

内 容 介 绍

本书总结了连续铸造时有色金属和合金铸锭形成的热物理条件的实验与理论研究结果,拟定了提高铸锭质量和连铸机生产率措施。综合分析了重金属和轻金属以及合金的试验结果,比较了传热和凝固的特征。列举了有色金属和合金优质铸锭形成方面的研究新成果,以及连续铸造的最佳冷却系统和冷却制度的选择结果。

本书可供从事连续铸造业的设计和科技人员之用。

有色金属及合金铸锭连续铸造的热物理基础

〔苏〕A·M·卡茨 E·Г·沙杰克 著

刘静安 吴煌良 郑廷顺 译

章宗和 审校

责任编辑 李成平

科学技术文献出版社重庆分社 出版发行

重庆市市中区胜利路132号

全 国 各 地 新 华 书 店 经 销

中国科学技术情报研究所重庆分所印刷厂 印刷

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 8.5 字数: 19万

1989年5月第1版 1989年5月第1次印刷

科技新书目: 195—287 印数: 1—1450

ISBN7-5023-0347-2/TB·21 定 价: 2.80元

字母和符号的说明

- α ——散热系数, 瓦/(米²·开);
 α_T ——线热胀系数, °C⁻¹;
 β_1 ——水(混合物) σ_L 方向与拉锭轴线之间的角度, 度;
 β_2 ——喷柱展开角, 度;
 $\Delta T_{кр} = t_{лик} - t_{сол}$ ——合金结晶的温度范围, °C;
 $\Delta T = t_{кр} - t''$ ——温度差, °C (在凝壳中);
 $\Delta t = t'' - t_c$ ——温度差, °C (在表面);
 $\delta = \xi / l$ ——无量纲厚度;
 $\theta = \Delta T / \Delta t$ ——相对的剩余温度;
 λ ——导热率, 瓦/(米·开);
 $\mu_{кк}$ ——结晶器往复运动频率, 赫兹;
 γ ——假松系数;
 ξ ——尺寸、厚度、坐标, 米;
 ρ ——密度, 公斤/米³;
 σ_B, σ_T ——抗张强度和屈服强度, 兆帕;
 τ ——经过时间, 秒;
 τ_L ——在结晶器中停留的时间, 秒;
 $\tau_{л}$ ——在液相线-固相线范围内局部体积的结晶时间, 秒;
 A_k ——结晶器往复运动的变化范围(振幅), 毫米;
 $a = \lambda / c v$ ——导温系数, 米²/秒;
 $Bi = al / \lambda, Bi = Kl / \lambda$ ——Бюссон数(必约数);
 $b = \sqrt{[\lambda c \rho]}$ ——吸热系数, 焦耳/(米²·开·秒^{0.5});
 c ——比热, 焦耳/(千克·开);
 D ——杂质通过液相边界层的扩散系数, 米²/秒;
 d ——直径, 米;
 E ——弹性模量, 兆帕;
 $Fo = a\tau / l^2$ ——傅立叶数(Фурье数);

G ——耗水量，分米³/秒；
 g ——单位耗水量，分米³/公斤，米³/（米²·小时），米³/（米·小时），分米³/（米²·公斤），分米³/（米·公斤）；
 h ——高度（深度），米；
 K ——在结晶器中的传热系数，瓦/（米²·开）；
 L ——结晶比热，焦耳/千克；
 l ——物体的特性尺寸，米；
 l_T, l_{III} ——方锭的厚度和宽度，米；
 $Pe = Vr''/a$ ——Пекле数（别克里数）；
 p ——水压，兆帕；
 Q, Q_z, Q' ——径向、轴向和总的热流量，千瓦，瓦；
 q ——热流密度，瓦/米²；
 $R = \xi/\lambda$ ——热阻，米²·开/瓦；
 r ——流变半径，米；
 r'' ——铸锭半径，米；
 s ——面积（表面），米²；
 t ——温度，℃；
 t_{kp} ——结晶温度，℃；
 $t_{пл}$ ——熔化温度，℃；
 t_n ——铸造温度，℃；
 t'' ——表面温度，℃；
 t_c ——周围介质温度，℃；
 v ——铸造速度，毫米/秒；
 w_c ——结晶器中的水流速度，米/秒；
 $X = 1/2 l_T$ ——方锭的半厚度，米；
 x, z ——坐标（ x ——按铸锭断面， z ——按铸锭长度）。

