

基于氧化物冶金的低碳齿轮钢带状组织调控研究

杨永坤^{1*}, 李小明¹, 战东平²

1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 西安 710055

2. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819

Research on banded structure control of low carbon gear steel based on oxide metallurgy

Yang Yongkun^{1*}, Li Xiaoming¹, Zhan Dongping²

1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

1. 前言

带状组织是低碳齿轮钢热轧缓慢冷却下形成的以先共析铁素体为主和珠光体交替分布的条带组织^[1], 不仅会恶化钢材横向塑韧性, 造成力学性能各向异性, 而且会增大齿轮渗碳淬火变形量, 导致齿轮啮合困难而提前失效报废^[2]。凝固合金元素偏析是带状组织形成的必要条件^[3], 其对带状组织形成的影响主要体现在两方面: 一方面是合金元素对相转变温度的影响, 另一方面则是合金元素对 C 元素扩散的影响。此外, 热轧过程钢中易形成长条状夹杂物, 导致铁素体在长条状夹杂物上形核并沿轧制方向生长为铁素体带。因此, 改变钢中塑性夹杂物存在形式, 调控先共析铁素体形核长大以及 C 元素扩散, 有望在热轧冷却过程实现带状组织的控制。

氧化物冶金的核心是利用钢中生成的细小、弥散氧化物作为硫化物、氮化物的形核点, 钉扎奥氏体晶界移动, 抑制奥氏体晶粒长大, 同时在奥氏体/铁素体相变过程促进晶内铁素体形核。晶内铁素体在一定程度上可以抑制粗大的先共析铁素体生成。基于此, 本文选择能够发挥夹杂物氧化物冶金作用的 Ti-Zr 脱氧低碳齿轮钢为研究对象, 统计热轧前后钢中夹杂物特征, 观察热轧态微观组织, 分析热轧态纵向和横向力学性能差异, 评估利用氧化物冶金技术改善微观组织和力学性能各向异性的效果。

2. 实验材料和方法

2.2. 实验材料

实验钢采用 30 kg 真空感应炉冶炼制备, 化学成分如表 1 所示。冶炼所需原料、脱氧工艺、操作步骤等均与之前研究相同^[4]。

表 1 实验钢化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of experimental steels (mass fraction, %)

实验钢	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	N	T.O	Ti	Zr	Fe
0#	0.20	0.22	0.78	0.006	0.49	0.58	0.17	0.0028	0.0031	—	—	Bal.
1#	0.21	0.28	0.80	0.006	0.50	0.57	0.18	0.0025	0.0019	0.033	0.0020	Bal.
2#	0.21	0.28	0.82	0.005	0.50	0.59	0.18	0.0027	0.0012	0.029	0.0200	Bal.

2.2. 实验方法

首先将切头去尾的实验铸锭置于马弗炉中随炉升温至 1200℃，保温 120 min，随后在双辊可逆实验轧机上进行热轧，开轧温度 1080~1120℃，经 8 道次热轧成厚度为 13 mm 的热轧板，总变形量为 80%，终轧温度为 890~920℃，热轧变形后采用空冷至室温。

其次，参照 GB/T 34474.1-2017“钢中带状组织的评定—第 1 部分：标准评级图法”，在热轧板 1/4 宽度处切取金相试样。金相试样经标准打磨、抛光后，采用带有能谱分析仪的钨灯丝扫描显微镜（SEM-EDS）对夹杂物形貌进行观察、统计；随后采用 4%硝酸酒精溶液对试样进行室温腐蚀，使用光学显微镜和 SEM 观察分析微观组织，根据 GB/T 34474.2-2018“钢中带状组织的评定—第 2 部分：定量法”计算求得微观组织各向异性指数。

最后，参照 GB/T 2975-2018“钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备”，在热轧板 1/4 宽度、1/2 厚度处切取纵向和横向的拉伸试样和冲击试样。使用岛津电子万能试验机 AGS-X 100 kN 在室温下进行单轴拉伸实验，采用型号为 JBW-500 的摆锤式冲击试验机在室温下进行冲击性能测试。

