



钢水凝固收缩与板坯铸机开口度参数设计

高 龙 永

(济南钢铁股份有限公司 炼钢厂, 山东 济南 250101)

摘 要:对板坯连铸机钢水凝固收缩特点及开口度参数对铸机生产的影响、连铸机开口度参数计算的理论依据进行了系统的分析,济钢板坯连铸机开口度设计生产实践表明,以铸机工况条件、钢种拉速及铸坯实物质量控制为基础,理论结合实践来设计铸机开口度参数的方法是合理实用的,铸坯的内部质量缺陷,特别是中间裂纹、中心偏析控制在较低水平。

关键词:板坯铸机;开口度;工艺参数;凝固收缩

中图分类号:TF777.1

文献标识码:B

文章编号:1004-4620(2012)01-0024-03

1 前 言

板坯连铸机的主体铸坯通道是结晶器和由不同类型支持辊组成的扇形段。在连铸机设计和生产实践过程中,无论是结晶器还是扇形段,都需要根据不同钢种、不同拉速和不同冷却条件来设定合理的开口度,以保证铸坯既没有表面及内部裂纹,也不会加剧中心线质量缺陷,同时还能得到合格厚度的铸坯。铸机的凝固收缩和开口度设定既是一个复杂的理论计算问题,也是与生产实践密不可分的生产实践问题,在对板坯连铸机进行开口度参数设计时,需要将两者密切结合起来综合考虑。

2 钢液凝固收缩的影响

2.1 凝固收缩的特点

钢水冷却凝固成常温铸坯的过程中会产生液态收缩、凝固收缩和固态收缩,具有如下特点:

1)钢水在由高温液态冷凝成常温固态的过程中,除了钢水在弯月面前的纯液态收缩和铸坯完全凝固完成之后的纯固态收缩外,在具有液相穴的坯壳内的钢水凝固通常是液态收缩、凝固收缩和固态收缩交织在一起同时进行。因此,单独测量这3部分的具体收缩数值很难。一般认为,液态收缩为~1%,凝固收缩为~4%,固态收缩为7%~8%。

2)钢的凝固收缩取决于钢的成分和凝固温度范围,凝固温度范围越大收缩量越大;钢的固态收缩取决于固相线到室温这段温度变化和组织变化。

3)由于连铸坯壳内的钢水供应是连续的,液态钢水因温差产生的体收缩可以通过钢水的连续供给而得到补充。因此,在考虑连铸机开口度参数和计算铸坯的凝固收缩特性时,对钢水液态收缩一般

不加考虑。

2.2 凝固收缩的主要影响因素

1)钢中C含量对凝固收缩的影响。钢中C含量对钢水的液相线温度影响最大,也决定着钢的最终组织。因此,钢中C含量对钢的凝固收缩影响最大,相关资料介绍的不同C含量条件下钢的体收缩和线收缩数据如表1所示。

表1 不同C含量下的各项收缩 %

C含量	液态	凝固	固态	合计	C含量	液态	凝固	固态	合计
0.1	1.50	3.12	5.85	10.5	0.7	1.62	4.08	5.64	12.1
0.2	1.50	3.39			0.8	1.68	4.05		
0.4	1.59	4.03	5.68	11.3	1.0	1.75	3.90	8.35	14.0
0.5	1.62	4.13			1.5	1.96	3.12		

碳素钢在不同C含量下,总收缩量在10%~14%。当钢的典型C含量为0.1%~0.2%时,可以认为板坯铸机钢水的液态收缩在1.50%左右,凝固收缩为3.25%,固态收缩约5.8%。

2)其他合金元素对凝固收缩的影响。合金元素对钢水凝固收缩影响不一,Mn、Cr的凝固收缩体积变化较小,这些元素含量高的钢种,收缩程度较轻。相比之下,合金元素对钢水凝固固液相温度和区间的影响较之对凝固收缩的影响要大得多^[1]。

2.3 凝固收缩对铸坯裂纹的影响

当C含量在0.09%~0.17%时,由铁碳相图可知,这正好是相图上的亚包晶反应成分范围。在钢水的冷却凝固过程中,先析出的 δ 铁素体的量在包晶反应前超过了79.5%,碳含量越低,先析出的 δ 铁素体的量越多。由于 δ 铁素体是体心立方结构,随着坯壳的进一步冷却,先析出的 δ 铁素体将通过多型性转变成面心立方的 γ 奥氏体,体积收缩量大^[2]。

钢水凝固过程中收缩量大,坯壳在结晶器内容易产生气隙,该气隙减缓传热,影响坯壳的均匀冷却、均匀生长和均匀收缩,从而容易使初生坯壳产生裂纹,此类钢种的裂纹敏感性强烈,而且随着碳含量越接近0.09%,先析出的体心立方 δ 铁素体越

