DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.003

GCr15 轴承钢大方坯连铸过程凝固传热数值模拟

张振学,张　慧,王明林,李鹏飞,王学兵
(钢铁研究总院 连铸技术国家工程研究中心,北京 100081)

摘　要:以某钢厂生产的 GCr15 轴承钢为研究对象,建立了 GCr15 轴承钢大方坯的凝固传热数学模型,结合现场的测温实验数据验证了模型的可靠性。研究了拉速的变化对坯壳厚度、铸坯横截面上各特征点温度的影响。结果表明,拉速每提高 0.1 m/min,铸坯中心液相线温度(1 460 ℃)与固相线温度(1 325 ℃)所在位置分别向后推迟了 1.1 m 与 4.1 m。在铸坯凝固初期与凝固末期,坯壳生长速度较快。原因是在结晶器内的冷却强度较大,冷却速率较大,促使铸坯的凝固速率较高;在凝固末期,钢液的过冷度较大,同时铸坯中心部位以等轴晶的形式凝固,促使凝固末期的坯壳厚度增长较快。

关键词:轴承钢; 凝固传热; 数值模拟
中图分类号: TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)08-0763-05

Mathematical Simulation of Heat Transfer During Solidification of GCr15 Bearing Steel

ZHANG Zhenxue, ZHANG Hui, WANG Minglin, LI Pengfei, WANG Xuebing
(National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Taking GCr15 bearing steel produced by a steel plant as the research object, the mathematical model of solidification heat transfer of GCr15 bearing steel billet was established. The influence of the change of drawing speed on the shell thickness and the temperature of each characteristic point on the cross section of the billet was studied. The results show that the speed drawing increasing of 0.1 m/min, slab center the liquidus temperature (1 460 ℃) and solidus temperature of (1 325 ℃) location backward will delayed by 1.1 m and 4.1 m, respectively. At the beginning and the end of solidification, the shell growth rate is faster. The reason is that the solidification rate of the billet is higher because of the higher cooling strength and cooling rate in the mold. At the end of solidification, the supercooling degree of molten steel is large, and the central part of the billet solidifies in the form of equiaxed crystal, which promotes the rapid growth of shell thickness at the end of solidification.

Key words: bearing steel; heat transfer of solidification; mathematical simulation

连铸的本质是一个凝固传热过程,过热的钢液从中间包通过浸入式水口进入结晶器后,在铜板强制冷却的作用下,部分过热的钢液凝固形成坯壳;连铸坯从结晶器拉出后进入足辊段、二冷区、空冷段,铸坯表面接受喷水冷却或喷雾冷却等,热量以辐射、对流、传导的形式向外界传输,最后钢液全部凝固。连铸坯的质量,包括裂纹、偏析等缺陷的形成都与铸坯凝固过程温度场的分布息息相关。了解铸坯的凝固传热过程对铸坯质量的改善以及连铸工艺参数的确定有重要的意义,尤其对大方坯凝固末端轻压下位置区间的选择有重要影响,轻压下对铸坯内部的疏松缩孔、偏析、内部裂纹等有着重要影响[1]。

本文以 GCr15 轴承钢(连铸坯断面尺寸为 280 mm×320 mm)为研究对象,利用 Ansys 仿真模拟软件建立了铸坯凝固传热的二维非稳态方程,并通过现场实际测温数据检验了模型的可靠性。讨论了铸坯凝固过程中各特征点处的温度变化,以及在不同拉速条件下坯壳厚度的生长状况,从而为凝固末端轻压下位置的选择提供可靠的理论依据。

1　连铸过程数学模型的建立

1.1　模型的基本假设

在实际的连铸坯凝固的过程中,往往是多种物质、多种形态(液、固及液固两相区)共同存在,并且同时进行着多个过程。一般说来,连铸过程包括下列物理现象:①在液相区的湍流流动和热量传递;②在两相区的流体流动、对流导热和溶质的扩散;③在固

收稿日期: 2018-04-28
作者简介: 张振学(1990-),河北衡水人,硕士生.主要从事连铸坯质量控制方面的工作.电话:18301026106,
E-mail:3316698691@qq.com

