

YE JIN SHI YONG JI SHU CONG SHU



冶金实用技术丛书

连续铸钢

郭廷钢 编著

冶金实用技术丛书

连续铸钢

郭廷钢 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
1995

图书在版编目(CIP)数据

连续铸钢/郭廷钢编著.-北京:冶金工业出版社,1995.6

(冶金实用技术丛书)

ISBN 7-5024-1707-9

I.连… II.郭… III.连续铸钢 IV.TF777

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 04759 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

三河市双峰印刷厂印刷

冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1995 年 6 月第 1 版,1995 年 6 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5 印张; 128 千字 152 页;1-3000 册

6.50 元

前 言

连续铸钢是现代钢铁生产中的重要工艺,是炼钢生产的重要组成部分。加速发展连续铸钢是我国钢铁工业实现结构优化的重要技术政策。冶金工业部提出,到2000年我国钢产量的连铸比力争达到70%以上。为了适应我国连续铸钢生产的迅速发展,不断提高连续铸钢生产、操作人员的素质,编者在长期的炼钢专业教学工作中,广泛收集有关连续铸钢资料,并在此基础上编写成此书。

本书在编写过程中,根据连续铸钢生产操作特点,力求理论联系实际,通俗易懂。本书内容主要包括,连铸理论、连铸机的设备、连铸工艺操作,连铸钢坯质量以及连铸技术的发展等。本书可供从事连铸技术工作的工程技术人员及大中专学生阅读参考,也可作为连铸生产操作人员进行培训或自学用读物。

本书在编写过程中,得到了唐山工程技术学院、唐山钢铁公司等单位和高长庚、刘银生、李国柱等同志的大力支持,本书承唐山工程技术学院吴勉华教授审阅,并提出了许多宝贵意见,在此一并致以衷心谢意。

由于编者水平有限,经验不足,时间仓促,故书中的缺点和错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

1994.11

目 录

1 连续铸钢概述	(1)
1.1 连续铸钢生产发展概况	(1)
1.2 连续铸钢特点	(3)
1.3 连铸机分类	(4)
2 钢液的结晶与连铸钢坯结构	(7)
2.1 钢液的结晶过程	(7)
2.2 连铸钢坯的凝固特征和结构特点	(10)
2.3 铸坯冷却过程中的相变和应力	(13)
3 连铸工艺及铸坯质量	(17)
3.1 连铸工艺参数	(17)
3.2 连铸的保护浇注	(26)
3.3 连铸生产操作	(31)
3.4 铸坯缺陷及防止措施	(38)
4 小断面铸坯连铸	(44)
4.1 德马克小方坯连铸机工艺参数及设备的主要 技术性能	(44)
4.2 小方坯连铸操作工艺	(47)
4.3 小方坯存在的质量和和设备问题	(69)
5 合金钢连铸	(78)
5.1 合金钢连铸的特点	(78)
5.2 典型合金钢种的连铸	(84)
6 弧形连铸机设备	(89)
6.1 钢液供应设备	(89)
6.2 中间罐	(92)
6.3 结晶器及其振动装置	(95)

6.4	二次冷却系统	(100)
6.5	电磁搅拌器	(102)
6.6	拉坯矫直机	(105)
6.7	切坯装置	(106)
6.8	引锭装置	(109)
6.9	连铸坯的承运设备	(111)
6.10	后步工序	(113)
6.11	连铸车间工艺布置和环境保护	(114)
7	水平连铸	(119)
7.1	水平连铸机设备及主要技术	(119)
7.2	水平连铸的工艺理论	(124)
7.3	水平连铸坯质量	(126)
8	连铸技术的发展	(128)
8.1	钢液处理	(128)
8.2	气水雾化冷却	(130)
8.3	压缩浇注	(133)
8.4	直接热送轧制	(134)
8.5	连铸-连轧	(137)
8.6	薄板坯(带)连铸新技术	(140)
8.7	超低头连铸	(147)
8.8	连铸坯分条技术	(150)
8.9	连铸设备的改进	(152)
	参考文献	(152)

1 连续铸钢概述

连续铸钢是炼钢生产中发展比较快的一项新技术,也是冶金和机械相结合的一门生产技术。用连续铸钢机可直接将钢水铸成所需的各种断面的钢坯,从而取代了传统的模铸钢锭、脱模、整模、钢锭均热、初轧开坯等一系列复杂的工艺流程,简化了从钢水到钢坯的生产工艺。这项新技术的采用,为炼钢生产向连续化、自动化方向的发展开辟了新的途径。

