

气膜软接触连铸技术 的基础研究

作者：程常桂
专业：钢铁冶金
导师：邓 康
任忠鸣



上海大学出版社

· 上海 ·

2003 年上海大学博士学位论文

气膜软接触连铸技术的基础研究

作 者： 程常桂
专 业： 钢铁冶金
导 师： 邓 康
任忠鸣

上海大学出版社

• 上海 •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：	丁文江	教授，上海交大材料工程学院	200030
委员：	陈兴章	教授级高工，上海有色金属总公司	200081
	丁伟中	教授，上海大学材料学院	200072
	张晓兵	教授级高工，上海宝钢集团公司	200435
	毛协民	教授，上海大学材料学院	200072
导师：	邓 康	教授，上海大学	200072
	任忠鸣	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

赵 沛	教授, 北京钢铁研究总院	100081
王新华	教授, 北京科技大学冶金学院	100083
陈立亮	教授, 华中科技大学材料学院	430074

评议人名单:

白晨光	教授, 重庆大学材料学院	400044
贾光霖	教授, 东北大学材料冶金学院	110004
韩至成	教授, 北方工业大学经济管理学院	100041
毛协民	教授, 上海大学材料学院	200072

答辩委员会对论文的评语

程常桂同学的博士学位论文“气膜软接触连铸技术的基础研究”在广泛阅读相关文献并总结前人工作的基础上,设计出一种新型的气膜软接触连铸结晶器,对气膜软接触连铸技术进行了较系统的基础研究。其结果对铝合金 DC 连铸技术有重要的借鉴意义和应用前景。该论文的主要贡献如下:

(1) 基于铸坯与结晶器内壁“软接触”的冶金原理,并结合热顶、短结晶器技术,设计出一种新型的气膜软接触连铸结晶器,它具有冷却长度短、传热量低、冷却均匀、润滑性能好等优点,对 1080 工业纯铝、2024 铝合金、6063 铝合金进行实验都取得了非常满意的结果。

(2) 引用气体轴承气膜润滑理论相关知识,并结合气膜软接触连铸工艺的实际条件,首次建立了气膜软接触连铸工艺润滑理论模型,研究了气体流量、拉坯速度、气缝尺寸等工艺参数影响气膜内压力分布的规律,模型计算结果与实验结果吻合。

(3) 研究了气膜软接触连铸工艺稳定进行的必要条件,工艺参数(气体流量、拉坯速度等)影响铝合金连铸坯质量的一般性规律。在合适的工艺参数下,获得了晶粒度为 2~3 级的全等轴晶组织的铸坯,实验现象重复性良好。实验结果和理论计算对气膜软接触连铸工艺的工业化具有重要的指导意义。

程常桂同学的博士论文的实验工作量较大并有一定的难度,其研究内容新颖,具有一定的理论深度,论文文字简洁、论述清楚,并有所创新。程常桂同学在答辩中论述清楚,思路清晰,对所提问题回答正确,说明程常桂同学具有较系统和扎实的理论基础及专门知识,具有从事科研工作能力。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决，全票同意通过程常桂同学的博士学位论文答辩，建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**丁文江**

2003年8月17日

摘 要

气膜软接触连铸是铝合金加工的一项新型连铸技术,与其它连铸技术相比,生产成本低,操作简单,浇注的铸坯表面光滑,内部组织均匀致密,机械性能好,因此,对于普通挤压铝合金铸坯而言,气膜软接触连铸技术能够取得非常满意的效果,在大断面的硬铝合金、超硬铝合金铸坯浇注中,该技术也具有较强的竞争力.目前,冶金工作者对该技术的研究主要集中在设备构造、气体流量自动控制、浇注合金的种类等方面,取得了一定的结果,但是具体的工艺参数(如拉坯速度、气体流量、冷却水压力、气缝的尺寸等)对铸坯质量影响规律的研究却很少报道,也未曾见过该工艺条件下气膜润滑理论方面的研究工作.因此,进行气膜软接触连铸技术的基础研究具有非常重要的现实意义.

