

# FQM - $\Phi 100$ mm 连轧管机组 $\Phi 73$ mm 孔型系列开发

王增海, 白志峰, 林 震, 米永峰, 温 博

(内蒙古包钢特种钢管有限公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 文章主要介绍六机架 FQM (Fine Quality Mill) -  $\Phi 100$  mm 连轧管机组关于  $\Phi 73$  mm 孔型系列的设计思路与开发情况。在设计该系列的连轧机组孔型时采用“孔型顶部延伸系数分配方法”, 采用该方法设计的  $\Phi 73$  mm 连轧管机组孔型系列, 实现了限动芯棒连轧管机组最小孔型系列开发技术的落地应用。工业化结果表明, 采用该技术设计的连轧机孔型生产的无缝钢管壁厚精度达到  $\pm 8\%$  范围以内, 钢管内外表面质量良好。

**关键词:** 孔型设计; FQM 轧机; 顶部延伸系数; 无缝钢管

中图分类号: TG332<sup>\*,13</sup>

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438 (2022) 06 - 0019 - 05

## Development of $\Phi 73$ mm Pass Series for Fine Quality Mill (FQM) - $\Phi 100$ mm Mandrel Pipe Mill

Wang Zeng - hai, Bai Zhi - feng, Lin Zhen, Mi Yong - feng, Wen Bo

(Inner Mongolia Baotou Steel Special Steel Tube Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In the paper, the design thought and development of  $\Phi 73$  mm pass series for FQM (Fine Quality Mill) -  $\Phi 100$  mm mandrel pipe mill with six stands are mainly introduced. When design this series of pass of mandrel pipe mill, the “distribution method of coefficient of elongation on top of pass” is adopted so that the applications of development technology of minimum pass series of mandrel pipe mill with retained mandrel are realized. The industrial results showed that the wall thickness accuracy of seamless steel pipe produced by the pass of mandrel pipe mill designed with this technology is within  $\pm 8\%$  as well as the internal and external surface qualities of steel pipe are good.

**Key words:** pass design; FQM; coefficient of elongation on top; seamless steel pipe

国内某管厂连轧机组选用 FQM (Fine Quality Mill) 类型轧机, 牌坊设计为整体隧道式, 这种整体结构设计使牌坊的刚性更高, 稳定性更好, 同时便于运输和安装。由于牌坊为整体式, 所以换辊采用轴向换辊方式。FQM 轧机和 PQF 轧机的孔型构成与设计完全一致, PQF 轧机的辊缝调整是沿弧线摆动压下, 而 FQM 轧机的辊缝调整是沿径向垂直压

下<sup>[1]</sup>, FQM 轧机在壁厚控制方面能力较强。

该管厂 FQM 连轧机组原设计采用  $\Phi 150$  mm 和  $\Phi 90$  mm 两个坯型生产直径 25 ~ 89 mm 的无缝钢管, 其中  $\Phi 150$  mm 坯料生产直径 51 ~ 89 mm 的钢管, 该组距产品已经形成工业化生产; 采用  $\Phi 90$  mm 坯料生产直径 25 ~ 48 mm 钢管的生产工艺属于空白。基于目前国内锅炉管、流体管等对于小口径薄

壁无缝钢管的迫切需求,急需开发小口径无缝钢管热连轧工艺技术。

## 1 孔型系列设计思路

针对外径 25 ~ 48 mm、壁厚 3.5 ~ 7.0 mm 的无缝钢管,开发热连轧工艺技术,该外径范围对应的连轧机出口钢管外径为 73 mm,即  $\Phi 73$  mm 系列。采用由成品向坯料的设计思路,应用“顶部延伸系数分配方法”,获得该系列的孔型设计与热轧工艺变形分配技术。在设计过程中所涉及的各个工序的钢管几何尺寸都是指在机组要求温度范围的热态钢管尺寸,如有其他状态文中会注明。

### 1.1 变形分配设计

#### 1.1.1 张力减径机变形制度

该无缝钢管生产机组的张力减径机组为 20 机架,根据每架轧机的平均减径率,可以得出机组的最小减径率和最大减径率,具体设计思路如下。

(1) 首先将需要开发的钢管外径范围中最大直径的钢管转换为热尺寸,并列出外径和壁厚的对应分布关系<sup>[2]</sup>。

(2) 再根据张力减径机组的最小减径率,利用(1)中得出的钢管热态最大外径数值,从而可计算出张力减径机入口钢管的外径尺寸,计算公式如下所示。

$$D_{\text{Max张减}} = D_{\text{Max热态成品}} / (1 - \delta_{\text{Min张减}}) \quad (1)$$

