

· 组织和性能 ·

GCr15 轴承钢 $\Phi 380$ mm 连铸圆坯 V-偏析的宏观与微观形貌分析

黄拓¹ 任金朝^{1,2} 马忠伟¹ 王明林¹ 张慧¹

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081;2 辽宁科技大学冶金与材料学院,鞍山 114051)

摘要 研究了 GCr15 轴承钢 $\Phi 380$ mm 连铸坯纵、横截面 V-偏析的分布,以及 V-偏析带的组织形貌。结果表明,V-偏析产生于铸坯中心等轴晶区,以铸坯中心线对称分布,各纵截面偏析带之间相互平行;横截面 V-偏析形貌与切割位置相关,呈同心圆分布;V-偏析带存在大量液析碳化物,是引起严重偏析的重要原因。

关键词 GCr15 轴承钢 连铸圆坯 V-偏析 形貌和分布 液析碳化物

An Analysis on Morphology of Macro and Micro Structure of V-Segregation in $\Phi 380$ mm Continuous Casting Bloom of Bearing Steel GCr15

Huang Tuo¹, Ren Jinzhao^{1,2}, Ma Zhongwei¹, Wang Minglin¹ and Zhang Hui¹

(1 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 School of Metallurgy and Material, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract The distribution of V-segregation at longitudinal and cross section of $\Phi 380$ mm continuous casting bloom of bearing steel GCr15 and the structure morphology of V-segregation band have been studied. Results show that the V-segregation forms in central equiaxial crystal zone by symmetrical about centre line of casting bloom and the segregation bands are parallel each another at longitudinal section; and the morphology of V-segregation bands at cross section is related with cutting location which presents with concentric distribution; there is lots of liquation carbonide in V-segregation band that is an important factor to form serious segregation.

Material Index GCr15 Bearing Steel, Round Continuous Casting Bloom, V-Segregation, Morphology and Distribution, Liquation Carbonide

高质量连铸坯是生产优质钢的基础,金属凝固过程中核心问题有 3 个:夹杂物、偏析、裂纹,这些缺陷的形成与冶炼、浇注和凝固过程密切相关^[1-3]。避免钢中夹杂物的产生可以通过优化精炼、增加夹杂物上浮时间加以解决;中心偏析现象对大断面连铸坯影响严重,在特殊钢实际生产中,特别是高碳钢,V-偏析区的碳偏析指数甚至可以达到 1.5 以上,它是造成液析碳化物和带状碳化物缺陷的根本原因^[4-6]。目前大断面连铸坯多是采用铸轧工艺进行解决,但国内一些企业即使采用铸轧工艺也未能解决问题,只是减轻了 V-偏析缺陷的程度^[7];裂纹形成方面,大断面连铸坯的裂纹主要是 V-偏析裂纹和为了改善 V-偏析所造成的铸轧裂纹。中心裂纹在轧制中不能焊合,作为钢板分层或超声波探伤缺陷而残留在产品中,是产生不良品的重要原因^[8]。

1 试验钢的生产条件及分析方法

1.1 试验钢的生产条件

本次试验钢种采用国内钢厂生产的 GCr15 轴

承钢,流程为 BOF→LF 精炼→RH 真空处理→380 mm 圆坯连铸机;连铸设备为 6 机 6 流弧形连铸机,弧半径 14 m,拉速为 0.43 m/min。表 1 为 GCr15 钢的化学成分,表 2 是轴承钢连铸生产工艺参数。

1.2 试样分析方法

取长 300 mm,直径 380 mm 的圆形连铸坯,在铸坯头尾两处横向上切出两块厚度 10 mm 的薄片,如图 1(a)所示,剩余圆坯长 280 mm,过圆坯中心线沿着直径方向进行纵向切割。由于纵向样尺寸过大,将两侧各切去 90 mm,只留下中心 200 mm,观察纵向上 V-偏析的分布。为了研究 C 元素在径向上的偏析分布规律,纵向样按照图 1(b)所示,在距离顶部 40 mm 处,将 200 mm 宽的纵向样等距离切割为 10 个 20 mm 宽度的试样,并按照由左至右的顺序依次标号 1~10,进行组织观察。

