

小方坯连铸“精准控重”的关键因素与优化方案——如何减少钢材浪费？

Key Factors and Optimization Strategies for Precise Weight Control in Billet Casting: Reducing Steel Waste in Continuous Casting

供稿|谭杜 / TAN Du

内
容
导
读

在钢铁连铸生产中，小方坯的精准质量控制直接影响着轧钢成材率，但高速铸造时钢坯质量常受多种因素影响。为破解这一难题，本研究从生产一线的四大痛点入手：结晶器通钢量波动、中间包温度变化、拉速波动及铸坯脱方，提出系统性解决方案。通过工业现场改善（二冷区加装侧支撑辊矫正变形）、速度分级管理（制定连浇炉拉速标准）、测量黑科技升级（编码器+辅助测量辊实现 ± 2.8 kg 精度突破），以及AI预测模型（基于10万组数据训练定长算法），成功将钢坯质量合格率从48.86%提升至85%。这些改进让每支钢坯的“体重偏差”平均减少15 kg，相当于每年为企业减少近千吨钢材浪费，真正实现了“斤斤计较”的智慧铸造。

铸坯质量稳定，能减少轧钢尾尺长度，提高成材率，但在连铸生产过程中，因铸坯切割方式不同，各流次铸坯的长度、质量存在明显差异。同时铸坯在不同拉速、结晶器通钢量、中间包温度条件下，质量也会发生变化，从而使轧制时成材率产生波动。为提高成材率^[1]，轧制过程中会对负公差进行调整，但在调整的同时又对成品质量的稳定造成了较大的影响，故对影响铸坯质量的因素进行研究，并提出相应的控制措施具有重要意义。

铸坯定重的影响因素

结晶器通钢量

对于连铸而言，结晶器是连铸设备中最关键的部件，是连铸机的“心脏”。钢水在结晶器内凝固收缩形成具有一定坯壳厚度的铸坯，同时随着结晶器通钢量的增加及铜管磨损，铸坯的实际断面发生变化，将直接影响铸坯的单位长度质量。

在铸坯断面尺寸测量过程中发现^[2]，取相同生产条件下的铸坯，会出现单流次铸坯的断面比其他流

次断面尺寸偏差大的情况。经现场生产工艺调查发现,在同等条件下,结晶器铜管通钢量较高时对应的断面尺寸普遍大于通钢量较低时对应的断面尺寸,相关统计数据见表1。随着铜管通钢量提高,铜管内壁难免存在磨损,铜管倒锥度也会因此发生改变,单支铸坯与内部控制标准铸坯质量(2226 kg)差值可达到27 kg。相关结晶器热流研究表明,结晶

器的热传递过程中气隙热阻最大,占总热阻的70%,结晶器设计为上大下小结构以减小下部的气隙厚度,若结晶器的铜管锥度发生变化,气隙增大,铸坯冷却不足,导致初生坯壳厚度降低,同时在钢水静压力作用下,坯壳薄的位置发生鼓肚,从而导致铸坯断面(见图1)高度或宽度的尺寸发生变化,导致铸坯实际单位长度质量与标准铸坯偏差较大。

表1 不同铜管通钢量与铸坯截面统计

通钢量/t	铸坯质量/kg	断面尺寸/mm		通钢量/t	铸坯质量/kg	断面尺寸/mm		通钢量/t	铸坯质量/kg	断面尺寸/mm		通钢量/t	铸坯质量/kg	断面尺寸/mm	
		高度, H	宽度, W			高度, H	宽度, W			高度, H	宽度, W			高度, H	宽度, W
7795	2250	157	157	6153	2248	159	155	5652	2250	156	157	2262	2230	155	156
7752	2253	158	156	6031	2251	158	156	4961	2247	157	155	1683	2227	155	155
7701	2247	156	157	5828	2245	157	156	4446	2246	157	155	1352	2226	155	155
7662	2251	157	156	5739	2245	156	157	3311	2247	157	156	1176	2226	155	155
6268	2246	157	155	5739	2247	156	157	2283	2230	156	155	229	2227	155	155

