

· 试验研究 ·

大型钢锭锭重兼容设计的适用性研究和应用

刘宁宁^{1,2} 许长军^{1,2} 吕 严^{1,2} 胡翰廷^{1,2} 张 岩^{1,2}

(辽宁科技大学, 1 材料与冶金学院; 2 冶金工程技术中心, 鞍山 114051)

摘 要 基于锭重兼容设计了插板式(C)、套圈式(T)和垫圈式(D)三种锭型,并运用有限元软件模拟10~15 t、20~27 t、29~35 t、39~45 t、50~60 t 42CrMo4 钢锭在三种锭型下的凝固特性。结果表明,在10~60 t 锭重内,随兼容容量增大,凝固末期液相穴愈加深入锭身,在D锭型中表现尤为明显。当兼容容量占原始锭重10%以下时,三种锭型凝固时间相近,中心疏松长度差均保持在69 mm以下;当兼容容量超过10%时,D锭型相对C锭型和T锭型凝固时间明显减少,中心疏松长度延长了107~232 mm;而当兼容锭重超过20%时,钢锭中心疏松长度将增大两倍以上,钢锭质量明显恶化。因此,当兼容锭重在10%以下时,宜采用T锭型和D锭型;当兼容容量在10%~20%时宜采用T锭型和C锭型。在现场进行42CrMo4 钢20~27 t兼容锭工业应用,其超声波探伤结果均达到Ⅱ级要求。

关键词 大型钢锭 锭重兼容 凝固时间 中心疏松

Applicability Research of Ingot Weight-Compatible (IWC) Design of Large Ingot and Application

Liu Ningning^{1,2}, Xu Changjun^{1,2}, Lü Yan^{1,2}, Hu Hanting^{1,2} and Zhang Yan^{1,2}

(1 School of Materials and Metallurgy; 2 Metallurgical Engineering Technology Center, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract Based on the Ingot Weight-compatible (IWC) design, three ingot designs [embedded insulation board (C), assemble ferrule (T) and assemble gasket (D)] are designed, and the solidification pattern of the 10 ~ 15 t, 20 ~ 27 t, 29 ~ 35 t, 39 ~ 45 t and 50 ~ 60 t 42CrMo4 steel ingots is predicted by finite element software. It can be seen that with 10 ~ 60 t ingot the liquid core more and more deep into ingot body especially in D design with the increase of compatible volume. When the compatible volume is less than 10% of the original ingot weight, the solidification time of the three designs is similar, and the difference of the center porosity length is below 69 mm. When the compatible volume is greater than 10%, the solidification time of D ingot decreases compared with two other mode (C and T ingot), and the center porosity length extends 107 ~ 232 mm. However, when the compatible volume exceeds 20%, the length of the center porosity of ingot will of ingot increase more than two times, and the quality of the ingot will worsen obviously. Therefore, when the compatible volume is less than 10%, T and D mode should be selected. T and C mode are taken into consideration when the compatible volume is between 10% and 20%. The in-situ commercial application for 42CrMo4 steel 20 ~ 27 t IWC ingot shows that, the ultrasonic detection results of ingots have reached Ⅱ grade requirement.

Material Index Large Ingot, Ingot Weight-Compatible, Solidification Time, Center Porosity

重型装备中的关键部件一般采用大型钢锭整锻而成,如汽轮机转子,航母用特厚板、大型模具、发电机转子等^[1]。钢锭在凝固过程中由于凝固收缩、溶质对流等现象会产生疏松、缩孔、偏析等缺陷,对凝固质量造成影响^[2]。不合理的锭模参数会增加模耗同时影响钢锭凝固质量,因此,钢锭生产厂家均会对锭型进行优化^[3,4]。钢锭相关行业产品以小批量、多品种、规格繁多、质量要求愈加苛刻为显著特征,所需钢锭模规格和数量亦随之繁杂,造成锭模制作、管理与维护等成本骤然增加。为了避免资源浪费,降低成本,对锭重兼容设计研究思路应运而生^[5,6],