液界面的相变过程；④材料的热物性参数（如导热系数、比热容、粘度等）随温度的变化。

除上述的物理现象外，应力分布也影响铸坯的凝固过程，固相形核及晶体长大、溶质分配的热力学平衡、微观偏析和液态及固态的成分扩散都影响着溶质传输过程的进行，过热的消除影响铸坯下部的等轴晶形成，而等轴晶的形成又通过宏观和微观尺度上富集液体的分配影响着流动过程的形成。以上各物理化学现象之间相互影响，而建立铸坯的凝固传热数学模型是一个逐步逼近的过程。在研究过程中，为使计算过程相对简化，在凝固传热数学模型的建立过程中忽略一些影响相对较小的因素。基于连铸坯凝固特有的性质，对模型作如下假设[2-6]：①将钢液视为不可压缩的牛顿流体；②将钢液的热物理参数均定义为常数；③忽略在凝固过程中钢密度产生的变化；④忽略结晶器内上表面钢液的散热及液面的波动；⑤忽略铸坯在连铸机运行过程中的弯曲效应和矫直效应；⑥连铸坯的外弧与内弧宽面、右侧与左侧窄面的传热条件对称；⑦不考虑铸坯机械变形引起的内部钢液的流动和铸坯凝固收缩引起的流动。

1.2 控制方程

连铸坯凝固的传热过程比较复杂，基于以上假设的条件下，采用二维切片法模拟铸坯的凝固过程，GCr15 轴承钢大方坯传热的二维非稳态微分方程可以简化为（1）式。

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+S_0 \tag{1}$$

式中，ρ 钢的密度，kg/m^3；c 钢的比热容，J/(kg·℃)；T 模型节点的温度，℃；t 凝固时间，s；k_{eff} 钢的导热系数，W/(m·℃)；x 铸坯宽度方向的坐标，m；y 铸坯厚度方向的坐标，m；S_0 是固液两相区的凝固潜热，即内热源项，W/m^3。

1.3 定解条件

1.3.1 初始条件

在本模型中假设结晶器内上表面的钢液温度等于铸坯的浇铸温度，即中间包内钢液的温度。

$$T_{t=0}=T_0 \tag{2}$$

式中，T_0 中间包钢液温度；t 铸坯经历的传热时间。

1.3.2 边界条件

由于大方坯的内外弧及左右侧之间的凝固传热条件具有非常高的对称性，故在建立凝固传热模型时，只取大方坯横截面内弧侧的 1/4 进行研究。

（1）在模型的中心位置上，由于传热条件的对称性，故将铸坯中心的对称面设置为绝热面，即，

$$-k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial x}=0 \tag{3}$$

$$-k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial y}=0 \tag{4}$$

（2）在固液两相区内已凝固坯壳边缘上的温度等于 GCr15 轴承钢的固相线温度，即，

$$T_{(x_s,t)}=T_s \tag{5}$$

式中，x_s 为铸坯已凝固坯壳的厚度，mm；T_s 为 GCr15 轴承钢的固相线温度，1 325 ℃。

（3）在结晶器内，铸坯与铜板接触的边界上热流密度按式（6）进行取值计算：

$$q=A-B\sqrt{t} \tag{6}$$

式中，A，B 常数；q 结晶器的热流密度，W/m^2，t 为二维切片在结晶器内的经历的传热时间。

（4）二冷区内取给定换热系数的边界条件：

$$q=h(T_f-T_w) \tag{7}$$

式中，T_f 铸坯表面温度，℃；T_w 冷却水温度，℃；h 对流换热系数，W/(m^2·℃)。

对流换热系数与水流密度及铸坯的表面状态有关，由经验公式计算：

$$h=CW^{\beta} \tag{8}$$

式中，C 常数，本文中 C=0.3；W 水流密度，L/(m^2·s)；β 常数，本文中 β=0.556。

（5）空冷区辐射换热的边界条件：

$$q=\varepsilon\sigma(T_f^4-T_e^4) \tag{9}$$

式中，ε 铸坯表面黑度，本文中 ε=0.8；σ 斯蒂芬－玻尔兹曼常数，σ=5.76×10^{-8}；T_e 环境温度，K。

1.4 GCr15 轴承钢热物性参数的选取

1.4.1 潜热的处理

在固液两相区内采用等效热容法处理凝固过程中潜热的释放，凝固过程中钢的热容为：

液相区：$C=C_L$

固相区：$C=C_S$

两相区：$C=C_L+\dfrac{\Delta H_m}{T_L-T_s}$

式中，C_L 液态钢的热容，J/kg·K；C_S 固态钢的热容，J/kg·K；ΔH_m 凝固潜热，J/kg；T_L GCr15 轴承钢的液相线温度，1 460 ℃；T_S GCr15 轴承钢的固相线温度，1 325 ℃。

