三辊连轧管机附加壁厚公差率研究*

高和平[1],林 震[1],王增海[1],温 博[1],白志峰[1],郭冬青[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 连轧管机的附加壁厚公差率是控制钢管壁厚精度的重要参数,同时也是某一孔型选择对应芯棒系列的主要依据。文章主要推导了三辊连轧管机附加壁厚公差率的计算公式,并且在孔型图中模拟出减小孔型直径和增加孔型直径后所产生的附加公差值,模拟结果与计算值一致;附加壁厚公差率公式与外方数学模型计算相同的壁厚变化量,计算结果基本接近。

关键词: 连轧管机;等效壁厚;孔型直径;附加公差率
中图分类号: TG333.8 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)03-0089-06
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.03.025

Research on Tolerance Rate of Additional Wall Thickness for Three-roll Mandrel Pipe Mill

Gao He-ping[1], *Lin Zhen*[1], *Wang Zeng-hai*[1], *Wen Bo*[1],
Bai Zhi-feng[1], *Guo Dong-qing*[2]

(1. *Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The tolerance rate of additional wall thickness for mandrel pipe mill is an important parameter to control the accuracy of wall thickness for steel pipe and main basis of selecting corresponding mandrel series for a pass. In the paper, the calculation formula for tolerance rate of additional wall thickness for three-roll mandrel pipe mill is derived as well as the additional tolerance values of reducing and increasing diameter of pass are simulated in pass detail and the simulated results are consistent with the calculated values. The result of variation for wall thickness calculated by this formula is basically the same as that calculated by external mathematical model.

Key words: mandrel pipe mill; equivalent wall thickness; diameter of pass; additional tolerance rate

两辊和三辊连轧管机孔型设计都是按照轧制最薄壁厚钢管设计的,当用同一孔型系列轧制一系列不同壁厚的钢管时,需要配用一系列不同直径的芯棒,如果仅以芯棒直径的改变来获得不同壁厚,必然导致芯棒数量太大,这在生产组织上是不经济的。所以在实际生产中,通常采用改变芯棒直径,并辅以

* 收稿日期:2021-05-06
作者简介:高和平(1986-),男,内蒙古包头市人,工程师,现从事无缝钢管生产管理和新产品研发、质量体系管理工作。

中国知网 https://www.cnki.net

调节各机架孔型直径的方法来获得不同壁厚的无缝钢管，从而减少待用芯棒的数量。调节各机架孔型直径后，孔型中心就会偏离原中心，钢管的壁厚在原来的基础上产生偏差，体现在成品孔型上就是钢管出口壁厚出现不均匀度，所以在减少待用芯棒数量的同时还要控制钢管的壁厚均匀度，这样就需要推导出调整孔型直径量与产生的壁厚偏差量之间的关系，附加壁厚公差率计算公式可以表达出这两个变量之间的函数关系。

1 附加壁厚公差率

1.1 定义

在标准孔型的基础上增大或减小孔型直径，孔型槽底弧的圆心会发生偏移，成品孔型轧制的钢管横断面壁厚已经变得不均匀，从而产生了壁厚偏差，孔型偏移量越大所产生的偏差越大。所以设计芯棒直径时，既要考虑经济性，还要考虑壁厚偏差的情况。在连轧管机的孔型设计上，壁厚偏差用附加公差率表示，它定义为调整孔型直径(增大或减小)后孔型断面最大壁厚与最小壁厚的差值与等效壁厚的百分比[1]，对应公式(1)：

$$\Delta = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{mean}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：Δ 为附加壁厚公差率；S_{max} 为孔型断面壁厚最大值；S_{min} 为孔型断面壁厚最小值；S_{mean} 为等效壁厚。

1.2 三辊连轧管机附加壁厚公差率的范围

三辊连轧管机成品孔型和成品前孔型通常采用带圆弧侧壁的圆孔型，并且成品孔型和成品前孔型设计的形状和尺寸相同。三辊连轧机轧制钢管时，前后机架的轧辊呈60°交替分布，成品孔型的槽底对应成品前孔型的辊缝；成品孔型的辊缝对应成品前孔型的槽底，且在与成品孔型辊缝中心线夹角30°的位置成品孔型和前孔型交叠[1]，所以标准孔型中的成品孔型钢管断面壁厚均匀分布。当各架轧辊的实际孔型直径等于设计孔型直径时，各架轧辊的辊缝也都等于设计值，这时的轧辊孔型称为标准孔型。成品孔型和成品前孔型通常不设计偏心距，槽底弧半径 R_1 与孔型半径 R 数值相同，槽底弧的圆心在坐标原点上[2]。