采用该思路可做到在同一锭模内浇注多种锭重相近的钢锭,极大减少了锭模成本,同时节省锭模存放空间,便于管理。本文研究设计了插板式、套圈式和垫圈式三种锭型,通过有限元软件模拟了10~60 t内钢锭(10~15 t、20~27 t、29~35 t、39~45 t、50~60 t)在三种锭型下的凝固过程和质量,系统研究了锭重兼容设计对钢锭凝固质量的影响,以及在10~60 t内不同锭型的适用性。

1 钢锭重量兼容锭型设计

锭重兼容设计研究是通过调整绝热板位置以及

改变锭模结构达到一模多铸的目的,并设计了插板式、套圈式和垫圈式三种锭型,如图1所示。用“C”代表插板式图1(a),通过调整锭模内绝热板的高度调整锭重;用“T”代表套圈式图1(b),采用分体式设计,在钢锭本体上部装配无锥度套圈调整锭重;用“D”代表垫圈式图1(c),采用分体式设计,在钢锭本体下部装配无锥度垫圈调整锭重。表1为兼容锭型设计参数,其中C锭型与T锭型的锭型参数相同,由于钢锭存在一定锥度,随兼容容量提升,D锭型

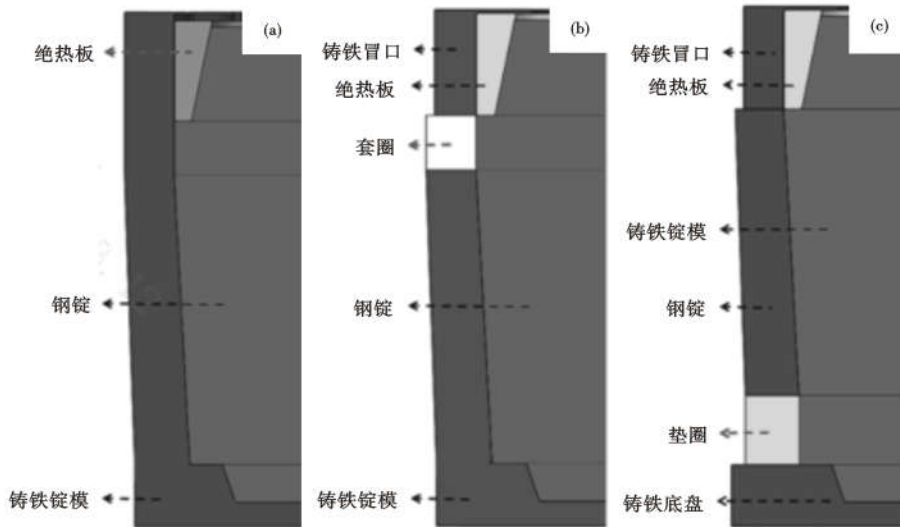


图1 (a)插板式(b)套圈式(c)垫圈式锭型设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IWC designs of insulation board (a) and ferrule (b) and gasket (c) mode

表1 42CrMo4 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 42CrMo4 steel/%

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S
0.38	0.23	0.88	1.05	0.20	0.03	0.035	0.035

高径比更大,锥度更小。本文研究的锭重范围涵盖了10~60 t,为保证冒口补缩效果,根据不同锭重范围调整冒容比。

2 钢锭锭重兼容锭型数学模型建立

2.1 控制方程

钢锭凝固过程的三维非稳态导热控制方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + Q \quad (1)$$

式中, ρ -钢液密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$, C_p -定压比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{k})^{-1}]$, T -材料热力学温度/ $^{\circ}\text{C}$, λ -换热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{kg} \cdot \text{k})^{-1}]$, Q -单位体积物体单位时间内释放的热。

钢液与锭模之间的传热控制方程为:

$$-\lambda c \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) |_{w_1} = h_{(c-m)} (T_{w_1} - T_{w_2}) \quad (2)$$

式中: λc -材料换热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{kg} \cdot \text{k})^{-1}]$, T -温度/ $^{\circ}\text{C}$, $h_{(c-m)}$ -钢锭/锭模换热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot \text{K})^{-1}]$, T_{w_1} -钢锭外表面温度/ $^{\circ}\text{C}$, T_{w_2} -钢锭内表面温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 网格划分及材料选取

