



8620系齿轮钢300 mm × 340 mm铸坯宏观偏析改善

葛洪硕¹, 任一峰², 张广军¹

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司连铸技术中心, 江阴 214400;

2 江阴兴澄特种钢铁有限公司工艺研究所, 江阴 214400)

摘要:通过使用拉矫机在铸坯凝固前沿压出的点状裂纹推算出8620系齿轮钢($\%:0.18 \sim 0.24\text{C}, 0.18 \sim 0.32\text{Si}, 0.65 \sim 1.0\text{Mn}, 0.45 \sim 0.55\text{Cr}, 0.50 \sim 0.80\text{Ni}, 0.15 \sim 0.25\text{Mo}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.020\text{S}$)300 mm × 340 mm连铸坯经过每一台拉矫机处铸坯的坯壳厚度(点状裂纹法),以此数据代入并校准铸坯凝固模型,计算出铸坯中心固相率,并设计压下量参数,采用第5、6、7、8共4台拉矫机进行压下,压下量分别为2、3、5、4 mm,总压下量共14 mm,试验后,在铸坯和轧材试样上钻孔进行碳硫分析。结果显示,和未经轻压下的铸坯相比,8620系齿轮钢铸坯碳偏析指数0.97~1.03的比例由原工艺的83.5%提升至94.2%,轧材碳偏析指数0.97~1.03的比例由原工艺的91.5%提升至98.8%,低倍试样原位分析致密度由0.899 9提升至0.976 9,疏松度由0.100 3降低至0.017 8,铸坯成分偏析和致密度有所改善。

关键词:8620系齿轮钢;轻压下;点状裂纹法;宏观偏析

DOI:10.20057/j.1003-8620.2022-00171

Improvement of Macro-Segregation of 8620 Series Gear Steel 300 mm × 340 mm Casting Bloom

Ge Hongshuo¹, Ren Yifeng², Zhang Guangjun¹

(1 CC Technology Center, Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214400;

2 Technology Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214400)

Abstract: The thickness of the shell of the 300 mm × 340 mm continuous casting billet of 8620 series gear steel ($\%:0.18 - 0.24\text{C}, 0.18 - 0.32\text{Si}, 0.65 - 1.0\text{Mn}, 0.45 - 0.55\text{Cr}, 0.50 - 0.80\text{Ni}, 0.15 - 0.25\text{Mo}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.020\text{S}$) at the place of each tension leveler (point crack method), is calculated by using the point crack pressed on the solidifying front of the casting blank by tension leveler, and then the solid phase ratio of the bloom is calculated by substituting the calibration model with the data, to design the pressure reduction. The total 4 tension levelers of 5 th, 6 th, 7 th and 8 th are used to press down, with pressure reduction 2 mm-3 mm-5 mm-4 mm respectively, and total pressure reduction is 14 mm. After experiment, the carbon-sulfur analysis is carried out by drilling holes in the bloom and rolled material samples. The results show that, comparing to the cast billet without light pressure, the ratio of carbon segregation index 0.97-1.03 of gear steel 8620 CC bloom increases from original 83.5% to 94.2%, and the ratio of carbon segregation index of rolled steel increases from original 91.5% to 98.8%, in situ analysis density of macro structure test piece increase from 0.899 9 to 0.976 9, porosity decreases from 0.100 3 to 0.017 8, and the composition segregation and density of casting billet improve

Key Words: 8620 Series Gear Steel; Soft Reduction; Point Crack Method; Macro-Segregation

随着我国装备制造业的迅速发展,对高品质齿轮钢的需求不断增加,影响齿轮钢性能的主要因素之一是横截面成分偏析,连铸坯的偏析缺陷会遗留到轧材,从而影响齿轮钢产品的各种应用性能。在连铸坯凝固过程中,通过控制连铸拉速与比水量,采用电磁搅拌等一系列手段抑制柱状晶发展,促进等轴晶区域扩大,使齿轮钢偏析的改善达到较好水平。但是,如何进一步改善偏析成为行业的瓶颈,投入大,但取得的效果却不明显。

