• 实用成型技术 Practical Shaping Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.020

Mn18Cr18N 电渣重熔钢锭凝固组织的 CA 法模拟

朱 花,何文武,陈慧琴
(太原科技大学 材料科学与工程学院,太原 030024)

摘 要:借助 PROCAST 软件的元胞自动机(CA)微观组织模拟方法,分析了 ϕ300 mm (ϕ100 mm)×350 mm Mn18Cr18N 高氮奥氏体不锈钢空心钢锭的电渣重熔凝固工艺,确定了合理的凝固工艺参数、冷却条件、凝固晶粒组织的形核密度与生长速度。在此基础上,分析了 ϕ712 mm(ϕ308 mm)×1 202 mm 空心钢锭电渣重熔金属熔池形状和底部冷却条件对凝固组织特征的影响。结果表明,电渣重熔熔速(渣-金界面上涨速度)控制在 0.1 mm·s^{-1} 以下,可以获得理想的熔池形状和凝固柱状晶组织;底部传热系数达到 500 W·m^2·K^{-1} 可提供足够的冷却能力,并获得最大尺寸的底部柱状晶区。

关键词:Mn18Cr18N;电渣重熔;空心钢锭;柱状晶凝固组织;CA 法
中图分类号:TG142 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)12-1180-06

CA Method Simulation of Solidification Structure of Mn18Cr18N Electroslag Remelting Ingots

ZHU Hua, HE Wenwu, CHEN Huiqin
(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: By using PROCAST software of cellular automata (CA), microstructure simulation method analyzes the 300 mm in diameter (inner 100 mm in diameter) with length 350 mm of Mn18Cr18N high nitrogen austenitic stainless steel electroslag remelting (ESR) of hollow ingot solidification process, the reasonable solidification process parameters, cooling condition, solidification grain nucleation density and growth rate of the microstructure. On this basis, the analysis of the 712 mm in diameter (inner 308 mm in diameter) with length 1 202 mm hollow ingot ESR metal molten pool at the bottom of the shape and the influence of cooling conditions on the solidified structure characteristics. The results show that the ESR melting speed (slag-the rise of gold interface) control in 0.1 mm·s^{-1} the following, can obtain the ideal shape of molten pool and the microstructure of the columnar crystal solidification; At the bottom of the heat transfer coefficient of 500 W·m^2·K^{-1} can provide enough cooling capacity, and achieve maximum size at the bottom of the columnar crystal area.

Key words: Mn18Cr18N; electroslag remelting (ESR); hollow ingot; columnar solidification structure; cellular automata (CA) method

大型筒形锻件多应用于核电、石化等重大装备的核心部件,随着设备效能的提高,压力容器向大型化发展[1]。通常情况下,大型筒形类空心锻件采用实心钢锭来制造,其制造的工艺流程是倒棱-下料-压钳-镦粗-冲孔-芯棒拔长-扩孔。用这种方法制造空心锻件,工序多,需要多火次锻造,钢锭的利用率很低。采用空心钢锭锻造加工筒节类产品,可减少镦粗、冲孔等锻造工序,缩短锻造流程,降低能耗,提高材料利用率[2]。而且,可实现空心钢锭-锻造/辗扩成形的短流程工艺,大幅度降低空心锻件的生产成本和生产周期。为此,一些国家先后进行了空心钢锭制造技术的研究,并取得成功。空心钢锭代表性的技术是日本的双套筒耐火材料芯子和法国的充填冷却介质的钢管芯子[3]。目前拥有大型空心钢锭生产技术的锻件供应商主要有法国克鲁索、日本川崎、英国谢菲尔德和中国一重,其中法国克鲁索最大可生产空心钢锭 250 t 以上,日本川崎最大可生产空心钢锭 320 t,谢菲尔德和一重最大可生产空心钢锭分别为 160 t 和 190 t[4]。随着电渣冶金技术的发展,采用电渣重熔方法制造空心钢锭成为可能。电渣冶金产品共同的特点是:金属纯净、组织致密、成分均匀、成形良好、表面光洁、使用性能优异。与其他空心钢锭制