所有钢锭模型以结构网格进行划分,划分尺寸

29 mm × 29 mm × 29 mm,图

2为钢锭网格划分示意图。紫色区域为套圈和垫圈装配位置,该处网格与其余部分平滑过渡,网格尺寸一致。锭模材料为灰口铸铁,钢锭材料为42CrMo4,主要化学成分如表1所示。

2.3 锭重兼容传热模型与验证

钢锭凝固过程由于凝固收缩会在钢锭与锭模之间形成气隙,随着凝固进行钢锭-锭模之间传热系数逐渐减小^[7-8]。本研究换热模型综合考虑了气隙对传热的影响,详见图3(a)。锭模与空

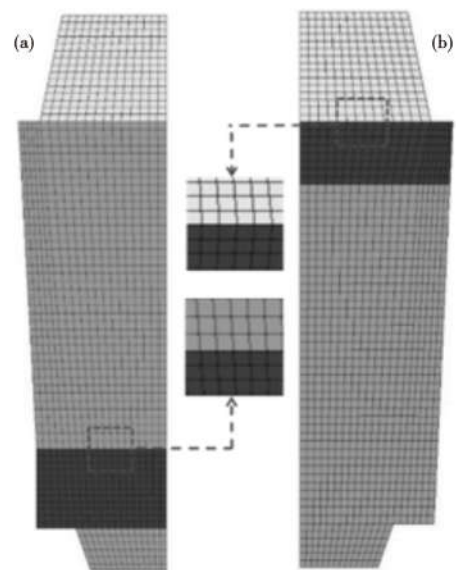


图2 (a)C锭型与T锭型(b)D锭型网格划分

Fig. 2 Mesh generation of C and T ingot (a) and D ingot (b) mode

表 2 兼容锭型设计参数

Table 2 Design parameters of ingot weight-compatible mode

锭型	锭重/t	高径比/%	锥度/%	冒容比/%
C 锭型、T 锭型	10~15	1.56~2.24	3.0~2.1	11.6
	20~27	1.62~2.13	4.7~3.6	13.1
	29~35	1.54~1.82	4.6~3.9	14.0
	39~45	1.39~1.59	4.8~4.2	14.7
	50~60	1.39~1.59	4.9~4.2	16.2
D 锭型	10~15	1.56~2.36	3.0~1.9	11.6
	20~27	1.62~2.21	4.7~3.3	13.1
	29~35	1.54~1.92	4.6~3.7	14.0
	39~45	1.39~1.67	4.8~4.0	14.7
	50~60	1.39~1.66	4.9~4.0	16.2

气的换热系数为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，绝热板与钢锭换热系数为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，浇注温度 $1537 \text{ }^\circ\text{C}$ （过热度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ），锭模预热温度 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

为了验证传热模型的准确性，在现场浇注了 42CrMo4 的 39 t 钢锭，钢锭本体高度 2162 mm，冒口浇高 387 mm，其余锭型参数见表 2。对脱模后的钢

锭进行表面测温，将模拟温度场结果与现场数据相比，具体结果见图 3(b)，从图 3(b) 中可知，模拟结果相对于实际测温数据，冒口处温度较高，锭尾为处温度略低，但总体上二者温度曲线基本吻合，因此，该传热模型可较为准确的预测钢锭凝固过程。

3 结果分析

3.1 兼容锭型对钢锭液相穴的影响

图 4 为固相率 90% 时不同锭型下的钢锭液相穴相穴形貌。从图 4 中可知，在模底与侧壁的冷却作用下，凝固前沿以 U 型或 V 型向冒口推进，且随着兼容容量提升，钢锭高径比变大，锭模侧壁的冷却能力有所增强，钢锭液相穴随之延长。在 30 t、52 t 钢锭中，如图 4(a、c)，三种锭型的钢锭参数相近，锭型的改变未对钢锭温度场造成明显影响，其凝固末期液相穴长度差在 21 mm 内，且整体呈 U 型，有利于冒口向下补缩。

