

高品质长型材连铸坯生产关键技术

张炯明*

北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083

Key Techniques for Production of High-quality Continuous Casting

Billets/Blooms Used for Long Products

Zhang Jiongming*

State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing,
Beijing, 100083, China

1. 前言

连铸是钢铁流程中的重要环节, 铸坯质量是影响钢材质量的重要因素。长型材铸坯主要质量问题有表面缺陷(夹杂)、内部缺陷(中心偏析、疏松及中间裂纹)等。钢凝固过程存在选分结晶现象, 不可避免的造成铸坯中心偏析, 而中心疏松常与中心偏析伴生, 中高碳钢、合金钢等钢种中心偏析、中心疏松问题尤为突出。对于轴承钢、弹簧钢等对疲劳性能要求严格的钢种来说还要求高的铸坯表面质量。

目前长型材连铸坯生产针对上述质量问题总体方向性明确, 但没有较好的结合各自的工艺来加以更精确控制。概括问题如下: 1. 连铸坯偏析、疏松低倍检测过程中经常出现取 5 块低倍试样, 每一块的偏析值差别非常大, 疏松级别也有差异, 没找到根本原因; 2. 连铸过程中基本采用的是静态配水, 有些采用等效拉速法的动态配水, 不像板坯采用的基于目标温度的动态配水, 拉速频繁波动导致了铸坯表面温度波动大; 3. 基本采用静态压下模式, 有些工厂由于软件封闭、实际应用复杂及对软件的理解存在偏差等, 将设计时已有的动态模式修改成静态辊缝设定模式, 仅仅取决于凝固终点, 根据固相率大致确定各辊的压下量。压下工艺没有结合钢种特点进行设定, 没有发挥出连铸机的最大潜力, 没有达到最佳的压下效果; 4. 合金钢通过压下技术减轻偏析时, 往往伴随内部裂纹产生。内部裂纹在后续的轧制过程中能够轧合, 但与轧制压缩比有关, 目前国内一些企业一味追求不产生内裂纹的压下工艺, 结果造成偏析解决不好, 影响后续的轧制产品的组织性能; 5. 压下的重要参数是凝固终点, 射钉法是方、矩形坯最常用的凝固终点测定方法, 通过确定射钉铸坯内钉子的熔化状况或钉子上硫的扩散状况, 来确定凝固坯壳厚度, 进而确定凝固系数, 这种方法的精度极低。矩形坯内外弧和侧面凝固速度不一样, 其结果精度就更低, 很难找到一套完整的凝固系数; 6. 国内钢铁企业迫于成本压力, 经常采用异钢种连浇, 对于异钢种连浇的铸坯成分并不清楚, 没有定量描述, 多数是凭检测到的数据进行判断, 判断升降级别, 没有理论上的精确计算和可视化显示; 7. 夹杂物控制方面, 没有结合轧制压缩比来控制铸坯表层及表面夹杂物, 而是一味追求钢水洁净度, 追求结晶器钢水夹杂物总体上浮, 没采用针对性加以控制。

本技术从长型材铸坯主要缺陷入手, 提出了相应的创新性关键技术集成: 揭示了不同钢种、工艺下铸坯凝固组织(二次枝晶间距)与温度梯度、凝固速率间的定量关系, 开发了基于凝固组织控制或目标温度的连铸动态二冷技术, 实现了不同拉速、过热度情况下凝固组织稳定控制, 解决了铸坯中心偏析、疏松及缩孔控制不稳定的难题; 开发了碳钢单辊或双辊压下、合金钢多辊压上等分钢类的压下技术, 结合轧制压缩比确定了铸坯压下裂纹的容忍度, 最大限度的改善铸坯中心偏析; 设计出以低熔点重金属(铅)为示踪剂的连铸坯凝固终点测定方法, 结合仿真计算确定了示踪剂的沉降时间以及铸坯的相对位移, 并对示踪剂位置进行修正, 首次揭示了结晶器电磁搅拌、钢水过热度对铸坯凝固终点的影响; 开发了铸坯表层夹杂物

