

离心轧辊花斑问题的形成原因分析

方伟^{1, 2}, 张劲飞¹, 吕记伟¹, 刘杰兵^{3, 4}, 赵立波^{3, 4},
陈兴富^{3, 4}, 肖志霞^{1, 2}, 冯建航^{1, 2}, 殷福星^{1, 2}

(1. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300132; 2. 天津市材料层状复合与界面控制技术重点实验室, 天津 300132;
3. 河北省板带轧辊产业技术研究院, 河北邢台 054009; 4. 河北省轧辊绿色制造技术创新中心, 河北邢台 054009)

摘要: 针对轧辊使用中出现的的花斑缺陷问题, 利用金相显微镜、电子探针等工具对花斑区和正常区进行微观组织观察与区域元素分布测量, 并对微观组织进行量化分析, 探讨了轧辊花斑的形成原因。结果表明, 花斑问题的产生和轧辊表面氧化程度关联, 而氧化程度和局部渗碳体尺寸密切相关。花斑区组织和正常区相比更为细小, 花斑区尺寸大于100 μm 的渗碳体占比不足30%, 正常区尺寸大于100 μm 的渗碳体占比接近80%。组织差异造成正常区氧化程度较高, 颜色偏暗; 而花斑区氧化较为分散, 未形成大块氧化区域; 两个区域的氧化程度差异造成了花斑现象。花斑现象形成原因的分析, 有利于下一步离心铸造轧辊的制备工艺设计与优化, 获取均匀组织以改善花斑问题。

关键词: 轧辊; 花斑; 微观组织; 氧化; 电子探针; 成分分布

作者简介:

方伟(1987-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高性能金属结构材料的研究工作。E-mail: fangwei@hebut.edu.cn

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1585-06

基金项目:

国家自然科学基金项目 51701061; 广东省科学院项目 2021GDASYL-20210102002; 河北省重大科技成果转化专项 21281003Z。

收稿日期:

2023-01-16 收到初稿,
2023-07-16 收到修订稿。

轧辊的生产以及服役过程中, 常常因为一些因素导致轧辊表面出现大面积的、形状不规则的花斑现象^[1-2]。这些花斑可归为产品表面缺陷, 且在继续使用中会将轧辊上出现的表面缺陷映射到生产成品上, 所以花斑缺陷要在实际生产中尽量避免^[3-6]。对花斑形成原因的分析有利于后续对离心轧辊的成分设计与工艺优化, 以提高离心轧辊的产品质量。

张晓波^[7]等人探究了轧辊在使用时坯料、冷却水路以及表面硬度等因素导致的花斑问题, 发现坯料的纯净度、冷却水的流动和表面硬度的高低都会影响到轧辊与成品的花斑产生; 通过改进生产措施, 例如改善配坯板质量、冷却水路以及轧辊周围环境, 最终提高了合格率并减少了花斑的出现。相关研究探索了花斑形成的各种原因^[8-11], 发现花斑区和正常区的组织差异是导致形成花斑的主要原因, 花斑区存在碳化物聚集, 凝固过程组织中石墨和碳化物异常分布; 这样的组织差异则是由于生产中铁液的粘度不同导致流速不同, 从而造成浇注时铁液紊流, 进而导致元素偏析; 最终通过适当控制浇注时的铁液流速, 细化操作, 减少元素的偏析, 改善了花斑问题。尽管研究者对于轧辊花斑问题进行了较多研究并提出改善措施^[12-19], 但是目前还缺少对缺陷处组织的量化统计以及轧辊花斑形成原因的详细分析。

本论文在轧辊花斑区和正常区取样, 比较了花斑区和正常区的表面形貌和金相组织, 通过电子探针分析对比了两个区域的成分分布特征, 最后对两个区域的微观组织进行了量化分析, 并详细讨论了花斑形成的原因。

