DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.005

新規和ロールへび。

Mn18Cr18N 空心钢锭凝固缺陷与 组织的模拟研究

△ 朱 花¹,张 博²,田继红¹,刘嘉辰¹,陈慧琴¹

(1.太原科技大学材料科学与工程学院,山西太原 030024;2.武汉育人博才教育有限公司,湖北武汉 430000)

摘 要:对常规底注式浇注 4.2 t Mn18Cr18N 空心钢锭的凝固过程进行了模拟研究,分析了浇注和冷却参数对凝固 缺陷和组织的影响。结果表明,内外壁的冷却条件显著影响钢锭的凝固顺序和组织特征。随着内外壁换热系数的减小, 最后凝固位置移向换热系数较小的一侧,柱状晶向等轴晶的转变(CET)提前,柱状晶长度减小。在1415 C 和 25 kg/s 低 温慢浇的条件下,当内外壁的换热系数比值为 2:5 时,钢锭径向从内外壁侧向壁厚内部逐渐凝固,最终凝固位置在靠近 内壁的 1/4~1/3 壁厚处,该处呈现一定程度的疏松缺陷,凝固组织为等轴晶;而内外壁处则为柱状晶组织,壁厚截面上两 种组织比例相当。形核参数中体形核密度是影响 CET 以及晶粒尺寸的主要参数,而面形核密度可以控制柱状晶的一次 枝晶间距。

关键词:空心钢锭;底注式浇注;孔隙性缺陷;柱状晶;等轴晶
 中图分类号: TG244
 文献标识码:A
 文章编号:1000-8365(2020)08-0727-07

Simulation Research on Solidification Defects and Microstructure of Mn18Cr18N Hollow Ingots

ZHU Hua¹, ZHANG Bo², TIAN Jihong¹, LIU Jiachen¹, CHEN Huiqin¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Aotu Personalized?Education, Wuhan 430000, China)

Abstract: The solidification process of 4.2 t Mn18Cr18N hollow ingot with conventional bottom gating system was simulated, and the influence of pouring and cooling parameters on solidification defects and microstructure evolution was analyzed. The results show that cooling conditions of the inner and outer walls has intensive effect on solidification sequence and microstructure. As the heat transfer coefficient of the inner and outer walls decreases, the solidification position finally moves to the side with low heat transfer coefficient, and the transformation (CET) of columnar crystals is advanced, and the length of columnar crystals decreases. Under the condition of low temperature of 1 415 C and low pouring velocity of 25 kg/s, when the heat transfer coefficient ratio of inner and outer walls is 2.5, the ingot gradually solidifies radially from the lateral wall thickness of inner and outer walls. The final solidification position is at the $1/4 \sim 1/3$ wall thickness near the inner wall, where there is a certain degree of loose defects, and the solidification structure is equiaxed grains. The columnar crystal structure is found on the inner and outer wall, and the proportion of the two structures is similar on the wall thickness section. In nucleation parameters, shape nucleation density is the main parameter that affects CET and grain size, while surface nucleation density can control the primary dendrite spacing of columnar grains.

Key words: hollow ingots; pouring with bottom gating system; porosity defects; columnar grains; equiaxed grains

随着石油化工与核电技术的高速发展,不同尺 寸与性能要求的筒形件需求量越来越大,从而使厚

收稿日期: 2020-04-12

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-),山西定襄人,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

壁筒形件的制造技术越来越得到关注¹¹。而相比于 传统的采用实心钢锭和自由锻技术制造厚壁筒形 件,采用空心钢锭直接成形厚壁筒形件的制造技术 具有明显的优势,不仅节能节材,而且还可以省去镦 粗和冲孔工序,简化加工流程,缩短了生产制造周 期^[2,3]。因此,空心钢锭制造技术能够推动厚壁筒形 件向着短流程精确成形制造方向发展^[4]。

采用试制方法研究空心钢锭浇注和凝固工艺及 其凝固缺陷和组织的特征^[5],周期长,材料损耗大,

(4)

