

## 轻压下参数对 75Cr1 高碳钢 230 mm 连铸板坯冶金质量的影响

黄 华 徐李军 仇圣桃

(钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081)

**摘 要** 基于有限元法,利用 ANSYS 软件模拟计算了高碳钢(0.73%~0.77% C)连铸板坯轻压下过程中热-机械塑性应变分布,分析了给定扇形段的压下量 2 mm+2 mm,3 mm+3 mm 和 2 mm+2 mm+2 mm 对压下区间和位置的塑性应变的影响,并通过现场试验对模拟结果进行了验证。结果表明,塑性应变模型模拟值与实测值吻合;热变形过程中,铸坯心部的等效应变最大,表面节点次之,1/4 位置等效应变最小;热-机械塑性应变随着压下量和压下速率的增加而增加,3 mm+3 mm 压下模式具有较好的压下效果。生产试验结果表明,采用 2 个扇形段(6<sup>#</sup>和 7<sup>#</sup>或 7<sup>#</sup>和 8<sup>#</sup>)进行 2.2 mm+2.3 mm 轻压下铸坯较优化前 3 个扇形段(6<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>和 8<sup>#</sup>)1.5 mm+1.5 mm+1.5 mm 轻压下铸坯中心偏析 2.0 级和中心疏松 2.0 级提高中心偏析 0.5 级和中心疏松 0.5 级,显著改善了连铸板坯的低倍质量。

**关键词** 高碳钢 230 mm 连铸板坯 轻压下 热-机械塑性应变 冶金质量

## Effect of Soft Reduction Parameters on Metallurgical Quality of 230 mm Casting Slab of High Carbon Steel 75Cr1

Huang Hua, Xu Lijun and Qiu Shengtao

(National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** Based on the finite element method the distribution of thermo-mechanical plastic strain of high carbon steel (0.73%~0.77% C) casting slab during soft reduction process has been simulated and calculated by using ANSYS software, the effect of reduction in height-2 mm+2 mm, 3 mm+3 mm and 2 mm+2 mm+2 mm at defined segments on plastic strain of reduction sector and location is analyzed and the simulated results are verified at casting worksite. The results show that the plastic strain simulated values coincide with the measured values; during hot deforming process the equivalent strain at center of slab is max, that at surface flows, and the equivalent strain at 1/4 of slab thickness is min; with increasing the reduction in height and reduction rate the thermo-mechanical plastic strain increases, and the reduction mode with 3 mm+3 mm has better reduction effect. Pilot production results show that compared with soft reduction 1.5 mm+1.5 mm+1.5 mm at three segments (6<sup>#</sup> sector, 7<sup>#</sup> sector and 8<sup>#</sup> sector) before optimization, the slab center segregation and center porosity are respectively 2.0 rating, with soft reduction 2.2 mm+2.3 mm at two segments (6<sup>#</sup> sector and 7<sup>#</sup> sector or 7<sup>#</sup> sector and 8<sup>#</sup> sector) after optimization, the slab center segregation and center porosity are respectively 0.5 rating, it is obviously improving the quality of macrostructure of casting slab.

**Material Index** High Carbon Steel, 230 mm Casting Slab, Soft Reduction, thermo-Mechanical Plastic Strain, Metallurgical Quality

与中低碳钢相比,高碳钢在连铸过程中,由于碳含量较高造成导热性差、两相区较宽,其连铸坯更容易产生中心偏析、疏松和缩孔等缺陷<sup>[1-4]</sup>;轻压下技术在连铸坯凝固末端进行适当及时的变形量,阻止了富集易偏析元素钢液的流动并补偿了两相区内钢液凝固时形成的体积收缩,改善了中心偏析和减少了中心疏松,是目前比较理想的提高连铸坯中心质量的手段<sup>[5-7]</sup>。本文以钢厂生产的高碳钢 75Cr1 连铸板坯为研究对象,其连铸板坯成分控制如表 1 所示,断面尺寸 230 mm×2 040 mm、拉速 0.9 m/min,连铸板坯低倍缺陷如图 1 所示,连铸板坯酸蚀硫印图的中心区域内呈现腐蚀较深的褐斑、空隙和断续条带,存在较严重的中心偏析和中心疏松。采用有限元切片法对连铸板坯凝固过程温度场进行了计