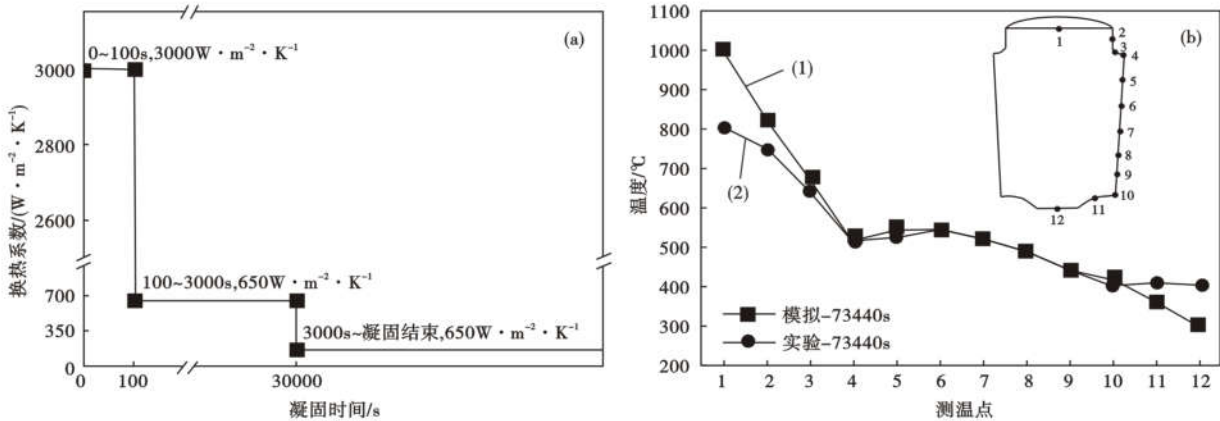


图 3 (a) 钢锭/锭模换热系数和(b)42CrMo4 钢 39 t 锭表面温度模型计算(1)和现场测量曲线(2)

Fig. 3 Heat transfer coefficient between ingot and mold (a) and model calculated curve (1) and in-situ measured curve (2) of surface temperature of 42CrMo4 steel 39 t ingot (b)

从图 4(b、d) 可知，在 35 t 钢锭中，D 锭型相对 C、T 锭型液相穴延长了 77 mm、72 mm，而在 60 t 钢锭中，D 锭型相对 C、T 锭型液相穴向下延伸了 41 mm、61 mm。根据钢锭设计原理可知，钢锭下部的冷却能力强于上部，其中 C 和 T 锭型增加了钢锭上部钢液体积，其液相穴随兼容容量提升而延长主要是由高径比增大导致的，而位于钢锭下部的垫圈，增强了钢锭下部冷却能力的同时也使得 D 锭型高径比更大，更易于凝固前沿潜热释放，致使 D 锭型液相穴与凝固前沿糊状区宽度增大。随着液相穴与糊状区宽度的增大，冒口与凝固前沿的补缩通道变得细长，冒口对凝固前沿的补缩能力逐渐减弱。由此

可见，在相同锭重下，D 锭型冒口补缩能力弱于 C 和 T 锭型。

3.2 兼容锭型对钢锭凝固时间的影响

图 5 为兼容锭型对钢锭凝固时间的影响。从图 5 中可知，随着兼容容量提升，C 和 T 锭型凝固时间呈线性增大，C 锭型相对 T 锭型凝固时间略短。这是由于 C 和 T 锭型通过增加锭身上部钢液调整锭重，而冒口作为钢锭最后凝固区，凝固末期未凝钢液聚集于冒口以及锭身上部，随着兼容容量提升，C 和 T 锭型锭身上部未凝钢液比例上升，在绝热板的作用下钢锭凝固时间得以延长。而 C 锭型相对 T 锭型凝固时间略短，这是由于 T 锭型采用保温冒壳设计，

