

(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
2022 年 8 月 18 日 (18.08.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/170686 A1

(51) 国际专利分类号:
B22D 11/115 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/093996

(22) 国际申请日: 2021 年 5 月 17 日 (17.05.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110175120.5 2021年2月9日 (09.02.2021) CN

(71) 申请人: 东北大学 (NORTHEASTERN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国辽宁省沈阳市和平区文化路三巷11号, Liaoning 110819 (CN)。

(72) 发明人: 王恩刚(WANG, Engang); 中国辽宁省沈阳市和平区文化路三巷11号, Liaoning 110819 (CN)。 王泽鹏(WANG, Zepeng); 中国辽宁省沈阳市和平区文化路三巷11号, Liaoning 110819 (CN)。 张林(ZHANG, Lin); 中国辽宁省沈阳市和平区文化路三巷11号, Liaoning 110819 (CN)。

(74) 代理人: 沈阳东大知识产权代理有限公司 (SHENYANG DONGDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD); 中国辽宁省沈阳市和平区文化路三巷11号, Liaoning 110819 (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,

(54) **Title:** ELECTROMAGNETIC STIRRING DEVICE AND METHOD FOR IMPROVING LIQUID CORE FEEDING CAPACITY AND CENTRAL QUALITY OF CASTING BLANK

(54) 发明名称: 提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置与方法

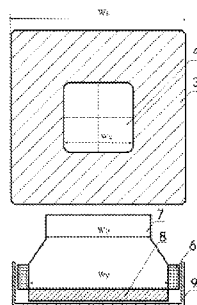


图 1

(57) **Abstract:** An electromagnetic stirring device for improving liquid core feeding capacity and central quality of a casting blank. The device is a V-LEMS which mainly comprises a coil (6), a magnetic pole (7), a magnetic yoke (8) and a magnetic gathering cover (9), wherein the width of the magnetic pole is less than or equal to the width of the casting blank opposite thereto, the width of a tip of the magnetic pole is less than the width of the casting blank opposite thereto, and greater than or equal to the width of a liquid core of the casting blank opposite thereto, and the width of the tip of the magnetic pole is less than or equal to the width of the magnetic yoke. An electromagnetic stirring method based on the electromagnetic stirring device is further provided. An electromagnetic field of the electromagnetic stirring device acts on a liquid core area of the casting blank in a concentrated manner, and through different combinations of arrangement patterns of the V-LEMS, the height and the intensity of the up-down circulation motion or spiral motion of a liquid core melt of the casting blank are increased to promote mixing of an upper melt and a lower melt of the casting blank and homogenization of temperature and a solute thereof and to improve the feeding capacity of the upper melt for the solidification shrinkage of the lower melt, which reduces and eliminates the defects of centre segregation, looseness, shrinkage cavities, cracks, etc. of the casting blank and improves the quality of the casting blank and rolled materials.

(57) **摘要:** 一种提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置, 该装置为主要由线圈(6)、磁极(7)、磁轭(8)、聚磁罩(9)构成的磁极宽度小于或等于其所面对的铸坯幅宽的V-LEMS, 且其磁极的端头宽度小于其所面对的铸坯幅宽, 大于或等于其所面对的铸坯液芯幅宽, 同时磁极的端头宽度小于或等于磁轭宽度。以及一种基于上述电磁搅拌装置的电磁搅拌方法。该电磁搅拌装置的电磁场集中作用于铸坯的液芯区域, 并通过V-LEMS的不同组合布置型式, 增大铸坯液芯熔体上下环流运动或螺旋运动的高度和强度, 促进铸坯上部熔体与下部熔体的混合及其温度和溶质的均匀化, 提高上部熔体对下部熔体凝固收缩的补缩能力, 减轻或消除铸坯中心偏析、疏松、缩孔和裂纹等缺陷, 提高铸坯和轧材的质量。

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, IT, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, 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)。

根据细则4.17的声明:

- 关于申请人有权申请并被授予专利 (细则4.17(ii))

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置与方法

技术领域

[0001] 本发明属于冶金与材料电磁制备技术领域，具体涉及一种提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置与方法。

背景技术

[0002] 在铸坯凝固过程中，特别是铸坯凝固末期，铸坯内的液芯通道越来越窄，特别是对于特殊钢和高碳钢等金属熔体粘度较大、流动性较差的钢种，致使铸坯上部熔体对下部熔体凝固收缩的补缩条件和能力变差，极易造成铸坯中心区域的缩孔、疏松、中心偏析和裂纹等缺陷，使其在后序加工与轧制过程中难以消除，严重影响最终产品的质量和性能。

[0003] 为了解决铸坯中心缺陷问题，通常在铸坯凝固过程中，特别是铸坯凝固末期，施加电磁搅拌装置，通过其产生的电磁力驱动铸坯液芯内的熔体产生强制流动，改善其流动、传热和传质条件，提高等轴晶比率和细化晶粒，以减轻或消除铸坯中心缺陷。

[0004] 长久以来，国内外广泛应用水平方向的行波型线性电磁搅拌（LEMS—Linear Electromagnetic Stirring）或旋转型电磁搅拌（REMS—Rotating Electromagnetic Stirring）方法和装置来提高铸坯中心质量。对于截面为方形和圆形的铸坯主要是采用REMS，而对于截面为长方形的板坯主要是采用LEMS。它们的主要作用是驱动铸坯液芯的金属熔体做水平方向的旋转运动，改善其流动、传热和传质条件，与此相关的研究报道相当广泛。另一种电磁搅拌方法和装置为旋转型磁场与行波型磁场相组合的、驱动金属熔体做螺旋运动的螺旋型电磁搅拌方法和装置（SEMS—Spiral Electromagnetic Stirring）。中国专利201110450015.4通过六层水平设置的环形铁芯、六条垂直设置的齿条铁芯和三十六个相同的电磁线圈，构建一种旋转磁场与行波磁场相组合的多功能电磁搅拌器；中国专利201910332351.5通过在常规旋转磁场的六个磁极上设置C型铁