目 录

第一章 冷却系统的分类	(1)
第一节 结晶器.....	(1)
第二节 二次冷却装置.....	(5)
第二章 连续铸造时传热研究方法	(14)
第一节 连续铸造过程的热物理描述的基础	(14)
第二节 一次冷却区.....	(16)
一、 计算方法.....	(16)
二、 计算-实验方法	(19)
第三节 二次冷却区.....	(22)
一、 物理模拟实验.....	(22)
二、 工业试验.....	(24)
第三章 研究铸锭凝固的方法	(29)
第一节 实验方法.....	(29)
第二节 计算方法.....	(33)
一、 电子计算机数学模拟法.....	(33)
二、 分析方法.....	(60)
第四章 结晶器的传热	(72)
第一节 实验结果.....	(72)
第二节 分析计算.....	(91)
第五章 二次冷却区的热交换	(104)
第一节 实验结果.....	(104)
第二节 工业试验.....	(118)
第六章 铸锭的凝固	(140)
第一节 实验结果.....	(140)

第二节 不同热物理性能的金属铸锭凝固的计算·····	(153)
第七章 极限铸造速度 ·····	(168)
第一节 限制极限铸造速度的因素的分类·····	(168)
第二节 由发生金属破裂所限制的铸造速度·····	(169)
第三节 由发生铸锭内部缺陷所限制的铸造速度·····	(175)
一、一次冷却因素的作用·····	(175)
二、二次冷却因素的作用·····	(185)
第八章 铸锭质量 ·····	(193)
第一节 铸锭质量指标的分类·····	(193)
第二节 表面状态·····	(194)
第三节 显微组织·····	(202)
第四节 宏观组织·····	(219)
第五节 区域偏析和疏松·····	(230)
第六节 由温度应力所引起的裂纹·····	(241)
第九章 冷却系统的寿命和操作可靠性 ·····	(251)
第一节 结晶器工作壁扭曲的计算评定·····	(251)
第二节 提高结晶器寿命的试验结果·····	(253)
第三节 对冷却水的要求和操作可靠性问题·····	(258)
参考文献 ·····	(262)

第一章 冷却系统的分类

第一节 结晶器

由于应用于连续铸造有色金属和合金铸锭的冷却系统的结构种类繁多，所以作者试图对其进行分类。用于连续铸造的冷却系统的基本构件之一是结晶器。结晶器的功用是在保证有足够高的生产效率的条件下，能获得给定几何断面和所需质量的铸锭。

以前，在连续铸造有色金属和合金铸锭时，仅仅采用滑动结晶器。通常，这种结晶器的结构简单，其基本构件是外壳和工作内壁。对于圆筒形滑动结晶器来说，下文中将其工作内壁称为内套。在滑动结晶器中铸造时，可相当容易地解决开铸、防止结晶器中金属液面氧化、保持结晶器中金属液面等问题。但与此同时，滑动结晶器中的铸造过程也存在一系列的严重缺点：1) 铸锭表面与滑动结晶器内套之间的摩擦力会导致铸锭产生表面裂纹和撕裂；2) 铸锭表面和滑动结晶器的内套之间形成间隙，从而降低导热能力，产生偏析和其它表面缺陷；3) 滑动结晶器内套的扭曲和磨损，恶化了铸锭的成形条件并会导致滑动结晶器的损坏。为了克服这些缺点，苏联国内外都在寻求合理的滑动结晶器结构和一次冷却制度方面进行了大量的研究。由于研制了有效的滑动结晶器结构（这种结晶器结构改进了保护金属液面的方法和铸造及冷却的工艺制度），从而保证了一系列有色金属和合金（其中包括黄铜Л63，ЛС59-1和铜М3р等）铸锭

质量的改善，同时提高了铸造速度 v 和铸造机的生产率。此外，特别是对于那些在铸造时易于产生诸如偏析、裂纹、冷隔等表面缺陷的许多有色金属合金来说，在滑动结晶器中进行传统的连续铸造的条件下，限制了改善铸锭质量的可能性。为了提高铸锭的质量，苏联提出了新型结构的结晶器，这就是由З.Н.盖采列夫等人提出的电磁结晶器和具有异华覆盖层的结晶器〔1〕。

