

工艺因素对 82B 钢 280 mm × 325 mm 铸坯凝固过程的影响

吕进^{1,2} 徐东^{1,3} 郑冰^{1,3} 庞洪轩^{4,5} 邹志鹏^{1,4} 杨昕昆^{1,5}

(1 河北工程大学河北省高品质冷镦钢技术创新中心, 邯郸 056038; 2 安阳市新普钢铁有限公司技术中心, 安阳 455003;
3 辽宁科技大学冶金学院, 鞍山 114051; 4 河北普阳钢铁集团河北省高韧性风塔钢工程研究中心, 邯郸 056305;
5 河北普阳钢铁集团河北省高塑性耐磨钢板技术创新中心, 邯郸 056305)

摘要 为模拟不同工艺条件下的连铸坯的凝固过程, 采用有限元法模拟了 82B 钢连铸的凝固过程, 获得 280 mm × 325 mm 连铸坯的温度场。结果表明, 随拉速从 0.60 m/min 增加到 0.76 m/min, 凝固时 $f_s = 1$ 处与 $f_s = 0$ 处皆后移, 但中心凝固时间反而增加了 9.8%。随过热度由 15 °C 增加到 50 °C 时, 凝固末端 $f_s = 1$ 处同样后移, 约后移 1.1 m。根据模拟结果改进连铸工艺, 当拉速从 0.60 m/min 增加到 0.76 m/min, 增加轻压下工艺可改善低倍质量。

关键词 280 mm × 325 mm 连铸坯 温度场 二次冷却区 数值模拟 SWRH82B 钢

Effects of Technological Factors on Solidified Process During Continuous Casting of 82B Steel 280 mm × 325 mm Bloom

Lü Jin^{1,2}, Xu Dong^{1,3}, Zheng Bing^{1,3}, Pang Hongxuan^{4,5}, Zou Zhipeng^{1,4} and Yang Xinkun^{1,5}

(1 Technology Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038; 2 Technology Center, Anyang Xindu Iron and Steel Co Ltd, Anyang 455003;
3 School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051;
4 Engineering Research Center for High Toughness Wind Tower Steel of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Co Ltd, Handan 056305); 5 Technology Innovation Center for Wear Resistant Steel Plate of High plasticity and High Toughness of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Co Ltd, Handan 056305)

Abstract In order to simulate solidification process of the bloom continuous casting under different technological factors, the solidification process of 82B steel is simulated by using finite element method, and temperature field of 280 mm × 325 mm casting bloom is obtained. The results show that the solidification at $f_s = 1$ and $f_s = 0$ both move backward with the increase of the casting speed from 0.60 m/min to 0.76 m/min, but the solidification time of center increases by 9.8%; when the superheat increases from 15 °C to 50 °C, the solidification end ($f_s = 1$) also moves backward about 1.1 m. Based on simulation result to improve casting process, as casting speed increasing from 0.60 m/min to 0.76 m/min, with adding soft reduction, it is available to improve macrostructure quality.

Material Index 280 mm × 325 mm Bloom Continuous Casting, Temperature Field, Secondary Cooling, Numerical Simulation, SWRH82B Steel

SWRH82B 系列高碳钢一般用于预应力钢丝、钢丝绳、钢绞线、胶管钢丝、钢帘线等金属制品行业。随着预应力技术的发展, 为了进一步发挥钢绞线的潜力, 国内外正在加快新一代新产品的研制步伐^[1-8]。

本文采用有限元法对凝固过程进行模拟, 得出不同参数对凝固过程的影响。

1 大方坯连铸的温度场模型

铸坯断面尺寸为 280 mm × 325 mm, 以 1/4 横截面作为建模区域, 图 1 为建模示意图。82B 钢的主要化学成分为: 0.82% C、0.23% Si、0.75% Mn。

针对该铸机生产过程, 课题组已经采用了先进的固定测温仪对铸坯的表面进行测温, 并根据铸坯射钉结果, 反算并拟合出各区的换热系数 h ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$) 和 水流密度 w ($L \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$) 的关系, 其结果也发表在文献[9-12]中。

2 热物性参数

凝固过程固相率计算可以分为 lever、diffusion 及 scheil 模型, 就本实验中, 在结晶器区冷却速率较大, 如果单独考虑结晶器的影响时, 在冷却过程中有必要考虑冷却速率对热物性参数的影响, 由于本文主要考虑二次冷却区的影响, 为了方便模拟计算, 因