芯和线圈，形成一种复合式线圈的结晶器电磁搅拌器。中国专利201110160188.2和中国专利201910332302.1通过倾斜一定角度的磁轭端面或铁芯，实现螺旋型电磁搅拌，但是其磁场强度并没有明显的增强。通常SEMS的磁体结构较LEMS和REMS更为复杂和庞大，安装维护不方便，成本高。

[0005] 现行生产中应用于方坯和圆坯的REMS和SEMS的总体结构特征是，装置的本体为圆型结构，环绕于铸坯四周，这使其产生的电磁场部分作用于铸坯的固相区域，未能有效发挥电磁场的作用功率和效果。特别是在采用同一套电磁搅拌装置生产不同截面大小的铸坯时，大截面的铸坯要求电磁搅拌装置的内径更大，造成其结构体积较为庞大；而当其用于较小截面的铸坯生产时，电磁搅拌装置与铸坯间的距离增大，特别是在铸坯的凝固末期，造成电磁搅拌装置距离铸坯的液芯更远，这将大幅度降低电磁搅拌装置驱动液芯熔体运动的作用效果。而应用于板坯的LEMS装置的结构特征是，装置本体的宽度与板坯同宽或大于板坯宽度，也大于铸坯液芯的宽度，这使得其产生的电磁场部分作用于板坯边缘的固相区域，未能有效发挥电磁场的作用功率和效果。另一方面，对于高温合金、马氏体不锈钢、轴承钢和高碳钢等粘度较大、流动性较差、成分偏析严重的钢种，采用现行应用的LEMS、REMS和SEMS，由于其以驱动铸坯液芯熔体做水平方向的旋转运动为主，对铸坯液芯熔体在垂直重力方向上的驱动不足，这使得铸坯上部熔体和下部熔体的搅拌混合及其温度和溶质的均匀化都受到一定程度的限制，特别是在铸坯凝固末端液芯通道较为狭窄、熔体流动性较差时，使得上部熔体对下部熔体凝固补缩的能力不足。因此，在其铸坯的中心区域依然存在中心偏析、疏松、缩孔和裂纹等缺陷。

[0006] 中国专利201610537622.4通过在铸坯侧面设置单个或两个对置的立式行波型电磁搅拌装置，驱动铸坯液芯的熔体产生沿铸坯中心线的向上或向下强制对流运动。但是，从其电磁搅拌装置及其布置方案可以看出，单个或两个对置布置的长方型、U型或半圆型LEMS装置的宽度，大于或等于铸坯的宽度或直径，特别是在铸坯凝固末期液芯的宽度或直径较小时，其磁极宽度远大于LEMS所在位置处的铸坯液芯的宽度或直径，这使得其所产生的电磁场有较大一部分作用于铸坯边缘的固相区域，这将大幅度降低电磁搅拌的作用功率和效果。再者，仅在铸

坯一侧单个布置或两侧对置布置LEMS装置，由于受所制造LEMS装置和铸坯周围冷却系统等空间环境的限制，其驱动铸坯液芯内熔体沿铸坯中心线的向上或向下强制对流运动的高度和强度都受到较大限制，制约了铸坯上部更高处相对温度更高的熔体与下部熔体的混合及其温度和溶质均匀化的程度，铸坯上部高温熔体对下部熔体凝固收缩的补缩也不充分。

发明概述

技术问题

问题的解决方案

技术解决方案

- [0007] 本发明的技术任务是针对以上现有技术的不足，而提供一种提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置与方法。
- [0008] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是：一种提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置，其为主要由线圈、磁极、磁轭、聚磁罩构成的磁极宽度小于或等于其所面对的铸坯幅宽的V-LEMS (Vertical Linear Electromagnetic Stirring, 垂直行波型电磁搅拌器)，且其磁极的端头宽度小于其所面对铸坯的幅宽，大于或等于其所面对铸坯的液芯幅宽，所述V-LEMS包括磁极的端头宽度小于磁轭宽度的窄幅磁极V-LEMS和磁极的端头宽度等于磁轭宽度的等幅磁极V-LEMS；
- [0009] 其中，对于截面为圆型的铸坯，铸坯幅宽为铸坯直径，铸坯的液芯幅宽为铸坯的液芯直径。
- [0010] 进一步地，所述V-LEMS磁极的端头和磁轭的形状依据铸坯形状及铸坯截面形状而设计，对于截面为圆型的铸坯，磁极的端头呈弧形或扇形结构；对于弧形铸坯，磁极和磁轭呈与弧形铸坯共圆心或同弧度的弧形结构。
- [0011] 进一步地，所述V-LEMS的电流强度为50~3000A，频率为0.5~50Hz，磁极的端头宽度为30~4000mm，磁轭的宽度50~5000mm，磁极数为2~15，所述V-LEMS的高度为200~6000mm，当磁极和磁轭呈弧形时，弧形磁极和磁轭的圆心角 θ 为 2° ~ 170° ，弧长为200~4000mm。
- [0012] 进一步地，所述磁极的布设方式为：(a) 所述磁极间互相平行，其中所述磁

极的端头呈水平方向设置或者与垂直方向呈 $-80^{\circ} \sim +80^{\circ}$ 的倾斜式设置；(b) 所述磁极间互相平行，磁轭和磁极的整体与垂直方向呈 $-80^{\circ} \sim +80^{\circ}$ 的倾斜式设置。

[0013] 进一步地，所述V-LEMS线圈的绕组方式可分别为重叠式绕组或克兰姆式绕组或集中式绕组。

[0014] 本发明还提供了一种基于上述电磁搅拌装置的电磁搅拌方法，该方法采用至少一组所述V-LEMS对铸坯液芯进行电磁搅拌，其中一组指单个的所述V-LEMS，或基于铸坯呈对置布置的所述V-LEMS。

[0015] 进一步地，若V-LEMS多于一组，或者一组V-LEMS结合其它型式的电磁搅拌装置组使用，则一组V-LEMS与其它V-LEMS组或者其它型式的电磁搅拌装置组采用沿铸坯纵向中心线上下组合排列的方式设置。

