DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.04.019

连铸坯凝固过程的数值模拟研究

刘俊平[1,2],张朝晖[2],冯　璐[3],鲁慧慧[2],王雪薇[2]

(1. 中国重型机械研究院股份公司,陕西 西安 710032;2. 西安建筑科技大学 冶金工程学院,陕西 西安 710055;3. 西安建筑科技大学 华清学院,陕西 西安 710043)

摘　要:研究了拉速和过热度相关工艺参数对铸坯温度场的影响规律,利用 Fluent 软件模拟石油套管用钢 37Mn5 铸坯的连铸凝固过程,分析了连铸坯凝固传热过程的温度场。讨论了不同过热度和拉坯速度条件下铸坯温度场的分布情况。总结了连铸圆坯凝固过程的传热特点,优化了工艺参数。结果表明,优化后的工艺参数可以指导生产实践。

关键词:连铸坯;凝固过程;数值模拟

中图分类号:TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)04-0379-03

Numerical Simulation on Solidification Process of Continuous Casting Billet

LIU Junping[1,2], ZHANG Zhaohui[2], FENG Lu[3], LU Huihui[2], WANG Xuewei[2]

(1. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Huaqing College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710043, China)

Abstract: The influence of drawing speed and superheat parameters on the temperature field of cast billet was studied. The solidification process of continuous casting of steel 37Mn5 billet for petroleum casing was simulated by software Fluent, the temperature field of solidification heat transfer process of continuous casting billet was analyzed. The distribution of billet temperature field under different superheat and casting speed was discussed. The heat transfer characteristics of continuous cast round billet during solidification were summarized and the process parameters were optimized. The results show that the optimized process parameters can guide the production practice.

Key words: continuous casting billet; numerical simulation; process of solidification

为了解 37Mn5 石油管用钢在生产过程中的质量问题,尤其 37Mn5 连铸坯在连铸工艺过程中出现的缩孔、偏析、卷渣等缺陷。本文基于数值模拟技术应用 Fluent 软件对 37Mn5 钢凝固过程进行数值模拟研究,主要分析连铸坯凝固过程的速度场、温度场和夹杂物分布等因素,从而为实际生产过程提供理论依据,达到优化工艺参数,起到节能降耗的作用。并且通过模拟来调整工艺参数,可以有效减少财力的损耗[1,2]。

1　连铸坯数模假定条件设定

针对模拟连铸坯连铸工艺过程的流场和温度场,设定数值模拟边界条件时,假定:①不考虑连铸坯冷却过程二冷区厚度;②连铸坯凝固过程的热量传输以导热为主;③连铸坯冷却速度和拉坯速度稳定不变;④连铸坯凝固过程物化参数不随温度变化[3-5]。

2　连铸二冷区数值模拟分析

利用 FLUENT 软件从连铸二冷区拉速和浇注温度两个方面进行数值模拟分析,通过浇注过程工艺参数的控制,观察二冷区连铸坯截面的温度场分布。以某钢铁厂生产过程的数据为依据。模拟参数为:浇铸温度为 T=1 510～1 545 ℃,拉坯速度 v= 0.05～2.5 m/s。选取二冷区初段、中段和出口处为研究对象。