收稿日期:2020-07-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575372)
作者简介:朱 花(1977-),女,山西定襄人,博士研究生.研究方向:热加工微观组织模拟与控制.电话:13834514348,E-mail:zhuhua200808@163.com
通讯作者:陈慧琴(1968-),女,山东定襄人,教授,博士.研究方向:大型铸锻件制造理论与新技术.
电话:0351-2161129,E-mail:chenhuiqin@tyust.edu.cn

造工艺相比,电渣重熔空心钢锭工序简单,成材率高,产品质量高,生产成本低;但是其技术难度大,需要精确的自动控制系统。东北大学和乌克兰 El-met-Roll 公司共同合作提出了基型 T 型导电结晶器和双电源的电渣重熔空心锭的新工艺和新技术,开发了大型电渣重熔空心钢锭成套设备和工艺,可生产最大空心钢锭尺寸为 ϕ1 100 mm×6 000 mm[5]。

电渣重熔是一种具有精炼和定向凝固于一体的特殊冶炼方法,其过程涉及到热传递、冶金反应、金属凝固和结晶等过程,是一个集热场、电磁场、流场于一体的复杂体系,各种场之间相互耦合,利用实际试验研究具有一定局限性。因此,国内外研究者大多采用数值模拟方法来研究电渣冶金技术[7-9]。导电结晶器电渣重熔空心钢锭技术为大型厚壁管坯的生产提供了一种新的途径,是电渣冶金领域的前沿和热点技术。陈旭等[10,11]借助有限元分析软件 ANSYS 对电渣重熔制备 ϕ900 mm×500 mm 空心钢锭过程进行了数值模拟,得到电场、磁场、温度场以及流场的分布特征;对比分析了在采用导电和非导电结晶器工况下,体系各物理场的分布规律和钢锭凝固特征,研究发现导电结晶器附近的熔池流动速度较快,渣池的温度场更为均匀,金属熔池形状更为浅平。他们采用 ANSYS 和 CFX 软件对电渣重熔空心钢锭的凝固过程进行数值模拟研究,通过改变渣池深度、电极插入深度、电极布置方式来比较不同工艺参数对电渣重熔空心钢锭金属熔池形状的影响。景馨[12]利用有限元软件 ANSYS 对导电结晶器电渣重熔空心钢锭进行了稳态的电热耦合分析,计算了不同供电方式对电渣重熔空心钢锭体系温度场的影响,结果表明采用外结晶器导电的电极,能促进电渣池温度均匀,进而使金属熔池更加浅平、均匀,且空心钢锭凝固的最后位置不是在厚度的中心,而是向内表面一侧偏离。随着电渣重熔技术的进步,硫及夹杂物的控制已经不是电渣生产中的主要矛盾,如何控制凝固,获得合理组织,成为电渣工作者中最为关心的问题。电渣重熔过程中金属熔滴经渣池净化后聚集在金属熔池,并在结晶器冷却水作用下定向凝固成型,最终形成致密的定向凝固组织。为此,研究电渣重熔过程凝固组织演变行为,建立电渣重熔过程宏观工艺参数与微观凝固组织演变行为的关系,揭示电渣重熔铸锭定向凝固机理和凝固微观组织演变规律至关重要。元胞自动机法具有计算资源少、效率高、计算区域大等优点,能够模拟尺寸大、形貌复杂的工业化铸锭凝固组织形貌,现已被集成到 Procast 有限元商业软件,并被许多研究者用于电渣重熔过程铸锭凝固组织数值模拟和工艺优化研究[13-15]。本文针对 Mn18Cr18N 高氮奥氏体不锈钢空心钢锭的电渣重熔凝固工艺,借助 PROCAST 软件的元胞自动机微观组织模拟方法(CA),分析了电渣重熔金属熔池形状和结晶器冷却条件对空心钢锭温度场和凝固组织特征的影响,以期为厚壁筒形件成形工艺优化和短流程制造技术提供优质的空心钢锭。

