

# 卷曲式 JCOE 成形焊管复合模具设计

刘庆才<sup>1,2</sup>

(1. 广州铁路职业技术学院 机电工程学院, 广东 广州 511400; 2. 番禺珠江钢管集团有限公司 研发中心, 广东 广州 511400)

**摘要:** 针对卷曲式 JCOE 成形焊管成形过程中存在的钢板滑动、板边未预弯、钢板变形导致难以进入钳口及成形芯轴尺寸不合理等工艺问题, 研究设计了板边预弯和成形复合模具。运用钢板弯曲的弹塑性变形理论, 给出了预弯力和复合模具参数计算方法, 进一步考虑加工硬化对钢管成形过程的影响, 并结合相关文献给出的硬化指数, 计算了钢级从 X42 到 X70 管线钢的性能参数  $B$  值, 得到了考虑加工硬化的模具参数计算方法。使用两种方法求得不同屈服强度等级和不同规格钢管的预弯力和模具参数, 并与实际工艺的模具参数进行对比。结果表明: 在不考虑加工硬化的条件下, 计算结果和实际模具尺寸的最大偏差为 1.1%; 在考虑加工硬化的条件下, 计算结果和实际模具尺寸的最大偏差为 -0.9%, 且所有计算结果均略小于实际工艺的模具参数。结合实际生产情况, 考虑加工硬化的模具参数计算结果更加准确。

**关键词:** 直缝埋弧焊管; 复合模具; JCOE 成形焊管; 加工硬化; 预弯力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.025

**中图分类号:** TG305

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 10-0184-05

## Design on composite mold for coiled JCOE forming welded pipe

Liu Qingcai<sup>1,2</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering, Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 511400, China;

2. R&D Center, Panyu Chu Kong Steel Pipe Group Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

**Abstract:** For the process problems of steel plate sliding, without pre-bending of plate edge, difficulty in entering the jaws due to steel plate deformation and unreasonable dimensions of forming core shaft in the forming process of coiled JCOE forming welded pipes, a composite mold of pre-bending and forming for plate edge was studied and designed, and using the elastic-plastic deformation theory of steel plate bending, a calculation method for pre-bending force and composite mold parameters was proposed. Then, the influence of work hardening on the steel pipe forming process was further considered, and combined with the hardening index provided in relevant literature, the performance parameter  $B$  value of pipeline steel grades from X42 to X70 was calculated, and the mold parameter calculation method considering work hardening was obtained. Furthermore, the pre-bending force and mold parameters of steel pipes with different yield strength grades and specifications were obtained by two kinds of methods, and compared with the mold parameters of actual process. The results indicate that without considering work hardening, the maximum deviation between the calculated results and the actual mold sizes is 1.1%. Under the condition of considering work hardening, the maximum deviation between the calculation results and the actual mold sizes is -0.9%, and all calculated results are slightly smaller than the mold parameters of actual process. Thus, considering the actual production situation, the calculation results of mold parameters considering work hardening are more accurate.

**Key words:** longitudinal submerged arc welded pipe; composite mold; JCOE forming welded pipe; work hardening; pre-bending force

随着国内油气输送管道工程不断建设产生的市场驱动, 国内大口径直缝焊管制造行业迅速发展, 出现了一批直缝焊管生产企业<sup>[1]</sup>。建设的大口径直缝埋弧焊管主要是以 UOE (U-shaped forming, O-shaped forming and Expanding) 和 JCOE (J-shaped

forming, C-shaped forming, O-shaped forming and Expanding) 工艺为主。其中, UOE 工艺设备投资大、产品质量好<sup>[2]</sup>, 但是模具更换不灵活, 仅适合大批量生产, 而不适合小批量、多规格的生产; 渐进式 JCOE 工艺的设备投资成本低, 模具更换比 UOE 工艺方便, 生产相对灵活, 企业应用较多。

UOE 和 JCOE 工艺技术均源自国外, 技术引进后在生产实践带动下开展了理论和实践研究。研究主要涉及成形理论、生产设备、生产工艺及产品开发等方面。有研究者使用解析法和有限元法分析了

收稿日期: 2024-01-30; 修订日期: 2024-04-12

基金项目: 广东省高校科技创新项目 (2019GKTSCX077)

