(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2020 年 9 月 17 日 (17.09.2020)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2020/181575 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01) *B22D 11/16* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/079025

(22) 国际申请日: 2019 年 3 月 21 日 (21.03.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910182561.0 2019年3月12日 (12.03.2019) CN

(71) 申请人: 东 北 大 学 (NORTHEASTERN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市浑南区创新路195号, Liaoning 110169 (CN)。

(72) 发明人: 祭程 (JI, Cheng); 中国辽宁省沈阳市浑南区创新路 195 号, Liaoning 110169 (CN)。 关锐 (GUAN, Rui); 中国辽宁省沈阳市浑南区创新路 195 号, Liaoning 110169 (CN)。 朱苗勇 (ZHU, Miaoyong); 中国辽宁省沈阳市浑南区创新路 195 号, Liaoning 110169 (CN)。 李应焕 (LI, Yinghuan); 中国辽宁省沈阳市浑南区创新路195号, Liaoning 110169 (CN)。

(74) 代理人: 沈阳优普达知识产权代理事务所 (特殊普通合伙) (SHENYANG UPDATE INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY); 中国辽宁省沈阳市浑南新区三义街6-1号天水e城1918室, Liaoning 110180 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) **Title:** PREDICTION METHOD FOR BEHAVIOR OF BLOOM CONTINUOUS CASTING REDUCTION SEGREGATION USING CONVEX ROLLER

(54) **发明名称**: 一种大方坯凸形辊连铸重压下偏析行为预测方法

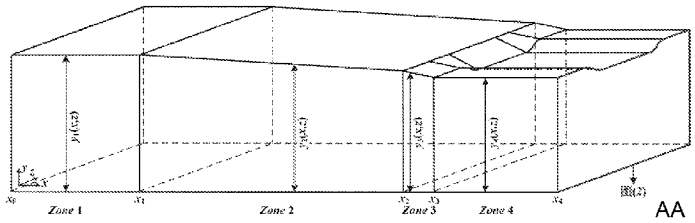

图 1

AA figure (2)

(57) **Abstract:** A prediction method for the behavior of bloom continuous casting reduction segregation using a convex roller, involving: first, accurately describing the bloom shell morphology of a bloom continuous casting process; then, accurately describing the bloom shell surface speed of the bloom continuous casting process; and finally, carrying out a multiphase solidification model coupling calculation. The prediction method is high-speed, high-efficiency and high-precision, and achieves a quantitative calculation for bloom internal macro-segregation behavior under various casting and reduction process conditions in the process of implementing continuous casting solidification end convex roller heavy reduction; and clarifies a mechanism for improving bloom solidification and segregation using reduction deformation in a convex roller heavy reduction process; and provides reliable theoretical support for the stable production of high-homogeneity casting billets.

(57) **摘要**: 一种大方坯凸形辊连铸重压下偏析行为预测方法，先准确描述大方坯连铸过程坯壳形貌，然后准确描述大方坯连铸过程坯壳表面速度，最后进行多相凝固模型耦合计算。该预测方法是高速度、高效率、高精度的实现连铸凝固末端凸形辊重压下实施过程中不同浇铸、压下工艺条件下的大方坯内部宏观偏析行为定量计算，阐明了凸形辊重压下过程中压下变形对大方坯凝固偏析的改善机理，为实现高均质度铸坯的稳定生产提供了可靠的理论支撑。

WO 2020/181575 A1

[见续页]

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种大方坯凸形辊连铸重压下偏析行为预测方法

技术领域

本发明属于钢铁冶金工业中的大方坯连铸生产领域，具体涉及一种大方坯凸形辊连铸重压下偏析行为预测方法。

背景技术

连铸大方坯内部宏观偏析缺陷作为典型的内部质量问题，且该缺陷不能通过轧制和后处理等手段有效去除，严重的影响最终轧材的机械性能。目前，连铸大方坯凝固末端凸形辊重压下技术是替代传统轻压下工艺的最为有效的技术手段之一。相比较传统的轻压下技术，大方坯凝固末端重压下技术能够通过较大的机械压下变形，有效的促进凝固前沿富集溶质的反向流动与二次分布，达到改善铸坯宏观偏析行为的工艺效果。同时，相比平辊重压下工艺，大方坯凝固末端凸辊重压下技术能够避开大方坯两侧已凝坯壳，显著降低辊坯接触抗力，在液压系统未整体升级条件下提升单辊压下量 2.5 倍以上，极大的提高压下力向铸坯中心的渗透效果，且能够进一步的促进凝固前沿富集溶质的反向传输，更好的改善宏观偏析行为。

鉴于大方坯凝固末端凸辊重压下技术在改善铸坯宏观偏析方面存在明显技术优势，该技术已得到许多研究者的重视，并开展了相关的科研工作。

中国专利 CN201710948669.7 公开了一种用于低压缩比轧制的连铸坯生产方法。其在凝固末端采用凸辊重压下技术轧制，通过调整铸机的浇铸工艺与重压下设备的压下量及压下分配，实现对铸坯中心质量的有效控制。但是，未考虑实施凝固末端凸辊重压下工艺后的偏析改善效果。

中国专利 CN201611029498.X 公开了一种连铸坯中心偏析行为研究的数值模拟方法。其对连铸坯流场进行计算区域划分，并通过界面数据转换实现多维度模型数据之间的链接，利用 ANSYS 与 Fluent 软件实现了连铸坯中心偏析行为的计算。但是，该模型并不能考虑凝固末端机械压下作用下的坯壳变形对铸坯偏析行为的影响。

韩国浦项公司通过在 2#大方坯连铸机凝固末端施加凸形辊（ISIJ International，Vol. 52（2012），No. 7，pp. 1266-1272），使技术实施后的大方坯中心偏析评级从 1.6 降低为 0.2，相比平辊压下显著的改善了大方坯内部的宏观偏析行为。但是该技术尚处于工业试验研究，并没有介绍凸形辊压下过程的大方坯偏析行为的定量预测。