控制技术，根据轧制压缩比确定铸坯夹杂物的遗传规律，找出不同轧制压缩比条件下轧材表层 1mm 内夹杂物在对应的连铸坯位置，通过优化结晶器流场、电磁搅拌位置及参数来控制铸坯该部位的夹杂物；开发了方坯动态配水及压下在线软件，建立了完整的数据库，实现了自动控制和离线仿真。同时软件纳入异钢种混浇模型，可准确预报混浇坯长度并可对铸坯改判，并实时跟踪混浇铸坯凝固终点和动态调整压下参数。

本技术先后在鞍钢、中天、宝武等企业 12 条产线获得推广应用，技术实施后中高碳钢及合金钢铸坯中心偏析、疏松明显改善（评级不大于 1.0 级），铸坯表层洁净度明显提高（夹杂物含量降低约 30%）。本技术推广应用过程中取得了显著的经济社会效益。

2. 技术内容

2.1. 基于凝固组织或目标温度控制的连铸动态二冷控制技术

本技术思路为通过测定连铸机生产的不同钢种、不同工艺下凝固组织参数（二次枝晶间距），找出能够表征该连铸机具体钢种、具体工艺下凝固特征的凝固指数。结合凝固传热模型，参照目标凝固指数来对控制各冷却区冷却强度。基于切片法进行连铸坯凝固传热计算，根据计算结果提取连铸坯的凝固前沿温度梯度、凝固速率，提取了枝晶测量线方向上的温度梯度和凝固速率数值（图 1）。可以看出随着凝固的进行，在凝固中心的凝固速率又迅速增大。

图 1 给出了凝固指数配水方式不同冷却区凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$ 和二次枝晶间距(SDAS)。可以看到，不同拉速条件下各冷却区的凝固指数基本一致，足辊区、二冷I区、二冷II区和二冷III区位置处的凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$ 分别约为 2.10、2.36、1.48 和 1.40。图 1(b)为不同冷却区二次枝晶间距(SDAS)分布，可以看到，二次枝晶间距先增加后减小，在二冷II区位置处的二次枝晶间距最大。不同拉速条件下的铸坯二次枝晶间距基本一致。因此，凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$ 控制二冷配水可以保证凝固组织稳定生长，可以保证铸坯凝固组织路径一致，二次枝晶间距也相同。

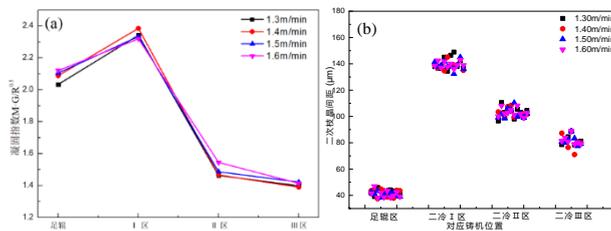


图 1 各冷却区凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$ 配水方式和二次枝晶间距(SDAS): (a)凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$; (b)二次枝晶间距

Fig. 1 Solidification index (a) and SDAS at each cooling zone(b)

图 2 所示为基于凝固组织控制的连铸动态二冷在线模型及数据库。在线模型在已有的基于目标温度动态控制模型的基础上进行了升级，增加了凝固组织控制选项。在模型数据库中，可以设置各控制点的目标凝固指数。



图 2 基于凝固组织控制的连铸动态二冷在线模型及数据库

Fig. 2 Online model and database for dynamic secondary cooling model

图 3 给出了凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$ 配水方式不同拉速条件下的连铸坯低倍照片，可以看出铸坯中心疏松、缩孔几乎消失，并且不同拉速低倍照片比较稳定。红色框内等轴晶区域，拉速 1.3-1.6m/min 拉速下等轴晶比例分别

