

喷射理论及其应用

韩惠霖 编著

浙江大学出版社

喷射理论及其应用

韩惠霖 编著

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了在无边界空间中不可压缩流体的喷射流,可压缩的炽热喷射流和两相喷射流的基本理论以及当有伴随流时,不可压缩流体的喷射流和可压缩气体喷射流的基本理论。并结合工程应用对喷射技术进行了一定论述。书中还对超音速喷管的收缩段,初始扩张段和扩张段的型线以及型线边界层的修正进行了阐述和计算,并提出了喷射器新的设计计算方法。

本书可作为有关专业的教材及教学参考书,亦可供从事流体力学、喷射技术、流体工程、动力工程和其他有关工程的技术人员参考。

喷 射 理 论 及 其 应 用

*

韩 惠 霖 编 著

责任编辑 李桂云

*

浙江大学出版社出版

浙江良渚印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

*

开本850×1168 1/32 印张9.1875 字数 229.7千字

1990年11月第1版 1990年11月第1次印刷

印数 0001—1500

ISBN 7-308-00620-4/O·084 定 价: 2.40元

目 录

第一章 绪论

第二章 喷射流的基本理论

§ 2-1 在无边界空间中不可压缩流体的喷射流·····	(22)
§ 2-1-1 自由喷射流的特性·····	(22)
§ 2-1-2 自由喷射流的流动特性·····	(32)
§ 2-1-3 轴对称自由喷射流的解析解·····	(37)
§ 2-1-4 平面自由喷射流的解析解·····	(43)
§ 2-1-5 自由喷射流温度场和浓度场的流动特性·····	(52)
§ 2-1-6 按照普朗特自由湍流理论来确定喷射流温度场 和浓度场的解析解·····	(57)
§ 2-1-7 按照泰勒自由湍流理论来确定喷射流温度场和 浓度场的解析解·····	(61)
§ 2-2 在无边界空间中可压缩的炽热气喷射流 (或 低温气体喷射流) ·····	(72)
§ 2-3 在无边界空间中两相喷射流 ·····	(81)
§ 2-4 当有伴随流时, 不可压缩流体的喷射流 ·····	(86)
§ 2-4-1 当有伴随流时, 喷射流的特性·····	(86)
§ 2-4-2 当有伴随流时, 喷射流边界层的几何特性·····	(95)
§ 2-4-3 当有伴随流时, 平面喷射流的初始段·····	(106)
§ 2-4-4 当有伴随流时, 轴对称喷射流的初始段·····	(108)
§ 2-4-5 当有伴随流时, 在喷射流主体段中一般关系 式·····	(113)
§ 2-4-6 当有伴随流时, 平面喷射流的主体段·····	(118)
§ 2-4-7 当有伴随流时, 轴对称喷射流的主体段·····	(126)
§ 2-5 当有伴随流时可压缩气体喷射流·····	(134)
§ 2-5-1 当有伴随流时, 可压缩气体湍流喷射流的一般	

特性.....	(134)
§ 2-5-2 当有非等温伴随流的气喷射流在湍流边界层内 流动特性.....	(142)
§ 2-5-3 当有相当大气体的伴随流速度时, 在喷射流边 界层内流动特性.....	(159)
§ 2-5-4 当有伴随流时, 气体喷射流初始段计算的基本 关系式.....	(168)
§ 2-5-5 加热气体喷射流的主体段.....	(172)
§ 2-5-6 气喷射器流动特性曲线的分类.....	(191)

参考文献

第三章 喷管的型线计算

§ 3-1 轴对称的理想收缩段型线计算.....	(197)
§ 3-2 轴对称的超音速扩张段型线计算.....	(206)
§ 3-2-1 引言.....	(206)
§ 3-2-2 轴对称超音速过渡区域的型线DE计算.....	(211)
§ 3-2-3 初始膨胀段的型线CD计算.....	(222)
§ 3-3 超音速喷管的边界层修正.....	(226)
§ 3-3-1 边界层的基本方程.....	(228)
§ 3-3-2 定常平面可压缩层流边界层的计算.....	(232)
§ 3-3-3 定常平面可压缩湍流边界层的计算.....	(237)
§ 3-3-4 定常轴对称可压缩湍流边界层的计算.....	(253)