费用高,致使空心钢锭的研发进度缓慢。随着计算 机技术的迅猛发展,计算机模拟技术已经成为研究 钢锭凝固成型、缺陷演变与组织控制的重要手段 ^[68]。模拟技术能够对不同的工艺参数和多种类型的 模型同时进行计算和分析,为高质量钢锭的制造提 供先进的技术手段。文献[9,10]采用数值模拟方法 在模拟分析空心钢锭凝固过程传热和温度场的基 础上,进行了缩孔和疏松的预测。

随着电渣冶金技术的发展,采用电渣重熔或电 渣液态浇注的技术可以制备纯净致密均质的空心 钢锭成为可能,并已得到一定的应用^[11-13]。但是,目 前对于大型筒体类锻件,采用传统套筒式模型浇注 空心钢锭仍然得到较为广泛的应用^[1-5]。本文采用 ProCAST软件在模拟分析 4.2 t Mn18Cr18N 空心钢 锭的凝固过程的基础上,研究通过控制冷却条件控 制凝固顺序,进而控制最终凝固位置和缺陷的分 布,并结合合理的浇注温度控制获得较细小均匀的 柱状晶组织。

空心钢锭凝固缺陷和组织模拟判据 及模型的建立

空心钢锭的底注式浇注系统由浇口杯、直浇 道、横浇道、内浇道组成,钢液从铸型底部进入到型 腔。底注式浇注系统的优点有充型平稳、不产生激 溅、气体易于排出、金属氧化少等。合理的浇注工 艺参数是获得良好铸件质量的前提,但是钢锭的 浇注凝固过程是一个传质、传热和流体传动的复 杂传输过程。钢锭的合金成分、形状尺寸和浇注 凝固工艺参数综合影响钢锭的凝固过程,进而影 响钢锭内部缺陷的种类和分布以及凝固组织的形 貌和尺寸。

1.1 凝固孔隙性缺陷模拟判据

熔融的高温合金在凝固过程中会发生体积收 缩现象,最终凝固部位有可能因得不到钢液的及时 补充而产生孔隙性缺陷,如缩孔、疏松等。采用 Niyama 判据来对疏松出现的可能性进行模拟预测。 Niyama 判据是一种基于枝晶间疏松的预测判据,可 以较准确的预测疏松可能产生的位置和分布情况。 表达式如下所示。

$$N=G/\sqrt{R} \tag{1}$$

式中,G凝固终了时的温度梯度;R冷却速度。

当 N 值小于某一临界值时,在相应区域内就会 产生疏松。N 值越小,产生疏松的倾向性越大;反之 产生的倾向性越小。该临界值的大小与钢锭材料和 浇注工艺有关,不受钢锭的形状尺寸和合金成分的 影响^[14-16]。文献[14]中根据达西定律和枝晶间的渗流 补缩理论推导出 Niyama 判据计算公式(2),用以判 断凝固过程中疏松的形成。

$$N = G/\sqrt{R} = \sqrt{\frac{\eta \cdot f_{\rm L} \cdot \beta \cdot \Delta T}{k \cdot (\Delta P - m \cdot \Delta T \cdot g/A)}}$$
(2)

式中, η 液相粘度系数; f_L 液相分数; β 凝固收缩率; ΔT 结晶温度区间大小; ΔP 压力降,m钢锭质量或需 要浇注金属液的质量。

1.2 钢锭凝固晶粒组织模拟判据

1.2.1 枝晶生长动力学

枝晶尖端的生长速度与过冷度之间的关系是建 立枝晶尖端生长动力学模型的关键。柱状晶的生长 速度,柱状晶前沿等轴晶的形核生长都受到枝晶尖 端过冷度的影响^[17]。下式给出了枝晶尖端总过冷度 ΔT 的表达式:

$$\Delta T = \Delta T_{\rm c} + \Delta T_{\rm t} + \Delta T_{\rm k} + \Delta T_{\rm r}$$
(3)

