

1 900 mm 板坯连铸黏结现象减少措施实践

张明海,赵建平,王 帅,唐广鹏,刘 鑫

(河钢集团 唐钢公司,河北 唐山 063016)

摘 要:对 1 900 mm 板坯连铸黏结现象形成的原因进行了分析。结果表明,造成黏结的主要原因是初生坯壳与铜板间的保护渣不能起到良好的润滑和传热作用。通过优化保护渣性能、改变结晶器铜板镀层材质、防止结晶器渗水、选择合适的水口浸入深度和水口底部倾角、选择合适的三路氩气流量、规范钢液过热度控制、恒拉速浇注、规范工操作等措施后,1 900 mm 板坯连铸机黏结次数由每月 20 次降至 4 次。

关键词:板坯连铸机;黏结;保护渣;黏结次数

中图分类号:TF777

文献标识码:A

文章编号:1000-8365(2021)04-0315-05

Measures to Reduce Sticking Phenomenon in 1 900 mm Slab Continuous Casting

ZHANG Minghai, ZHAO Jianping, WANG Shuai, TANG Guangpeng, LIU Xin

(Tangshan Iron and Steel Company, Hebei Iron and Steel Group, Tangshan 063016, China)

Abstract: The causes of sticking phenomenon in 1 900 mm slab continuous casting were analyzed. The results show that the main reason of sticking is that the protective slag between the green shell and the copper plate can not play a good lubrication and heat transfer function. Slag by optimizing performance, change the mold copper plate coating material, waterproofing crystallizer, choosing the right at the bottom of the nozzle immersion depth and nozzle angle, choosing appropriate three-way argon flow, standardization of pouring molten steel superheat control, constant speed, standardize the worker operation measures, such as 1 900 mm slab continuous caster sticking number by 20 times down to 4 times a month.

Key words: slab caster; sticking; mould protecting slag; sticking times

唐钢 1 900 mm 板坯连铸机是唐钢区位优势调整的重点建设项目,现已建成两台一机两流的板坯连铸机,该铸机运用了电磁感应下渣检测技术、大容量中间包技术、大包转台机器人技术、保护渣自动加入技术、Dynaphase 3D 动态成分分析模型技术、结晶器液面自动控制技术、结晶器漏钢预报技术、结晶器在线调宽技术、动态轻压下技术、铸坯氢氧切割技术和在线质量判定技术等一系列的新技术,装备优良,该生产线可生产高端汽车板、家电板、建筑用钢和高强海洋用钢等产品,生产质量稳定。然而,在投产初期,铸机频繁发生黏结,每个月黏结次数达 20 次左右,影响了生产稳定,具有黏结漏钢隐患,尽管关于黏结的产生原因,大量的学者进行过研究,通常与结晶器液位波动、保护渣性能不合适、水口设计不合理等有关^[1-2]。但是,不同的设备和工艺条件,黏结的产生原因不同,需采取的措施也不同。本文研究目的是针对唐钢 1 900 mm 板坯连铸

机黏结的原因制定措施,并加以实施,解决铸机频繁黏结问题。

1 板坯连铸机的主要技术参数

唐钢 1 900 mm 板坯连铸机的主要技术参数如下:铸机类型:直弧型;台/流数:1/2;铸机断面:(900~1 900)×(230 或 250) mm;拉速:0.8~1.8 m/min;铸机半径:9 500 mm;结晶器长度:900 mm;扇形段数量:14;冶金长度:35 300 mm;二冷系统:气水雾化冷却系统。

2 黏结形成机制

拉坯过程中,在结晶器内,拉坯力必须克服凝固的初生坯壳与结晶器铜板之间的摩擦力,由于某种原因,流入坯壳与结晶器铜板间的液渣被阻断,导致坯壳直接与结晶器壁接触。当坯壳受到的摩擦力大于拉坯力,形成的初生坯壳会被撕裂,就会与结晶器铜板产生黏结现象。发生黏结后,典型的坯壳形貌如图 1 所示,可见在拉坯力的作用下,钢壳撕裂,钢液沿着撕裂处渗出,重新凝固成新的坯壳,裂口呈现倒三角状,角度一般为 80~120°,宽边中央的黏结破断源可扩展到窄边,甚至到另一个宽边,此时,若不