[0016] 进一步地，靠近铸坯凝固末端处设置V-LEMS组。

[0017] 进一步地，一组V-LEMS设置在距铸模或结晶器的金属液自由液面 $100\text{mm} \sim 30000\text{mm}$ 的位置，和其它V-LEMS组或者其它型式的电磁搅拌装置组之间的距离为 $50\text{mm} \sim 25000\text{mm}$ 。

[0018] 进一步地，所述其它型式的电磁搅拌装置组所用的搅拌装置可为常规的垂直行波型电磁搅拌装置，或水平行波型电磁搅拌装置(LEMS)，或旋转型电磁搅拌装置(REMS)，或螺旋型电磁搅拌装置(SEMS)；各行波型电磁搅拌装置的电磁力方向可设置为同时向上或同时向下，或是向上与向下的组合。

发明的有益效果

有益效果

[0019] 与现有技术相比，本发明的有益效果为：

[0020] 1. 本发明通过使用V-LEMS对铸坯液芯进行搅拌，使V-LEMS所产生的电磁场主要集中作用于铸坯液芯的区域，增强铸坯液芯的熔体沿铸坯纵向中心线方向的上下环流运动，提高了电磁搅拌的作用效率和铸坯上部熔体与下部熔体的混合效果，有助于拓宽铸坯内的液芯通道，改善熔体凝固补缩的条件。而且在相同的工况条件下，适当减小窄幅的V-LEMS的电流强度或功率时，也能够达到同样的电磁搅拌效果，起到节能降耗的作用；同时，由于此窄幅的V-LEMS的宽度小于

铸坯幅宽，其整体结构和体积减小，降低了装置的制造成本。当V-LEMS的磁极的端头采用倾斜式平行排列结构时，会促进铸坯液芯内的熔体产生沿铸坯中心线向上或向下的螺旋型运动，进一步增强电磁搅拌的效果。

- [0021] 2. 本发明可依据工况条件构成沿铸坯中心线的上下多组组合的电磁搅拌方法，使各组电磁搅拌装置在铸坯液芯内形成的上部和下部环流流动区域相互关联，进一步增大铸坯液芯内熔体上下环流运动或螺旋运动的高度和强度，进一步增强铸坯上部相对温度较高熔体与下部相对温度较低熔体的混合及其温度和溶质的均匀化，进一步拓宽铸坯内的液芯通道，提高铸坯上部熔体对下部熔体凝固收缩的补缩能力，进而减轻或消除铸坯中心偏析、疏松、缩孔和裂纹等缺陷。

对附图的简要说明

附图说明

- [0022] 图1为窄幅磁极V-LEMS与方坯的横截面示意图；
- [0023] 图2为窄幅磁极V-LEMS与圆坯的横截面示意图；
- [0024] 图3为集中绕组式窄幅水平磁极结构示意图；
- [0025] 图4为集中绕组式窄幅倾斜磁极结构示意图；
- [0026] 图5为克莱姆绕组式弧形磁极和磁轭结构示意图；
- [0027] 图6为多种组合型式的V-LEMS布置示意图；
- [0028] 图7为铸坯内侧单侧设置窄幅磁极V-LEMS下的流场分布；
- [0029] 图8为铸坯内外侧对置窄幅磁极V-LEMS下的流场分布；
- [0030] 图9为铸坯内侧单侧设置V-LEMS作用下的磁场分布；
- [0031] 图10为铸坯内外侧对置设置V-LEMS下的磁场分布；
- [0032] 图11为铸坯内侧上下组合设置窄幅磁极V-LEMS下的流场分布；
- [0033] 图12为不同布置型式的V-LEMS下铸坯液芯内熔体上下环流运动区域的高度；
- [0034] 图13为无电磁搅拌和等幅磁极V-LEMS下铸坯纵截面的温度分布；
- [0035] 图14为无电磁搅拌和等幅磁极V-LEMS下铸坯横截面中心线上的液芯平均温度变化；
- [0036] 图15为无电磁搅拌和等幅磁极V-LEMS下铸坯横截面中心线上的液芯宽度变化；
- [0037] 图16为铸坯上部设置REMS下Incoloy800铸坯的低倍凝固组织；

[0038] 图17为铸坯内侧设置上下组合V-LEMS下Incoloy800铸坯的低倍凝固组织；

[0039] 附图标记：1-位于铸坯下部的V-LEMS装置；1'-位于铸坯下部对置布置的V-LEMS装置；2-位于铸坯上部的电磁搅拌装置；2'-位于铸坯上部对置布置的电磁搅拌装置；3-铸坯凝固坯壳；4-铸坯液芯；5-结晶器；6-线圈；7-磁极；8-磁轭；9-聚磁罩。

发明实施例

本发明的实施方式

[0040] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0041] 如图1和图2所示，本发明提供一种提高铸坯液芯凝固补缩能力和铸坯中心质量的电磁搅拌装置，其为主要由线圈6、磁极7、磁轭8、聚磁罩9组成或构成的磁极宽度小于或等于其所面对的铸坯幅宽的V-LEMS (Vertical Linear Electromagnetic Stirring, 垂直行波型电磁搅拌装置，该装置的磁极沿垂直方向线性排列，主要产生沿垂直方向的电磁力)，且其磁极的端头宽度 W_p 小于其所面对铸坯的幅宽，大于或等于其所面对铸坯的液芯幅宽，所述V-LEMS包括磁极的端头宽度 W_p 小于磁轭宽度 W_y 的窄幅磁极V-LEMS和磁极的端头宽度 W_p 等于磁轭宽度 W_y 的等幅磁极V-LEMS；对于截面为方型的铸坯，铸坯幅宽即为铸坯宽度 W_s （实际生产中为铸坯凝固坯壳3整体的宽度），铸坯液芯幅宽即为铸坯液芯4宽度 W_c ，对于截面为圆型的铸坯，铸坯幅宽即为铸坯直径 Φ_s ，铸坯液芯幅宽即为铸坯液芯直径 Φ_c 。