电磁结晶铸造法在轻合金铸锭生产中获得了广泛的应用〔2〕，这种方法也用于生产重有色金属和合金，由苏联独创的和有发展前途的电磁结晶器铸造法与滑动结晶器铸造法相比具有许多重要的特点〔2〕。这些特点包括：液体金属和结晶器器壁不产生接触；熔融金属的弯月面与铸锭水流冷却带之间的距离小（实际上在零高度结晶器中进行铸造）；液体金属在液穴中的运动是可调的。电磁结晶器铸造法的上述特点，可保证大幅度地提高铸锭质量，特别是铸锭外表面的质量（可取消对铸锭表面的铣削和车削）；提高铸锭的可变形性和半成品的质量。但与此同时，电磁结晶器铸造法要克服由于提高对保持金属液面的精度要求和提高拉锭速度的稳定性所引起的困难，对于某些合金来说，应用电磁结晶器铸造法难于获得无内部热裂纹的铸锭；电磁结晶器铸造难于防止金属氧化和对于大多数重有色金属和合金来说，由于在其表面不能形成坚固的氧化膜而难以获得高质量的铸锭。由于上述的以及其它一些原因，在生产重有色金属及其合金铸锭时，这种方法至今尚未获得广泛的应用，而仍然主要采用滑动结晶器铸造法铸造。

连续铸造有色金属和合金的滑动结晶器的结构是按以下关键性特征进行分类的：一次冷却系统的结构（I）；内套

材料 (II)，用途 (被浇铸的金属和合金) (III) (见图1)。按照第一个特征进行的分类，总结了苏联和其他国家的一次冷却系统结构的使用经验和发展趋势。结构上最简单的单腔结晶器最先得到广泛的应用，这种单腔结晶器具有一个宽度为 $\delta_c = 12 \sim 30$ 毫米的水冷槽 (见图2, a)。它们需要耗费大量的水，在其往复运动时需要耗费相当大的能量。因此，为了降低水耗提出并试验了汽化冷却结晶器来铸造铜锭。

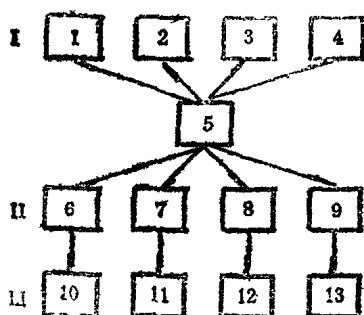


图1 滑动结晶器的分类示意图

1—单腔式；2—双腔式；3—带环形断面冷却槽组合式；4—带圆形断面冷却槽组合式；5—滑动结晶器；6—金属型；7—带有绝热填料的金属型；8—带石墨衬垫的金属型；9—石墨；10—铝、铜及其合金，钢及其它金属材料；11—铝、铜、二元和复合铝青铜 (含Fe, Ni, Mn)，铜镍合金；12—电工用铜和用磷脱氧的铜，铜-锌合金 (锌少于10)%；13—铜

汽化冷却的滑动结晶器，按其结构可以看成单腔结晶器的变种，它们的特征是工作内套具有起棱表面。汽化冷却结晶器具有某些优点，其中值得一提的是能大大节约用水。但是，它们至今尚未在连续铸造有色金属及其合金铸锭中获得应用。

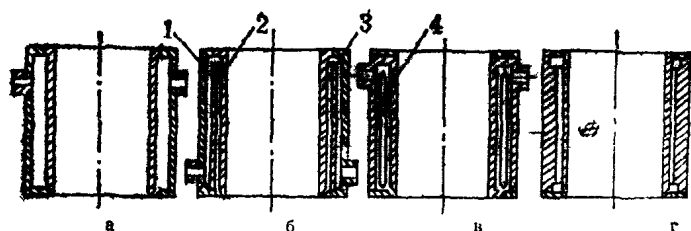


图2 滑动结晶器结构示意图

a—单腔的，б—双腔的，в.г—带有环形(в)和圆形(г)断面冷却槽的组合式滑动结晶器；1—外壳；2—挡板；3—内套；4—销子

滑动结晶器的另一变种——带有窄水冷槽的双腔结晶器和具有圆形或环形断面冷却槽的组合式结晶器（图2，б～г）获得了最广泛的应用。以下将详细地分析这些滑动结晶器方案的研究结果。结果表明，滑动结晶器比单腔结晶器具有更大的优越性。