1　电渣重熔空心钢锭凝固组织模拟模型及参数设置

本文应用 ProCAST 软件中 CA-FE 模块,模拟凝固晶粒组织的形核及长大的演化过程。CA-FE 模型吸取了确定模拟法与随机模拟法的特点,能够体现多种微观组织的演变过程,包括柱状晶和等轴晶竞相长大的柱状晶向等轴晶的转变(CET),且其具有减少计算时间及节省内存的优点[9]。CA-FE 模型中,传热过程的计算在宏观有限元(FE)网格系统中进行;凝固组织模拟使用 CA 法在更加细密的方形规则网格上进行。通过宏观温度场模拟的 FE 网格和微观组织模拟的 CA 法网格的对应关系,建立 FE 节点与 CA 元胞的耦合关系,实现宏观温度场与微观组织场的耦合模拟[13]。

鉴于本文侧重于模拟电渣重熔凝固组织,在建模和模拟过程中作如下假设:①由于金属熔滴和渣池的物理化学反应充分进行,假设渣池和金属熔池接触的渣金界面处温度相同。②由于金属熔滴在下落过程中受到渣池的阻力,进入金属液池速度很小,故忽略金属熔池中流动对凝固的影响。

1.1　模型一

本文首先建立了 ϕ300 mm(ϕ100 mm)×350 mm 实验室小尺寸的 Mn18Cr18N(表 1 中成分 1)空心钢锭电渣重熔凝固过程模拟模型,通过水冷结晶器冷却条件的精确设置,分析了凝固过程中的温度场和凝固组织场演变过程,并进行了实验验证[16]。模拟参数如表 2 所示。根据 Mn18Cr18N 成分及相图等,计算得出其枝晶生长动力学参数中生长系数 a_2=0,a_3=7.131 0^{-5};电渣重熔过程中,沿钢锭轴向的内外壁冷却边界条件是一个随距离渣金界面的高度而变化的函数,如图 1(a)所示。

1.2　模型二

建立了 ϕ712 mm (ϕ308 mm)×1 202 mm (表 1 中成分 2)实际尺寸的 Mn18Cr18N 空心钢锭电渣重熔凝固过程模拟模型,壁厚分别是 202 mm 和 181 mm。计算获得模拟参数如表 2 所示。枝晶生长

表1 Mn18Cr18N钢的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of Mn18Cr18N steel

元素	Cr	Mn	Ni	Mo	Cu	Si	Al	C	Ti	N	P	S
成分 1	19.38	19.87	/	/	/	0.48	/	0.093	/	0.51	0.034	0.001
成分 2	20.00	19.21	0.14	0.022	0.035	0.59	0.023	0.074	0.016	0.61	0.014	0.001

表 2 模型一中的模拟参数
Tab.2 Simulation parameters in Model 1

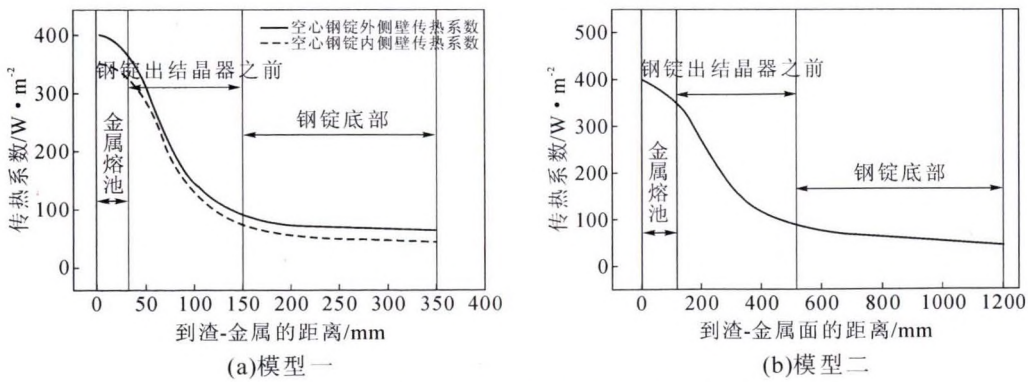
模拟参数			成分 1	成分 2
凝固工艺参数		固相线温度 /℃	1 323	1 384
		液相线温度 /℃	1 437	1 415
		凝固潜热 /J·kg^{-1}	2.610 5	2.610 5
		熔化速率 / mm·s^{-1}(渣–金界面上涨速度)	0.1	0.1
		渣–金界面传热系数 /W·m^{2}·K^{-1}	200	200
		金属熔池环境温度 /℃	1 480	1 550
		钢锭底部换热系数 /W·m^{2}·K^{-1}	500	300
		底部环境温度 /℃	27	27
形核参数	体形核	体形核过冷度 /℃	2	15
		体形核标准方差	1	1.5
		体形核最大形核数 /cm^{3}	2.010 8	1.010 8
	面形核	面形核过冷度 /℃	0.5	0.3
		面形核标准方差	0.1	0.1
		面形核最大形核数 /cm^{2}	1.010 7	1.010 7