[0042] 其中，所述V-LEMS线圈的绕组方式为重叠式绕组或克兰姆式绕组或集中式绕组；磁极的端头和磁轭的形状依据铸坯形状及铸坯截面形状而设计，对于截面为圆型的铸坯，磁极的端头呈弧形或扇形结构（如图2所示）；对于弧形铸坯，磁极和磁轭呈与弧形铸坯共圆心或同弧度的弧形结构（如图5所示）；当磁极和磁轭呈弧形时，弧形磁极和磁轭的圆心角 θ 为 $2^\circ \sim 170^\circ$ ，弧长为 $200 \sim 4000\text{mm}$ 。

[0043] 其中，所述V-LEMS的电流强度为 $50 \sim 3000\text{A}$ ，频率为 $0.5 \sim 50\text{Hz}$ ，磁极的端头宽度为 $30 \sim 4000\text{mm}$ ，磁轭的宽度 $50 \sim 5000\text{mm}$ ，磁极数为 $2 \sim 15$ ，所述V-LEMS的高度为 200

~6000mm, 所述磁极的布设方式为: (a) 所述磁极间互相平行, 其中所述磁极的端头呈水平方向设置(如图3所示)或者与垂直方向呈 -80° ~ $+80^{\circ}$ 的倾斜式设置(如图4所示); (b) 所述磁极间互相平行, 磁轭和磁极的整体与垂直方向呈 -80° ~ $+80^{\circ}$ 的倾斜式设置。

[0044] 本发明还提供了一种提高铸坯液芯凝固补缩能力和铸坯中心质量的电磁搅拌方法, 该方法采用至少一组所述V-LEMS对铸坯液芯进行电磁搅拌, 其中一组指单个的所述V-LEMS, 或基于铸坯呈对置布置的所述V-LEMS。

[0045] 其中优选方法为设置第一组V-LEMS: 位于铸坯下部的V-LEMS装置1与位于铸坯下部对置布置的V-LEMS装置1', 并依据工况条件, 设置第二组或多组电磁搅拌装置: 位于铸坯上部的电磁搅拌装置2与位于铸坯上部对置布置的电磁搅拌装置2' (如图6所示), 构成沿铸坯中心线的上下多组组合的电磁搅拌方法, 第二组或多组电磁搅拌装置可为本发明所述的V-LEMS, 或常规的垂直行波型电磁搅拌装置, 或水平行波型电磁搅拌装置(LEMS), 或旋转型电磁搅拌装置(REMS), 或螺旋型电磁搅拌装置(SEMS)。各行波型电磁搅拌装置的电磁力方向可设置为同时向上或同时向下, 或是向上与向下的组合。

[0046] 实施例1:

[0047] 本实施例采用数值模拟计算方法, 按照以下三种型式分别布置窄幅磁极V-LEMS和等幅磁极V-LEMS, 对比分析窄幅磁极和等幅磁极V-LEMS在不同布置型式下弧形连铸机铸坯液芯内熔体上下环流运动, 以及不同V-LEMS的影响。

[0048] 型式I: 在距结晶器5钢液自由液面6500mm处的铸坯内侧设置V-LEMS(如图7所示);

[0049] 型式II: 在距结晶器5钢液自由液面6500mm处的铸坯内侧和外侧分别设置V-LEMS(如图8所示);

[0050] 型式III: 在距结晶器5钢液自由液面6500mm和5600mm区域的铸坯内侧分别设置V-LEMS-1和V-LEMS-2(如图11所示)。

[0051] 钢种为Q235, 铸坯宽度为200mm, 铸坯液芯宽度为100mm, 拉坯速度为0.9m/min。以上各V-LEMS的共同参数为: 电流强度300A, 频率12Hz, 电磁力方向向下, 搅拌器高度450mm, 磁极数3, 磁轭宽度180mm, 磁极的端头呈水平式平行排列结

构，窄幅磁极的磁极端头宽度为100mm，等幅磁极的磁极端头宽度为180mm。

[0052] 图7、图8和图11分别为 I、II 和 III 三种布置型式，窄幅磁极 V-LEMS 作用下铸坯液芯内的流场分布图；图9和图10分别为 I 和 II 两种布置型式，窄幅磁极和等幅磁极 V-LEMS 作用下铸坯内的磁场分布图；图12为 I、II 和 III 三种布置型式，窄幅磁极和等幅磁极 V-LEMS 作用下铸坯液芯内熔体上下环流运动区域的高度对比图。

[0053] 由图9和图10可知，在窄幅磁极 V-LEMS 作用下，铸坯液芯内部的磁感应强度明显高于等幅磁极 V-LEMS 的，这说明采用窄幅磁极 V-LEMS 的结构使得其电磁场更集中作用于铸坯的液芯区域，能够进一步提高铸坯内的磁场强度，可提高电磁搅拌的作用效率和效果，而且在相同的工况条件下，适当减小窄幅磁极 V-LEMS 的电流强度或功率，也能够达到同样的电磁搅拌效果，起到节能降耗的作用。

[0054] 由图7、图8和图11可见，施加窄幅磁极 V-LEMS 后，铸坯液芯内熔体均产生沿铸坯纵向中心线的上下环流运动，特别是在采用型式 III 的上下组合窄幅磁极 V-LEMS 时，铸坯液芯上部和下部形成的两个环流区域相互关联（图11），显著增大了铸坯液芯内的上下环流运动区域的高度。在三种 V-LEMS 布置型式中，采用窄幅磁极 V-LEMS 时铸坯内的熔体上下环流运动区域的高度分别为 870mm、1120mm 和 1880mm，明显高于等幅磁极 V-LEMS 的 840mm、1030mm 和 1740mm（如图12所示），这说明窄幅磁极 V-LEMS 对铸坯内熔体的上下环流运动的驱动强度更大。窄幅磁极和等幅磁极 V-LEMS 在采用布置型式 III 的上下组合时，上下环流运动区域的高度比布置型式 II 的分别提高了 67.8% 和 68.9%（图12），这说明布置型式 III 的 V-LEMS 有助于使铸坯上部的相对温度更高的熔体与铸坯下部的相对温度较低熔体的混合及其温度和溶质的均匀化，有助于减轻或消除铸坯中心偏析。