T_L、T_S 分别由下式计算：

$$T_L=1\,536-(90[C\%]+6.2[Si\%]+1.7[Mn\%]+28[P\%]+40[S\%]+2.6[Cu\%]+2.9[Ni\%]+1.8[Cr\%]+5.1[Al\%])$$

$$T_S=1\,536-(415.3[C\%]+12.3[Si\%]+6.8[Mn\%]+124.5[P\%]+183.9[\%S]+2.6[Cu\%]$$

+4.3[Ni%]+1.4[Cr%]+4.1[Al%])

1.4.2　导热系数的处理

在液相区，由于存在钢液的对流效应，使钢液内部实际的导热系数要比静止时的导热系数大很多。采用放大导热系数的方法处理液相的有效导热系数，即将液相区的导热系数设置为静止钢液导热系数的 θ 倍，θ 根据经验来确定。在固液两相区内，有效导热系数根据固相率的大小来确定。有效导热系数计算方法如下：

液相区：$\lambda=\theta\lambda_L$

固相区：$\lambda=\lambda_S$

固液两相区：$\lambda=(1-f_S)\theta\lambda_L+f_S\lambda_S$

式中，λ_L 液态钢的导热系数，W/m·℃；λ_S 固态钢的导热系数，W/m·℃；$f_s=\frac{T_L-T}{T_L-T_S}$ 两相区内局部区域的固相率。

1.5　模型的计算条件

铸机的设备参数如表 1 所示，GCr15 轴承钢浇铸的工艺参数如表 2 所示，GCr15 轴承钢的热物性参数如表 3 所示。

表1 连铸机的设备参数/mm
Tab.1　Equipment parameters of continuous caster

断面尺寸	结晶器长度	足辊段	二冷一区	二冷二区	二冷三区	二冷四区
280×320	750	560	1 520	2 340	2 490	2 600

表 2 GCr15 轴承钢的浇铸工艺参数
Tab.2 Casting parameters of GCr15 bearing steel

过热度/℃	拉速/(m·min^{-1})	结晶器水量/(L·min^{-1})	温差/℃	比水量/(L·kg^{-1})
20	0.7	2 850	5.5	0.2

表 3 GCr15 轴承钢的热物性参数
Tab.3 Thermal-physical parameters of GCr15 bearing steel

液相线温度/℃	固相线温度/℃	导热系数/W/(m·℃)	比热容/J/(kg·C)	密度/kg·m^{-3}	凝固潜热/kJ/kg
1 454	1 328	29.7	5.5	0.2	300

1.6　计算区域的网格划分状况

为使模型的计算结果更加靠近真实的浇铸状况，同时考虑到模拟计算过程的收敛状况，使用了三节点三角形单元对铸坯横截面的 1/4 部分进行了网格划分，共产生 3 208 个单元、6 567 个节点，划分结果如图 1 所示。

2　凝固传热模型的验证

利用 Ansys 模拟仿真软件，对 GCr15 轴承钢大方坯的连铸过程进行了二维切片的模拟计算。为了验证模型的可靠性，在拉速为 0.7 m/min，过热度为 20 ℃，二冷比水量为 0.2 L/kg 的工况下，使用红外测温仪（测温为 600~1 800 ℃），对现场实时生产的轴承钢连铸坯，在距弯月面的不同位置处对大方坯窄面中心进行了实际测温，测温结果与模拟结果如表 4 所示。

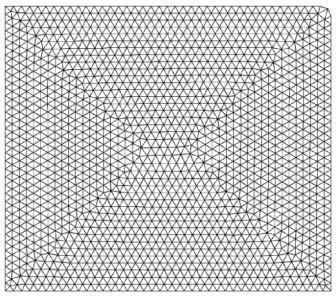


图 1　计算区域的网格划分
Fig.1　Gridding of computational domain

表4 方坯窄面中心温度的测试结果
Tab.4 Measure narrow side center temperature of GCr15 bearing steel

距弯月面的距离/m	实测温度/℃	计算温度/℃	绝对误差/℃	相对误差(%)
16.19	970	965	5	0.52
17.67	950	943	7	0.74
23.15	860	855	5	0.58
25	830	826	4	0.48
27.2	795	791	4	0.50