为 19.7%、18.1%、17.2%和 17.7%。此外，图 3 给出了凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$ 配水方式凝固试样中心偏析度统计，1.3-1.6m/min 拉速下铸坯的中心偏析度分别为 1.098、1.095、1.101 和 1.118，铸坯中心偏析度基本一致，并且标准差也基本一致，表明铸坯中心偏析度波动性较小。因此，通过采用凝固指数 $M \cdot G/R^{0.5}$ 控制二冷配水的方式，连铸坯凝固组织基本一致，可以保证不同拉速条件下凝固组织的稳定生长，形成铸坯内部质量较稳定。

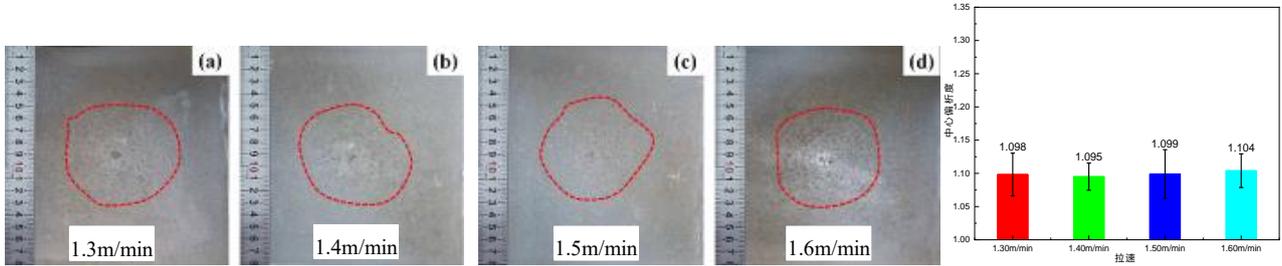


图 3 本技术应用后生产的铸坯低倍和偏析统计

Fig. 3 Billets produced by this technique

2.2. 长型材连铸坯分钢类动态压下技术

结合钢种裂纹敏感性及其压下裂纹在轧制中的愈合特性来对不同钢种实施分钢类压下。具体的准则为：

(1) A 类钢种（高碳钢）：像 82b 这一类钢种连铸坯裂纹敏感性较弱，一般不会出现压下中间裂纹。这一类钢种经轧制后成为盘条，所需压缩比较大，即使出现压下中间裂纹，经大压缩比轧制后裂纹也会愈合。通过减少压下辊，单辊或双辊压下，提高单辊压下量可以更好改善中心偏析指数；

(2) B 类钢种（轴承钢、弹簧钢）：GCr15 这一类钢种，虽然其铸坯裂纹敏感性较强，但铸坯轧制过程中压缩比大。因此，这一类钢种即使出现压下中间裂纹，也会在轧制过程中愈合。在实施压下时，多辊实施压下，放宽对中间裂纹的容忍度，最大程度改善偏析，压下时可容忍压下内裂纹的出现；

(3) C 类钢种（型材、高裂纹敏感性）：U71Mn 这一类钢种，裂纹敏感性高，轧制压缩比小（型材轧制），所以在压下过程中需要格外注意避免压下中间裂纹出现。在实施压下时，多辊实施压下，同时兼顾改善中心偏析和避免出现中间裂纹改善偏析的同时避免出现压下内裂纹。