收稿日期:2021-02-22

作者简介:张明海(1971—),河北张家口人,硕士,高级工程师,主要从事洁净钢生产工艺方面的工作。



图1 黏结坯表面形貌

Fig.1 Morphology of slab with sticking surface

能及时停止拉坯,坯壳在摩擦力和拉坯力的作用下,新形成的坯壳又被拉断,钢液补充后又形成一个新的坯壳。这一过程反复进行,直到新坯壳到达结晶器下口时,就发生了黏结漏钢事故^[3]。

黏结形成的根本原因是保护渣不能起到良好的润滑和传热作用。其影响因素主要有保护渣性能不合适、结晶器液面波动、拉速波动、结晶器流场不合理、捞渣操作不规范等^[4-6]。对于1900 mm板坯连铸机,导致其投产初期频繁黏结的因素主要:①保护渣性能不满足生产需要,由于保护渣碱度、熔点、黏度等理化指标设计的不合理导致黏结,约占黏结总数的57%;②结晶器质量不达标,频繁发生镀层脱离、铜板压铁渗水,影响保护渣流入,并且结晶器热电偶经常发生损坏,产生假报警,由于结晶器原因产生的黏结,约占黏结总数的21%。③结晶器流场原因,如水口不对中、氩气流量设定不合理等,由该类原因产生的黏结约占黏结总数的7%。④操作不合理等其它原因导致的黏结,约占黏结总数的14%。

3 控制措施

3.1 选择合适的保护渣

保护渣对生产过程中黏结的控制起着至关重要的作用。一方面,保护渣融化后形成的液渣填充在坯壳与结晶器铜板间形成了渣膜,起到润滑作用有利于脱模。另一方面,液渣填充气隙,有利于控制传热,使坯壳均匀生长。如果液渣不能及时渗入,会导致坯壳与结晶器铜板间摩擦力增大,气隙增加,热阻增大,坯壳变薄且生长不均,在结晶器内钢液静压力的作用下,容易发生黏结^[7-9]。保护渣对润滑和传热的控制,主要体现在两个方面:一是保护渣的流入均匀性,二是保护渣的渣膜结构。保护渣在坯壳与结晶器铜板间流入不均,会直接导致结晶器传热不均匀,要使保护渣流入均匀,必须保证保护渣有合适的渣耗,渣耗的回归方程式见公式(1)^[10]。

$$Q=0.74(1/A0.3) \cdot (60/f) \cdot (\mu v^2)^{0.5+0.17} \quad (1)$$

式中, Q 为保护渣的消耗量, Kg/m^2 ; A 为振幅, mm ; f

为频率,次/min; μ 为液态渣膜黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; v 为拉速, m/min ;由此可见,渣耗的多少与振幅、频率、保护渣黏度、拉速、浇注温度以及钢种等因素有关。振频、拉速以及保护渣黏度减小,保护渣的耗量增加。另外,渣条过大或结晶器液面波动,也不利于保护渣均匀流入。所以生产过程中,首先要选择合适黏度的保护渣,另外为保证渣耗,振幅和频率控制也不能过大;其次应尽量避免结晶器液位波动,以确保保护渣均匀流入。

保护渣渣膜结构对传热控制影响如下:晶体质固态渣膜结构,内部的空隙较多,热阻较大,有利于减小热流密度,反之会增加热流密度。另外,渣膜结构还决定着结晶器内摩擦力的大小,影响润滑效果。浇注过程中,当结晶器与坯壳相对运动时,在液态保护渣层内产生的摩擦力为液态摩擦力(F_1),结晶器与固态渣膜之间产生的摩擦力为固态摩擦力(F_2)。拉坯时,铸坯在结晶器内受到的摩擦力 F 等于 F_1 和 F_2 两者之和。有关研究表明,在结晶器弯月面部位主要是 F_1 决定这润滑作用,而 F_1 的理论计算公式见公式2^[10]。

$$F_1=\mu(v_m-v_c)/d_1 \quad (2)$$

式中, v_m 为结晶器的运动速度, m/min ; v_c 为铸机拉速, m/min ; μ 为液态渣膜黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; d_1 为液态渣膜厚度, mm 。从公式2可以看出,适当减小 μ 、 v_m 或增大 v_c 、 d_1 ,可减小 F_1 ,有助于减小摩擦力,控制黏结。