某一孔型系列设计完成后轧制该系列最薄壁厚的芯棒直径确定下来，该芯棒是这一系列的最大直径芯棒，选择其他规格芯棒时通过孔型轧制的钢管壁厚范围和附加公差率范围确定出其他规格芯棒。根据经验，Φ180 mm 以下的连轧机组选用的附加公差率最大范围为：－1.5%～1.5%，Φ273 mm 以上的连轧机组附加公差率最大范围为：－2.0%～2.0%[3-4]。图1和图2分别是某钢管厂135系列和322系列的附加壁厚公差率范围。

SIZE 135

TABLE 1

N°	Mandrel Dia. mm	Wall Thickness nom. mm	min. mm	max. mm	壁厚差 mm	%	附加公差上限 Under Size Addit. Tol. %	Extractor OD out mm	Extractor OD red. %	mm	%	附加公差下限 Over Size Addit. Tol. %	Extractor OD out mm	Extractor OD red. %
1	127.20	3.83	3.50	4.20	0.33	8.6	1.32	134.3	5.46	0.37	9.7	-1.24	135.7	6.44
2	125.70	4.58	4.20	5.00	0.38	8.3	1.27	134.2	5.39	0.42	9.1	-1.18	135.8	6.51
3	124.00	5.43	5.00	5.90	0.43	7.9	1.21	134.1	5.32	0.47	8.6	-1.12	135.9	6.57
4	122.00	6.43	5.90	7.10	0.53	8.3	1.26	133.9	5.18	0.67	10.4	-1.32	136.3	6.85
5	119.30	7.78	7.10	8.60	0.68	8.8	1.35	133.6	4.96	0.82	10.5	-1.34	136.6	7.05
6	116.00	9.44	8.60	10.50	0.84	8.9	1.36	133.3	4.75	1.06	11.3	-1.43	137.1	7.39
7	111.80	11.54	10.50	12.80	1.04	9.0	1.38	132.9	4.46	1.26	10.9	-1.39	137.5	7.65
8	108.00	13.50	12.85	15.00	0.65	4.8	0.71	133.8	5.10	1.50	11.1	-1.42	138.1	8.05

"Extractor O.D. reduction" is referred to extract 127 mm

图1 连轧机组135系列附加公差率范围

中国知网 https://www.cnki.net

SIZE 322

TABLE 1

N°	Mandrel Dia. mm	Wall Thickness nom. mm	min. mm	max. mm	wt. mm	%	附加公差上限 Under Size Addit. Tol. %	Extractor OD out mm	Extractor OD red. %	mm	%	附加公差下限 Over Size Addit. Tol. %	Extractor OD out mm	Extractor OD red. %
1	307.70	6.98	6.20	7.95	0.78	11.2	1.76	320.4	4.04	0.97	13.9	-1.72	323.9	5.07
2	303.60	9.03	8.00	10.25	1.03	11.4	1.80	319.9	3.89	1.22	13.5	-1.68	324.4	5.22
3	298.40	11.64	10.30	13.20	1.34	11.5	1.80	319.3	3.70	1.56	13.4	-1.68	325.1	5.42
4	291.70	14.99	13.25	16.65	1.74	11.6	1.82	318.5	3.46	1.66	11.1	-1.41	325.3	5.48
5	284.00	18.84	16.70	20.50	2.14	11.4	1.78	317.7	3.21	1.66	8.8	-1.14	325.3	5.48
6	276.30	22.70	20.55	24.35	2.15	9.5	1.45	317.7	3.21	1.65	7.3	-0.96	325.3	5.47
7	268.60	26.55	24.40	28.25	2.15	8.1	1.22	317.7	3.21	1.70	6.4	-0.85	325.4	5.50
8	260.80	30.46	28.30	32.15	2.16	7.1	1.06	317.7	3.21	1.69	5.6	-0.75	325.4	5.50
9	253.00	34.36	32.20	36.00	2.16	6.3	0.93	317.7	3.20	1.64	4.8	-0.65	325.3	5.47
10	245.15	38.29	36.05	40.00	2.24	5.9	0.86	317.5	3.16	1.71	4.5	-0.61	325.4	5.51