参考文献

第四章 喷射器原理和设计计算

§ 4-1 喷射器的分类.....	(257)
§ 4-2 气喷射器的近似计算方法.....	(259)
§ 4-3 气喷射器的改进计算方法.....	(267)
§ 4-3-1 简单的喷射器原理.....	(267)
§ 4-3-2 计及摩擦损失, 膨胀损失和冲击损失的喷射器 原理.....	(272)

参考文献

第一章 绪 论

喷射技术是利用喷射原理在工程中应用的一门新兴技术，目前，已广泛应用于国民经济的各部门，并已产生了非常明显的经济效益。

喷射技术按其用途可分成如下十大类：

- (1) 喷射器；
- (2) 喷射切割和焊接；
- (3) 喷射燃烧；
- (4) 喷射冶炼；
- (5) 喷雾干燥；
- (6) 喷灌、喷洒、消防和清洗；
- (7) 喷涂、喷焊和喷补；
- (8) 喷射钻探；
- (9) 喷射发动机；
- (10) 喷射纺织。

一、喷射器

具有主喷射流和被引射流的喷射器，目前，已得到了广泛应用。它可以利用串联不同级数的喷射器来替代不同真空度的机械真空泵，适用于蒸馏、蒸发、浓缩、干燥、结晶、吸收、混合、传质、加热、冷凝、萃取、制冷、除氧、增氧、除臭、除尘、除烟雾、包装、冷冻、脱水、提水、输送、搅拌、三废处理等用途，已广泛应用于化工、医药、化肥、染料、印染、石油、纺织、化纤、轻工、食品、制糖、制盐、制碱、选矿、冶金、塑料、橡胶、

建筑、电子元件、造纸、炼油、热电站、水电站、排灌、锅炉、环保等部门，这是由于喷射器具有如下特点：

(1) 能抽吸干的、湿的或有腐蚀性气液混合物，甚至带有尘粒的混合物；

(2) 能产生工业操作上所需的任何真空度。产品规格可满足不同抽吸量的要求；

(3) 无运动部件和密闭式的结构。因而，结构简单、操作和维修方便、噪音和腐蚀影响小；

(4) 与机械真空泵相比，设备费用低、占地面积小，效率亦是合理的。

还须指出，在蒸汽网路中，为了充分利用多余低压蒸汽，常利用蒸汽喷射增压器来提高蒸汽的工作压力，即该喷射器当作压缩机。

喷射器除了上述的众多用途和应用外，它又是一个年青而又亟待加速开发项目。当前在国际上最热门是将小小喷射器替代生产流程中的反应塔或反应罐，成为管道反应的核心部分。如此，可使生产流程所需设备的费用大大降低。例如，国内某厂用 $\phi 80 \times 910\text{mm}$ 的溶氯喷射器替代 $\phi 500 \times 7500\text{mm}$ 的填料塔，溶氯效果皆为50%。但喷射器的设备体积比原体积缩小了200倍，设备重量减轻了12倍，大大提高了单体设备的生产强度，工艺流程也得到了简化。

在大中型水电站中供水，目前国内外正在采用喷射泵技术供水来替代水泵供水，即喷射泵利用上游水库压力水为动力，用来抽吸一定量的下游水，以满足机组的技术供水要求。由于它具有无运动部件、结构简单、工作可靠、费用低廉，及运行管理方便等优点，因此，近年来，在国内外的水电站技术供水系统中得到广泛应用。例如，装机 $640 \times 10^4\text{kW}$ ，单机容量为 $65 \times 10^4\text{kW}$ ，工作水头为190m的萨扬-舒申斯克水电站采用了输水量达 $2000\text{m}^3/\text{h}$ 的可调式喷射泵，作为机组主供水设备。我国的白山、龙羊、东

江等水电站机组冷却供水全部采用了喷射泵。

近年来,国外的石油开采,正由喷射泵替代活塞泵进行采油,美国的用量已达水力活塞泵的一半,这是由于它对井深不敏感,对井温和出砂,出游离气都无要求,直井和斜井都能使用,且结构简单、无运动件、工作可靠、换修方便、产量较高,虽效率较低,但仍得到发展。在我国,华北、胜利等油田亦在自行设计和研制一些采油喷射泵。

