

Q235B 钢板坯连铸凝固传热行为的数值模拟计算

谢集祥^{1,2} 罗 钢² 刘 浏¹ 汪成义¹

(1 钢铁研究总院冶金工艺研究所,北京 100081;2 湖南华菱涟源钢铁集团有限公司,娄底 417009)

摘 要 基于涟钢板坯连铸机结构参数和冷却条件,建立了 Q235B 230 mm × 1 280 mm 板坯连铸过程凝固传热的数值模型,研究了铸坯温度分布和坯壳厚度变化规律以及过热度 and 拉速对铸坯温度和凝固末端位置的影响规律。得出:随过热度 and 拉速的增加,铸坯中心和角部温度整体呈升高趋势,在其它参数不变的条件下,过热度每升高 10 ℃,铸坯凝固末端和液相消失位置分别后移约 0.38 m 和 0.31 m;拉速每升高 0.1 m/min,凝固末端和液相消失位置分别后移 2.06 m 和 1.4 m。通过数值模拟研究,掌握了铸坯温度和凝固末端位置的变化规律。

关键词 Q235B 钢 板坯 凝固传热 数值模拟

Numerical Simulation Calculation of Solidification & Heat Transfer Behavior of Steel Q235B Slab in Continuous Casting

Xie Jixiang^{1,2}, Luo Gang², Liu liu¹ and Wang Chengyi¹

(1 Institute of Metallurgical Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;
2 Hunan Valin Lianyuan Iron and Steel Co., Ltd, Loudi 417009)

Abstract Based on the structural parameters and cooling conditions of Liansteel slab caster, a numerical model of solidification & heat transfer during steel Q235B 230 mm × 1 280 mm slab continuous casting is established. The temperature distribution of slab and the variation of shell thickness are studied, and the effects of superheat and casting speed on the temperature of slab and the position of solidification end are also studied. It is concluded that with the increase of superheat and casting speed, the temperature at the center and corner of billet increases as a whole. With the same other parameters, the solidification end and the disappearance position of liquid phase move backward 0.38 m and 0.31 m respectively with every 10 ℃ of superheat increase, and the solidification end and the disappearance position of liquid phase move backward 2.06 m and 1.4 m respectively with every 0.1 m/min increase of casting speed. Through numerical simulation, the variation of slab temperature and solidification end position are mastered.

Material Index Steel Q235B, Slab, Solidification & Heat Transfer, Numerical Simulation

连铸凝固过程的工艺控制直接影响着铸坯的表面和内部质量,由于铸坯凝固过程存在着质量、动量和热量的传递,且无法通过测量工具进行直观的判断。通过计算机数值模拟可以掌握凝固过程各阶段的内部变化规律,分析连铸工艺参数变化对铸坯坯壳凝固和传热行为的影响,从而可为实际生产工艺参数的合理控制提供理论指导。国内外学者通过 ANSYS、Procast 等软件对铸坯凝固和传热做了大量模拟计算,对本研究工作提供了参考^[1-5]。

本文以涟钢板坯连铸机浇铸 Q235B 钢的连铸过程为研究对象,采用 ANSYS 有限元分析软件,建立涟钢板坯连铸凝固传热数学模型,研究连铸过程中板坯温度和坯壳厚度分布,以及拉速和过热度对其的影响。主要研究内容包括:根据板坯连铸结晶器和二冷冷却条件,计算连铸过程中不同时刻铸坯横截面温度场;研究铸坯横截面温度分布规律和凝固末端位置以及不同拉速和过热度条件下,铸坯截面温度和凝固末端位置分布规律,为射钉试验和轻

压下的设计提供参考。

Q235B 钢主要元素及含量(%)为:0.17C-0.12Si-0.30Mn-0.018P-0.016Al。板坯断面尺寸为 1 280 mm × 230 mm,板坯结晶器总高度 900 mm,有效高度 800 mm。二冷区包括 16 个段,总冷却长度为 37.78 m,由于受计算条件的限制,本次只计算二冷区喷水段,总计 27 m。结晶器和二冷各区冷却条件分别列于表 1 和表 2。