唐钢1900 mm板坯连铸机投产初期,使用某品牌的保护渣(保护渣1)浇注时,频繁发生黏结,观察结晶器专家系统发现,使用该保护渣时,摩擦力等量系数在0.55~0.8波动(正常浇注该钢时摩擦力等量系数为0.45~0.6)。图3为浇注该钢时的热相图,图中颜色越深,代表温度越高,颜色越浅,代表温度越低,可见浇注该钢时,热相图温度分布不均,波动较大。图4为结晶器表面热电偶检测的温度曲线,可见热电偶温度第2排和第3排热电偶检测温度常有大幅跳变,与热相图的检测结果一致,说明传热不均匀。对比同等

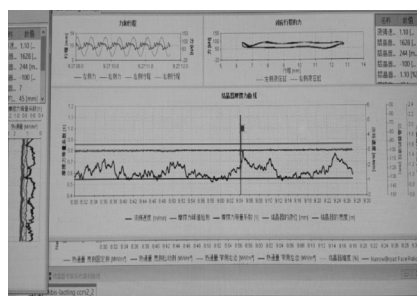


图2 使用保护渣1浇注时摩擦力曲线

Fig.2 Friction curve when pouring with protective slag 1

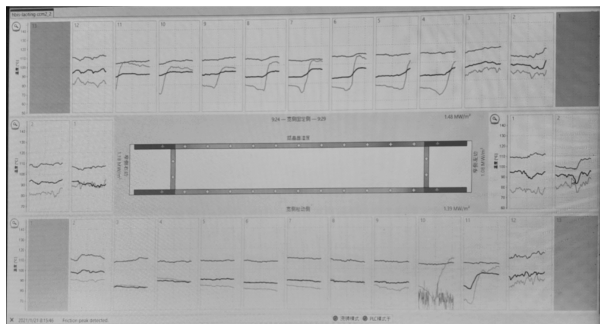


图3 使用保护渣1浇注时热相图

Fig.3 Thermal phase diagram when pouring with protective slag 1

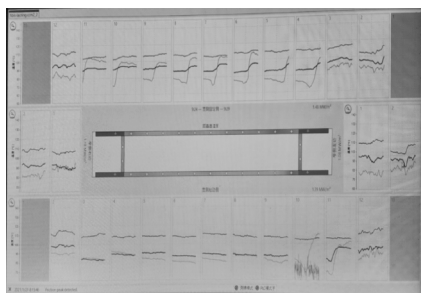
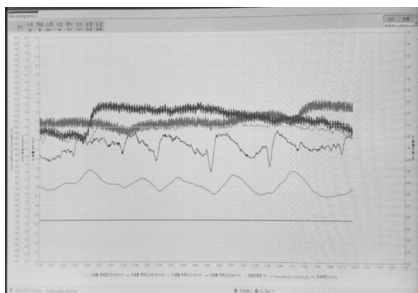
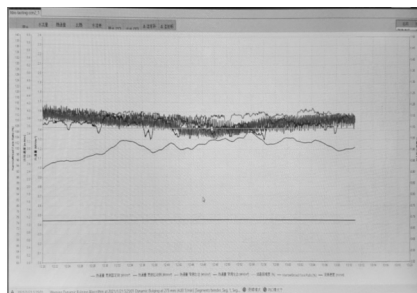


图4 使用保护渣1浇注时热电偶温度曲线

Fig.4 Thermocouple temperature curve when pouring with protective slag 1



(a)保护渣1



(b)保护渣2

图5 使用试验保护渣2浇注时的热流曲线

Fig.5 The heat flow curve when casting with protective slag 2

表2 试验保护渣1的物理性能
Tab.2 Physical index experimental slag 1

	C(固)	比重/(kg/L)	熔融点/℃	熔速/(1 350℃, s)	黏度/(1 300℃, Pa·s)	粒度(0.125~1.00 mm)
调整前	4.14	0.63	1136	21	0.125	>90%
调整后	4.15	0.61	1118	23	0.114	>90%

作用,不利于黏结的控制。同时,如图6所示,保护渣在实际使用过程中容易形成大渣条,主要原因是保护渣生产过程中材料混合不均,形成的大渣条堵塞液渣向下流入通道,这也不利于液渣的均匀流入,也是引发黏结的重要因素。