表 1 试验 75Cr1 钢的化学成分 /%

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr
内控	0.73 ~ 0.77	0.27 ~ 0.37	0.60 ~ 0.80	≤0.025	≤0.020	0.30 ~ 0.50
目标	0.75	0.30	0.75	0.015	0.001	0.45

算,通过射钉实验和测温结果验证了模型的准确性;建立了压下段连铸板坯纵截面热-机械耦合模型,分析了不同压下参数的连铸板坯表面、厚度中心及 1/4 位置塑性应变情况,提出了新的轻压下工艺,并在现场进行了对比试验及固化试验。

### 1 数值分析研究

#### 1.1 温度场计算

钢厂 1<sup>#</sup>板坯连铸机 1 流生产的高碳钢 75Cr1 连

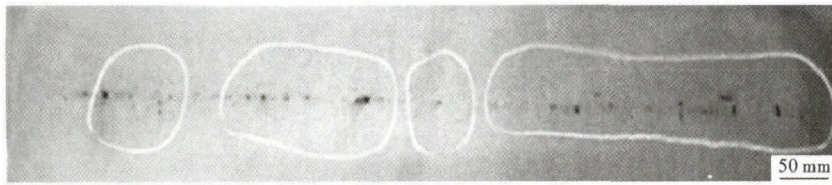


图1 优化前 75Cr1 钢 230 mm × 2 040 mm 连铸板坯低倍缺陷形貌

Fig. 1 Morphology of defect in macrostructure of 230 mm × 2 040 mm casting slab of steel 75Cr1 before process optimization

铸板坯断面为 230 mm × 2 040 mm、拉速 0.9 m/min, 浇注温度为 1 491 ~ 1 499 °C, 由表 1 目标成分计算其液相线温度为 1 471 °C, 固相线温度为 1 373 °C, 凝固潜热取常数 291 kJ/kg。采用 ANSYS 软件有限元切片法进行几何建模, 依据现场实际结晶器冷却参数及二冷参数施加边界条件, 得到连铸板坯内弧 1/4 位置的温度变化曲线与采用 IR-HQH 型红外双色智能测温仪现场测温值如图 2(a) 所示, 连铸板坯内弧 1/4 位置的凝固坯壳厚度随变化曲线与 6#、7# 扇形段末和 8# 扇形段末射钉实验实测的结果如图 2(b) 所示, 其中 6# 扇形段与 7# 扇形段为矫直段。

经研究 75Cr1 钢连铸板坯低塑性区第一脆性区温度范围为 1 250 °C ~ 熔点, 第二脆性区温度范围为 950 ~ 1 250 °C, 第三脆性区温度范围为 700 ~ 950 °C<sup>[8,9]</sup>; 从图 2(a) 可以看出, 矫直区域连铸板坯表面温度在 880 ~ 900 °C, 因此连铸板坯在矫直过程中并没有避开该钢种裂缝敏感第三脆性区温度区域; 在 8# 扇形段末计算结果与测量结果出现最大偏差 1.57%。从图 2(b) 可以看出, 数值模拟的连铸板坯凝固坯壳厚度变化曲线与射钉实验结果吻合较好, 在 6# 扇形段出现最大偏差 0.54%, 采用此模型对温度场的模拟结果是可靠的。

## 1.2 热-力耦合塑性应变计算

在温度场的基础上, 借助 ANSYS 参数化设计语言 APDL, 建立了 7# 扇形段连铸板坯宽度中心纵截面弹塑性热-机械耦合模型, 考虑了恒拉速情况下进行 2 个扇形段压下和 3 个扇形段压下模型的受力情况, 其中 2 个扇形段的轻压下工艺在压下量均为 2 mm 时, 简称为“2 + 2”方式; 压下量均为 3 mm 时, 简称为“3 + 3”方式; 3 个扇形段的轻压下工艺当压下量均为 2 mm 时, 简称

为“2 + 2 + 2”方式。

在模拟过程中, 不考虑连铸板坯鼓肚、错位的影响, 忽略连铸板坯宽面对窄面变形的影响, 连铸板坯为可变形接触体, 辊子为刚性接触体, 连铸板坯与辊子之间的接触为摩擦转动接触。通过不同压下参数作用下连铸板坯塑性应变情况对轻压下工艺提出合