从按第二个特征进行分类的情况来看，用铜或低合金化的铜合金做内套的滑动结晶器获得了最广泛的作用，带绝热衬垫的滑动结晶器在国外（用于铸造铝青铜和铜镍合金）获得了有限的应用。这些滑动结晶器的结构特点是具有石棉覆盖层的铸铁外壳和被冷却金属部分的高度小（15～20毫米）〔3〕。

在铸造铜和某些铜合金铸锭的许多情况下，为了减少摩擦，提高铸造速度和结晶器的使用寿命，采用了带石墨衬垫的滑动结晶器〔4，5〕。这种结晶器在制造和安装时比较复杂。就圆形滑动结晶器来说，能较容易地克服上述困难，而对于扁形滑动结晶器来说，则难以克服上述困难。某些外国公司—“Асарко”，“Виланг-Верке”——采用用整块石墨做成的结晶器来铸造铜合金。

苏联在生产重的和许多轻的有色金属及其合金铸锭时，广泛应用了带金属内套的单腔滑动结晶器。在作者的参与下，对适于重有色金属和合金铸造的较有效的双腔滑动结晶器进行了详细的研究，并已运用于工业生产。本书特别注意研究上述最有发展前途的结晶器的热工作业。由于考虑到扩大其应用范围的趋势，也必须研究在带有石墨衬垫的滑动结晶器和电磁结晶器铸造有色金属和合金铸锭时的传热特性和铸锭的形成特性。

第二节 二次冷却装置

已知的二次冷却系统可按如下特征进行分类：1) 冷却介质的种类（水、蒸汽、水-空气或蒸汽-空气的混合物）；2) 制备和供给冷却介质的方法和装置：a) 喷流集中冷却——用通过狭缝的连续水流或用滑动结晶器或者喷水室的射流束方式供水；б) 水雾冷却——用机械喷雾器（喷雾器、喷管等）将水分散成小水滴；в) 水-气或蒸汽-空气冷却——用压缩空气或强制扇风的空气，或者借助于风动喷雾器、不同类型的混合器产生的蒸气来喷水；г) 水幕冷却——在铸锭的周围建立水幕；д) 利用与铸锭接触的已冷却的表面进行冷却；е) 综合冷却方式——两种或多种冷却系统结合使用，如水幕冷却系统和喷流集中冷却系统结合的冷却方式。3) 结构特征——与结晶器结构相关的系统及与其无关的系统；4) 冷却介质的供给——从滑动结晶系统中注入水流，或单独供水。

喷流冷却可能是集中的，也可能是分散的。水-气冷却

根据构造型式可分为：联合式的结构，即水和空气形成一个封闭系统，制备和供给水-气混合物（水-气共用一个集流管，通道、调气室、喷嘴装置等等）；分散式的结构，具有不同类型的，在结构上彼此无关的喷射装置。

下面提出了各种不同结构的冷却系统方案（为简化起见，用开头一个字母标记出各相应系统的名称）：C-1，Э-1——喷流和水幕集中冷却系统（用于扁铸锭）；Э-2~Э-4——用于圆锭的水幕集中冷却系统（设有单排和多排喷水装置）；Ф-1~Ф-3——单层和多层喷雾冷却系统；В-1~В-5——水-气集中冷却系统（在混合物喷雾室上设有一排和两排喷嘴，这些喷嘴以各种不同的角度 β_1 与喷射器接合）；В-6——水-气冷却系统。

在连续铸造重有色金属及合金和轻有色金属及合金方面，仍主要采用喷流冷却系统（集中的和分散的）〔6〕。用得最广泛的是集中喷流冷却系统。在这种系统中，其滑动结晶器中的所有水流都直接地喷向铸锭（见图2, 3, a）。在这种情况下产生一个喷流冷却带。这种被广泛采用的冷却系统，其优点是经济，制作和使用简单，结构紧凑和工作安全可靠。用这种系统进行冷却可保证铸锭具有高的致密性和机械性能指标。同时，这种方法也存在一些实质性的不足。主要的缺点是，由于沿铸锭断面上的冷却速度很不均匀，在温度应力的作用下容易产生裂纹，所以，其铸造速度低。利用上述冷却系统来提高铸锭速度 v ，会导致铸锭产生裂纹，特别是对于有热脆倾向的金属和合金更是如此。许多研究多年的工业生产表明，对于上述类型的合金，采用这种系统（特别是在提高铸锭速度 v 方面）会受到很大的限制，实际上是不可能的。