作者简介: 刘庆才 (1969-), 男, 博士, 高级工程师, 教授

E-mail: 807431278@qq.com

JCOE 工艺的板料预弯过程, 得出预弯过程的解析式和预弯参数与成形质量的关系<sup>[3-5]</sup>, 还有研究者使用解析法分析了卷曲式 JCOE 成形过程, 得出后弯和成形模具的参数计算方法<sup>[6]</sup>。在工艺配套设备方面, 国内制造了钢管矫直机, 以改善钢管的圆度和直线度<sup>[7]</sup>, 此外, 为了降低成本、替代进口, 国内开展了扩径技术研究, 并研制了 UOE 工艺的扩径模具<sup>[8-9]</sup>。目前, 已有很多关于生产制造工艺与工艺控制方面的研究, 例如有研究分析了如何控制 JCOE 成形的椭圆度问题<sup>[10]</sup>, 提出了采用卷曲式 JCOE 工艺开发海底管线用超大口径直缝焊管<sup>[11]</sup>, 对于应用于酸性环境下的 UOE 钢管开发工艺也有研究<sup>[12]</sup>, 大量的研究文献说明技术引进后的应用和优化是非常必要的。

卷曲式 JCOE 工艺技术的设备投资低, 模具更换迅速, 非常适合小批量多规格的管坯成形, 该工艺尤其适合强度高、壁厚偏薄和公称外径  $\leq \Phi 457.4 \text{ mm}$  或公称外径  $\geq \Phi 1219 \text{ mm}$  口径的直缝焊管的生产<sup>[6-7]</sup>。本文基于进一步提高钢管成形质量和降低成本的需求, 通过分析卷曲式 JCOE 钢管的成形工艺过程, 设计了预弯和管体成形复合模具, 解决了成形过程中钢板滑动、钢板未预弯、钢板纵向板边有时因变形导致难以进入钳口以及芯轴尺寸不合理等问题。并根据钢板弯曲的弹塑性变形理论, 得出了预弯力和模具参数的计算方法, 在不考虑加工硬化的条件下, 得到了针对不同钢级与不同规格钢管的模具尺寸计算公式。为了确定钢管成形过程中加工硬化的影响, 研究了不同管线钢的硬化指数对成形的影响以及钢板性能参数  $B$  的确定方法, 并分析计算了不同钢级与不同规格钢管的模具尺寸。经过分析对比计算结果, 不考虑加工硬化的计算结果已满足工艺要求, 而考虑加工硬化的计算结果更加准确。

## 1 卷曲式 JCOE 成形的工艺问题

卷曲式 JCOE 成形过程中, 钢板送入钳口, 模具芯轴旋转, 钢板卷曲形成 J 形, 如图 1 所示。模具芯轴退出后再用模具上另一侧的钳口卷曲钢板的另一边, 形成 C 形<sup>[6]</sup>。钳口是压板与成形模具本体之间的空间, 钢管成形时用来卡住钢板边缘。

成形过程可能发生以下问题。

(1) 成形过程中卡在钳口的钢板可能发生滑动, 影响成形精度。从成形过程来说, 不进行预弯, 也是因为预弯后钢板更易滑动。

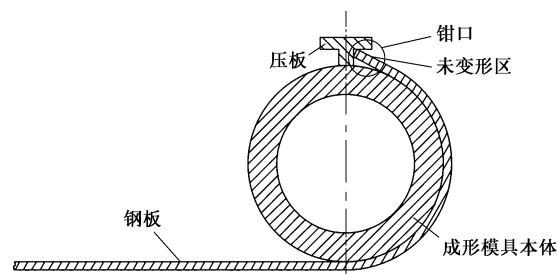


图 1 钢管 J 形成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of J-shaped forming for steel pipe

(2) 从图 1 可以清楚地看到, 成形过程中为了保证钢板顺利进入钳口, 钳口处压板下表面和模具表面之间的距离必须大于钢板厚度, 这样就造成了管坯板边区域的曲率半径接近无穷大, 即存在未变形区, 即直边。管坯直边的存在会导致开口区域的管坯偏离预定曲率, 影响后续焊接质量, 增大残余应力。为了消除直边, 要求设计的复合模具在不影响钢板进入钳口的前提下, 能够保证加工后的管坯开口区域的曲率半径与管坯预定曲率半径接近。