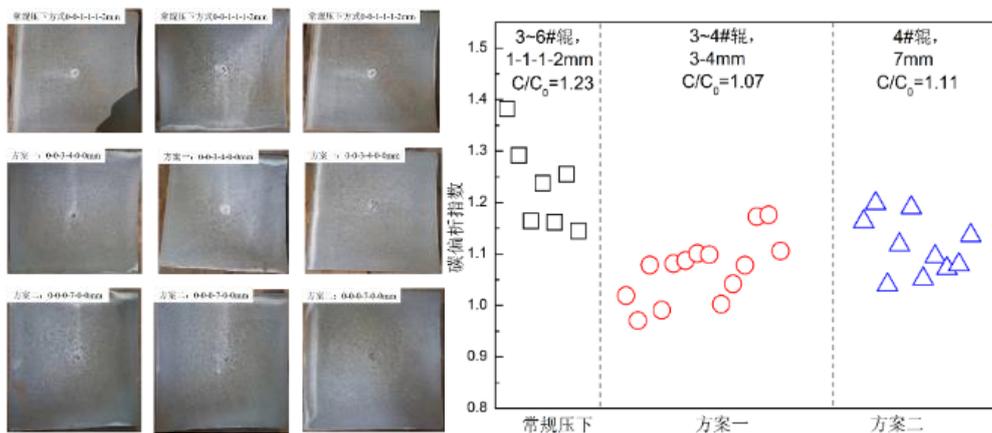


图 4 SWRH82B 钢种铸坯不同压下方式低倍照片及铸坯中心偏析指数

Fig. 4 Reduction for SWRH82B billets

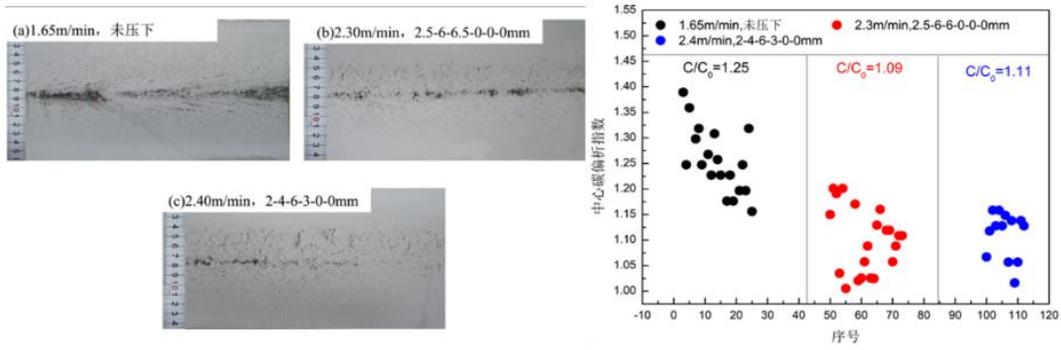


图 5 160mm×160mm 断面 GCr15 连铸坯低倍照片及连铸坯中心偏析指数统计

Fig. 5 Reduction for GCr15 billets

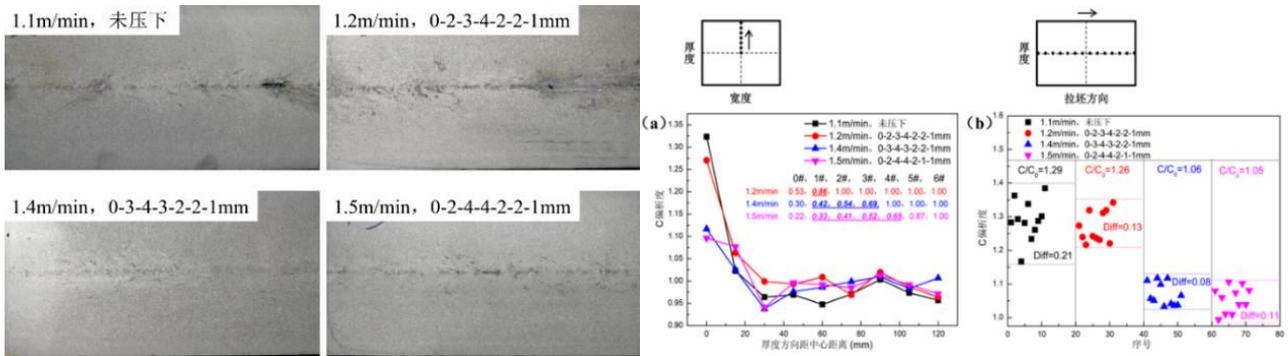


图 6 160mm×250mm 重轨钢 U71Mn 低倍照片及偏析度统计

Fig. 6 Reduction for U71Mn billets

2.3. 连铸坯凝固终点的示踪剂测定技术

以低熔点重金属（铅）为示踪剂，实现了连铸坯凝固终点测定。灌铅实验时，连铸机保持连铸坯拉速恒定，以确保在特定拉速条件下，连铸坯的凝固末端位置保持不变。通过对实验铸坯进行取样和工业 X 光机检测，获得含铅连铸坯的 X 光片。结合数值模拟计算，确定铅液在液相穴内沉降时间和示踪剂的沉降时间以及铸坯的相对位移，对示踪剂位置进行修正，最终确定连铸坯凝固终点位置。图 7 为灌铅示意图、现场实施及凝固终点测定结果。