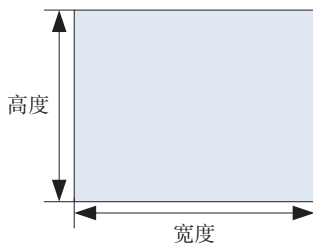


图1 方坯界面示意图

钢水过热度每上升10℃,出结晶器的坯壳厚度约减少3%,而当坯壳厚度不足以支撑钢水静压力时,铸坯发生鼓肚,断面随之发生变化,质量变重。如表2所示,以中间包钢水过热度(中间包温度与钢水液相线温度1505℃的差值)为例,若拉速不发生变化,钢水过热度大于20℃与过热度低于10℃生产的铸坯质量对比,过热度较高时生产的铸坯质量差明显大于过热度较低时生产的铸坯,其中钢水过热度大于20℃生产的铸坯的质量与标准铸坯(2226 kg)的质量差值多数可达10 kg以上。

中间包钢水温度及拉速

铸坯的质量波动与中间包钢水温度息息相关,

表2 拉速为4.22 m/min时温度与铸坯质量关系表

中包温度/℃	过热度/℃	实际铸坯质量/kg	实际铸坯质量均值/kg	质量差*/kg
1513	8	2226.0	2226.0	0.0
1514	9	2226.0、2225.0	2225.5	-0.5
1516	11	2227.0	2227.0	1.0
1517	12	2225.0、2227.0、	2226.0	0.0
1518	13	2224.0	2224.0	-2.0
1529	24	2235.0、2237.0	2236.0	10.0
1530	25	2236.0、2236.0、2238.0、2236.0	2236.5	10.5
1531	26	2238.0、2236.0	2237.0	11.0
1532	27	2237.0、2234.0、2238.0	2236.3	10.3

注: *为实际铸坯质量均值与标准铸坯质量的差值。

表3所示为中包温度1517℃,过热度12℃时拉速与铸坯质量的关系。当需要下调拉速时,拉速每下降0.1 m/min,对应铸坯质量减轻0.97 kg。

铸坯脱方

脱方是连铸过程中难以避免的一大问题^[3],尤其是在高拉速小方坯中,因为铸坯形状、尺寸发生变

表 3 拉速与铸坯质量关系表

拉速/(m/min)	实际铸坯质量均值/kg	质量差*/kg
4.22	2226.0	0
2.21	2206.7	-19.3

注：*为实际铸坯质量均值与标准铸坯（2226 kg）质量的差值

化，铸坯质量也随之发生变化。故在铸坯的定重切割中，尤其是铸坯的间断性脱方，会导致铸坯质量的波动性增大，难以通过调整切割长度满足铸坯定重标准，正常铸坯断面与脱方铸坯断面示意图如图 2 所示。