强化铸造过程要求在二次冷却区从铸锭上分散导热。在这个方面，从结构上最简单的解决办法是，分散喷流冷却系统，这种冷却系统依靠多非强制流动装置（安装在结晶器下面的喷射器或水套）将水的细流喷射到铸锭上去。其喷射装置是这样一个闭合的密封室，它可独立地供水，并设有一系列用于排水的孔或缝隙（通常相对于铸锭的角度为 $\beta_1 = 20^\circ \sim 25^\circ$ ）。水套是一个空心圆筒或外壳（用于圆铸锭），它由

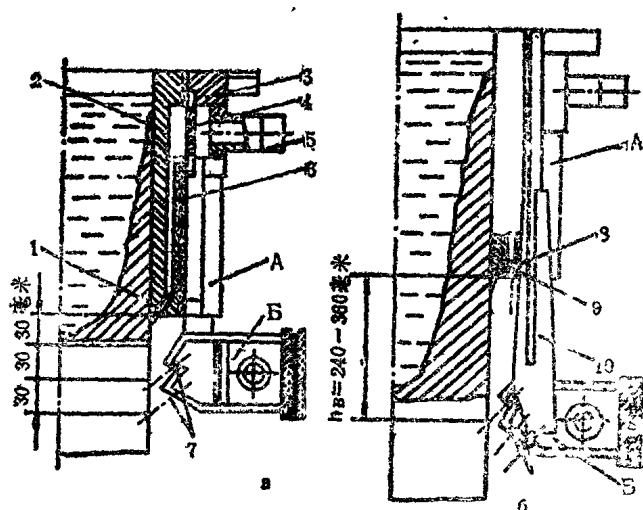


图3 铸造铜扁锭的冷却系统：喷流集中冷却系统，方案C-1 (a) 和水幕集中冷却系统，方案3-1 (b)

A—结晶器；B—喷水装置；1—铸锭上总排水口；2—内套；3—外壳；4—过滤器；5—供水连接管；6—隔板；7—缝隙；8—向铸锭供给部分水的出水口；9—供水到水幕上的出水口；10—吊架

一个或若干个按高度排列的在工作内壁上开孔 ($\beta_1=90^\circ$) 的单独区段组成。喷流分散冷却系统获得了工业性应用, 特别是在其他一些国家广泛用于带有两排到三排喷水装置的铜和黄铜半连续和连续铸造机上。喷流分散冷却系统的应用实例是在铸造黄铜和青铜铸锭时所研究的强制流动装置的结构, 其形式为单段水套式, 水套的高度达300毫米, 水套上开有不同直径 d_{or} (0.6~1.0毫米) 和不同数量的孔口, 角度 $\beta_1=90^\circ$ [7]。应该注意, 这种结构有重大的缺点, 诸如: 由于很容易淤塞, 所以在操作时可靠性小; 在结晶器下用肉眼检查铸锭较困难等等。

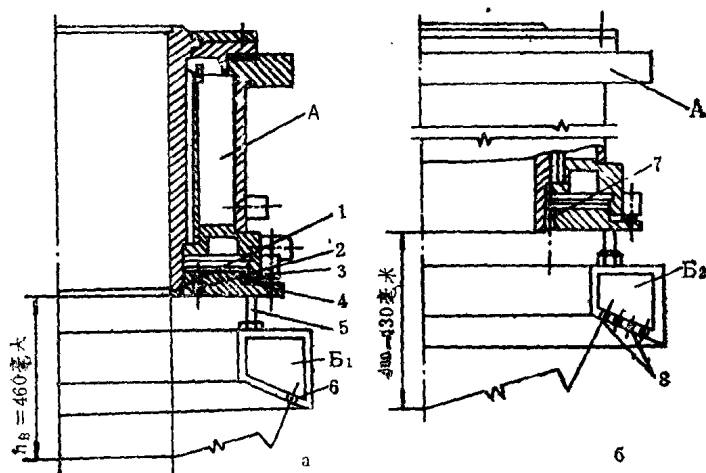


图4 铸造铜圆锭 (直径300毫米) 的水幕集中冷却装置示意

图: 单排式3-2 (a) 和多排式3-4 (b) 喷水装置方案
A—结晶器; B₁, B₂—单排和多排喷水装置; 1—衬垫;
2—供水到水幕上的开孔; 3—带紧固螺栓的凸台; 4—
结晶器的下法兰; 5—吊架; 6—开孔 (单排); 7—用
于水幕 (隔水帘) 排水的缝隙; 8—开孔 (四排)