1 模型建立

连铸过程中,钢水从浸入式水口流入结晶器中,经结晶器和二冷区冷却逐渐凝固成为铸坯。若将坐

表 1 结晶器冷却条件
Table 1 Cooling conditions of mold

项目	位置			
	左侧窄面	外弧宽面	内弧宽面	右侧窄面
冷却水量/(L · min ⁻¹)	396	3 905	3 930	402
回水温度/℃	7.6	4.5	4.5	7.5

表 2 二冷各区喷淋范围和冷却水量
Table 2 Water volume in each secondary cooling zone

位置	足辊段	0 段				扇形段				
		1 区	2 区	3 区	1 区	2+3 区	3+4+5 区	7+8 区	9+10+11 区	
冷却水量/(L·min ⁻¹)	144	384	344	300	150	152	120	68	66	

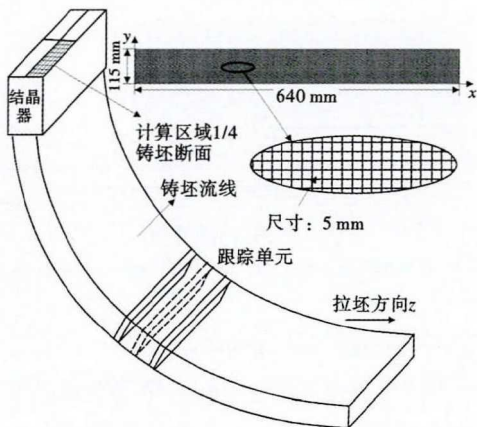


图 1 连铸过程凝固传热二维切片模型

Fig. 1 Two-dimensional slice model of solidification & heat transfer in continuous casting process

标系固定于铸坯界面中心,连铸过程中将铸坯视为一系列移动薄片组成,沿拉速方向的导热忽略不计,连铸凝固传热过程可通过建立铸坯界面二维切片模型来描述。本文采用 ANSYS 有限元分析软件建立 1/4 铸坯切片模型,如图 1 所示。

2 模型假设

连铸坯凝固过程由传热和传质两个方面组成,两者之间相互影响。传热过程在实际生产中不仅受浇注条件(钢种、过热度、拉速等)和冷却条件(冷却水量以及环境温度等)的影响,也受设备条件(足辊与铸坯间传热以及二冷喷嘴冷态性能等)和冷却水特性的影响。由于铸坯凝固传热过程十分复杂,数学模型有必要进行以下假设^[6-7]:

(1)连铸过程沿拉坯方向的热量损失很小,占总热量的 3%~6%,因此主要考虑横向传热,忽略弯月面处的复杂传热;

(2)铸坯内的两相区和液相区的对流状态对传热的影响,可用增大导热系数的方法来等效,即把对流传热等效成传导传热计算;

(3)钢的热物理特性在液态、两相区以及固态为分段常数,且各项同性;

(4)凝固潜热采用等效比热容的方法进行处理;

(5)连铸机二冷区同一段设为均匀冷却,铸坯

内外弧传热条件对称;

(6)忽略铸坯凝固收缩。

3 求解条件

(1)结晶器。Savage 通过测定结晶器内热流与钢液停留时间的关系,得出结晶器壁与铸坯界面间局部热流密度 q 的计算公式^[8-9]如下:

$$q = 2.688 - 0.335\sqrt{t} = 2.688 - 0.335\sqrt{z/\nu} \text{ MW/m}^2 \quad (1)$$

式中: t -时间/s; z -距结晶器弯月面的距离/m; ν -拉速/(m·min⁻¹)。

(2)二冷区。铸坯中心钢液热量通过坯壳传导至表面,喷水到达铸坯表面把热量带走,表面温度突然降低,中心与表面之间形成较大的温度梯度。二冷区铸坯表面热量传递有以下方式:①铸坯表面向空气中辐射 25%;②喷水蒸发 33%;③喷淋水滴浸渍 25%;④足辊与铸坯接触传导 17%。

很多模型为简化计算,往往不考虑足辊与铸坯的传导传热,忽略这部分计算必然会使模拟过程与实际过程有很大的出入。本文将铸坯与足辊的导热折合成对流传热,因而采用综合换热系数处理。