动力学参数中生长系数同模型一。内外壁冷却边界条件相同,如图 1(b)所示。模拟分析了熔化速率(渣–金界面上涨速度)分别为 0.050、0.075、0.100、0.150 mm·s^{-1} 的凝固过程,以及底部换热分别 200、500、800、1 000 和 1 100 ℃的凝固过程。

2 电渣重熔空心钢锭凝固过程分析

2.1 模型一电渣重熔空心钢锭凝固过程分析

电渣重熔过程中,钢锭的传热行为直接影响着钢锭的结晶形态,钢锭内部温度场的分布,对于凝固质量起着决定性的作用。图 2 为模拟得出的模型一电渣重熔凝固过程中温度场的变化规律。可以看出,电渣重熔过程中钢锭的温度自下而上逐渐升高,一直达到熔池中金属的温度。而且,沿着钢锭轴向自下而上的温度梯度基本恒定,表明电渣重熔在水冷结晶器的冷却条件下基本实现了逐层凝固。而沿径向的壁厚方向上,从内外壁两侧至壁厚中心形成了与金属熔池形状一致的等温曲线;且随着凝固过程的进行,等温曲线上内外壁与壁厚中心的轴向距离呈现先增大后减小的变化规律,即开始凝固时,温度场等温线较浅(图 2a);随着凝固时间的延长,温度场等温曲线逐渐变深;5 000 s 时(图 2e)温度场等温线最深;此后又逐渐变浅,7 000 s 凝固结束后(图 2g)温度场等温曲线形状与 4 000 s 的相当。而且温度场等温曲线径向对称位置(图 2 中虚线所示)从开始凝固的壁厚中心(图 2a)逐渐向内壁移动。凝固结束时,温度场等温曲线壁厚对称中心约在离内壁 1/3 的壁厚处。



(a)模型一　(b)模型二

图 1 电渣重熔空心钢锭内外壁传热系数变化规律
Fig.1 Conduction coefficient variation of inner and outer wall surfaces of ESR hollow ingots