式中: $D_{\text{Max张减}}$ ——张力减径机入口直径;

$D_{\text{Max热态成品}}$ ——所开发系列钢管最大外径热态尺寸;

$\delta_{\text{Min张减}}$ ——该机组张力减径机最小减径率。

#### 1.1.2 连轧机变形制度

根据张力减径机入口钢管的外径(即脱管机出口钢管的外径),选择适当的脱管机减径率,从而可计算出连轧机出口钢管的外径,这也就确定了所开发的钢管外径范围对应的连轧机系列尺寸,具体变形制度如下。

(1) 三辊不可调整式脱管机减径率范围为 3% ~ 6%,小直径连轧机组脱管机减径率取较大值,计算脱管机入口钢管外径,具体公式如下。

$$D_{\text{脱管入口}} = D_{\text{Max张减}} / (1 - \delta_{\text{脱管}}) \quad (2)$$

$$D_{\text{毛管}} = \sqrt{4(D_{\text{连轧}} - S_{\text{连轧最薄}}) \times S_{\text{连轧最薄}} \times \lambda_{\text{连轧最大}} + (D_{\text{Max芯棒}} \times 1.0011 + \nabla_{\text{芯棒}})^2} \quad (7)$$

再根据毛管外径数值利用公式(6)计算出最薄

式中: $D_{\text{脱管入口}}$ ——脱管机入口钢管外径即连轧机出口钢管外径;

$\delta_{\text{脱管}}$ ——脱管机减径率。

(2) 根据连轧管机的变形能力,给定连轧后钢管的最大径壁比  $D/S$ ,由此可计算出连轧机可以轧制的最薄壁厚钢管。

$$S_{\text{连轧最薄壁厚}} = D_{\text{脱管入口}} \div (D/S) \quad (3)$$

式中: $S_{\text{连轧最薄壁厚}}$ ——连轧机组可以轧制的钢管最薄壁厚;

$D/S$ ——连轧机组轧制钢管最大的外径与壁厚比值。

(3) 确定最大芯棒直径,确定所设计系列使用最大芯棒直径的计算公式如下。

$$D_{\text{Max芯棒}} = D_{\text{连轧出口}} - 2 \times S_{\text{连轧最薄壁厚}} \quad (4)$$

式中: $D_{\text{Max芯棒}}$ ——该系列的最大芯棒直径;

$D_{\text{连轧出口}}$ ——连轧出口钢管外径。

#### 1.1.3 穿孔机变形制度

(1) 确定毛管几何尺寸。毛管外径和壁厚的确定需要满足两个条件<sup>[3-5]</sup>。

第一个条件是连轧选定的最大延伸系数要小于其极限能力,连轧延伸系数计算公式如下所示。

$$\lambda_{\text{连轧最大}} = \frac{(D_{\text{毛管}} - S_{\text{最薄毛管}}) \times S_{\text{最薄毛管}}}{(D_{\text{连轧}} - S_{\text{最薄连轧}}) \times S_{\text{最薄连轧}}} \quad (5)$$

式中: $\lambda_{\text{连轧最大}}$ ——连轧机组最大延伸系数(六机架三辊连轧机最大延伸系数范围为 4.0 ~ 4.5);

$D_{\text{毛管}}$ ——毛管外径;

$S_{\text{最薄毛管}}$ ——最薄毛管壁厚;

$D_{\text{连轧}}$ ——连轧机出口钢管外径;

$S_{\text{最薄连轧}}$ ——连轧机出口钢管最薄壁厚。

第二个条件是毛管内壁与芯棒之间要保持适当间隙,以保证穿芯棒过程的顺利进行,对应的计算公式如下所示。

$$S_{\text{最薄毛管}} = \frac{D_{\text{毛管}} - K_{\text{芯棒}} \cdot D_{\text{Max芯棒}} - \nabla_{\text{芯棒}}}{2} \quad (6)$$