总之,随着喷射器广泛应用,喷射器已越来越明显地在各生产部门产生显著经济效益。

但喷射器内动量、质量和热量交换的机理及其理论计算,目前,在国内外尚处于起步阶段,有待于大力研究和开发。即使对研究较早的喷射器动量交换机理的理论计算,也仅对具有收缩喷嘴的气体喷射器的流动特性能相当准确地进行定量系统计算,而对具有超音速喷嘴的喷射器的流动特性,目前还不能准确地定量计算,仍采用理论、实验和经验相结合的办法进行设计计算。至今,国外许多学者对喷射器的有关理论如:喷射器扩压段喉部存在激波对喷射器流动特性的影响;气液两相的喷射器理论和计算方法;喷射器内两相热交换,喷射器中两相流混合激波的概念和计算等专题均做了许多研究,并提出了相应的理论和计算方法。世界各国学者理论和试验研究已证实,在喷射器中利用多喷嘴替代单喷嘴,可导致生产量明显提高和所消耗功率下降;利用喷射器长喉部,由于喷射液滴与所抽气体所形成乳浊液产生压力急剧提高区域,从而可大大提高液抽气的经济效果;变截面喷嘴的喷射器,可使其经济地适合于变工况运行需要。

二、喷射切割和焊接

喷射切割包括:氧切割、等离子体切割、水切割。

氧割流主要着重于超音速氧割流的技术开发,用于切割厚到几百毫米钢料或进行成型切割。它由一定压力的高压氧通过割嘴喷射出高速氧割流,经点燃遇到金属(主要是铁)引起剧烈燃烧,生成熔融的氧化铁,放出大量的反应热(一克铁生成 Fe_2O_3 时,放出热量为4814J,而生成 Fe_3O_4 时放出热量为6614J,比割嘴预热火焰的热量高6~8倍。而一克铁加热到熔化温度(约1500℃)只须670J的热量,所以氧割不是金属熔化过程,而是金属燃烧过程。切割时所须总热量的85%来自燃烧反应热,只有15%是由预热火焰所提供。高速氧切割是60年代末发展起来的一项新技术,它是在普通氧割流基础上,通过提高氧压和改用超音速喷嘴来提高氧割流速度,使产生更剧烈的燃烧和强烈冲刷切口的氧化溶液,从而获得切割速度使切口光洁度明显提高。目前,氧压已从6~8 kg/cm²发展到16~36 kg/cm²,甚至高达100 kg/cm²(表压),氧割流的出口速度由马赫数 $M=1.8\sim 2$ 提高到 $M=3\sim 3.6$ 。因此,不但提高了切割速度和切割厚度,而且提高了切口光洁度和降低了割缝宽度。

利用高压氧割流还可用来切割厚为20~70cm的混凝土、钢筋混凝土、花岗岩和对混凝土结构熔出直径达40cm的熔孔,它是借助 FeO 与 SiO_2 化合而生成 $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 溶液,然后被割流吹出。

等离子体切割亦是60年代发展起来的一项新技术,又称等离子弧切割,由于等离子弧受水冷收缩喷嘴型线,使等离子弧收缩而进一步释放电离热能、产生更高温度,此现象称为机械收缩效应。由于喷嘴受水冷却,沿喷嘴壁流过的气体由于温度较低而不易电离,所以形成一个导电、导热性能很差几乎是中性的气体“套”。此气体套一方面压缩电弧使其不向外扩张,另一方面保护喷嘴不被烧坏,使通过喷嘴的气体形成一个相当大的径向温度梯度,越是靠近中心,电离度和导电性越好,于是,带电粒子流向着电离度高、导电性较好的喷嘴轴线处集中,使电弧柱进一

步压缩，并称为热收缩效应。因而，弧柱中心能量密度进一步提高。又由于弧柱可看成许多载流导线束，由于电流是同向的，所以彼此互相吸引，从而构成一组从弧四周向中心压缩的电磁力，使弧柱进一步缩小，该现象称为磁收缩效应。由于等离子弧具有上述三种收缩效应，使等离子弧的能量密度较一般电弧提高十倍以上，温度提高五倍以上（约2万度左右）。由于弧柱温度高、能量集中，所以，能对绝大部份金属进行切割（包括导热性好的铜、铝，熔点高的钨、钼、钛，以及不锈钢、铸铁、镍和高温难熔合金）。等离子弧切割具有速度快、切缝光洁、成本低和热影响区小的优点。尚须指出，等离子弧是将金属熔化而切割。