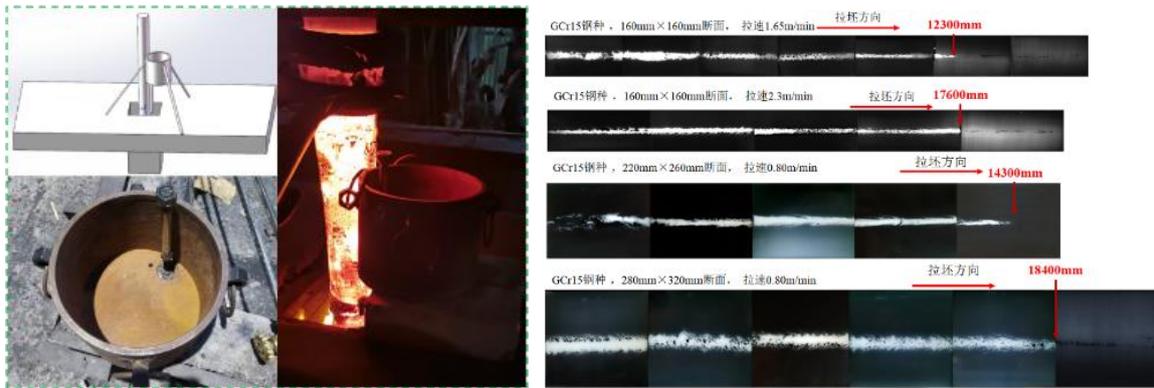


图 7 灌铅示意图、现场实施及凝固终点测定结果

Fig. 7 Measurement of solidification end through Pb tracer

2.4. 异钢种连浇过程判定及压下实施技术

国内钢铁企业迫于成本压力，经常采用异钢种连浇，对于异钢种连浇的铸坯成分并不清楚，没有定量描述，多数是凭检测到的数据进行判断，判断升降级别，没有理论上的精确计算和可视化显示。此外，异钢种钢水在中间混合后，中间包钢水成分逐步由第一个钢种变化到第二个钢种，其固液相线温度、导热系数、热焓值等热物性参数势必发生变化，进而也对凝固固相率产生了影响，由于成分的变化，也要求目标温度相应进行调整。为了在二冷控制模型中涉及这一影响因素，首先对连铸中间包中连浇过程进行了数值模拟。将数值模拟计算获取的混合浇注时间、混合浇注过程中的钢水成分及固液相线温度变化特征嵌入数据库中，软件即可对现场生产中混浇过程的钢水成分、固液相线温度、中心固相率、混钢比例进行预报，并可对混浇坯进行判定。

2.5. 连铸坯表层夹杂物控制技术

本技术首先展开了铸坯夹杂物遗传性的研究，弄清了一定压缩比情况下轧材表面及表层夹杂物的来源，来自铸坯内的夹杂物的具体部位（图9），对结晶器流场、电磁搅拌器位置及参数进行优化研究，确定了相应的合理工艺（图10）。