式中: $K_{\text{芯棒}}$ ——芯棒膨胀系数,取 1.0011;

$\nabla_{\text{芯棒}}$ ——穿棒间隙。

两个公式联立求解得出计算毛管外径的公式。

毛管壁厚数值。

1.1.4 各工序钢管几何尺寸

工序的钢管几何尺寸,具体数值如表1所示。

根据上述的工艺设计方法,计算出开发系列各

表1 变形分配后计算出各工序钢管几何尺寸

mm

项目	成品管外径 范围	张力减径机入口钢管外径 (脱管机出口钢管外径)	连轧机出口钢管外径 (脱管机入口外径)	连轧机可以轧制的 最薄钢管壁厚	毛管外径	最薄毛管壁厚
设计值	25 ~ 89	68	73	3.2	96	10.75

2 孔型设计开发

2.1 连轧机孔型设计方法

2.1.1 设计思路

连轧机采用“孔型顶部延伸系数分配方法”,计算孔型前要先确定的参数包括机架数、毛管直径、毛管最薄壁厚、连轧机出口钢管外径、连轧机可以轧制的最薄钢管壁厚、偏心系数、第一脱离弧比例<sup>[6-10]</sup>,如果是两段脱离弧还需要确定第二脱离弧比例。再分配各架轧机的顶部延伸系数,确定孔型高,计算出槽顶弧半径、脱离弧半径,根据脱离弧角度和连接弧角度确定出各架轧机孔型轮廓。

2.1.2 计算各架孔型高

首先计算各架轧机孔型顶部的延伸系数,计算公式如下。

$$\mu_{\text{顶部}} = \frac{S_{\text{入口}}}{S_{\text{出口}}} \quad (8)$$

$$\text{即 } S_{\text{出口}} = \frac{S_{\text{入口}}}{\mu_{\text{顶部}}}$$

式中: $\mu_{\text{顶部}}$ ——孔型顶部延伸系数;

$S_{\text{入口}}$ ——某架孔型顶部钢管入口壁厚;

$S_{\text{出口}}$ ——某架孔型顶部钢管出口壁厚。

在确定了各架孔型顶部延伸系数后,再已知钢管入口壁厚就可得出钢管出口壁厚。第*i*架孔型顶部钢管入口壁厚近似等于*i*-2的孔型顶部出口壁厚,当*i*不大于2时,入口壁厚为毛管的壁厚值。*i*架孔型的孔型高度的计算公式如下所示。

$$D_i = D_{\text{芯棒}} + 2S_{i\text{架出口}} \quad (9)$$

式中: $D_i$ ——第*i*机架孔型高度;

$D_{\text{芯棒}}$ ——芯棒直径;

$S_{i\text{架出口}}$ ——第*i*架机架孔型顶部出口壁厚。

2.1.3 计算各架孔型槽顶弧半径  $R_{1i}$

各架孔型高的一半就是孔型半径  $R_i$ 。关于偏心系数  $\eta_i$ 、孔型半径  $R_i$  和槽顶弧  $R_{1i}$  的关系如下所示。

$$\eta_i = \frac{R_{1i}}{R_i} \quad (10)$$

$$\text{即 } R_{1i} = \eta_i \times R_i$$

式中: $\eta_i$ ——第*i*架的偏心系数;

$R_{1i}$ ——第*i*架孔型的槽顶弧半径;

$R_i$ ——第*i*架孔型半径。

2.1.4 计算脱离弧半径  $R_{2i}$

在确定了第一脱离比例  $\sigma_{1i}$  和槽顶弧半径  $R_{1i}$  的条件就可以求出脱离弧  $R_{2i}$ ,计算公式如下。

$$R_{2i} = R_{1i} \times \sigma_{1i} \quad (11)$$

式中: $R_{2i}$ ——脱离弧半径;

$R_{1i}$ ——槽顶弧半径;

$\sigma_{1i}$ ——第一脱离比例。

参照相近机组的成熟经验参数,确定脱离角  $\alpha_1$  和连接角  $\alpha_4$ ,再利用圆弧相切方程确定连接弧半径  $R_5$ 。

2.2 连轧机孔型参数

在设计该系列连轧机孔型时各架轧机的顶部压下率、偏心系数、脱离弧比例、脱离弧角度、连接弧角度属于经验数值,这部分参数沿用 Φ135 mm 系列孔型的数值,具体数值如表2所示。