[0055] 实施例2：

[0056] 本实施例采用数值模拟计算方法，对比分析无电磁搅拌和等幅磁极 V-LEMS 作用下弧形连铸坯液芯内的温度变化。钢种为 GGr15，铸坯截面尺寸为 260mm×300mm，拉坯速度为 0.65 m/min，按固相率 0.68 确定凝固过程中的坯壳厚度。

[0057] 距结晶器钢液自由液面 7280mm 和 6380mm 区域的铸坯内侧分别设置等幅磁极 V-LEMS-1 和等幅磁极 V-LEMS-2（如图13b所示），形成沿铸坯内侧上下组合的 V-LEMS

电磁搅拌方式。电磁搅拌器的参数为，电流强度400A，频率8Hz，电磁力方向为向下，搅拌器高度为450mm，磁极数3，磁轭的宽度为200mm，磁极的端头宽度为200mm（大于液芯幅宽），磁极的端头呈水平式平行排列结构，面对铸坯弧面的磁极和磁轭为弧形，其圆心角为 4° ，弧长为460mm。

[0058] 图13、图14和图15分别为无电磁搅拌和V-LEMS作用下铸坯纵截面的温度分布、铸坯横截面中心线上的液芯平均温度变化和铸坯横截面中心线上的液芯宽度变化。

[0059] 由此可见，在无电磁搅拌作用下，铸坯内外侧的熔体温度呈对称均匀分布（图13a）。在采用铸坯内侧上下组合V-LEMS后，由于铸坯液芯内熔体形成上下大环流运动，使得上部区域相对温度较高的熔体与位于下部区域的熔体发生混合与均匀化，在等幅磁极V-LEMS-2和等幅磁极V-LEMS-1作用区域内的高温液芯区域向设置V-LEMS的铸坯内侧拓展（图13b），使得V-LEMS作用区域内铸坯液芯的平均温度整体提升了 3.2°C （如图14所示）；V-LEMS作用区域内的铸坯液芯宽度扩大了 $3\sim 10\text{mm}$ （如图15所示）。这说明采用铸坯内侧上下组合V-LEMS方法，提升了铸坯内的液芯平均温度，拓宽了铸坯内的液芯通道，改善了熔体凝固补缩的条件，这将有助于提高上部高温流动性较好的熔体对下部熔体凝固收缩的补缩能力，特别是对于合金熔体粘度较大、流动性较差的特种钢和高碳钢等钢种，有助于减轻或消除铸坯的中心偏析、疏松、缩孔和裂纹等缺陷，从而减轻和消除铸坯轧制后的带状偏析等各种缺陷，整体提高产品的质量和性能。

[0060] 实施例3：

[0061] 本实施例通过连续浇注实验，对比分析不同电磁搅拌方法对合金凝固组织的效果。电磁搅拌方法I为在立式连铸机的上部距结晶器自由液面400mm设置旋转型电磁搅拌装置(REMS)，而在铸机下部不设置电磁搅拌装置，REMS的高度为450mm，磁极数为6。电磁搅拌方法II为在立式连铸机的上部距结晶器自由液面400mm设置等幅磁极V-LEMS-2，而在立式连铸机的下部距结晶器自由液面800mm设置等幅磁极V-LEMS-1装置，构成上下组合的V-LEMS电磁搅拌方法。V-LEMS的参数为，高度300mm，磁极数3，磁轭宽度90mm，磁极的端头宽度90mm（大于液芯幅宽），电磁力总体方向为向下，磁轭和磁极的整体与垂直方向呈 15° 。

- [0062] 实验钢种为Incoloy800高温合金，其主要化学成分(wt%)为0.467Ni，0.183Cr，0.235Al，0.17Ti，0.22C，余量为Fe等。铸坯截面尺寸为100mm×100mm，浇注温度1600℃，冷却水流量为4.32m³/h，拉坯速度为0.06 m/min；各种电磁搅拌器的电流强度均为350A，频率均为5Hz。
- [0063] 图16和图17分别为采用电磁搅拌方法 I 和电磁搅拌方法 II 时Incoloy800高温合金连铸坯上部a) 和底部b) 的纵向低倍凝固组织。
- [0064] 由图16可见，在铸机上部单独采用REMS时，Incoloy800高温合金铸坯的上部中心区域为等轴晶凝固组织。但是，在铸坯下部的较大中心区域，存在较为严重的缩孔和疏松等中心缺陷，等轴晶比率也较低，这说明铸坯上部熔体对下部熔体凝固收缩的补缩能力严重不足或凝固补缩条件较差。由图17可见，当采用电磁搅拌方法 II 的上下组合V-LEMS时，上部铸坯和底部铸坯的中心区域均为等轴晶凝固组织，等轴晶比率较高，铸坯中心区域的缩孔和疏松等缺陷消失，这说明采用上下组合V-LEMS方法，显著提高了Incoloy800高温合金铸坯上部熔体对下部熔体凝固收缩的补缩能力，显著提高铸坯的中心质量。
- [0065] 以上技术方案阐述了本发明的技术思路，不能以此限定本发明的保护范围，凡是未脱离本发明技术方案的内容，依据本发明的技术实质对以上技术方案所作的任何改动及修饰，均属于本发明技术方案的保护范围。