采纳铸坯与结晶器内壁“软接触”的设计思想,设计出了一种新型的气膜软接触连铸结晶器,它具有冷却长度短、传热量低、冷却均匀、润滑性能好等优点,对 1080 工业纯铝、2024 铝合金、6063 铝合金进行实验都取得了比较满意的结果.利用气体轴承气膜润滑理论的相关知识,并结合连铸过程中的实际情况,建立了气膜软接触连铸工艺条件下的雷诺润滑理论模型,研究了气膜内的压力分布特点及工艺参数对连铸稳定性的影响规律.通过实验,研究了气膜软接触连铸稳定进行的必要条件及工艺参数影响铸坯质量的一般性规律.理论计算结果和实验结果非常吻合,得出了一些具有指导意义的结论,这为下一步的工业化试验提供了坚实的理论和实验基础.主要内容如下:

通过传热收缩模型及润滑理论模型的研究,发现在稳定的气膜软接触连铸条件下,气膜内的压力随距结晶器气缝距离的增加单调下降;在非稳定条件下,气膜内的压力则会出现先降后升的“压力阻塞”现象,这不利于连铸的顺利进行.计算结果同时还表明,随拉坯速度的增加、气体流量的降低及环形气缝尺寸的减小,气膜内的压力分布朝非稳定方向发展.合理提高气体流量,有利于保证连铸的稳定性,避免产生“压力阻塞”现象.

通过气缝处金属液的受力分析,得出了保证气膜软接触连铸工艺顺利进行的必要条件.当气体背压满足这一条件时,连铸就能稳定进行;低于气体背压条件的下限时,金属液就可能进入环形气缝内,堵塞气缝;反之,气体可能进入金属液内,形成侵入式气孔,降低铸坯质量.

实验结果表明:一定工艺条件下,气体流量对铸坯表面质量的影响存在临界值,高于临界值时,铸坯表面非常光滑;低于临界值时,铸坯表面则存在冷隔、裂纹等缺陷,这主要是其对气膜连续性、周向均匀性和稳定性的影响不同而导致的.影响气膜连续性、均匀性的因素还有拉坯速度、金属液位高度、气缝尺寸等参数,事实上,拉坯速度越大,气膜的连续性、稳定性越差.连铸过程中,气体背压随气体流量的增加而增大,随拉坯速度的增大而减小,因此,合理增大气体流量,可以提高气膜的刚性及其对液态金属的约束能力.

电镜检测及等离子发射光谱分析结果表明:气膜软接触连铸稳定条件下,2024 铝合金的皮下反偏析层厚度可降低到 100 μm 左右,远小于传统 DC 连铸工艺条件下的 500 μm .由宏观组织检验分析可知,工艺参数合理时,可获得晶粒度为 2~3 级全等轴晶的铸坯.拉伸力学性能分析则表明,气膜软接触连铸坯的

力学性能优于传热条件类似传统DC连铸工艺条件下铸坯的力学性能。这表明通过气膜软接触连铸工艺可以获得高质量的铸坯。

实验研究发现, 气体流量、拉坯速度等工艺参数对铸坯的宏观组织、皮下反偏析程度有重要影响。其它工艺参数一定, 随着气体流量的降低、拉坯速度的增大, 铸坯宏观组织的等轴晶比率降低, 一定条件下甚至整个横断面上全为柱状晶; 气体流量过低的时候, 气膜不能起到软接触作用, 此时铸坯的凝固条件与传统DC连铸工艺相似, 铸坯宏观组织为典型的三层晶粒结构。铸坯的皮下反偏析程度则随着气体流量的降低、拉坯速度的增大而增加。实验研究还发现, 铸坯表面光滑时, 铸坯内部质量并不一定好, 还需进一步调整气体流量, 改善传热条件, 才能获得全等轴晶组织的铸坯, 这也说明, 在气膜软接触连铸条件下, 通过调整工艺参数可以获得全等轴晶组织的铸坯, 这是非常有意义的。事实上, 在合理工艺参数条件下, 获取全等轴晶铸坯的实验现象重复性非常好。

实际生产过程中为提高生产率, 总是尽可能地提高拉坯速度, 但理论分析和实验结果均表明, 拉坯速度增大, 连铸的稳定性、连铸坯的质量会降低, 解决这一问题的有效途径就是提高气体流量。由此可知, 对于气体流量和拉坯速度而言, 两者对连铸工艺影响的理论分析结果与实验结果是一致的。

关键词 连铸, 铝合金, 气膜, 软接触, 润滑理论

Abstract

The gas film soft-contacted continuous casting (GFCC) is a late-model casting technology in the aluminum alloy process, it possesses many advantages compared to other technologies, which include the low yield cost, the simple operation, the slippery slab surface, the even inner structure and the high mechanism performance. Therefore, the GFCC technology receives great satisfying metallurgical purpose for the ordinary extrusion aluminum alloy slab, and has forceful competence in the duralumin and super-duralumin casting also. At present, the metallurgists make researches mainly on the design of equipment configuration, the automatic controlling of gas volume rate and the kinds of casting aluminum alloy, and have obtained some results. However, the influencing regulations of the technology parameters (which include the casting speed, the gas volume rate, the cooling water pressure and the gas slot width) on the slab quality are rarely found in the literature, furthermore, the research of gas film lubricating theory has not still found in the literature. So, it is very interesting to study the GFCC technology.