为控制黏结,对保护渣1进行了调整,如表1、表2所示,将保护渣1的碱度由1.25降至1.21,熔融点由1 136℃降至1 118℃,黏度由0.125 Pa·s降至0.114 Pa·s,以降低摩擦力,提高渣耗,保证润滑效果,同时保护渣生产过程中注意控制材料混合均匀性。保护渣调整后,渣耗由0.35 Kg/t提高至

表1 试验保护渣1的成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of experimental slag 1

	CaO/SiO ₂	SiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	R ₂ O	F
调整前	1.25	25.95	1.14	32.47	0.76	4.25	8.14	8.75
调整后	1.21	26.41	1.23	31.98	0.82	4.34	9.13	8.64

生产条件下(同炉次,相同铸机不同流)使用该保护渣与某黏结控制较好保护渣品牌(保护渣2)热流曲线对比情况,如图5所示,可见使用保护渣1进行浇注时,明显热流波动的更大。以上结果表明,使用保护渣1进行浇注时,液渣对坯壳与结晶器铜板间填充的不好,计算保护渣渣耗,为0.35 Kg/t,渣耗偏低,现场测量液渣层厚度,在4~12 mm,液渣层厚度不均匀,影响了润滑和传热。

保护渣1的化学成分和主要物理指标如表1和表2所示,由于投产初期保护渣的碱度、熔点、黏度设计的过高,导致实际使用过程中,频繁发生黏结。这是由于碱度较高,保护渣的结晶温度提高,有利于结晶器缓冷,但增大了坯壳与结晶器铜板的摩擦力;熔点过高影响了液渣层厚度的保证,不利于保护渣的均匀流入;黏度过高也有减小渣耗,增大摩擦力的



图6 使用保护渣1浇注时形成的渣条

Fig.6 The slag strip formed when pouring with protective slag 1

0.44 kg/t,液渣层测量结果如图7所示,可见调整后,液渣层明显变得均匀,厚度在8~12 mm,使用

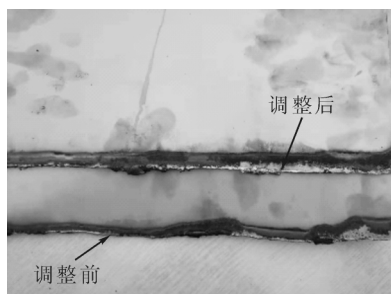


图7 保护渣调整前后液渣层厚度对比

Fig.7 Thickness comparison of slag layer before and after adjustment of protective slag

过程中产生大渣条现象消失,解决了使用保护渣1浇注时频繁黏结问题。

3.2 提高结晶器质量

由于钢液在结晶器内凝固、传热,靠结晶器连接漏钢预报系统判断黏结,因此结晶器质量对结晶器内黏结行为及判断具有重要影响。唐钢1 900 mm板坯连铸机投产初期结晶器的问题主要如下:①结晶器弯月面部位镀层经常磨损、剥落,导致剥落部位的保护渣不能均匀稳定的流入坯壳与结晶器铜板间,容易在该位置引发黏结;②结晶器铜板压铁经常出现渗水现象,主要原因是压铁与结晶器铜板间密封不严,水蒸气预冷凝形成的水透过亚铁与铜板间的缝隙,流入结晶器内,导致结晶器弯月面部位的保护渣潮湿、结块,阻碍液渣的流入,使保护渣流入不均;③结晶器热电偶频繁发生接触不良、检测温度低,影响结晶器专家系统对黏结的判断,多次导致黏结误报。

针对以上问题,采取的措施如下:①改进结晶器铜板镀层结构,由0.1 mm厚,拥有更为优异的耐高温性、更高的硬度和耐磨性的高钴含量的钴镍合金代替原有镀层(0.3 mm厚的高镍含量的镍钴合金),并且改进了铜刻蚀工艺,使镀层的内应力较低,不易脱落;②优化了结晶器维修操作,保证压铁的清亮度,使压铁和结晶器铜板间无间隙,同时确保倒水槽畅通,使凝结产生的水及时排出,解决了结晶器铜板压铁缝隙渗水问题;③对所有热电偶安装孔进行封堵,确保浇注过程中无异物、水蒸气进入热电偶安装孔影响铜板温度检测,同时在结晶器上线前,对所有的热电偶进行检测,对问题的热电偶进行更换,解决了结晶器专家误报警问题。

