维普资讯 http://www.cqvip.com



# 浅议拉瓦尔喷头

李军英
(舞阳钢铁有限责任公司技改部)

# Brief Description of Laval Nozzle

Li Junying
(Technical Renovation Department of Wuyang Iron and Steel Co. Ltd)

拉瓦尔喷头是一个收缩—扩张型喷管。通过此喷头能够使具有一定压力及较低速度的气体产生超音速流(见图1)。

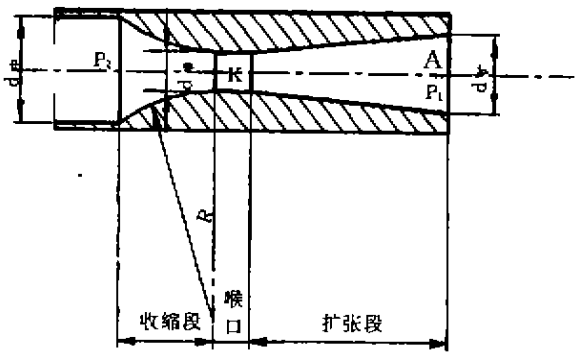


图1 拉瓦尔喷头原理示意图

根据流体力学的原理,气体在稳定流动状态下,单位时间内气体经过喷嘴的每一个截面的气体质量均相等。因此在通常的情况下,低流速(高压强)截面的喷嘴应当具有大面积,而高流速(低压强)截面的喷嘴应有小面积。所以气体由喷嘴进口处A进入后,喷嘴开始一段由大到小逐渐收缩,而气流速度逐渐增大,当沿气流流动方向截面收缩到最小处K时,流速达到临界速度即音速,此时压力近似为喷嘴进口处的压力之半,即$P_K \approx 0.5P_1$。为了使喷嘴出口处的压力$P_2$低于$P_k$,必须在喷嘴临界面以后再加一段渐扩段,这样可以在喷嘴出口处获得比音速还要大的流速即超音速,并在该处建立低压区域[1]。

## 1 拉瓦尔喷头的构造

典型的拉瓦尔喷头一般有收缩段、喉口、扩张段三部分组成。

### 1.1 收缩段

收缩段的作用是将气流从低速即小于马赫数(例如M=0.2)加速到音速即马赫数(M=1)左右。因为收缩段的初始部分气流速度比较低,所以从恒截面的中心管到收缩段必然有个过渡。按理想从恒截面的中心管到圆锥形收缩段应当逐渐过渡,然而假定锥角不太大,来流马赫数又比较低,则实际上收缩段可以与恒截面的中心管相交。当然交接处圆滑一些比急剧的转角为好,这主要是为了避免喷头内应力集中及使气流平缓。收缩段的长度通常取定于收缩段的半锥角α,中心管直径$d_{中}$,喉口直径$d_{喉}$。可按下式$L_{收}=ctg\alpha(d_{中}/2-d_{喉}/2)$求得。

收缩段的半锥角一般选取比较大,可为30°,同时从收缩段到喉口过渡部分用同一个大致不变的曲率半径,其曲率半径稍大于喉口半径就可以了,这样做的目的是为了使过渡非常光滑和平缓。

### 1.2 喉口部分

理论上讲,只要喉口上游和下游的截面积变化足够平缓,喉口的长度可以为0。例如喉口内壁曲率半径为喉口半径的1.5倍,则喷出系数应为0.99左右,这时收缩段与扩张段与形成喉口的弧相切,因而最小截面的一段长度实际上等于0。但是这样的喷头难于制作。为了方便收缩段与扩张段的加工,喉口应有一定的长度。一般恒截面喉口的长度不超过喉口直径。因为随喉口长度增大,喉口有效截面积减少,反而会造成喷出系数减少。

已知给定的气体流量和气体的滞止状态,则喉口断面积可以由下式求出:

维普资讯 http://www.cqvip.com



$$F_m=\sqrt{\frac{K}{R}\left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}}\cdot\frac{P_0A^{(2)}}{\sqrt{T_0}}$$

式中：$F_m$——气体流量 kg/s；

K——气体的等压热容[4]与等容热容量之比。

对于氧气：K＝1.4；

R——气体常数。

对于氧气：R＝259.7J/kg·K；

$P_0$——工作压力 kgf/cm²；

$T_0$——气体温度 K；

A——喉口断面积 cm²。

1.3　扩张段

扩张段半顶角的适用范围一般采用 5°左右。大家知道，因为扩张角太大，在喷头出口处产生的激波比较严重，导致射流扩散比较快；扩张角太小，则超音速通道很长，附面层过厚和产生压力损失。从喉口到扩张段的过渡应该非常光滑和平缓。现实的办法是喉口到扩张段的过渡处，采用同一个大致不变的曲率半径。从扩张段到喷头端面相交处有一小的曲率半径为好，大的曲率半径会使氧气射流不稳定，减少其穿透能力。