式中, ΔT_{e} 、 ΔT_{t} 、 ΔT_{r} 分别代表溶质过冷度、热过 冷度、曲率过冷度和动力学过冷度。对于大多数合金 而言, ΔT_{t} 、 ΔT_{k} 、 ΔT_{r} 与 ΔT_{c} 相比来说很小,通常可以 忽略。枝晶生长速度 ν 和过冷度 ΔT 用 3 次多项式 (4)进行拟合,拟合后可以加快计算速度。

$\nu = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3$

式中, ΔT 枝晶尖端总过冷度, K; a_2 、 a_3 拟合多项式的 系数,称为生长动力学系数, m/(s·K³)。

本文采用 KGT (Kunur、Giovanola 和 Trivedi)模型描述柱状晶和等轴晶的生长。 a_2 和 a_3 的值通过对 KGT 模型进行拟合得到, a_2 和 a_3 可以控制晶粒生长 过程中的形貌和转变^[18,19]。在模拟软件 ProCAST 的 CA-FE 模块中,可以通过 Co,m,k,D 计算系数 a_2 和 a_3 。其中, C_o 表示凝固材料中各元素的质量分数,m表示凝固材料的液相线斜率,k表示溶质的分配系数,D表示扩散系数。Gibbs-Thompson 系数 Γ 是用 来表示临界晶核半径的,表示为:

$$\ln = \frac{c}{C_{\rm s}} = \frac{2\sigma \cdot M}{dRT \cdot r_{\rm crit}} \tag{5}$$

式中,c 为溶液相浓度; c_s 为溶液的饱和浓度; σ 为表 面张力;M 为晶体分子的摩尔质量;d 为晶体密度;R为摩尔气体常数;T 为绝对温度; r_{crit} 为临界晶核半 径,用来判断晶核是否能够生长成为晶粒。只有当晶 核半径大于临界晶核半径时才有可能生长成为晶 粒。不同材料的 Γ 值不同,这里取 Gibbs-Thompson 系数 Γ =2.0×10⁷ m·K。

1.2.2 柱状晶向等轴晶转变(CET)模型

柱状晶和等轴晶是构成钢锭凝固组织的两种主 要晶粒形貌。不同形貌的凝固组织具有不同的加工 性能性能和用途,所以掌握 CET 转变机制对于有效 控制钢锭的凝固组织十分重要。通常认为当柱状晶 生长前沿的等轴晶固相分数达到 0.49 时,就会发生 CET 转变^[20,21]。

4.2t Mn18Cr18N 空心钢锭底注式浇注凝固模 拟模型

1.3.1 孔隙性缺陷模拟模型

4.2t Mn18Cr18N 空心钢锭的尺寸为 ϕ 1 210 mm× ϕ 640 mm×1 100 mm。底注双套筒式浇注系统,套筒 之间添加耐火材料,耐火材料选用铬矿砂加树脂, 厚度为 20 mm。浇注系统由一个直浇道、一个横浇 道和两个内浇道构成,各浇道的尺寸可根据漏包的 包孔直径进行确定,尺寸分别为 D_{\pm} =60 mm, D_{\pm}

根据浇注系统设计理论,浇注速度取决于浇注 钢锭的质量及浇注系统决定的浇注时间;而浇注温 度过热度高出液相线温度 30~50 ℃。文献[22]研究 了浇注速度和浇注温度对凝固过程及凝固缺陷的 影响,得到合理的浇注速度为 25 kg/s,浇注温度 为1415℃。

钢锭模预热至 200 ℃,材料选用铸铁,与环境 之间为空冷,环境温度 20 ℃。内壁界面换热系数 *c*_i1 000 ~400 W/m²K,外壁界面换热系数 *c*_o1 000~ 800 W/m²K。采用保温冒口,外加保温层厚度为 10 mm。 钢锭与底座砂模之间的换热系数为 300 W/m²K。 **1.3.2** 凝固晶粒组织模拟模型