窄面中心的测温数据与建立的凝固传热模型所计算结果契合度较高，表明了模型的可靠性较高，如图 2 所示。建立的模型可用于计算 GCr15 轴承钢连铸坯在其他生产工况下的传热状况，为实际浇铸工艺参数的选择提供参考。

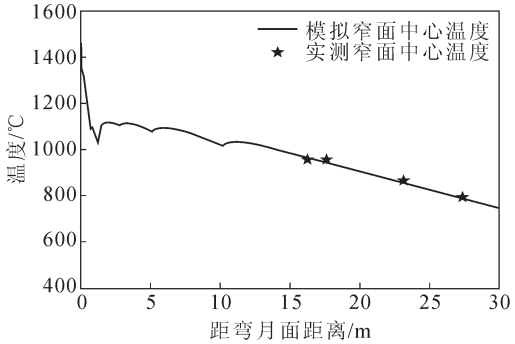


图 2　模型计算温度与实测温度的对比
Fig.2　Compare of calculated and measured temperature

3　计算结果及分析

3.1　同一拉速铸坯各特征点温度的变化

对拉坯速度为 0.7 m/min、过热度为 20 ℃、比水量为 0.2 L/kg 的工况进行模拟，由图 3 可以明显的看出：随距弯月面距离的增加，铸坯中心、铸坯角部、宽面中心、窄面中心的温度，总体上呈现下降的趋

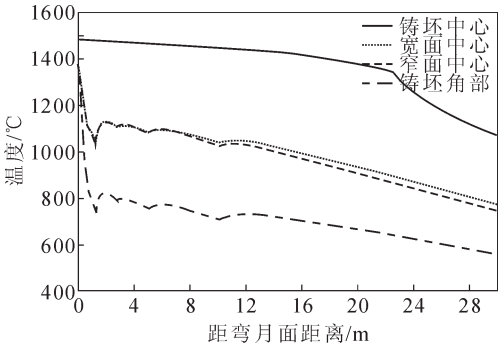


图 3 方坯各特征点的温度变化

Fig.3 Temperature variation of each characteristic point of the square billet

势，但除铸坯中心点外，在其他三个特征点温度变化的过程中均出现了不同程度的温度回升现象。这是由于在实际的连铸过程中，铸坯在铸机不同冷却段内的冷却条件是不同的，冷却强度的减弱会造成在短时间内铸坯内部传递到表面的热量大于铸坯表面向外界的散热量，从而导致铸坯表面温度的升高。在足辊段、扇形段一段、扇形段二段、1# 矫直辊之前各段的最高返温分别为 3.5、86、22 和 18 ℃。在足辊段内的返温不是特别剧烈，因为铸坯在足辊段直接接受大量的喷水冷却，使其与结晶器内的冷却强度相差不大。铸坯出足辊段，进入第一扇形段后，两者冷却强度相差较大，造成铸坯表面回温幅度较大，较大的回温会对铸坯表面质量产生不利影响，应使回温幅度控制在可接受的范围之内。在 23 m 左右时，铸坯中心温度的降低速率明显加快，这是由于凝固潜热已全部释放完毕，铸坯中心温度下降到固相线温度 1 325 ℃之下。同时可以明显的看出，在距弯月面相同距离处铸坯中心、宽面中心、窄面中心、铸坯角部温度依次降低，如在结晶器出口其温度分别为 1 480、1 104.2、1 099.9、834.9 ℃。由此可见，铸坯宽面中心与窄面中心温度相差不大，但与角部温度相差较大，这是由于铸坯角部在宽面和窄面同时与外界进行热量的交换，因此角部属于二维传热的状况，冷却能力较强造成的。

对同一工艺条件下铸坯在不同冷却段的降温幅度是不同的。以铸坯宽面表面的中心为例，铸坯在结晶器内部、足辊段、扇形段一段、扇形段二段、矫直开始之前的空冷段、矫直开始至铸机出口空冷段的降温幅度分别为 376、60、-32.5、43.9、39.6 和 135.3 ℃。铸坯在结晶器内强制冷却的作用下，温度降幅较大；在扇形段一段内出口温度高于入口温度，主要是由于足辊段与扇形段一段内水流密度相差较大，造成表面的返温现象；而在矫直开始至铸机出口降温幅度较大是由于空冷段较长，空冷距离约为 13.8 m。

