



不锈钢WMS精细等离子切割工艺应用

田野

【摘要】 论述了在大尺寸不锈钢件整体一次性切割成形要求下，如何对比不锈钢切割方法，选用“二次水雾”（WMS）切割工艺完成施工。切割件平面度指标良好、切口表面粗糙度和倾斜度等指标都能达到国内外热切割质量分级评定最高要求，并把切割表面作为产品最终表面的生产应用。

1. 概况

不锈钢材料在制造加工业普遍应用，在保证切割质量和尺寸要求前提下，经济快速下料切割成为制造工艺优化和改进的重要课题。等离子切割可高效、低成本的进行不锈钢切割，而二次水雾（The Water Mist Secondary，以下简称WMS）切割工艺使切割质量更精细并接近于激光切割的效果；WMS工艺采用氮气作为等离子气体进行切割，枪体内以水作为再压缩途径使等离子弧获得高密度压缩和较高的动能，再以枪体外的水雾作为保护层以实现不锈钢高精度、高质量的无渣切割，其切割成本低于其他切割工艺。对操作者技能水平要求较低，节省工时降低辅助工序的劳动资源。

工件的材质为022Cr19Ni10，厚度20mm，形状为 $\phi 1\ 900\text{mm} \times \phi 1\ 260\text{mm}$ 的环形板件，共56块。加工后整体平面度要求为0.9‰且 $\leq 1.6\text{mm}$ ，尺寸公差为

-2mm，外圆尺寸公差为 $\phi 1\ 900_{-0.2}^0\text{mm}$ ，内圆尺寸公差为 $\phi 1\ 260_{+0.2}^0\text{mm}$ ；准备用板幅 $6\ 000\text{mm} \times 2\ 000\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的钢板进行整体切割。

2. 切割工艺试验

等离子切割工艺参数主要是：等离子弧压、切割气流、气体类型、气体压力和流量、割嘴高度及切割速度；它们直接决定了切割过程的稳定性、切割质量和效果。除切割速度外以上各种因素直接影响等离子弧的压缩效应，即等离子弧的温度和能量密度，而等离子弧的高温、高能量决定了可选切割速度的范围。在保证切割质量的前提下，应尽可能的提高切割速度，不仅提高生产效率而且能减少被割零件的变形量和割缝区的热影响区域。若切割速度不合适，其效果相反，而且会使粘渣、挂渣增加，切割质量下降。

由于所采用设备的外特性为恒流特性，等离子弧压调节通过

割嘴高度进行调节；而切割气体选用后，可通过更换专用切割易损件配合与相应的固定电流等级配套使用。等离子弧压缩效应已经通过易损件设计优化并相对固定成型，气体压力及流量配比固定，不需额外调节。主要通过调节弧压、切割速度来调整切割质量，调节割缝补偿量对切割尺寸进行微调。

等离子气流离开割枪时会旋转产生光滑的气柱，这种气旋的结果是切口的一边形状比另一边更直。从行走方向看，由于右边的切口形状比左边直，所以切割环板时内圆以逆时针方向切割，外圆以顺时针方向进行切割，如图1所示。

表1为设备操作手册推荐的工艺参数，采用此参数进行试切割 $\phi 150\text{mm}$ 、 $\phi 100\text{mm}$ 的圆形板件，切割后圆板上下表面直径相差2~3mm，不能满足工件切割2mm负偏差要求而需要调整。通过在板材上切割

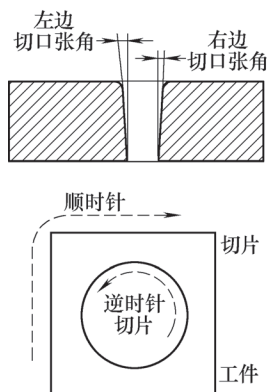


图1 气流对切口的影响

$\phi 200\text{mm} \times \phi 100\text{mm}$ 的小环板进行工艺试验,调整推荐工艺中弧压、割缝及切割速度,找到较为合适的参数配合。