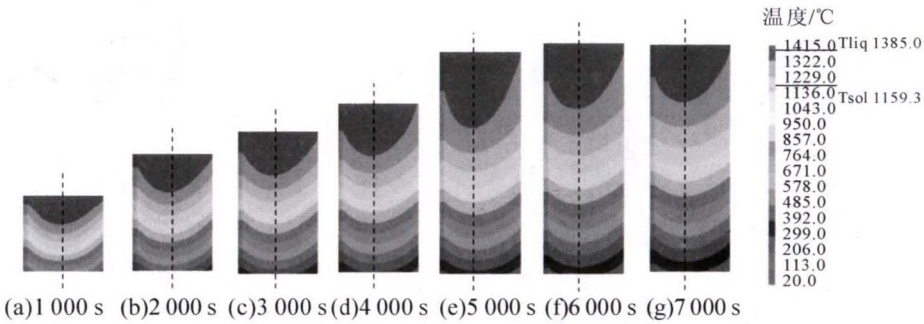


图 2 模型 1 凝固过程中的温度场

Fig.2 Temperature field during solidification process of model 1

温度场的变化规律取决于电渣重熔特殊的冷却条件。如图 3 所示,空心钢锭电渣重熔过程中重熔和凝固从底水箱开始逐步向上(图 3)。重熔凝固开始阶段,由于底水箱的冷却能力大于内外结晶器的冷却能力,温度场沿轴向的梯度大于径向的梯度,温度场约在 700~1 415 ℃的范围内(图 2a);柱状晶从底水箱开始沿着轴向生长,钢锭壁厚中心部分的柱状晶几乎垂直于底面而与轴向平行,靠近内外壁两侧则由于内外水冷结晶器的冷却作用,柱状晶向壁厚中心倾斜(图 3a)。也就是说,柱状晶是沿着温度场等温曲线的法向生长的。随着重熔凝固过程的进行,底水箱的冷却能力逐渐减小,温度场轴向梯度逐渐减小(图 2b),内外壁冷却能力主导了传热的趋势,钢锭壁厚中部垂直于底面而与轴向平行的柱状晶减少,内外壁两侧向壁厚凝固中心倾斜的柱状晶越来越多(图 3b)。当温度场在 300~1 415 ℃的范围内(图 2c)时;底部柱状晶区消失,壁厚组织完全由内外壁冷却导致的柱状晶组成(图 3c),同时柱状晶组织与钢锭轴向的夹角达到最大 54。随着重熔凝固的进一步进行,轴向温度梯度逐渐减小,但是温度范围基本稳定在 300~1 415 ℃(图 2d-g);壁厚凝固组织沿轴向逐层向上稳定生长(图 3d-g)。在此期间,由于下部已经凝固钢锭发生收缩,钢锭凝固部分与水冷结晶器之间产生气隙,从而使钢锭外壁逐渐与水冷结晶器分离,进而使传热系数逐渐减小直到趋于平稳(图 1a);而内壁则会由于金属凝固收缩接触更加紧密,传热系数稍有改善(图 1a),从而使温度场等温曲线在壁厚上的对称中心从底部柱状晶消失以后(图 3c)开始,逐渐向内壁测移动,最终使内外壁柱状晶的接合处位于靠近内壁的壁厚 1/3 处。另外,图 3e 中凝固组织在内外壁基本完成,对应的熔池最深,因此图 3a-e 柱状晶内外壁冷却促进了柱状晶轴向的生成;而图 3e 以后,柱状晶主要沿径向生长,从而使熔池逐渐变浅。

图 4 为本文模型一电渣凝固组织模拟结果与文献[15]实验和模拟结果的对比。由于模型一与文献[15]的模型和参数一致,本文 ϕ300 mm(ϕ100 mm)×350 mm Mn18Cr18N 的电渣凝固组织模拟结果(图 4a)的金属熔池形状及尺寸、内外部柱状晶组织的接合位置等与文献[15]的实验(图 4b)和模拟结果(图 4c)基本一致;而本文模型一底部柱状晶区较为显著,且壁厚柱状晶与轴向的夹角略大,原因可能是底部和内外壁的冷却条件与文献[15]略有差异所致。

2.2 模型二电渣重熔空心钢锭凝固过程分析

电渣重熔是集精炼、凝固于一体的一种冶炼方法,它不仅可以有效地去除钢中的非金属夹杂物,减少硫的含量;而且可以有效地控制结晶方向,获得趋于轴向的结晶组织[16]。电渣重熔空心钢锭凝固过程的控制主要是对电渣重熔过程中金属熔池形状和深度进行控制,熔池深度是凝固组织的主要控制参数。