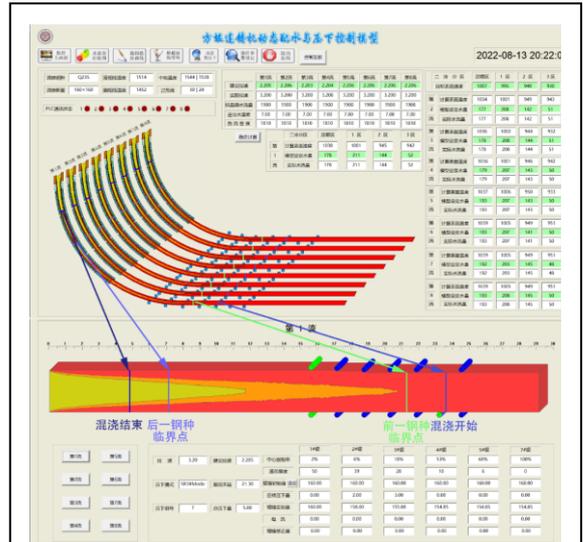


图8 异钢种连浇过程软件主窗口和压下图
Fig. 8 Predicting model for mixing casting of different steel grades

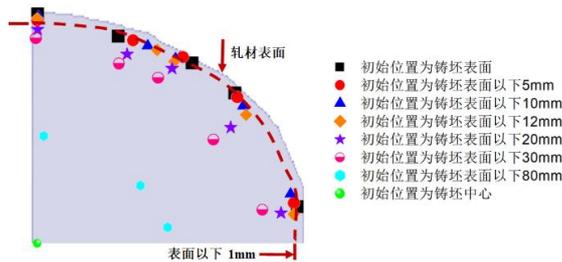


图9 连铸坯典型位置处夹杂物在Φ80mm轴承钢棒材上的分布
Fig. 9 Position evaluation of inclusions in billet during hot-rolling process

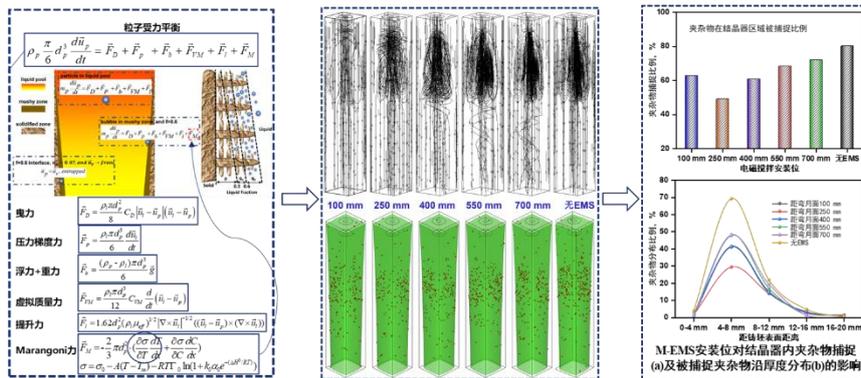


图10 基于连铸坯表层洁净度提升的结晶器电磁搅拌优化
Fig. 10 Optimization for in-mold electromagnetic string

3. 结论

（1）揭示了不同钢种、工艺下铸坯凝固组织（二次枝晶间距）与温度梯度、凝固速率间的定量关系，开发了基于凝固组织控制或目标温度的连铸动态二冷技术，实现了不同拉速、过热度情况下凝固组织稳定控制，解决了铸坯中心偏析、中心疏松及中心缩孔控制不稳定的难题；

（2）开发了碳钢单辊或双辊压下、合金钢多辊压上等分钢类的压下技术，结合轧制压缩比确定了铸坯压下裂纹的容忍度，最大限度的改善铸坯中心偏析；

（3）设计出以低熔点重金属（铅）为示踪剂的连铸坯凝固终点测定方法，结合仿真计算确定了示踪剂的沉降时间以及铸坯的相对位移，并对示踪剂位置进行修正。首次在 180mm² 方坯连铸机上获得应用；

（4）开发了铸坯表层夹杂物控制技术，根据轧制压缩比确定铸坯夹杂物的遗传规律，找出不同轧制压缩比条件下轧材表面 1mm 对应的连铸坯壳厚度，通过优化结晶器流场、电磁搅拌位置及参数来控制铸坯该部位的夹杂物；

（5）开发了方坯动态配水及压下在线软件，建立了完整的数据库，实现了自动控制和离线仿真。