

# 冷弯方矩管 R 角控制方法的探索与研究

柳 喆

山西钢铁建设(集团)有限公司山西鼎荣冷弯型钢有限公司 山西 太原 030008

**【摘要】**：对冷弯成型过程中影响 R 角一致性的因素进行分析，因素包括材料的厚度、R 值、屈服强度。同一批次、不同炉批的力学性能的差异性，影响到了钢管截面尺寸的一致性和互换性。

**【关键词】**：冷弯方矩管；R 角；一致性；控制方法

## 1 引言

冷弯方矩管被应用我国建设的多个行业，通过成型轧辊的多道辊压成型，焊接，整形，生产出满足需求的各种尺寸的矩形钢管。随着各企业向自动化发展的逐步迈进，机器人的应用越来越广泛，方管的技术要求也随着自动化产业的扩展而提升，如何生产出可满足机器人要求的原材料也迫在眉睫，在此过程中，保证流水化作业首要解决的问题即是产品的一致性、互换性，需要对冷弯方矩形管 R 角的进一步控制。要求钢管焊缝无论朝那个方向，都要求圆弧处错台小于 1.5mm。

以原有的冷弯方管举例，通过下图可明显看出第一弯角趋于内趴型。



图 1

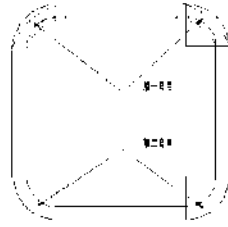


图 2

## 2 原因分析

产生内趴的原因主要有板料宽度分配的偏差；弯曲角度的影响；空弯造成板料的成型不到位。

### 2.1 板料宽度计算偏差

由于现在生产方管采用的是直接成方的工艺，需要在设计辊花时合理的分配圆弧用料和直线段用料。在其板料的弯曲面上必然会有一个既不受拉，又不受压的过渡层，应力几乎等于零，这个过渡层称为材料的中性层。中性层系数 K 值的选取决定了 R 角对称的关键性因素。

现采用标识法对不同厚度、不同力学性能的板料进行分析研究，对于中性层系数的影响因素有厚度、R 角值，屈服强度、抗拉强度。

通过在生产的过程中，用同一套轧辊在不进行任何的调整状态下，同一材质的不同炉批号的钢卷所生产的钢卷截面

尺寸也不尽相同。发现同一批次的钢卷，由于钢卷的力学性能存在差异，导致了其截面无法做到完全一致。在对轧辊间距进行微调后，可得到较为稳定的截面。

因此在孔型设计时，不但需要考虑 R 角与厚度之间的关系，同样也需考虑钢卷力学性能对其中性层的影响。

现采用的比较合理公式：

$$K = 0.567 \times (R_i/t + 0.25) \div (1.2 \times R_i/t + 1) \times (1 + \sigma_s^{2.5} / (2051 \times \sigma_b^{1.41})) \quad (\text{公式 } 1)$$

$R_i$ ---内弯角半径

$t$ ---材料厚度

$\sigma_s$ ---屈服强度

$\sigma_b$ ---抗拉强度

该公式所反映的 K 值，与实际生产中通过标记法实际测量的 K 值虽有差异，但计算结果差别很小。

现将该公式分解为两个部分，即  $(R_i/t + 0.25) \div (1.2 \times R_i/t + 1)$  和  $(1 + Y^{2.5} / (2051 \times U^{1.41}))$ ，通过函数图表对其进行分析，这里将  $R_i/t$  简化为 x，U 和 Y 的关系通过屈强比  $\lambda$  进行作图。屈强比范围为 0.7~0.9 之间进行分析及  $Y = \lambda U$