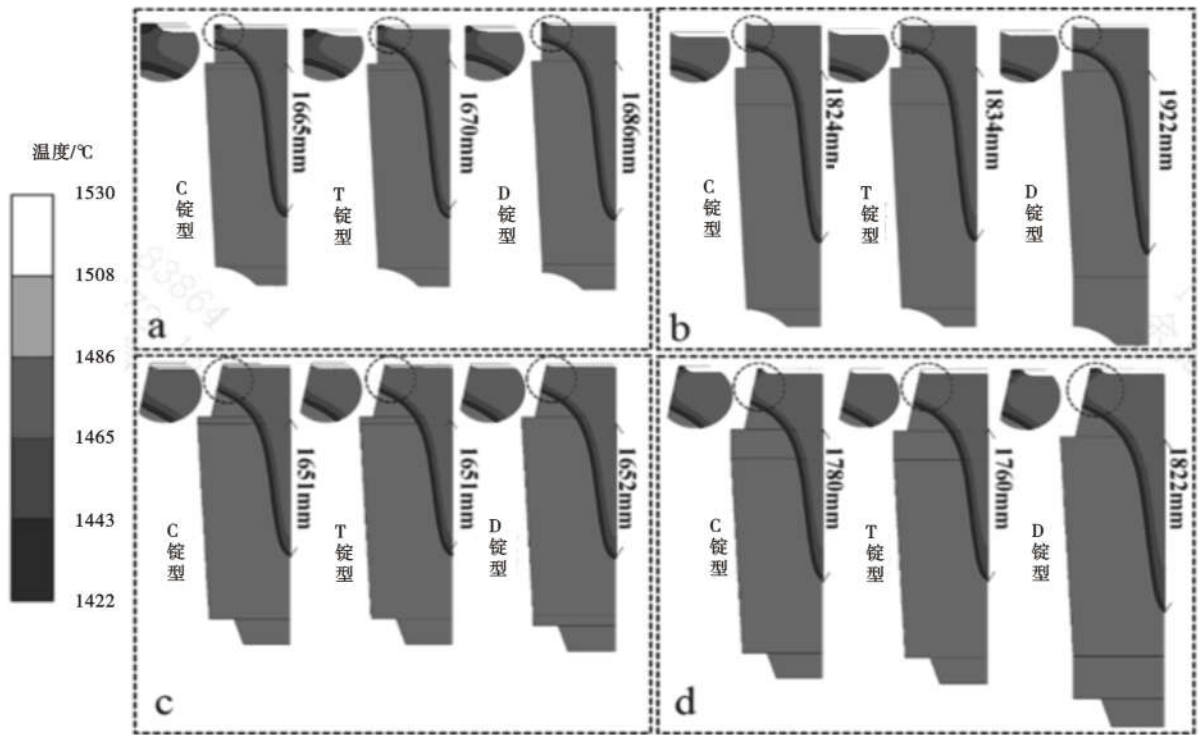


图 4 (a)30 t 钢锭,(b)35 t 钢锭,(c)52 t 钢锭,(d)60 t 钢锭在三种锭型下凝固至 90% 时的液相穴形貌

Fig. 4 Liquid core morphology of 30 t ingot (a) and 35 t ingot (b) and 52 t ingot (c) and 60t ingot (d) of 90% solidification under three IWC designs