除一般的气电等离子弧切割外，根据生产情况，经济效果和特殊需要，又相应地发展了微束等离子弧切割（喷嘴孔径用到0.1~0.4mm），压缩空气等离子弧切割（其特点是成本低气源容易解决），水再压缩等离子弧切割（喷嘴不易坏，切速快，切缝窄、能得到较垂直切边），水下等离子弧切割等。

据东德中央焊接研究所报导，利用等离子电弧和高速氧割相结合的切割方法，可以突破过去所认为最高理论气割速度4.3m/min。事实上，在研究试验中，气割速度已达到了5.4m/min。

等离子弧焊接亦是近期发展起来新技术，当它与氩弧焊和埋弧焊相较，具有焊接过程稳定，焊接电源小，焊接速度快，热影响区小，变形小，熔池保护好，焊缝正反面成形美观，焊缝内部质量好，生产效率高等优点。三种方法所焊接头的机械性能基本相同。由于等离子弧的能量密度高而集中，所以，具有熔深大、焊缝窄、热影响区小、焊件不开坡口、单面焊双面成形和生产效率高等优点。它可对绝大部份金属进行焊接。当今，穿透等离子弧焊接已发展到对不锈钢对接不开坡口一次焊透12mm。等离子弧的焊接速度要比非消耗性电极的氩弧焊的焊接速度高50~300%。对微束等离子弧焊接能焊接最小厚度（或最小直径）达

0.01mm。等离子弧正在冶金、化工、半导体材料、动力工程等领
域得到新的应用。

但是,由于在操作时产生有害气体(主要是臭氧、NO和NO₂)、
金属烟尘、光辐射、高噪音、高频电磁场和放射线,因而,使等
离子弧尚得不到广泛推广,而且在操作时必须配备相应的防护设
备和防护工具。

等离子体喷流的机理分析,是当前国际切割学术会议上热门
学术论题,是当前国际上正在发展着研究课题。由于它存在着动
量、质量、热量和电荷交换,存在着内摩阻、扩散、热传导和电
流传导等的所谓等离子体的输运过程。在输运过程中产生离解、
电离、复合和化学反应。因此,在动量方程和能量方程中存在着
粒子间碰撞项,致使方程组求解非常困难。而在作为连续介质的
电磁流体流的基本方程组中,不存在碰撞项,仍可用其基本方程
组近似求介。对等离子体喷流的机理分析,尚有待于人们去进行
深入研究和开发。

高压水喷射流是一门新技术,近期来发展较快,应用也日益
广泛。从原理上讲,它与我国煤矿中采用已久的水力采煤技术基
本相似,都是使具有一定压力的水通过喷嘴射出喷射流,以此作
为切割或破碎物料的工具,不过高压水喷射流的水压较高,一般
为300kg/cm²以上,高者达每平方厘米数千公斤。高压水喷射流
所采用喷嘴出口直径较小,通常在2~3mm以下,有时仅为零
点几毫米。这样就可以在很小区域内集中极大的能量来切割或破
碎各种物料。由于是用普通的水作为工作介质,所以,在安全、
成本等方面都有许多独特的优点。

国外已有高压水喷射切割机出售,可用于切割塑料、木材、
皮革、胶木、锡、铅等软金属,并具有良好光洁度。目前,有许
多国家正在加紧用高压水喷射流对煤、岩、混凝土的切割和破碎
的研究工作,以期能在开采煤矿或金属矿,水利工程,市政工程中

得到应用。高压水喷射切割是煤矿开采今后发展的主要方法，它能降低刀具消耗，可传递较高的功率，消除了足以点燃积聚瓦斯的火花，并使煤尘含量显著减少，将逐步发展成为开掘其他矿床或岩体的重要手段。