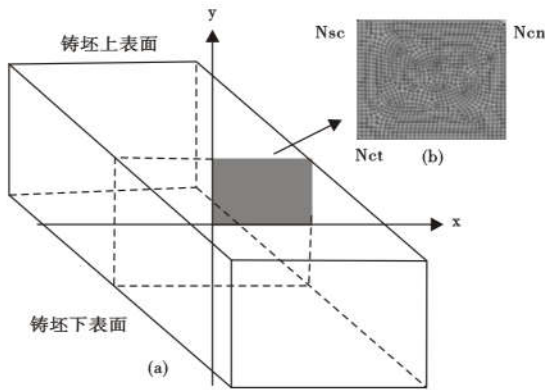


图1 建模示意图
Fig. 1 Modeling diagram

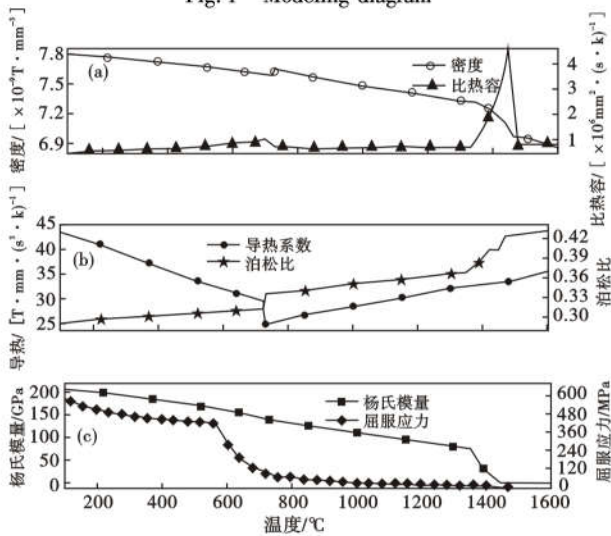


图2 82B钢的热物性参数:(a)比热容与密度;(b)导热系数与泊松比和(c)杨氏模量与屈服应力分布
Fig. 2 Thermal parameters of 82B steel: distribution of specific heat and density (a), of thermal conductivity and poisson ratio (b) and young modulus and of yield stress (c)

此简化了冷却速率对热物性参数的影响。

二次冷却区的冷却速率一般为0.3~10℃/s,

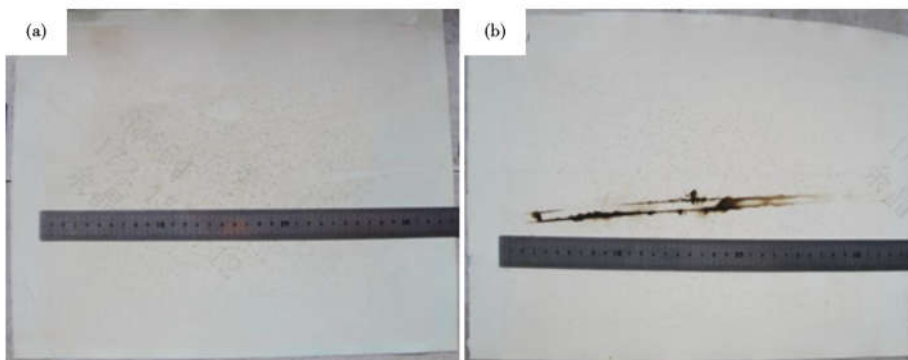


图4 射钉实验得出的液相穴长度:(a)二冷29#~30#辊之间;(b)矫直辊3#~4#之间
Fig. 4 Length of liquid core by pin shooting test: secondary cooling zone between 29# and 30# roller (a), between straightening roller 3#~4#(b)

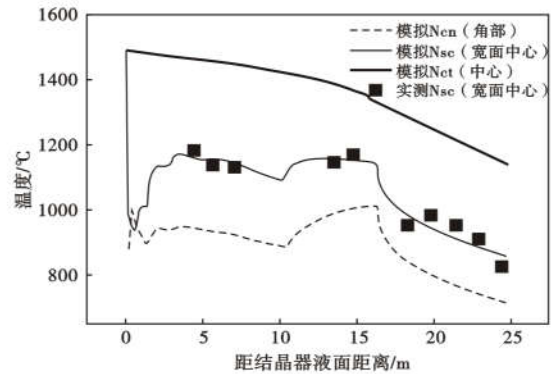


图3 82B钢铸坯表面测温与模拟温度分布

Fig. 3 Distribution of temperature of measurement and simulation of 82B steel cast bloom

空冷时更低,本文使用冷却速率为1℃/s时的热物性参数^[9-12],计算结果如图2所示,图2中比热容在1400℃左右时出现峰值,主要由于液固相变导致;导热系数在760℃左右时向下突变,主要由于固态相变导致。根据计算82B钢的固相线温度为1358℃,液相线温度为1467℃。本文中出现的 f_s 为该钢种的固相率分数。