Based on the design idea of soft-contacted for the mold and slab, a new mould has been developed in this paper on substantive experiments, it has some merits such as shorter cooling length, low heat transfer efficiency, even cooling and better lubricating

performance, the casting experiments for 1080, 2024 and 6063 aluminum alloy are very successful. It has established the Renault lubricating model under the GFCC technology through modifying of the gas bear lubricating theory in the paper. It has studied the effect of technology parameters on the casting stability and the distributing rule of gas pressure in the gas film. The paper has also studied the general influencing rules of the technology parameters on the slab quality under the GFCC. The mathematic results are coincident with the experiment conclusions, and it also gains some instructional conclusions for the GFCC technology, which give a strong theory and experiment groundwork for the next industrialized experiment. The paper's main contents are showed as follows.

Based on the study of the heat transfer modeling and lubricating theory modeling, it finds that the gas pressure decreases with the distant of the calculating location and the gas slot increasing in the GFCC technology, and the gas film can appear the phenomena of pressure backup which the pressure decreases first, then increase under the instability condition and finally bring disadvantages to the casing. The computational results show that the gas pressure distributing develops forward the instability estate with the casting speed increasing and the gas volume rate and the gas slot width reducing. It is necessary to enhance the gas volume rate logically for avoiding the gas pressure backup.

It has gained the essential condition for the GFCC technology by analyzing of the suffering forces of the liquid metal at the gas slot. When the gas backpressure is lower than the lower limit of the

essential condition, the liquid metal can enter the gas slot, contrarily, the gas can enter the liquid metal and form incursive air hole which depress the slab quality, when the gas backpressure meet the demand of the essential condition, the casting process is very steady and the slab quality is fine.

The experiment results show that there is a critical value on the influence of the gas volume rate on the surface quality of the slab. The surface of the slab is very slipper if the gas volume rate is higher than the critical value, while it is lower, there are some cracks and fold marks on the surface of the slab, that may be induced by the different influence that the gas volume rate on the continuity, the uniformity and the stability of the gas film. The factors effecting the gas film continuity and uniformity also include the casting speed, the liquid metal height in the hot top and the gas slot width, in fact, the faster the casting speed is, the more awfully the continuity and the uniformity of the gas film will become. The experiment results also show that the gas backpressure decrease with the gas volume rate decreasing and the casting speed increasing. So to increase the gas volume rate rationally can improve the rigidity of the gas film and the restricting ability.

Through the scanning electron microscopy and the induction couple plasma analyzing, We can know that the negative segregation thickness in the 2024 aluminum alloy produced with the GFCC technology may decrease to about $100\text{ }\mu\text{m}$, it is much less than $500\text{ }\mu\text{m}$ under the condition of the conventional DC casting technology. From the gross segregation analyzing, we can find that the slab

structure can be full equiaxed dendrite and the dendrite grade is on 2~3 grade. The mechanics performance check-up also indicates that the mechanics performance of the GFCC slab obviously excels that of the conventional DC casting slab. These examining results make known that the GFCC technology can produce high quality slab.

The technology parameters, which include the gas volume rate, the casting speed, and so on, have important influence on the macrostructure and the degree of the surface inverse segregation of the slab. When the other technology parameters are fixed value, the equiaxed dendrite rate of slab macrostructure decreases with the gas volume rate decreasing and the casting speed increasing, the macrostructure may be full columnar dendrite under a certain condition. If the gas volume rate is very low and the cooling condition in the mold is approximately the conventional DC casting technology, the macrostructure is a typical three-layer dendrite (fine equiaxed, columnar and equiaxed dendrite) for the gas film cannot act as the soft contact function. The degree of the surface inverse segregation of slab increases with the gas volume rate decreasing and the casting speed increasing. It is also indicated from the experiment inspecting that the inner quality of slab is not always better when the surface quality of slab is fine. Adjusting the gas volume rate ulteriorly is asked to improve heat transfer condition in the mold and to obtain the full equiaxed dendrite structure. That is to say, it is very significative that we can acquire the full equiaxed dendrite structure through adjusting the technology parameters in the GFCC technology. In fact, the repeating phenomena of gaining full

equiaxed dendrite slab are better when the technology parameters are rational.