在70年代初，美国科罗拉多矿业学院等单位进行了高压连续水喷射流辅助盘形滚刀破岩试验，初步结果表明，在推力和扭矩相同的情况下，用水喷射流辅助破岩的切割速度可比单纯机械破岩快2倍。据南非采矿协会报导，将水喷射流直接冲射在或稍超前于机械截齿造成的破碎区上，以辅助破碎、碎落或切割岩石。在抗压强度超过 2800kg/cm^2 的石英岩中，仅仅采用 700kg/cm^2 的水喷射流压力，就达到了比纯机械切割高五倍的切割速度。为了加快钻进速度，首先应是改进喷嘴的几何形状，其次是采用空化喷流，再其次是稍加高分子长链聚合物（如聚乙烯氧化物）来改进喷射流结构和稳定性。

高压水喷射流对物料所施加载负不同，可分成为：对物料连续稳定施载的连续喷射流，对物料施以脉冲载负的脉冲喷射流和介于两者之间的混合喷射流，关于在空气中紊流水喷射流，至今尚未像气体紊射流那样进行系统研究和理论分析。仅对紊流水喷射流的流动特性进行了初步研究和分析，并通过实验进行了验证，水喷射流破碎岩石的过程颇为复杂，它涉及到应力波传播，压缩与剪切破碎、冲蚀、成坑和水楔作用造成的大规模裂缝扩张等。这一系列现象的持续时间仅为几分之一微秒到1秒。当前，正在利用空化水喷射流来节省能耗。所谓空化水喷射流，是紊流喷流，它有意地激发出蒸汽和气体空穴，以扩大流速较低的水喷射流的冲蚀作用，这是由于空化将产生极其集中的局部压力增高，造成物料表面迅速破碎。如用来割煤，空化水喷射流要比非空化水喷射流能在低得多的工作压力和比能下成功地割煤，据报导当切割出深度相近的截槽，所需的压力仅为五分之一，比能仅

为二分之一。

三、喷射燃烧

对液体或气体燃料的燃烧都存在着将燃料雾化与氧化剂混合和燃烧共同性问题，而燃料雾化是通过喷嘴喷射得到。燃料雾化已广泛应用于动力机械（尤其是汽油机、柴油机和燃气轮机），燃油或燃气锅炉、加热炉、热处理炉、锻造炉、干燥炉、熔炼炉、炼焦炉、烧结炉、生活炉等方面。为了降低燃料成本费用，常采用重质油。为此，对重质油雾化、混合和燃烧的研究和技术开发，具有相当大经济价值。但由于气体燃料燃烧速度快，几乎没有灰份，允许大幅度提高烟气流速，受热面的积灰、污染远比燃煤、燃油时轻，不需要吹灰设备，对流受热面的传热性能良好，所以，燃气炉可比燃油炉有更小体积，从而大大节省了金属和耐火材料消耗，对烟囱排出废热气也比较清洁，还可对它的余热进行利用。所以，虽燃料成本较高，但还是得到了较广泛采用。

为了使重油能够完全燃烧，尽量避免冒黑烟和结焦现象，必须加速油的蒸发，减少油的热解和裂化反应。要加速油的蒸发就要求油的雾化好。油滴的直径越小，则单位油量的受热面和空气的接触面就越大，因而蒸发就越快。为了减少油的热解和裂化，要求油的蒸气能及时均匀地与空气混合。因此，重油燃烧好坏主要取决于雾化和混合。喷油喷嘴的作用就是造成良好的雾化条件和混合条件。对燃烧最适宜的粒度是直径小于 0.05mm 的油滴，加热炉要求喷出的雾滴群中小于 0.05mm 的油滴为 85% 以上，最好有 5% 的油滴小于 0.02mm ，这样有利于着火迅速和火焰稳定。为了强化重质油燃烧。除了提高燃料的雾化质量外，还可采用分段供给空气的多段燃烧，如我国RK型低压喷嘴，它对火焰根部只供给着火和最小颗粒液滴燃烧所必须的一部份空气量，其余空气

量是沿火焰长度分段供给。空气分布的特点确定于喷嘴的用途和结构。如此,可避免在燃料雾化区内(即火焰根部)供入全部空气量所导致妨碍火焰开始段温度迅速提高,影响着火前的过程变化。这是燃料喷嘴技术开发的重要方向。利用旋喷流来强化燃料和空气混合,随着气流紊流度和旋转度增加,可使不完全燃烧直线下降。还可采用反相流来强化热交换,由于逆流导致相对速度增加可加速燃料和空气混合。