本文通过点状裂纹法校准连铸凝固模型,然后设计轻压下参数,最终通过原位分析和铸坯、轧材钻屑碳硫检测等综合对比评价,证明采用轻压下工艺和不经轻压下工艺相比,铸坯、轧材的偏析改善明显,质量明显提升。

1 试验材料及方法

试验钢种为SAE8620齿轮钢,SAE8620钢是根据美国ASTM A29/A29M-04标准生产的产品^[1]。其化学成分见表1,生产工艺为:100 t超高功率电弧炉

表 1 SAE8620H 齿轮钢的化学成分(质量分数)
Tab. 1 Chemical composition of SAE8620H gear steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	%
0.18 ~ 0.24	0.18 ~ 0.32	0.65 ~ 1.0	≤0.025	≤0.02	0.45 ~ 0.55	0.50 ~ 0.80	0.15 ~ 0.25	

(UHP)→100 t 二次精炼炉(LF)→100 t 真空脱气炉(VD)→氩气软吹→R12 五机五流大断面连铸机(300 mm×340 mm)→轧制。

1.1 点状裂纹法

在长期跟踪方坯纵剖低倍的过程中,发现靠近方坯内弧有许多微小点状裂纹,并且呈现一定的分布规律,一般不超过 2 mm,偶而也会出现较长裂纹。推断这些裂纹是在铸坯经过拉矫辊时,铸坯凝固前沿在拉矫辊压力作用下产生变形并开裂,从而形成的轻压下裂纹。这些裂纹位置可以用于判断经过每台拉矫机时铸坯的坯壳厚度,该方法称为“点状裂纹法”,可用于凝固模型的数据校准。

裂纹一般在零塑性温度(ZDT)和零强度温度(ZST)区间内产生。当在零强度温度和零塑性温度之间的应变总量超过临界应变时,无论是连续的还是间断的,内部裂纹都会发生并扩展。根据这一结果,可以得出连铸坯内部裂纹形成的条件应由各辊施加的零强度温度和零塑性温度之间的总应变来评价^[2],在零塑性温度产生的点状裂纹往往在一条直线上,由此归纳出“点状裂纹法”,具体方法如图 1 所示。零塑性温度与固相线温度基本接近,该直线到铸坯内弧表面垂直距离可视为是此台拉矫机处铸坯的坯壳厚度,因此,理论上起到压下作用的拉矫机台数与能通过点状裂纹法画出的直线数量相等,现实中由于某些拉矫机压力较小,点状裂纹很模糊,很难画出对应的直线。同理,零强度温度附近也会产生裂纹,不过比较浅,本文不做深究。

1.2 轻压下试验

1.2.1 模型校准

通过 FOXPRO 软件,使用差分法构建连铸凝固模型^[3]。

本模型假设条件:

(1)忽略沿着铸坯拉浇方向的传热(3%~6%),温度变化主要考虑厚度和宽度方向的二维传热;

(2)忽略由于连铸坯凝固冷却收缩而引起的尺寸变化;

(3)默认为二冷区内同一冷却区的水量分布均匀,连铸坯同一冷却段均匀冷却,这是理想条件,实

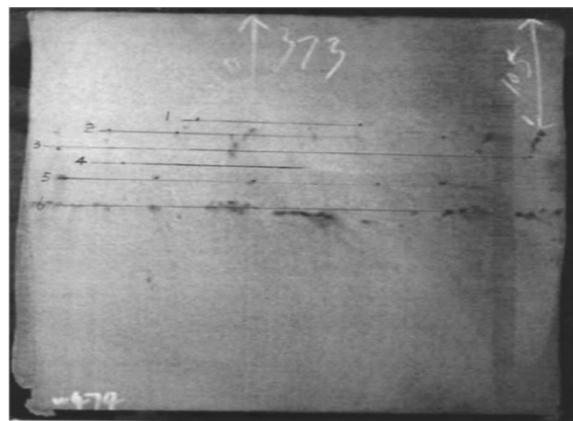


图 1 点状裂纹法在铸坯纵剖低倍的应用

Fig. 1 Application of point crack method at longitudinal macro structure of casting bloom