3.3 优化结晶器流场

结晶器内流场的变化,会影响结晶器液面稳定性、保护渣的化渣情况,因此会影响保护渣在坯壳与结晶器铜板间均匀流入^[11-12]。通常影响结晶器流场因素主要有,水口浸入深度及底部倾角,随着水口浸入

深度的增加以及水口底部倾角的增大,水口出口射流冲击点位置逐渐下移,结晶器液面的波动减弱,因此水口浸入深度和底部倾角过大或过小都不利于黏结的控制,浸入过深或底部倾角多大,影响化渣,反之则影响结晶器液面稳定,都不利于保护渣的均匀流入,唐钢1 900 mm板坯连铸机生产实践表明,水口浸入深度控制在120~180 mm,底部倾角25°时,可保证良好的结晶器流场,利于黏结控制和铸坯质量稳定。

浸入式水口对中 浸入式水口不对中,会形成偏流,影响结晶器流场,甚至会导致钢流直接冲刷坯壳,容易引发黏结,因此在开浇、更换浸入式水口后,要首先检查、调整浸入式水口对中情况。三路氩气流量尤其是塞棒和上水口流量,过大会导致结晶器液面波动,影响保护渣的均匀流入,因此,浇注普通钢种时,塞棒和上水口流量无需过大,保证背压大于0.1 Bar即可。

3.4 规范操作

浇注过程中,操作不合理,往往会造成结晶器液面波动或液渣填充不足,引发黏结,唐钢板坯连铸机生产实践表明,以下操作是导致黏结的重要因素:

(1)温度低时拉速过快 温度低时,影响保护渣的融化性能,形成的液渣层厚度较薄,在过快的拉速下,不足以填充在坯壳与结晶器铜板间起到润滑的作用,导致摩擦力增加,容易引发黏结。因此,保证钢液合适的过热度对黏结的控制非常重要。对于常规板坯连铸机,浇注超低碳钢系列钢,钢液过热度控制在液相线 $TL+(25\sim40)^\circ\text{C}$;浇注低碳钢系列钢、中碳钢系列钢、包晶钢系列钢,钢液过热度控制在液相线 $TL+(20\sim35)^\circ\text{C}$;浇注高碳钢系列钢,钢液过热度控制在液相线 $TL+(15\sim30)^\circ\text{C}$,有利于黏结的控制。另外,当中间包内钢液过热度较低时,应适当调整拉速,防止拉速过快,液渣过薄造成黏结。

(2)拉速波动 当拉速调整过快时,固态的粉渣还未能融化形成稳定的液渣层便进入坯壳与结晶器铜板间,造成液渣层补充不上,产生缺渣,使形成的坯壳过薄或不均,容易引发黏结。因此生产组织节奏要合理,确保恒拉速浇注。

(3)捞渣操作不合理 液渣在结晶器周围会形成渣条,当渣条过大时,会堵塞液渣向下流入通道,容易引发黏结^[13]。因此形成的大渣条必须捞净,但捞渣时必须注意以下几点:第一,温度低时,影响保护渣的熔化,液渣难以持续流入坯壳与结晶器铜板间,因此温度低时不能捞渣;第二,结晶器液面上涨时,捞渣操作会导致固态渣膜断开,钢液直接与结

晶器内壁接触,引发黏结,因此降速、涮杆、降中包车等引起结晶器液面上涨时不能捞渣;第三,捞渣不能过勤,通常渣条厚度在 20 mm 以下时,对液渣的流入不会造成影响,因此渣条厚度超过 20 mm 才能进行捞渣操作。

通过选择合适的保护渣、提高结晶器质量、优化结晶器流场、规范职工操作等措施,有效解决了唐钢 1 900 mm 板坯连铸机频繁黏结问题,黏结次数由投产初期的每月 20 次,降至每月 4 次以内,取得良好的控制效果。

4 结论

(1)造成唐钢 1 900 mm 板坯连铸机投产初期频繁黏结的原因主要是由于保护渣性能不合适、结晶器质量不达标、结晶器流场不合理、职工操作不规范等,使保护渣不能起到良好的润滑的传热效果。