表 1 GCr15 轴承钢的化学成分 / %
Table 1 Analysis of bearing steel GCr15 / %

C	Si	Mn	Cr	P	S
1.02	0.26	0.38	1.51	0.015	0.020

表2 GCr15 轴承钢连铸坯的生产工艺参数

Table 2 Production process parameters for casting bloom of bearing steel GCr15

中间包温度/ ℃	过热度/ ℃	结晶器高度/ mm	进出口水温差/ ℃	末端轻压下	末端电磁搅拌	水流量/(L·min ⁻¹)		
						结晶器	二冷水一段	二冷水二段
1481	21	780	2.9	无	425 A/ 9 Hz	2992	50	44

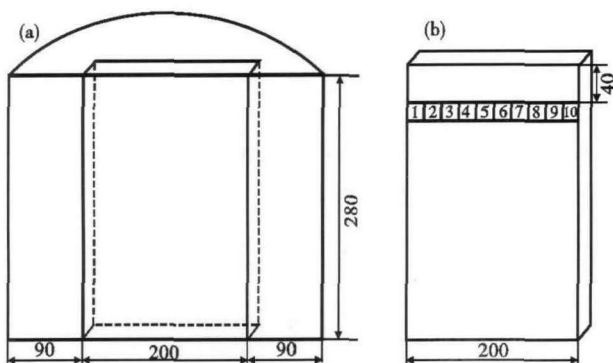


图1 GCr15 轴承钢连铸圆坯取样示意图

Fig.1 Schematics of sampling of bearing steel GCr15 casting round bloom

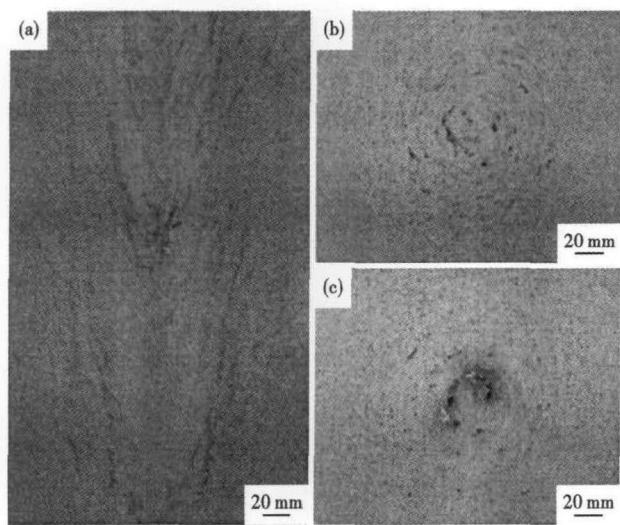


图2 GCr15 轴承钢连铸圆坯 V-偏析纵截面(a)和横截面1(b),2(c)的低倍形貌

Fig.2 Macro-morphology of V-segregation of bearing steel GCr15 round casting bloom at longitudinal section (a), cross section 1 (b) and 2 (c)

2 试验结果

2.1 V-偏析的宏观形貌

图2(a)是200 mm × 280 mm 的纵截面,图2(b, c)是厚度为10 mm 的横向切片,分别对应铸坯顶部、底部所在横截面。

由图2可以看出,纵向上,在中心区域有两个明显的黑色“V”型偏析带,沿铸坯中心线左右基本对

称;在每个V-偏析带内,分布着多个“V”字型偏析,共同组成V-偏析带;横向上,V-偏析表现为一组不连续的同心圆,圆心位于铸坯横截面的几何中心。但是,横向上形貌通常差异较大,主要表现为同心圆的个数上,图2(b)(c)相比,同心圆范围更大、个数更多。

2.2 V-偏析带内部的微观形貌

图3是图1(b)中7#试样V-偏析带的内部微观形貌。由图3(a)可以看到,V-偏析条带经过7#试样,且在7#试样表面有明显的2处偏析带区域。现以7#试样下方偏析带作为研究对象,研究V-偏析带在金相显微镜下的内部形貌。

图3(b)是金相显微镜下V-偏析带的放大图,可以看到,在主偏析带附近,有许多白亮的碳化物液析存在,形成黑白相间的碳化物条带组织。其中,碳化物液析成细条状,长度几百个微米,分布致密,方向主要与V-偏析带垂直;图3(c,d)分别是液析碳化物局部放大照片,由图3(d)可以明显地看出,被包围的液析碳化物与周围组织形貌明显不同,其凝固时间相对较晚,凝固组织粗大,嵌入在晶间,严重影响组织的均一性。