目前，已有众多关于压下工艺及装备设计的相关技术专利，但凝固末端凸形辊压下过程铸坯宏观偏析行为的定量预测方法还鲜有报道。

发明内容

针对连铸大方坯凝固末端凸形辊压下过程宏观偏析行为定量预测方法上的研究不足，本发明公开了一种大方坯凸形辊连铸重压下偏析行为预测方法，目的是高速度、高效率、高精度的实现连铸凝固末端凸形辊重压下实施过程中不同浇铸、压下工艺条件下的大方坯内部宏观偏析行为定量计算，阐明凸形辊重压下过程中压下变形对大方坯凝固偏析的改善机理，为

实现高均质度铸坯的稳定生产提供可靠的理论支撑。

具体技术方案如下：

一种大方坯凸形辊连铸重压下偏析行为预测方法，包括如下步骤：

步骤 1：准确描述大方坯连铸过程坯壳形貌

基于大方坯连铸过程中凝固末端轻压下与凸形辊重压下工艺，忽略铸坯坯壳的 z 向展宽，对铸坯的坯壳形貌进行准确描述将连铸铸流划分为 4 个分区，分别为 Zone 1 结晶器与二冷段、Zone 2 轻压下段、Zone 3 凸形辊重压下段、Zone 4 水平段，将铸流沿 y 方向同时被划分为 5 个子区域；

各个分区内的 y 方向高度计算公式如下：

$$y_1(x,z)=T, x=x_0\sim x_1, z=z_0\sim z_5 \tag{1}$$

$$y_2(x,z)=T-r_a^S\left(\frac{(x,z)-(x_1,z)}{(x_2,z)-(x_1,z)}\right), x=x_1\sim x_2, z=z_0\sim z_5 \tag{2}$$

$$y_3(x,z)=y_2(x_2,z)-r_a^S-r_a^H\left(\frac{(x,z)-(x_2,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right), x=x_2\sim x_3, z=z_0\sim z_5 \tag{3}$$

$$y_4(x,z)=y_3(x_4,z), x=x_3\sim x_4, z=z_0\sim z_5 \tag{4}$$

式中，$y_1(x,z)$、$y_2(x,z)$、$y_3(x,z)$、$y_4(x,z)$为铸流各个分区内的 y 方向高度，mm；x_0、x_1、x_2、x_3、x_4 分别为铸流各段表面形貌函数对应的 x 轴坐标，mm；z_0、z_1、z_2、z_3、z_4、z_5 分别为铸流内各子区域表面形貌函数对应的 z 轴坐标，mm；T 为大方坯的初始厚度，mm；r_a^S 和 r_a^H 分别为凝固末端轻压下工艺压下量和凸形辊重压下工艺压下量，mm；

对于 Zone 4 水平段，在凸形辊重压下工艺实施后，该区域内内沿 y 方向 5 个子区域内表面形貌的具体计算公式如下：

$$y_4(x,z)=\begin{cases} T-r_a^S-r_a^H+n, x=x_4\sim x_5, z=z_0\sim z_1 \\ a_4(x,z)^4+a_3(x,z)^3+a_2(x,z)^2+a_1(x,z)+a_0, x=x_4\sim x_5, z=z_1\sim z_2 \\ T-r_a^S-r_a^H, x=x_4\sim x_5, z=z_2\sim z_3 \\ b_4(x,z)^4+b_3(x,z)^3+b_2(x,z)^2+b_1(x,z)+b_0, x=x_4\sim x_5, z=z_3\sim z_4 \\ T-r_a^S-r_a^H+n, x=x_4\sim x_5, z=z_4\sim z_5 \end{cases} \tag{5}$$

式中，a_0、a_1、a_2、a_3、a_4 分别为 Zone 3 凸形辊压下段内 z_1~z_2 侧弧线过渡区的高次多项式函数的辊型系数；b_0、b_1、b_2、b_3、b_4 为 Zone 3 凸形辊压下段内 z_4~z_5 侧弧线过渡区的高次

多项式函数的辊型系数；n 为Zone 3 凸形辊压下段内中心凸形辊凸起段对应的压下厚度，mm；

步骤 2：准确描述大方坯连铸过程坯壳表面速度

由于铸坯坯壳 z 向展宽被忽略，所以 Zone 1~4 内 z 轴方向的速度全部为 0；根据式（1）~式（5）所示的坯壳表面形貌公式，可以推出 Zone 1~4 内沿 x、y 方向铸坯内弧侧的坯壳表面速度公式如下：

$$\vec{v}_1^{\,x}(x,z)=v_{cast},\vec{v}_1^{\,y}(x,z)=0,x=x_0\sim x_1,z=z_0\sim z_5 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}&\vec{v}_2^{\,x}(x,z)=v_{cast}+\frac{(x,z)-(x_1,z)}{(x_2,z)-(x_1,z)}\frac{v_{cast}\cdot r_a^S}{y_1(x_1,z)-r_a^S},\\&\vec{v}_2^{\,y}(x,z)=\vec{v}_2^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\frac{r_a^S}{((x_2,z)-(x_1,z))}\right),x=x_1\sim x_2,z=z_0\sim z_5\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}&\vec{v}_3^{\,x}(x,z)=v_{cast}+\frac{v_{cast}\cdot y_1(x_1,z)}{\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)}+\\&\frac{(x,z)-(x_2,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\frac{v_{cast}\left(r_a^S\cdot y_2(x_2,z)+r_a^H\cdot y_1(x_1,z)+r_a^S\cdot r_a^H\right)}{\left(y_2(x_2,z)-r_a^H\right)\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)},x=x_2\sim x_3,z=z_0\sim z_1\end{aligned} \tag{8}$$

$$\vec{v}_3^{\,y}(x,z)=\begin{cases}\vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{r_a^H-n}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_0\sim z_1\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{y_2(x_2,z)-y_3(x,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_1\sim z_2\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{r_a^H}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_2\sim z_3\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{y_2(x_2,z)-y_3(x,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_3\sim z_4\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{r_a^H-n}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_4\sim z_5\end{cases},x=x_2\sim x_3 \tag{9}$$

$$\vec{v}_4^{\,x}(x,z)=\frac{y_2(x_2,z)\,y_1(x_1,z)v_{cast}}{\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\left(y_2(x_2,z)-r_a^H\right)},\vec{v}_4^{\,y}(x,z)=0,x=x_3\sim x_4,z=z_0\sim z_5 \tag{10}$$