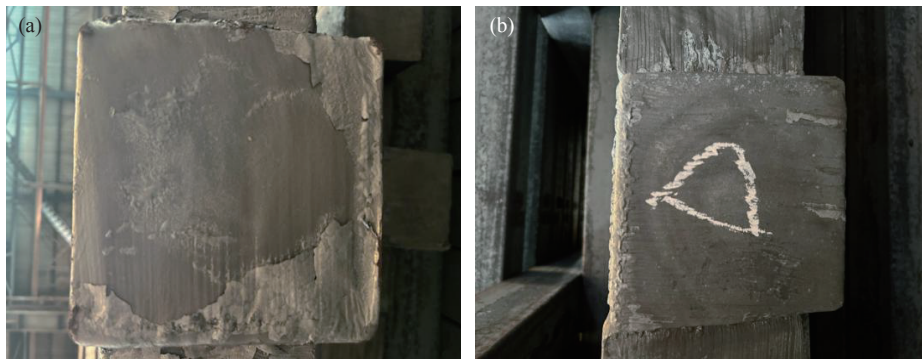


图 2 铸坯断面: (a) 正常铸坯; (b) 脱方铸坯

切割精度

红外定尺采用红外摄像机采集图像信息，通过图像处理实现对铸坯位置跟踪，可准确定位铸坯位置并通过可编程逻辑控制器（PLC）控制火切机进行切割。在以往定尺切割模式下，红外定尺可满足生产需求，但是在铸坯定重切割模式下，红外定尺存在一定的缺陷。红外定尺精度为 0~15 mm，最大可导致单支铸坯波动约 2.8 kg，且由于红外定尺系统通过摄像机识别铸坯的现场位置，现场环境会对铸坯画面的识别产生一定影响，导致红外定尺切割误差增大。

铸坯定重优化措施

稳定铸坯断面

铸机拉速快，铸坯在凝固过程中受到不均匀冷

却及钢水的不均匀冲刷作用，致使坯壳收缩不均匀，厚坯壳收缩量大，薄坯壳收缩量小，从而造成铸坯脱方。而脱方导致实际铸坯断面发生变化，当定尺长度一致时，实际质量将会发生变化，此时通过定尺调整也难以对铸坯定重进行调整，故通过在二区增加侧面支撑辊（见图 3），解决铸坯脱方问题，从而实现定重的稳定。

制定铸机定重拉速制度

不同拉速下的铸坯质量发生明显变化，波动范围在 6~15 kg，造成调整困难或调整滞后，故通过制定开浇炉、连浇炉拉速标准（见表 4），减少因拉速波动，造成铸坯质量发生变化。

协调上一级精炼工序保证钢水温度的稳定，依

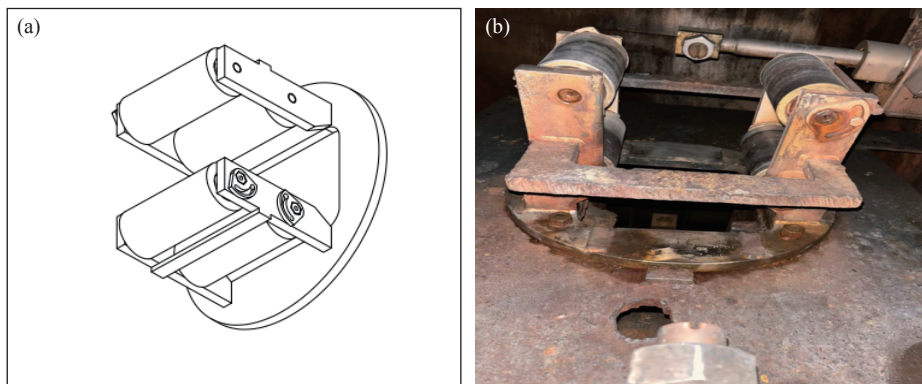


图 3 侧支撑辊: (a) 三维示意图; (b) 现场安装图

表 4 铸机连浇炉拉速标准

炉次	中间包温度/℃	拉速/(m/min)
第一炉	[1550, 1565]	2.5
第二炉	>1540	2.5
	[1531, 1540]	3.5
	<1530	4.1
第三炉及以后	(1514, 1519]	4.4
	(1519, 1524]	4.2