1 试验过程

本文研究轧辊涉及的元素含量(质量分数)分别为: 3.2%~3.5%C、1.6%~2.5%Cr、0.35%~0.8%Mo、4.0%~4.5%Ni、0.7%~1.3%Si、0.6%~1.1%Mn、 $P \leq 0.15\%$ 、 $S \leq 0.03\%$ 。从出现花斑问题的轧辊表面不同区域取样, 试样表面未经处理, 利用ZeissAxioVert.A1型光学显微镜, JEOL8530F型电子探针显微分析设备(EMPA)对轧

辊试样原始表面进行组织观察、区域元素分析。对轧辊试样未处理表面进行以上测试分析后，将试样打磨抛光处理，使用4% HNO_3 酒精腐蚀，制备金相试样，分别使用光学显微镜与电子探针进行组织的显微观察与成分分布分析。使用ProImaging软件统计相比比例与渗碳体尺寸大小，采用5张图片进行数据统计并取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 未处理试样表面微观组织与元素分布

2.1.1 未处理试样表面的微观组织

轧辊在使用过程中容易形成表面花斑缺陷，为了直观观察花斑区表面的微观组织以及元素分布状态，

更好地分析花斑形成原因，首先通过金相显微镜直接观察花斑区与正常区未处理的表面组织，如图1所示。图1a是存在花斑区的轧辊表面，表面呈现光亮色的区域即为花斑区，较暗的区域为正常区，二者交界的区域为交界处。在花斑区和正常区分别取样，取样后表面未经其他处理，保留原始氧化状态，直接在光学显微镜下观察表面形貌，可以发现，花斑区亮，黑色区域面积明显比正常区小（图1b）。在相同的光学显微镜拍摄条件下，正常区暗，且黑色区域面积更大（图1c）。可以在过渡区观察到组织差异，交界线两侧分别为正常区和花斑区，如图1d所示。偏光照片显示出黑色块区可能是红色的氧化物（图1e）。