2.3 V-偏析带的碳元素偏析

图4给出了按图1(b)所切取的1#~10#试样的低倍酸浸图。利用光谱分析的方法,图5绘制了碳元素含量、碳偏析比在径向上的分布曲线图。

由图5(a)可以看出,C含量的整体分布呈中间

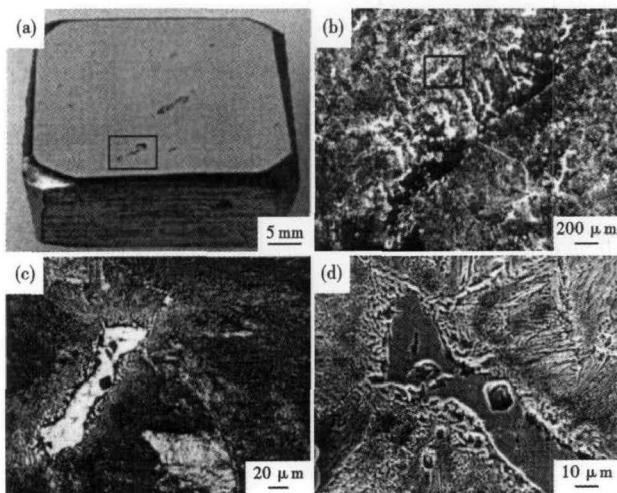


图3 GCr15 轴承钢连铸圆坯横截面 V-偏析带组织形貌: (a)宏观;(b)×50;(c)×500;(d)×1000

Fig.3 Structure morphology of V-segregation band of bearing steel GCr15 round casting bloom at cross section: (a) macro; (b) ×50; (c) ×500; (d) ×1000

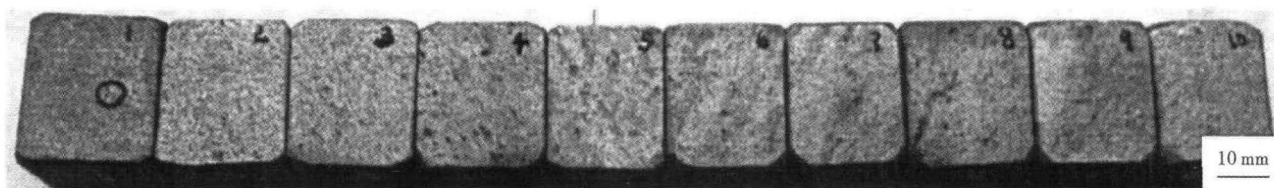


图 4 图 1(b)中 GCr15 轴承钢圆铸坯试样 1[#]至 10[#]的低倍酸浸组织形貌

Fig. 4 Morphology of macro-etching structure of bearing steel GCr15 round casting bloom specimen 1[#] to 10[#] in Fig. 1 (b)

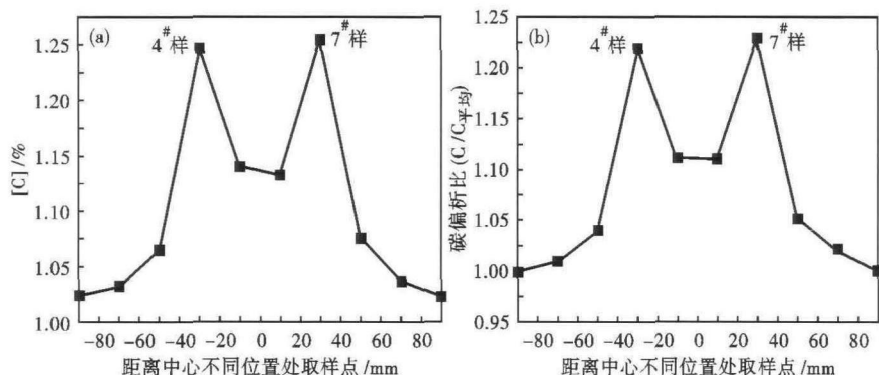


图 5 碳含量(a)和碳偏析比(b)在 GCr15 轴承钢连铸圆坯直径上的分布曲线

Fig. 5 Distribution of carbon content (a) and carbon segregation ratio (b) along diameter of bearing steel GCr15 round casting bloom