3 结果分析与讨论

3.1 拉速对凝固过程的影响

正常生产时,使用结晶器电磁搅拌技术,拉速控制在0.60 m/min,过热度控制在15~40℃,工艺参数中规定使用末端压下制度,但是由于末端过早凝固,实际生产时并未使用末端压下制度。

如果存在一定的应力,本文使用模拟软件的热力耦合模块计算温度场。拉速0.76 m/min、过热度25℃时,根据文献[9-12]及反算出的换热系数,得到的82B钢表面测温与模拟温度的对比图,如图3所示,可以看出宽面中心点Nsc处的计算结果与实测结果较为吻合。同时,在该边界条件下,角部Nen处温度下降过快,矫直区已经下降到900℃以下。中心Net处在15.2 m时已经完成凝固。

由于受二冷区喷水与遮挡影响,本次射钉实验选在二冷区29#~30#号辊之间与矫直辊3#~4#之间。由于铸坯切割与腐蚀的原因,射钉的结果不是很清晰,但是仍然能够判断出液相穴长度,结果如图4(a)所示,根据射

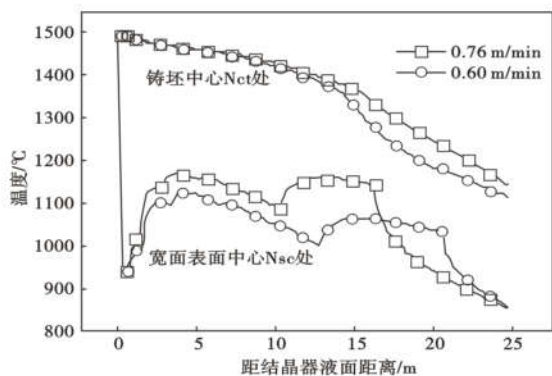


图 5 铸坯拉速 0.76 和 0.60 m/min 时的温度分布曲线
Fig.5 Temperature distribution curves of cast bloom at cast rate 0.76 and 0.60 m/min

钉实验其液相穴长度约 125 mm。根据模拟结果可知,液相穴长度 125 mm 时,约在距结晶器液面 11.65 m 处,正处在二冷区 29#~30#号辊之间。根据图 4(b) 所示,矫直辊 3#~4# 之间的射钉结果显示其已经完全凝固,符合模拟结果。

根据不同的拉速的配水水表,在其他参数不变的情况下,考虑了拉速分别为 0.60、0.76 m/min 时对铸坯凝固过程的影响,如图 5 所示。

根据图 5 所示可知,随拉速的增加,凝固末端 $f_s = 1$ 处后移,拉速为 0.60 m/min 时,其凝固末端约在 11.2 m 处,拉速增加到 0.76 m/min 时,其凝固末端约在 15.2 m 处,后移了 4 m;凝固末端 $f_s = 0$ 处同样后移,其开始凝固处由 2.55 m 增加到 3.28 m 处,后移了 0.73 m;其中心凝固时间由 14.3 min 增加到

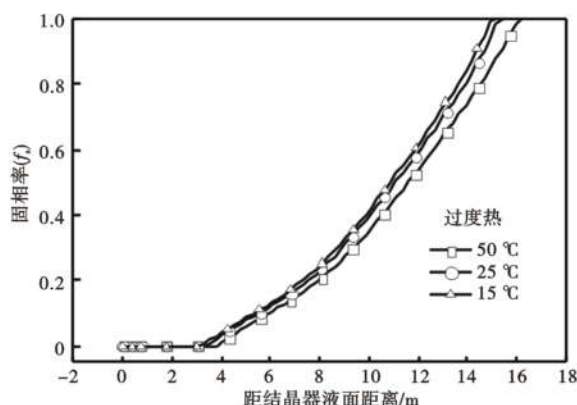


图 7 铸坯中心固相率的分布
Fig.7 Distribution of solidified phase ratio in center of cast bloom

15.7 min,随拉速的增加,中心凝固所需要的时间增加了 9.8%。

当拉速为 0.60 m/min 时,结晶器出口处的两相区分布图,从图 6(a) 中可以看出,宽面中心处的凝固坯壳厚度约 19 mm,两相区分布约 35 mm,液芯约 90 mm;从液相凝固末端时的两相区分布图 6(b) 得出,对应凝固时间约 255 s,到结晶器液面距离约 2.55 m,其宽面中心处的凝固坯壳厚度约 30 mm;从两相区凝固末端时的分布图 6(c) 得出,对应凝固时间约 1 095 s,到结晶器液面距离约 10.95 m。