式中，$\vec{v}_1^{\,x}(x,z)$、$\vec{v}_2^{\,x}(x,z)$、$\vec{v}_3^{\,x}(x,z)$、$\vec{v}_4^{\,x}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 x 方向铸坯内弧侧的坯壳表面速度，m/min；$\vec{v}_1^{\,y}(x,z)$、$\vec{v}_2^{\,y}(x,z)$、$\vec{v}_3^{\,y}(x,z)$、$\vec{v}_4^{\,y}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 y 方向铸坯内弧侧的坯壳表面速度，m/min；为了精准的表征大方坯凸辊重压下实施后铸坯内部的速度分布，其 Zone 1~4

内沿 x、y 方向的铸坯内部速度公式如下：

$$\vec{v}_1^{x,in}(x,z)=\vec{v}_1^{x}(x,z),\vec{v}_1^{y,in}(x,z)=\vec{v}_1^{y}(x,z),x=x_0\sim x_1,z=z_0\sim z_5 \tag{11}$$

$$\begin{aligned}&\vec{v}_2^{x,in}(x,z)=\vec{v}_2^{x}(x,z),\\&\vec{v}_2^{y,in}(x,z)=\vec{v}_2^{y}(x,z)+\frac{v_{cast}\cdot r_a^S\cdot\left(y_2(x,z)-y_2^{in}(x,z)\right)}{\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\left((x_2,z)-(x_1,z)\right)},x=x_1\sim x_2,z=z_0\sim z_5\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}&\vec{v}_3^{x,in}(x,z)=\vec{v}_3^{x}(x,z),\\&\vec{v}_3^{y,in}(x,z)=\vec{v}_3^{y}(x,z)+\\&\frac{v_{cast}\cdot\left(y_1(x_1,z)\cdot y_2(x_2,z)-y_4(x_3,z)\cdot\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\right)}{y_4(x_3,z)\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\left((x_3,z)-(x_2,z)\right)}\cdot\left(y_3(x,z)-y_3^{in}(x,z)\right),\\&x=x_2\sim x_3,z=z_0\sim z_5\end{aligned} \tag{13}$$

$$\vec{v}_4^{x,in}(x,z)=\vec{v}_4^{x}(x,z),\vec{v}_4^{y,in}(x,z)=\vec{v}_4^{y}(x,z),x=x_3\sim x_4,z=z_0\sim z_5 \tag{14}$$

式中，$\vec{v}_1^{x,in}(x,z)$、$\vec{v}_2^{x,in}(x,z)$、$\vec{v}_3^{x,in}(x,z)$、$\vec{v}_4^{x,in}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 x 方向的铸坯内部速度，m/min；$\vec{v}_1^{y,in}(x,z)$、$\vec{v}_2^{y,in}(x,z)$、$\vec{v}_3^{y,in}(x,z)$、$\vec{v}_4^{y,in}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 y 方向的铸坯内部速度，m/min；$y_2^{in}(x,z)$和 $y_3^{in}(x,z)$分别为 Zone 2 和 Zone 3 区域铸坯内任一节点的 y 方向数值，mm；

步骤 3：多相凝固模型耦合计算过程

在准确描述铸坯坯壳形貌及速度分布的基础上，建立体积平均多相凝固耦合计算模型，对凝固过程中液相、柱状晶相、等轴晶相的溶质传输方程、质量传输方程、动量传输方程、热量传输方程进行耦合计算；上述方程的具体表述形式如下：

$$\frac{\partial(\rho_i f_i c_i)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i c_i\right)=-C_s \tag{15}$$

$$\frac{\partial(\rho_i f_i)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i\right)=-M_s \tag{16}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(f_i\rho_i\vec{v}_i\right)+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i\vec{v}_i\right)=-D_s \tag{17}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(f_i\rho_i H_i\right)+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i H_i\right)=-H_s \tag{18}$$

式中，i 为各传输方程中的相参数，分别代表液相 l、柱状晶相 c 和等轴晶相 e；f_i 为各相的体积分数，%；ρ_i 为各相的密度，kg/m^3；c_i 为各相的溶质浓度，wt%；$\vec{v}_i$ 为各相速度，

m/min；H_i为各相的焓，J/mol；C_s、M_s、D_s、H_s分别为溶质传输方程、质量传输方程、动量传输方程、热量传输方程的源项；

通过“相耦合 Simple”算法，实现体积平均多相凝固模型的耦合计算；采用精度和收敛性高的耦合隐式算法，并控制收敛残差在 10^{-5} 以下，得到连铸凝固末端凸形辊重压下实施过程中不同浇铸、压下工艺条件对大方坯内部宏观偏析缺陷的改善作用规律。与现有技术相比，本发明具有如下有益技术效果：

本发明针对连铸大断面方坯，基于凝固末端凸形辊重压下后的坯壳形貌，提出了适用于连铸凝固末端凸形辊重压下工艺实施过程中，不同浇铸、压下工艺条件下的大方坯内部宏观偏析行为定量计算方法，有助于高速度、高效率、高精度的定量评估不同生产工艺对大方坯内部宏观偏析的改善效果，从而为浇铸、压下工艺及相关设备开发提供定量化的数据支撑。通过模型的计算，发现相比传统轻压下工艺，采用大方坯凝固末端凸形辊重压下工艺可以使大方坯中心偏析度由 1.18 降低到 1.10。同时，通过实际检测铸坯断面的元素分布规律，验证了模拟计算结果的准确性，进一步定量说明了该模型有助于高速度、高效率、高精度的定量评估大方坯凝固末端的宏观偏析缺陷。此外，本发明也填补了凸形辊压下过程大方坯内部宏观偏析计算方法上的研究空白，丰富了连铸大方坯凝固末端重压下工艺理论体系。

附图说明

图 1 为连铸大方坯铸流计算区域划分示意图；

图 2 为连铸大方坯横向子区域划分示意图；

图 3 为连铸大方坯坯壳厚度变化趋势；

图 4 为连铸大方坯宏观偏析计算结果；

图 5 为平辊轻压下工艺生产的铸坯纵断面低倍照片；

图 6 为凸形辊重压下工艺生产的铸坯纵断面低倍照片；

图 7 为平辊轻压下与凸型辊重压下工艺下的偏析行为实测对比。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明，但本发明的保护范围不受实施例所限。