据实际生产条件科学、合理的控制工序时间, 保证钢水冶炼周期稳定。

同时规范铸机控速要求, 当系统出现节奏不匹配时, 通过单流或二流次进行控速。减少全线控速时, 铸坯质量发生变化。

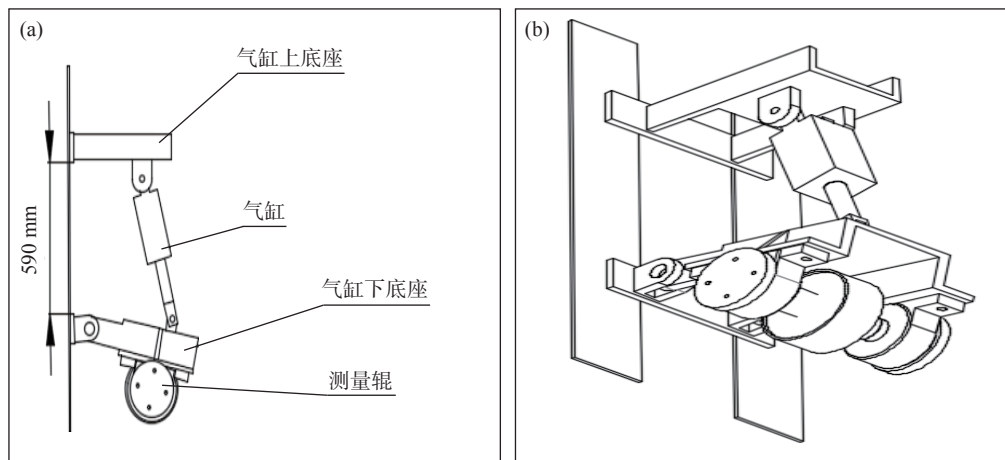


图 4 铸坯测量辊: (a) 正面图; (b) 侧面图

收集编码器与红外定尺切割数据见表 5, 其样本基于 390 组生产数据, 按切割方式拆分, 编码器切割占比 20%, 红外定尺切割占比 80%。编码器切割的重量标准差仅 1.2 kg, 远低于红外定尺的 3.8 kg,

精准控制定尺, 推进测量辊应用

为实现铸坯的精准定重切割^[4], 引入编码器代替红外定尺, 编码器的精度高于红外定尺, 使用编码器能更精准的测量铸坯长度。但编码器安装在夹送辊上使用时, 夹送辊压下后上下抖动造成编码器计数不准, 又因为夹送辊宽度大于铸坯宽度, 使得铸坯与夹送辊的摩擦不均。由于辊面的磨损量不同, 从而造成辊径变化不均, 导致编码器的测量准确度降低, 进而影响铸坯的长度计算, 最终影响铸坯切割质量的精准。因此, 设计一种通过铸坯长辅助测量装置 (见图 4), 在铸坯运行过程中精准测量铸坯的长度^[5], 从而达到精准控制铸坯质量的目的。

说明编码器切割重量离散度更小, 铸坯重量一致性更优; 编码器切割重量合格率达 98.7%, 较红外定尺高 9.3%, 可显著减少因重量超标导致的返工或判废。

表 5 测量辊与红外切割铸坯定重数据对比

切割方式	样本数量/组	平均质量/kg	质量标准差/kg	质量波动范围/kg	质量合格率/%
编码器切割	78	2856	1.2	2831~2880	98.7
红外定尺切割	312	2849	3.8	2765~2923	89.4

利用大数据建立预测学习模型

预测学习模型要求如下:

(1) 连浇炉数 $N \leq 3$ 时, 学习之前浇次与当前炉次拉速、通钢量最接近的 10 支坯的数据; 当前连浇炉数 $N \geq 4$ 时, 学习之前炉次与当前炉次拉速、通钢量最接近的 10 支坯的数据。当学习数据匹配不到

当前炉次数据时, 则学习前面同钢种同规格浇次与当前炉次工艺参数时间上最接近的 10 支坯的数据^[6]。

(2) 学习数据为不同拉速和通钢量下, 1 m 铸坯质量影响变化。由图 5 可看出, 随着拉速或通钢量的提高, 铸坯质量在不断增加。其中通钢量在 6000 t 及以上时, 铸坯质量增加不明显。对定尺长度