为简化计算,轴向取 1/4,高度从锭底沿轴向向 上取 100 mm 的模型,并忽略对流和偏析的影响,分 析冷却条件对空心钢锭凝固组织的影响。内外壁和 底部界面换热系数取值范围、浇注速度和浇注温度 同 1.3.1。

冷却条件对凝固组织影响的参数:体形核密度 N_v =3e+007/cm³,体形核过冷度 $\Delta T_{v,max}$ =1.5 K,体形核 过 冷 度 标 准 方 差 $\sigma \Delta T_{v,max}$ =0.1, 面 形 核 密 度 N_s =2e+006/cm³,面形核过冷度 $\Delta T_{s,max}$ =1 K,面形核过 冷度标准方差 $\sigma \Delta T_{s,max}$ =0.1。枝晶尖端生长动力学系 数 a_2 =1.4e-007, a_3 =2.4e-008。Gibbs-Thompson 系数 Γ =2.0×10⁷ m·K。CA 单元大小为 100 μm,每个有限 元体单元中包含的 CA 数为 500,最大晶粒取向数 为 5 000。

形核密度对凝固组织影响的参数:形核密度参数如表1,其余参数同上。

1.4 缩比实验

进行了模拟模型与实验模型之比为 2:1 的缩比 实验研究,并沿轴向子午面进行切割解剖,观察壁 厚截面上孔隙性缺陷的分布。

表 1 不同形核密度下的模拟方案 Tab.1 Simulation designs for different nuclei densities

模拟方案	<i>N</i> √10 ⁸	$\Delta T_{ m V,max}/ m K$	$\sigma_{\Delta T v}$	$N_{\rm S}/10^{6}$	$\Delta T_{\rm S,max}/{ m K}$	$\sigma_{\Delta T \mathrm{v}}$
Α	1.00	1.25	0.1	2	1.00	0.1
В	2.00	1.25	0.1	2	1.00	0.1
С	20.00	1.25	0.1	2	1.00	0.1
D	0.01	1.25	0.1	2	1.00	0.1
Е	0.01	1.25	0.1	20	1.00	0.1
F	1.00	2.00	0.1	2	100	0.1
G	2.00	1.25	1.0	2	1.00	0.1
н	2.00	1.25	1.0	2	2.00	0.1
Ι	2.00	1.25	1.0	2	2.00	1.0
J	20.00	1.50	0.1	2	1.00	0.1
K	20.00	1.25	1.0	2	1.00	0.1
L	2.00	1.25	0.1	20	1.00	1.0

2 试验结果及讨论

2.1 冷却条件对空心钢锭凝固缺陷和组织的影响

2.1.1 模壁冷却条件对空心钢锭孔隙性凝固缺陷的 影响

图 1 为浇注速度 25 kg/s 和浇注温度 1 415 ℃ 条件下,内外壁传热系数均为 1 000 W/m2K,模拟计 算获得的空心钢锭凝固过程中壁厚截面上的温度场 (图 1a),固液相场(图 1b),以及凝固终了时的孔隙 性缺陷分布。可以看出,由于内外壁冷却条件相同, 壁厚截面上的温度沿壁厚中心呈对称分布(图 1a)。 凝固过程也分别从内外壁开始顺序向壁厚中心推 进,最后凝固位置位于壁厚的中心区域(图 1c)。而 且由于空心钢锭的高径比较大,沿壁厚径向方向的 凝固速度大于从底部向上的轴向凝固速度,从而在 凝固终了时在钢锭壁厚的中心区域产生孔隙性缺陷 (图 1c)。图 1d 为内外壁冷却条件相同缩比实验件 冒口下方壁厚截面,与模拟结果一致,壁厚中心处断 续分布有孔隙性缺陷,约占壁厚轴向尺寸的 2/3。