首先在160~180V之间对弧压进行调整;按5V为增量逐渐递增,并将切割尺寸改变明显的数据列举,如表2所示。

通过调节弧压进行切割可以发现,弧压升高则割枪高度提高,割缝宽度随之加宽,弧压提高后出现起弧困难,等离子弧不稳定。较低的弧压可获得较窄的割缝和较高的切割质量,但割枪高度较低会增加其碰撞工件的几率,且使切割易损件处于更为恶劣的工况环境下缩短其使用寿命。

在推荐工艺基础上,我们对4.3~6.0mm的调节割缝宽度进行切割试验,选取尺寸偏差较为明显的数据列举在表3中。

从表3可以看出,割缝宽度值增加或减小则工件尺寸相应增大或减小,只有合适的设置才能保证想要得到的切割尺寸。

在推荐工艺基础上,设置弧压为168V,割缝宽度为4.7mm,从低到高在1 300~1 450mm/min之内调整切割速度,将切割尺寸

记入表4。

通过速度调节可以得出,一般情况下切割速度对切割尺寸影响不大,而过大或过小对切割面质量存在较大影响。

试验中小环板内外圆切割倾斜度存在较大差异,如外圆上下表面尺寸相差1mm,而内圆尺寸相差2mm,但同样的切割工艺为什么会有如此差异,考虑到可能是因为小半径圆切割时电弧拖尾现象影响较为明显。为了验证分析的正确性,切割 $\phi 100\text{mm} / \phi 730\text{mm}$ 较大尺寸环板,结果内外圆上下表面切割尺寸都相差1mm,分析正确。

经过工艺试验小结如下:20mm不锈钢板采用WMS工艺切割质量较好时,斜度为 $1.4^\circ \sim 2^\circ$ 。割枪工作高度随弧压增

大而提高,同时等离子弧长度变大,割缝随之变宽,割缝宽度值设置应相应增大以获得更多割缝补偿。为获得更好的切割质量,电弧电压应在保证易损件安全和切割流畅前提下尽量降低;为提高切割效率,切割速度可以适当提高,如果切割面质量要求不高则切割速度有较大提升空间。

3. 产品切割

经过工艺试验确定一套适用于本次产品切割的工艺,如表5所示,以此工艺对环形工件进行正式切割。试验中测得工件上下表面直径相差1~1.5mm,如果加上外界因素影响,可能超过 $1\ 900_{-2}^{\circ}\text{mm} / 1\ 260_{-2}^{\circ}\text{mm}$ 的负偏差要求。如切割正式工件,输入尺寸应进行微调。当切割尺寸为1 900mm时,下表面外圆尺寸应

表1 20mm不锈钢WMS推荐切割参数

预送 气压力 (N ₂)	切割气流流量		弧压	枪高	运行速度	穿孔 高度	穿孔 延迟	割缝 宽度
	等离子气 (N ₂)	保护气 (H ₂ O)						
/MPa	/MPa	/MPa	/V	/mm	mm·min ⁻¹	/mm	/s	/mm
0.14	0.69	0.38	170	5.8	1320	12.7	0.8	5.8

表2 弧压参数调节试验件切割尺寸

试件 编号	外圆尺寸/mm		内圆尺寸/mm		变量	
	工件上表面	工件下表面	工件上表面	工件下表面	调节项目	数值/V
S02	200	201	100	98.5	弧压	165
S04	200	201	100	98	弧压	170
S06	199	202	99	96.5	弧压	180

表3 割缝宽度参数调节试验件切割尺寸

试件 编号	外圆尺寸/mm		内圆尺寸/mm		变量	
	工件上表面	工件下表面	工件上表面	工件下表面	调节项目	数值/mm
S09	199	201	101	100	割缝宽度	4.6
S11	200	201	100	98	割缝宽度	5.1
S13	201	202	99.5	97	割缝宽度	5.8

表4 切割速度调节试验件切割尺寸

试件 编号	外圆尺寸/mm		内圆尺寸/mm		变量	
	工件上表面	工件下表面	工件上表面	工件下表面	调节项目	数值/mm·min ⁻¹
S15	200	201	100	98.5	切割速度	1 300
S16	200	201	100	98	切割速度	1 350
S17	200	201	100	98	切割速度	1 400

