

14Cr-13Co-5Mo-2Ni 齿轮钢真空自耗熔炼过程的数值模拟

程爱民 马 昱 高向宙 李京社 杨树峰 白李国
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘 要 建立了 14Cr-13Co-5Mo-2Ni 齿轮钢(/% : 0.014C, 0.26Si, 0.17Mn, 13.79Cr, 12.69Co, 4.66Mo, 2.00Ni, 0.53Al) 直径 290 mm 9 t 锭真空自耗熔炼过程三维数学模型, 研究冷却水压、电流和熔化速率对自耗锭凝固组织分布及晶粒大小的影响。研究表明, 当冷却水压由 6 000 MPa 增加到 8 000 MPa, 电流由 6.250 0 kA 减小至 6.228 6 kA, 熔化速率由 1.250 kg/s 降低至 1.125 kg/s 后, 冶炼的自耗锭内部等轴晶区域增大将近 1 倍, 晶粒数目提高了 45.17%, 晶粒平均半径减小了 17%, 最大二次枝晶间距减小了 4.88%, 基本达到晶粒细化, 合金元素分布均匀化的目的。

关键词 14Cr-13Co-5Mo-2Ni 齿轮钢 真空自耗 工艺参数 数值模拟

Numerical Simulation on Consumable-Electrode Vacuum Melting Process for 14Cr-13Co-5Mo-2Ni Gear Steel

Cheng Aimin, Ma Yu, Gao Xiangzhou, Li Jingshe, Yang Shufeng and Bai Ligou
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract A three-dimensional mathematical model for consumable-electrode vacuum melting process of 14Cr-13Co-5Mo-2Ni gear steel (/% : 0.014C, 0.26Si, 0.17Mn, 13.79Cr, 12.69Co, 4.66Mo, 2.00Ni, 0.53Al) diameter 290 mm, 9 t ingot has been established to study the effect of cooling water pressure, electric current and smelting rate on distribution of solidified structure and grain size of consumable-electrode vacuum melting ingot. Research results show that as the cooling water pressure increases from 6 000 MPa to 8 000 MPa, the current and smelting rate respectively decrease from 6.250 0 kA and 1.250 kg/s to 6.228 6 kA and 1.125 kg/s, the equiaxed zone in melted ingot increases nearly by one-fold, amount of grain increases by 45.17%, average grain size decreases by 17% and max spacing between secondary dendritic arms decreases by 4.88%, basically to achieve the object of grain fining and uniform distribution of alloying elements in steel.

Material Index 14Cr-13Co-5Mo-2Ni Gear Steel, Consumable-Electrode Vacuum Melting, Process Parameters, Numerical Simulation

齿轮是一种传递转矩和角运动的机械构件, 其复杂的服役环境对齿轮钢的洁净度、均匀性以及细晶化提出了较高的要求。采用纯净原材料和双真空冶炼工艺使洁净度得到有效控制, 而如何控制凝固, 获得合理均匀组织成为主要矛盾^[1-2]。

真空自耗冶炼过程工艺参数对凝固组织影响的研究方法中, 工业试验具有成本高、周期长等缺点^[3-4], 数值算法逐渐取代了工业试验法成为主要方法。如李海松^[5]曾对真空自耗电弧熔炼 γ -TiAl 合金铸锭凝固组织进行了数值模拟, 得出增大熔炼速率可促进等轴晶形成, 增大界面传热系数有利于促进柱状晶形成和长大; 高帆^[6]、龙洋^[7]等人也进行过类似的模拟研究。

本文基于钢厂齿轮钢真空自耗熔炼的生产实际, 拟采用数值模拟法研究直径为 290 mm, 锭重 1 000 kg 的 14Cr-13Co-5Mo-2Ni 钢锭(表 1)真空自耗熔炼过程, 确定最佳的自耗冶炼工艺条件, 从而得

表 1 14Cr-13Co-5Mo-2Ni 齿轮钢主要合金成分 / %
Table 1 Main alloying composition of 14Cr-13Co-5Mo-2Ni gear steel / %

C	Si	Mn	Al	Cr	Co	Mo	Ni
0.014	0.26	0.17	0.53	13.79	12.69	4.66	2.00

到合理的凝固组织分布及晶粒尺寸大小。

1 数学模型与边界条件

1.1 数学模型

凝固过程非稳态计算采用 Fourier 导热偏微分方程^[6], 表达式为:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q$$

式中: ρ - 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_p - 定压热容/[$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]; T - 温度/ $^\circ\text{C}$; t - 时间/s; λ - 热导率/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]; Q - 热源项/($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$); x, y, z - 三维坐标。

1.2 假设条件

由于冶炼过程涉及钢液的填充和凝固,过程极其复杂,本研究在计算过程中作如下假设:不考虑钢液在凝固过程中的相对流动,钢液内部以热传导方式传热;钢和结晶器的热物性参数(导热参数、密度等)随着温度的变化而变化;当所有钢的温度低于固相线温度时,认为钢锭全凝固,其凝固组织形态不再变化。