对于厚壁空心钢锭,在后续的芯轴扩孔或径轴 向辗扩变形状态下,壁厚截面中心处为变形最小区 域,孔洞类缺陷不易闭合。因此,分析冷却条件对凝 固过程的影响,为合理控制凝固冷却条件提供依据。 研究发现,在浇注温度1415℃,浇注速度25 kg/s 合理的浇注工艺条件下^[27],控制内外壁冷却条件,可 以控制凝固过程及凝固缺陷分布和凝固组织特征。 当内壁换热系数降低到400 W/m²K时,在浇注充型 过程平稳的同时,钢锭径向从内外壁侧向壁厚内部 逐渐凝固(图2a),最终凝固位置在靠近内壁的 1/4~1/3 处(图2b)。钢锭内没有出现宏观缩孔,靠近 内壁的最后凝固处(距内壁约89 mm 处)存在一 定程度的缩松,并从冒口端延伸至距离钢锭下部约

1 :

Fraction Solid

1.000

0.867

0.800

0.667

 $0.600 \\ 0.533 \\ 0.467$

0.400

 $\begin{array}{c} 0.333 \\ 0.267 \\ 0.200 \\ 0.133 \end{array}$

0.067



(c)孔隙性缺陷分布和

U

(b)固液相场



(d)实验件内缺陷分布

图 1 内外壁冷却条件相同时壁厚截面上的参数分布 Fig.1 The parameter distribution on the wall thickness section under the same cooling condition

1/3 高度处(图 2c)。日本^[2]试制的 20 t 和 45 t 空心 钢锭和中国一重^[2]试制的 65 t 空心钢锭的实践结果 都表明,空心钢锭最终凝固位置不在钢锭壁厚中 心,而是在靠近里侧部位相当于壁厚的 1/4~1/3 处。 这与图 2 浇注冷却条件下凝固缺陷的位置一致,说 明图 2 中的冷却边界条件更接近于文献 [21,22]中 的实际情况。

2.1.2 模壁冷却条件对空心钢锭凝固晶粒组织的 影响

图 3(a)为与图 1 相同浇注和冷却条件下的凝固 晶粒组织。可以看出,内外壁换热系数同为 1000 W/m²K 的强冷却条件下,柱状晶从内外壁界面同时沿径向 向壁厚中心处生长,最终凝固位置在壁厚中心处, 中心等轴区较窄。当内壁换热系数降低到图 2 中的 400 W/m²K 时(图 3b),空心钢锭外壁柱状晶长度基 本不变,但是内壁柱状晶长度从图 3(a)中的 4/5 壁 厚长度减小到 3/5 壁厚长度,一次枝晶间距减小了 约 1/3。柱状晶比例也从 55%降低到 50%,即壁厚中 心等轴晶区面积增大,并发生向内壁方向扩展的现 象。说明靠近内壁处 CET 转变提前。图 3(b)组织的 浇注凝固条件与图 2 缺陷模拟条件一致。所以,文献 [23]试制获得的空心钢锭的凝固组织特征应该与 图 3(b)的凝固组织具有可比性。文献[23]实践表明 20 tCr-Mo 钢空心钢锭的内外壁侧至中心最后凝固 处,凝固组织分别由柱状晶区、枝晶区、等轴晶区组 成。这与图 3(b)的凝固组织特征一致。



Fig.2 The parameter distribution on the thick section of solidified wall under different cooling conditions

在图 3(b)的基础上,进一步降低外壁换热系数 为 800 W/m²K。与图 3(a)对比,则外壁柱状晶的长度 也略有所减小。这是由于内外壁换热系数的减小抑制了柱状晶的发展,使得 CET 转变提前。当内外壁 界面换热系数同时随着浇注时间均匀变化到凝固 结束,即内部由 1 000 W/m²·K 减小至 400 W/m²·K, 外壁由 1 000 W/m²·K 减小至 800 W/m²·K。模拟结 果如图 3(d)所示。可以看出,其凝固组织介于图 3(a) 和图 3(b),柱状晶的形貌接近图 3(a),中心等轴晶区 接近图 3(b),约占 50%。说明当边界条件为变化值 时可以加快 CET 转变。