权利要求书

- [权利要求 1] 一种提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置，其特征在于，其为主要由线圈、磁极、磁轭、聚磁罩构成的磁极宽度小于或等于其所面对的铸坯幅宽的V-LEMS（Vertical Linear Electromagnetic Stirring，垂直行波型电磁搅拌器），且其磁极的端头宽度小于其所面对铸坯的幅宽，大于或等于其所面对铸坯的液芯幅宽，所述V-LEMS包括磁极的端头宽度小于磁轭宽度的窄幅磁极V-LEMS和磁极的端头宽度等于磁轭宽度的等幅磁极V-LEMS；
- 其中，对于截面为圆型的铸坯，铸坯的幅宽为铸坯直径，铸坯液芯幅宽为铸坯液芯直径。
- [权利要求 2] 根据权利要求1所述的一种提高铸坯液芯凝固补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置，其特征在于，所述磁极的端头和磁轭的形状依据铸坯形状及铸坯截面形状而设计，对于截面为圆型的铸坯，磁极的端头呈弧形或扇形结构；对于弧形铸坯，磁极和磁轭呈与弧形铸坯共圆心或同弧度的弧形结构。
- [权利要求 3] 根据权利要求2所述的一种提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置，其特征在于，所述V-LEMS的电流强度为50~3000A，频率为0.5~50Hz，磁极的端头宽度为30~4000mm，磁轭的宽度50~5000mm，磁极数为2~15，所述V-LEMS的高度为200~6000mm，当磁极和磁轭呈弧形时，弧形磁极和磁轭的圆心角 θ 为 2° ~ 170° ，弧长为200~4000mm。
- [权利要求 4] 根据权利要求1所述的一种提高铸坯液芯补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置，其特征在于，所述磁极的布设方式为：（a）所述磁极间互相平行，其中所述磁极的端头呈水平方向设置或者与垂直方向呈 -80° ~ $+80^{\circ}$ 的倾斜式设置；（b）所述磁极间互相平行，磁轭和磁极的整体与垂直方向呈 -80° ~ $+80^{\circ}$ 的倾斜式设置。
- [权利要求 5] 根据权利要求1所述的一种提高铸坯液芯凝固补缩能力和中心质量的电磁搅拌装置，其特征在于，所述V-LEMS线圈的绕组方式可分别为重叠式绕组或克兰姆式绕组或集中式绕组。

- [权利要求 6] 一种基于权利要求1~5其中任意一项所述的电磁搅拌装置的电磁搅拌方法，其特征在于，该方法采用至少一组所述V-LEMS对铸坯液芯进行电磁搅拌，其中一组指单个的所述V-LEMS，或基于铸坯呈对置布置的所述V-LEMS。
- [权利要求 7] 根据权利要求6所述的电磁搅拌方法，其特征在于，若V-LEMS多于一组，或者一组V-LEMS结合其它型式的电磁搅拌装置组使用，则一组V-LEMS与其它V-LEMS组或者其它型式的电磁搅拌装置组采用沿铸坯纵向中心线上下组合排列的方式设置。
- [权利要求 8] 根据权利要求7所述的电磁搅拌方法，其特征在于，靠近铸坯凝固末端处设置V-LEMS组。
- [权利要求 9] 根据权利要求7所述的电磁搅拌方法，其特征在于，一组V-LEMS设置在距铸模或结晶器的金属液自由液面100mm~30000mm的位置，和其它V-LEMS组或者其它型式的电磁搅拌装置组之间的距离为50mm~25000mm。
- [权利要求 10] 根据权利要求7所述的电磁搅拌方法，其特征在于，所述其它型式的电磁搅拌装置组所用的搅拌装置可为常规的垂直行波型电磁搅拌装置，或水平行波型电磁搅拌装置、或旋转型电磁搅拌装置，或螺旋型电磁搅拌装置，各行波型电磁搅拌装置的电磁力方向可设置为同时向上或同时向下，或是向上与向下的组合。