3.2 拉速对坯壳厚度的影响

在图 4 中可以看出随着拉速的增加，铸坯完全凝固的位置明显向后移动。拉速为 0.6 m/min 时，铸坯中心点温度降低到的液相线与固相线温度时分别距弯月面 5.88 m 与 18.9 m；拉速为 0.7 m/min 时，铸坯中心点温度降低到的液相线与固相线温度时分别距弯月面 7 m 与 22.94 m；拉速为 0.8 m/min 时，铸坯中心点温度降低到的液相线与固相线温度时分别距弯月面 8.06 m 与 27.08 m。可以看出拉速每增加 0.1 m/min，铸坯中心达到液相线温度时薄片所在位置向后推迟 1.1 m 左右，而铸坯中心达到固相线温度时则向后推迟约 4.1 m，导致铸坯心部的固液两相区被拉长 3 m 左右。同时可以明显的看到，在各种拉速状况下，凝固坯壳在初始阶段与凝固即将结束阶段增长较快。这是由于在初始阶段，由于结晶器与足辊段的冷却强度较大，带走了过热钢液的大量热量，导致坯壳增长迅速；而在扇形段内与空冷段冷却强度较低，固相线向铸坯心部移动的速率变缓；在凝固末期，凝固潜热逐渐释放完成，未凝固钢液的过冷度较大，同时大方坯的心部以等轴晶的形式凝固，从而造成凝固末期铸坯坯壳增长较快。

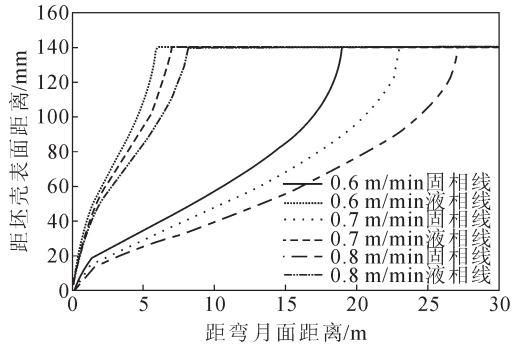


图 4 不同拉速对 GCr15 轴承钢坯壳厚度分布的影响

Fig.4 Influence of casting speed on shell thickness of GCr15 bearing steel

3.3 拉速对特征点温度的影响

在过热度与二冷比水量保持不变的情况下，研究了铸坯拉速的变化对 GCr15 大方坯横截面上不同节点处温度的影响。从图 5 中可以明显看出，随着拉速的提高，在距弯月面相同距离处各特征点的温度在总体趋势上都有所升高。拉速的提高造成铸坯在不同冷却段内的停留时间减少，相应冷却时间减少，造成各特征点处温度的升高。同时，在不同冷却段内，拉速对各特征点温度的影响是不同的，在前期有冷却水强制冷却的条件下，拉速变化造成的温度变化幅度较小；而在后期的空冷段，拉速对铸坯温度的影响更加明显。以拉速 0.7 m/min 提高到