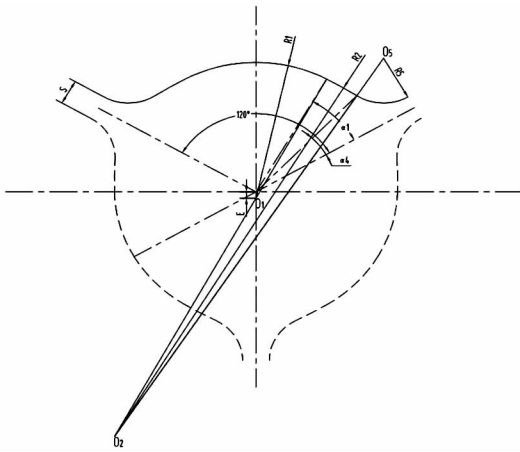
表2 设计孔型经验参数

机架	偏心系数 $\eta_i$	第一脱离比例 $\sigma_i$	脱离角 $\alpha_1 / (^\circ)$	连接角 $\alpha_4 / (^\circ)$
第一架	1.031 ~ 1.040	3.00 ~ 3.20	30	16.00
第二架	1.020 ~ 1.030	3.50 ~ 3.70	30	13.01
第三架	1.013 ~ 1.014	3.50 ~ 3.70	32	13.04
第四架	1.013 ~ 1.014	3.50 ~ 3.70	32	13.02
第五架	1.000	2.75 ~ 3.00	30	8.02
第六架	1.000	2.75 ~ 3.00	30	8.02

按照上述的设计方法,该系列连轧机孔型参数 见表 3,孔型轮廓见图 1。

表 3  $\Phi 73$  mm 连轧机孔型参数

机架	槽顶弧 $R_{1i}$ /mm	脱离弧 $R_{2i}$ /mm	连接弧 $R_{5i}$ /mm	辊缝 $S$ /mm	顶部延伸 系数 $\mu$	偏心距 ECC ( $ECC = R_{1i} - R_i$ )/mm
第一架	41.402	124.210	11.440	10.000	1.640	1.250
第二架	39.017	136.560	6.950	10.000	2.160	0.780
第三架	37.641	131.740	6.850	10.000	1.750	0.470
第四架	37.035	129.620	6.560	8.000	1.700	0.470
第五架	36.500	100.340	2.120	8.000	1.320	
第六架	36.500	100.340	2.120	8.000	1.030	



$\alpha_1$  - 脱离角;  $\alpha_4$  - 连接角;  $O_1$  - 槽顶弧圆心;  $O_2$  - 脱离弧圆心;  $O_3$  - 连接弧圆心;  $R_1$  - 槽顶弧半径;  $R_2$  - 脱离弧半径;  $R_5$  - 连接弧半径;  $E$  - 偏心距;  $S$  - 辊缝值

图 1 连轧孔型轮廓

## 2.3 脱管机孔型设计

### 2.3.1 确定脱管机总减径率

三辊不可调式脱管机的总减径率为 3% ~ 6%, 连轧机出口钢管外径较大时脱管机减径率选较小值, 出口钢管外径较小时脱管机减径率选较大值, 这样选择利于大口径连轧机组可以轧制特厚壁钢管; 对于小口径连轧机组轧制薄壁钢管时利于脱棒<sup>[11]</sup>。对于该孔型系列, 脱管机减径率选择 6%。

### 2.3.2 脱管机孔型计算结果

为了适应来料钢管外径的波动, 并且有利于咬入, 第一机架的减径率取较小值, 通常应小于第二机架的减径率, 第三机架减径率不大于 1.5%, 所以最后一架脱管孔型直径确定为 68 mm, 脱管机理想直径选定为 380 mm。具体的孔型参数见表 4。

表 4 脱管机孔型参数

机架	孔型直径 /mm	短半轴 $b$ /mm	长半轴 $a$ /mm	减径率 /%
第一架	71.03	36.21	34.82	2.70
第二架	68.79	34.61	34.18	3.15
第三架	68.03	34.02	34.02	1.10