"Extractor O.D. reduction" is referred to extract 307.5 mm

图 2　连轧机组 322 系列附加公差率范围

2　附加壁厚公差率下限值计算公式

2.1　减小孔型直径断面壁厚变化规律

连轧管机的孔型为标准孔型时成品孔型轧制出的钢管断面壁厚均匀分布，在标准孔型的基础上减小孔型直径(压轧辊)，钢管横断面上壁厚的分布已经不均匀，产生壁厚偏差，此偏差除以横断面的等效壁厚为附加壁厚公差率下限值。当减小孔型直径时，槽底处的壁厚压下量最大，侧壁处与辊缝中心线夹角 30°的位置压下量最小，所以减小孔型后槽底处的壁厚最薄，侧壁 30°处的壁厚最厚。由于成品孔型与成品前孔型呈 60°交替分布，侧壁 30°至辊缝中心线的钢管断面位置对应成品前孔型槽底 60°至侧壁 30°的位置，成品孔型与成品前孔型几何尺寸相同，所以最终成品孔型的钢管断面壁厚在槽底 60°至侧壁 0°的范围内，以侧壁 30°为轴对衬分布；压孔型后侧壁 30°处壁厚最厚，两侧壁厚最薄。关于槽底 60°处和侧壁 30°的位置如图 3 所示。

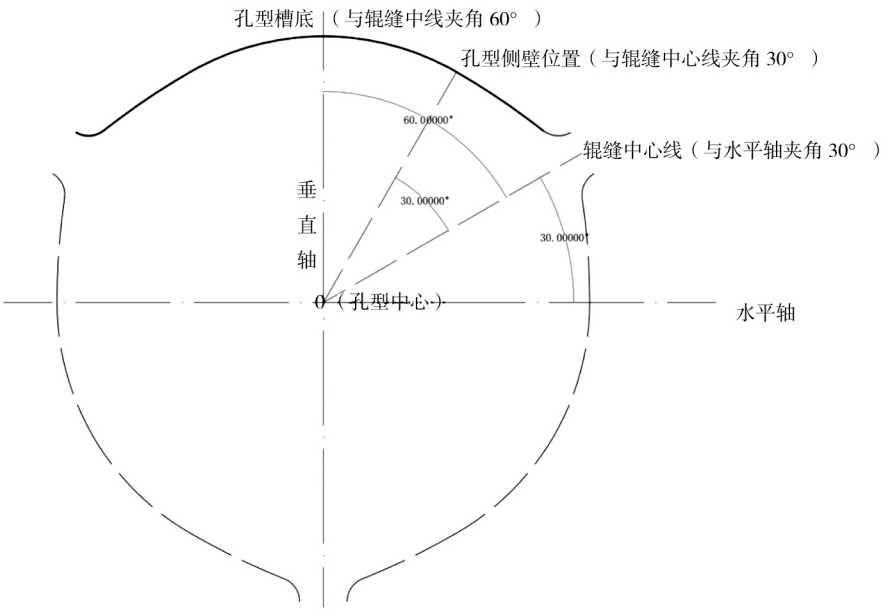


图 3　孔型轮廓

中国知网　https://www.cnki.net

2.2 推导等效壁厚计算公式

减小孔型直径(压轧辊),孔型直径小于标准孔型直径,轧辊的压下量 $\delta_{压下}$ 是孔型直径减小量 ΔD 的一半。减小孔型直径后,成品孔型的钢管断面壁厚外轮廓曲线从槽底到孔型侧壁 30° 处为抛物线,其方程为 $y = ax^2$,$a = S_{max} - S_{min}$,通过对这段抛物线进行积分运算,计算出这一区间钢管断面等效壁厚 S_{mean} 为:

$$S_{mean} = \frac{1}{3}(S_{max} - S_{min}) + S_{min} \quad (2)$$

减小孔型直径槽底壁厚最薄,与辊缝中线交角 30° 处壁厚最厚,其中最薄壁厚和最厚壁厚的计算公式如公式(3)和公式(4):

$$S_{min} = S_{nom} - \delta_{压下} \quad (3)$$

式中:S_{nom} 为名义壁厚(标准孔型的钢管壁厚);$\delta_{压下}$ 为轧辊压下量。

$$S_{max} = S_{mon} - \delta_{压下}\sin 60° \quad (4)$$

将公式(3)和(4)代入公式(2)可以得出等效壁厚的计算公式(5):

