

# 全连铸钢水温度控制技术的研究

冯远超

(攀枝花钢铁研究院,四川 攀枝花 617000)

**摘 要:** 通过对攀钢实现全连铸前板坯连铸钢水过程温度变化规律及其影响因素的调查分析,建立了全连铸条件下钢水过程温度控制制度,并根据现场应用效果及存在的问题,对其进行了优化和完善。

**关键词:** 全连铸;板坯;温度制度;优化

**中图分类号:** TF777.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1002-1043(2008)05-0013-04

## Study on liquid steel temperature control technology under the 100 % continuous casting codition

FENG Yuan-chao

(Panzhihua Iron and Steel Research Institute ,Panzhihua 617000 ,China)

**Abstract :** By investigaig in and analyzing on the law of variation of the process temperature of the liquid steel and its influencing factors of the slab continuous caster prior to its being put into commissioning of 100 % continuous casting in PanGang the hot metal process temperature control pattern under the 100 % continuous casting condition has been established. Moreover this schedule has been optimized and improvized in light of the results of application and problems existing on-site.

**Key words :** 100 % continuous casting ;slab ;temperature control pattern ;optimization

随着冶金技术的进步,国内外越来越多的大、中型钢铁厂实现了全连铸生产模式。与模铸工艺或连铸、模铸工艺并存相比,全连铸工艺的生产节奏更加紧凑,要求各工序间的配合及缓冲能力更为严格。全连铸工艺下的系统温度制度是全连铸技术的重要组成部分,稳定、适当的温度-时间控制对于保证钢厂生产顺行和产品质量具有重要的意义。

攀枝花钢铁集团公司(以下简称攀钢)实现全连铸后,由于钢水运输路线长、品种结构复杂、工艺路线多,炼钢系统温度控制的难度增大,因此,为了建立与之相适应的温度控制制度,对全连铸投产前板坯连铸钢水过程温度变化情况及其影响因素进行了系统地跟踪调查和分析,并根据温度控制制度在全连铸条件下的应用效果及存在的问题,对其进行了优化和完善。

### 1 连铸钢水过程温度变化及其影响因素

采用全连铸生产前,攀钢采用模铸、连铸并存的<sup>1</sup>生产模式。实现全连铸后,模铸工艺被淘汰,钢

水运行共有 6 条连铸工艺路线,为了建立与之相适应的温度制度,对实现全连铸前的连铸钢水过程温度变化情况进行了调查分析。

#### 1.1 连铸钢水过程温度变化情况

实现全连铸前,攀钢板坯连铸典型钢种从转炉出钢至浇铸各工序钢水过程温度变化情况见表 1。由表 1 可见,转炉出钢过程温降较大,吹氩过程温降较小,虽然钢包运输过程温降速率较小,在 0.8~1.1 /min 之间,但运输时间较长,所以钢包中钢水输送过程温降也较大。

#### 1.2 影响连铸钢水过程温度的主要因素

由钢水温降情况可见,钢水过程温降主要包括出钢温降、钢水输送过程温降、精炼温降。出钢温降与出钢时间、合金加入量和钢包状况有关;钢水输送过程及精炼温降与工序传搁时间、工序滞留时间及钢包状况等因素有关。因此,过程时间、钢包状况及合金加入情况是过程温度的主要影响因素。

作者简介:冯远超(1977-),男(回族),四川西昌人,攀枝花钢铁研究院,工程师,从事炉外精炼、连铸的研究。

表 1 钢水过程温度变化情况

钢种	炉数	温降/			LF 加热 升温/	温度变化速度/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ )					
		转炉出钢	吹氩	钢包运输		LF	RH	LF	中包	RH 过程	RH
IF	30	30 ~ 60	10 ~ 20	0.6 ~ 1.5	2.0 ~ 5.0	0.5 ~ 2.0			0.7 ~ 1.0	2.0 ~ 6.0	
		48	16	1.1	3.8	1.1			0.8	4.0	
P510L	80	30 ~ 60	10 ~ 25	0.6 ~ 1.5	2.0 ~ 4.0			2.0 ~ 6.0			
		49	15	0.8	2.8			4.3			
Stb32Z	134	20 ~ 50	10 ~ 30	0.5 ~ 1.5	2.0 ~ 5.0			2.0 ~ 6.0			
		36	18	1.0	3.8			4.0			