理化建议。各工艺方案得到的连铸坯纵截面中心处表面节点、厚度方向中心节点、厚度方向 1/4 位置节点的等效塑性应变随时间的变化情况分别如图 3(a, b, c) 所示。

等效塑性应变是用来确定材料经强化后屈服面的位置的物理量<sup>[10]</sup>, 从图 3(a) 可以看出, 热变形过程中, 铸坯各部位变形不均, 心部的等效应变最大, 塑性应变由 0.036 到 0.095, 表面节点等效应变由 0 到 0.045, 铸坯 1/4 位置节点的塑性应变由 0.002 9 到 0.016; 从图 3(b) 可以看到, 心部的等效塑性应变最大值为 0.11, 表面节点最大值为 0.051, 铸坯 1/4 位置节点最大值为 0.020; 从图 3(c) 可以看到, 心部的等效塑性应变最大值为 0.117, 表面节点最大值为 0.047, 铸坯 1/4 位置节点最大值为 0.018。

中心节点 Y 轴分量塑性应变反映了扇形段上下辊机械载荷作用下表面力渗透情况, 不同压下量、不同压下区间情况下厚度方向中心节点 Y 轴分量塑性应变分别如图 4(a, b) 所示, 从塑性应变随时间的变化曲线可以得到, “2 + 2”方式中心节点 Y 轴

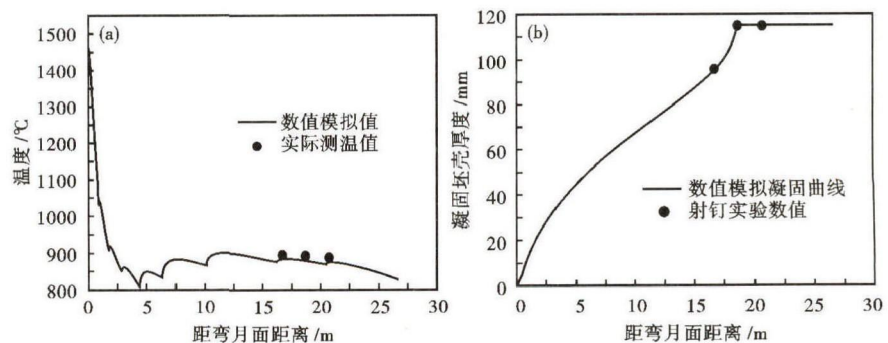


图2 75Cr1 高碳钢 230 mm 连铸板坯温度数值模拟值(曲线)与实际测温值(点)的对比(a)和板坯凝固坯壳厚度数值模拟值(曲线)和射钉测量值(点)的对比(b)

Fig. 2 Comparison between numerical-simulated value (curve) and measured value (spots) of temperature (a) and comparison between numerical-simulated value (curve) and pin shooting test value (spots) of solidified shell thickness (b) of 230 mm casting slab of high carbon steel 75Cr1