收稿日期:2011-07-18

作者简介:高龙永,男,1980年生,2002年毕业于北京科技大学钢铁冶金专业。现为济钢炼钢厂连铸中心副主任,工程师,从事炼钢连铸工艺技术工作。

多,冷却收缩量越大,结晶器内坯壳生长越容易不均匀,裂纹倾向性越大。实践中如Q235B等裂纹敏感性就比较大。

当C含量在0.17%~0.53%的区间时,属于过包晶区,随着C含量的增加,钢水凝固过程中析出的 δ 铁素体越来越少,而通过液相直接结晶成 γ 相的量越来越多。当C含量高于0.53%时,钢水全部直接由液体结晶为 γ 相。因此由 δ 铁素体经过多型性转变成 γ 相的量也随着C含量的增加也越来越少,多型性转变体积收缩也越来越小。

钢水凝固过程中收缩量小,坯壳与结晶器壁间形成的气隙就比较小,坯壳与结晶器铜壁之间的传热越均匀,坯壳的生产、收缩也均匀,因此不易产生裂纹。钢种的裂纹敏感性越差。实践中如45#等中高碳钢的凝固收缩率较之其他C含量少的钢种小,钢种的裂纹敏感区间小,也就是这个原因。

3 铸机开口度参数的设计

3.1 开口度的作用及对铸坯质量的影响

铸机开口度通常分结晶器的开口度和各对支撑辊的开口度。结晶器的开口度是指结晶器内外弧铜板半径连线辊面间的最短距离,扇形段各对支撑辊的开口度是指两支撑辊之间径向连线上辊面间的最短距离。开口度是为了弥补坯壳及钢液凝固过程中产生的各类型收缩,并确保铸坯出扇形段并冷却至常温后外形尺寸满足需要的铸坯尺寸要求;同时,开口度的变化不能使铸坯表面或内部凝固前沿受到超出其表面及内部临界值的应变应力,以确保铸坯不因此产生表面及内部裂纹、加剧偏析、疏松等质量缺陷。

铸机开口度参数设计收缩量偏大,在结晶器或扇形段中铸坯的内外弧总会有一侧或两侧同时受到支撑辊机械挤压力的作用。当此机械挤压应力超过坯壳表面或内部凝固前沿的临界应力时,铸坯便会出现表面横裂、内部中间裂纹等质量缺陷;坯壳受到挤压,还会导致铸坯液相穴内钢液流动,加剧铸坯的枝晶偏析和中心线偏析。

反之,铸机开口度参数设计收缩量偏小,铸坯在结晶器或扇形段内会由于收缩量大而失去支撑,未完全凝固的坯壳在液相穴及结晶器内钢水静压力作用下会出现坯壳的蠕变鼓肚现象;铸坯鼓肚一方面会在内外弧坯壳上导致拉应力的产生,当此拉应力超过坯壳表面的许用拉应力时便会出现表面横裂纹,如表面横裂纹等质量缺陷;同样,坯壳内部也会出现类似的拉应力情况,当此拉应力超过坯壳内部凝固前沿的临界应力时便导致铸坯内部出现

裂纹,如三角区裂纹、中心线裂纹、中间裂纹等;同时,坯壳鼓肚也会造成液相穴内的钢液流动,加剧铸坯的宏观和微观偏析。

3.2 铸机开口度参数的设计原则

1)铸机钢种生产大纲,特别是钢种成分中碳含量范围的设计原则,即钢种的总收缩量问题;2)铸机典型拉速,即铸坯在各个二冷区间内的凝固壳生长厚度原则,也就是总收缩量在不同二冷区间内的分配问题;3)钢种裂纹类型及内部质量要求,即尽可能缓解钢种的横裂纹缺陷、中间裂纹缺陷及中心线偏析缺陷等质量问题。

4 济钢板坯铸机开口度参数设计

济钢采用R5.7/6.8/8.5/12/17/33—1500型超低头板坯连铸机。基本工艺设备参数如下:铸坯断面尺寸200 mm×1 400 mm;大包吨位50 t;中间包正常容量17 t;结晶器长度784 mm;铸机冶金长度17 m;结晶器振动形式为电机驱动四偏心机械正弦振动;扇形段Seg1~7;最大拉速1.15 m/min;浇钢周期20 min。生产主要钢种碳含量范围在0.2%左右,铸机的正常典型拉速为0.9 m/min。

1)结晶器收缩量。结晶器有效使用长度700 mm,在上述工况条件下,由凝固平方根定律和表1所述的凝固收缩量参考值,设定该板坯铸机结晶器厚度方向的收缩量为0.9 mm。

2)结晶器出口到足辊的收缩量。考虑到坯壳降温线收缩和结晶器下口到支导段上口还有400 mm的距离,由于结晶器足辊处二冷水量分配较大,凝固收缩量也大,比照结晶器收缩,设定结晶器出口到足辊的收缩量为0.6 mm。

3)支撑导向段的收缩量。由凝固平方根定律可知,在拉速0.9 m/min的情况下,结晶器下口坯壳厚度18 mm,0段下口坯壳厚度56 mm;设定结晶器内钢液温度为1 500 °C,0段下口坯壳温度1 150 °C;并且铸坯收缩量与温度呈正比;铸坯外形尺寸主要取决于固态收缩和凝固收缩,但凝固收缩有液态钢水的补充,固影响较小,取凝固收缩的一半参与计算,合计收缩量为7.31%。则结晶器上口至0段下口收缩量为3.53 mm;结晶器上口207.5 mm,足辊为206 mm,相差1.5 mm,则0段内的凝固收缩量为2.03(3.53-1.5) mm;计算得0段上口坯壳厚约18 mm,下口约56 mm,即该区域的凝固长度为38 mm,则0段已凝固坯壳收缩量相对200 mm厚度(完全凝固)为0.77 mm,开口度参数设计时取0.8 mm。