注:表中横线上的数据为范围值,横线下的数据为平均值。

1.2.1 工序时间的影响

连铸钢水在各工序的过程耗时情况见表 2。

由表 2 可见,连铸钢水过程时间主要分布在氩后至精炼工序的传摘和精炼工序的滞留时间上,最大波动分别为 28~85 min 和 21~79 min;出钢和吹氩过程耗时比较稳定,最大波动范围分别为 4~9 min 和 5~15 min。因此,确保现场生产顺行、尽可能缩短从转炉出钢至连铸的过程耗时是减少钢水过程温度损失的主要措施。

1.2.2 钢包状况的影响

通过对 500 炉现场生产数据的统计分析,攀钢钢包周转周期为 127~262 min,平均 211 min。以 162 炉现场生产数据为样本,统计分析了攀钢钢包烘烤时间与出钢温降之间的关系,如图 1 所示。由图 1 可见,出钢温降随着烘烤时间的增加而降低,因此,强化钢包在线和离线烘烤,使钢包包衬有高而稳定的蓄热对降低出钢过程温降有着重要的作用。

表 2 出钢至浇铸过程时间统计表

钢种	炉数	过程时间/min								
		出钢	吹氩	氩后 LF	LF	LF RH	RH	RH(LF)	中包	
IF	30	4~9	5~15	26~75	19~53	4~28	28~55	—	2~23	
		5	10	41	34	12	40		9	
P510L	80	4~8	4~10	20~71	11~52	—	—	—	3~19	
		5	6	46	31				11	
Stb32Z	134	4~9	8~18	28~85	21~79	—	—	—	2~25	
		6	11	58	47				13	

注:表中横线上的数据为范围值,横线下的数据为平均值。

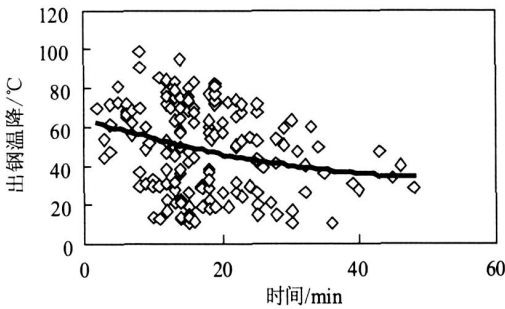


图 1 钢包烘烤时间与出钢温降的关系

钢包使用次数是影响钢水过程温降的主要因素之一,钢包包衬的吸热状况和保温性能直接影响钢水过程温降情况,以 50 炉重轨钢 U75V 的现场生产数据为样本,分析了钢包使用次数与钢水过程温降之间的关系,如图 2 所示。由图 2 可见,钢包使用前期和后期,钢水过程温降较大;钢包使用中期,钢水过程温降较小。因为钢包在使用初期,包衬吸收热量较大,增加了钢水的热量损失,降低了

钢水温度;而钢包在使用后期,包衬耐火材料侵蚀较严重,保温性能降低,加快了钢水与包壁的传热速度,增加了钢水热量损失,降低了钢水温度。

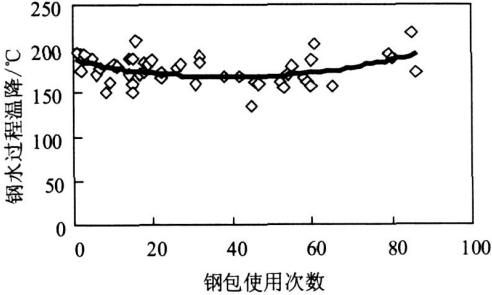


图 2 钢包使用次数与钢水过程温降的关系

1.2.3 合金的影响

在出钢过程中加入脱氧合金会对出钢温降产生影响。合金加入钢水后首先是吸热升高温度,然后熔化、溶解或发生相变,此外,合金元素还要与钢中 O 及渣中 FeO 等发生化学反应。所以合

金在钢水中吸收和放出的热量包括物理热和化学热<sup>[1]</sup>。

在保证红包出钢,出钢时间波动不大的情况下,脱氧合金种类及加入量对出钢温降的影响程度不同,例如 Fe-Mn 和 Si-Mn 合金的加入会增加

出钢温降,Fe-Si、Al-Mn-Fe、V-Fe 和 Si-Ca-Ba 的加入会减少出钢温降,如表 3 所示,根据钢种不同,加入合金的种类和加入量也不同,超低碳钢和低碳钢合金加入较少,出钢温降较小;低合金钢合金加入较多,出钢温降较大。