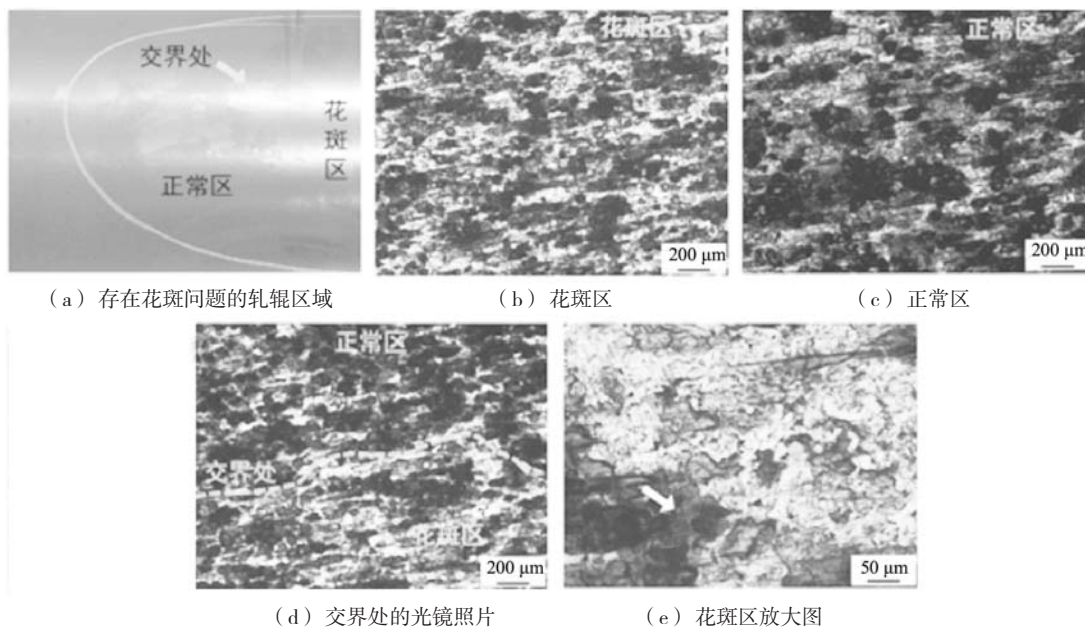


图1 花斑现象宏观照片以及未处理试样表面的光学显微镜照片

Fig. 1 Macroscopic photo and optical microscopy of untreated sample surface

2.1.2 未处理试样表面的区域元素分布

对于金相显微镜下观察到的花斑区，采用电子探针分析了该区域的元素面分布情况，如图2所示。花斑区背散射照片中（图2b）的黑色区域对应图1中的黑色区域，通过O元素的分布判断黑色区域为氧化物。轧辊微观组织中包含渗碳体相、基体相以及石墨相等^[8, 12]。渗碳体中Cr元素含量高于基体相中Cr元素含量，可以通过Cr元素面分布照片观察到渗碳体的分布，而基体相Ni、Si元素含量更高。从图2可以看出，在面积大的基体相上更容易形成大块的氧化区域，而面积小的基体上氧化物小。氧的分布主要和基体相区域大小或渗碳体尺寸相关。

之后通过电子探针对比分析了花斑区和正常区低倍形貌与元素分布情况，如图3所示。通过背散射照片图3a、b可看出，花斑区的氧化物数量和面积都低于

正常区。渗碳体中Cr含量高，从Cr元素的面分布图中可以观察出渗碳体组织分布，在下文中会更细致的表征。图3中花斑区的渗碳体分布更为密集，组织更细小，正常区的渗碳体尺寸更大。在面积大的基体上更容易形成大块的氧化区域，这和观察到正常区氧化物更大、更多的结果一致。

2.2 金相试样的微观组织与元素分布

2.2.1 金相试样的微观组织

为了更清楚地观察花斑区和正常区的微观组织差异，通过打磨、抛光后经过4% HNO_3 酒精腐蚀制备了金相试样，利用光学显微镜、电子探针对于组织和成分进一步表征。如图4所示，在金相照片中，可以看到明显的两相，分别为白色渗碳体与黑色基体相。对比两个区域的金相组织照片（图4a、b），可以明显看出