In order to improve the productive efficiency, the casting speed is usually improved in the production, but the lubricating theory analyzing and the experiment results all make known that the casting stability and slab quality may decrease with the casting speed increasing. So the gas volume rate must be improved to solve the conflict. Then, for the gas volume rate and the casting speed, about their influence on the GFCC technology, it can be concluded that the results of the lubricating theory analyzing are consistent with that of the experiments.

Key words continuous casting, aluminum- alloy, gas film, soft-contacted, lubrication theory

目 录

第一章 序言	1
第二章 文献综述	4
2.1 传统 DC 连铸技术的设备特点	4
2.2 DC 连铸坯缺陷的成因及解决措施	6
2.3 DC 连铸技术的发展概况	16
2.4 小 结	27
第三章 实验设备、材料与实验研究方法	30
3.1 气膜软接触连铸实验装置	30
3.2 连铸结晶器装置的设计	32
3.3 实验测温装置	39
3.4 实验材料的选取与实验方法	40
3.5 铸坯取样及检测方法	41
3.6 数据处理软件	42
第四章 气膜软接触连铸技术传热模型的研究	43
4.1 传热数学模型方程	43
4.2 传热模型的初始及边界条件	48
4.3 传热模型物性参数的确定	50
4.4 差分方程的稳定性及时间、空间步长的确定	52
4.5 铸坯凝固收缩计算的处理	54
4.6 程序编制	55
4.7 传热收缩模型计算结果及分析	57
4.8 小 结	60
第五章 气膜软接触连铸工艺润滑理论的研究	61
5.1 润滑气膜形成的机理	61
5.2 气膜形状及厚度的讨论	62

5.3 润滑气体的可压缩性讨论	67
5.4 气膜软接触连铸润滑理论模型	70
5.5 气体润滑模型物性参数及工艺参数的确定	82
5.6 雷诺润滑压力方程的求解方法	85
5.7 雷诺润滑方程的求解及结果分析	90
5.8 小结	98
第六章 气膜软接触连铸工艺参数的选择与控制	99
6.1 连铸合适拉坯速度的确定	99
6.2 气膜软接触连铸合适气体背压的选取	101
6.3 气膜软接触连铸合适气体流量的确定	107
6.4 气体流量、拉坯速度与气体背压之间的关系	112
6.5 气体均匀性对铸坯质量的影响	116
6.6 气体种类对铸坯质量的影响	117
6.7 冷却水压力的控制	118
6.8 结晶器液位的控制	119
6.9 小 结	119
第七章 气膜软接触连铸坯的组织性能特点及分析	121
7.1 气膜软接触连铸坯的表面特性	121
7.2 气膜软接触连铸坯的宏观组织特点	125
7.3 气膜软接触连铸坯反偏析的分布特点	133
7.4 气膜软接触连铸坯的力学性能测试	141
7.5 小 结	143
第八章 结论与展望	145
8.1 主要结论	145
8.2 展望	149
8.3 创新点	150
全文符号一览表	151
参考文献	154
致 谢	162

第一章 序 言

铝及其合金是有色金属中用途较广的轻金属之一,它具有密度小、重量轻、比强度高、导电与导热性好以及较强的耐蚀性等优点.随着近代机械制造业(如航空、航海、汽车工业)的发展,石油化工、电信和原子能及空间技术等新型工业的崛起,铝合金的使用量日益增加,因而在国民经济中占有重要的地位^[1].铸锭的生产是铝及铝合金加工工艺中的重要组成部分,其主要目的是铸造成型,提供符合加工要求的优质铸锭.在很大程度上,铸锭的质量影响压力加工过程和制品的质量,因此,开发先进的浇注工艺一直是冶金工作者的追求.随着铝及铝合金加工工艺的发展,铸锭成型的方法在不断改革,现已不下几十种,归纳起来,主要有:铁模或水模铸锭法、DC(direct chill)连续及半连续铸造法、连续铸轧法三大类^[2].

DC 连铸技术自 20 世纪 40 年代开发以来,因其可以生产无收缩缺陷的铸坯,与模铸工艺相比,具有铸坯质量好、金属收得率高、生产成本低、生产效率高、生产规格灵活等优点而得到迅速的发展^[3,4].按结晶器布置方式的不同,可将该工艺分为垂直 DC 铸造和水平 DC 铸造两大类.传统垂直 DC 铸造实质上是一种半连续式的铸造工艺,由于受到浇铸坑的深度和铸机行程的限制,每浇注完一定长度的铸坯,便停下来,再重新开始浇注.为提高生产效率,生产过程中常采用单机多流的浇注方法,一次可