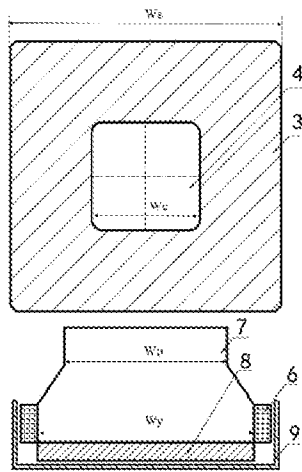


图 1

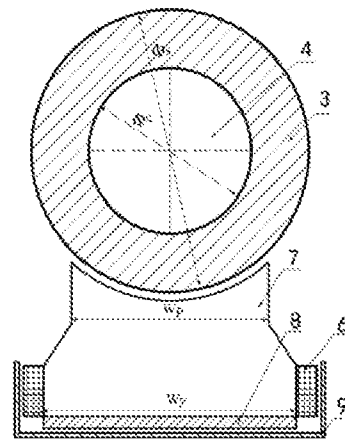


图 2

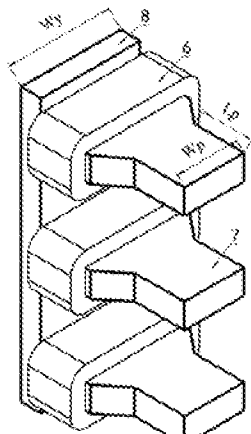


图 3

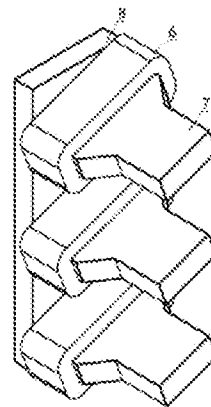


图 4

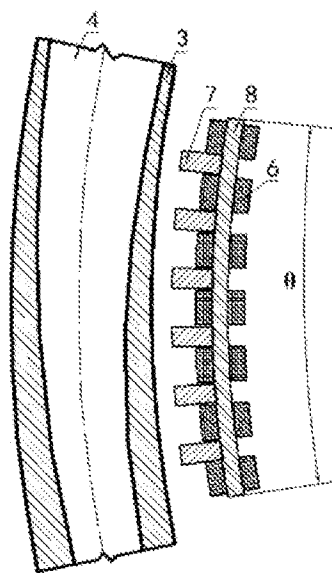


图 5

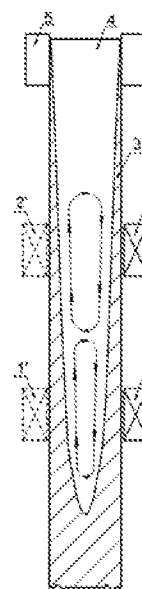


图 6

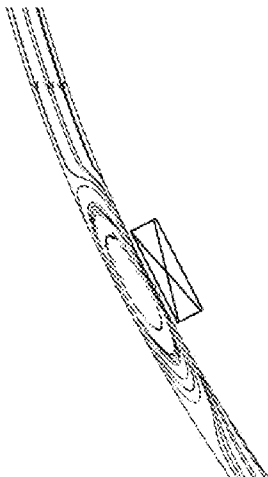


图 7

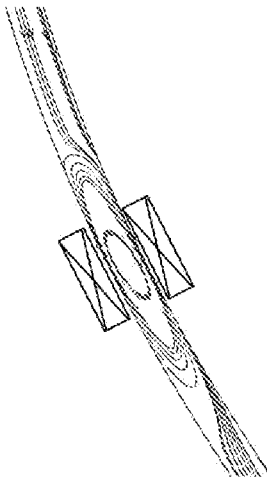


图 8

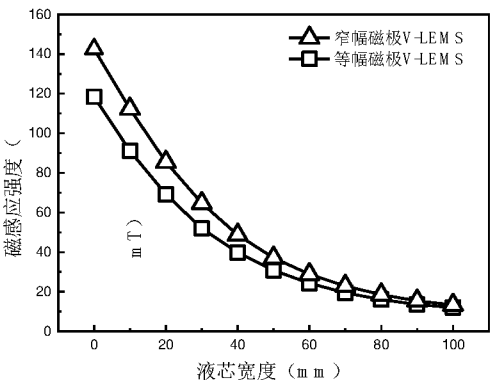


图 9

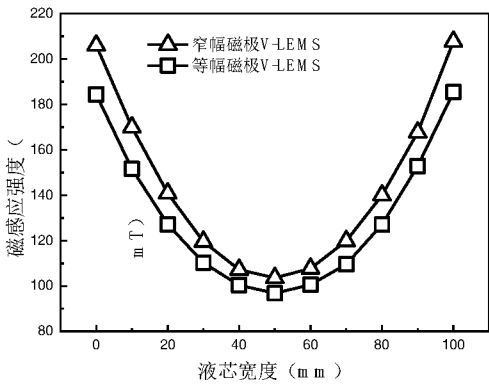


图 10

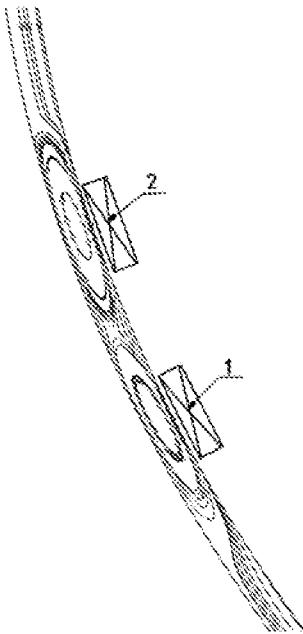


图 11

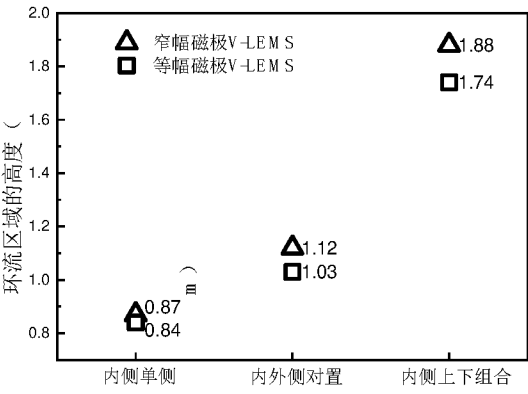


图 12

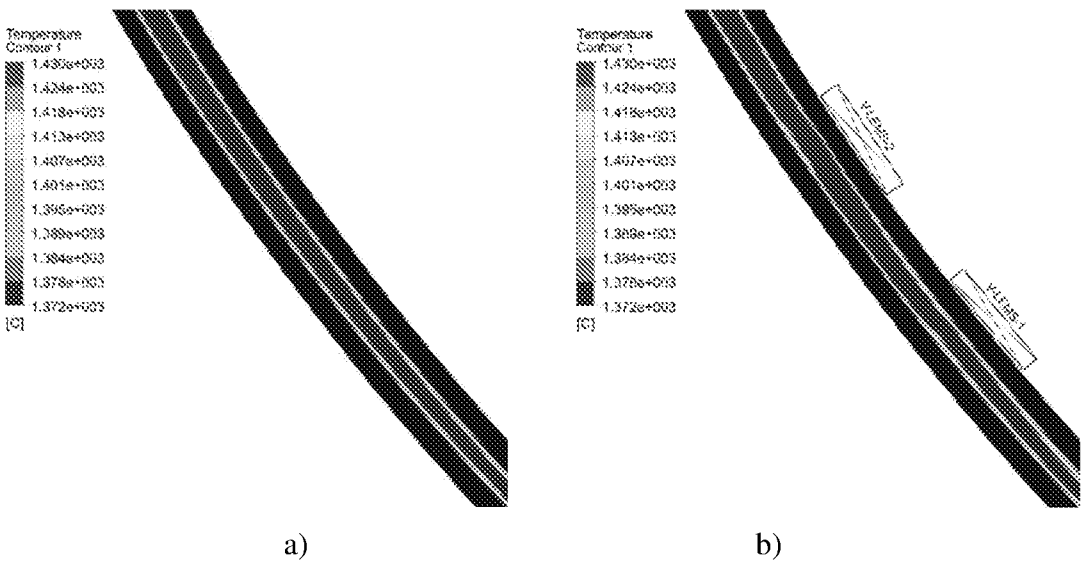


图 13

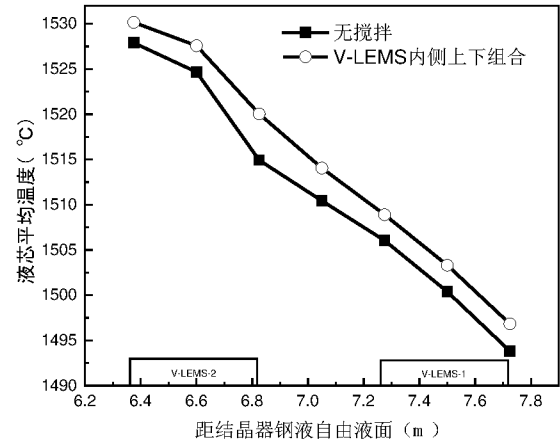


图 14

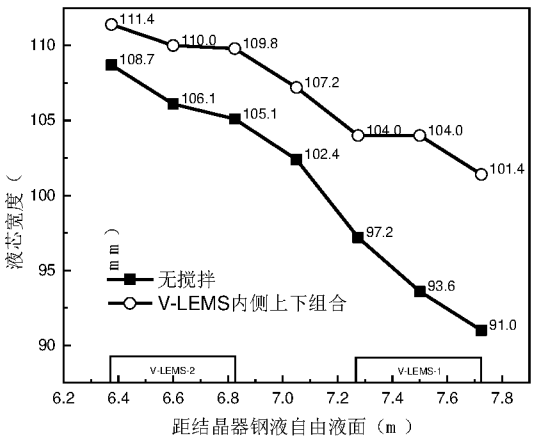


图 15

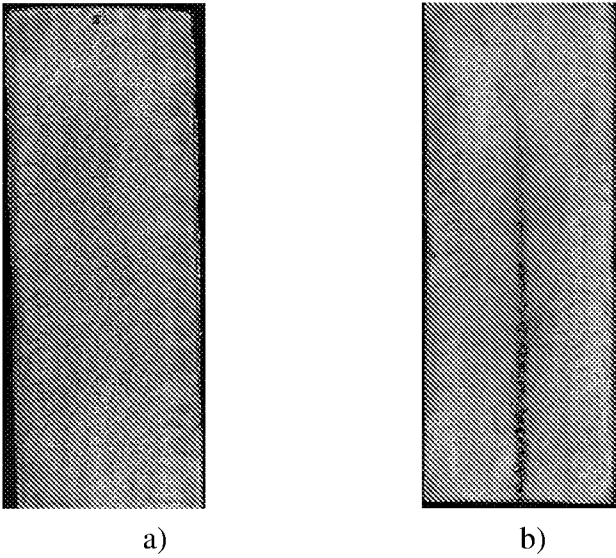


图 16

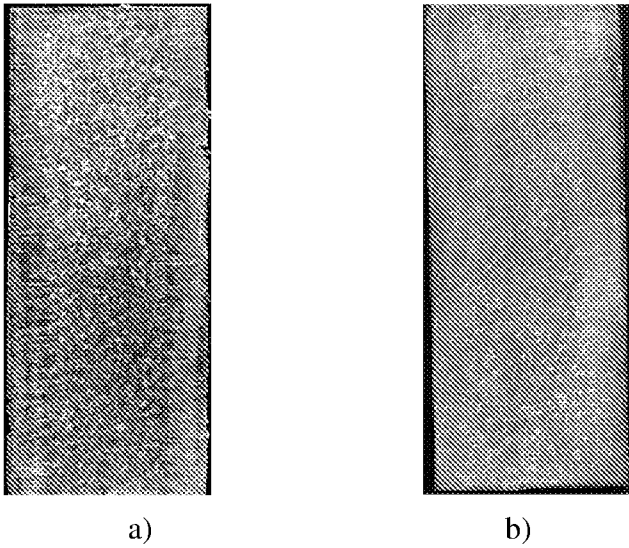


图 17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/093996

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B22D 11/115(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)

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)

VEN; SIPOABS; CNABS; CNTXT: 液芯, 搅拌, 磁场, 垂直, 磁极, 磁轭, 宽度, 尺寸, 距离, 体积, 板坯, 补缩, 补偿, 偏析, 缩松, (liquid 5D core), stir+, vertical+, magnetic 3D pole, yoke, width, size, spac+, slab, billet+, feed+, segregat+, shrinkage, porosity

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105935752 A (NORTHEASTERN UNIVERSITY) 14 September 2016 (2016-09-14) description, paragraphs 5-8, figures 1-11	1-10
A	US 4016926 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES) 12 April 1977 (1977-04-12) entire document	1-10
A	CN 106475537 A (BAOSHAN IRON & STEEL CO., LTD.) 08 March 2017 (2017-03-08) entire document	1-10
A	CN 105014029 A (SHANGHAI UNIVERSITY) 04 November 2015 (2015-11-04) entire document	1-10



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

12 August 2021