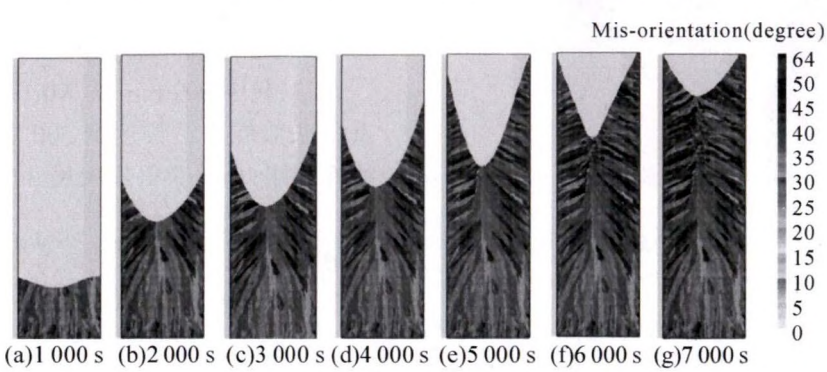
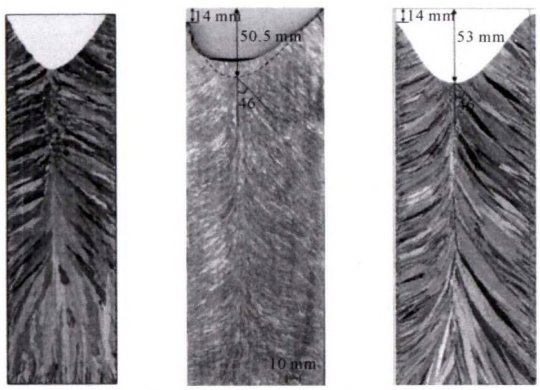


图 3 模型 1 凝固过程中的组织场

Fig.3 Microstructure field during solidification process of model 1



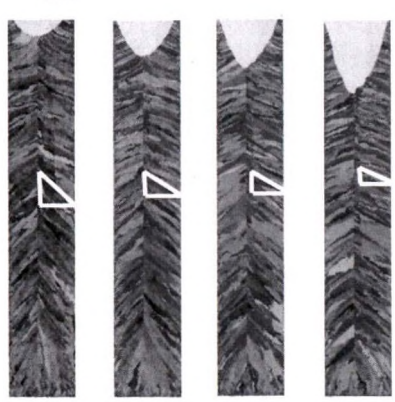
(a)重熔凝固组织 (b)文献[16]组织 (c)模拟结果

图 4 模型一电渣重熔凝固组织与不同条件下的对比

Fig.4 Model a comparison of ESR and solidification structure under different conditions

电渣重熔工艺中，电极熔化速度主要影响金属熔池的深度和形状，从而影响重熔产品的质量[17]。因此，金属熔池的深浅反映了熔速的快慢。从而使金属熔池深度对重熔铸锭凝固组织产生重要的影响，浅的熔池形貌更有利于生成良好的凝固组织。

图 5 为不同熔化速率(渣–金界面上涨速度)条件下的凝固组织。可以看出，随着熔速的升高，金属熔池逐渐变深，底部柱状晶区缩小，壁厚柱状晶与轴向的夹角增大。熔速为 0.05 mm·s^{-1} 时(图 5a)，底部柱状晶区域较大，但熔池最浅，壁中部柱状晶与轴向的夹角约为 45；熔速增加到 0.075~0.100 mm·s^{-1} 之间（图 5b-5c），底部柱状晶区域缩小，熔池深度适中，壁中部柱状晶与轴向的夹角约为 50~55；当熔速增加到 0.15 mm·s^{-1} 时(图 5d)，底部柱状晶区域最小，但熔池也最深。但是，四种熔速条件下的有效轴向尺寸(去除底部三角锥和倒 V 型熔池)基本一致。