(2)通过优化保护渣性能、改变结晶器镀层材质、防止结晶器压铁渗水、防止热电偶接触不良造成黏结误报、选择合适的水口浸入深度和水口底部倾角、选择合适三路氩气流量、规范钢液过热度控制、恒拉速浇注、规范捞渣操作等措施,使唐钢 1 900 mm 板坯连铸机黏结次数由投产初期的每月 20 次降至每月 4 次以内。

参考文献:

- [1] 李向奎,张丙龙,陈玉鑫.冷轧板表面夹渣缺陷成因及控制[J].中国冶金,2015,25(12):54-58.
- [2] 李建文,高福彬,刘红艳.低碳钢铸坯表面“夹渣”生产控制实践[J].连铸,2015,40(4):65-68.
- [3] 刘曙光,赵建平,王帅,等.中板坯连铸机黏结的原因分析及预防措施[J].连铸,2018,43(3):31-34.
- [4] 何飞.板坯连铸结晶器漏钢预报系统的开发与实践[J].连铸,2015,41(3):68-72.
- [5] 韩立海,姜英,唐作宇.薄板坯连铸的黏结机制分析及控制实践[J].连铸,2014,1(6):7-11.
- [6] 姚云苗,杨国涛,苏本红.板坯连铸机黏结漏钢的原因与预防措施[J].钢铁研究,2010,38(S2):269-272.
- [7] 于海涛.本钢薄板坯连铸 SK85 高碳钢的生产实践[J].连铸,2019,44(1):5-9.
- [8] 孙启浩,文光华,朱先飞,等.保护渣固态渣膜传导及辐射耦合传热特性研究[J].连铸,2017,42(1):35-39.
- [9] 王谦,何生平,任勤,等.连铸保护渣析晶温度的调查[J].钢铁,2004,39(S1):641-644.
- [10] 张菊根,夏文勇.新钢板坯连铸黏结漏钢原因分析[J].江西冶金,2005,25(5):12-14.
- [11] 崔拓.连铸板坯 SS400 钢黏结漏钢攻关实践[J].连铸,2016,41(6):67-71.
- [12] 王帅,赵建平,冯帅,等.热轧板边裂缺陷成因及控制[J].河北冶金,2019,286(10):34-37.
- [13] 赵建平,王帅,冯帅,等.减少唐钢中薄板坯连铸机黏结实践[J].连铸,2020,45(1):74-77.
- [10] 孙有平,周学浩,何江美,等. Mg-4Sn-1Zn 生物镁合金均匀化处理制度研究[J].特种铸造及有色合金,2016,36(11):1126-1128.
- [11] 朱素琴,严红革,刘志文,等.剪切应变对镁合金板材微观组织的影响[C]//第十二届全国青年材料科学技术研讨会论文集.2009:1096-1101.
- [12] Trojanová Z, Lukáč P, Chmelík F, et al. Microstructure changes in ZE41 composite estimated by acoustic measurements [J]. Journal of Alloys and Compound, 2003, 355(1-2): 113-119
- [13] DENG K K, LI J H, NIE K B, et al. High temperature damping behaviors of as-deformed mg matrix influenced by micron and sub-micron SiCp [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 624: 62-70.
- [14] 冯旭辉,孙有平,何江美,等.热处理对大应变轧制 ZK60 镁合金阻尼峰的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1287-1290.
- [15] Xuhui Feng, Youping Sun, Yuwei Lu, et al. Effect of the strain rate on the damping and mechanical properties of a ZK60 magnesium alloy[J]. Materials, 2020, 13(13), 2696.
- [16] 马春江,张荻,覃继宁,等. Mg-Li-Al 合金的力学性能和阻尼性能[J].中国有色金属学报,2000(S1):10-14.
- [17] 刘先兰. Mg-Zn-Nd-Cd-Zr 合金的力学性能和阻尼性能研究[D].长沙:中南大学,2012.

(上接第 314 页)

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章:1 铸铁件均衡凝固与有限补缩;2 铸铁件冒口补缩设计及应用;3 压边浇冒口系统;4 浇注系统大孔出流理论与设计;5 铸件均衡凝固工艺;6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7 浇注系统当冒口补缩设计方法;8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页,特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628