表 3 脱氧合金对出钢温降的影响

钢种	炉数	出钢温降/	合金加入量/(kg t <sup>-1</sup> )					
			Fe-Mn	Si-Mn	Fe-Si	Al-Mn-Fe	V-Fe	Si-Ca-Ba
超低碳钢	26	32~66(45)	2.52	—	—	—	—	—
低合金钢	56	41~68(51)	—	12.32	5.07	8.76	0.84	—
低碳钢	99	31~63(40)	0.40	—	—	8.57	—	—

注:表中括号内数据为平均值。

2 全连铸钢水温度制度的建立

方坯连铸钢水温度制度的建立方法是先确定中包浇铸温度,再根据各工序过程温降情况反推前工序的温度控制范围。中包浇铸温度等于各钢种的液相线温度加上钢液过热度,即:  $t_{\text{液}} = t_{\text{液}} + t_0$ 。

液相线温度是根据各钢种的化学成分计算的,计算公式如式(1)<sup>[2]</sup>:

$t_{\text{液}} = 1536.6 - 100 X \times w_c - 100 Y \times w_{\text{合金}}$  (1)

式(1)中,X、Y 为合金影响系数,X、Y 的值根据钢种碳含量和合金含量而定。

钢水过热度主要是根据经验确定,  $t_0$  值的大小与钢种、中间包状况、铸坯断面及浇铸速度等因素有关。

确定了合理的中包浇铸温度后,根据钢水过程温降情况确定前工序的温度控制范围,例如转炉出钢温度等于中包浇铸温度与过程温降之和,即:

$t_{\text{出}} = t_{\text{液}} + t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$  (2)

式(2)中,  $t_1$  为出钢过程温降, , 主要与出钢时间、钢包状况、加入合金种类和数量等因素有关;

$t_2$  为炉后吹氩温降, , 主要与吹氩时间、氩气流量及喂丝情况等有关;

$t_3$  为氩后至精炼钢包运输过程温降, , 主要与运输时间、钢包状况等因素有关;

$t_4$  为精炼工序温降, , 主要与精炼时间、合金及渣料加入情况、真空处理情况等因素有关;

$t_5$  为精炼出站至钢水浇入中间包温降, ,

主要与钢包吊运时间、中间包烘烤温度及保温剂性能等因素有关。

由此确定了方坯连铸钢水温度控制范围,建立了全连铸钢水过程温度制度。1 号板坯连铸机钢水过程温度制度的建立主要以实现全连铸前钢水过程温度变化情况调查分析为基础,2 号板坯连铸机位置与 1 号板坯连铸机相邻近,浇铸的钢种相同,因此,参照 1 号板坯连铸机钢水过程温度变化情况建立了 2 号板坯连铸机钢水过程温度制度。

3 全连铸钢水温度制度的应用效果

实现全连铸后,考察了全连铸条件下典型钢种中包钢水温度制度的应用效果,见表 4 所示。由表 4 可见,中包钢水温度控制命中率较低:板坯连铸中包钢水温度命中率为 77 % ~ 93 %;方坯连铸中包钢水温度命中率为 60 % ~ 70 %。中包钢水温度偏高是导致命中率偏低的主要原因。

表 4 连铸中包钢水温度控制情况

铸机	钢种	炉数	中包温度命中率/ %	中包温度偏高的炉次比例/ %
板坯	IF	30	90	8
	P510L	70	77	22
	Stb32Z	152	93	6
方坯	Q235 - B	40	70	30
	U75V	82	60	40

为了进一步分析中包钢水温度偏高的原因,统计分析了实现全连铸前后钢水过程时间对比情况,如表 5 所示。由表 5 可见,实现全连铸后钢水过程耗时减少,其中各工序间钢水输送过程平均耗时最多减少了 22 min,精炼工序减少了 10 min。

表 5 实现全连铸前后连铸钢水过程时间对比

钢种	炉数	过程时间/ min									
		氩后 LF		LF 工序		LF RH		RH 工序		RH(LF) 中包	
		投产前	投产后	投产前	投产后	投产前	投产后	投产前	投产后	投产前	投产后
IF	30	26~75	14~69	19~53	15~61	4~28	2~25	28~55	24~50	2~23	1~21
		41	32	34	30	12	8	40	35	9	7
P510L	70	20~71	18~69	11~52	12~49	-	-	-	-	3~19	2~17
		46	42	31	29	-	-	-	-	11	8
Stb32Z	152	28~85	18~67	21~79	15~78	-	-	-	-	2~25	2~21
		58	36	47	37	-	-	-	-	13	10