1.1 连续铸钢生产发展概况

早在19世纪中期就已提出了液体金属连续铸锭的概念。1840年,美国塞勒斯获得连铸铅管专利。1846年,英国贝塞麦使用水冷旋转双辊式连铸机生产锡箔、铅板和玻璃板。1872年,英国戴维尔提出移动结晶器连续浇铸的概念。1886~1889年,提出了垂直浇注的立式连铸机的设计,1921年提出了结晶器振动概念,使铸坯与结晶器壁之间作连续相对运动。

1933年,连铸的先驱者德国人容汉斯建设了第一台1700t/月立式带振动结晶器的连铸机,首先浇注铜铝合金获得成功,使有色金属连铸于30年代就已应用于生产。

在40年代,由容汉斯在德国建成第一台浇铸钢水的试验连铸机,当时就已提出振动的水冷结晶器、浸入式水口和保护浇注等技术,这为现代连铸机奠定了基础。随后,相继在美国、英国、奥地利、日本等国建成了中间性试验连铸机。

在50年代,连续铸钢进入工业试验阶段,先后有多台连铸机相继建成。其中有代表性的钢厂有:1951年苏联红十月冶金厂建立了第一台不锈钢板坯连铸机,铸坯断面为 $180 \times 800\text{mm}$,产量为3.6万t/年。1952年英国巴罗厂建成第一台小方坯连铸机,铸坯断面为 $50 \times 50 \sim 100 \times 100\text{mm}$,生产碳钢和低合金钢。1954年第一台浇铸圆坯的4流连铸机在联邦德国建成。同年,在加拿大建成不锈

钢板坯连铸机,铸坯断面为 $165\times 620\text{mm}$ 。1956年英国巴罗厂成立弯式连铸机,同年,瑞士人获得弧形连铸机专利。1958年第一台8流小方坯连铸机在意大利工厂投产。

在60年代,连续铸钢进入工业应用阶段,不少工厂都相继建设连铸机。其中有代表性的钢厂有:1961年第一台立弯式板坯连铸机在联邦德国建成,铸坯断面为 $200\times 1520\text{mm}$ 。1963年第一台弧形结晶器小方坯连铸机在瑞士建成投产。当时全世界已有61台连铸机投产,44台连铸机在建设之中。1964年第一个全连铸钢厂在英国谢尔顿厂投产,该厂有4台连铸机共11流,生产低碳钢和低合金钢,铸坯断面为 $140\times 140\sim 432\times 632\text{mm}$ 。同年,第一台弧形板坯连铸机在联邦德国梯林根钢厂投产,铸坯断面为 $250\times 1600\text{mm}$ 。1965年联邦德国埃斯维特尔钢厂4流圆坯弧形连铸机投产。1968年美国钢厂的弧形结晶器板坯连铸机投产,用于生产镀锡板。同年,在加拿大钢厂投产一台工字梁连铸机。1969年法国瓦卢埃克建成第一台立式离心旋转连铸机并投产,用于生产管坯。

在70年代以后,为连续铸钢大发展时期。连铸设备和工艺技术日益完善。1970年全世界有325台连铸机,生产能力为2600万t/年;1974年有550台连铸机,生产能力为1.4亿t/年;1985年有1318台连铸机,生产能力为3.3亿t/年;1990年有1360台连铸机,生产能力为5.58亿t/年。据1991年统计结果表明,全世界已有26个国家和地区的连铸比超过90%。全世界钢产量的平均连铸比1981年为33.8%,到1993年为69.7%。

我国连续铸钢技术起步较早,50年代中期即开始科研试验,第一台工业生产型立式方(矩)坯连铸机于1958年12月在重钢三厂诞生,第二台同类型连铸机1960年6月在唐钢投产。1964年6月薄板坯(厚度110mm)弧形连铸机在重钢三厂问世(1983年迁重钢六厂改拉方坯),1967年12月厚板坯(厚度320mm)弧形连铸机在重钢二炼钢投产(现改拉 $250\times 250\text{mm}$ 大方坯),这两台薄厚板坯弧形连铸机,在当时居于世界领先地位或前列。1965~1966年在上钢三厂、天津二钢和首钢试验厂先后建成矩坯、板坯和小方坯