1.3 边界条件

为便于计算,模型建立时只模拟结晶器部分。自耗锭材质由实际生产 14Cr-13Co-5Mo-2Ni 齿轮钢的成分而定,结晶器材质选择的是纯铜。

由于冶炼过程中电弧在不断给熔化电极提供热量产生钢液,因此对于钢锭而言液层上方是恒温状态,即视钢液顶部为绝热条件;结晶器内层紫铜与外部冷却水间的换热通过计算热流率来确定;结晶器底部的冷却水压采用外接函数模块,来实现换热随锭身温度的变化而逐渐减小。结晶器身部调用外接函数模块实现结晶器的冷却与钢锭高度的同步;充型计算时,质量源和热源随钢液液面上升。生产现场原始的边界条件参数见表 2。

2 模拟结果与讨论

2.1 现有工艺条件下的模拟结果

为了减小计算量,鉴于模型的对称性,只选择如图 1(a)所示 1/2 切面进行微观组织形貌的计算。

由图 1(b)计算所得的微观组织形貌可以看出,在自耗锭底部外表面有大量晶核产生,形成了一个区域很窄的由许多细小等轴晶粒组成的细晶区;紧邻细晶区的是垂直于结晶器底部的竖直柱状晶区,呈倒三角形;往上是由垂直于熔池,呈倒“V”形状的柱状晶组成的柱状晶区;在凝固末端(自耗锭顶端)是由等轴晶组成的等轴晶区,这是因冶炼末端小电流补缩引起的。整个计算得出的微观形貌也与实际锭型的凝固组织结构(图 1c)相一致,验证了该模型的准确性。

表 2 模型主要边界条件
Table 2 Main boundary conditions of model

项目	数值
锭型填充后初始温度/℃	1 700
结晶器初始温度/℃	30
大气环境温度/℃	30
锭身与冷却水换热系数/[W·(m ² ·K) ⁻¹]	800
液相线温度/℃	1 421
固相线温度/℃	1 322
比热容/[kJ·(kg·℃) ⁻¹]	0.46
等效质量源/(kg·s ⁻¹)	0.015 7

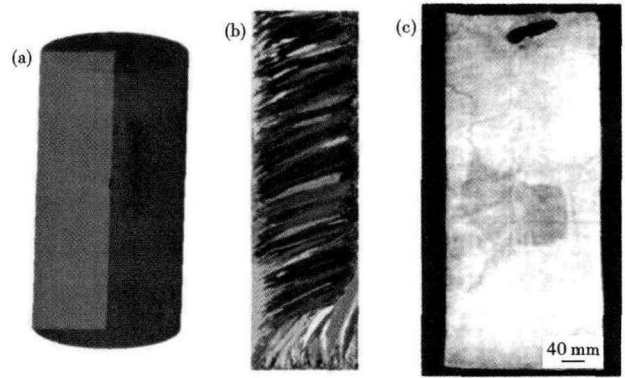


图 1 (a)计算区域选择;自耗锭纵向组织计算(b)和试验(c)结果

Fig. 1 (a) to choose computational domain; (b) calculated and (c) experimental results of ingot longitudinal structure

2.2 工艺参数改进前后的模拟结果及讨论

真空自耗过程中对铸锭组织均匀性和晶粒大小分布影响较大的工艺参数主要有冷却水压、熔池温度以及熔化速率等。冷却水压大小主要受冷却水流量、冷却水流动速度及冷却水与结晶器间传热系数的影响;熔池温度主要受电压、电流的控制;熔化速率即是单位时间内自耗电电极的熔化速度。表 3 是工艺改进前后冶炼参数对比情况,模拟结果对比如图 2 和图 3 所示。

由图 2(a,b)可以看出,改进后柱状晶组织变短变细,外层激冷层区域向内扩展,心部等轴晶区域面积扩大(CET 转变位置向外移动约 10%),是原有等

表 3 工艺改进前后冶炼参数对比

Table 3 Comparison smelting parameters between before and after process optimization

工艺	冷却水压/MPa	电压/V	电流/kA	熔化速率/(kg·s ⁻¹)	冶炼时间/min
改进前	6 000	25.000 0	6.250 0	1.250	780
改进后	8 000	24.914 3	6.228 6	1.125	852

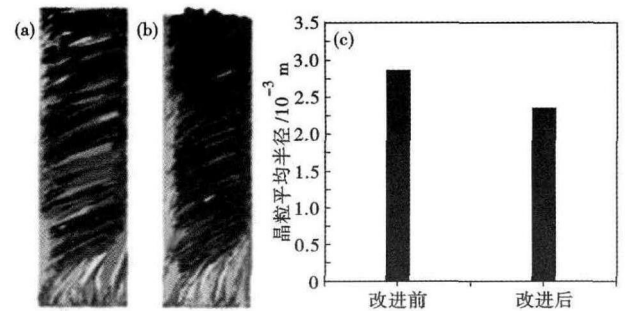


图 2 工艺改进前(a)后(b)晶粒形貌和(c)晶粒平均半径对比

Fig. 2 Comparison of grain morphology in ingot before (a) and after (b) process optimization and average grain radius (c)