通过控制浇注凝固工艺参数,控制凝固缺陷的 前提下,进一步控制凝固组织及其形貌,需要控制 熔体的纯净度或借助异质形核来改变形核密度,从 而达到在浇注冷却工艺参数确定的情况下进一步 控制凝固晶粒组织的目的。

2.2 形核密度对空心钢锭凝固组织的影响

描述形核的参数主要包括体形核密度 N_v 、面形 核密度 N_s 以及相对应的最大形核过冷度 ΔT_{max} 和过 冷度标准方差 $\sigma \Delta T_o$ 设置不同形核密度参数的模拟 方案(见表 1),通过对比模拟结果,分析形核密度对 空心钢锭凝固组织的影响。

图 4 是不同形核密度模拟方案下的模拟结果。 如图 4(a,b)所示,在其他形核密度不变的条件下,只 增大体形核密度 N_v,中心等轴晶区面积增大,柱状 晶生长受到抑制,CET 转变提前。柱状晶与等轴晶 的尺寸均减小,显微组织更加均匀致密。晶粒尺寸减 小是由于增大 N_v时,钢液在较小的过冷度下即可形 核,晶核数量的增多导致晶粒不能充分长大。如图 4 (c)所示,当 N_v增大到 2e+009/cm³时,可得到全部的 细小等轴晶组织。如图 4 (d),当 N_v减小到 1e+006/cm³时,中间等轴晶区消失,凝固组织全部由 柱状晶组成。由以上结果可知。体形核密度 N_v是控 制 CET 转变的主要因素。增大体形核最大过冷度





(k)K

(1)L

(i)I

图 4 不同形核密度下的凝固显微结构 Fig.4 Solidification microstructures with different nuclei densities

(i)J

 $\Delta T_{V,max}$,发现凝固组织没有发生明显的变化,如图 4(a,f)。增大体形核过冷度标准方差 $\sigma_{\Delta TV}$,可看到柱 状晶与中心等轴晶区的面积没有发生变化,但是中 心等轴晶尺寸略有增大,如图 4(b,g)。

对比图 4(d)和图 4(e),增大面形核密度 N_s ,没 有对 CET 转变产生影响,凝固组织仍然全部由柱状 晶组成,但柱状晶的一次枝晶间距 λ_1 有所减小。这 是因为空心钢锭内外壁单位面积上的形核数量增 大,向钢锭内部生长的柱状晶的数量相应增多,一 次枝晶间距 λ_1 就会减小。增大面形核最大过冷度 $\Delta T_{S,max}$ 对凝固组织的影响不大,如图 4(g,h)。增大面 形核过冷度标准方差 $\sigma_{\Delta Ts}$,柱状晶与等轴晶的尺寸 和晶区面积不变,但内部等轴晶分布更加均匀,如图 4(h,j)。

由上述模拟结果可以得到,影响凝固组织的形 核密度参数主要有 $N_v,\sigma_{\Delta Tv},N_s$ 和 $\sigma_{\Delta Tso}$ 增大 N_v 使柱 状晶与等轴晶的晶粒尺寸减小,增大 $\sigma_{\Delta Tv}$ 则使等 轴晶的晶粒尺寸增大。模拟方案J同时增大 N_v 和 $\Delta T_{v,max},模拟方案K同时增大<math>N_v$ 和 $\sigma_{\Delta Tvo}$ 对比模拟 方案J和K的结果(图4j,k),凝固组织几乎全部由 细小的等轴晶构成,后者晶粒尺寸略大于前者,说明 N_v 是控制CET转变和晶粒尺寸的主要因素。模拟 方案I是同时增大 N_s 和 $\sigma_{\Delta Ts}$,结果显示(图41)柱状 晶的一次枝晶间距 λ_1 有所减小,CET转变没有发生 明显的变化。

综上所述, N_v 是影响 CET 转变的主要形核密 度参数; N_v 和 $\sigma_{\Delta Tv}$ 都会显著影响晶粒的尺寸, (D_v) 是主要因素; N_s 可以控制柱状晶的一次枝晶间距; 增大 $\sigma_{\Delta Ts}$ 可以起到使中心等轴晶分布更均匀的效 果。在实际生产中,可以在浇注时加入异质形核合 金,改变晶粒的形核密度,从而控制 CET 转变的快 慢和晶粒的尺寸^[25],达到控制钢锭凝固组织的目的。