在1 898~1 901mm，所以外圆切割尺寸应设定为1 899mm，使切割尺寸保持在1 900~1 901mm，即使尺寸为1 901mm时可人工去除多余金属；但如将尺寸设置为1 898mm，则容易使上圆实际切割尺寸为1 897mm，使工件作废。同样，内圆切割尺寸设定为1 261mm。按上述工艺进行产品正式切割后，尺寸偏差控制效果较好，如表6所示，满足了产品公差要求。

(1) 切割质量 因WMS工艺在切割过程中，割枪内的水分分解产生 H_2 和 O_2 。 H_2 的释放降低了切割区的比大气压，阻碍了污染元素获得无熔渣和氧化残留的切割面。 O_2 在切割过程中与被等离子弧熔化的熔融金属反应氧化并释放热量加速切割，绝大多数水被分解为气体，和枪外喷淋水的水气一起阻隔空气。所以工件割缝表面光滑、外观良好，切割面表面粗糙度值 $R_a \leq 20\mu m$ ，表面呈淡黄色。由于WMS消除了切割面氮化物堆积，故不会对切割表面焊接造成很大影响。切口张角 $1.4^\circ \sim 2^\circ$ ；除穿孔位置外割缝及其上下沿光洁、无溅

污切渣残留，避免二次清洁操作；离子弧和工件的最初接触磨损带来的圆角现象不明显，上沿较锐；切口宽度5mm左右，如图2所示。切割质量可达到JB/T 10045—1999和EN ISO9013质量评定等级I级。WMS精细等离子切割设备凭机载作业，其等离子弧柱压缩度高、能量密度高，非常稳定，动能大挺度好，切割尺寸偏差小。设备运行尺寸偏差满足JB/T5102—1999（ISO8206—1991）《坐标式切割机》，定位精度、交点误差皆 $\leq 0.5mm$ ，另外切割倾斜度较小。

(2) 切割后热变形 WMS切割法的一大优势是有较大的调节窗宽，不仅简化了质量调试程序，缩小了热影响区，而且还降低了材料变形几率。工件切割完毕后，使用红外测温仪对割缝周围及切割面温度进行实测，切割环境温度 $24^\circ C$ ，在切割弧前进方向后10~20cm割缝边缘位置测温，工件温度在 $60 \sim 80^\circ C$ ，故基本不会造成热变形。

4. 生产效率及经济性分析

$\phi 1\ 900/\phi 1\ 260$ 环板总割缝长度为10 000mm左右，切割速度

为1 380mm/min，较H35等切割工艺更快，如图3所示。加设备运作时间台上切割操作不超过10min，工件暂存区与料台间吊装运输时间不超过10min。每张板材可切割三个环板，每张板材切割及运放时间低于1h，每天可切割下料6张板、18个工件，本批次56个工件555m割缝4天切割完毕。

N_2 每瓶30元，如非持续日切割量较大不必购进汇流排。每个工件消耗氮气1.5MPa，平均每瓶氮气12MPa，可切割两张板6个工件，本批次共使用9瓶氮气。而 H_2 每瓶200元，Ar每瓶90元。