3. 结果与分析

图 1 为 3 炉实验钢热轧后夹杂物分布。可以看出，0#钢中夹杂物表现出沿轧制方向的延伸变形，而这在 1#钢和 2#钢中并不明显。这主要是由于 0#钢中只加入 Si-Mn 脱氧合金化，钢中夹杂物类型主要为硅酸盐夹杂物和 MnS 夹杂物，二者在实验热轧温度下均表现为塑性，轧制过程容易沿轧制方向发生流动变形；而对于 1#钢和 2#钢，尽管钢中也存在 MnS 会沿轧制方向延伸拉长，但是其氧化物分别为 Ti_2ZrO_6 和 ZrO_2 ，均为具有高熔点的不可变形夹杂物，不仅自身不会沿轧制方向发生变形，也会对其外层析出的硫化物的变形有一定抑制作用。此外，2#钢中 MnS 中固溶有部分 Zr，以 Zr_3S_4 形式存在^[5]，硬度要明显高于纯 MnS，这也抑制其在热轧过程延伸变形。

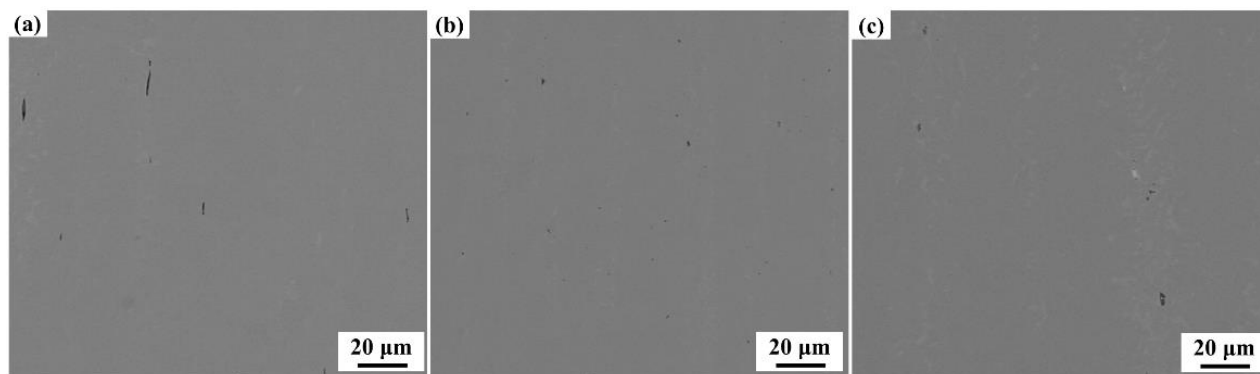


图 1 实验钢热轧态夹杂物分布及元素面分布

Fig.1 Inclusion distribution and element mapping images of typical inclusion in hot rolled steels

(a) 1#钢；(b) 2#钢；(c) 3#钢

对热轧态夹杂物数量密度和面积分数进行统计，并与铸态夹杂物特征进行对比，结果如表 2 所示。可以看出，与铸态夹杂物相比，热轧态夹杂物数量密度明显增加，但面积分数并无明显差异，这说明夹杂物数量密度增加主要是因为热轧过程夹杂物的断裂和破碎。此外，从表 2 中还可以看出，经热轧后 0#钢中夹杂物数量密度增加最多，增量为 55 个/mm²，而 2#钢中夹杂物数量密度增加最少，增量只有 13 个/mm²。这主要是因为 0#钢和 1#钢中硫化物为纯 MnS，其在热轧过程容易发生延伸和周期性断裂^[6]，而 2#钢中硫化物为 MnS-Zr₃S₄，硬度要高于纯 MnS，在热轧过程硫化物变形和断裂要比纯 MnS 更困难，因此 2#钢夹杂物数量密度变化最小。

表 2 热轧前后夹杂物数量密度和面积分数

Table 2 Number density and area fraction of inclusion before and after hot rolling

实验钢	夹杂物数量密度 / (个/mm ²)		夹杂物面积分数 / %	
	铸态	热轧态	铸态	热轧态
0#	94	149	0.0744	0.0716
1#	107	136	0.0317	0.0303
2#	83	96	0.0253	0.0228

图 2 为 3 炉实验钢热轧态微观组织的金相图像和 SEM 图像。可以看出, 3 炉实验钢均未出现传统的铁素体/珠光体带状组织, 微观组织中铁素体形貌主要为针状和板条状, 少量铁素体形貌为多边形, 珠光体则随机分散在铁素体之间。由于热轧后试样中存在沿轧制方向的元素偏析带, 经腐蚀后在金相图像中仍会存在颜色明显差异的条带状^[7], 如图中黄色点线圆所示, SEM 观察可以判断条带处组织主要为粒状贝氏体。