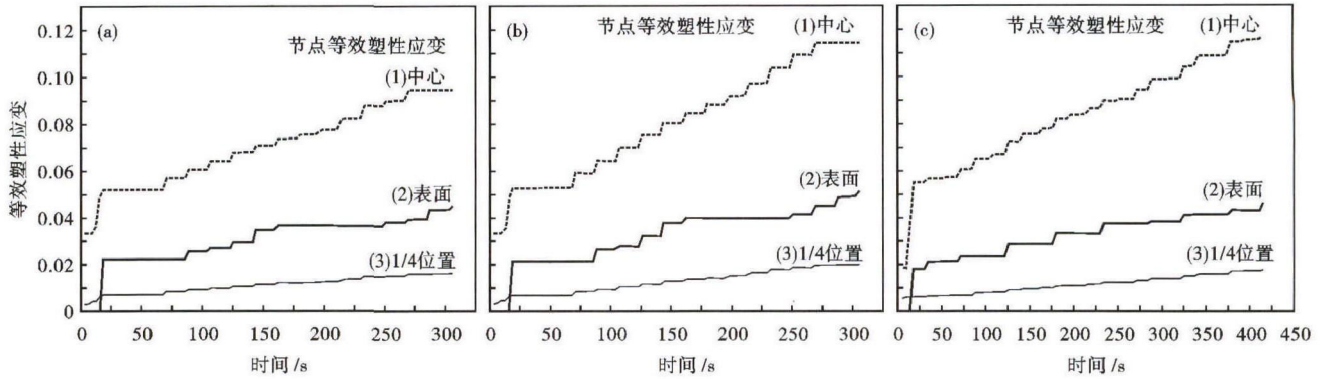


图3 75Cr1 高碳钢 230 mm 连铸板坯中心(1),表面(2)和厚度1/4(3)位置等效塑性应变随时间的变化曲线:方式-(a)2+2;(b)3+3;(c)2+2+2

Fig.3 Curves of change of equivalent plastic strain with time for 230 mm casting slab of high carbon steel 75Cr1 at center (1), surface (2) and 1/4 thickness (3): mode-(a)2+2; (b)3+3; (c)2+2+2

分量塑性最大应变为 0.081, “3+3”方式最大应变为 0.10, “2+2+2”最大应变为 0.096。尽管“2+2+2”与“3+3”两种模式下中心节点 Y 轴分量塑性最大应变值接近,但从变化曲线可以看出,“3+3”模式应变率较大,压下效果较好。

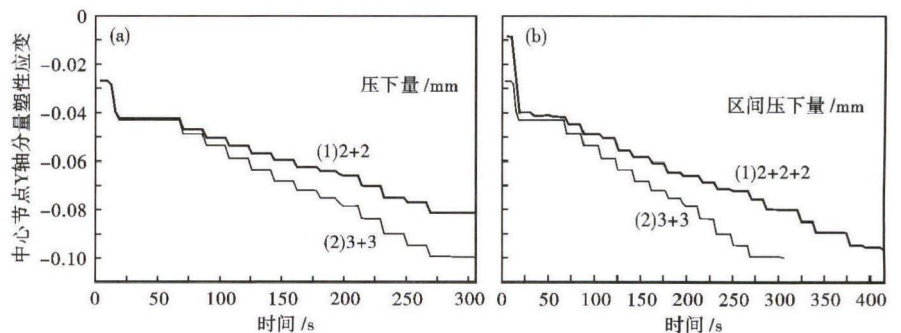


图4 75Cr1 高碳钢 230 mm 连铸板坯压下量(1)2 mm+2 mm、(2)3 mm+3 mm(a)和(1)2 mm+2 mm+2 mm、(2)3 mm+3 mm(b)对中心节点 Y 轴分量塑性应变的影响

Fig.4 Effect of deduction (1) 2 mm+2 mm and (2) 3 mm+3 mm (a) and (1) 2 mm+2 mm+2 mm and (2) 3 mm+3 mm (b) on center node Y-component plastic strain of 230 mm casting slab of high carbon steel 75Cr1

2 现场试验

2.1 对比试验

在射钉实验与数值模拟的基础上,制定了新的轻压下工艺,并在 1#连铸机进行 2 个扇形段压下和 3 个扇形段压下对比试验,1 流采用 2 个扇形段进行压下,连铸板坯断面 230 mm × 2 040 mm、拉速 0.9 m/min,压下位置为 6#扇形段、7#扇形段,压下量分别为 2.2、2.3 mm;2 流采用 3 个扇形段进行压下,连铸板坯断面 230 mm × 2040 mm、拉速 0.9 m/min,压下位置为 5#、6#、7#扇形段,压下量分别为 1.5、1.5、1.5 mm。

1 流连铸板坯与 2 流连铸板坯低倍硫印如图 5 所示,低倍评级执行 YB/T4003-1997 标准,1 流连铸板坯酸蚀硫印图的中心区域无褐斑和空隙,低倍缺陷评级中心偏析为 C 类 0.5,中心疏松为 0.5;2 流连铸板坯酸蚀硫印图的中心区域左侧约 1/4 位置呈现褐斑并伴有暗点与空隙,低倍缺陷评级中心偏析为 C 类 1.0,中心疏松为 1.0。