在文献[8]中，半连续铸造Mn15-20合金扁锭时分散冷却是通过在离滑动结晶器120~140毫米的距离处布置喷射装置实现的。喷射器中的水从滑动结晶器窄面的水套中流入，而通过内套从滑动结晶器的宽面排出。水幕集中冷却系统包括：以平行于铸锭的水流，或连续的水幕的方式从滑动结晶器中排出所有水的排水装置；距结晶有较大距离的一排或多排喷射器[9~11]。从滑动结晶器的底部到液流冲击的第一区段（即所谓的空气中冷却的“干燥”区段）的距离 h_B 为200~460毫米（图3，6，4）

无论是水幕分散冷却系统还是水幕集中冷却系统都存在着喷流冷却的缺点：在铸锭上液流互相交错的地方，局部散热系数 α 高；难于保证沿铸锭周边均匀散热和在足够宽的范围内均匀地调节冷却表面的冷却强度和冷却面积。为不断地提高连续铸造法的技术经济指标（生产效率、金属质量、经济性），扩大铸锭品种，特别是增大铸锭厚度和生产有热脆倾向的合金，要求进一步完善二次冷却系统及二次冷却制度。

强化有色金属及合金连续和半连续铸造过程的问题的根本解决办法是，建立安全可靠的、可调节的、紧凑的分散冷却系统，以保证在足够长的铸锭区段和必须的冷却强度范围内散热高度均匀并可灵活地控制冷却条件。在这方面，广泛用于连续铸坯机并表现出良好性能的喷雾冷却系统以及铸锭的水-气冷却系统已引起人们的注目。

苏联文献详细地讨论了连续铸坯机的喷雾系统和喷雾器的装置与使用问题[12]以及喷雾冷却的热交换特性，介绍了研究方法和研究结果[12~18]。设计了多种喷嘴结构[19，20等]，研究了这些喷嘴的使用方法和冷却制度的控制方法。

完善喷雾系统的方向主要是提高安全可靠，改善喷雾质量（弥散度和均匀性）和沿铸锭周边冷却的均匀性。为此目的，应该注意喷嘴的安装，比如说，应把它们安装在离铸锭不等的距离上，并要求它们垂直于铸锭移动，且围绕铸锭中心线转动。

提出了检查喷嘴堵塞和工作情况的方法和装置[21]，以及自动清洗系统的方法和装置，例如用压缩空气吹洗。规定了必须机械净化过滤器中的水。

现代连续铸坯机的喷雾系统，在大多数情况下可以采用钢锭的典型冷却制度。同时，也应该注意到喷雾系统的不足，其主要的缺点是沿铸锭周边散热不均匀，这种现象主要在铸造扁铸锭时出现。在操作使用方面存在的缺点有：易于堵塞和必须有高的水压（对于缝隙式喷嘴）。作者的研究[22]认为，由于难于遵循热流与水耗之间的最佳关系，所以水雾（喷雾）冷却系统是低效率的，其水滴尺寸大，冷却范围窄，并在此冷却范围内可能产生热冲击。

近来，在连续铸坯机上应用以压缩空气将水滴雾化成细小颗粒喷到铸锭上的水-气冷却系统。苏联[23]和国外[17, 22]在连续铸坯机上运用这种系统的经验说明了其技术上和经济上的效果。这种方法与喷雾冷却相比，可提高散热强度[22]和铸造速度[17]，改善铸锭质量——由于沿铸锭周边的散热很均匀和扩大了其调整的范围[17, 23]，所以，降低了裂纹废品[22]，减少了弯曲以及圆铸锭的椭圆度和方铸锭的菱形度。

在装备了水-气冷却系统的连续铸坯机上，压力为 $p_B = 0.3 \sim 0.4$ 兆帕的压缩空气进入到混合器-喷射器中，这一装置固定在滑动结晶器的下端，从结晶器下端到混合物喷出孔