实施例 1：大方坯压下过程宏观偏析行为预测：

结合现场的大方坯连铸机实际生产工艺，对凸形辊压下过程的宏观偏析进行模拟预测，主要分为以下步骤：

步骤 1：大方坯连铸过程坯壳形貌的准确描述

图 1 为针对本例建立的大方坯凸形辊重压下过程三维几何模型。本例中，大方坯的厚度为 280 mm，宽度为 380 mm，几何模型中的大方坯采用 6 面体网格划分，网格尺寸为 5 mm^2，网格数量为 3,400,000。大方坯凝固末端重压下凸形辊安装在 6#拉矫机，位于距结晶器 27.95 m 的位置上。结合现场生产实际，附图 1 中模型对应的纵向区域划分参数如表 1 所示，附图 2

中模型对应的横向子区域划分参数如表 2 所示。

表 1 计算模型纵向区域划分

区域	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
x 轴坐标位置(m)	0~20.35	20.35~27.95	27.95~29.55	29.55~30

表 2 计算模型横向子区域划分

区域	z_0~ z_1	z_1~ z_2	z_2~ z_3	z_3~ z_4	z_4~ z_5
z 轴坐标位置(mm)	0~50	50~120	120~260	260~330	330~380

凝固末端轻压下工艺压下量 r_a^S 为 2~13 mm，凸形辊重压下工艺压下量 r_a^H 为 9~15 mm。在凸形辊横向辊身轮廓中，两侧过渡区内高次多项式函数的辊型系数如表 3 所示，n 为 30 mm。

表 3 高次多项式函数的辊型系数

辊型系数				
a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
-1.50108E-11 ± 3.14196E-8	-1.04648E-4 ± 5.38633E-6	0.01334 ± 3.00482E-4	-0.02622 ± 0.00602	23.60294 ± 0.03475
b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
-1.50108E-11 ± 3.14196E-8	1.04653E-4 ± 5.38633E-6	-0.01334 ± 3.00482E-4	0.02622 ± 0.00602	53.50846 ± 0.03475

步骤 2：大方坯连铸过程坯壳表面速度的准确描述

在步骤 1 得到的大方坯凸形辊重压下过程的准确坯壳表面形貌的基础上，通过公式（6）~（14）实现对大方坯连铸过程坯壳表面速度的准确描述。其中拉坯速度为 0.72 m/min。

步骤 3：多相凝固模型的耦合计算

采用“相耦合 Simple”算法及精度和收敛性高的耦合隐式算法，收敛残差为 10^{-6}。

步骤 4：大方坯凸形辊重压下宏观偏析预测结果

采用该模型进行连铸大方坯凝固末端凸形辊重压下偏析行为的计算，可以得出图 3 中 0.72 m/min 拉速下对应的坯壳厚度变化趋势。从坯壳厚度计算结果可以得出，凝固终点位于距结晶器弯月面 28.32m 处，处于 6#拉矫机凸形辊位置（27.95 m）之后，表明该位置处的凸形辊重压下可以有效的促进大方坯内部中心富集溶质熔体发生反向流动，进而改善偏析。

此外，根据模型计算的大方坯宏观偏析模拟结果，如图 4 所示，能够得到沿 y 方向的偏析度分布趋势。模型预测结果可以看出，相比传统轻压下工艺，采用大方坯凝固末端凸形辊重压下工艺可以使大方坯中心偏析度由 1.18 降低到 1.10。

将大方坯凝固末端渐变曲率凸型辊投入使用，根据现场试验的铸坯低倍结果对比，图 5 中平辊轻压下工艺生产的铸坯纵断面中心位置存在着明显的中心宏观偏析行为，而图 6 凸形辊重压下工艺生产的铸坯纵断面中心位置的宏观偏析行为则较轻。由此可见，实施凸型辊重压下后，铸坯中心偏析改善效果明显。

为了定量表征实际生产中凸形辊重压下工艺实施后的宏观偏析改善程度，对图 5 和图 6 中的铸坯进行了横向的钻屑实验，并利用碳硫分析仪对钻屑进行了成分检测，结果如图 7 所示。可以看出，大方坯凝固末端凸形辊重压下工艺实施后，相比传统的平辊轻压下工艺，铸坯的中心偏析度可以由 1.17 降低到 1.11。将图 4 中的模拟预测结果与图 7 的实际生产结果进行对比，验证了模拟计算结果的准确性，且进一步定量说明了大方坯凝固末端凸形辊重压下工艺可以有效的改善铸坯内部的宏观偏析缺陷。

以上所述的实施例仅为本发明较佳的具体实施方式，本发明的保护范围不限于此，任何熟悉本领域的技术人员在本发明披露的技术范围内，可显而易见地得到该技术方案的简单变化或等效替换，并应用于连铸板坯凸形辊凝固末端压下工艺中，均属于本发明的保护范围之内。

权利要求

1、一种大方坯凸形辊连铸重压下偏析行为预测方法，其特征在于，包括如下步骤：

步骤 1：准确描述大方坯连铸过程坯壳形貌

基于大方坯连铸过程中凝固末端轻压下与凸形辊重压下工艺，忽略铸坯坯壳的 z 向展宽，对铸坯的坯壳形貌进行准确描述将连铸铸流划分为 4 个分区，分别为 Zone 1 结晶器与二冷段、Zone 2 轻压下段、Zone 3 凸形辊重压下段、Zone 4 水平段，将铸流沿 y 方向同时被划分为 5 个子区域；

各个分区内的 y 方向高度计算公式如下：

$$y_1(x,z)=T,x=x_0\sim x_1,z=z_0\sim z_5 \tag{1}$$

$$y_2(x,z)=T-r_a^S\left(\frac{(x,z)-(x_1,z)}{(x_2,z)-(x_1,z)}\right),x=x_1\sim x_2,z=z_0\sim z_5 \tag{2}$$

$$y_3(x,z)=y_2(x_2,z)-r_a^S-r_a^H\left(\frac{(x,z)-(x_2,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),x=x_2\sim x_3,z=z_0\sim z_5 \tag{3}$$

$$y_4(x,z)=y_3(x_4,z),x=x_3\sim x_4,z=z_0\sim z_5 \tag{4}$$

式中，$y_1(x,z)$、$y_2(x,z)$、$y_3(x,z)$、$y_4(x,z)$为铸流各个分区内的 y 方向高度，mm；x_0、x_1、x_2、x_3、x_4 分别为铸流各段表面形貌函数对应的 x 轴坐标，mm；z_0、z_1、z_2、z_3、z_4、z_5 分别为铸流内各子区域表面形貌函数对应的 z 轴坐标，mm；T 为大方坯的初始厚度，mm；r_a^S 和 r_a^H 分别为凝固末端轻压下工艺压下量和凸形辊重压下工艺压下量，mm；

