

蔡开科文集

孙彦辉

主编

CAIKAIKE WENJI



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

蔡开科文集

孙彦辉 主编

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2016

内 容 提 要

本文集收录了蔡开科教授 50 篇学术论文,分为浇注与凝固、钢中夹杂物研究、洁净钢生产工艺、物理模拟与数值模拟、连铸坯质量控制 5 个专题。本文集展示出蔡开科教授在炼钢连铸领域的学术思想与科研脉络,体现了蔡开科教授严谨的学术风格和深厚的学术造诣,将对读者的科研创新有所启发。

本文集可供冶金领域相关科研、生产、管理、教学人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

蔡开科文集/孙彦辉主编. —北京:冶金工业出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-5024-7184-2

I. ①蔡… II. ①孙… III. ①钢铁冶金—文集 IV. ①TF4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 034283 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 杜婷婷 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7184-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版, 2016 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 27.5 印张; 2 彩页; 674 千字; 432 页

160.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



友誼



合作

執
著





秋 露



本书编委会

名誉主编：刘新华

主 编：孙彦辉

编委会委员（以姓氏笔画为序）：

万晓光	王 琳	王小松	王龙岗	王成喜	王宝辉
王海涛	仇圣桃	艾立群	田志红	朱立新	刘中柱
刘军占	孙彦辉	严国安	杨吉春	杨阿娜	杨素波
李志斌	李桂军	李建新	吴 巍	吴海民	张立峰
张桂芳	张彩军	陈卫强	陈素琼	武小林	赵长亮
赵克文	赵国燕	胡勤东	荆德君	柳向椿	秦 哲
袁伟霞	顾克井	倪有金	徐 涛	郭艳永	魏 军

编者的话

蔡开科（1936—2014）是北京科技大学教授，国内外知名的冶金专家，在我国开创连续铸钢凝固学科的理论研究。蔡开科教授生于1936年1月27日，湖南省华容县人。1959年毕业于北京钢铁学院冶金系，同年留校任教直至退休。任教期间，先后任助教、炼钢实验室主任、炼钢教研室主任、教授、博士生导师，兼任中国金属学会理事、中国金属学会炼钢分会理事兼秘书长、连续铸钢分会副理事长等职务。1973年以工程师身份在法国钢铁研究院开展为期三年的研究工作，1989年以高级访问学者身份在加拿大麦吉尔大学开展为期一年的研究工作。

蔡开科教授从事高等教育工作近40年，主编或参编《炼钢学原理》《浇注与凝固》等高校统编教材，主编《连续铸钢》《连续铸钢原理与工艺》《连铸结晶器》《连铸坯质量控制》等专著。在国内外学术刊物和学术会议发表高水平学术论文280余篇。

蔡开科教授主要从事炼钢、炉外精炼及连铸工艺等方面的理论与应用研究，先后参与了小方坯连铸技术、管坯水平连铸、不锈钢连铸工艺、合金钢连铸、多功能真空精炼等国家科研攻关工作。在20世纪80年代初就开始用数值方法求解凝固传热方程，之后逐渐与连铸二冷控制模型相结合，开创了钢包—中间包—结晶器—铸坯多级取样系统分析研究钢中夹杂物的方法，对提高国内钢铁企业的夹杂物控制水平做出了贡献。蔡开科教授在20世纪90年代就意识到了洁净钢生产的重要性，在国内最早与宝钢合作开展相关研究。在20世纪90年代引进了国外大型软件研究连铸坯凝固机理，同时进行数学物理模拟。蔡开科教授在连铸坯质量控制方面也做了大量工作，在20世纪80年代就提议引进能够测定钢高温性能的Gleeble1500热模拟试验机，准确测定钢在凝固点温度附近的高温力学性能，用于分析连铸坯表面裂纹生成原因。

同时，蔡开科教授注重与企业开展深入合作，积极举办技术专题讲座，为企业解决实际生产中遇到的问题。

以上这些蔡开科教授的研究内容，为我国钢铁工业中炼钢连铸技术的发展，奠定了良好的理论基础与技术基础。

本文集按照蔡开科教授的研究方向分为5个专题，依次为“浇注与凝固”、“钢中夹杂物研究”、“洁净钢生产工艺”、“物理模拟与数值模拟”及“连铸坯质量控制”，共收录蔡开科教授50篇代表性学术论文，读者可从中感受到蔡开科教授严谨的治学态度和执著的科研精神，激发为实现钢铁强国目标拼搏奋进的动力。旧作读来胜新书，重读文章，景仰之情油然而生。向与蔡开科教授一起工作过的老一辈科研工作者致以由衷的敬意。