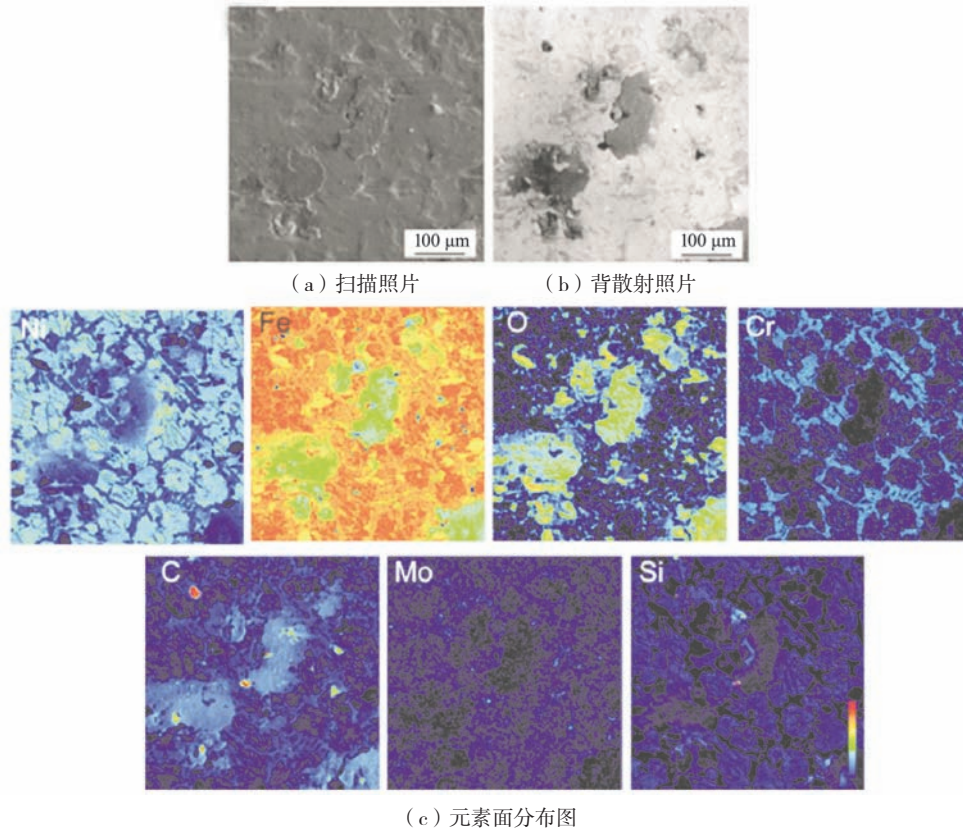


图2 花斑区未处理试样表面的扫描照片和背散射照片以及对应的元素面分布图

Fig. 2 Scanning photos and back scattered photos of the untreated specimen surface in piebald area, and the corresponding element distribution mapping

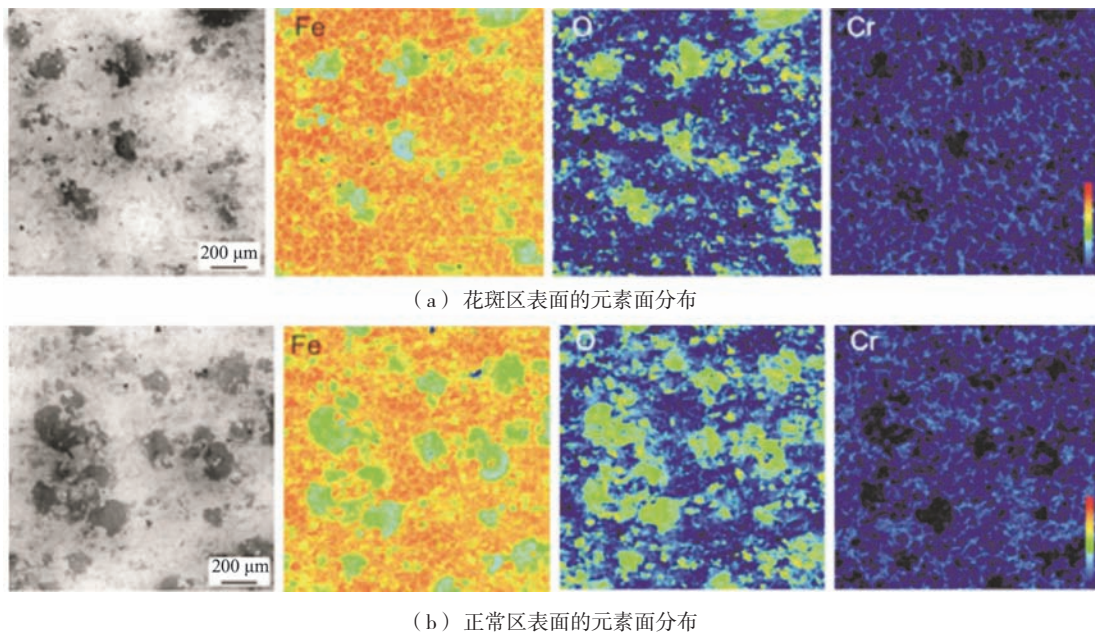


图3 花斑区和正常区未处理试样表面的元素面分布图

Fig. 3 Elemental distribution of piebald area and normal area in untreated sample surface