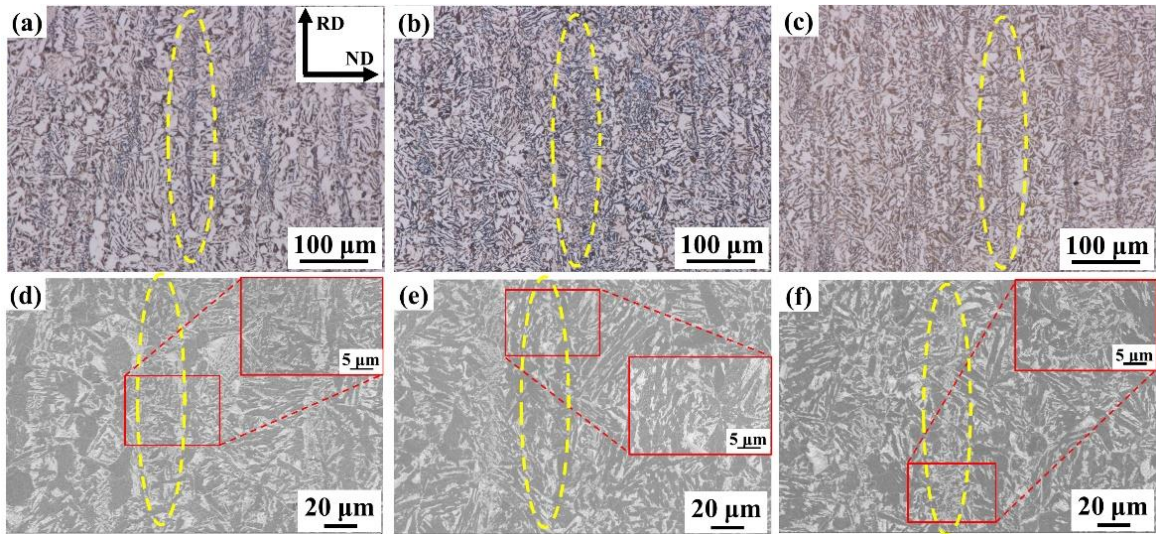


图 2 实验钢热轧态微观组织

Fig. 2 Hot rolled microstructure of experimental steels

(a, d) 0#钢; (b, e) 1#钢; (c, f) 2#钢

图 3 为 3 炉实验钢微观组织各向异性指数计算结果。0#钢、1#钢和 2#钢微观组织各向异性指数分别为 1.53、1.33 和 1.42。一般而言, 当各向异性指数为 1 时, 微观组织表现为随机性、无方向性, 而各向异性指数越大, 说明微观组织方向性和带状程度越严重^[8]。可以看出, 3 炉钢各向异性指数均较小, 这主要是由于在热轧冷却过程, 微观组织中形成的晶内铁素体生长会穿过元素偏析带, 弱化粒状贝氏体带的形成。此外, 对比 3 炉实验钢, 1#钢的各向异性指数最小, 这主要是因为 1#钢经热轧后沿轧制方向的长条状夹杂物少于 0#钢和 2#钢, 同时 1#钢中夹杂物类型主要为 TiN, TiN+MnS, Ti₂ZrO₆+MnS, 可诱导晶内铁素体形核的有效夹杂物多于 0#钢和 2#钢, 可以促进更多晶内铁素体形成。晶内铁素体的生成不仅可以细化晶粒尺寸, 而且还可以破坏粒状贝氏体条带的形成, 弱化微观组织的方向性。