此外, 由于钳口尺寸固定, 生产过程中会出现因钢板变形而导致的钢板难以进入钳口的问题, 降低了生产效率。因此, 从工艺角度希望钳口大小可调。

(3) 成形用模具芯轴的尺寸不合理。因为钢厂生产的钢板性能存在波动, 其屈服强度不是一个确定值, 而且成形过程中存在加工硬化的影响, 其弯曲程度难以确定。成形后的管坯可能开口过大, 造成焊接后的内应力大、缺陷率高; 成形后的管坯也可能无开口, 形成重叠, 即搭边现象。如果出现了搭边则无法进行后续的焊接, 处理费时费力。为了避免出现搭边, 设计成形模具芯轴时应尽量使管坯形成开口, 开口范围以不超过 70 mm 为最佳。

此外, 还需考虑大口径直缝焊管在成形焊接之后还要经过扩径工序, 以降低残余应力, 修正管形。按照 API 5L—2013<sup>[13]</sup> 的要求, 扩径率在 0.3% ~ 1.5% 之间。实际生产使用的模具参数通常按照 0.8% 计算。考虑到钢管扩径, 为了保证钢管最终尺寸, 钢管成形的的外径尺寸必须小于钢管的公称外径尺寸, 再考虑存在回弹, 回弹前尺寸则必须小于管坯尺寸。

## 2 板边弯曲和管坯成形复合模具设计

### 2.1 结构设计

针对第 1 章提出的问题, 开展针对性结构设计, 设计的复合模具在 J 形成形时的工作截面如图 2 所示。图 2 中, 压板与管坯接触的钳口侧设计为圆弧

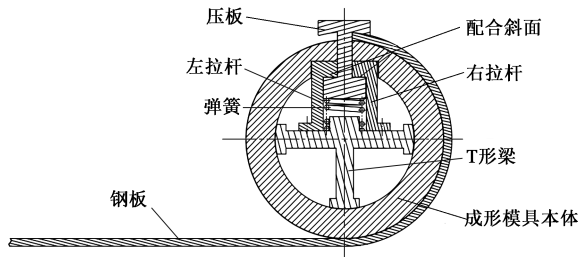


图 2 复合模具 J 形形成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of J-shaped forming for composite mold

形, 圆弧曲率半径与管坯回弹前半径相同。成形时, 通过拉杆与压板之间的配合斜面实现钳口开口的大小变化, 既便于钢板进入, 又可以尽量消除直边, 实现预弯。配合斜面如图 3 所示, 拉杆上加工有若干个斜面, 与对应的若干个压板斜面配合。液压驱动拉杆左移时, 压板向下运动, 图 2 中右侧钳口尺寸减小, 夹紧钢板至钢板与成形模具贴合, 使其具有更大的压紧力和摩擦力。此 J 形形成过程中, 与图 1 成形过程相比, 通过液压驱动钳口压紧钢板, 钢板不易滑动, 可以保证成形的管坯尺寸更加准确。

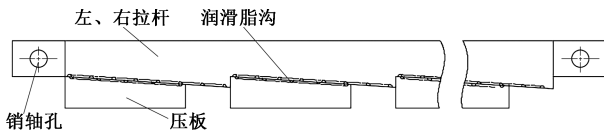


图 3 拉杆与压板斜面配合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of slope matching between pull rod and pressing plate

预弯后, 两端液压马达驱动模具芯轴旋转, 完成 J 形形成。J 形形成完成后, 图 3 中的拉杆右移, 图 2 中的压板在弹簧力作用下向上运动, 操作退出钳口钢板后, 再利用图 2 中左侧钳口完成预弯和成形。为了便于安装调试, 图 2 中拉杆分为左拉杆和右拉杆, 且两个拉杆与下方的 T 形梁通过螺栓连接, 径向定位拉杆。弹簧在拉杆松开时顶出压板。

## 2.2 预弯力计算

按照式 (1) 计算<sup>[14]</sup>弯矩:

$$M = \frac{bt^2}{4} \cdot R_{eL} \quad (1)$$

式中:  $M$  为钢板成形弯矩, ( $N \cdot mm$ );  $b$  为钢板宽度, 具体计算时可以取钢管长度,  $mm$ ;  $t$  为钢板公称厚度,  $mm$ ;  $R_{eL}$  为钢板屈服强度,  $MPa$ 。