花斑区的组织比正常区的组织更细小，可能与离心铸造过程中，轧辊表面不同位置的流动性不同导致的组织差异密切相关。在图4e中可以观察到交界处两侧正

常区和花斑区的组织差异。在两个区域的扫描照片中观察到相似的组织特征，此外，可以看到除两相外的黑色石墨相（图4c、d）。

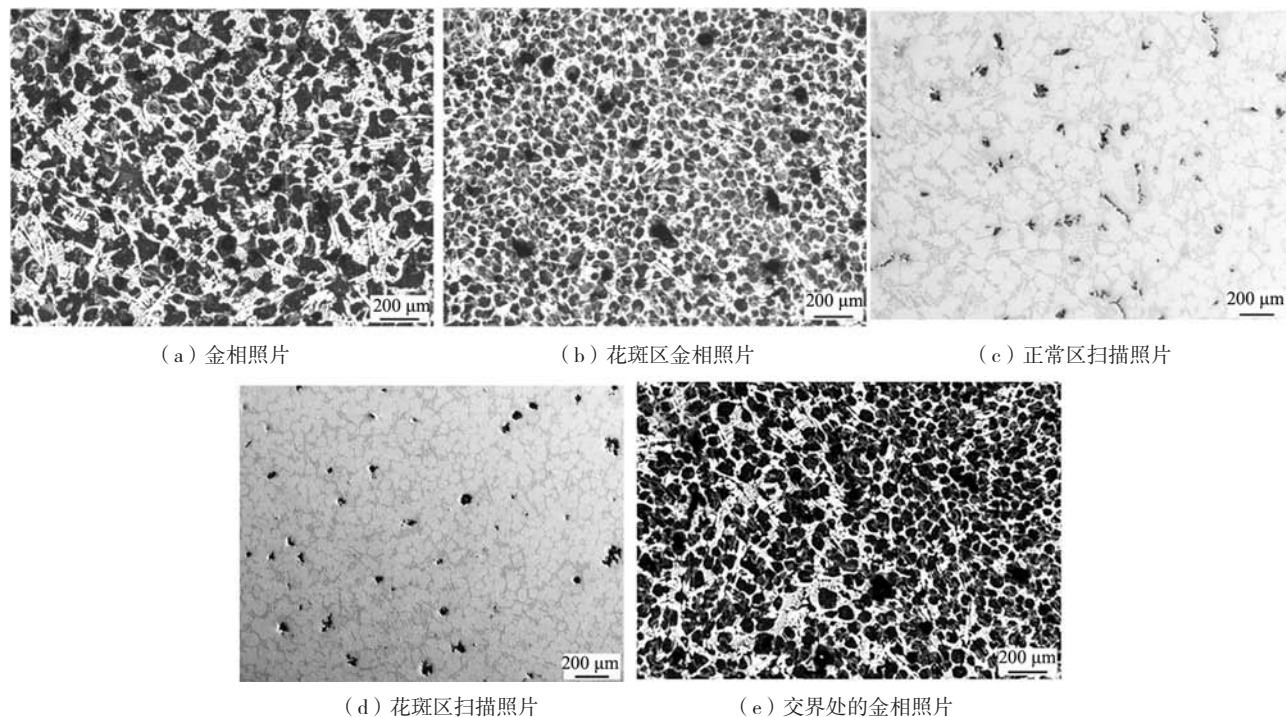


图4 正常区、花斑区金相照片和扫描照片及交界处的金相照片

Fig. 4 Metallographic photos and scanning photos in normal areas and piebald areas, and metallographic photos at the junction

2.2.2 金相试样的元素分析

进一步利用电子探针分析了金相试样花斑区和正常区的成分分布特征,如图5所示。金相试样的组织特征和原始表面微观组织相比更为清晰,同样,渗碳区域和高Cr区域重合,基体相区域和富Ni区域重合。对比花斑区和正常区的元素分布可以看出,花斑区的渗碳体尺寸更为细小,正常区渗碳体尺寸更大。此