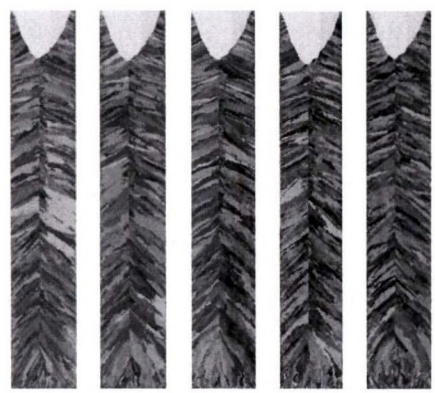
(a)0.05 (b)0.075 (c)0.1 (d)0.15

图 5 不同熔速(mm·s^{-1})下的凝固组织

Fig.5 Solidified structure at different re-melting velocities

文献[16]指出，铸锭中心金属熔池深度不大于铸锭半径，即 $h_m \leqslant D/2$(D 为铸锭半径)，结晶前沿轮廓应是粗略的抛物面，柱状晶垂直于固液相界面生长，柱状晶方向与液面上升方向（纵轴方向）夹角 $\theta \leqslant 45$，以保证铸锭凝固质量。因此，对于模型二，要想得到理想的凝固组织，熔速应控制在 0.1 mm·s^{-1} 以下。

图 6 为不同底部换热系数条件下的凝固组织。由于熔速恒定，所以熔池形状和深度一致，壁中部柱状晶与轴向的夹角也一致。但是，随着底部传热系数的增大(图 6a-6c)，底部柱状晶区逐渐增大；继续增大底部传热系数，底部柱状晶区基本保持恒定(图6c-6e)。因此，对于模型二，底部传热系数达到 500 W·m^2·K^{-1} 可提供足够的冷却能力，并获得最大尺寸的底部柱状晶区。



(a)200 (b)500 (c)800 (d)1 000 (e)1 100

图 6 不同底部传热系数(W·m^2·K^{-1})的凝固组织

Fig.6 Solidified structure at different heat transfer coefficients

3 结论

(1)通过精确计算电渣重熔金属材料的熔炼和凝固结晶模拟参数，设置合理的冷却边界条件，可以利用 ProCAST 软件中 CA-FE 模块对电渣重熔凝固过程进行准确的模拟分析，获得与实验结果吻合的模拟结果。

(2)壁厚 202 mm 的 Mn18Cr18N 空心钢锭电渣重熔的电极熔速（渣–金界面上涨速度）控制在 0.1 mm·s^{-1} 以下，可以获得底部柱状晶区域较小，熔池深度适中，壁厚中部柱状晶与轴向的夹角约为 50~55 的理想凝固组织。

(3)壁厚 202 mm 的 Mn18Cr18N 空心钢锭电渣重熔底部传热系数达到 500 W·m^2·K^{-1} 可提供足够的冷却能力，并获得最大尺寸的底部柱状晶区。

参考文献：

[1] 吕奎明，李家驹，张文辉. 超大型筒形锻件制造技术的发展现状[J].大型铸锻件，2016(1): 35-37.

[2] 许天华. 空心钢锭的制造技术[J]. 一重技术，2004，100(2):28-30.

[3] 邢世勋，于广文. 空心钢锭生产技术的发展与应用. 2012 年钢锭

制造技术与管理研讨会论文集，2012，5，135-143.

[4] 来庆红，田丰，谢全胜，等. 大型空心钢锭的生产实践[J]. 热加工工艺，2016，45(13):169-171.

[5] 姜周华，刘福斌，余强，等. 电渣重熔空心钢锭技术的开发[J]. 钢铁，2015，50(10):30-36.

[6] A Mitchell. Solidification in remelting processes. Materials Science and Engineering A 413-414 (2005) 10-18.

[7] 宋照伟，陈瑞，李宝东，等. 电渣冶金数值模拟技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金，2016，36(12):1257-1261.

[8] 王晓花，康晓雪，马骏. 电渣重熔宏微观多尺度数值研究进展. 辽宁石油化工大学学报，2018，38(5):1-8.

[9] 陈旭，刘福斌，姜周华，等. T 型导电结晶器电渣重熔空心钢锭过程的数值模拟. 东北大学学报（自然科学版），2015，36(6):805-810.