结合式 (1) 可计算预弯力, 如式 (2) 所示:

$$F_{\text{弯}} = \frac{M}{1000L_{\min}} = \frac{bt^2}{4000L_{\min}} R_{eL} \quad (2)$$

式中:  $F_{\text{弯}}$  为预弯力,  $kN$ ;  $L_{\min}$  为最小弯曲距离, 即预弯时初始施力点距离管坯开口的长度, 取  $20 \text{ mm}$ 。

拉杆和压板配合斜面的斜度取  $1:20$ , 则拉杆需要的拉力如式 (3) 所示:

$$F_{\text{拉}} = \frac{F_{\text{弯}}}{20} (1 + \mu) = \frac{(1 + \mu)bt^2}{80000L_{\min}} \cdot R_{eL} \quad (3)$$

式中:  $F_{\text{拉}}$  为液压缸提供的拉力,  $kN$ ;  $\mu$  为与摩擦等其他因素有关的系数, 取  $0.2$ 。

## 2.3 钳口压板曲率半径确定

管坯钳口压板的曲率半径计算如式 (4) 所示<sup>[6]</sup>:

$$r_{\text{压}} = \frac{Et(D-t)}{2Et + 3R_{eL}(D-t)} + \frac{t}{2} \quad (4)$$

式中:  $r_{\text{压}}$  为压板下表面与钢板接触位置的曲率半径,  $mm$ ;  $E$  为钢板材料的弹性模量, 取  $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ ;  $D$  为管坯外径,  $mm$ 。

其中, 管坯外径为:

$$D = \frac{D_{\text{out}} - t}{1 + k} + t \quad (5)$$

式中:  $D_{\text{out}}$  为钢管公称外径,  $mm$ ;  $k$  为扩径率。

## 2.4 成形模具本体的曲率半径确定

成形模具本体的曲率半径按照式 (6) 计算<sup>[6]</sup>:

$$r_{\text{模}} = \frac{Et(D-t)}{2Et + 3R_{eL}(D-t)} - \frac{t}{2} \quad (6)$$

式中:  $r_{\text{模}}$  为成形模具本体的曲率半径,  $mm$ 。

实际生产中由于直径更便于测量, 成形模具本体尺寸一般用直径  $D_{\text{模}} = 2r_{\text{模}}$  表示。根据式 (6) 可以得到式 (7):

$$D_{\text{模}} = 2r_{\text{模}} = \frac{Et(D-t)}{Et + 1.5R_{eL}(D-t)} - t \quad (7)$$

## 3 不同规格钢管的模具尺寸计算与应用对比

以公称外径  $\Phi 457.4 \text{ mm}$ 、公称壁厚  $10.3 \text{ mm}$ 、钢级 X60 的钢管为例。扩径率  $k$  取  $0.8\%$ , 按照式 (5) 计算得到管坯外径  $D$  为  $\Phi 453.9 \text{ mm}$ 。

此钢管规定的最小屈服强度为  $415 \text{ MPa}$ , 弹性模量为  $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 按照式 (4) 计算得到  $r_{\text{压}} = 200.7 \text{ mm}$ , 按照式 (6) 计算得到  $r_{\text{模}} = 190.4 \text{ mm}$ , 按照式 (7) 计算得到  $D_{\text{模}} = \Phi 380.8 \text{ mm}$ 。

按照同样方法计算并预测了几种不同规格钢管的成形模具尺寸, 如表 1 所示。其中  $D_{\text{工}}$  为实际模具尺寸。



表 1 不同规格钢管的计算与实际模具尺寸对比

Table 1 Comparison of calculated and practical mold dimensions for different specifications of steel pipes

| 公称外径/mm | 公称壁厚/mm | 钢级  | 最小屈服强度/MPa | $r_{\text{压}}/\text{mm}$ | 模具尺寸/mm        |                | 偏差/% | $F_{\text{拉}}/\text{kN}$ |
|---------|---------|-----|------------|--------------------------|----------------|----------------|------|--------------------------|
|         |         |     |            |                          | $D_{\text{模}}$ | $D_{\text{工}}$ |      |                          |
| Φ406.4  | 6.4     | X42 | 290        | 178.0                    | Φ343.3         | Φ345           | -0.5 | 107                      |
| Φ457.4  | 10.3    | X60 | 415        | 200.7                    | Φ380.8         | Φ377           | 1.0  | 396                      |
| Φ828.2  | 27.2    | X65 | 450        | 375.3                    | Φ696.1         | Φ690           | 0.8  | 2996                     |
| Φ914.4  | 14.3    | X60 | 415        | 381.0                    | Φ733.3         | Φ725           | 1.1  | 764                      |
| Φ1219.2 | 20.6    | X52 | 360        | 524.7                    | Φ1008.2        | Φ1016          | -0.7 | 1375                     |
| Φ1422.0 | 19.8    | X70 | 485        | 563.9                    | Φ1088.1        | Φ1100          | -1.0 | 1711                     |