二冷区综合传热系数是描述二冷区传热效果和连铸计算的重要参数,它与水流密度、水温、喷嘴类型、喷嘴布置及铸坯表面状态有关,国内外学者对传热系数进行了大量的测定和研究,在此采用 Nozaki 的经验公式。

$$h = 0.3925 W^{0.55} \times (1 - 0.0075 Tw) \quad (2)$$

式中: Tw -冷却水温度/K; W -冷却强度/[L·(m²·s)⁻¹]。

4 计算分析

4.1 铸坯温度和坯壳厚度分布

根据上述初始条件和边界条件,计算铸坯截面温度和坯壳厚度分布,研究其分布变化规律。首先分析在拉速 1.1 m/min 和过热度 20 °C 条件下,铸坯截面温度分布和坯壳厚度分布规律,随后以单变量条件分别研究拉速和过热度对温度的影响。

随距弯月面距离的增加,在结晶器和二冷各区

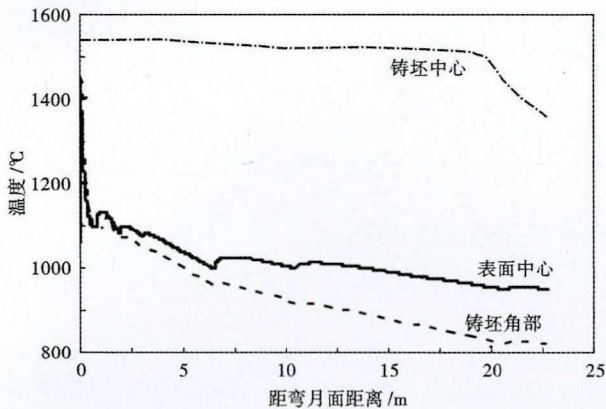


图 2 铸坯温度随距弯月面距离的变化趋势

Fig. 2 Variation trend of slab temperature with distance from mold meniscus

出口位置,铸坯中心和表面中心温度整体呈降低趋势,但在各区开始时均有一定的回温,如图 2 所示。在结晶器中,铸坯表面中心受到冷却水的激冷作用,温度随距弯月面距离的增加而急剧下降,在出结晶器时,温度有一定量的回升,主要原因是结晶器下部气隙的生成,导致局部热流密度的减小。在二冷区中,铸坯表面温度表现为先回升后下降的趋势,是由于二冷区中冷却强度先强后弱导致二冷各区换热系数逐渐降低。在铸坯完全凝固之前,铸坯中心温度变化较为平缓,是由于凝固潜热的释放抵消了铸坯热量的损失。通过数值模拟计算,得出 7、8、9 段入口角部温度计算值分别为 859 °C、840 °C、819 °C,通过红外测温得到的实测值分别为 849 °C、836 °C、821 °C,误差在 1.2% 以内,这也在一定程度上验证了模型的准确性。

图 3 是铸坯固相线和液相线随距弯月面距离的变化曲线。从图 3 中可以看出,在结晶器中,由于钢液受到铜板和冷却水的激冷作用,坯壳厚度急剧增加。在结晶器出口处,坯壳厚度达到 17.1 mm,满足连铸安全生产的需要^[10];随后由于冷却强度的逐渐降低,坯壳增长速度降低;但在凝固末端,由于等效热容较小,坯壳厚度增长速度升高,直至完全凝固。同理,液相线在结晶器中急剧移动,随后移动速度减小,但减小到一定程度后保持不变直至液相线消失,这是潜热释放、固液相导热和冷却水冷却共同作用的结果。

由图 3 中可以看出,随距弯月面距离的增加,两相区宽度逐渐增大,至液相线消失位置,这是由于液相作为热源相对固相移动速度较快。凝固末端位置和液相线消失位置分别距弯月面 13.9 m 和 20.2 m。