际上由于工装条件,无法完全达到均匀;

(4)将固液两相区的比热容用等效比热容代替;

(5)铸坯内固液两相区和液相区的对流传热分别用等效导热系数代替;

(6)将夹棍传热、水滴沿内弧表面浸渍等二冷传热影响因素统一计入二冷综合传热系数中。

将钢种的物性参数和工艺参数代入模型模拟连铸凝固过程,通过上述点状裂纹法可以读出每台拉矫机处的坯壳厚度。根据铸坯多台拉矫机处的坯壳厚度调整模型的参数校准模型。同时,用实际测量铸坯表面及中心的温度来辅助校准模型。实际测量的温度与模型计算的温度差应低于 20 °C。若是相差超过 20 °C,说明模型模拟的结果不准确,需要进一步调整模型参数。经过校准后的模型可以更准确的模拟连铸凝固过程。

1.2.2 轻压下参数设计

压下参数若是设计不合理会导致较重的铸坯内裂,严重时导致铸坯报废。因此,采用轻压下要注意压下量分布的合理性。

近年来,许多作者^[4-8]研究轻压下对铸坯液芯流动以及溶质再分配的影响,研究发现中心固相率在 0.3~0.75,轻压下的压下区间越宽,其改善偏析效果越好。假如同样是从第 2 台拉矫机处开始压下,其中心固相率为 0.3,依次往后,第 5 台拉矫机处中

心固相率为0.6,第6台拉矫机处中心固相率为0.8,改善偏析的有效区间在0.3~0.6;若是第5台拉矫机处中心固相率为0.75,第6台拉矫机处中心固相率为0.9,改善偏析的有效区间在0.3~0.75。

采用经“点状裂纹法”所得数据校准后的模型得到每台拉矫机处铸坯的中心固相率,综合考虑该钢种的塑性,最终设定采用第5、6、7、8共4台拉矫机进行压下,压下量分别为2、3、5、4 mm,共14 mm。

1.3 原位分析检测

原位分析技术可对各元素在材料中不同含量所占的原位权重比率进行快速有效的分析,是材料及工艺研究中一种反应材料内在质量的新判据方法。通过原位分析仪可以达到以下目标:

(1) 观察到各元素在扫描区域内不同坐标(X,Y)所对应的元素含量分布;

(2) 用不同颜色或灰度表征其含量与位置对应关系;

(3) 实现元素最大偏析度的准确定位及定量分析。

由于该铸坯试样比较大,无法整体进行分析,将试样按图2切成9片,编号为1~9,每片试样分别做原位检测,将检测结果按原方位拼在一起。由于原位检测设备的固有缺陷,试样边界有检测盲区,如图3所示。



图2 300 mm×340 mm铸坯试样切割示意图

Fig. 2 Cutting-off schematic diagram of steel sample of 300 mm×340 mm casting bloom

1.4 铸坯和轧材钻孔碳硫分析

为了对比轻压下和未轻压下铸坯的元素偏析,采用Φ6 mm的钻头对铸坯横向低倍进行钻孔取样,沿铸坯横向低倍中心呈“米”字形钻孔取样,如图4所示,相邻点间隔15 mm,内外弧方向取点共计19