大两边小的趋势,但并不是在中心处达到最大,而是在距离中心 -30,30 mm 处(4[#]、7[#]试样)到达顶峰,整体上 C 元素分布呈“M”型分布。由图 5(b)可以看到,碳元素最大偏析比达到 1.23,最小偏析比 1.0,这说明在整个等轴晶区域内,碳元素始终为正偏析。但这种碳偏析在等轴晶内的分布并不是均匀的,而是在局部位置处偏析严重,偏析比很大。对照图 4,偏析严重区正好位于 V-偏析带区域,液析碳化物的大量析出是偏析严重的重要原因。

3 偏析带的分析与讨论

3.1 纵向形貌上 V-偏析的规律及分析

如图 6 所示,为寻找规律,方便观察,在图 6(a)的基础上,将各个黑色偏析条带用实线连接起来,组成图 6(b),其中竖线是铸坯纵截面中心线。可以看出,偏析条带是由多个“V”字上下交织、嵌套在一起组成,各个“V”字之间相互平行。如果单个地去研究每一个“V”字,发现在纵截面上,“V”字并不是连续的,而是由一条条断续的直线组成;现就 GCr15 钢种纵截面 V-偏析的尺寸参数信息加以测量,测量结果为:

- ①整个纵截面上 V-偏析以中心线基本对称;
- ②V-偏析线之间是相互平行,V-偏析线与铸坯中心线的夹角为 15.9°;
- ③纵截面上有 2 个明显偏析带,相距 138 mm,各偏析带周围由多个“V”字共同组成。

在凝固初期,形成激冷层后,随着柱状晶的不断生长,枝晶的凝固由外向内呈平面式推进,受溶质分配比的影响,液相前沿的溶质含量总是大于固相;与此同时,中心液相一方面溶质不断富集,另一方面液相过热度逐渐消失,当过热度为 0 时或者有一定的过冷度时,与平面式逐渐推进凝固不同,整个液相区同时凝固,中心液相在整个体积范围内凝固。当

等轴晶区固相率较高时,在凝固收缩的作用下,等轴晶间残存的低熔点液相流入中心疏松区。一方面冲刷已凝固枝晶,形成枝晶重熔,另一方面偏析带由于热的富集溶质的冲刷不断扩散,形成一个富集溶质的偏析带,最终形成 V-偏析带。

3.2 横向形貌与切割位置的关系

以前的研究结果发现,V-偏析在横截面上的分布与切割位置有关。在不同的切割位置处,同心圆的区域大小及个数有较大区别。V-偏析在空间上的分布可以看作是纵截面绕着中心线的旋转,将纵截面 V 型条带绕着中心线在整个空间内旋转 360°,形

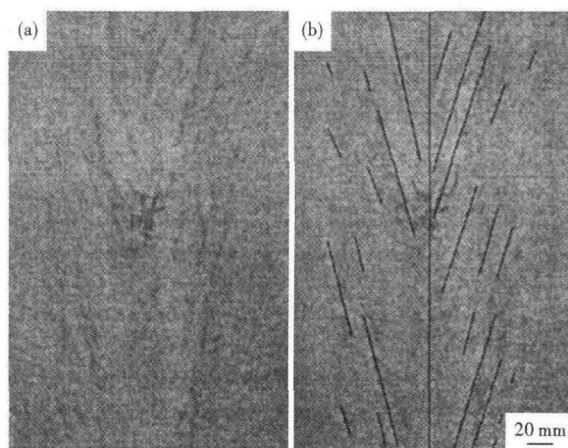


图 6 GCr15 轴承钢连铸圆坯 V-偏析的纵向形貌

Fig. 6 Morphology of V-segregation of bearing steel GCr15 round casting bloom at longitudinal section

成一个圆锥体,那么横截面可以看作是对该锥体横向切割。如图 2(b)处于锥体上部的密集区,在多条 V 字穿过这个截面,反映在横截面上是形成较大同心圆区域以及较多的同心圆个数;而图 2(c)处于锥体的根部,横向上宽度较窄,如果在此处对铸坯进行横向切割,则仅仅有一簇辐射状射线穿过该面,形成一个圆。