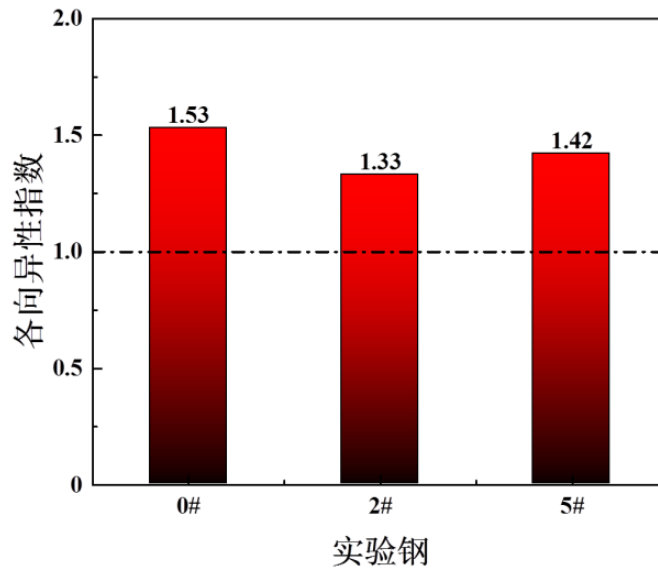


图 3 热轧实验钢微观组织各向异性指数

Fig. 3 Anisotropy index of hot rolled microstructure of experimental steels

表 3 汇总了 3 炉钢纵向和横向力学性能。可以看出, 3 炉实验钢纵向和横向的强度和韧性差异并不大, 但是纵向塑性要优于横向。此外, 从 3 炉实验钢热轧态性能差值比计算结果可以看出, 3 炉实验钢纵向和横向强度差异较小, 强度性能差值比均在 $\pm 2\%$ 内, 但是纵向和横向延伸率及断面收缩率存在一定差异, 特别是 0#钢和 2#钢。0#钢延伸率、断面收缩率和冲击功的性能差值比分别为 6.66%、14.63%和 1.72%, 1#钢延伸率、断面收缩率和冲击功的性能差值比分别为 1.69%、3.87%和 1.69%, 2#钢延伸率、断面收缩率和冲击功的性能差值比分别为 3.43%、13.15%和 6.67%。这表明微观组织中出现的粒状贝氏体条带主要影响塑性和韧性的各向异性, 对强度各向异性的影响较小。此外, 对比 3 炉实验钢可以发现, 1#钢纵向和横向力学性能差异最小, 性能差值比均小于 5%, 这说明 1#钢微观组织中粒状贝氏体条带对力学性能各向异性的影响最小, 这也证实了图 3 中 1#钢微观组织各向异性指数最小。

表 3 实验钢纵向和横向力学性能

Table 3 Longitudinal and transverse mechanical properties of experimental steels

实验钢	方向	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	断面收缩率 /%	冲击功 /J
0#	纵向	698.5	492.7	25.07	60.60	29
	横向	707.1	497.4	23.40	51.73	28.5
	性能差值比 /%	-1.21	-0.95	6.66	14.63	1.72
1#	纵向	702.6	485.5	26.58	55.23	29.5
	横向	695.7	485.6	26.13	53.09	29
	性能差值比 /%	0.98	-0.02	1.69	3.87	1.69
2#	纵向	661.2	434.1	33.24	58.69	30
	横向	649.3	441.9	32.10	50.97	28
	性能差值比 /%	1.80	-1.80	3.43	13.15	6.67

4. 结论

(1) 3 炉实验钢经热轧后夹杂物数量密度均有所增加, 但是 0#钢夹杂物数量密度增量最大为 55 个/ mm^2 。1#钢和 2#钢中生成的氧化物+硫化物复合夹杂物弱化了纯硫化物沿轧制方向的变形延伸。

(2) 实验钢经热轧后存在元素偏析带, 在元素富集区形成了粒状贝氏体条带, 但是冷却过程生成的晶内铁素体破坏了粒状贝氏体条带的连续性, 因此 3 炉钢微观组织各向异性指数均较小。

(3) 充分发挥氧化物冶金作用的 1#钢微观组织及力学性能各向异性均得到改善, 利用氧化物冶金技术可以实现低碳齿轮钢带状组织控制。

致谢

感谢陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目（项目编号：2023-JC-QN-0376）的支持。

参考文献

- [1] Verhoeven J D. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2000, 9(3): 286-296.
- [2] 冯桂萍. 低碳齿轮钢带状组织影响因素研究[J]. *模具制造*, 2021, 21(7): 86-89.
- [3] 杨永坤, 朱佳雨, 李小明, 等. 低碳合金钢带状组织控制研究现状[J/OL]. *钢铁*, 2022, DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220636.
- [4] Yang Y K, Zhan D P, Lei H, et al. Research on Inclusion Evolution during Re-Heating Process in Ti-Zr Deoxidized Low Carbon Steel[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52: 1839-1853.
- [5] 杨永坤, 朱佳雨, 李小明, 等. Zr 处理对 Ti 脱氧低碳微合金钢中硫化物的影响[J/OL]. *钢铁研究学报*, 2023, DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20220305.
- [6] Yang Y K, Zhan D P, Qiu G X, et al. Inclusion evolution in solid steel during rolling deformation: a review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 5103-5115.
- [7] Ren C, Zhang X, Ji H, et al. Effect of banded morphology and grain size on the tensile behavior of acicular ferrite in HSLA steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 705: 394-401.
- [8] 刘金源, 陈远生, 雷中钰, 等. 运用 ASTM E1268-01 标准定量评定钢中显微带状组织[J]. *物理测试*, 2010 (6): 37-41.