对于 Zone 4 水平段，在凸形辊重压下工艺实施后，该区域内内沿 y 方向 5 个子区域内表面形貌的具体计算公式如下：

$$y_4(x,z)=\begin{cases}T-r_a^S-r_a^H+n,x=x_4\sim x_5,z=z_0\sim z_1\\ a_4(x,z)^4+a_3(x,z)^3+a_2(x,z)^2+a_1(x,z)+a_0,x=x_4\sim x_5,z=z_1\sim z_2\\ T-r_a^S-r_a^H,x=x_4\sim x_5,z=z_2\sim z_3\\ b_4(x,z)^4+b_3(x,z)^3+b_2(x,z)^2+b_1(x,z)+b_0,x=x_4\sim x_5,z=z_3\sim z_4\\ T-r_a^S-r_a^H+n,x=x_4\sim x_5,z=z_4\sim z_5\end{cases} \tag{5}$$

式中，a_0、a_1、a_2、a_3、a_4 分别为 Zone 3 凸形辊压下段内 z_1~z_2 侧弧线过渡区的高次多项式函数的辊型系数；b_0、b_1、b_2、b_3、b_4 为 Zone 3 凸形辊压下段内 z_4~z_5 侧弧线过渡区的高次多项式函数的辊型系数；n 为 Zone 3 凸形辊压下段内中心凸形辊凸起段对应的压下厚度，mm；

步骤 2：准确描述大方坯连铸过程坯壳表面速度

由于铸坯坯壳 z 向展宽被忽略，所以 Zone 1~4 内 z 轴方向的速度全部为 0；根据式（1）~式（5）所示的坯壳表面形貌公式，可以推出 Zone 1~4 内沿 x、y 方向铸坯内弧侧的坯壳表面速度公式如下：

$$\vec{v}_1^{\,x}(x,z)=v_{cast},\vec{v}_1^{\,y}(x,z)=0,x=x_0\sim x_1,z=z_0\sim z_5 \tag{6}$$

$$\vec{v}_2^{\,x}(x,z)=v_{cast}+\frac{(x,z)-(x_1,z)}{(x_2,z)-(x_1,z)}\frac{v_{cast}\cdot r_a^S}{y_1(x_1,z)-r_a^S},$$
$$\vec{v}_2^{\,y}(x,z)=\vec{v}_2^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\frac{r_a^S}{((x_2,z)-(x_1,z))}\right),x=x_1\sim x_2,z=z_0\sim z_5 \tag{7}$$

$$\vec{v}_3^{\,x}(x,z)=v_{cast}+\frac{v_{cast}\cdot y_1(x_1,z)}{\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)}+$$
$$\frac{(x,z)-(x_2,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\frac{v_{cast}\left(r_a^S\cdot y_2(x_2,z)+r_a^H\cdot y_1(x_1,z)+r_a^S\cdot r_a^H\right)}{\left(y_2(x_2,z)-r_a^H\right)\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)},x=x_2\sim x_3,z=z_0\sim z_1 \tag{8}$$

$$\vec{v}_3^{\,y}(x,z)=\begin{cases}\vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{r_a^H-n}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_0\sim z_1\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{y_2(x_2,z)-y_3(x,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_1\sim z_2\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{r_a^H}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_2\sim z_3\quad,x=x_2\sim x_3\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{y_2(x_2,z)-y_3(x,z)}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_3\sim z_4\\ \vec{v}_3^{\,x}(x,z)\cdot\left(-\dfrac{r_a^H-n}{(x_3,z)-(x_2,z)}\right),z=z_4\sim z_5\end{cases} \tag{9}$$

$$\vec{v}_4^{\,x}(x,z)=\frac{y_2(x_2,z)\,y_1(x_1,z)\,v_{cast}}{\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\left(y_2(x_2,z)-r_a^H\right)},\vec{v}_4^{\,y}(x,z)=0,x=x_3\sim x_4,z=z_0\sim z_5 \tag{10}$$

式中，$\vec{v}_1^{\,x}(x,z)$、$\vec{v}_2^{\,x}(x,z)$、$\vec{v}_3^{\,x}(x,z)$、$\vec{v}_4^{\,x}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 x 方向铸坯内弧侧的坯壳表面速度，m/min；$\vec{v}_1^{\,y}(x,z)$、$\vec{v}_2^{\,y}(x,z)$、$\vec{v}_3^{\,y}(x,z)$、$\vec{v}_4^{\,y}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 y 方向铸坯内弧侧的坯壳表面速度，m/min；为了精准的表征大方坯凸辊重压下实施后铸坯内部的速度分布，其 Zone 1~4 内沿 x、y 方向的铸坯内部速度公式如下：

$$\vec{v}_1^{x,in}(x,z)=\vec{v}_1^{x}(x,z),\vec{v}_1^{y,in}(x,z)=\vec{v}_1^{y}(x,z),x=x_0\sim x_1,z=z_0\sim z_5 \tag{11}$$

$$\begin{aligned}&\vec{v}_2^{x,in}(x,z)=\vec{v}_2^{x}(x,z),\\&\vec{v}_2^{y,in}(x,z)=\vec{v}_2^{y}(x,z)+\frac{v_{cast}\cdot r_a^S\cdot\left(y_2(x,z)-y_2^{in}(x,z)\right)}{\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\left((x_2,z)-(x_1,z)\right)},x=x_1\sim x_2,z=z_0\sim z_5\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}&\vec{v}_3^{x,in}(x,z)=\vec{v}_3^{x}(x,z),\\&\vec{v}_3^{y,in}(x,z)=\vec{v}_3^{y}(x,z)+\\&\frac{v_{cast}\cdot\left(y_1(x_1,z)\cdot y_2(x_2,z)-y_4(x_3,z)\cdot\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\right)}{y_4(x_3,z)\left(y_1(x_1,z)-r_a^S\right)\left((x_3,z)-(x_2,z)\right)}\cdot\left(y_3(x,z)-y_3^{in}(x,z)\right),\\&x=x_2\sim x_3,z=z_0\sim z_5\end{aligned} \tag{13}$$

$$\vec{v}_4^{x,in}(x,z)=\vec{v}_4^{x}(x,z),\vec{v}_4^{y,in}(x,z)=\vec{v}_4^{y}(x,z),x=x_3\sim x_4,z=z_0\sim z_5 \tag{14}$$