野奈基(Ю·П·Енякин)的研究指出,当存在反相流时,可导致燃料液滴被二次破碎,如此,可降低对喷嘴雾化燃料质量的要求,当流速为 50m/s 时,所有大于 $300\mu\text{m}$ 直径的液滴均受到二次破碎,比较小的油滴在互撞区中所形成高温的火焰核心中作振荡运动,因而增加了油滴在该区内的停留时间,从而可能大大强化燃烧。

燃油喷嘴又可分成低压喷嘴、高压喷嘴和油压离心喷嘴。国内皆有定型生产。低压喷嘴用风机就能满足风压,喷嘴能力一般不超过 300kg/h ,空气预热温度一般不超过 300°C ,火焰短而软。高压喷嘴由于雾化剂压力高,流速大,因而雾化质量好,调节范围大,火焰长而硬,适合于热负荷较大的加热炉和熔炼炉上使用。油压离心喷嘴,结构比较简单,动力消耗少,费用低,助燃空气可以预热到高温,但雾化质量较差,要有较大的燃烧空间。

煤气燃烧过程可分为三个阶段,即煤气与空气混合,将混合物加热到着火温度和完成燃烧反应温度。上述三个阶段中最重要的是混合过程,混合过程的快慢将会直接影响到煤气燃烧速度和火焰长度。煤气的混合过程是一个紊流扩散和机械掺混过程。保证燃烧反应进行的主要因素是着火温度和着火浓度极限。当空气煤气混合物向炉内喷出速度小于火焰传播速度时,则火焰会回窜到喷嘴内部产生回火。反之,空气煤气混合物喷出速度过大时,又会发生脱火现象。当煤气与空气在喷嘴中不预先混合,或只有部份

混合，而在离开喷嘴进入炉内以后才边混合边燃烧，这时可以看出明显的火焰轮廓，称为有焰燃烧。当煤气与空气在进入炉内以前就已经混合均匀，整个燃烧过程在烧嘴砖内就可以结束。所以，炉内火焰很短，甚至看不到火焰，故称为无焰燃烧。由于是预先混合，所以，燃烧速度快，燃烧温度高，煤气中碳氢化合物来不及分解。火焰中游离碳粒比较少，所以，火焰的黑度比有焰燃烧时小，空气过剩系数亦小。对天然气喷嘴可分成高压喷射器式喷嘴，半喷射器式喷嘴（即利用天然气的压力吸入空气量占总需量10~15%，再与鼓入的85~90%二次空气混合，边混合边在炉内燃烧）和低压喷嘴。上述的各类喷嘴，在国内皆有定型产品。

对液体或气体燃料的完全燃烧，涉及到雾化、混合和燃烧。而它所述及的知识有：气体动力学、传热学、热力学、传质和物质的传递、化学反应动力学、物理化学、化学热力学、统计力学等学科的基本知识，因而，它的燃烧机理描述相当复杂。直到目前，喷射燃烧机理发展远远落后于实践的发展，而仅能定性地分析一些基本规律，来推动对喷射燃烧技术的进一步开发。70年代初，苏联学者对在船用柴油机中燃料喷射燃烧进行了系统理论分析和试验研究，并对重质油喷雾喷嘴（尤其是压力式喷嘴）进行了系统理论分析和试验比较。

四、喷射冶炼

喷射吹氧转炉的发明和发展，使钢铁生产带来了革命性变化，使原有炼钢主力——平炉，被迫陆续退出历史舞台，而被喷射吹氧转炉和电弧炉所替代。在四分之一的世纪里，世界年钢产量由 $2.1 \times 10^8 \text{t}$ 增加到 $6.7 \times 10^8 \text{t}$ ，其中喷射吹氧转炉钢从零猛增到 $5.3 \times 10^8 \text{t}$ ，可见它所具有卓越生命力。在日本，在60年代末已经完全淘汰了平炉生产。一座容量为100t的喷射吹氧转炉连续生产24h，钢