注:表中横线上数据为范围值,横线下数据为平均值。

由此可见,与实现全连铸之前相比,全连铸条件下的生产运行节奏加快后,缩短了钢水过程时间,减少了钢水过程温度损失,增加了中包钢水温度偏高的炉次,降低了中包温度的命中率。因此,实现全连铸前建立的钢水过程温度制度已不适应全连铸后的生产,应进行优化与改进。

4 全连铸钢水温度制度的完善

根据全连铸生产运行节奏的要求,结合对全连铸投产初期钢水温度制度应用效果的分析,通过调整钢水过程温度控制范围,优化和完善了钢水温度制度。优化后,IF 板坯钢、P510L、Stb32Z 及方坯 Q235-B、U75V 钢的温度制度的应用效果见表 6。

由表 6 可见,钢水过程温度制度完善后,IF 板坯钢、P510L、Stb32Z 钢中包温度命中率分别提高了 1 %、15 %和 6 %;方坯 U75V 和 Q235-B 钢中包温度命中率分别提高了 25 %和 23 %。

表 6 优化后连铸中包钢水温度控制情况

铸机	钢种	炉数	中包温度命中率/ %
板坯	IF	32	91
	P510L	83	92
	Stb32Z	125	99
方坯	Q235 - B	42	93
	U75V	152	85

在连铸过程中,钢液的过热度对铸坯的内部质量具有至关重要的作用,过热度过低会影响浇铸的顺利进行;过热度过高会恶化铸坯的内部质量<sup>[3]</sup>。因此,为了考察温度制度优化前后对铸坯质量的影响,统计分析了部分铸坯硫印、低倍检验结果对比情况,见表 7~8。由表 7~8 可见,钢水过程温度制度优化和完善后,P510L 钢板坯中心偏析不大于 1.0 级的比例提高了 20 %,Stb32Z 板坯中心偏析不大于 1.0 级的比例提高了 3 %;U75V、U71Mn 钢方坯中心偏析和中心疏松不大于 1.0 级的比例分别提高了 56 %和 51 %。

表 7 部分钢种连铸板坯硫印和低倍检验结果对比

钢种	2004 年 2 月 - 4 月				2004 年 8 - 10 月			
	块数	中包钢水温 度合格率/ %	中心偏析		块数	中包钢水温 度合格率/ %	中心偏析	
			评级	1.0 级者/ %			评级	1.0 级者/ %
P510L	10	77	0.5 ~ 1.5	80	10	92	0.5 ~ 1.0	100
Stb32Z	25	93	0.5 ~ 1.5	92	34	99	0.5 ~ 1.5	95

表 8 部分钢种连铸大方坯硫印和低倍检验结果对比

钢 种	块数	中包钢水 温度合格率/ %	2003 年 10~11 月 中心偏析		中心疏松	
			评级	1.0 级者/ %	评级	1.0 级者/ %
			评级	1.0 级者/ %	评级	1.0 级者/ %
U75A、U71M	88	60	0.5~2.0	41	0.5~2.0	28
Q235-B	18	70	0.5~1.0	100	0.5~1.0	100
钢 种	块数	中包钢水 温度合格率/ %	2003 年 12 月~2004 年 8 月 中心偏析		中心疏松	
			评级	1.0 级者/ %	评级	1.0 级者/ %
			评级	1.0 级者/ %	评级	1.0 级者/ %
U75A、U71M	111	85	0.5~2.0	97	0.5~2.0	79
Q235-B	22	93	0.5~1.0	100	0.5~1.0	100

(下转第 22 页)

动<sup>[6]</sup>,导致夹杂物中 CaS 含量增加。

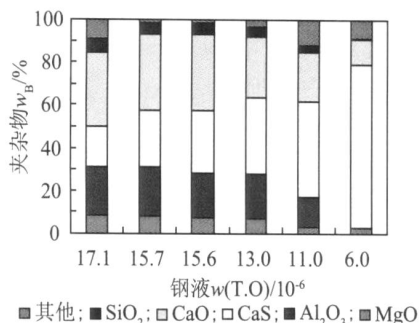


图 4 钢液 T.O 与夹杂物组成之间的关系

### 3 结 论

(1) 采用高碱度、高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  炉渣精炼的 Al 脱氧弹簧钢中的夹杂物的变化过程为  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  尖晶石  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{MgO}$  类复合夹杂  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{CaS}$  类复合夹杂。