WMS采用洁净自来水即可，价格每吨2元，切割时用水量为38L，本批工件切割水使用总量不超过0.5t。

易损件有保护圈、保护帽、保护气体分配器、割嘴、等离子气体分配器及电极，其中保护帽、电极、割嘴的损耗较大，但可保证穿孔90~120余次。每套

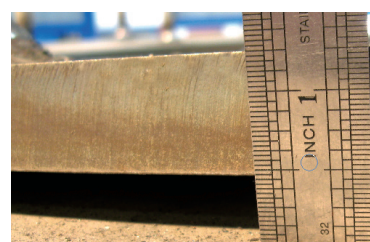


图2 工件切割表面

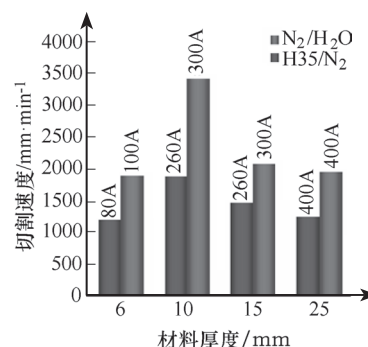


图3 不锈钢切割速度对比

表5 20mm不锈钢环形工件WMS工艺

预送气压力 (N_2)	切割气流流量		弧压	枪高	运行速度	穿孔高度	穿孔延迟	割缝宽度
	等离子气 (N_2)	保护气 (H_2O)						
/MPa	/MPa	/MPa	/V	mm	/mm·min ⁻¹	/mm	/s	/mm
0.14	6.9	3.8	167	5.1	1380	12.7	0.8	4.7

表6 工件切割尺寸 (mm)

工件编号	外圆尺寸		外圆尺寸	
	上表面	下表面	上表面	下表面
222-016	1 899	1 900	1 261.5	1 260.5
222-017	1 898	1 899.5	1 261.5	1 260
222-018	1 898	1 899.5	1 262	1 261
222-019	1 898	1 899	1 261	1 260



汽轮机低压内缸焊接制造技术

李宏 宋少锋

【摘要】 介绍了汽轮机低压内缸的焊接制造技术及检测要求，对其他类似结构件的制造具有指导和参考价值。

1. 概述

汽缸是汽轮机的外壳，其作用是将汽轮机的通流部分与大气隔开，形成封闭的汽室，保证蒸汽在汽轮机内部完成能量的转换过程，汽缸内安装着喷嘴室、隔板及隔板套等零部件；汽缸外连接着进汽、排汽及抽汽等管道。

汽缸一般分为高压、中压及低压三段，其中高、中压段一般采用合金钢或碳钢铸造结构，而低压段可根据容量和结构要求，采用铸造结构或由简单铸件、型钢及钢板焊接的结构。

本文主要以我公司承接的某国外项目电站用汽轮机的低压内缸为例，介绍低压段内缸（见图1）的焊接制造工艺及检测要求。

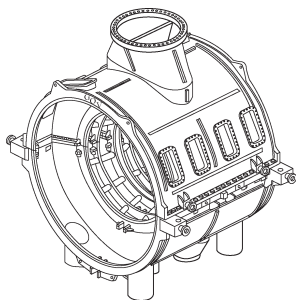


图1 低压内缸

2. 原材料要求及焊接性

（1）厚材料 根据图样要求，主体采用Q390D（GB/T 3274）正火板，管路采用P265GH（EN10028—3），附件等采用S355J2+N（EN10025—2）；板厚12~300mm，管径 $\phi 22 \sim \phi 560 \text{mm}$ 。

（2）焊接性分析 以主体采用板材Q390D为例，产品要求化学成分熔炼分析如表1所示。

根据表1中化学成分，可估算出碳当量 $C_{eq} \geq 0.40$ 时，属于有条件焊接的材料，需要采取焊

300元，共使用两套。而WMS工艺因使用 H_2O 为保护气，较其余等离子切割工艺大大延长了易损件使用寿命。

设备功率负载持续率100%时功率54kW，按实际切割时50kW，计算本次切割消耗电能每小时340kW，按0.7元/度算，本次切割刨除设备折旧和人工费用计算后得出20mm不锈钢切割

成本为每米2元左右。

5. 结语

二次水雾切割是不锈钢等离子切割领域新兴工艺，用水作为保护气氛，因而等离子弧能量密度更大，实现了无挂渣或无氧化堆积，切割精度好。采用二次水雾精细等离子切割工艺切割不锈钢，较传统切割技术切割速度快且生产成本低，并可获得较高的

切割质量，具有明显优势。能切割的厚度范围大，机载后适合于大批量、大尺寸，尤其是特殊形状工件的切割。WMS工艺廉价高效，在有色金属切割领域推广前景好，将对热切割产生重大影响。

作者简介：田野，中核二三公司东方核电工程公司。

MW 20151212