[10] 陈旭，刘福斌，李星，等. 工艺参数对电渣重熔空心钢锭凝固过程影响的数值模拟[J]. 材料与冶金学报，2015，14(2):100-106.

[11] 景馨，姜周华，刘福斌，等. 导电结晶器电渣重熔空心钢锭电场和温度场的数值模拟[J]. 材料与冶金学报，2013，12(3):203-208.

[12] 陈明秋，李宝宽，赵林. 利用元胞自动机法模拟电渣重熔钢锭定向凝固组织. 材料与冶金学报，2011，10(S1):139-146.

[13] 张赫，雷洪，耿佃桥，等. 电渣重熔过程中传热及凝固组织的数值模拟[J]. 工业加热，2013，42(6):42-46.

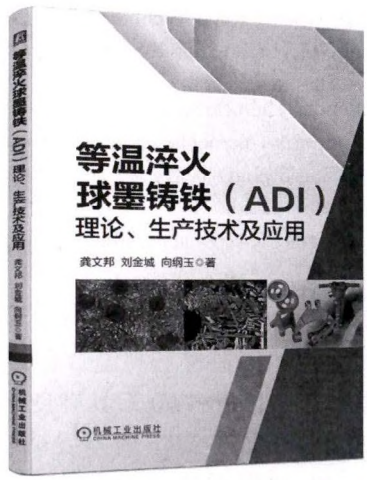
[14] 朱鸣芳，汤倩玉. 合金凝固过程中显微组织演化的元胞自动机模拟[J]. 金属学报，2016，52(10):1297-1310.

[15] 陈旭. 电渣重熔空心钢锭过程的数学模拟和试验研究[D]. 沈阳：东北大学，2016.

[16] 常立忠，李正邦. 电渣重熔过程中金属凝固的控制方法[J]. 炼钢，2007，23(4):56-58.

[17] 王长周，宋锦春. 电渣重熔炉电极熔化速度对重熔过程的影响[J]. 冶金设备，2012，194(2):5-8.

《等温淬火球墨铸铁(ADI)理论、生产技术及应用》新书出版



等温淬火球墨铸铁(ADI)是一种具有独特奥铁体微观组织的新型高性能工程材料，代表了铸铁冶金学的最新成就，是钢铁材料领域适合制造高端装备关键零部件和轻量化创新极具竞争优势的新型工程材料。为使机械制造领域的设计及工程技术人员快速掌握国内外 ADI 的最新研发成果、基础理论及生产技术，促进我国 ADI 产业化的发展，龚文邦教授、刘金城博士、向纲玉教授级高级工程师等三位 ADI 领域专家合作，完成了《等温淬火球墨铸铁(ADI)理论、生产技术及应用》一书，柳百成院士为该书作序，于 2020 年 11 月由机械工业出版社出版。本书是三位作者在数十年坚持 ADI 材料研究开发及生产实践的基础上，并参考国内外相关学术文献及生产技术数据等 ADI 最新研究成果，经过数年时间潜心撰写、反复修改的辛勤劳动结晶，凝聚了三位作者专注 ADI 事业的心血和汗水。它是对 ADI 理论及生产应用论述非常深刻、内容十分丰富的一部专著，系统阐述了 ADI 的最新理论、生产技术、工艺控制及其应用。

本书共分 9 章，内容包括球墨铸铁和 ADI 的发展、ADI 的热处理及等温转变热力学与动力学、ADI 的化学成分及铸态质量控制、ADI 的微观组织、ADI 的性能、ADI 的耐磨性、ADI 的机械加工性能、ADI 的其他处理方法、ADI 的应用实例等。

本书的出版必将为提高我国 ADI 的研发水平和产业化发挥重要作用，也将对加强我国制造业的工业基础创新能力和高质量发展发挥积极作用。本书可供从事机械工程、新材料研究及应用开发的科研人员、工程技术人员参考，也可供大专院校相关专业师生参考。

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2021 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52-64　国外发行号：M855　国内定价：25 元/本　海外定价：25 美元/本