外,如图5所示,组织中的石墨相为高C区域。交界处的组织照片与Cr元素分布如图6所示,交界处的元素分布情况也进一步表明了正常区和花斑区的组织差异情况。

2.3 渗碳体尺寸统计与量化分析

通过试验结果可以清晰的观察到花斑区和正常区的组织差异在于渗碳体尺寸不同,也即图5中渗碳体连

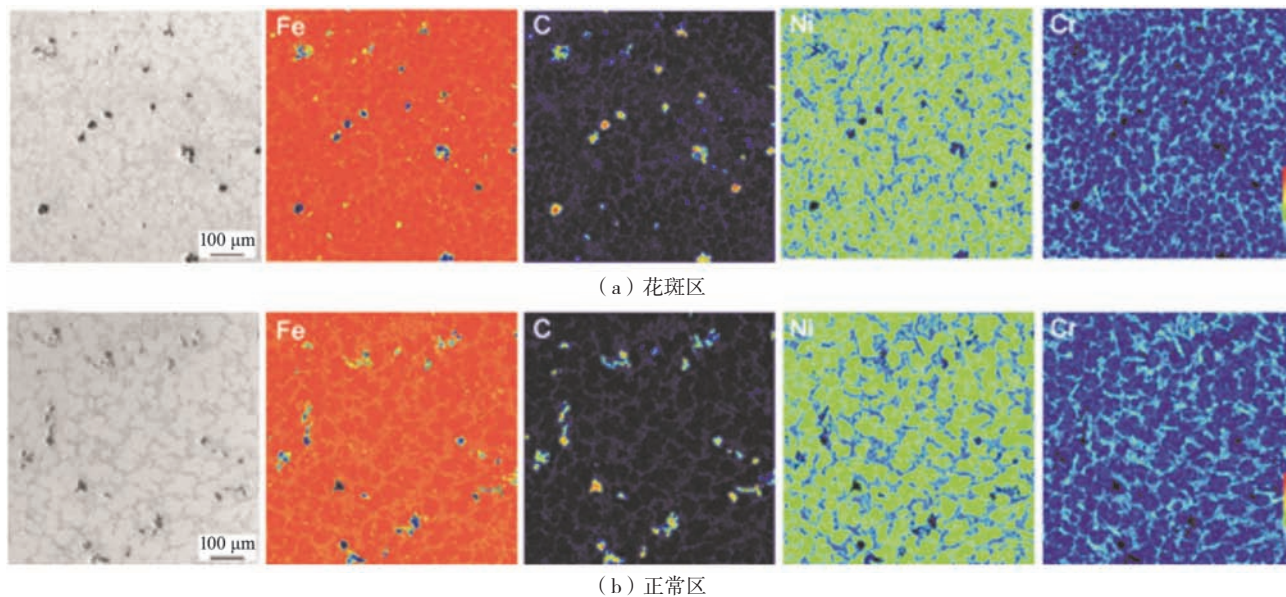
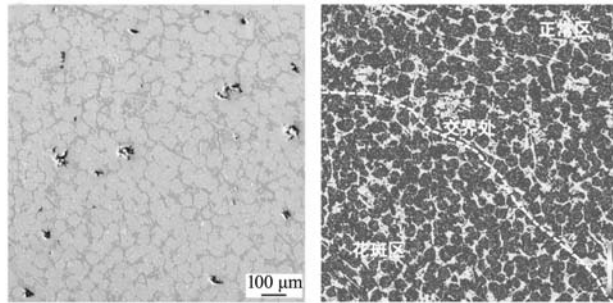


图5 花斑区和正常区抛光后组织及元素面分布图

Fig. 5 Microstructure and elemental mapping of polished surface in piebald area and normal area

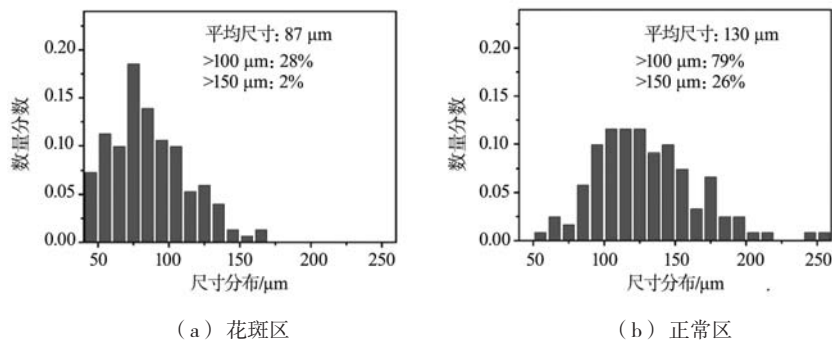


(a) 交界处的扫描照片 (b) Cr元素分布

图6 交界处的扫描照片与Cr元素分布

Fig. 6 Scanning electron microscopic image of the junction with the Cr element distribution