2.2 固化试验

为了验证试验的可靠性,以便将工艺参数固化到连铸机二级系统中,特进行了固化试验。1#连铸

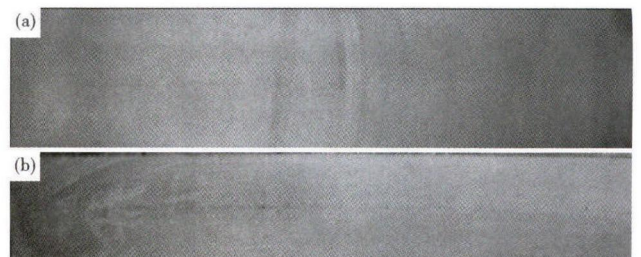


图5 75Cr1 高碳钢 230 mm 连铸板坯轻压下:1 流-(a)6#段 2.2 mm+7#段 2.3 mm 和 2 流-(b)5#段 1.5 mm+6#段 1.5 mm+7#段 1.5 mm 时低倍硫印形貌,拉速 0.9 m/min

Fig.5 Morphology of sulphur print macrostructure of 230 mm casting slab of high carbon steel 75Cr1 with soft reduction: No1 strand-(a) 6# sector 2.2 mm+7# sector 2.3 mm and No2 strand-(b) 5# sector 1.5 mm+6# sector 1.5 mm+7# sector 1.5 mm, casting speed 0.9 m/min

机两流轻压下工艺参数均采用 2 个扇形段进行压下,压下量为 2.2、2.3 mm。1 流连铸板坯断面 230 mm × 2 040 mm、拉速 0.9 m/min,压下位置为 6#扇

表 2 轻压下工艺参数对 75Cr1 高碳钢连铸板坯低倍质量的影响

Table 2 Effect of soft reduction parameters of process on macrostructure of casting slab of high carbon steel 75Cr1

项目	铸机流数	工艺	参数	低倍质量/级	
				中心偏析 C 类	中心疏松
优化前	1 流	断面/(mm × mm)	230 × 2 040	2.0	2.0
		拉速/(m · min <sup>-1</sup> )	0.9		
		压下位置/(扇形段)	6 <sup>#</sup> 、7 <sup>#</sup> 、8 <sup>#</sup>		
		压下量/mm	1.5、1.5、1.5		
对比试验	1 流	断面/(mm × mm)	230 × 2 040	0.5	0.5
		拉速/(m · min <sup>-1</sup> )	0.9		
		压下位置/(扇形段)	6 <sup>#</sup> 、7 <sup>#</sup>		
		压下量/mm	2.2、2.3		
	2 流	断面/(mm × mm)	230 × 2 040	1.0	1.0
		拉速/(m · min <sup>-1</sup> )	0.9		
		压下位置/(扇形段)	5 <sup>#</sup> 、6 <sup>#</sup> 、7 <sup>#</sup>		
		压下量/mm	1.5、1.5、1.5		
固化试验	1 流	断面/(mm × mm)	230 × 2 040	0.5	0.5
		拉速/(m · min <sup>-1</sup> )	0.9		
		压下位置/(扇形段)	6 <sup>#</sup> 、7 <sup>#</sup>		
		压下量/mm	2.2、2.3		
	2 流	断面/(mm × mm)	230 × 1 840	0.5	0.5
		拉速/(m · min <sup>-1</sup> )	1.1		
		压下位置/(扇形段)	7 <sup>#</sup> 、8 <sup>#</sup>		
		压下量/mm	2.2、2.3		

形段、7<sup>#</sup>扇形段;2 流连铸板坯断面 230 mm × 1 840 mm、拉速 1.1 m/min,压下位置为 7<sup>#</sup>扇形段、8<sup>#</sup>扇形段,1 流连铸板坯与 2 流连铸板坯低倍硫印如图 6 所示,1 流、2 流生产的连铸板坯酸蚀硫印图的中心区域均无褐斑和空隙,其低倍缺陷评级中心偏析均为 C 类 0.5,中心疏松均为 0.5。

优化前、对比试验及固化试验过程中轻压下工艺参数和连铸板坯低倍质量如表 2 所示,从统计结果可以看出,在压下总量不变的情况下,采用 2 个扇形段进行压下的轻压下工艺得到的连铸板坯酸蚀硫印图的中心区域均无褐斑和空隙,低倍硫印评级中