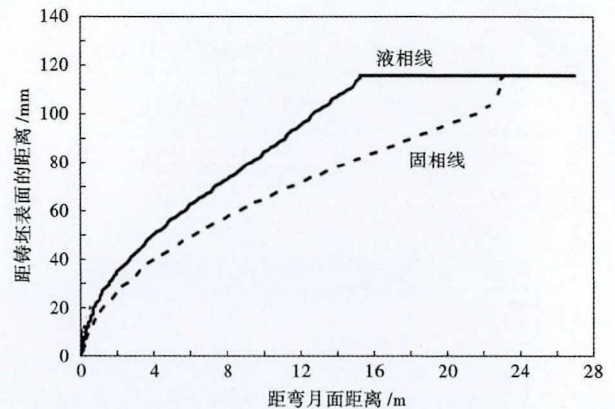


图 3 铸坯固相线和液相线位置变化

Fig. 3 Change of solid and liquidus line position of slab

4.2 过热度对凝固传热的影响

在连铸过程中,过热度过高导致等轴晶降低、柱状晶发达,在凝固末期柱状晶容易搭桥,形成中心疏松等缺陷;同时过热度过低导致结晶器中保护渣难以熔化,润滑效果变差,不利于初生坯壳的均匀生长,因此选取合适的过热度是获取良好铸坯质量的必要条件。本次计算设定拉速为 1.1 m/min,不同过热度情况下的铸坯温度分布见图 4。

如图 4 所示,随过热度的增加,铸坯中心和角部温度整体呈升高趋势,对于铸坯中心如图 4(a),当温度处于过热度之上时,其随过热度升高而升高,但增量随温度的降低而逐渐降低,直至中心温度降至液相线温度,此时铸坯截面距弯月面 11.7 m。随后铸坯中心钢液处于两相区中,中心温度逐渐趋于平缓。但由于过热度大的钢液单元体中蕴含的热量稍多,所以中心凝固稍晚。从图 4(b)可以看出,结晶器出来,铸坯角部由于受二维传热影响,温度降低速度较快。铸坯进矫直段时,过热度每增加 10 °C,铸坯角部平均增加 3.2 °C,可以看出过热度对表面温度的影响不是很大。

图 5 表示不同过热度下固相线和液相线距铸坯表面的距离,固相线和液相线距铸坯表面的距离随过热度升高而减小,同时二者的减量随距弯月面距离的增加而增大。过热度每升高 10 °C,凝固末端和液相消失位置分别后移约 0.38 m 和 0.31 m。

4.3 拉速对凝固传热的影响

设定过热度为 20 °C,分析不同拉速情况下的铸坯温度分布。图 6(a)是在不同的拉速条件下铸坯中心的温度随距弯月面距离的变化曲线,从图 6(a)中可以看出,铸坯中心温度随拉速升高而升高,且距弯月面距离小于 14.1 m 时,温度受拉速的影响逐渐

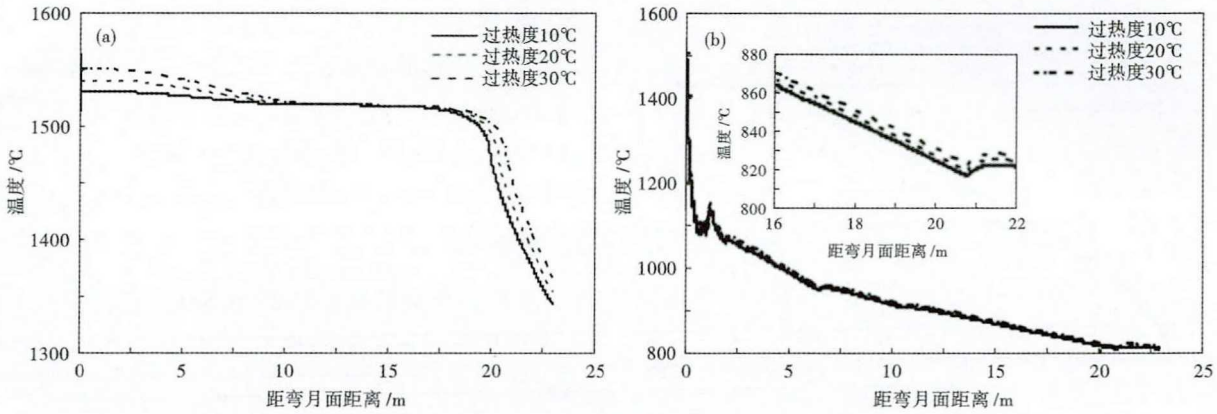


图4 不同过热度下的铸坯温度分布:(a)铸坯中心;(b)角部

Fig. 4 Temperature distribution of casting slab at different superheated degrees: (a) slab center; (b) corner