连铸机,发展形势喜人。但后来进展缓慢,甚至停滞不前。到1978年在生产的连铸机仅21台,年设计能力共312万t,1978年连铸坯产量仅112.7万t。

1979年以来,国家确定以发展生产为中心,明确科学技术是生产力,强调技术进步的科学技术,提出为社会主义四个现代化而奋斗的目标。连铸技术是节约能源,提高成材率,增加经济效益,实现钢铁工业现代化的重大战略措施。1985年全国连铸机累计达49台,年设计能力为677万t,连铸坯产量为502万t;1989年连铸机达112台,产量达1004万t;1990年全国在生产、在建设和已签约的连铸机为163台,设计能力为3283.1万t。1974年以前,我国连铸比为零,到1993年已上升到34%。

1.2 连续铸钢特点

连续铸钢与模铸相比,主要有以下特点:

(1)简化了钢坯生产的工艺流程,节省大量投资,省去了模铸工艺中脱模、整模、均热及初轧等工序。基建投资和操作费用可节省40%左右,占地面积减少50%,设备费用减少70%,耐火材料消耗减少15%。这对加速我国钢铁工业迅速发展具有重要的现实意义。

(2)提高了金属收得率和成材率。连铸从根本上消除了模铸中注管和汤道的残钢损失,提高了钢水收得率。同时省去了钢锭的保温帽,不需要切除钢坯的头部,成材率可提高10%~15%。

(3)提高了钢坯质量。采用连铸方法时,可以根据不同的钢种,制订合理的连铸工艺,控制铸坯的结晶过程。由于连铸冷却强度大,凝固快,所以钢坯结构致密,化学成分偏析及低倍缺陷有所降低,机械性能提高。

(4)采用连铸技术不仅能改善劳动强度,提高劳动生产率,而且有助于铸钢生产的连续化和自动化,为炼钢生产实现高产、优质、低消耗、低成本创造了有利条件。

(5)节约能量消耗。采用连铸,省去了钢锭均热炉加热的燃料

消耗,可使能量消耗减少四分之一到二分之一。

1.3 连铸机分类

目前连铸机已在各钢厂广泛应用,形式多种,用途各异。现按一般习惯介绍连铸机的分类方法:

(1)按连铸机外形分类有:立式连铸机、立弯式连铸机、弧形连铸机、超低头(椭圆形)连铸机、水平连铸机、轮式连铸机等。

(2)按浇注铸坯断面分类有:方坯连铸机、板坯连铸机、圆坯连铸机、异形坯连铸机、方、板坯兼用连铸机。

(3)按拉速分类有:高拉速连铸机和低拉速连铸机。

(4)按钢水静压头分类有:高头型连铸机(如立式、立弯式连铸机)和低头连铸机(如弧形、椭圆形、水平连铸机)。

连续铸钢的生产过程是盛钢桶中的钢水,先流入中间罐,再经中间罐注入结晶器,在结晶器内冷凝,再经二次冷却进一步冷凝,由拉坯辊牵引移动,经切割后运出的。按照浇完的铸坯在凝固过程中的移动轨迹,可以分为五种基本类型连铸机。即立式连铸机、立弯式连铸机、弧形连铸机、椭圆形连铸机和水平连铸机。

1.3.1 立式连铸机

立式连铸机是早期在世界各国被广泛采用的连铸机形式。其设备是由浇注系统(盛钢桶、中间罐)、结晶器(包括振动装置)、二次冷却系统、拉坯及引锭装置、切割装置和出坯运输系统等组成的。立式连铸机从中间罐到切割等主要设备都排列在一条垂直线上,整个机身矗立在车间地平面上或布置在地下的深坑内。立式连铸机的浇注作业和结晶凝固、二次冷却、切割等工序都在垂直线上按顺序进行。这种连铸机占地面积小,设备紧凑,高温铸坯无弯曲变形,铸坯表面和内部裂纹少;铸坯内未凝固液体中夹杂物容易上浮,钢水比较“干净”;二次冷却装置和夹辊等结构简单,便于维护。但是铸机高,基建费用昂贵,且操作维修不方便。因此,限制了立式连铸的发展。近年来,大型转炉炼钢厂多采用其他类型连铸机。

1.3.2 立弯式连铸机

立弯式连铸机是在立式连铸机的基础上发展起来的。立弯式连铸机,先是垂直的,待铸坯凝固后再弯 90° 成水平状,然后切割运出。立弯式连铸机与立式连铸机相比,铸机高度有所降低,节省投资;水平方向出坯,加长机身比较容易,可实现高速浇注;铸坯内未凝固钢液中的夹杂物容易上浮,夹杂物分布均匀。但是,铸坯要经过一次弯曲一次矫直,故容易产生内部裂纹;铸机高度降低有限,因此,基建费用仍然较高。