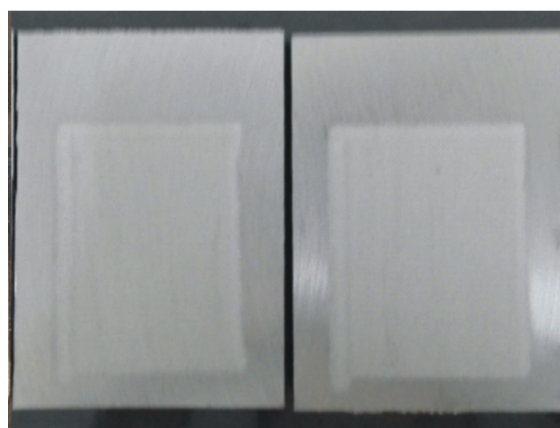


图3 原位检测后的试样形貌

Fig. 3 Morphology of sample after in situ detection

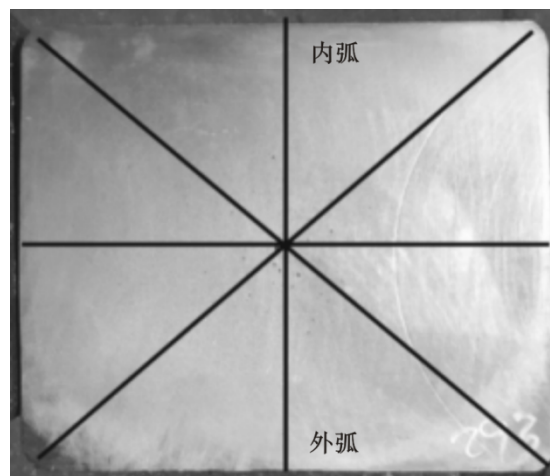


图4 300 mm×340 mm连铸坯横断面钻孔取样位置示意图
Fig. 4 Schematics diagram of drilling for sampling at cross section of 300 mm×340 mm casting bloom

点,横向共计23点,沿着对角线钻点取屑,共计58点。铸坯几何中心一般疏松相对严重,可以多取几点做平均值计算。

采用碳硫分析仪检测C、S元素含量,然后计算各元素平均含量和偏析指数。铸坯偏析指数 R_i 的计算公式为:

$$R_i = C_i / C_0 \quad (1)$$

式中: C_i 该位置的碳元素含量/%; C_0 所有检测位置的元素平均值^[9],选取的铸坯截面为300 mm×340 mm断面。

同理,对轧材钻孔做碳硫,由于轧材规格相对较小,不方便取多点,可以使用5 mm钻头仅在轧材中心进行钻孔,如图5所示,每个轧批号至少取6个试样,且从不同支轧材上切取。

轧材偏析指数 R_i 的计算方法为:

$$R_1 = C_1 / C_{熔} \quad (2)$$

式中： C_1 该轧材中心位置的碳元素含量/%； $C_{熔}$ 该炉号熔炼 C 检测值。

2 试验结果与讨论

2.1 连铸坯和轧材低倍对比

试验完成后,首先取样做低倍,包括横向低倍和纵剖低倍。对比轻压下效果,一般选取纵剖低倍。横向低倍仅能反映某一截面的状况,纵剖低倍能够反应连铸坯拉浇方向某一段长度的铸坯状况。轻压下工艺试样如图 5(a)所示,通过测量铸坯厚度可知,压下 14 mm 基本执行到位,低倍存在轻微轻压下裂纹,中心较好。根据以往经验可知,轻微的轻压下裂纹经过轧制会消失,不会遗留到轧材。原工艺(即未采用轻压下工艺)试样如图 5(b)所示,无轻压下裂纹,中心小缩孔较多。轻压下工艺能够打碎“晶桥”,通过施加机械力,将已“搭桥”的树枝晶破碎,改变周期出现的“小钢锭”结构,保证铸坯上端钢液可以自由补充到下端^[10]。因此缩孔出现的比例大幅降低。

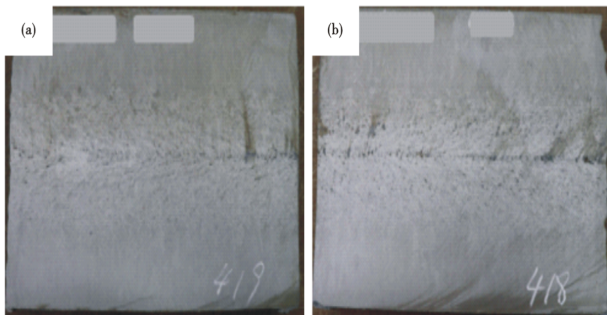


图 5 轻压下工艺(a)与未轻压下(b)的 300 mm × 340 mm 铸坯纵向低倍组织对比
Fig. 5 Comparison of the longitudinal microstructure of 300 mm × 340 mm casting billet under light pressure (a) and original process (b)

