的基础上,只添加1种微合金元素Al的试验材料晶粒度稳定性明显优于同时添加2种微合金元素Nb和Al的试验材料。

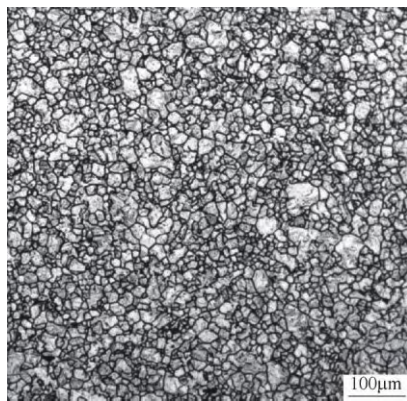
2) 通过优化20CrMnMo钢的锻后热处理工艺,



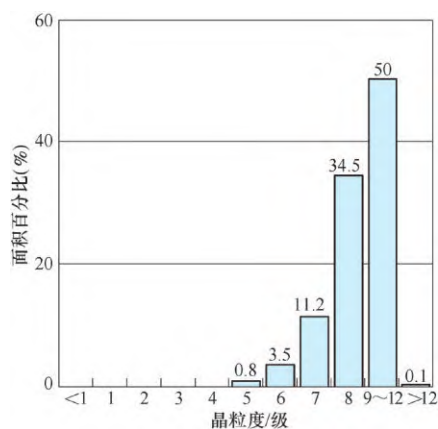
a) II-1#试样的奥氏体晶粒度原始照片



b) II-1#试样的奥氏体晶粒面积分布



c) II-2#试样的奥氏体晶粒度原始照片



d) II-2#试样的奥氏体晶粒面积分布

图5 20CrMnMo钢试样的奥氏体晶粒度结果

将锻后非平衡组织改善为平衡组织、消除组织遗传，可以有效细化晶粒，提高晶粒度稳定性。

参考文献：

- [1] 赵振东. 20CrMnMo钢和20CrMnTi钢热处理工艺性及力学性能对比分析[J]. 金属热处理, 1997 (3) : 43-45.
- [2] 高金柱, 顾敏, 王爱香, 等. 常用典型齿轮钢渗碳层的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2012, 36 (2) : 49-51.
- [3] 于录元. 几种渗碳钢的接触疲劳和弯曲疲劳性能[J]. 热加工工艺, 1997 (3) : 10-12.
- [4] 庄军, 华公平, 施瑞华. 四种渗碳钢的接触和弯曲疲劳强度的对比研究: “第九届江苏省热处理年会”论文集[C]. 南京: 江苏省热处理学会, 2006.
- [5] 谢玲珍, 王忠, 冯显磊, 等. 不同材料不同工艺热处理的重载齿轮的弯曲疲劳性能研究[J]. 热处理, 2019, 34 (5) : 11-18.
- [6] 郭发军, 李祥才, 崔建海, 等. Al含量对齿轮钢20CrMo奥氏体晶粒度的影响[J]. 山东冶金, 2024,

46 (2) : 34-35.

- [7] 郭涛, 岁月, 何肖飞, 等. Al、N含量对齿轮钢奥氏体晶粒度的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49 (7) : 113-120.
- [8] GONG S H, WANG F M, CHEN K T. AlN and Nb (C, N) composite precipitation behaviors and their effects on austenite grain growth in SCr420H high-temperature carburized gear steel[J]. Steel Research International, 2024: 1-15.
- [9] LIU Z Y, BAO Y P, WANG M, et al. Austenite grain growth of medium-carbon alloy steel with aluminum additions during heating process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2019, 26 (3) : 282-290.
- [10] 刘云旭. 金属热处理原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 20-34.
- [11] 肖纪美, 赵任涛, 刘昌其. 奥氏体晶粒异常长大的理论及应用[J]. 特殊钢, 1982 (6) : 1-13.