$$S_{mean} = S_{mon} - \frac{1}{3}\delta_{压下}(\sin 60° + 2)$$

$$S_{mean} = S_{mon} - 0.955\,3\,\delta_{压下} \quad (5)$$

2.3 减小孔型直径断面壁厚变化量

现在用一个实例介绍减小直径断面壁厚的最大值、最小值和等效值的计算过程。某 135 系列标准孔型中的成品孔型直径是 135 mm,设计标准孔型时选用直径 127.2 mm 的芯棒(热态芯棒直径 127.33 mm);该芯棒对应的名义壁厚 S_{nom} = 3.83 mm。轧辊压下量 $\delta_{压下}$ 取 2 mm,所以孔型直径减小值为 4 mm。压辊 2 mm 孔型轮廓线变化如图 4,实线是标准孔型轮廓,虚线是压辊的孔型轮廓,中间的实线是芯棒直径,虚线和芯棒直径之间的部分就是压辊后钢管断面壁厚。

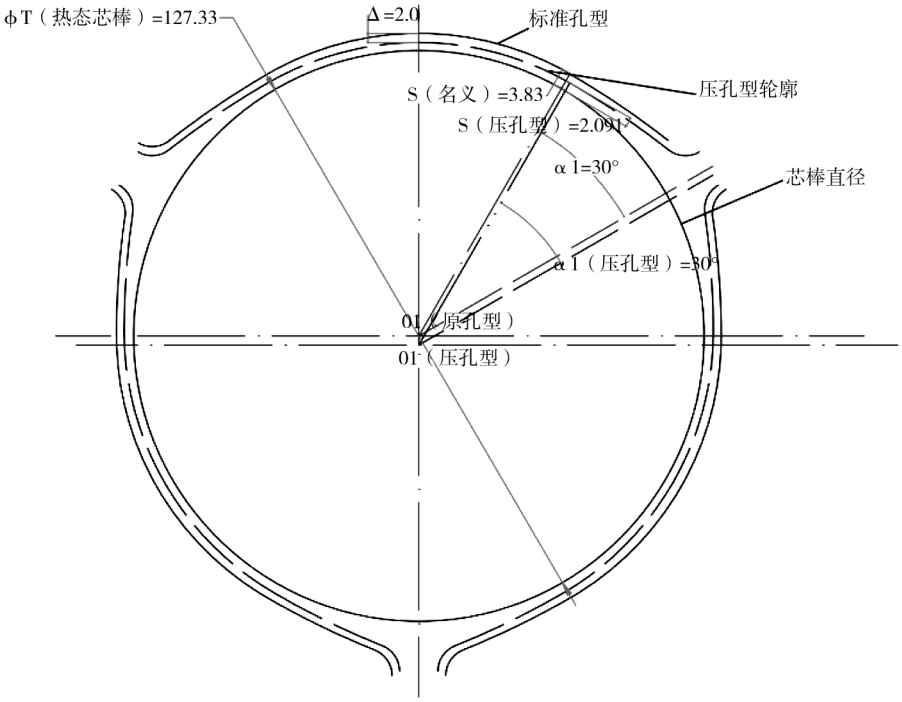


图4 压轧辊孔型轮廓变化

2.3.1 槽底处壁厚变化值

图 4 中压轧辊后槽底壁厚最薄,该处壁厚 $S_{槽底}$ = 1.83 mm;计算压辊后槽底的壁厚值 $S_{min} = S_{nom} - \delta_{压下}$ = 3.83 − 2 = 1.83 mm;计算值与实际值相等。

2.3.2 侧壁 30° 壁厚变化值

图 4 中侧壁 30° 处壁厚最厚,该处壁厚 $S_{30°}$ = 2.091 mm;计算压辊后侧壁 30° 处的壁厚值:$S_{max} = S_{nom} - \delta_{压下}\sin 60° = 3.83 - 2 \times \sin 60° = 2.098$ mm,计算值与实际值相等。

中国知网 https://www.cnki.net

2.3.3　计算等效壁厚

等效壁厚:

$S_{mean} = S_{nom} - 0.955\ 3\ \delta_{压下} = 3.83 - 0.955\ 3 \times 2 = 1.919$ mm

2.4　附加壁厚公差率下限计算公式

将压轧辊后钢管断面壁厚的最小值 S_{min}、最大值 S_{max}、等效壁厚 S_{mean} 代入附加壁厚公差率计算公式(1),就可以得出减小孔型直径(压轧辊)对应附加壁厚公差率下限计算公式(6):