3 结论

(1)内外壁的冷却条件显著影响钢锭的凝固 组织,进而控制钢锭壁厚的最终凝固位置和缺陷分 布。在1415 C和25 kg/s 浇注条件下,当内外壁换 热系数同为1000 W/m²K时,与试验相符,最后凝 固位置位于壁厚的中心区域,并伴随有孔隙性缺 陷产生。当内外壁的换热系数分别为400 W/m²K 和1000 W/m²K时,钢锭径向从内外壁侧向壁厚内 部逐渐凝固。最后凝固位置在靠近内壁的1/4~1/3 壁厚处,疏松缺陷从冒口下端一直延伸至距离钢锭 下部约1/3 处。该处为等轴晶组织,而靠近内外壁则 为柱状晶组织,且两种形貌晶粒组织比例相当。 (2)随着内外壁换热系数的减小,CET 转变提前,抑制了柱状晶的发展,柱状晶长度减小,一次枝晶间距减小,晶粒的分布变得更加均匀。当内壁换热系数从1000 W/m²K 减小到400 W/m²K,柱状晶比例也从55%降低到50%。

(3)体形核密度 N_v 是影响 CET 转变的主要形 核密度参数; N_v 和体形核密度标准方差 $\sigma_{\Delta T v}$ 都会显 著影响晶粒的尺寸, $(0, N_v)$ 是主要因素; 面形核密度 N_s 可以控制柱状晶的一次枝晶间距; 增大面形核密 度标准方差 $\sigma_{\Delta T s}$ 可以起到使中心等轴晶分布更均 匀的效果。分析得出了全部为柱状晶或全部为等轴 晶 的 极 限 体 形 核 密 度 值 分 别 为 1e+006/cm³ 和 2e+009/cm³。

参考文献:

- 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] 郭显胜,田丰,杜璇,等.空心钢锭制造技术发展现状[J].大型铸 锻件,2015(2):12-16.
- [3] 邢世勋,于广文.空心钢锭生产技术的发展与应用 [J].金属世 界,2013(1):26-29.
- [4] Giradin G, Jobard D, and et. al. Hollow ingots: thirty years of use to control segregation and quality for nuclear and petrochemical large shells[C]. Forge masters Meeting, 2011,20:32-35.
- [5] 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.
- [6] 樊超,王光明,张挨元,等. ProCAST 模拟仿真技术在铸钢件缺 陷预测中的应用[J].铸造技术, 2019,40(7),705-707.
- [7] 于海龙, 沈明钢, 张春宇, 等. 不同高宽比下大钢锭凝固过程的 数值模拟与优化[J]. 铸造技术, 2015, 36(3), 729-731.
- [8] 吉晓霞,常军委,韩兴,等.数值模拟参数对铸钢件缩孔缩松预 测精度的影响[J].铸造,2019,68(12):1355-1361.
- [9] 李亚辉. 空心钢锭的传热过程分析 [J]. 大型铸锻件, 2017(1): 25-28.
- [10] 张向琨,石伟,高国峰,等.空心钢锭凝固过程温度场模拟与缩 孔、疏松预测[J].铸造,2000,49(6):344-348.
- [11] V S Dub, L Ya Levkov, et al. Experience of Production of Hollow Tubular Ingots by Electroslag Melting [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2015(6):478-486.
- [12] 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.
- [13] 郑立春,董艳武,姜周华,等.电渣液态浇注空心钢锭的数值模 拟[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(8):1162-1165.
- [14] Niyama E, Uchida T. A method of shrinkage prediction and its application to steel casting practice. AFS Int [J]. Cast Metal,1998(7): 52-63.
- [15] 崔吉顺,李文珍.铸件缩孔缩松多种预测判据的应用[J].清华大 学学报(自然科学版) 2001,41(8):5-8.
- [16] 贾宝仟,柳百成.基于枝晶间渗流理论的砂型铸件缩孔缩松判据 N=G/R 的讨论及应用[J]. 热加工工艺,1996(2):34-36.