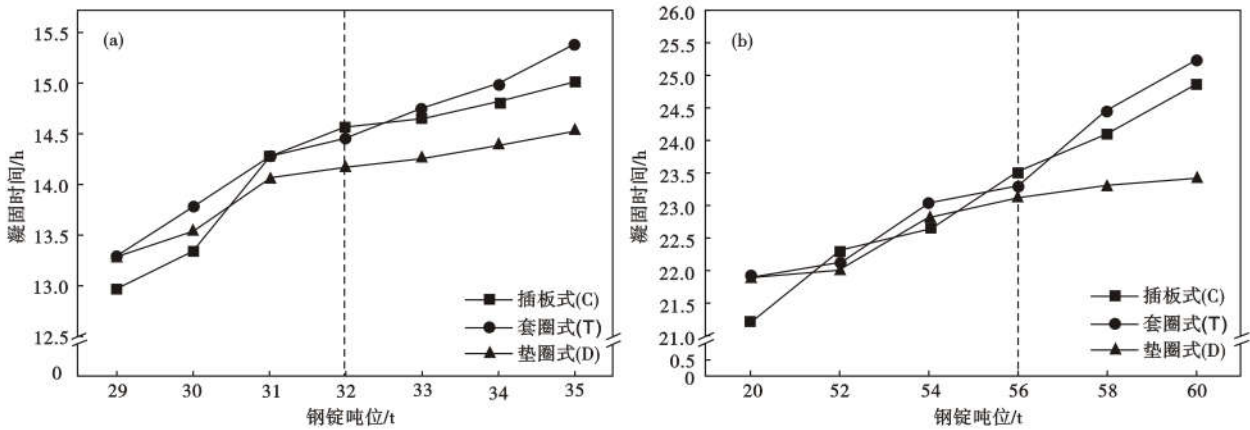


图 5 兼容锭型对(a)29 ~ 35 t 钢锭(b)50 ~ 60 t 钢锭凝固时间的影响

Fig. 5 Influence of IWC mode on 29 ~ 35 t steel ingot (a) 50 ~ 60 t steel ingot (b) solidification time

阻碍了冒口热量传递,而 C 锭型本体锭模为一体式设计,冒口处的绝热板直接与内壁接触,加快了冒口内钢液传热速率,缩短了钢锭凝固时间。

D 锭型亦采用保温冒壳设计,当兼容容量在 10% 以下时,与上述两种锭型凝固时间相近,这是由于兼容小重量时,添加的垫圈相对高度较小,在保温冒口的作用下,凝固随兼容容量增大有所提升。而随着兼容容量进一步提升,其凝固时间未出现明显延长。这是由于 D 锭型安装的垫圈位于钢锭下部,在锭身下

部的强冷作用下,该区域内的钢液在凝固前期快速凝固,并在重力作用下与底盘接触密切,未受到气隙的影响,在凝固末期凝固前沿潜热通过锭身下部快速释放。当兼容容量超过 10% 时,D 锭型锭身吨钢模耗比超过 1,钢锭凝固速率明显加快,此时冒口无法已无法抑凝固前沿快速凝固,冒口补缩效率开始下降。

3.3 兼容锭型对中心疏松的影响

在凝固末期,凝固前沿钢液潜热消耗殆尽,趋近

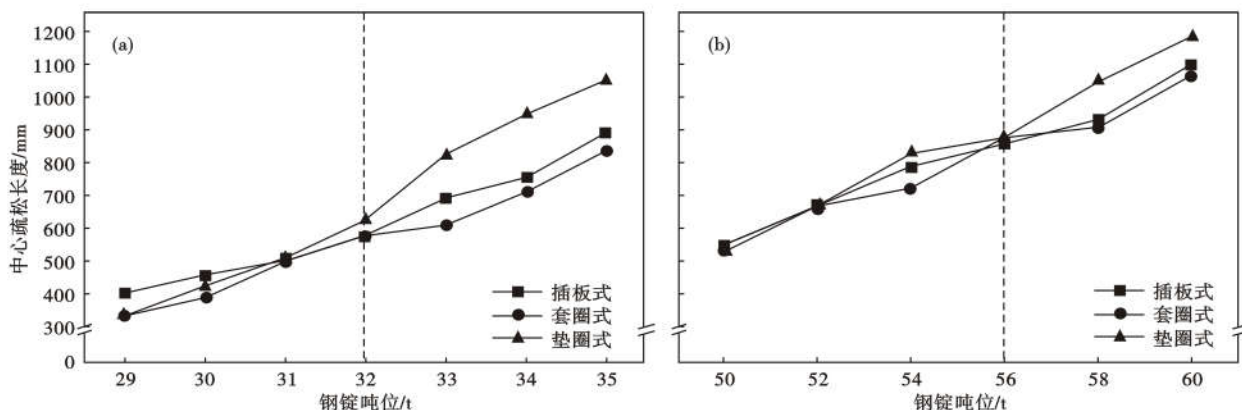


图 6 兼容锭型对(a)29~35 t 钢锭(b)50~60 t 钢锭中心疏松的影响

Fig. 6 Influence of IWC mode on center porosity of 29~35 t ingot (a) and 50~60 t ingot (b)