轧材低倍取样,试验工艺与原工艺分别选取试样 9 块,且从不同轧材上切取,轧材取样规格一致。轻压下工艺轧材如图 6 所示,中心不存在黑心,低倍组织较好,铸坯的压下裂纹没有遗留到轧材,为了确保轧材质量,所有轧材经过超声探伤,证明经过轧制,轻压下的铸坯裂纹已经被轧合。而原工艺轧材存在黑心,表明该处偏析较重。

综上所述,通过低倍对比,轻压下工艺优于原工艺,显著改善铸坯的偏析。

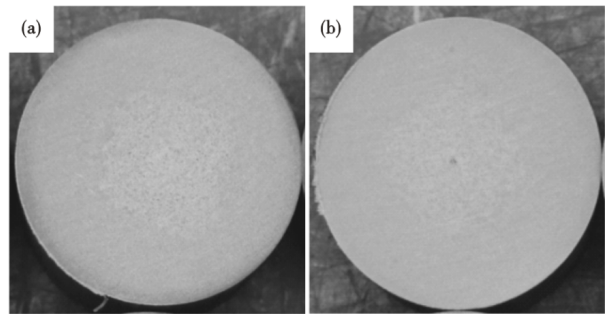


图 6 轻压下工艺(a)与未轻压下(b)的 Φ70 mm 轧材横向低倍组织对比
Fig. 6 Comparison of transverse low-magnification microstructure of Φ70 mm rolled by light pressing process (a) and original process (b)

2.2 原位检测对比

根据切片编号,把所有试样原位检测结果拼成一个整体。原位检测整体效果如图 7 所示。

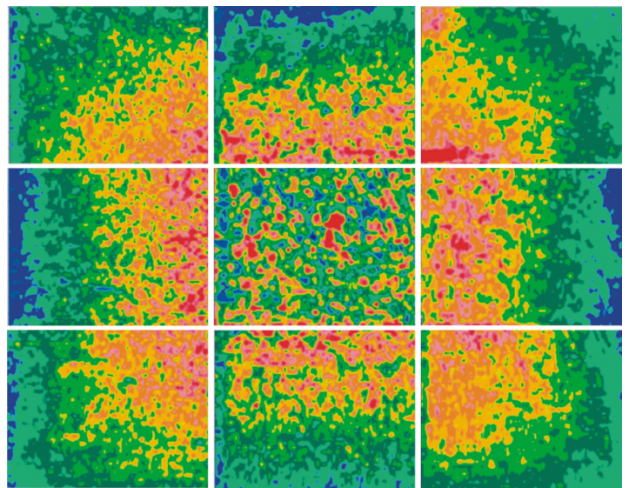


图 7 拼接后的原位检测图
Fig. 7 Result after joining together by Original Position Analyzer

在原位分析检测方法中,致密度分析单次放电位置的基体元素(Fe)通道的强度所代表的表观致密度的统计平均值定量表征材料的致密性。理论上致密度 1~0,理想值为 1。

材料各位置表观致密度统计分布中位值的 95% 置信区间为 $(D_2 - D_1)$; 统计疏松度 P_r :

$$P_r = Z / D_0 \quad (3)$$

式中： $Z = (C_2 - C_1) / 2$, 某元素在材料各位置含量统计分布中位值的 95% 置信区间为 $[C_1, C_2]$; D_0 为表观致密度统计分布的中位值。

统计疏松度 P_r 数值越大,疏松越严重;最高

100%,最低趋于0。

通过原位分析检测结果可知,轻压下工艺试样致密度0.976 9,疏松度0.017 8。原工艺试样致密度0.899 9,疏松度0.100 3。轻压下工艺不仅能够改善铸坯偏析,也能够改善疏松。这是由于轻压下产生的挤压作用还可以促进铸坯中心富集溶质元素的钢液沿拉坯方向反向流动,使溶质元素在钢液中重新再分配,从而使铸坯中心的凝固组织更加均匀致密。