$\Delta = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{mean}} \times 100\%$,将公式(3)(4)(5)代入得出:

$$\Delta = \frac{\delta_{压下} - \delta_{压下}\sin 60^\circ}{S_{nom} - 0.955\ 3\ \delta_{压下}} \times 100\% \quad (6)$$

设计芯棒直径时既要尽量减少芯棒数量,还要考虑附加壁厚公差率,所以不同机组确定了附加壁厚公差率,就可以计算出轧辊可以压下的最大值,根据上面的公式(6)推导出轧辊压下量的计算公式为(7):

$$\delta_{压下} = \frac{\Delta \times S_{nom}}{1 - \sin 60^\circ + 0.955\ 3\ \Delta} \quad (7)$$

式中:$\delta_{压下}$ 为轧辊压下量;S_{nom} 为名义壁厚;Δ 为附加壁厚公差率。

3　附加壁厚公差率上限值计算公式

3.1　增加孔型直径壁厚变化规律

增加孔型直径(放轧辊),孔型直径大于标准孔型直径,产生壁厚偏差,这一偏差称为附加壁厚公差率上限值。增加孔型直径成品前孔型槽底的壁厚变化量最大,壁厚最厚,从槽底向侧壁壁厚逐渐减小。由于成品孔型和成品前孔型几何尺寸相同,呈 60° 交替分布。成品前孔型槽底 60° 到侧壁 30° 范围的钢管进入成品孔型后对应侧壁 30° 到辊缝中心线的范围,所以这部份钢管壁厚不被轧辊压缩。成品前孔型侧壁 30° 到辊缝中心线范围的钢管壁厚进入成品孔型后被压缩。

3.2　推导等效壁厚计算公式

3.2.1　计算壁厚值

(1) 成品孔型的槽底处壁厚最厚,该处壁厚的计算公式为:

$$S_{max} = S_{nom} + \delta_{抬起} \quad (8)$$

式中:$\delta_{抬起}$ 为轧辊抬起量。

(2) 侧壁 30° 位置壁厚值

$$S_{30^\circ} = S_{nom} + \delta_{抬起}\sin 60^\circ \quad (9)$$

(3) 辊缝处的壁厚值

$$S_{0^\circ} = S_{nom} + \delta_{抬起}\sin 30^\circ \quad (10)$$

式中:S_{0° 为辊缝中心线处的壁厚。

3.2.2　计算等效壁厚

成品孔型的壁厚,从槽底到侧壁 30° 的位置,壁厚由成品前孔型轧制;从侧壁 30° 到辊缝中心线的位置,壁厚由成品孔型轧制,计算着两部分的等效壁厚。

(1) 槽底到侧壁 30° 范围内的最大壁厚和最小壁厚

$$S_{max} = S_{nom} + \delta_{抬起}$$
$$S_{min} = S_{nom} + \delta_{抬起}\sin 60^\circ \quad (11)$$

(2) 槽底到侧壁 30° 范围内等效壁厚

$$S_{mean} = S_{min} + \frac{S_{max} - S_{min}}{3}$$

$$S_{mean60^\circ\sim30^\circ} = S_{nom} + \frac{1}{3}\delta(2\sin 60^\circ + 1) \quad (12)$$

(3) 侧壁 30° 到辊缝中心线位置(侧壁 0°)壁厚最大值和最小值

$$S_{max} = S_{nom} + \delta_{抬起}\sin 60^\circ$$
$$S_{min} = S_{nom} + \delta_{抬起}\sin 30^\circ \quad (13)$$

(4) 侧壁 30° 到中心线位置等效壁厚:

$$S_{mean} = S_{min} + \frac{S_{max} - S_{min}}{3}$$

$$S_{mean30^\circ\sim0^\circ} = S_{nom} + \frac{1}{3}\delta_{抬起}(2\sin 60^\circ + 1) \quad (14)$$

$$S_{mean60^\circ\sim0^\circ} = \frac{1}{2}(S_{mean60^\circ\sim30^\circ} + S_{men30^\circ\sim0^\circ}) \quad (15)$$

将公式(12)和(14)带入公式(15)得出成品孔型整个断面的等效壁厚:

$$S_{mean} = S_{nom} + \frac{1}{2}\delta_{抬起}\sin 60^\circ + \frac{1}{3}\delta_{抬起}\sin 30^\circ + \frac{1}{6}\delta_{抬起} = S_{nom} + 0.766\ 3\ \delta_{抬起} \quad (16)$$