(2) 炉渣中  $\text{CaO} / \text{MgO}$  高的炉次,夹杂物转变为液态铝酸钙夹杂的速度较快,有利于夹杂物的尽快上浮。炉渣  $w(\text{CaO}) / w(\text{MgO})$  为 19.67 时,在 LF 冶炼中期,大部分夹杂物已经转变为  $w(\text{MgO}) < 10\%$  的液态夹杂。

(3) 炉渣的氧化性减缓了夹杂物向液态转变,LF 精炼结束,当炉渣  $w(\text{FeO} + \text{MnO})$  降低到 1.0 以下时,夹杂物逐渐转变为  $w(\text{CaO}) / w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  接近于 1 的铝酸钙夹杂。

(4) 钢中 Al 和 S 低的炉次,在精炼结束时,  $\text{CaS} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{CaO}$  类复合夹杂物的熔点较低,在钢

加工过程中容易发生微小变形,因此能够减小夹杂物对钢的危害。

(5) 随着钢液 T.O 的降低,夹杂物中氧化物夹杂所占比例逐渐减小,  $\text{CaS}$  夹杂所占比例逐渐增加,当钢液  $w(\text{T.O})$  降低到  $6 \times 10^{-6}$  时,夹杂物中  $\text{CaS}$  质量分数已经达到 76.29 %。

#### [参 考 文 献]

- [1] 蒋国昌,郑少波,张晓兵,等. 钢铁冶金及材料制备新技术 [M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] Hidekazu TODOROKI, Kenji MIZUNO. Effect of silica in slag on inclusion compositions in 304 stainless steel deoxidized with aluminum [J]. ISIJ International, 2004, 44 (8): 1350-1357.
- [3] Lauri Holappa, Matti Liukkonen, Minna Lind, et al. Thermodynamic examination on inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified steel [C]// Proceedings of Sixth International Conference on Clean Steel. Balatonfured, Hungary: 116-125.
- [4] R Story, J Piccone, Richard J Fruehan, et al. Inclusion analysis to predict casting behavior [J]. Iron and Steel Technology, 2004, (9): 163-169.
- [5] Shiro BAN- YA, Makoto HOB0, Tetsuro KAJI, et al. Sulphide capacity and sulphur solubility in  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{CaF}_2$  slags [J]. ISIJ International, 2004, 44 (11): 1810-1816.
- [6] L Holappa, M Liukkonen, M Lind, et al. Thermodynamic examination of inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified steel [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2003, 30 (2): 111-115.

(修回日期: 2007-12-17)

(上接第 16 页)

由此可见,连铸钢水过程温度制度完善后,在很大程度上提高了钢水过程温度控制的命中率,改善了铸坯中心偏析、中心疏松等内部质量,为确保攀钢连铸重点品种的质量稳定和全连铸生产的顺利进行提供了重要的技术支撑。

### 5 结 论

(1) 缩短从转炉出钢至连铸的过程耗时,强化钢包在线和离线烘烤,保证红包出钢,加快钢包热周转等措施对减少钢水过程温降、稳定生产节奏有重要的意义。

(2) 在温降情况调查及理论计算的基础上,制定了全连铸条件下的钢水温度制度,使方、板坯连铸钢水温度控制命中率分别达到 60 % ~ 70 % 和

77 % ~ 93 %,基本满足全连铸生产顺行的需要。

(3) 生产节奏加快,工序传搁时间缩短是钢水温度控制命中率偏低的主要原因,通过优化完善全连铸钢水温度制度,方、板坯连铸钢水温度控制命中率分别达到 85 % 和 91 % 以上,铸坯内部质量得到明显提高,为攀钢全连铸生产顺行及品种质量稳定提供了重要的技术保障。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王舒黎,韩海鸥. 炼钢脱氧合金化剂和喷吹剂的热效应 [J]. 炼钢, 1985, (2): 20-26.
- [2] 袁方明. 钙元素对钢液相线温度的影响 [J]. 特殊钢, 2006, (3): 32-34.
- [3] 白素宏. 连铸机中间包温度的控制 [J]. 河北冶金, 2005, (6): 44-46.

(修回日期: 2007-11-23)