(下转第741页)

75-83

- [6] 虞大联,邓小军,刘韶庆,等.复合材料技术在转向架中的应用[J].电力机车与城规车辆,2015(38):17-22.
- [7] 李辰,许淑萍,张伟龙,等.复合材料在轨道交通转向架中的应用[J].纤维复合材料,2019 (3): 6-11.
- [8] 门永林,楚永萍,冯遵委.纤维增强复合材料在转向架上的应用 研究[J].铁道机车车辆,2019 (39): 92-95.
- [9] 李梁京,王继荣,李军.新型轻材料在转向架部件中的应用[J]. 青岛大学学报(自然科学版),2017 (30): 42-46.

[21] Hunt J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites

[22] 张博,朱花,赵晓东,等.空心钢锭凝固过程缺陷的模拟研究[J].

[23] 松野淳一. 锻造用大型中空钢锭的凝固与偏析 [J]. 英在田摘译.

[25] 宋迎德,郝海,谷松伟,等.枝晶尖端生长速度对凝固组织数值

模拟的影响研究-Ivantsov函数近似方式的确定 [J]. 铸造技术,

[24] 许天华. 空心钢锭的制造技术[J]. 一重技术, 2004 (2): 28-31.

太原科技大学, 2018, 39(1):35-41.

大型铸锻件, 1983(4):66-71.

2011, 32(1): 34-38.

and eutectic [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65 (1):

(上接第732页)

- [17] Hunt J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65(1): 75-83
- [18] Zhu M F, Hong C P. A modified cellular automaton model for the simulation of dendritic growth in solidification of alloys [J]. ISIJ International, 2001, 41(5):436-445.
- [19] Flood S C, Hunt J D. Columnar and equiaxed growth:I-A model of a columnar front with a temperature dependent velocity [J]. J Crys Growth,1987,82(3): 543-551.
- [20] Flood S C, Hunt J D. Columnar and equiaxed growth: I-I-E-quiaxed growth ahead of a Columnar front[J]. J Crys Growth, 1987, 82(3):552-560.

(上接第735页)

比,可以看出半调式斜流泵叶轮叶片加工制造的问题得到了有效的解决,保证了设计要求。

7 结论

通过完善铸造工艺和机加工工艺,保证了叶片 加工精度的问题;叶片定位销孔设计错误时,面临 着无工艺卡头并且要解决加工定位销孔的问题,通 过工装胎具的设计,解决了装卡的问题。通过解决 半调式斜流泵在试制过程中的各种问题,编制半调 式斜流泵叶轮典型制造工艺,为其加工制造提供了

参考文献:

宝贵经验。

 [1] 成大先,王德夫,刘世参,等.机械设计手册(第五版)[M].北京: 化学工业出版社,2011.

福建省榕霞石英砂有限责任公司 漳浦县榕霞矿业开发有限公司

Company Company

我公司创办于1976年,是国内较早从事石英砂系列产品生产、销售一体化经营的综合性企业。公司拥有丰富的优质石英砂矿产资源,矿区面积1000多亩,年开采量可达40万吨。公司生产的石英砂产品具有SiO2含量高,含泥量低、角形系数小等特点,是高品位的天然石英砂。

"榕霞"天然石英砂系列产品现广泛应用于国内铸造行业、机械制造行业、全国各水处理行业及玻 璃制造、钢铁冶金行业等,质量达到国际先进水平。公司已通过ISO9001、ISO14001管理体系认证, 先进的生产工艺及完善的品质保障体系确保了产品质量的长期稳定,专业的销售团队为客户提供优质完 善的售后服务。



地址:福建省晋江市金井 电话:0595-85332410 85332410 传真:0595-85331410 www.rxsgy.com E-mail:rxsgy@163.com