4)扇形段的凝固收缩量。设结晶器内钢液温度1 500 °C,7段出口坯壳温度900 °C;结晶器至7段

出口总收缩量应为 6.07 mm; 扇形段内的收缩量为 3.9(6.2-1.5-0.8)mm。

在已知总收缩量的情况下, 根据 1、2 段温度高收缩小, 3、4 段矫直控制表面横裂纹采取小压下量,

5、6 段凝固末端应加大压下量来控制铸坯的中心偏析、疏松、缩孔的原则, 来合理控制 1~7 段之间的收缩量分配。根据以上设计原则和思路形成的济钢板坯铸机开口度工艺参数见表 2(偏差 ± 0.10 mm)。

表 2 铸机扇形段开口度标准 mm

项目	结晶器	足辊	0段	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
上口	207.5	206.0	206.0	205.2	204.8	204.3	203.8	203.3	202.6	201.9
下口	206.6		205.2	204.8	204.3	203.8	203.3	202.6	201.9	201.3
收缩量	0.9	0.6	0.8	0.4	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.6

5 铸坯质量统计分析

通过以上方法设定的板坯铸机开口度参数, 经过 3 台板坯铸机在线 5.5 a 的实际运行, 铸坯质量好。2005~2011 年共检验 1 368 次, 铸坯低倍内部质量统计结果如表 3 所示。

表 3 2005~2011 年板坯低倍检验缺陷情况

缺陷类型	发生次数	占检验次数比例/%
中间裂纹 ≥ 0.5 级	20	1.46
中心线裂纹	0	0
中心偏析 $\geq C$ 类 1 级	31	2.27
中心疏松 ≥ 0.5 级	48	3.51
缩孔	68	4.97

由表 3 可以看出, 铸坯的内部质量缺陷, 特别是中间裂纹、中心偏析控制在较低水平。

6 结 语

根据钢种凝固收缩特点、铸机具体工况和相应质量要求来分别计算铸机长度上不同位置的收缩量, 并以此为依据来设计铸机的开口度工艺参数, 是一项理论结合实践的系统工作, 需要综合考虑铸机生产钢种成分、典型拉速、冷却水量及铸机不同位置对铸坯质量的影响等因素。济钢板坯铸机开口度工艺参数设计的实践证明, 在经验和理论数据的指导下, 完全可以设计出满足生产需求的铸机开口度工艺参数。

参考文献:

- [1] 曹广畴. 现代板坯连铸[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 70.
- [2] 宋维锡. 金属学[M]. 修订版. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 167.

Solidification Shrinkage of Liquid Steel in Slab Continuous Casting and the Design of the Gap Parameters

GAO Long-yong

(The Steelmaking Plant of Jinan Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: This article analyzed the solidification shrinkage characteristics of liquid steel, the influences of the gap parameters on the production of CCM and the basis of the gap calculation and so on. An example of designing practice on the slab CCM in Jinan Steel was given out also. The production practices proved that the method studied is practical and suitable and the internal quality defects especially the cracks and center segregation were controlled in low level.

Key words: slab CCM; gap; process parameter; solidification shrinkage

(上接第 23 页) 钢控制下渣, LF 炉控制萤石用量, 加入时机向后推迟, 以减少 Al 与 SiO₂ 的反应时间; 适当减少精炼冶炼时间, 控制在 25~35 min 较为合适。

参考文献:

- [1] 丁广友, 史翠薇, 田启新, 等. 冶炼冷轧用钢 SPHD 低硅控制的生产实践[C]//河北省冶金协会. 河北省冶金协会炼钢连铸技

术与学术交流论文集. 2006: 196-198.

- [2] 《新编钢水精炼暨铁水预处理 1 500 问》编辑委员会. 新编钢水精炼暨铁水预处理 1 500 问[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [3] 单庆林. 150 t LF 冷轧料用钢 SPHD 生产实践[J]. 南方金属, 2007(4): 56-60.

Practice of Controlling Carburization and Controlling Increasing Silicon in Smelting SPHD Steel

ZHANG Xing-jian, XIE Ji-biao, CHU Bin, PENG Zhi-jun

(The Second Steelmaking Plant of Jinghua Rizhao Steel Group International Trade Company, Rizhao 276800, China)

Abstract: In order to control carburization and increasing silicon in LF refining, Rizhao Steel operated by large slag, deoxidized with Al ball, controlled the amount of fluorite, and controlled the refine time between 25 min and 35 min etc, developing SPHD successfully. The slab quality is good and central unsoundness is 0.5 grades.

Key words: SPHD; LF refiner furnace; controlling carburization; controlling increasing silicon