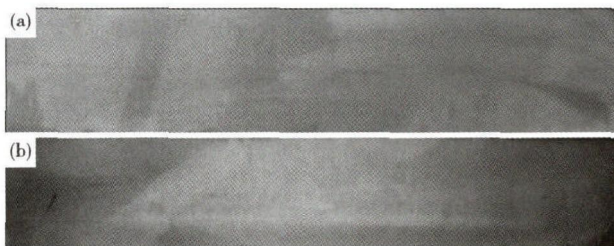


图 6 生产试验的 75Cr1 高碳钢 230 mm 连铸板坯轻压下量: 1 流,拉速 0.9 m/min- (a)6<sup>#</sup>段 2.2 mm + 7<sup>#</sup>段 2.3 mm;2 流,拉速 1.1 m/min- 7<sup>#</sup>段 2.2 mm + 8<sup>#</sup>段 2.3 mm 时低倍硫印形貌

Fig. 6 Morphology of sulphur print macrostructure of 230 mm casting slab of high carbon steel 75Cr1 of production test with defined soft reduction: No1 strand, casting speed 0.9 m/min- (a) 6<sup>#</sup> sector 2.2 mm + 7<sup>#</sup> sector 2.3 mm and No2 strand, casting speed 1.1 m/min- (b) 7<sup>#</sup> sector 2.2 mm + 8<sup>#</sup> sector 2.3 mm

心偏析均为 C 类 0.5、中心疏松均为 0.5,连铸板坯低倍质量得到改善。

### 3 结论

(1)温度场的数学模型计算结果与实测结果吻合较好,只是连铸矫直并没有避开 75Cr1 高碳钢第三脆性区间。

(2)从热-力耦合模型计算结果看出,热变形过程中,铸坯各部位变形不均,心部的等效应变最大,表面的等效应变次之,厚度方向 1/4 位置的等效应变最小;“2 + 2 + 2”与“3 + 3”两种方式下中心节点 Y 轴分量塑性最大应变值接近,但从压下效果来看,建议采用“3 + 3”方式。

(3)从对比试验和固化试验结果看出,在压下总量不变的情况下,采用 2 个扇形段进行压下的轻压下工艺得到的连铸板坯酸蚀硫印图的中心区域均无褐斑和空隙,低倍硫印评级中心偏析均为 C 类 0.5、中心疏松均为 0.5,提高了连铸板坯低倍质量。

### 参考文献

- [1] 干 勇. 现代连续铸钢实用手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- [2] 曾四宝,李洪波,包燕平,等. 高碳钢连铸坯偏析问题的分析与探讨[J]. 北京:2007 年炉外精炼年会论文集,2007:211-218.
- [3] Suzuki M, Kimura K. Improvement in Center Segregation High Carbon Steel Continuous Casting Blooms[A]. Steelmaking Conference Proceedings, 1996:505-512.
- [4] Mikio Suzuki, Makoto Suzuki, Masayuki Nakada, 等. 板坯中心偏析形成机理及“轻压下”技术的改善效果[A]. 北京:2001 中国钢铁年会论文(上卷)[C]. 2001:624-630.
- [5] 朱苗勇,林启勇. 连铸坯的轻压下技术[J]. 鞍钢技术, 2004(1): 1-6.
- [6] Dipankar Majumdar, Prakash Chaudhari, Bruce Kozak. Optimization of Slab Centerline Quality Using Dynamic Soft Reduction[A]. ES-SAR Steel, Hazirs Gujarst India. AISTech 2007 Proceedings, 2007, 2:209-211.
- [7] 何 浪. 75Cr1 薄板坯高温力学性能研究及配水工艺优化[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [8] 王新华,朱国森,于会香,等. 高碳钢连铸板坯高温力学性能[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(5): 545-548.
- [9] 吴宗双,龚志翔,陈 刚. 高碳钢高温力学性能研究[J]. 钢铁研究, 2006, 34(2): 13-15.
- [10] 胡于进. 有限元分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

黄 华(1985-),男,硕士(2012 年燕山大学),工程师,2009 年山东科技大学(本科)毕业,连铸工艺研究。

E-mail:huanghual18@163.com

收稿日期:2016-07-18