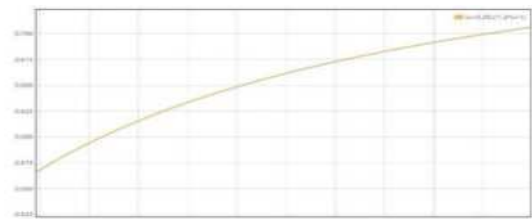


图 3

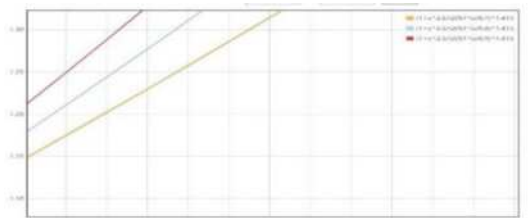


图 4

通过图 3、图 4 进行分析我们可以看到， $R_i/t$  与  $\lambda$  越大， $K$  值也越大。

我们通过常用冷弯方管进行计算， $R_i$  的确定按照 GB/T6728 中所规定的中间值进行选取。计算结果如下表

表 1

序号	厚度	R 角	屈服强度	抗拉强度	屈服比	K 值	弯角弧长
1	6	6	378	538	0.70	0.38	13.04
2	6	6	424	541	0.78	0.40	13.23
3	6	6	472	538	0.88	0.43	13.47
4	8	10	423	549	0.77	0.42	21.04
5	8	10	475	544	0.87	0.45	21.41
6	8	10	506	547	0.93	0.47	21.64
7	10	12	395	567	0.70	0.40	25.19
8	10	12	475	570	0.83	0.44	25.79
9	10	12	508	548	0.93	0.47	26.21
10	12	15	384	538	0.71	0.41	31.25
11	12	15	464	573	0.81	0.44	31.85
12	12	15	497	570	0.87	0.46	32.21

通过表 1 可看出，同样厚度、材质的板料，当屈服比越大时， $K$  值也越大，而在板厚度不大于 8mm 的情况下，钢卷可以混产。当板厚超过 10mm 后，为了保证孔型的一致，需要将原料卷按照屈服比的大小进行分类，按照屈服比的分类对轧辊间距进行微调以保证所生产的孔型一致。厚度越大，屈服比分类区间越小，微调次数越多。

### 2.2 孔型设计中弯曲角度的影响

在成型的过程中，合理的分配角度至关重要，而如果成型角度过大，必然会使板料厚度发生变化，内应力的增加，造成板料回弹原有的圆弧变为直线段。

当板料在受到成型力的作用下，通过与板料内部的残余应力相互作用，使板料发生弯曲，导致板料内应力状态的重新分部，当板料通过成型机架，位于两组机架之间时，相当于外力卸载，板料发生回弹。在成型时，一方面有塑性变形，同时也伴随着弹性变形，架次的间距越大，越容易发生板带的回弹，及板带内应力的释放。在板料内部所产生的内应力越大，合理的选择成型角度就非常重要。

现对板料的回弹进行分析。

回弹恢复计算公式如下：

$$r_s = \frac{1}{\frac{1}{R_i} - \left( \frac{2 \times \sigma_s}{E \times t} \times \left( 1.5 - 0.5 \times \frac{2 \times R_i \times \sigma_s^2}{E \times t} \right) \right)} - (K \times t) \quad (\text{公式 2})$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_i} - \left( \frac{2 \times \sigma_s}{E \times t} \times \left( 1.5 - 0.5 \times \frac{2 \times R_i \times \sigma_s^2}{E \times t} \right) \right)} \div R_i \times \alpha \quad (\text{公式 3})$$

$R_i$ ---内弯角半径

$t$ ---材料厚度

$\sigma_s$ ---屈服强度

$\sigma_b$ ---抗拉强度

$E$ ---弹性模量

$\alpha$ ---设计角度

$\alpha_0$ ---恢复角度

$r_s$ ---恢复内弯角半径

现采用材质为 Q355B 的不同厚度原材料进行计算，计算结果如下表：

表 2

序号	厚度	R 角	屈服强度	K 值	$r_s$	$\alpha_0$
1	6	6	378	0.38	6.063	89.310
2	6	6	424	0.4	6.073	89.214
3	6	6	472	0.43	6.085	89.106
4	8	10	423	0.42	10.139	89.064
5	8	10	475	0.45	10.162	88.928
6	8	10	506	0.47	10.177	88.844
7	10	12	395	0.4	12.149	89.163
8	10	12	475	0.44	12.188	88.966
9	10	12	508	0.47	12.209	88.873
10	12	15	384	0.41	15.187	89.156
11	12	15	464	0.44	15.234	88.959
12	12	15	497	0.46	15.257	88.871

通过表 2 可看出，当我们按照国标的 R 角和图纸的弯曲角度进行设计时，由于板料的回弹，最终得到的弯曲角度和 R 角值都会变大，因此在每架成型角度的基础上，要适当增大弯曲角度和减小轧辊的 R 角，才能保证每架次弯曲角度达到设计角度。

这是由于回弹角与材料的屈服强度、硬化指数成正比，与弹性模量  $E$  成反比，屈服强度越大，板料内应力也越大，导致大的弹性变形，弹性模量越大，材料抵抗弹性弯曲的能力也越大。在实际生产过程中，由于每炉钢的材料性能不稳定，回弹值随之也会出现波动。

以表 2 中序号 10 举例，对于不同的成型角度，考虑的过弯量也不同， $R$  角越大时，相对于厚度的变形趋势越小，板料中性层两侧的纯弹性变形区以及塑性变形区总变形中的弹性变形比重增大，塑性变形不充分。这就要求在设计时，对每架的成型角度进行过弯，对每架次的轧辊成型  $R$  角也要适当的减小，才能达到设计的初衷。