于同时凝固,得不到外部钢液充分补缩,易于形成疏松缺陷。利用 Niyama 判据[温度梯度(G)与冷却速度(R)平方根的比值]可以预测钢锭内疏松缺陷, Niyama 值越小,出现疏松的几率越大。崔吉顺等人指出,在大型铸钢件中, Niyama 判据临界值应在 2~3 之间^[9]。李建强等人认为大型铸件 Niyama 判据临界值应在 3.2~3.87 之间^[10]。而在潘利文的研究中指出 Niyama 判据临界值随铸件尺寸增大而增大^[11]。本节根据不同钢锭重选取相应临界值, 29~35 t 和 50~60 t 钢锭 Niyama 临界值分别取 3.6 和 4.2。

图 6 为兼容锭型对钢锭中心疏松的影响,从图中可知,在 29~32 t 和 50~56 t 锭重内,随兼容量提升三种锭型中心疏松长度相近,在相同锭重下,三种锭型中心疏松长度差均在 69 mm 以下,在 32~35 t、56~60 t 锭重内, D 锭型中心疏松缺陷明显恶化。相对 C 与 T 锭型中心疏松长度延长了 107~232 mm。通过钢锭温度分布与凝固时间可知,在凝固末期, C 和 T 锭型锭身上部未凝钢液比例增加,利于冒口对锭身的补缩,但由于高径比增大,钢锭液相穴变得细长,导致整体疏松长度延长。当兼容量在 10% 以下时,在保温帽壳作用下, D 锭型冒口可满足锭身补缩要求,中心疏松增大是由于高径比变化导致的。当兼容量达到 10% 时,在大高径比与锭身下部强冷的影响下, D 锭型凝固随兼容量提升而变化不大,液相穴与凝固前沿糊状区宽度逐渐增大,冒口内用于补缩的钢液无法作用于凝固前沿,使得中心疏松缺陷在轴向上越发严重。

3.4 锭重兼容适用性分析

通过分析三种锭型对钢锭液相穴、凝固时间以及中心疏松的影响可知,当兼容量在 10% 以下时,

三种锭型凝固时间相近,中心疏松长度差保持在 69 mm 内,而 C 锭型和 T 锭型采用独立冒口延缓了冒口内钢液凝固,因此,兼容量在 10% 以下时,宜采用 T 锭型和 D 锭型。兼容量超过 10% 时, D 锭型凝固时间随锭重增大基本不变,中心疏松长度骤然上升,因此,兼容量超过 10% 时,采用 T 锭型与 C 锭型较为合理。兼容量达 20% 时,钢锭中心疏松长度延长两倍以上,钢锭内部质量明显恶化。因此,盲目追求兼容量实现一模多铸,只会降低钢锭凝固质量,并不能从根本上降低成本。

4 工业实验

在生产现场浇注了 20~27 t C 型兼容锭,钢种为 42CrMo4,锭型参数见表 1。钢锭冶炼工艺路线为 BOF→LF→VD→下注钢锭,浇注温度 1537 °C,锭身注速 1.2~1.4 t/min,冒口注速 0.37~0.4 t/min。通过脱模后冒口收缩情况计算出相应冒口补缩量,

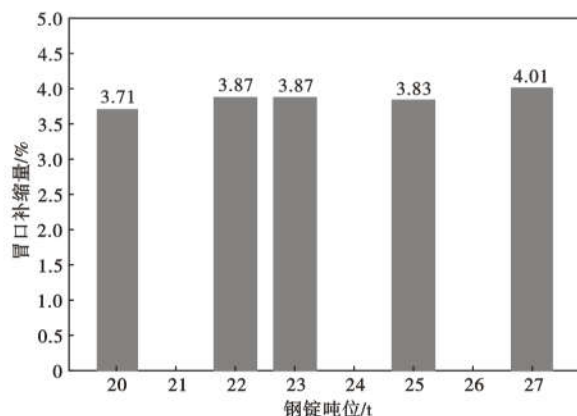


图 7 现场 42CrMo4 钢插板式(c)型兼容 20~27 t 锭重冒口补缩量

Fig. 7 In-situ feed ratio of hot top of 20~27 t ingots with embedded insulation board (c) mode for 42CrMo4 steel