式中，$\vec{v}_1^{x,in}(x,z)$、$\vec{v}_2^{x,in}(x,z)$、$\vec{v}_3^{x,in}(x,z)$、$\vec{v}_4^{x,in}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 x 方向的铸坯内部速度，m/min；$\vec{v}_1^{y,in}(x,z)$、$\vec{v}_2^{y,in}(x,z)$、$\vec{v}_3^{y,in}(x,z)$、$\vec{v}_4^{y,in}(x,z)$为 Zone 1~4 内沿 y 方向的铸坯内部速度，m/min；$y_2^{in}(x,z)$和 $y_3^{in}(x,z)$分别为 Zone 2 和 Zone 3 区域铸坯内任一节点的 y 方向数值，mm；

步骤 3：多相凝固模型耦合计算过程

在准确描述铸坯坯壳形貌及速度分布的基础上，建立体积平均多相凝固耦合计算模型，对凝固过程中液相、柱状晶相、等轴晶相的溶质传输方程、质量传输方程、动量传输方程、热量传输方程进行耦合计算；上述方程的具体表述形式如下：

$$\frac{\partial(\rho_i f_i c_i)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i c_i\right)=-C_s \tag{15}$$

$$\frac{\partial(\rho_i f_i)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i\right)=-M_s \tag{16}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(f_i\rho_i\vec{v}_i\right)+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i\vec{v}_i\right)=-D_s \tag{17}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(f_i\rho_i H_i\right)+\nabla\cdot\left(f_i\rho_i\vec{v}_i H_i\right)=-H_s \tag{18}$$

式中，i 为各传输方程中的相参数，分别代表液相 l、柱状晶相 c 和等轴晶相 e；f_i 为各相的体积分数，%；ρ_i 为各相的密度，kg/m^3；c_i 为各相的溶质浓度，wt%；$\vec{v}_i$ 为各相速度，m/min；

H_i为各相的焓，J/mol；C_s、M_s、D_s、H_s分别为溶质传输方程、质量传输方程、动量传输方程、热量传输方程的源项；

通过“相耦合 Simple”算法，实现体积平均多相凝固模型的耦合计算；采用精度和收敛性高的耦合隐式算法，并控制收敛残差在 10^{-5} 以下，得到连铸凝固末端凸形辊重压下实施过程中不同浇铸、压下工艺条件对大方坯内部宏观偏析缺陷的改善作用规律。

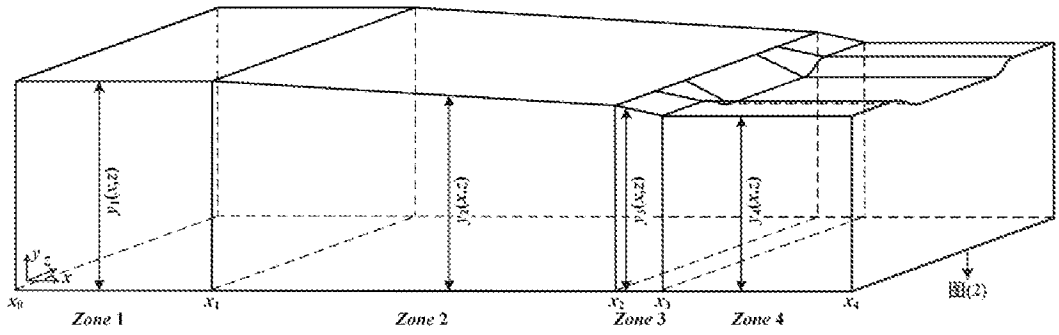

图1

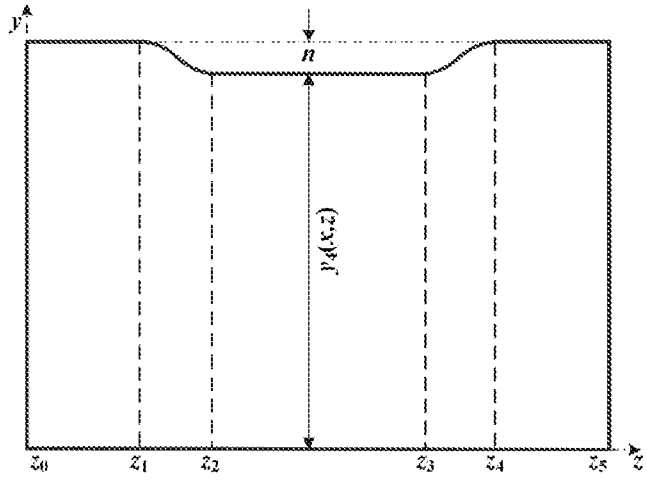

图2

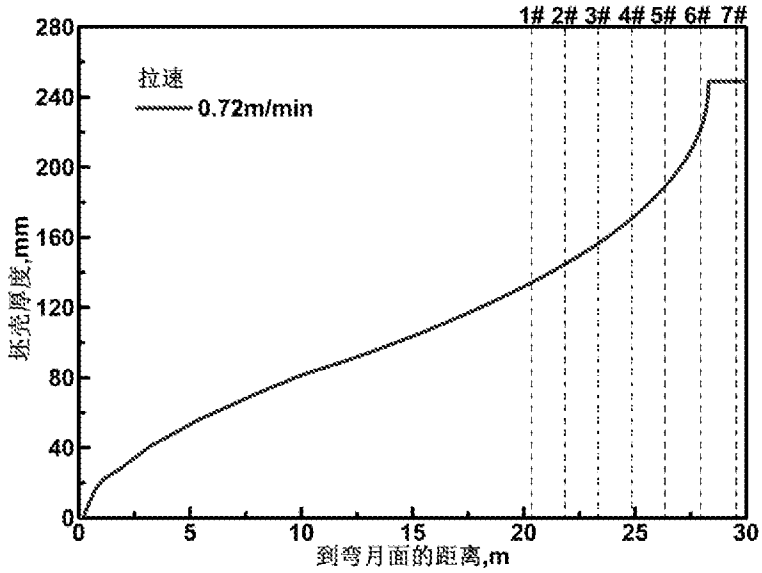
1# 2# 3# 4# 5# 6# 7#
拉速
0.72m/min
坯壳厚度,mm
到弯月面的距离,m
0
40
80
120
160
200
240
280
0
5
10
15
20
25
30