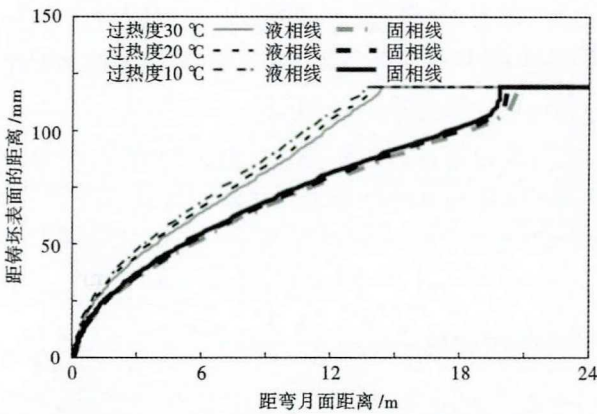


图5 不同过热度下固相线和液相线距铸坯表面的距离
Fig. 5 Distance between solid and liquid phases line from slab surface at different superheat

减小,然而距弯月面距离大于 14.1 m 时,温度受拉速影响呈逐渐增大趋势。这是由于铸坯距弯月面距离小于 14.1 m 时,铸坯在 3 个拉速条件下均具有过热和潜热释放,且当随着过热度的消除而逐渐减小。当铸坯距弯月面距离大于 14.1 m 时,潜热逐渐消

失,因此拉速对铸坯中心温度的影响稍微增强。从图 6 (a) 中可以看出,当拉速分别为 1.0、1.1、1.2 m/min 时,9 段出口处对应的铸坯中心温度分别为 1 282 °C、1 353 °C 和 1 433 °C。

图 6 (b) 是在不同拉速条件下铸坯角部温度随距弯月面距离的变化曲线。由于冷却方式相同,温度沿拉速方向的变化规律基本相同。从图 6 (b) 中可以看出,距弯月面相同位置处,拉速越低,温度越低。这是由于随着拉速的降低,单位时间内冷却水带走的热量越少,但铸坯在二冷区停留的时间越长,铸坯温度随之越低。从图 6 (b) 中还可以看出,在进入 7、8 段矫直段,拉速为 1.0 m/min 时,此段水表已关,已经进入空冷段,角部有一定程度的回温后下降;拉速每提高 0.1 m/min,角部平均提高 15 °C 左右,因此拉速对角部温度的影响较大。

从图 7 可以看出,随着拉速的提高,铸坯的完全凝固点往后推移。当拉速分别为 1.0、1.1、1.2 m/min 时,铸坯分别移动到距弯月面 12.55、13.96、15.35 m

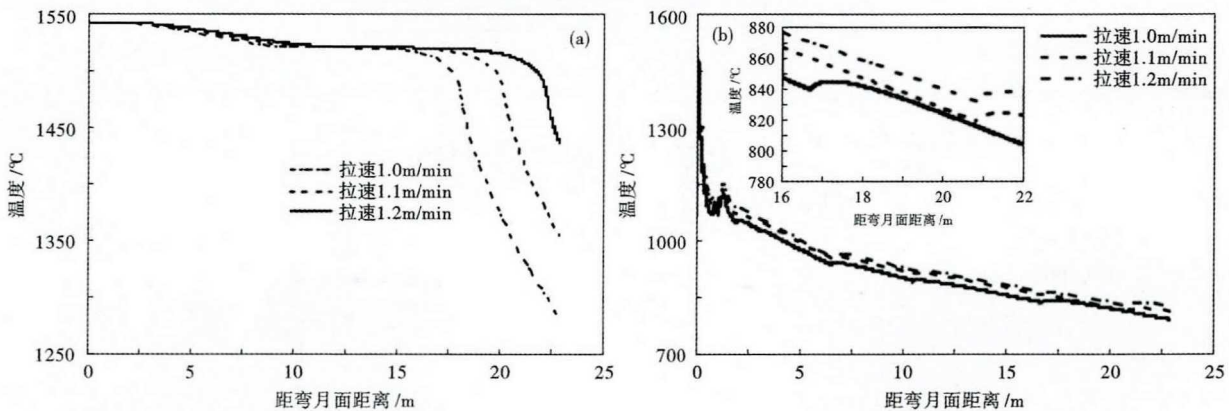


图6 不同拉速下的铸坯温度分布:(a)铸坯中心;(b)角部

Fig. 6 Temperature distribution of slab with different casting speed: (a) slab center; (b) corner