## 2　拉瓦尔喷头的作用和应用

由于拉瓦尔喷头能获得超音速流的特性，在冶金行业最早应用在转炉炼钢，特别是顶吹氧气转炉炼钢的生产中，而它应用于电弧炉钢其实只是近十年来的事情。

拉瓦尔喷头在电弧炉炼钢生产中的主要作用是通过拉瓦尔喷头向电弧炉吹入氧气，可最大限度的把氧气的压力能转变成动能。与传统的自耗性管吹氧气相比，利用高速的氧气流切割远离高温区的废钢，增加了炉料受热面积，使炉料中 C、Si、Mn、P 等元素迅速氧化并放出大量热量，直接加速了炉料的熔化。并且由于拉瓦尔喷头得到的超音速氧气流，在同样的穿透深度下，对熔池的冲击面积最大。这对加速 C 的氧化、杂质的去除速度、减少熔池的喷溅都是非常有利的，我公司 1995 年引进的 90t 超高功率电弧炉用的碳氧枪氧枪喷头就是典型的拉瓦尔喷头。

通过向熔池吹入超音速氧气流的同时，喷吹 C 粉，引起炉渣起泡，这改善了电弧的屏蔽，减少了电炉壁及水冷炉盖的热辐射，可以大大提高电炉炉壁及水冷炉盖的使用寿命。

拉瓦尔喷头在电弧炉炼钢生产中的另一个作用是利用其结构即氧—燃烧嘴向电炉内喷入氧及其它燃料。通过在电炉冷区配置固定的氧—燃烧嘴，向炉内喷入氧及其它燃料，如重油、C 粉、柴油，形成的非电极热源，直接加快了废钢的熔化过程，并且减小了电弧炉内由三根电极电弧形成的三个点热源对炉料加热的不均匀，尤其对超高功率电弧炉，避免了由炉料坍塌引起的大翻腾及电极折段现象[3]。我公司 2000 年自行改造设计的 90t 电弧炉用的氧—重油烧嘴也是采用典型的拉瓦尔喷头。由于氧—重油烧嘴的应用，使我公司 90t 电弧炉每炉钢冶炼时间缩短 5min 以上，吨钢成本降低接近百元，使我公司产品在市场中的竞争能力有了提高。

由于对高质量钢的需求，炉外精炼技术出现并得到飞速发展，拉瓦尔喷头又以其独有的特性被再次应用。在炉外精炼装置中，其中最典型的例子就是冶炼不锈钢种时的 VOD 工艺中应用的单孔或多孔氧枪喷头。

由单孔拉瓦尔氧枪喷头过渡到多孔拉瓦尔氧枪喷头，冲击面积有所扩大，更重要的是通过合理选取喷孔数、喷孔倾斜角和喷孔之间的距离，使超高音速氧气射流对熔池的冲击点适当分散，可以得到化渣快，杂质氧化快，喷溅少，炉龄长的良好效果。

由于应用于电弧炉炼钢生产中的拉瓦尔喷头经常工作在炉内 800℃高温以上，材料一般选用导热性能好的紫铜或黄铜，经锻造和切削加工制成，也有用压力浇注的。喷头用双层套管通水冷却。图 2 是设计在 90t 电炉 VOD 吹氧装置中的典型单孔拉瓦尔喷头结构图，图 3 是应用于氧—燃烧嘴的拉瓦尔喷头结构图。

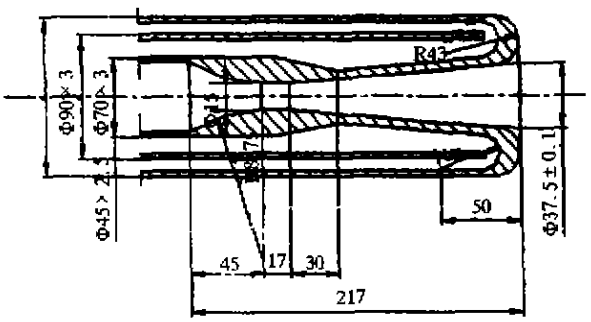


图 2　VOD 炉吹氧装置中的拉瓦尔喷头图

（下转第 48 页）

维普资讯 http://www.cqvip.com



大线能量焊接技术。除了钢材的制造外，对焊接金属本身的质量要求也同时提高了，焊接中新的焊接技术的开发也是今后大线能量焊接用钢板实用化时的重要技术课题。

为实现能适应这些新时代需要的钢板，作为促进 TMCP 技术发展的关键是合金元素的固溶、析出、相变强化作用的定量化技术，因此希望能确立与以往概念不同的工艺设计技术和成分设计技术。在实用化时，变更以现有淬火回火为对象的高强度钢材的规格体系也是必须考虑的。