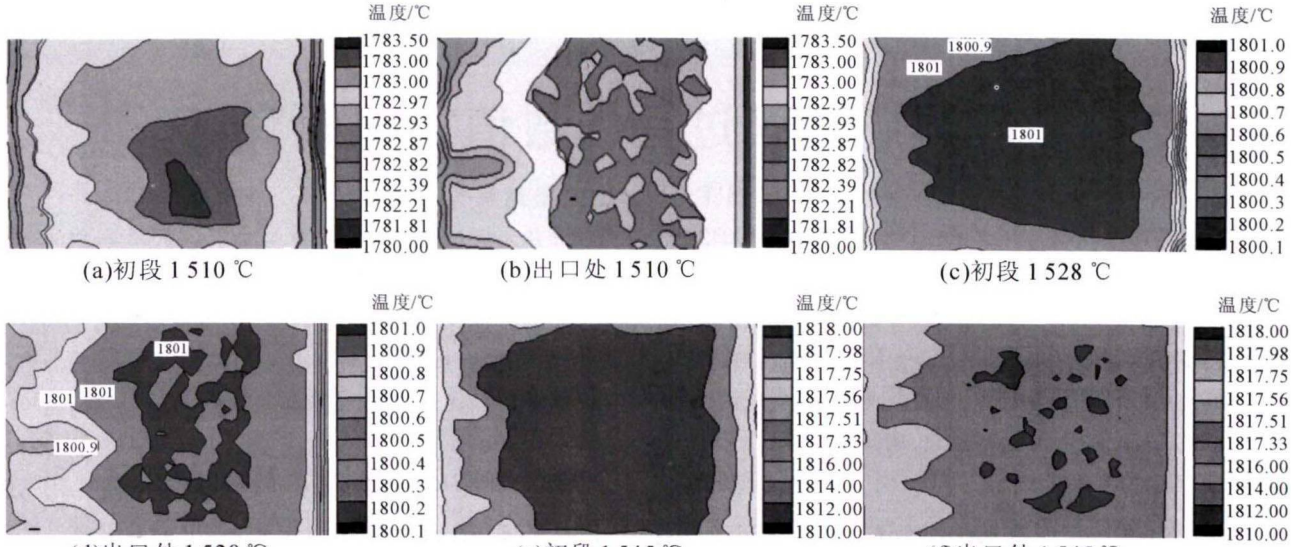
2.1　浇注温度对温度场的影响

分别以 1 510、1 528 和 1 545 ℃浇注温度为研究对象,分别对应的过热度为 7、25 和 42 ℃进行数值模拟分析,设定浇注速度为 0.1 m·s^{-1} 定值的温度场数值模拟,以二冷区浇注入口的初段、中间位置和出口处位置等 3 个位置设定检测对象。图 1 为不同浇注温度下连铸坯的温度场。可以看出,随着浇注温度的变化,连铸坯中间位置的温度场变化比较小,相比较 1 510、1 528 和 1 545 ℃的出口处和入口段温度场的变化,温度梯度过大,后期在凝固过程会产生

收稿日期:2018-10-31

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK1005)

作者简介:刘俊平(1979-),陕西西安人,学士,高级工程师.从事连铸工艺和设备研究.电话:18066851027,E-mail:jdfenglu@126.com