3.3　增加孔型直径断面壁厚变化量

现在用某三辊连轧管机组的 135 系列孔型,增加孔型直径(抬辊)后成品前孔型壁厚变化情况。该 135 系列标准孔型中的成品孔型直径是 135 mm,设计标准孔型时选用直径 127.2 mm 的芯棒(热态芯棒直径 127.33 mm);该芯棒对应的名义壁厚 S_{nom} 是 3.83 mm。轧辊抬起量 $\delta_{抬起}$ 取 2 mm,所以孔型直径增加值为 4 mm。

3.3.1　槽底处壁厚

中国知网　https://www.cnki.net

抬起轧辊后槽底壁厚最厚，该处壁厚 $S_{槽底}$ = 5.83 mm。计算抬辊后槽底处的壁厚值 $S_{max} = S_{nom} + \delta_{抬起}$ = 3.83 + 2 = 5.83 mm，计算值和实际值相等。

3.3.2 侧壁30°处壁厚

侧壁30°处壁厚 $S_{30°}$ = 5.565 mm。计算抬辊后侧壁30°处的壁厚值：$S_{max} = S_{nom} + \delta_{抬起}\sin60° = 3.83 + 2 \times \sin60° = 5.562$ mm，计算值与实际值相等。

3.4 附加壁厚公差率上限计算公式

抬起轧辊钢管断面壁厚的最小值 S_{min}、最大值 S_{max}、等效壁厚 S_{mean} 代入附加壁厚公差率计算公式(1)，就可以得出抬起轧辊情况下附加壁厚公差率计算公式：

$$\Delta = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{mean}} \times 100\%$$

$$\Delta = \frac{(S_{nom} + \delta_{抬起}) - (S_{nom} + \delta_{抬起}\sin30°)}{S_{nom} - 0.766\,3\,\delta_{抬起}} \times 100\%$$

$$\Delta = \frac{0.5\delta_{抬起}}{S_{nom} + 0.766\,3\,\delta_{抬起}} \times 100\% \quad (17)$$

推导出抬起轧辊时的孔型调整量计算公式为：

$$\delta_{抬起} = \frac{\Delta \times S_{nom}}{0.5 - 0.766\,3\Delta} \quad (18)$$

4 推导公式与外方公式对比

4.1 计算附加壁厚公差率

利用公式(6)计算135孔型，名义壁厚3.83 mm、芯棒直径127.2 mm、孔型直径减小2 mm，对应轧辊压下1 mm(壁厚减小1 mm)附加壁厚公差率为：

$$\Delta = \frac{1 - 1 \times 0.866\,0}{3.83 - 0.955\,3 \times 1} \times 100\% = 4.661\,3\%$$

4.2 外方数模计算结果

外方数学模型计算该孔型减小相同数值的附加壁厚公差率为4.85%，本文推导附加壁厚公差率公式的计算值与外方数学模型计算值接近，存在0.19个百分点的差值。

5 结束语

通过在孔型图上模拟和与外方数学模型的对比，证明了推导公式的正确性，该附加壁厚公差率计算公式可以用于工艺研究和工艺设计。为了推导出更加精确的附加壁厚公差率计算公式，应该应用数值模拟方法分析测量出轧钢过程轧件的滑移系数和轧件轧辊间、轧件芯棒间的摩擦系数，利用这些系数修正附加公差率公式。

参 考 文 献

[1] 卢立峰，王庆伟. PQF三辊连轧管机辊缝调整[J]. 钢管，2020，48(2)：45－46.
[2] 王鹏飞，秦建新. 少机架限动芯棒连轧管机孔型设计探讨[J]. 钢管，2000，29(1)：19－20.
[3] 李国祯. 现代钢管轧制与工具设计原理[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.
[4] 王先进，徐树成. 钢管连轧理论[M]. 北京：冶金工业出版社，2005.

(上接第37页)

4 结束语

智能燃烧系统投入使用以来，比传统的控制系统有着更快的系统响应速度和更高的控制精度，既节约了能源，又保证了稳定的生产工艺，也为目前煤气环形加热炉智能燃烧控制改造提供了可借鉴的方案。

参 考 文 献

[1] 杨福宇. 现有双交叉限幅系统的缺点[J]. 冶金自动化，1989，(1)：13－17.
[2] 卢于逑. 热轧钢管生产问答[M]. 北京：冶金工业出版社，1994.

中国知网 https://www.cnki.net