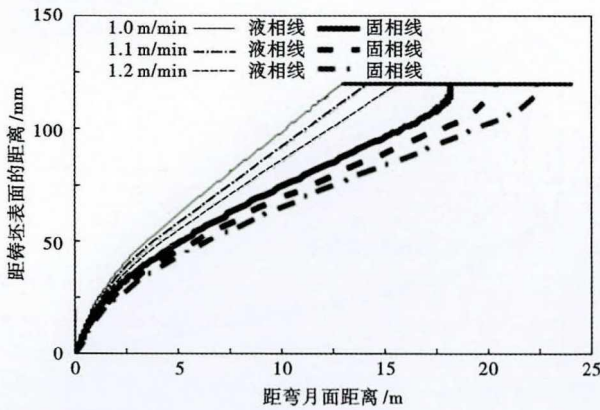


图 7 不同的拉速下固相线和液相线距铸坯表面的距离
Fig. 7 Distance between solid and liquid phases from slab surface with different casting speed

时,液相线消失,铸坯移动到距弯月面分别为 18.12、20.21、22.24 m 时,固相线消失。从液相线和固相线完全消失的位置分析,拉速对铸坯凝固终点的影响比较大。拉速增大 0.1 m/min,铸坯的液相线消失位置往后推移 1.4 m,铸坯的完全凝固点

往后推移 2.06 m,对电磁搅拌装置的安装产生非常大的影响。这是由于浇注温度一定时,钢液具有的热量是恒定的,增大铸坯拉速,导致铸坯在二冷区停留的时间变短,热量的散失也相应减慢,铸坯的完全凝固点往后推移,液芯变长。

5 结论

(1)通过对连钢 Q235B 钢板坯在连铸工艺条件下凝固传热过程的数值模拟,得出拉速 1.1 m/min,过热度为 20 ℃ 条件下,结晶器出口处坯壳厚度为 17.1 mm;铸坯移动到距弯月面 13.96 m 时,液相消失;铸坯移动到距弯月面 20.2 m 时,铸坯中心凝固。

(2)其它参数不变条件下,过热度每升高 10 ℃,铸坯凝固末端和液相消失位置分别后移约 0.38 m 和 0.31 m;拉速每升高 0.1 m/min,凝固末端和液相消失位置分别后移 2.06 m 和 1.4 m 左右。

国家重点研发计划项目(2017YFB0304000),国家自然科学基金项目(51674092)资助

参考文献

[1] 蔡开科. 连铸结晶器[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
 [2] 李 钊. Q345 钢凝固过程的模拟计算及铸态组织分析[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.
 [3] 张志祥, 闵 义, 姜茂发. 37Mn5 连铸圆坯凝固过程数学模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7): 966-969.
 [4] Yoon J K. Applications of Numerical Simulation to Continuous Casting Technology[J]. ISIJ International, 2008, 48(7): 879-884.
 [5] 汪成义, 崔怀周, 赵 斌, 等. Q420C 角钢铸坯凝固传热分析及 AlN 析出控制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(11): 1661-1668.
 [6] Lally B, Biegler L and Henein H. Finite Difference Heat Transfer Modeling for Continuous Casting[J]. Metal Tran B, 1990, 21(4): 761-770.
 [7] Tieu A K and Kim I S. Simulation of the Continuous Casting Process by a Mathematical Model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1997, 39(2): 185-192.
 [8] 马光林, 李京社, 刘 纲, 等. 基于 PROCAST 的 82B 连铸二冷温度场分布及凝固传热的研究[J]. 冶金设备, 2013, 6(3): 17-20.
 [9] Choudhary S K and Mazumdar D. Mathematical Modelling of Fluid Flow, Heat Transfer and Solidification Phenomena in Continuous Casting of Steel[J]. Steel Research, 1995, 66(5): 199-205.
 [10] Masahito H, Masayuki K and Akihiro Y. Growth of Solidified Shell Just Below the Meniscus in Continuous Casting Mold[J]. ISIJ International, 2009, 49(3): 365-374.

谢集祥(1968-),男,博士生,高级工程师,1991年武汉科技大学(本科)毕业,炼钢工艺研究。
E-mail: wangcy0615@163.com

收稿日期:2019-10-30

抗击新冠疫情
平凡而伟大