1.3.3 弧形连铸机

弧形连铸机是世界各国钢厂采用最多的一种机型。立式和立弯式连铸机的结晶器都是直的,而弧形连铸机采用的是具有某一曲率半径的弧形结晶器。其结晶器、二次冷却装置和拉矫装置都布置在某一半径的一个圆的四分之一弧度上。铸坯在结晶器内凝固时就已弯曲,带液芯的铸坯从结晶器拉出来,沿着弧形轨道运行,继续喷水冷却,在四分之一圆弧处完成凝固,然后矫直拉出送至切割站切割成定尺。弧形连铸机在不缩短二次冷却区长度的前提下,显著地降低铸机高度,一般仅为立式的三分之一,建设费用低,钢水静压力小,铸坯在辊间的鼓肚小。加长机身较容易,故可高速浇注,生产率高。但是铸坯弯曲矫直,容易引起内部裂纹,铸坯内夹杂物分布不均匀,内弧侧存在夹杂物的集聚。设备较为复杂,维修较困难。

1.3.4 椭圆形连铸机

椭圆形连铸机是弧形连铸机的另一种形式。椭圆形连铸机的二次冷却区是由不同曲率半径的几段弧线组成的。它与弧形连铸机比较,高度略低,钢水静压力小,鼓肚变形小,但结晶器内的夹杂物没有上浮机会,存在夹杂物聚集内弧面皮下倾向,同时铸机弧线调整困难,设备较复杂。

1.3.5 水平连铸机

水平连铸机的中间罐、结晶器、二次冷却装置和拉坯装置全部放在地平面上呈直线水平布置。钢水浇入中间罐,中间罐与结晶器

的入口端连接,中间罐内的钢水通过结晶器与中间罐连接处的分离环进入水冷结晶器,凝固成一定形状的坯壳,带液芯的铸坯从结晶器内拉出,经过二次冷却后全部凝固,送至切割站切成定尺。水平连铸机设备高度低,容易在原有厂房内进行安装,基建费用少;设备简单,重量轻,便于操作和维修;中间罐与结晶器密封连接,可以防止二次氧化,钢中夹杂减少,纯净度高。铸坯无需矫直,因此可浇注对裂纹敏感性强的合金钢。目前水平连铸机正处于开发阶段,是一种很有发展前途的连铸设备。

2 钢液的结晶与连铸钢坯结构

2.1 钢液的结晶过程

冶炼合格的钢液,经过结晶和凝固,可得到具有一定形状的铸坯。结晶和凝固两个过程伴随发生,二者有密切的联系,但又有所不同。结晶主要是从金属学的原理出发,研究金属熔体中晶核的形成和长大,以及由此而产生的结晶组织。而凝固主要从传热原理出发,研究铸坯不同部位的凝固过程,凝固速度以及伴随发生的物化现象。

2.1.1 钢水结晶凝固的必要条件

钢水结晶凝固的必要条件之一,是钢水具有一定的过冷度,也就是说,首要的条件是具有结晶凝固的温度。

钢水的结晶凝固也和其他液态金属一样,必须冷却到理论结晶温度,即液相线温度以下,才能开始结晶。这种结晶现象称为结晶的“过冷”现象。常用液态金属的理论结晶温度($T_{液}$)与实际结晶温度($T'_{液}$)之差表示过冷度(即过冷度= $T_{液}-T'_{液}$)。所谓过冷度也可理解为液态金属结晶凝固时的“过冷程度”。不是纯金属的钢水有一个结晶开始温度,还有一个结晶结束温度。结晶开始温度即一般称为液相线的温度($T_{液}$),结晶结束温度即一般称为固相线的温度($T_{固}$)。两者的温度差,即 $T_{液}-T_{固}=\Delta t_{凝}$,称为结晶凝固温度范围。

钢水的实际温度($T_{实}$)与钢水液相线温度($T_{液}$)、钢水固相线温度($T_{固}$)之间的关系,可存在以下几种情况:

当 $T_{实}>T_{液}$ 时,以钢水存在。 $T_{实}<T'_{液}$ 时,以钢锭存在。 $T_{固}<T_{实}<T'_{液}$,以固、液两相共存。在此温度范围内,如钢水的 $T_{实}$ 接近于 $T'_{液}$,则钢的液相占的比例大;如钢水的 $T_{实}$ 接近于 $T_{固}$,则钢的固相占的比例大。

钢水也像其他液态金属一样,需要在过冷条件下结晶凝固。从

热力学第二定律可知,自然界中的一切自发过程,只有在引起自由能降低的情况下,才能自发进行。钢水的结晶凝固过程,就必须满足上述的热力学条件才能进行。

图 2-1 表示液态钢和固态钢的自由能随温度变化的趋势。液态钢的自由能和固态钢的自由能,都随温度的升高而降低,但两者随温度而变化的程度不同。

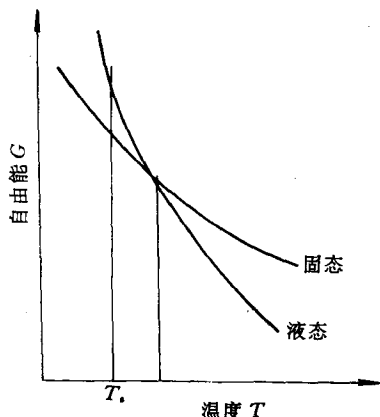


图 2-1 不同状态下钢的自由能与温度的关系

当钢水实际温度 $T_{\text{实}} = T_{\text{固}}$ 时,液态钢的自由能($G_{\text{液}}$)与固态钢的自由能($G_{\text{固}}$)交于一点。此时, $G_{\text{液}} = G_{\text{固}}$,液态钢和固态钢同时存在,液态可能转变为固态,固态也可能转变为液态,固、液两相共存,处于动平衡状态。由此可看出,当钢水温度为 $T_{\text{实}} = T$ 时,钢水不能结晶凝固, $T_{\text{固}}$ 只是理论结晶温度。

当 $T_{\text{实}} > T_{\text{固}}$ 时,则 $G_{\text{固}} > G_{\text{液}}$,钢呈液态稳定存在。当 $T_{\text{实}} < T_{\text{固}}$ 时,则 $G_{\text{固}} < G_{\text{液}}$,钢呈固态稳定存在。液态转为固态的必要条件是, $G_{\text{固}} < G_{\text{液}}$,亦即必须是 $T_{\text{实}} < T_{\text{固}}$ 。

处于两相区的钢水,才存在过冷,才能进行结晶凝固。钢水和钢锭模或结晶器直接接触可产生过冷。过冷度越大,结晶越容易进行。

2.1.2 钢水的结晶凝固过程

钢水的结晶过程,不是一下子就由液体变为固体。在实际生产中,钢锭或铸坯的结晶过程,虽然是比较复杂的,但是它也要经过形核和晶粒长大两个过程。

(1)晶核的形成。晶核的形成方式分为:自发形核与非自发形核。

凡结晶时直接从熔体中产生晶核的过程,称为自发形核过程。熔体达到较大的过冷度后,可自发形核。例如,钢水和冷模或结晶器接触的瞬间,过冷度大,可自发形核。

借助于存在于熔体中的异相晶粒而形核的过程,称为非自发形核。

钢水是含有 C、Si、Mn、P、S 及其他合金元素以 Fe 为基的熔体,其中还含有脱氧产物和非金属夹杂。钢水在结晶凝固过程中,这些物质的质点,往往成为异相晶核而存在于钢水中,钢水结晶在这些质点上继续进行。此为钢水结晶时的非自发形核。

衡量形核特点的一个重要指标是形核速率,即单位时间内出现的晶核数目。自发形核与非自发形核的形核速率都与过冷度有关,过冷度越大,形核速率越高,钢的晶粒越细。非自发形核的形核速率,还与出钢温度有关,温度高,有异相晶核熔化,形核速率降低,钢的晶粒变粗。

(2)晶核的长大。晶核生成后还要继续长大,这种过程称为晶核的长大过程。晶核长大过程的主要问题是,晶核生长的快慢和晶核沿着什么方向,以什么形状长大。晶核在单位时间内生长的尺寸,称为晶核长大线速度。

在结晶过程中,发生两个现象,即形核和晶核长大。形核速率和晶核长大速度,都与熔体的过冷度有关,如图 2-2 所示。

随着过冷度的增加,形核速率和晶核长大线速度都增加,但两者增加的快慢不同。当达到一定的过冷度后,形核速率比晶核长大线速度增加得快。显然,在单位体积的熔体内,如过冷度很大时,则形核速率高,晶核长大线速度低,将得到细晶粒结晶。例如,钢锭的