Date of mailing of the international search report

29 October 2021

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.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/093996

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	105935752	A	14 September 2016	CN	105935752	B	23 July 2019
US	4016926	A	12 April 1977	JP	S50125930	A	03 October 1975
				JP	S5326210	B2	01 August 1978
CN	106475537	A	08 March 2017	None			
CN	105014029	A	04 November 2015	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/093996

A. 主题的分类

B22D 11/115 (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)

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))

VEN; SIPOABS; CNABS; CNTXT: 液芯, 搅拌, 磁场, 垂直, 磁极, 磁轭, 宽度, 尺寸, 距离, 体积, 板坯, 补缩, 补偿, 偏析, 缩松, (liquid 5D core), stir+, vertical+, magnetic 3D pole, yoke, width, size, spac+, slab, billet+, feed+, segregat+, shrinkage, porosity

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 105935752 A (东北大学) 2016年 9月 14日 (2016 - 09 - 14) 说明书第5-8段, 附图1-11	1-10
A	US 4016926 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES) 1977年 4月 12日 (1977 - 04 - 12) 全文	1-10
A	CN 106475537 A (宝山钢铁股份有限公司) 2017年 3月 8日 (2017 - 03 - 08) 全文	1-10
A	CN 105014029 A (上海大学) 2015年 11月 4日 (2015 - 11 - 04) 全文	1-10

☐ 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

“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

2021年 8月 12日

国际检索报告邮寄日期

2021年 10月 29日

ISA/CN的名称和邮寄地址

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

传真号 (86-10)62019451

授权官员

孟凡硕

电话号码 010-62085198

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/093996

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	105935752	A	2016年 9月 14日	CN 105935752 B	2019年 7月 23日
US	4016926	A	1977年 4月 12日	JP S50125930 A	1975年 10月 3日
				JP S5326210 B2	1978年 8月 1日
CN	106475537	A	2017年 3月 8日	无	
CN	105014029	A	2015年 11月 4日	无	