蔡开科教授一生光明磊落，品德高尚；潜心学术，教书育人。他培养的学生遍及海内外，继续为钢铁事业的发展做着贡献。蔡开科教授虽然离开了我们，但他的音容笑貌永远留在我们的心中。

谨以本文集，表达我们对他的深刻怀念。

本书编委会
2015年12月

目 录

◇ 浇注与凝固 ◇

连续铸锭结晶器传热	蔡开科	3
连续铸锭板坯凝固传热数学模型	蔡开科 吴元增	19
连铸坯凝固冷却过程的控制	蔡开科 刘凤荣	31
连铸二冷区喷嘴冷态特性的实验研究	蔡开科 张克强 袁伟霞 等	40
水平连铸圆坯凝固特性研究	蔡开科 邢文彬 张克强 等	48
连铸二冷区喷雾冷却特性研究	杨吉春 蔡开科	55
水平连铸凝固壳热应力模型研究	蔡开科 邵璐 刘新华	60
板坯连铸机二次冷却水的控制模型	陈素琼 蔡开科	68
凝固模型在高碳钢方坯连铸中的应用	陈卫强 韩传基 蔡开科 等	76
板坯连铸二冷区凝固传热过程与控制	韩传基 蔡开科 赵家贵 等	85

◇ 钢中夹杂物研究 ◇

喷硅钙粉对镇静钢中 Al_2O_3 夹杂形态的控制	蔡开科 张克强 李绍舜 等	93
水平连铸圆坯非金属夹杂物的研究	蔡开科 邢文彬 李秀文 等	99
连铸坯大型夹杂物的研究	蔡开科 刘新华	105
含 Ti 不锈钢中氮化钛夹杂的研究	赵克文 蔡开科	109
含钛不锈钢连铸板坯夹杂物的行为	孟志泉 刘新华 蔡开科 等	115
非稳态浇注对钢水洁净度的影响	张彩军 王琳 蔡开科 等	121
72A 钢非金属夹杂物行为研究	魏军 顾克井 蔡开科 等	127
钙处理对冷轧无取向硅钢磁性的影响	郭艳永 蔡开科 骆忠汉 等	134
中碳钙硫易切削钢夹杂物形态控制	严国安 秦哲 田志红 等	141
Mathematical Model of Sulfide Precipitation on Oxides during Solidification of Fe-Si Alloy	Liu Zhongzhu Gu Kejing Cai Kaike	147

◇ 洁净钢生产工艺 ◇

镇静钢铝含量控制	蔡开科	163
预测半钢冶炼条件下沸腾钢氧含量的数学模型	杨素波 蔡开科 陈渝 等	168
RH 真空处理生产 IF 钢时脱碳行为的研究	靖雪晶 张立峰 蔡开科 等	175
RH 生产超低碳钢的工艺优化	方东 刘中柱 蔡开科	181

RH 处理过程钢液脱硫	艾立群 蔡开科	186
用 CaO-CaF ₂ -FeO 系渣进行钢水深脱磷	田志红 艾立群 蔡开科 等	193
炼钢过程钢中氧的控制	杨阿娜 刘兴华 蔡开科	201
小方坯连铸低碳低硅铝镇静钢可浇性研究	刘兴华 韩传基 蔡开科 等	209
转炉冶炼低碳钢终点氧含量控制	蔡开科	218
炼钢—精炼—连铸过程钢水纯净度控制战略	蔡开科 孙彦辉 田志红	227

◇ 物理模拟与数值模拟 ◇

连铸中间包钢水停留时间分布的模拟研究	蔡开科 李绍舜 黎学玛 等	243
水平连铸中间包流动特性的模拟研究	蔡开科 王利亚 李绍舜 等	251
板坯连铸结晶器铜板温度场研究	郭 佳 蔡开科	258
阻流器流控装置下中间包内的流场	李冀英 韩传基 蔡开科 等	265
板坯连铸中间包流动控制及冶金效果研究	吴 巍 韩传基 蔡开科	271
连铸板坯结晶器浸入式水口试验研究	万晓光 韩传基 蔡开科 等	275
包晶相变对连铸坯初生坯壳凝固收缩的影响	荆德君 刘中柱 蔡开科	281
RH 精炼过程钢液流动数值模拟和应用	张 琳 孙彦辉 朱进锋 等	288
Fluid Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundish	Zhang Lifeng Shoji Taniguchi Cai Kaike	296
Prediction and Analysis on Formation of Internal Cracks in Continuously Cast Slabs by Mathematical Models	Han Zhiqiang Cai Kaike Liu Baicheng	320