拉速为 0.76 m/min 时,从结晶器出口处的两相区分布图 6(d) 可以看出,宽面中心处的凝固坯壳厚度约 17.5 mm,两相区分布约 30 mm,液芯约 96.5 mm;从液相凝固末端时的两相区分布图 6(e) 得出,对应凝固时间约 259 s,到结晶器液面距离约 3.28 m,宽面中心处的凝固坯壳厚度约 27.5 mm;从两相区凝固末端时的分布图 6(f) 得出,对应凝固时间约 1 199 s,到结晶器液面距离约 15.19 m,与拉速 0.60 m/min 时相比,凝固末端后移了 4.24 m。

3.2 过热度对凝固过程的影响

在其他参数不变的情况下,考虑了过热度分别为 15、25、50 °C 时对凝固的影响,如图 7 所示。由图 7 可

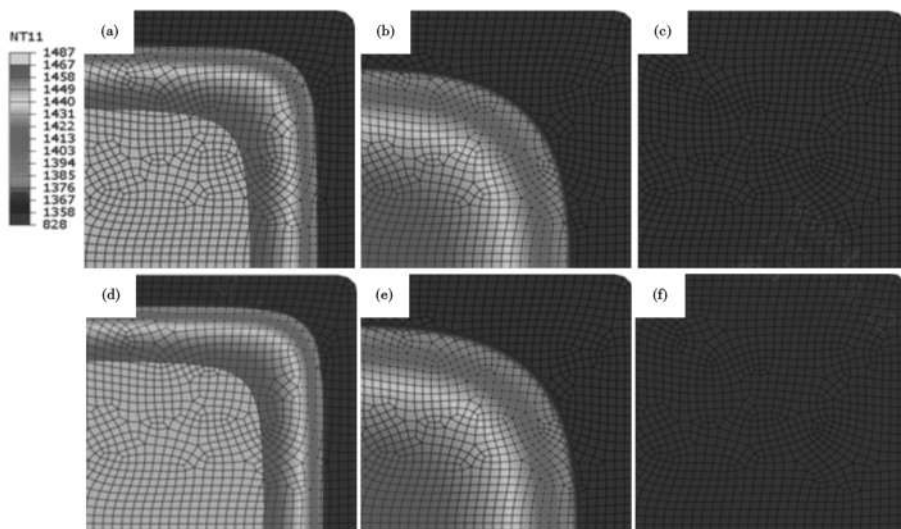


图 6 铸坯凝固过程两相区的区间分布:(a) (d) 结晶器出口处;(b) (e) 液相末端;(c) (f) 两相区末端;(a) (b) (c) 0.60 m/min;(d) (e) (f) 0.76 m/min
Fig.6 Distribution of two-phase region during bloom solidification process:(a) (d) mould exit;(b) (e) liquid phase end,(c) (f) two-phase region end;(a) (b) (c) 0.60 m/min;(d) (e) (f) 0.76 m/min

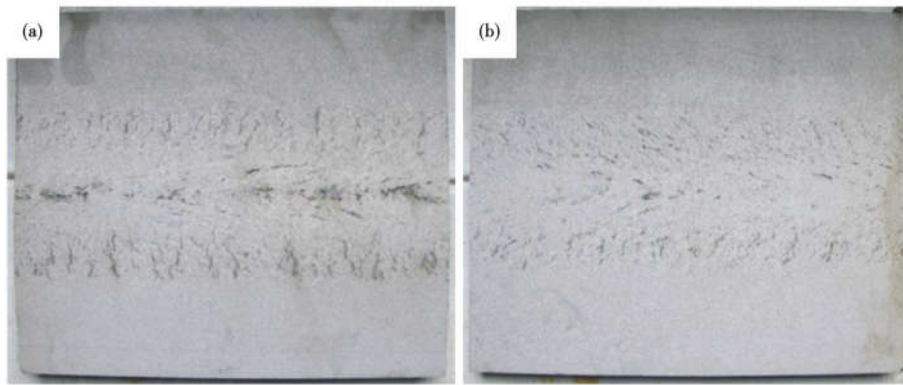


图8 280 mm × 325 mm铸坯的低倍组织:(a)轻压前;(b)轻压后

Fig. 8 Macrostructure of 280 mm × 325 mm cast bloom; before (a) and after (b) soft reduction process