调整时,可结合铸坯质量与拉速之间的关系,统一转换为定尺长度,从而可实现不同通钢量与拉速下定尺长度调整。

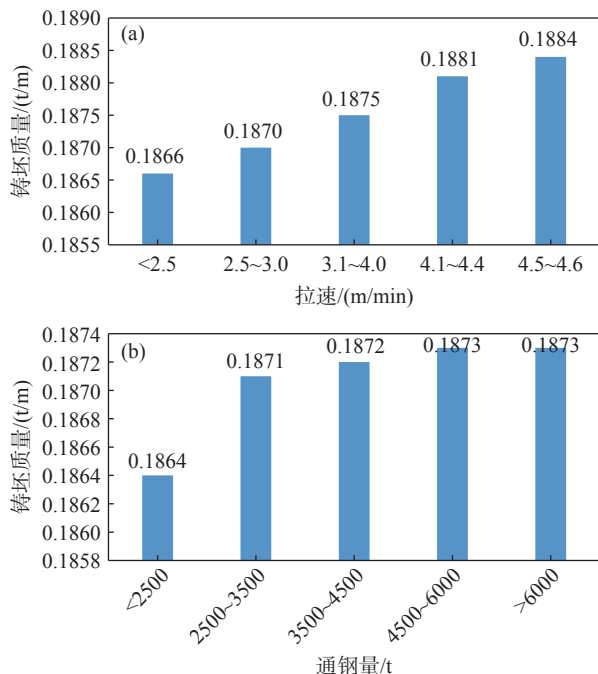


图5 不同因素对铸坯质量的影响: (a) 拉速; (b) 通钢量

(3) 由于学习的铸坯长度数据量较大,为增加可靠性,推送给岗位的预测长度结果为8支铸坯学习数据的平均值。计算平均长度时取10个数据,剔除其中的最大值与最小值后再求平均值。

(4) 通过计算模型按炉推送预测数据,岗位人员可将系统推送的预测长度与铸坯实际生产长度进行对比分析,以此验证该预测模型的计算准确性,同时不断修正模型数据,使之预测与实际相吻合,从而真正实现指导岗位调整,最终实现定尺自动调整。

利用采集的铸坯数据,在定重系统中搭建定重预测模型^[7],该模型可根据铸坯在不同生产情况下的实际铸坯每米质量指导定尺的调整。尤其在生产节奏不稳定时,例如铸机拉速频繁波动,可参考该模

型提供的定尺长度进行调整,以保证铸坯质量处于合格范围内。

通过各项措施的推进:加强铸机精度的维护,设计辅助测量辊以及搭建定重系统平台,铸坯定重合格率由原来48.86%提高至85%,有效提高轧制成材率与定尺率,降低企业生产成本。

结束语

(1) 铸坯定重切割的重点在于连铸机生产拉速的稳定以及铸坯断面的稳定。

(2) 相对于红外定尺系统,测量辊、侧面辊的设计与使用,能够有效提高连铸坯定尺精度。

(3) 通过采集每支铸坯的定重数据,搭建定重系统平台,可直观看出每浇次、每炉的每支铸坯质量变化趋势。

(4) 预测模型实现了铸机拉速大幅变动时,对切割定尺的有效调整提供指导。

参考文献

- [1] 陈志凌. ECR长材连铸连轧生产线连铸过程优化控制的研究[学位论文]. 上海: 上海大学, 2005
- [2] 周从锐, 熊良友, 吴建军, 等. 定重切割技术在小方坯连铸机上的应用. 金属世界, 2022(6): 75
- [3] 李建科, 梁日成, 何杨开. 广西钢铁小方坯脱方成因分析与控制措施. 广西节能, 2021(4): 58
- [4] 陈世超. 基于定尺的连铸机定重优化切割系统的研究. 山东工业技术, 2015(18): 240
- [5] 候锰. 连铸钢坯在线精准定重切割技术的研究//中国计量协会冶金分会2013年会议论文集. 济南, 2013: 67
- [6] 范锦龙. 棒线材连铸-直轧无头轧制技术的研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2011
- [7] Andreatta D. ABS LUNA ECR®连铸连轧厂的工艺及业绩. 钢铁, 2002, 37(8): 44

作者简介: 谭杜(1989—), 男, 湖南湘潭人, 高级工程师。本科学历, 研究方向: 炼钢连铸。通信地址: 广东省阳春市潭水镇南山工业园阳春新钢铁有限公司; E-mail: tandu520@vip.qq.com。