◇ 连铸坯质量控制 ◇

连铸坯裂纹	蔡开科	337
连铸电磁搅拌理论	蔡开科	351
中碳钢的高温力学行为	王学杰 蔡开科 党紫九 等	358
薄板坯连铸液芯铸轧过程铸坯的应力应变分析	逯洲威 蔡开科	364
连铸板坯凝固过程应变及内裂纹研究	袁伟霞 韩志强 蔡开科 等	369
钢中碳含量对连铸板坯纵裂纹的影响	柳向椿 赵国燕 蔡开科 等	375
连铸大方坯轻压下内裂纹趋势预报	赵国燕 李桂军 包燕平 等	380
CSP 热轧板卷边部裂纹成因	赵长亮 孙彦辉 田志红 等	385
BOF—LF—CC 生产特殊钢连铸坯质量控制	蔡开科 孙彦辉 秦 哲	392
连铸坯质量控制零缺陷战略	蔡开科 孙彦辉 韩传基	401

◇ 附 录 ◇

附录 1 蔡开科教授主要科研项目	419
附录 2 蔡开科教授主要学术论文目录	421



浇注与凝固

JIAOZHU YU NINGGU



连续铸锭结晶器传热

蔡开科

(北京钢铁学院炼钢教研室)

摘 要: 本文论述了结晶器对提高连铸机生产率的重要性, 分析了结晶器传热特点并指出凝固壳与铜壁交界面构成了传热主要热阻。从结晶器热平衡的试验指出了改善结晶传热, 增加坯壳厚度, 以增加拉速防止拉漏的发生, 讨论了设计结晶器主要参数的选择原则。

连续铸锭机的生产率是受多种因素限制的。在工艺上, 往往是拉速和拉漏事故影响了连铸机的生产, 而结晶器在很大程度上和这两个因素有关。

1 结晶器的重要性

由凝固定律 $e = k\sqrt{t}$ 得:

$$v_{\max} = \left(\frac{k}{b}\right)^2 H$$

式中 $v_{\max}$ ——最大拉速, m/min;
 k ——凝固系数, mm/min^{1/2};
 b ——铸坯的 1/2 厚度, mm;
 H ——液相深度, m。

由此知最大拉速是受液相深度的限制, 因为连铸机的 H 不能超过最后一个支撑辊的长度, 否则铸坯就可能鼓肚, 铸坯以液心通过拉矫机时, 可能导致内部裂纹或偏析线。同时拉速也受结晶器的限制, 拉速增加, 拉漏可能性增大, 在铸坯凝固壳的中部或角部可能产生纵裂。

连铸机和炼钢炉之间配合不协调, 或连铸机本身的设备事故, 往往会造成耽误。而拉漏事故可能引起设备相当大的损坏和长时间的修理。因此, 人们采取以下措施来减少拉漏造成的损坏:

(1) 在结晶器下按信号指示器, 及早发现拉漏, 避免大量钢水流入二冷支撑辊;

(2) 采用特殊装置能迅速更换被损坏装置。虽然这些措施可减少由拉漏造成的时间损失, 但是我们的目的是在提高拉速时, 避免产生拉漏, 以提高连铸机的生产率。铸坯出结晶器的拉漏, 主要有以下原因:

- 1) 高拉速;
- 2) 结晶器与二冷辊对弧不准;
- 3) 保护渣导热性不好;
- 4) 结晶器变形或磨损;

- 5) 锥度调整不当;
- 6) 局部冷却不均匀;
- 7) 伸入式水口没有对中。

这些因素都可能使出结晶器凝固壳产生破裂。因此对结晶器要求是:

- (1) 尽可能在高拉速下, 保证出结晶器坯壳足够的凝固厚度和铸坯断面周边厚度的均匀性;
- (2) 避免机械和热应力, 以免撕裂凝固壳。

如果结晶器满足这两个要求, 就可减少铸机的拉漏率。因此, 必须进一步研究结晶器的传热和制造使用特点。

2 结晶器的传热特点

从图 1 可把结晶器内钢液向外界的传热区分为以下几部分。

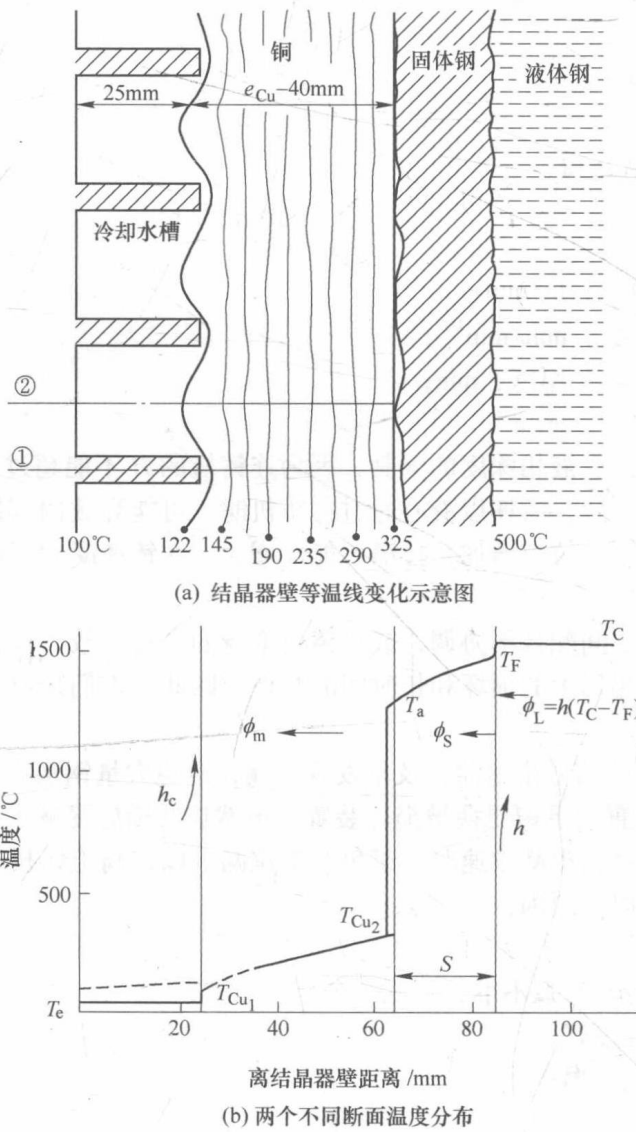


图 1 结晶器内温度分布

2.1 液体钢对凝固壳传热

模型研究指出：注流动能引起了钢液沿结晶器中心下降，沿凝固前沿上升的运动。流股运动所影响的高度决定于水口和铸坯断面。液体钢与凝固壳之间的对流热交换系数 h 可由下式计算^[1]：

$$h = \frac{2}{3} \rho c w \left(\frac{c\eta}{\lambda} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{Lw\rho}{\eta} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

式中 ρ ——液体钢密度， g/cm^3 ；
 c ——液体钢比热， $\text{cal}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ；
 w ——结晶前沿液体钢运动速度， cm/s ；
 L ——结晶器高度， cm ；
 η ——液体钢黏度， P ；
 λ ——液体钢导热系数， $\text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 。

模型试验测得 $w = 30 \text{ cm/s}$ ，代入已知数据，计算得 $h = 0.197 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 。热流 ϕ_L 决定于液体钢过热：

$$\phi_L = h(T_0 - T_F)$$

如 $T_0 - T_F = 30^\circ\text{C}$ ，则 $\phi_L = 6 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。这与已凝固钢壳传导传热相比 ($\phi_s \approx 50 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) 是很小的。在正常浇注条件下，凝固速度 ds/dt 是与凝固交界面热流成比例的。

$$L_t \frac{ds}{dt} = \phi_s - \phi_L = \lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial X} \right)_s - h(T_C - T_F)$$

式中 L_t ——凝固潜热， cal/g ；
 λ_s ——固体钢导热系数， $\text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 。

因此，结晶器内注流产生的对流运动把钢液过热传给凝固壳。钢液过热度越高，凝固壳就越薄。因此应限制中间包钢液过热度为 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 。

2.2 凝固坯壳的传热

在凝固钢壳中为传导传热。对板坯可用热传导方程表示如下：

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

当温度大于 900°C 时，可认为 $\lambda = 0.07 \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 。

2.3 凝固壳与结晶器壁的传热

凝固开始时，已凝固坯壳与结晶器壁是紧密接触的，随后由于坯壳收缩，在结晶器壁与坯壳之间产生了不均匀气隙。此时坯壳表面与结晶器壁热交换是靠辐射和对流传热（或气层导热）^[2]。

$$\phi_m = \varepsilon \sigma [(273 + T_a)^4 - (T_{\text{Cu}_2} + 273)^4 + h_a(T_a - T_{\text{Cu}_2})]$$