(a)初段 1 510 ℃ (b)出口处 1 510 ℃ (c)初段 1 528 ℃

(d)出口处 1 528 ℃ (e)初段 1 545 ℃ (f)出口处 1 545 ℃

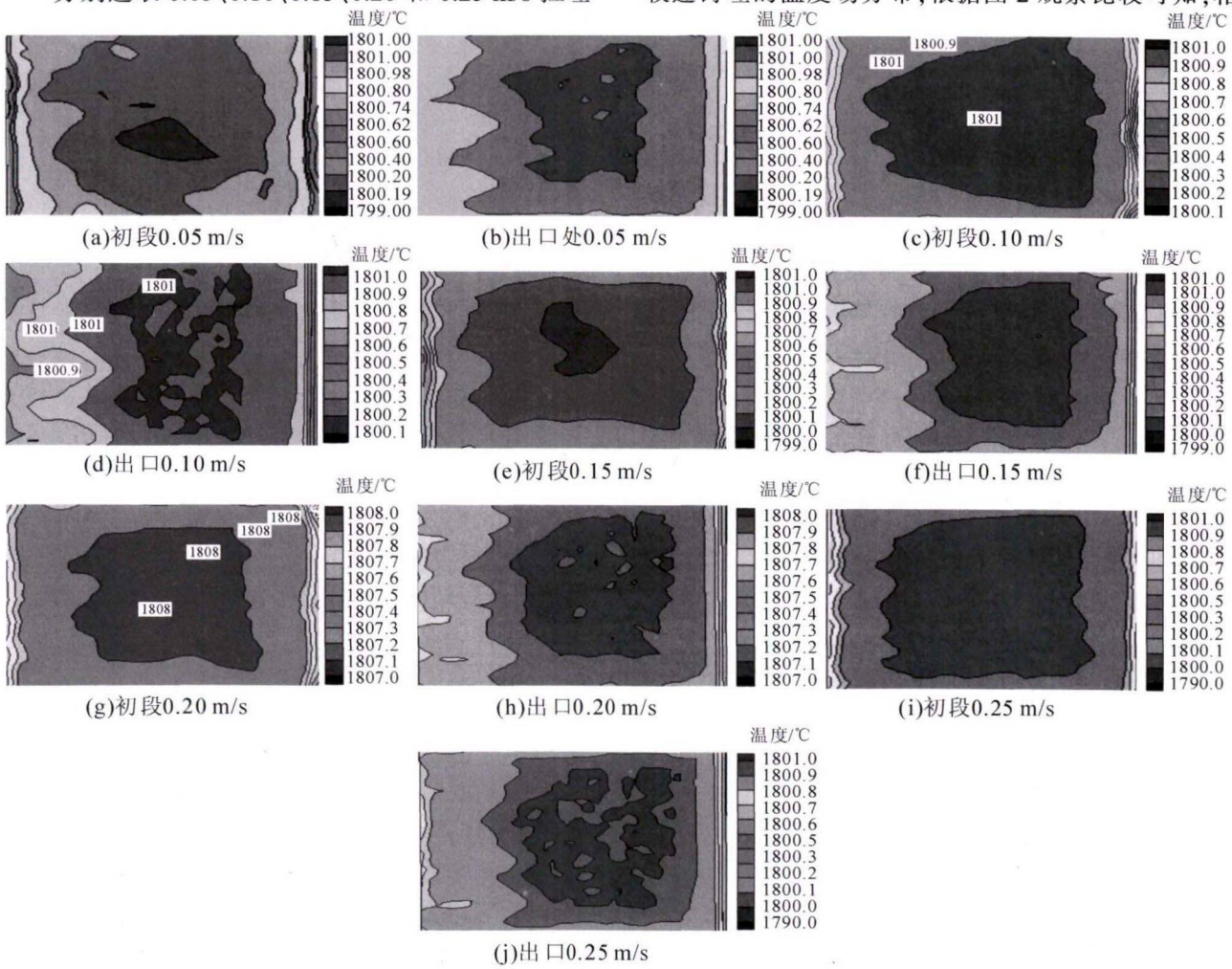
图 1 不同浇注温度下连铸坯的温度场

Fig.1 Temperature distribution of continuous casting under different pouring temperatures

成分偏析和影响下一步浇注工艺；温度梯度过下，在后期轧制过程会造成式样的变形。因此，根据温度梯度分布，选择浇注温度 1 528 ℃最佳。

2.2 拉坯速度对温度场的影响

分别选取 0.05、0.10、0.15、0.20 和 0.25 m/s 拉坯速度为研究对象。分析不同拉坯速度对铸坯温度的影响。以二冷区浇注入口的初段、中间位置和出口处位置等 3 个位置设定检测对象。图 2 为不同拉坯速度下铸坯截面温度分布云图。根据不同拉坯速度比较连铸坯的温度场分布，根据图 2 观察比较可知，相



(a)初段0.05 m/s (b)出口处0.05 m/s (c)初段0.10 m/s

(d)出口0.10 m/s (e)初段0.15 m/s (f)出口0.15 m/s

(g)初段0.20 m/s (h)出口0.20 m/s (i)初段0.25 m/s

(j)出口0.25 m/s

图 2 不同拉坯速度下铸坯截面温度分布云图

Fig.2 Cloud diagram of casting slab temperature with different drawing speeds

（下转第 390 页）

two-step increase in hardness of precipitation hardened CuCoNiBe alloys and characterization of precipitates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701(Complete):116-121.

[8] 李隆盛. 铸造合金及熔炼[M]. 机械工业出版社, 1989.

[9] 汲翠兰. 微量元素对铍青铜材料的影响 // 中国电子学会生产技术学会、中国有色金属学会材料科学与工程学术委员会、中国仪器仪表学会仪表材料学会.第三届弹性合金与工艺学术交流会论文集[C]. 中国电子学会生产技术学会、中国有色金属学会材料科学与工程学术委员会、中国仪器仪表学会仪表材料学会:中国电子学会电子制造与封装技术分会,1991:208-211.

[10] 李永华,潘建立,任海强,等. Ni 对低铍铜合金铸锭组织和硬度的影响[J]. 有色金属加工, 2018, 47(6):22-24,41.

[11] S. Spaić and B. Markoli. Microstructural characterization of alloys of the quasibinary Cu-NiBe system, Z. Metallkd., 94(2003), No.8, p.876.

[12] Shuang-jiang He, Yan-bin Jiang, Jian-xin Xie, et al. Effects of Ni content on the cast and solid-solution microstructures of Cu-0.4wt% Be alloys [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2018, 25(6):641-651.

[13] 杨贵荣,郝远,宋文明,等. 高性能铜材的研究近况[J]. 铸造技术, 2003(1):13-15.