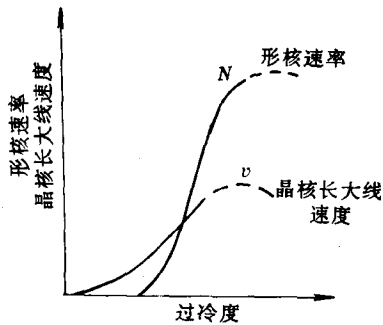


图 2-2 晶核形核速率和长大速度与过冷度的关系

激冷层过冷度很大,形核速率高于晶核长大线速度,生成的是很细小的等轴晶。

晶核长大过程的第二个问题是,晶核沿着什么方向,以什么形状长大?晶核的长大具有一定的方向性,结晶潜热传递最快的方向,是晶核长大最快的方向。对立方晶格的 Fe 来说,沿着晶格的棱角方向晶核长得最快,形成晶体的主干,称为一次晶轴或称为主轴。主轴形成后,又在与主轴垂直的方向上生出分枝,称为二次晶轴。随后又在与二次晶轴垂直的方向上生出三次晶轴,依此进行下去,直至最后全部铁液凝固完了。如此生成的结晶,其形状很象树枝,故称树枝状晶。树枝状晶主轴的长大速度,实际上就是凝固前沿向前推进的速度,也就是结晶凝固速度。在钢水结晶凝固过程中,在钢水没充填的地方,例如,钢锭的缩孔,能保留住已形成的树枝晶。在树枝晶二次、三次晶轴之间,被后来的钢水填满时,就不易看到树枝晶。在树枝晶的分枝,即二次、三次晶轴的长大过程中,常有偏析物聚集在晶界上,钢锭剖面酸浸后,仍能显示出树枝晶,实际上是树枝型偏析。

2.2 连铸钢坯的凝固特征和结构特点

连铸坯的凝固过程与散热条件密切相关。注入结晶器的钢水,

受到来自三个方面的冷却作用。

- (1) 结晶器壁的强制冷却；
- (2) 结晶器上部钢水液面的以辐射为主的散热；
- (3) 向拉坯方向的以传导为主的散热。

根据实际测定，结晶器壁散热速度、钢水液面散热速度，铸坯向拉坯方向的散热速度为 1000 : 5 : 1。可见，铸坯上下两个方向的传热速度都比较小。因此，连铸坯的凝固过程，可近似地看作是钢水向结晶器壁的单向传热过程。也可以认为，铸坯凝层厚度的增长速度，主要决定于钢水向结晶器壁的传热速度。

钢水向结晶器壁的传热过程包括：钢水向坯壳的传热，坯壳向气隙的传热，气隙向结晶器壁的传热，结晶器壁向冷却水传热，最后冷却水带走钢水凝固过程散出的热量。

钢水的凝固过程：钢水注入结晶器后，受到激冷，形成初生坯壳。坯壳边向下移动，边向坯心凝固。由于钢水结晶凝固速度，一般滞后于拉坯速度，因而在铸坯内部残留一个尖而不长的未凝区，一般称为液穴，也称液相深度。第二次冷却区，铸坯受到喷水或喷雾冷却，逐步完成全部的结晶凝固。连铸坯的冷却是强制冷却，不仅它的凝固速度比模铸快，而且还可以通过改变冷却制度，在一定程度上控制铸坯的组织结构。连铸坯坯壳的形成，在铸坯的凝固过程中有重要的位置。

连铸坯的典型宏观组织结构和模铸钢锭一样，也是由三个结晶带组成的混合结构。即外层是激冷生成的细小等轴晶带，其次是柱状晶带，锭心是粗大的等轴晶带。

(1) 细小等轴晶带。钢水与结晶器开始接触的时刻，受到激冷，生成细小等轴晶带，即激冷层。细小等轴晶带的宽度决定于钢水过热度。如钢水过热度高，则细小等轴晶带窄。反之，则宽。

(2) 柱状晶带。当结晶凝固前沿的钢水过冷度减小，而又有向结晶器壁散热的定向热流存在时，柱状晶便开始生长。靠近激冷层的柱状晶很细，基本上不长侧枝，沿断面没有明显的倾角，这是由于温度梯度较大的缘故。随后，柱状晶的方向性变强，并向上倾斜