产量可达4000~5000 t。而同容量的平炉一昼夜只能炼得300~400 t钢，平均小时产量相差十几倍。喷射吹氧转炉的炉料为铁水、废钢和造渣材料，喷射吹氧是从喷嘴喷出高速氧流，并穿入熔渣和金属，搅动铁水。熔池的搅动和循环使熔渣与金属密切混合，大大有助于高速精炼。铁水中硅、碳、锰和磷的氧化是放热反应。这些元素与氧化合所产生的热量，不仅足以把金属提高到所要求温度，而且还允许在炉料中用一部份废钢来平衡其过剩的热量。喷射吹氧转炉的主要优点是：精炼速度快、节约劳动力、基建投资低、耐火材料消耗低、烟尘控制比较容易、产品质量高，生产周期的规律性强，便于安排后部作业，可以充分实现自动化。

然而，只要喷射吹氧转炉还不能全部用掉易得的废钢，电炉炼钢仍将继续稳定增长。而且，只要喷射吹氧转炉还须要高炉铁水，焦炉—高炉流程所须巨额投资就会促使人们继续把直接还原的电炉流程作为新的炼钢途径加以考虑，且此时污染亦比较小。

由于喷射吹氧转炉内的反应动力学和机理都很复杂，所以，直到目前还不能全面认识。当喷嘴吹氧几分钟后，就开始形成熔渣，从溶池放出一氧化碳的速度也很快增大，以后就开始产生泡沫渣（是金属液滴和气泡分散在连续熔渣相内的一种复杂混合物），不久就把喷枪淹没。此时的喷流特性，至今尚不太清楚，亦很难用实验方法测得。北京大学力学系氧枪科研组对氧枪喷嘴设计，氧射流衰变规律和氧射流与铁水熔池相互作用已进行了一些研究。

应当指出，日本所以能快速上升为世界首要产钢国家之一应归功于他们在50年代中期选择了喷射吹氧转炉作为主要炼钢方法。1972年日本90座现代化的喷射吹氧转炉生产了约 80×10^8 t粗钢，日本的钢产量80%左右是采用喷射吹氧转炉。目前，世界钢产量70%左右是采用喷射吹氧转炉生产得到。

五、喷雾干燥

喷雾干燥是干燥技术中一支新兴技术。所谓喷雾，是将溶液、乳浊液、悬浮液或有水份的膏糊状物料通过雾化器作用，使其成为细小的雾状液滴。 1m^3 的液体可雾化成约 2×10^{12} 个均匀的约 $100\mu\text{m}$ 的液滴，总表面积为 $6 \times 10^4\text{m}^2$ ；比 1m^3 的表面积增加了1万倍。由于物料与载热体(如热空气等)热交换面积有了非常显著增加，导致物料快速干燥(约 $5 \sim 30\text{s}$)，并导致液滴表面温度比较低(由于水饱和，其温度接近湿球性能)，使热敏性物料能保持良好的色泽、香味和成品质量(如维生素、蛋白质性能等不受损失)，干燥产品纯度高，溶解性能亦相当好。由于不再需要蒸发、结晶、过滤、干燥、粉碎和筛析等工序，使生产过程大大简化，而且操作控制方便，适宜于连续性大规模生产，且环境卫生亦相当好。其缺点就是单位制品的蒸发负荷大，回收粉尘的分离设备要求较高，近年来，我国兴建了不少大型尿素、合成洗涤剂、奶粉和聚氯乙烯树脂生产厂，就是采用喷雾干燥技术。

喷雾干燥又分成为非泡沫喷雾干燥、泡沫喷雾干燥(即含有空泡的泡沫状雾滴)和喷雾速冻干燥(将物料喷到冷空气中使雾滴冻结，然后在真空中升华除去水份)。喷雾干燥在塑料、树脂、陶瓷材料、洗涤剂、表面活性剂、医药品、农药、染料、颜料、化肥、浮选矿物、无机化工产品、有机化合物、奶制品、蛋制品、食物和植物汁、水果、蔬菜、糖及类似产品、酵母、纤维素、鱼制品、碳水化合物和谷物产品、咖啡、香料类、海产品、中成药等方面已得到广泛应用。

喷雾速冻干燥是食品和医药工业中兴起的新技术，它所以获得发展，是由于可获得比其他冷冻方法更能保持原有的风味和营养成分(即维生素和叶绿素等营养物质几乎全部保留下来)，且