[14] 陈乐平, 周全. 铍铜合金的研究进展及应用 [J]. 热加工工艺, 2009, 38(22):14-18.

[15] 杨复建,梅敬军. 铍青铜热处理工艺的改进[J]. 机电元件, 2004 (3):18-20.

[16] 叶丽梅. 铍青铜热处理工艺研究 [J]. 世界有色金属, 2017(1): 29-30.

[17] 郁龙贵. 热处理对铍青铜组织和性能的影响[J]. 物理测试, 2000 (4):5-8.

[18] 李宁宁,宋克兴,周延军,等. 热处理对 Cu-0.23Be-0.84Co 合金性能和组织的影响 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2015,36(2):10-13,2-3.

[19] 韩明达,朱宝辉,韩俊刚. QBe2 铍青铜棒热处理断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册),2014,50(4):299-302.

[20] 李宁宁. Cu-0.23Be-0.84Co 合金热处理强化工艺及组织性能研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2015.

[21] Zhang H, Jiang Y, Xie J, et al. Precipitation behavior, microstructure and properties of aged Cu-1.7 wt% Be alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 773:1121-1130.

[22] 王荣滨. 铍青铜的热处理缺陷分析和双重时效强化 [J]. 热处理, 2001(3):20-24.

[23] Huang X, Xie G, Liu X, et al. The influence of precipitation transformation on Young's modulus and strengthening mechanism of a Cu-Be binary alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772:138592.

[24] 曹迪,王宇鑫,高伟东,等. 铍青铜材料的加工工艺研究进展[J]. 金属功能材料,2018,25(4):35-40.

[25] Zhou Y J, Song K X, Xing J D, et al. Precipitation behavior and properties of aged Cu-0.23 Be-0.84 Co alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 658:920-930.

[26] Tang Y, Kang Y, Yue L, et al. The effect of aging process on the microstructure and mechanical properties of a Cu-Be-Co-Ni alloy [J]. Materials & Design, 2015,85:332-341.

[27] 宋帆,耿浩,李强. 分级时效处理对铍青铜弹性簧片的组织和性能影响[J]. 中国设备工程, 2016 (9):44-44.

[28] Zhu D B, Liu C M, Han T, et al. Effect of Two-step Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu-2.7 Be Alloys[C] //Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2016, 850:532-535.

[29] 张龙. Cu-Ni-Si 合金回归工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[30] 施永奎. 高强度 QBe2 铍青铜线材的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.

[31] 王迎鲜. 低铍 Cu-0.2Be-XCo 合金热处理工艺及组织性能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.

(上接第 380 页)

比较其它 3 个拉坯速度，拉坯速度 0.10 m/s 的温度场分布均匀,温度梯度变化比较小。

从不同拉坯速度比较可知,冶金长度在浇注初期对于浇注速度影响不大，随着冶金长度的增加，拉坯速度越大,铸坯中心温度越高。相比较在二冷区出口段位置，浇注速度 0.05 m/s 和 0.10 m/s 的出口处的温度相近。铸坯表面温度在不同拉坯速度的情况下变化，相比较其它的拉坯速度，浇注速度 0.10 m/s 的温度梯度变化量比较小，有利于降低凝固过程偏析和疏松现象的发生。

3 总结

相比较 1 510、1 528 和 1 545 ℃的出口处和入口段温度场的变化,温度梯度过大,后期在凝固过程会产生成分偏析和影响下一步浇注工艺;温度梯度过小,在后期轧制过程会造成式样的变形。因此根据温度梯度分布，易于选择浇注温度 1 528 ℃最佳;相比较其它的拉坯速度,浇注速度 0.10 m/s 的温度梯度变化量比较小,有利于降低凝固过程偏析和疏松现象的发生。

参考文献:

[1] 王社教. Q345E 钢 ϕ600 mm 大圆坯生产工艺及质量控制研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2014.

[2] 章裕琳. 板坯连铸凝固传热及鼓肚变形分析[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2011.

[3] 方庆. Q345E 钢 ϕ600 mm 大圆坯连铸凝固数值模拟 [J]. 炼钢, 2014, 30(5): 57-61.

[4] 冯科. 方坯连铸二冷仿真数学模型的改进性研究[J]. 炼钢, 2006 (3): 49-53.

[5] 李慧春. 连铸坯凝固传热过程的数值模拟[D]. 兰州:兰州理工大学, 2008.