知,随浇注温度的增加,凝固末端 $f_s = 1$ 处后移。浇注温度为1482℃时,其凝固末端约在14.9 m处;浇注温度为1492℃时,其凝固末端约在15.2 m处;浇注温度为1517℃时,其凝固末端后移到16.0 m处。

由图4~图7对比可知,与拉速相比,82B钢种的过热度对凝固过程的影响较小。

根据图6、图7及对比文献[10-12]中的钢种模拟,82B钢种的凝固区间($T_{f_s=0}$ 与 $T_{f_s=1}$ 之差)较大,导致现场生产容易出现中心偏析,控制不当更容易产生缩孔疏松。

3.3 优化工艺

针对模拟情况,82B钢将拉速由0.60 m/min提高到0.76 m/min,并在矫直1#~2#辊实施共6 mm的轻压下,1#、2#距结晶器液面距离分别约为16.2 m、17.7 m,该炉钢水的浇注过热度约为35℃。压下前后的低倍效果如图8所示。对比轻压前后的

图8(a)与轻压下后的图8(b)低倍组织,可以看出铸坯截面的横裂纹、中心裂纹、中心空洞都得到一定程度的优化。虽然得到了很大的改善,但图8(b)仍存在一些小裂纹,以后工艺操作中可以继续优化配水水表并与拉速匹配,调节凝固区间位置,优化轻压下参数,以期取得更好的效果。

4 结论

(1) 拉速为0.60 m/min

时,其凝固末端约在11.2 m

处,拉速增加到0.76 m/min时,280 mm × 325 mm铸坯凝固末端约在15.2 m处,凝固末端 $f_s = 1$ 处位置后移了约4 m;凝固末端 $f_s = 0$ 处同样后移,其开始凝固由2.55 m延长到3.28 m,后移了0.73 m;其中心凝固时间由14.3~15.7 min,随拉速的增加,中心凝固所需要的时间增加了9.8%。

(2) 随过热度由15℃增加到50℃时,凝固末端 $f_s = 1$ 处后移,约后移了1.1 m。

(3) 在矫直1#、2#辊实施轻压下后,铸坯质量得到一定程度的改善。

国家联合基金重点支持项目(U20A20272);河北省钢铁联合基金(E2020402016);辽宁科技大学材料成型与组织性能控制重点实验室开放课题(USTLKFSY201708)

参考文献

- [1] 李峥杰,李志攀. 变形温度及冷却速度对微合金化82B盘条组织和性能的影响[J]. 钢铁钒钛. 2021,42(1):170-175.
- [2] 余超,王晓兰,唐佳勇,等. 帘线钢夹杂物中轻元素F的分析[J]. 物理测试. 2021,39(1):6-10.
- [3] 左小坦,赵立,张洪彪,等. 浸入式水口对82B钢方坯渣沟缺陷的影响[J]. 钢铁. 2020,55(10):43-49.
- [4] 刘宗辉,秦凤婷. 钢包MgO-C砖抗氧化剂对帘线钢酸溶铝的影响[J]. 炼钢. 2020,36(5):69-74.
- [5] 刘毅,张洪起,王凡,等. 控冷工艺对72A帘线钢组织性能的影响[J]. 热加工工艺. 2021,50(7):97-99.
- [6] 孙先焦. 72A帘线钢控冷工艺[J]. 河北冶金. 2020(12):48-53.
- [7] 景财良,许志刚,王鄂,等. 82B帘线钢小方坯凝固组织的CA-Fe法模拟[J]. 铸造技术,2011,32(6):849-853.
- [8] 吕明,米小雨,张朝晖,等. 连铸工艺参数对SWRH82B高碳钢碳偏析的影响[J]. 工程科学学报. 2020,42(S1):102-108.
- [9] 杨跃标. 基于热成像测温的连铸二冷传热系数反算研究[D]. 沈

阳:东北大学,2010.

- [10] 徐东,朱苗勇,祭程,等. SCM435钢大方坯凝固过程组织的模拟[J]. 材料科学与工艺,2012,20(6):121-125.
- [11] 徐东,朱苗勇,祭程,等. 工艺因素对SCM435钢大方坯凝固组织的影响[J]. 材料与冶金学报,2013,12(1):17-22.
- [12] Xu Dong, Liu Hongyi, Cheng Peng, et al. Effect of Casting Temperature on Continuously-Cast Bearing Steel GCr15 Billet Structure Formation[J]. Metallurgist, 2017, 61(1): 19-25.

吕进(1984-),男,硕士研究生(英国谢菲尔德哈雷姆大学),助理工程师,2007年武汉理工大学(本科)毕业,连铸、轧钢等工艺研究。E-mail: lvjinking@163.com

收稿日期:2021-08-09