图3

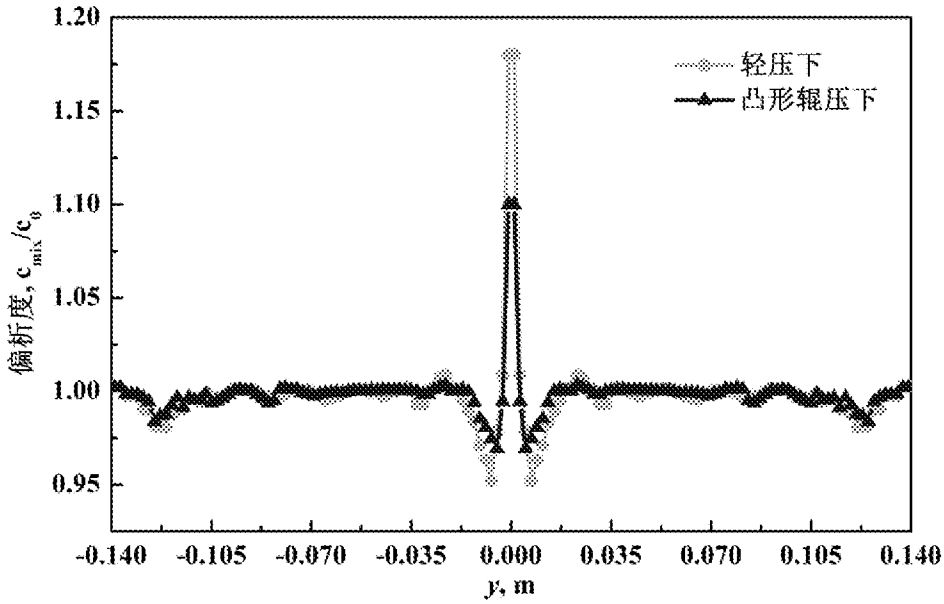
轻压下
凸形辊压下
偏析度, c_{mix}/c_0
y, m
1.20
1.15
1.10
1.05
1.00
0.95
-0.140
-0.105
-0.070
-0.035
0.000
0.035
0.070
0.105
0.140