## 3 工业应用情况

该工艺开发完成后在 FQM 机组工业化生产了  $\Phi 48$  mm  $\times$  4.7 mm 的无缝钢管, 随机抽查了一支成品钢管, 测量钢管的壁厚精度情况, 检查时沿着钢管的轴向和周向两个维度进行测量, 测量结果见表 5。表 5 中 A ~ I 代表沿钢管轴向从管头端 500 mm、每间隔 1 m 的距离确定一个横截面的测量结果;  $0^\circ \sim 315^\circ$  是在每个截面上间隔  $45^\circ$  测量的壁厚值。

表5 钢管壁厚精度

轴向位置	周向测量值/mm								同一横截面	同一横截面	同一横截面
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	壁厚平均值 /mm	壁厚差值 /mm	壁厚偏差范围 /%
A	4.67	4.7	4.64	5.03	5.05	5.06	5.06	5.06	4.91	0.42	-1.30~7.66
B	4.44	4.44	4.92	4.81	4.44	4.85	4.72	4.91	4.69	0.48	-5.53~4.68
C	4.33	4.34	4.52	4.47	4.82	4.47	4.61	4.72	4.54	0.49	-7.87~2.55
D	4.35	4.34	4.66	4.76	4.64	4.67	4.77	4.73	4.62	0.43	-7.66~1.49
E	4.61	4.39	4.63	5.06	4.73	4.82	4.89	4.92	4.76	0.67	-6.59~7.66
F	4.59	4.50	4.90	5.05	4.72	4.89	4.84	4.88	4.80	0.55	-4.23~7.45
G	4.77	4.90	4.61	4.81	4.69	4.81	4.67	4.54	4.73	0.36	-3.40~4.23
H	4.99	4.83	4.36	4.34	5.01	5.04	4.34	4.58	4.69	0.70	-7.66~7.23
I	4.62	4.66	4.34	4.59	4.74	4.85	4.61	4.92	4.67	0.58	-7.66~4.68

## 4 结论

(1)从壁厚测量结果分析,钢管壁厚精度达到 $\pm 8\%$ 以内,证明孔型设计合理。

(2)基于FQM连轧机组的变形特点,采用孔型顶部延伸系数分配方法,设计开发了 $\Phi 73$  mm系列连轧机孔型,形成了穿孔机组、连轧机组和张力减径机组的变形分配制度,经理论分析与工业化生产验证,这一系列的工艺技术可以推广应用到其他热连轧管机组。

### 参 考 文 献

- [1] 王增海,林震.  $\Phi 100$  mm 三辊连轧管机组的工艺与设备[J]. 钢管,2020,49(4):23-24.
- [2] 王栋. MiNi-MPM 连轧管机 194 mm 系列孔型开发[J]. 钢管,2020,49(1):38-39.
- [3] 李群,杨帆,丁德元,等. 从 MPM 到 PQF—限动芯棒连轧管机回顾及展望[J]. 钢管,2007,36(6):19-24.
- [4] 金如崧. PQF、CPS 和 PAM 轧管新工艺浅论[J]. 钢管,2007,36(2):31-34.
- [5] 岳世斌,刘永利,郭火星. PQF 连轧管机组 382 mm 孔型的设计与开发[J]. 钢管,2009,38(3):46-48.
- [6] 卫晓嵩,郭火星,殷雪峰. PQF 连轧管机  $\Phi 488$  mm 孔型的设计与开发[J]. 钢管,2010,39(2):34-36.
- [7] 高瑞全,周晓锋. PQF 连轧管机两种不同换辊方式机型的对比分析[J]. 钢管,2012,41(6):60-62.
- [8] 李晓忠,白屹峰,周晓锋,等.  $\Phi 258$  mm PQF 连轧管机组连轧辊的优化设计与应用[J]. 钢管,2012,41(1):64-67.
- [9] 吴明宏,李卫河. 包钢  $\Phi 460$  mm 三辊连轧管机组的工艺装备特点[J]. 钢管,2013,42(1):34-39.
- [10] 卢立锋,王庆伟. PQF 三辊连轧管机辊缝调整[J]. 钢管,2020,49(2):45-48.
- [11] 郭海明,姜长华,李道刚.  $\Phi 159$  mm MPM 连轧管机的孔型开发与优化[J]. 钢管,2008,37(1):51-56.