同样，两个相邻道次间成型的角度越小，板料所产生的内应力也随之越小，分别采用 10 组机架和 12 组机架进行分析。

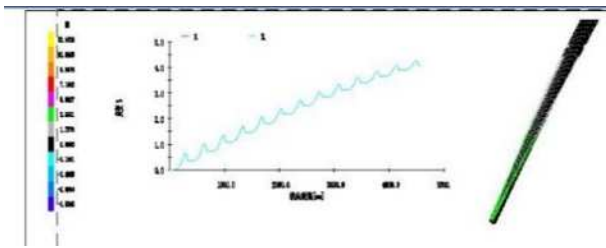


图 5

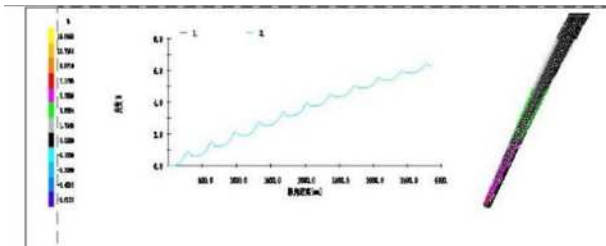


图 6

上图中，成型机架分别采用 12 架和 10 架进行成型，在成型过程中，最大应变分别为 4.26% 和 6.2%，减小其成型过程中的残余应力，可更好的使  $R$  角成型到位。用 12 组机架成型，减小了相邻架次的成型角度，降低了内应力。

### 2.3 空弯造成板料的成型不到位

在成型过程中，由于轧辊无法与下  $R$  角进行约束，导致下  $R$  角为空弯，上辊无法给予板带进行压缩作用，下  $R$  角会增大。



图 7

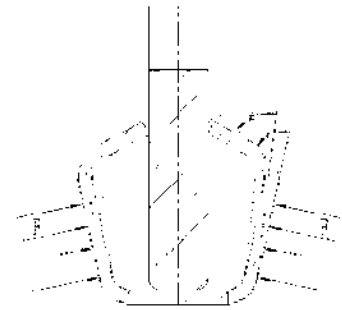


图 8

图 8 明显可以看出，由于板带的成型，第 1 弯角在成型到角度  $\alpha$  时，上轧辊无法压紧到第二弯角的内  $R$  处，致使内  $R$  处无法提供约束，第二弯角在受到校正弯曲的弯曲力  $F$  的作用下，会有向内弯曲的趋势，如果弯曲力  $F$  过大，很有可能导致压轧线向内偏移。第一弯角直线段向内偏移，板带自由边在碰触到轧辊侧时，原有角度  $\alpha$  减小至角度  $\beta$ ，弯曲力作用面直线段尺寸增大。

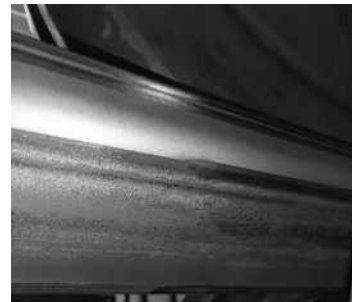


图 9

## 3 主要解决措施

(1) 合理计算板宽，确定弯角圆弧所需板料宽度和挤压力，根据机组情况和原材料材质书，进行实际测量，确定好中性层系数。

(2) 合理分配成型角度，采用下山法的方式通过减小应力，使每架次受力最大值稳固在合理的计算范围之内。

(3)  $R$  角空弯，需要计算合理的定径量，同时采用补偿法，根据板料的回弹趋势，进行修正弯曲前几架道次的上辊尺寸，使板料的回弹量得到补偿。如有必要，需增加内压装置。

## 4 结论

为了控制好  $R$  角的一致性，需要对中性层进行反复的验算，在验算过程中，不仅要验算  $R$  角、板厚，同时应考虑原材料的本身的力学性能。在设计辊花图时，需要根据原材料的屈服强度、厚度、 $R$  角对每架次的回弹进行重新分配。对钢卷进行入厂检验，参照钢厂提供的产品质量证明书，对钢

卷进行分类，以保证快速稳定的生产。

### 参考文献:

- [1] 乔治·哈姆斯,刘继英,艾正青.冷弯成型技术手册[M].化学工业出版社,2009.
- [2] 吴必顺.厚壁方矩管外圆弧不对称缺陷的探讨[J].焊管.2000(1).
- [3] 董晓俊.冷弯厚壁矩形管的参与应力[D].武汉科技大学,2012.
- [4] 吴义江,赵耀.高强度钢厚板冷弯成型及回弹分析[J].中国造船.2014(12)
- [5] 国家质监局.结构用空心冷弯型钢[S].北京:中国标准化出版社,2017.
- [6] 国家质监局.塔机用冷弯方矩形管[S].北京:中国标准化出版社.2010.