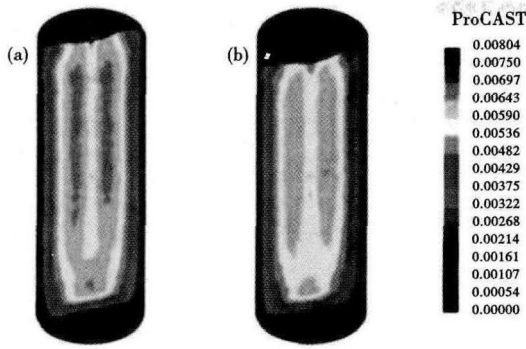


图 3 工艺改进前(a)后(b)二次枝晶间距分布
 Fig. 3 Distribution of spacing of secondary dendritic arms before (a) and after (b) process optimization

轴晶区域的 1.67 倍,同时底部三角形区域内的柱状晶尺寸也有所减小。

图 2(c)为工艺改进前后微观组织形核晶粒平均半径的变化情况,可以看出,工艺改进后形核数目大幅增加,晶粒数目提高了 45.17%;晶粒平均半径有所减小,减小幅度约为 17%。

由图 3 可以看出,改进工艺后凝固组织中二次枝晶间距有较大幅度的减小。改进前工艺最大二次枝晶间距为 8.2×10^{-6} m,改进后最大二次枝晶间距为 7.8×10^{-6} m,减小幅度为 4.88%。

冶炼工艺参数改进后的模拟结果显示,自耗锭凝固组织中晶粒数目有大幅度提高,晶粒平均半径也有一定幅度减小,内部等轴晶区域增大将近 1 倍,最大二次枝晶间距有所减小。说明改进后的工艺很大程度上能细化晶粒,减小二次枝晶间距,这也有利于提高合金元素的分布均匀性。

3 结论

(1)对 14Cr-13Co-5Mo-2Ni 钢锭建立数学模型

并对其凝固微观组织进行了模拟计算,通过与实际锭型的低倍组织形貌进行对比验证,可得该模型能准确模拟实际锭型的凝固组织。

(2)模拟结果显示,当冷却水压由 6 000 MPa 增加到 8 000 MPa,电流由 6.250 0 kA 减小至 6.228 6 kA,熔化速率由 1.250 kg/s 降低至 1.125 kg/s 后,冶炼的自耗锭晶粒数目提高 45.17%,晶粒平均半径减小 17%,CET 转变位置外移,内部等轴晶区域增大将近 1 倍,最大二次枝晶间距减小 4.88%。改进后的工艺能够在很大程度上细化晶粒,减小二次枝晶间距,提高合金元素分布的均匀性。

国家自然科学基金资助项目(No51374016)

参考文献

[1] 吴树漂,刘占江,武云峰,等.我国齿轮钢的生产与应用[J].特殊钢,2003,24(5):30-33.
 [2] 柳春桃.国内轮齿钢的发展动向[J].湖南冶金,1996(5):41-47.
 [3] 高帆,王磊,王新英,等.真空自耗方法冶炼工业尺寸 TiAl 合金铸锭的冶金质量分析[J].中国有色冶金,2010(1):65-68.
 [4] 王颖慧,吴彬,姜治隆,等.真空自耗熔炼钛铝合金铸锭的研制及性能研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2010,28(1):97-99.
 [5] 李海松,李宏伟,寇宏超,等.真空自耗电弧熔炼 γ -TiAl 合金铸锭凝固组织模拟[J].特种铸造及有色合金,2012,32(10):901-904.
 [6] 高帆,王新英,王磊,等.TiAl 合金真空自耗熔炼过程的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2011,31(7):608-611.
 [7] 龙洋.钛合金真空自耗重熔过程中温度场数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:27-41.

程爱民(1969-),男,博士(北京科技大学),1991 年河北联合大学(本科)毕业,特殊钢冶炼工艺研究。

收稿日期:2014-04-29

下 期 要 目

基于有限元法优化低碳钢板坯连铸机结晶器锥度的设计 王卫华等
 基于水力学模拟试验的 3 流连铸 20 t 中间包结构优化研究 杨凌志等
 电渣重熔过程 ANF-6 渣 Al_2O_3 选分结晶对渣皮成分和组织的影响 赵俊学等
 融盐电沉积过程温度对 1.6Si 无取向硅钢片 Si 扩散的影响 李慧等
 低磷低硅铁水 180 t 复吹转炉冶炼高磷钢的工艺优化 管挺等
 特殊钢连铸生产中 30 t 中间包感应加热的应用 谢文新等
 双道次热压缩 50CrV4 弹簧钢奥氏体的静态再结晶 吴浩等
 316LN 高氮超低碳奥氏体不锈钢的热变形行为和组织演变 裴海祥等
 盾构机轴承套圈用钢 42CrMo 连续加热奥氏体晶粒长大模型 郑禹等