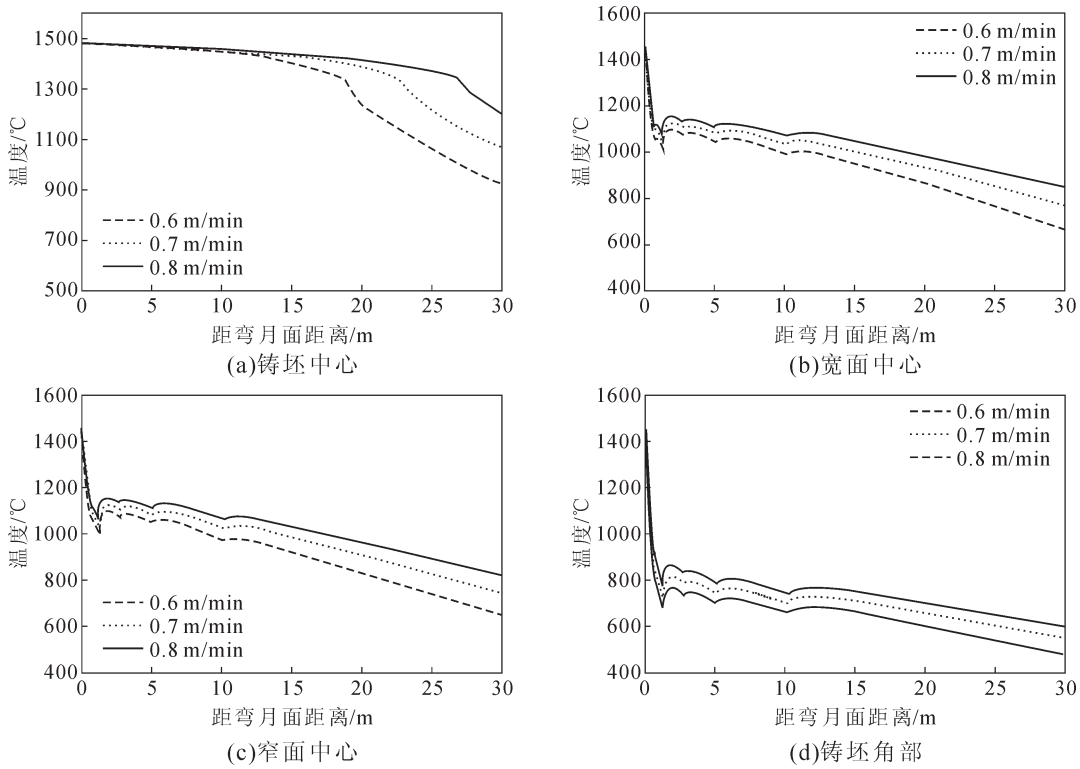


图 5　不同拉速对铸坯各特征点温度的影响

Fig.5　Effect of different casting speed on the temperature of each characteristic point of the billet

0.8 m/min 为例进行说明，对铸坯表面的宽侧中心而言，在结晶器末端、足辊段结束处、第一扇形段末、第二扇形段末、脚趾开始位置、铸机出口处，温度分别提高了 5.5、25.3、28、36.4、47.8 和 65.3 ℃。可见随着铸坯距弯月面距离的增加，拉速变化导致的铸坯表面温度的变化更加明显。同时，研究铸坯中心点的温度的变化，可以推算出中心位置处的固相率，从而可以为凝固末端的轻压下工艺位置的选择提供参考。在拉速为 0.7 m/min、过热度为 20 ℃、二冷比水量为 0.2 L/Kg 的工况下，在凝固末端轻压下的起始位置（距弯月面 16.19 m）铸坯中心的固相率约为 0.31，而在凝固末端轻压下的结束位置（距弯月面 21.81 m）铸坯中心的固相率约为 0.76，从而保证了良好的压下位置区间的选择。

4　结论

（1）通过与实际测温数据对比，本文建立的凝固传热数学模型已将计算误差控制在合理范围内，因此本模型可用于 GCr15 轴承钢的传热过程的模拟研究。

（2）从模拟结果可以看出铸坯中心点、铸坯表面的宽面中心、铸坯表面的窄面中心、铸坯角部的温度依次降低，且铸坯表面宽面中心温度与窄面中心温度相差不大。

（3）伴随着浇铸速度的增加，距结晶器弯月面相同距离处，坯壳厚度变的更薄；拉坯速度每增加 0.1 m/min，铸坯中心点的固相线温度与液相线温度所在位置距弯月面的距离分别推迟了 1.1 m 和 4.1 m。

（4）拉速的增加，造成距弯月面相同距离处，铸坯各点的温度均有所增加，当拉速由 0.7 m/min 提高到 0.8 m/min 时，对铸坯表面的宽侧中心而言，在结晶器末端、足辊段末、第一扇形段末、第二扇形段末、矫直开始位置、铸机出口处，温度分别提高了 5.5、25.3、28、36.4、47.8 和 65.3 ℃。

参考文献：

[1] 安航航，包燕平，王敏，等. 凝固末端电磁搅拌和轻压下复合技术对大方坯高碳钢偏析和中心缩孔的影响[J]. 北京科技大学学报, 2017, 39(7):996-1007.

[2] Louhenkilpi S, Laitinen E, Nieminen R. Real-time simulation of heat transfer in continuous casting [J]. Metallurgical Transactions B, 1993, 24(4):685-693.

[3] 肖超，张炯明，罗衍昭，等. 大方坯连铸过程凝固规律[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(9):1011-1016.

[4] 铁占鹏，王宝峰，高志冉，等. 20CrMnTi 连铸大方坯凝固规律的模拟计算[J]. 连铸, 2014(3):43-48.

[5] Lally B, Biegler L, Henein H. Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting [J]. Metallurgical Transactions B, 1990, 21(4):761-770.

[6] Wang H, Li G, Lei Y, et al. Mathematical Heat Transfer Model Research for the Improvement of Continuous Casting Slab Temperature [J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2006, 45(9):1291-1296.