由于凝固过程中缩孔集中在铸坯中心,因此在横截面上形成了图 2(c)的结果。

3.3 液析碳化物形成原因

金相显微镜观察 V-偏析带周围存在大量白色液析碳化物,这些液析碳化物硬度很高,严重影响轴承钢的使用性能。大颗粒液析碳化物主要由含铬的渗碳体 (Fe,Cr)₃C 组成,此外还存在少量的 (Fe,Cr)₇C₃碳化物。在 GCr15 轴承钢凝固过程中,由于碳和铬的含量高,这种含铬碳化物很容易形成。特别是在树枝晶之间,最后凝固的残液中,碳、铬的富集程度很高,当达到共晶浓度时,它将以共晶结晶的方式形成大块的共晶碳化物,通常把这种共晶碳化物称为液析碳化物。如果液析碳化物处于表面层,则容易剥落成为磨损的起源,降低轴承钢零件的耐磨性;而内部的液析碳化物和脆性夹杂物一样,降低轴承零件的疲劳性能。目前,液析碳化物的减少主要依靠后期热处理的方法解决,即提高连铸坯加热温度、增加高温保温时间。

4 结论

(1)GCr15 钢 Φ380 mm 铸坯纵向上 V-偏析以中心线为对称轴基本对称,各个 V-偏析带之间相互

平行,V 字并不是连续的,而是由一条条断续的直线组成。

(2)横向上 V-偏析的形貌与切割位置有关,呈同心圆分布。

(3)V-偏析带周围存在液析碳化物,是引起偏析严重的重要原因。

国家 973 项目(夹杂物稳定性及铸坯均匀度控制的研究)资助(2010CB630806)

参考文献

- [1] 刘助柏,倪利勇.大锻件形变新理论新工艺[M].北京:机械工业出版社,2009:14-18.
- [2] 刘庄,赵勇.大钢锭凝固过程的温度场计算及缩孔疏松预测[J].钢铁研究学报,1993,5(1):23-32.
- [3] 桑宝光,张秀伟.大型钢锭凝固数值模拟与试验研究[J].铸造,2010,59(3):276-279.
- [4] 丁礼权,范植金,方德法,等.GCr15 轴承钢液析碳化物的控制研究[J].武钢技术,2013,51(2):27-30.
- [5] 刘靖,韩静涛,席良军,等.GCr15 轴承钢加热温度与碳化物的溶解扩散[J].金属热处理,2008,33(10):87-90.
- [6] 马丙涛,刘超群,林洁,等.GCr15 钢的加热工艺与液析、带状的关系[J].中国冶金,2012,22(7):24-28.
- [7] 周国平,于世川,刘振宇,等.高磷耐候钢铸轧薄带的组织和深拉伸性能[J].钢铁研究学报,2011,23(1):36-41.
- [8] 张富强,李超,姜振生,等.连铸坯中心裂纹和三角区裂纹的成因与防止[J].钢铁,2004,39(10):20-23.

黄拓(1989-),男,硕士研究生(钢铁研究总院),2011年西安建筑科技大学(本科)毕业,连铸工艺技术、铸坯及铸锭凝固组织细化。E-mail:huangtuo2014@163.com

收稿日期:2014-02-11

下 期 要 目

100 t 顶吹转炉三维可压缩流场的数值模拟	解家英等
上浮速度对钢渣界面夹杂物去除的影响	刘超等
不同断面矩形坯结晶器钢液表面流速的水模型研究	刘涛等
LF 精炼过程 100 t 钢包底吹氩卷渣水模拟研究	田罗林等
120 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼石油套管钢时 TiN 的析出和控制	方忠强等
100 t 顶吹氧气转炉石灰石造渣炼钢技术的分析和工艺实践	秦登平等
50 t EAF-AOD-LF-VD-CC-轧制高碳不锈钢 9Cr18 盘条的工艺实践	李忠之等
600 MPa 级低硅优质 3.5 mm 热轧双相钢的开发	殷胜等
40 t EAF-LF-VD-3.7 t 铸锭工艺高品质齿轮钢 20MnCr5H-1 的研制	丁忠等
超低碳马氏体时效不锈钢 00Cr13Ni7Co5Mo4W 的组织 and 性能	姜越等