接所形成的网格尺寸的差异。因此，对两个区域的渗碳体尺寸进行了量化统计，如图7所示。统计结果表明，花斑区渗碳体平均尺寸为87 μm，远小于正常区



(a) 花斑区

(b) 正常区

图7 花斑区和正常区渗碳体网格大小的统计结果

Fig. 7 Statistical results of the grid size in the piebald area and normal area

表1 花斑区和正常区各相的面积分数统计结果
Table 1 Statistical results of area fraction for each phase of the piebald area and normal area

项目	渗碳体/%	石墨相/%	基体相/%
花斑区	35.7	1.3	63.0
正常区	33.1	1.6	65.3

通过试样未处理表面以及金相试样表面的微观组织以及元素分布结果，可以看出视觉上花斑的产生原因主要和轧辊表面氧化程度关联，氧化程度和组织特征相关，花斑区独特的细密组织造成该区域氧化较为分散，未形成大块氧化区域，因氧化程度的不同造成视觉差异，从而观察到花斑现象。通过相统计可以看到，花斑区的石墨相比例略低，渗碳体相比例略高，正常区的基体相比例高。花斑区和正常区的成分组织差异可能和石墨相的形成、碳元素的分布相关。铸造时形成组织差异的原因是解决轧辊花斑问题的关键和下一步研究的方向。

碳体平均尺寸130 μm。人眼能够分辨的最小物体尺寸是0.1~0.2 mm，通过两个区域渗碳体尺寸统计得出，花斑区尺寸大于100 μm的渗碳体占比不足30%，正常区尺寸大于100 μm的渗碳体占比接近80%；花斑区尺寸大于150 μm渗碳体占比仅为2%，正常区尺寸大于150 μm渗碳体占比为26%。渗碳体尺寸和局部基体相大小直接关联。结合上文中局部基体相大小与氧化物的分布，氧化程度和局部基体相大小的正向关系，正常区更易氧化为较大块区域。因为氧化程度的差异，导致正常区较为暗淡，而花斑区更亮。两个区域的氧化模式接近，组织中的关键差异是渗碳体尺寸与分布，导致氧化程度的区别，从而造成视觉上的差异。

统计了金相照片两个区域中的基体相、渗碳体相和石墨相比例，如表1所示。结果表明花斑区的渗碳体比例高于正常区，其他两相低于正常区的含量。

3 结论

(1) 花斑产生的原因和试样表面氧化物的形成相关，在花斑区氧化物少，且面积较小；在正常区会存在较多、较大的氧化物。

(2) 试样的氧化程度和渗碳体相尺寸、基体相局部大小正向相关。花斑区组织细小，花斑区尺寸大于100 μm的渗碳体占比不足30%，正常区尺寸大于100 μm的渗碳体占比接近80%。正常区氧化程度高，视觉效果更为暗淡。花斑区和正常区组织的氧化程度差异造成了花斑现象。