中心线的距离为60毫米，而从喷出孔到铸锭的距离 $l_{\text{сл}}=100 \sim 120$ 毫米[23]。在上述研究中确认，这种系统比喷雾系统更简单，更便宜且更安全可靠。在由“Файвз Лилль Каль”公司研制的连续铸造装置的二次冷却系统中，喷雾器有中心圆锥形水通道，出口处有环形空腔包围。切向送进的水流在孔腔中旋转，并被空气流雾化约为100微米的水滴。在相应的压力比为0.05:0.5兆帕的条件下，水量和空气量的重量比为1:6。在大多数已知的喷雾装置结构中，借助于各自不同的角度，从互不相关的通道（小室）中供送交叉的水流和空气流的方式获得水-气混合物。在这种情况下，可获得分散度高的混合物；水滴的尺寸为20~100微米[22]。有人提出了一种用于制备和供给混合水雾的喷嘴-混合器装置，这种装置具有低的气压（0.003~0.01兆帕），大尺寸的排水孔（ $d_{\text{от}}=3 \sim 6$ 毫米），它可在很广泛的范围内（从0.0017~0.17分米³/秒）调节水流量。另一种众所周知的喷雾器装置是具有三个互相平行独立通道的方断面管，一个通道通水，其余两个通压缩空气。沿着管道的一边以各自不同的角度配置了排水和排气孔。在“Файвз Каль Бэбкок”公司研制的装置中，用压缩空气将水弥散雾化（雾幕）的过程是由水流和气流相互碰撞来实现的，并且水主管和气主管一个挨一个地布置，或者一个主管部分地包围另一个主管[17]。混合物的喷柱（雾幕）呈全锥形。提出了一种高质量的喷雾器，它的压力 $p_{\text{в}}$ 必须为0.12到0.22~0.25兆帕，在单位耗水量 g 为2~3.4分米³/公斤的条件下，水-气之比可在16到30的范围内变化。用于通空气的开孔尺寸为 $d_{\text{от}}=3.5$ 毫米，而用于通水的开口尺寸为 $d_{\text{от}}=2.8$ 毫米。该装置曾用于圆钢锭的冷却系统，效果很好，由于散热系数 α 从650瓦/（米²·开）提高

到了900~1100瓦/(米²·开)，从而提高了 ν 值。“Компани Франсэз де Мет”公司研制并采用了一种类似的结构：在二次冷却区内，在与滑动结晶器底座连结的整体外壳上，沿高度（分成若干层次）成对地配置有开孔的水和空气环形集流管，水流和空气流通过其中，形成细小弥散的混合物。

对于重有色金属和合金的铸锭，其中包括直径为300毫米的圆铸锭，作者参与了研制喷雾冷却系统和水-气冷却系统的工作（见图5，6）。

在所研制的装置中，把水-气混合物制备装置安置在一次冷却区中（图6），并以法兰3、喷嘴圆盘7以及配置于它们之间的气室的形式来实现。在这种情况下，在顶盖中开有孔，在孔中装有可拆卸的喷嘴9（喷嘴与垂直线所形成的角度 $\beta_1 = 5^\circ \sim 10^\circ$ ，孔的间距 l_{or} 比其内孔直径大9~14倍），而向下缩小的孔10的圆锥在法兰上与喷嘴共轴，而且，从喷嘴9的下基面到法兰3的下基面距离等于喷嘴直径的2~5倍。这种装置的研究结果见第五章。

水-空气冷却系统的缺点是，由于在接近音速的高速下，水-空气流的磨损作用与水腐蚀（特别是排出口的喷嘴）相结合，使这一系统容易磨损，需要增加动力源（压缩空气）和相应的能耗。但是，国外在连续铸造重有色金属和铝（“Изомет”过程）时使用水-空气冷却系统的地方并不少。

因此，综合已有的经验和文献资料，可以挑选出如下最有实际意义的冷却系统：1）集中喷流冷却系统（见图2，图3，a）；2）水幕-集中冷却系统（见图3，б，图4）；3）喷雾冷却系统（图5）；4）不带自动喷流装置的和带喷流装置的水-空气集中冷却系统（图6）。这些系统由作者研究过并将在第五章中详细讨论。