如图7所示。42CrMo4钢种的凝固收缩率约为3.7%,而20~27t钢锭冒口补缩量均在3.71%以上,基本可满足钢锭补缩要求,按照JB/T5000.15-2007标准对钢锭进行超声波探伤,均达到了Ⅱ级探伤要求,因此,兼容锭型在钢锭生产中取得良好的应用效果。

5 结论

(1)随着兼容量提升,三种锭型的高径比增大,锥度减小,其中D锭型锭身下部冷却增强,其液相穴与糊状区宽度明显增大,在35t钢锭中相对C与T锭型延长了77mm和72mm,在60t钢锭中延长了41mm、61mm。

(2)兼容量在10%以下时,随兼容量提高三种锭型凝固时间接近,当兼容量超过10%时,C锭型和T锭型凝固时间随兼容量提高呈线性增大,而D锭型凝固时间随兼容量提升增幅不大。

(3)兼容量在10%以下时,三种锭型中心疏松长度差值均在69mm以下;兼容量超过10%时,D锭型中心疏松长度相对C锭型和T锭型增加了107~232mm;当兼容量超过20%时,三种锭型中心疏松长度将增大两倍以上。

(4)综合考虑兼容量、钢锭质量和成本三方面因素,针对10~60t钢锭,兼容量在10%以下时,宜采用T锭型、D锭型;兼容量超过10%时,T锭型、C锭型较为合适;为保证钢锭质量,最大兼容量最好控制在20%以内,

(5)在现场进行了20~28t工业实验,经检验,钢锭达到Ⅱ级探伤要求,锭重兼容锭型在钢锭生产中取得了良好的使用效果。

国家自然科学基金项目(No. 51504130, 51834002); 辽宁科技大学专项基金项目(No. 2017HZ01); 辽宁科技大学优秀人才项目(No. 601011507-15)

参考文献

- [1] Tanaka Y, Ishiguro T. Development of High-Purity Large-Scale Forgings for Energy Service[J]. Physica Status Solidi (a), 1997, 160(2): 305-320.
- [2] Marburg, Edgar. Accelerated Solidification in Ingots; Its Influence on Ingot Soundness[J]. JOM: The Journal of the Minerals, 1953, 5(2): 157-172.
- [3] 王树达, 张德臣, 吴秀娥, 等. 提高钢锭模使用寿命的优化设计[J]. 钢铁, 1995, 30(2): 32-36 + 11.
- [4] 耿明山, 曹建宁, 刘艳, 等. 水冷模铸造技术的研究现状[J]. 中国冶金, 2017, 27(9): 1-8.
- [5] 张雪健, 彭兴东, 李静, 等. 锭重兼容式锭型设计对钢锭凝固质量影响的模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(4): 365-368.
- [6] Zhang Yan, Xu Changjun, Liu Ningming, et al. Effects of Weight-Compatible Design on Ingot Solidification[J]. Steel Research International, 2021, 92(3): 1-7.
- [7] Duan Z Tu W, Shen B, et al. Experimental Measurements for Numerical Simulation of Macro-segregation in a 36-Ton Steel Ingot[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2016, 47(7): 3597-3606.
- [8] Tu W, Duan Z, Shen B, et al. Three-Dimensional Simulation of Macro-segregation in a 36-Ton Steel Ingot Using a Multicomponent Multiphase Model[J]. JOM: the journal of the Minerals, 2016, 68(12): 3116-3125.
- [9] 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.
- [10] 李建强. 大型铸钢件凝固过程数值模拟参数优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [11] 潘利文, 郑立静, 张虎, 等. Niyama判据对铸件缩孔缩松预测的适用性[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 037(12): 1534-1540.

刘宁宁(1995-), 男, 硕士生(辽宁科技大学), 2019 营口理工学院(本科)毕业, 特殊钢凝固工艺研究。
E-mail: lnnymy@163.com

收稿日期: 2021-06-23

《特殊钢》杂志官方投稿网站

[www. specialsteeljournal. com](http://www.specialsteeljournal.com)

地址: 湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

邮编: 435001 咨询电话: 15961618632 0714-6297386 6297313

《特殊钢》编辑部邮箱: E-mail: tsghs@sina.com, tsghs@citicsteel.com