图4

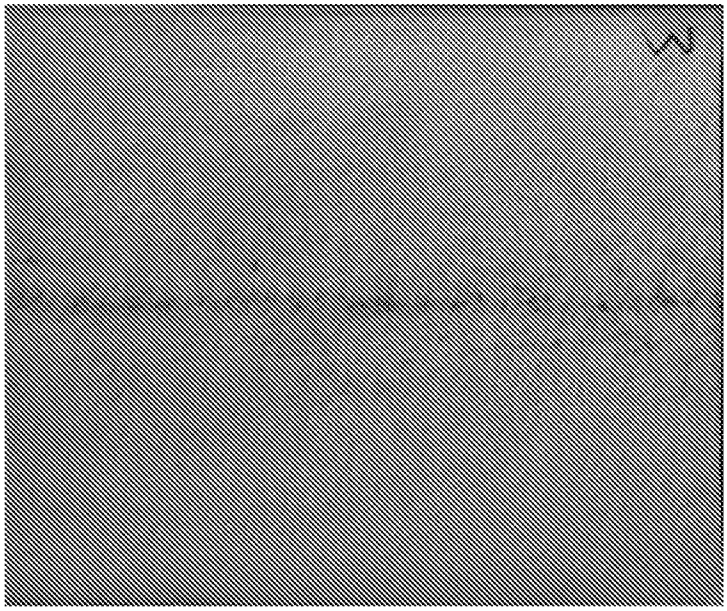

图 5

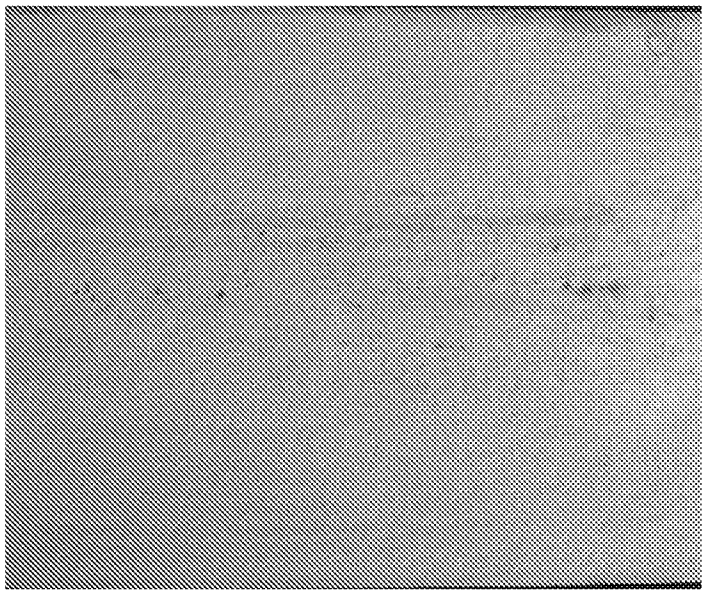

图 6

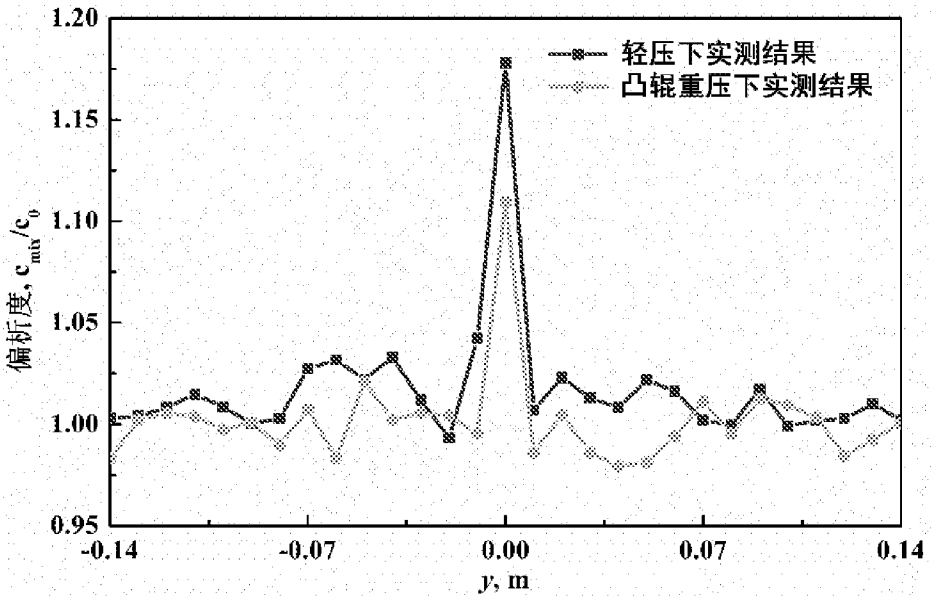
1.20
1.15
1.10
1.05
1.00
0.95
偏析度, c_{min}/c_0
-0.14
-0.07
0.00
0.07
0.14
y, m
轻压下实测结果
凸辊重压下实测结果

图7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/079025

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50(2006.01)i; B22D 11/16(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F, B22D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, SIPOABS, DWPI, CNKI: 连铸, 重压下, 轻压下, 偏析, 预测, 辊, 方坯, 高度, 速度, 模型, 凝固, 末端; continuous casting, reduction, heavy, soft, segregation, predict, roller, billet, slab, height, speed, model, solid, end

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	朱苗勇等 (ZHU, Miaoyong et al.). "连铸大方坯凝固末端重压下技术及其应用 (Heavy Reduction Technology and Its Application for Bloom Continuous Casting Process)" *"第十届中国钢铁年会"暨"第六届宝钢学术年会"论文集 (Non-official translation: Proceedings of the "Tenth China Iron and Steel Annual Meeting" and "The Sixth Baosteel Academic Annual Meeting")*, 21 October 2015 (2015-10-21), sections 1-3	1
A	董其鹏等 (DONG, Qipeng et al.). "板坯凝固末端重压下的模拟研究 (Simulation Study on the Heavy Reduction at the End of Slab)" *第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集III (Non-official translation: Proceedings of the "Tenth China Iron and Steel Annual Meeting" and "The Sixth Baosteel Academic Annual Meeting")*, 21 October 2015 (2015-10-21), sections 1-3	1
A	CN 109261922 A (CHINA NATIONAL HEAVY MACHINERY RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 25 January 2019 (2019-01-25) entire document	1
A	CN 101920323 A (HANDAN BRANCH OF HEBEI IRON & STEEL CO., LTD.) 22 December 2010 (2010-12-22) entire document	1

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
14 November 2019	**11 December 2019**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088** **China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107243611 A (NORTHEASTERN UNIVERSITY) 13 October 2017 (2017-10-13) entire document	1
A	CN 104001891 A (CCTEC ENGINEERING CO., LTD.) 27 August 2014 (2014-08-27) entire document	1
A	JP 05220560 A (NIPPON STEEL CORP.) 31 August 1993 (1993-08-31) entire document	1
A	JP 2014036997 A (JFE STEEL CORP.) 27 February 2014 (2014-02-27) entire document	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2019/079025

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109261922	A	25 January 2019	None			
CN	101920323	A	22 December 2010	CN	101920323	B	08 May 2013
CN	107243611	A	13 October 2017	CN	107243611	B	11 January 2019
CN	104001891	A	27 August 2014	CN	104001891	B	31 August 2016
JP	05220560	A	31 August 1993	JP	2593386	B2	26 March 1997
JP	2014036997	A	27 February 2014	JP	5954043	B2	20 July 2016

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2019/079025

A. 主题的分类

G06F 17/50(2006.01)i; B22D 11/16(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F, B22D

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNABS, CNTXT, SIPOABS, DWPI, CNKI:连铸，重压下，轻压下，偏析，预测，辊，方坯，高度，速度，模型，凝固，末端; continuous casting, reduction, heavy, soft, segregation, predict, roller, billet, slab, height, speed, model, solid, end

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	朱苗勇等. "连铸大方坯凝固末端重压下技术及其应用" “第十届中国钢铁年会”暨“第六届宝钢学术年会”论文集, 2015年 10月 21日 (2015-10-21), 第1-3节	1
A	董其鹏等. "板坯凝固末端重压下的模拟研究" 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集III, 2015年 10月 21日 (2015-10-21), 第1-3节	1
A	CN 109261922 A (中国重型机械研究院股份公司) 2019年 1月 25日 (2019-01-25) 全文	1
A	CN 101920323 A (河北钢铁股份有限公司邯郸分公司) 2010年 12月 22日 (2010-12-22) 全文	1
A	CN 107243611 A (东北大学) 2017年 10月 13日 (2017-10-13) 全文	1

☑ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：
“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件
“D” 申请人在国际申请中引证的文件
“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利
“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）
“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件
“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件
“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件
“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性
“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性
“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2019年 11月 14日	2019年 12月 11日

ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员
中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	李星星
传真号 (86-10)62019451	电话号码 62085398

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2019/079025

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 104001891 A (中冶连铸技术工程有限责任公司) 2014年 8月 27日 (2014 - 08 - 27) 全文	1
A	JP 05220560 A (NIPPON STEEL CORP) 1993年 8月 31日 (1993 - 08 - 31) 全文	1
A	JP 2014036997 A (JFE STEEL CORP) 2014年 2月 27日 (2014 - 02 - 27) 全文	1

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2019/079025

检索报告引用的专利文件	公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN 109261922 A	2019年 1月 25日	无	
CN 101920323 A	2010年 12月 22日	CN 101920323 B	2013年 5月 8日
CN 107243611 A	2017年 10月 13日	CN 107243611 B	2019年 1月 11日
CN 104001891 A	2014年 8月 27日	CN 104001891 B	2016年 8月 31日
JP 05220560 A	1993年 8月 31日	JP 2593386 B2	1997年 3月 26日
JP 2014036997 A	2014年 2月 27日	JP 5954043 B2	2016年 7月 20日