(3) 花斑区的石墨相面积占比略低，渗碳体相面积占比略高；正常区的基体相面积占比高。

(4) 石墨相和渗碳体相的形成过程，渗碳体组织差异的形成原因是理解、解决花斑问题的关键；应当结合实际生产条件来保证组织的均匀性，预防或者降低花斑的产生，是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 张银海, 王振京, 李华芳. 离心轧辊灰斑缺陷的原因分析与控制 [J]. 铸造技术, 2006 (5): 532-533.
- [2] WU S A, XING W B, LIU Y C, et al. Research on dynamic characteristics and identification method of local defect on the roll surface [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105063.
- [3] 张杰, 刘宇, 李红宇. 高铬铸铁离心轧辊裂纹和软点原因分析 [J]. 铸造, 2015, 64 (9): 909-912.
- [4] OMORI S, HINO H, GOTO H. Characteristic phenomena observed during rolling by pair crossed mill [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1994, 21 (6): 465-471.
- [5] KATO O, YAMAMOTO H, ATAKA M, et al. Mechanisms of surface deterioration of roll for hot strip rolling [J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 1992, 32 (11): 1216-1220.
- [6] 李济玉. 离心轧辊在中轧机组上的推广应用 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (2): 196-200.
- [7] 张晓波. 八钢中厚板成品下表面亮斑分析及措施 [J]. 新疆钢铁, 2016 (4): 26-28.
- [8] HUANG Z, WU J, XIE F. Automatic surface defect segmentation for hot-rolled steel strip using depth-wise separable U-shape network [J]. Materials Letters, 2021, 301: 130271.
- [9] 扎世利. 关于离心轧辊辊身亮斑问题的探讨 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (9): 1165-1167.
- [10] 幸泽欣. 提高毛化辊表面质量一次合格率的生产实践 [J]. 现代冶金, 2020, 48 (4): 58-59.
- [11] 姚建新. 冷轧毛化辊表面缺陷分析及改进 [J]. 冶金设备, 2019 (4): 78-80.
- [12] 卢焱飞, 胥建平, 幸泽欣, 等. 冷轧毛化辊表面缺陷原因分析及改进措施 [J]. 四川冶金, 2020, 42 (3): 51-54.
- [13] 符寒光, 弭尚林, 邢建东, 等. 离心铸造高速钢轧辊偏析控制技术研究 [J]. 铸造, 2005 (4): 386-390.
- [14] RYU J H, KWON O, LEE P J, et al. Evaluation of the finishing roll surface deterioration at hot strip mill [J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 1992, 32 (11): 1221-1223.
- [15] DROBNE M, KLANNIK U, FAJFAR P, et al. Role of oxidation and microstructure constituents on high chromium steel work roll surface degradation [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 186-192.
- [16] 李钢. 离心轧辊毛坯浇铸过程中的温度监测及温度查询方法 [J]. 自动化技术与应用, 2008, 159 (9): 107-109.
- [17] 张银海, 王振京, 张兆龙. 离心轧辊工作层厚度均匀性的质量控制 [J]. 热加工工艺 (铸锻版), 2006 (5): 90-91.
- [18] 谢世强. 离心轧辊结合层质量控制 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2008 (S1): 71-72.
- [19] 高玉章, 盛强, 曹瑞荣. 高速钢轧辊铸造工艺的优化 [J]. 铸造, 2015, 64 (9): 905-912.

Analysis of the Causes for the Formation of Centrifugal Roll Piebald Problem

FANG Wei^{1,2}, ZHANG Jin-fei¹, LÜ Ji-wei¹, LIU Jie-bing^{3,4}, ZHAO Li-bo^{3,4}, CHEN Xing-fu^{3,4}, XIAO Zhi-xia^{1,2}, FENG Jian-hang^{1,2}, YIN Fu-xing^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Material Laminating Composite and Interface Control Technology, Tianjin 300132, China; 3. Hebei Plate and Belt Roll Industrial Technology Research Institute, Xingtai 054009, Hebei, China; 4. Hebei Roller Green Manufacturing Technology Innovation Center, Xingtai 054009, Hebei, China)

Abstract:

In view of the piebald defects in the use of rolls, optical microscope and electron probe micro-analysis were used to perform the microstructure observation and regional element distribution in the piebald and normal areas, and the quantitative analysis of microstructure was carried out, then the causes of the piebald formation of rolls were discussed. The results show that the generation of speckles is related to the oxidation degree of roll surface, and the oxidation degree is closely related to local cementites size. Compared with the normal area, the microstructure in the piebald area is finer, and the percentage of cementites size more than 100 μm in the piebald area is less than 30%, while that in the normal area is close to 80%. The microstructure difference causes that the normal area is easier to be observed by naked eyes after oxidation, and the color is darker. However, the oxidation in the spotted area is scattered, and no large oxidized area is formed. Owing to the difference of oxidation degree in these two areas, the piebald phenomena are observed. The analysis of the causes of piebald phenomenon is beneficial to the design and optimization of the preparation process of centrifugal roll in the next step, so as to obtain uniform structure and improve the speckle problem.

Key words:

roller; piebald phenomena; microstructure; oxidation; electronic probe; composition distribution