强度更高、壁厚更厚，尤其是具备高性能的大线能量焊接用钢板通过与新开发的各种焊接法的组合一定能应用于各种焊接钢结构。从这个意义上来看，作为一种高性能钢需求时代的到来，所要求的不仅是焊接时的效率，而且要有助于提高焊接时整个工序的效率。

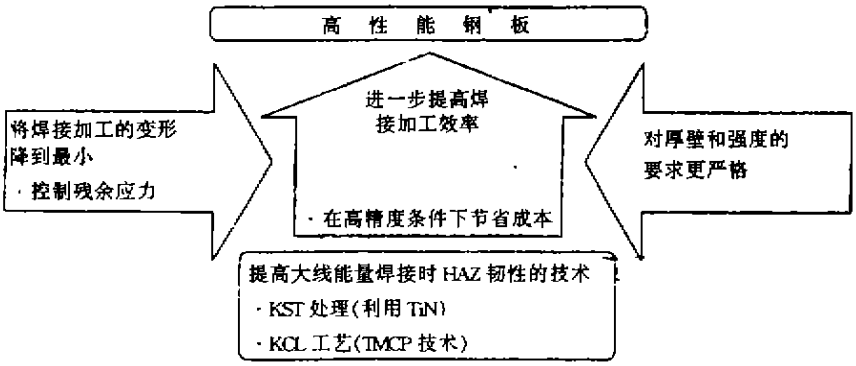


图 5　与提高焊接施工效率和高性能相对应的新型钢板

## 7　结束语

在追求经济性和安全性的历史潮流中，特别是伴随造船业发展而开发的大线能量焊接用钢板目前已应用于各种焊接钢结构物。如图 5 所示，从这个意义上来说，作为不仅能提高焊接效率，而且有助于提高焊接施工全工序效率的钢材，除了以往的大线能量焊接性能外，向用户提供能减轻焊接操作时的修整工作强度和能提高焊接精度的钢材是 21 世纪厚板制造厂的义务。

（上接第 26 页）

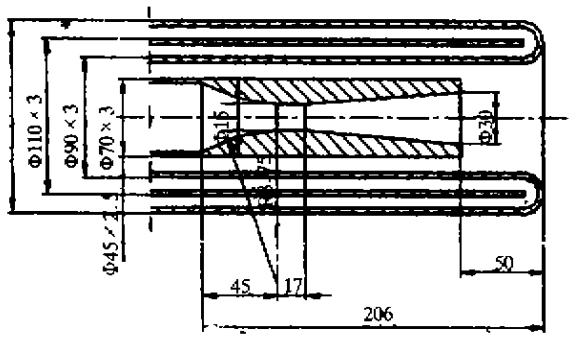


图 3　用于氧一燃烧嘴的拉瓦尔喷头图

此外，由于拉瓦尔喷头在喷嘴出口处获得超音速，并在该处建立低压区域，因此假设喷嘴出口与一密闭空腔相通，就可使密闭空腔内的气体不断的被高速流体带走，而使腔内压力下降形成负压，并最终形成真空。在炉外精炼装置中，抽真空用的蒸汽式喷射泵内部结构即是典型的单孔拉瓦尔喷头。通过把钢包内的钢水置于一密闭容器，此密闭容器被称作真空罐，通过密闭管路与蒸汽式喷射泵出口相连，就可使钢包内的钢水从大气压力抽至真空状态。由于压力的降低溶于钢水内的氢气，氧气，氮气被释放出来，使钢质纯净，并为生产优质钢板奠定基础，同时可使钢水的流动性大大提高，最终使钢水的浇注温度比未经真空处理的钢水低约 20℃。

### 参考文献

1　天津大学工业机械手设计编写组，工业机械手设计基础，天津科学技术出版社，1981.10
2　将仲乐：炼钢工艺及设备，冶金工业出版社，1987.4
3　李士绮：现代电弧炉炼钢，原子能出版社，1995.11