2.3 碳偏指数对比

将轻压下工艺连铸坯试样和原工艺铸坯试样的碳硫检测结果使用minitab软件进行统计分析,每块试样61点,共计122点,两种工艺检测结果如图8所示。轻压下工艺铸坯碳偏析指数0.97~1.03的比例为93.4%,原工艺为83.6%;轻压下工艺轧材中心碳偏析指数0.97~1.03的比例为98.8%,原工艺比例为91.5%。使用轻压下工艺明显改善了铸坯和轧材偏析水平。

3 结论

(1) 8620系齿轮钢300 mm × 340 mm连铸坯在

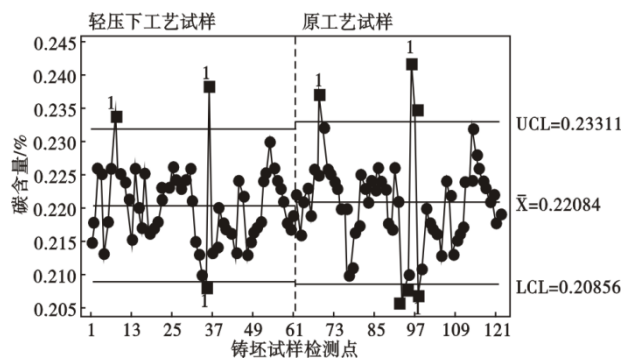


图8 轻压下工艺试样和原工艺试样检测结果

Fig. 8 The test result of sample by soft reduction process and original process

原工艺基础上通过使用点状裂纹法判断经过每一台拉矫机处铸坯的坯壳厚度,以此数据代入并校准模型,计算出铸坯中心固相率,设计压下量分别为2、3、5、4 mm,总压下量共14 mm,开展生产试验,8620系齿轮钢铸坯碳偏析指数0.97~1.03的比例由原工艺的83.6%提升至93.4%;轧材碳偏析指数0.97~1.03的比例从原工艺的91.5%提升至98.8%。

(2) 采用轻压下工艺,不仅改善齿轮钢铸坯的偏析水平,还能够改善其疏松水平。

参考文献

- [1] 寻忠忠,李成良,李祥龙,等. 齿轮轴用SAE8620热轧盘条的开发[J]. 连铸,2019,44(3):39-43.
- [2] A. Yamanaka, K. Nakajima, K. Okamura. Critical strain for internal crack formation in continuous casting. [J]. Ironmaking and Steelmaking. 1995.
- [3] 胡燕. 连铸板坯凝固传热数学模型的研究与运用[D]. 重庆大学. 硕士学位论文,2005.
- [4] 马长文,沈厚发,黄天佑. 方坯连铸中心偏析的数值模拟[J]. 铸造,2004,53(8):617-620.
- [5] 马长文,沈厚发,黄天佑. 板坯凝固末端轻压下流动与溶质分布的研究[J]. 铸造,2004,53(12):1023-1027.
- [6] 曾杰,陈伟庆. 高碳钢矩形坯轻压下中心负偏析形成机理[J]. 钢铁研究学报,2016,28(3):51-53.
- [7] 侯自兵,成国光,饶添荣. 连铸板坯中心线偏析形成机制与轻压下技术[J]. 钢铁,2011,46(11):45-48,60.
- [8] 蔡兆镇,朱苗勇. 钢凝固两相区溶质元素的微观偏析及其对连铸坯表面纵裂纹的影响[J]. 金属学报,2009,45(8):949-955
- [9] 刘勇,高鹏. 8620系齿轮钢300 mm × 360 mm连铸坯宏观偏析改善的工艺实践[J]. 特殊钢. 2018,39(6):43-46.
- [10] 刘伟. 大方坯轻压下与动态控制研究[D]. 北京:钢铁研究院. 博士学位论文,2009.