表 1 中，给出了 6 种规格直缝焊管的公称直径、公称壁厚和 API 5L—2013<sup>[13]</sup>要求下不同钢级规定的最小屈服强度，预测了压板曲率半径  $r_{\text{压}}$  和计算模具尺寸  $D_{\text{模}}$ 。作为对比，还给出了生产工艺指定的实际模具尺寸  $D_{\text{工}}$ 。表 1 中的偏差是计算的模具尺寸  $D_{\text{模}}$  与生产工艺指定的实际模具尺寸  $D_{\text{工}}$  的代数差，再除以  $D_{\text{工}}$  得到的百分比。从整体来看 6 组计算值与生产工艺指定的实际值的偏差，其中最大偏差为 1.1%，最小偏差为-0.5%，偏差较小，预测合理准确。

表 1 中的计算值是根据钢材的最小屈服强度计算得来的最优值。根据经验，实际的钢材屈服强度比规定的最小值至少偏高 20 MPa，一般高 50 ~ 70 MPa，少量可偏高 120 MPa。按照实际屈服强度计算得到的预测最优值会减小，应使偏差为正值。据此判断，表 1 中实际模具尺寸应该小于计算值，即偏差为正值 1.0%、1.1% 和 0.8% 这 3 组更加合理。而偏差为负值的合理性稍逊，从实际成形效果来看，成形后的管坯开口量偏大。但是如果模具尺寸过小也可能导致管坯无开口，难以处理，影响后续生产。从另一个角度来说，因为钢管直径、壁厚和钢级的不同可以形成各种规格的钢管，实际生产中因为成本原因，不可能为每个规格的钢管均按照最优设计配备模具，对于小批量订单生产，只能选用模具尺寸最接近的成形模具，这也是钢管成形后开口量偏大的主要原因。

从表 1 还可以看到，对于壁厚大或者钢级高的钢管，需要的拉杆力较大，需配备较大的液压缸，反过来也说明该模具非常适合生产钢级适中、壁厚适中的钢管，且生产效果最佳。

4 考虑加工硬化的模具尺寸计算

前文的计算未考虑加工硬化的影响。钢管成形过程中发生塑性变形后，材料的屈服强度上升，即加工硬化

现象。加工硬化指数可描述金属材料抵抗均匀塑性变形的能力。加工硬化对钢管成形过程存在影响，如果考虑加工硬化指数，则钢管成形后的回弹应遵循式 (8)：

$$\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} = \frac{6B}{E(n+2)} \cdot \frac{t^{n-1}}{2^n r_0^n}$$

(8)

式中： $r_0$  和  $r_1$  分别为成形回弹前后管坯中性层半径，可以根据钢管公称直径、公称壁厚与扩径率计算  $r_1$ ； $n$  为加工硬化指数，可参考相关研究确定<sup>[15]</sup>； $B$  为与材料性能有关的参数，为了简化问题，可以统一取 680 MPa，但此取值在计算大管径和高钢级的钢管时误差偏大。

参数  $B$  也可以根据式 (9) 计算<sup>[15]</sup>：

$$B = R_m \left( \frac{e}{n} \right)^n$$

(9)

式中： $R_m$  为抗拉强度。

表 2 给出了硬化指数  $n$  和计算得到的  $B$  值。在不考虑其他因素的影响下，加工硬化指数越小，回弹越大，加工硬化指数越大，回弹越小。其原因为：加工硬化指数越大，材料发生塑性变形后的屈服强度提高越多，抵抗变形的能力越强，所以回弹越小。根据研究<sup>[15]</sup>发现，钢管强度等级越高，加工硬化指数越小。

表 2 不同钢级钢管的加工硬化指数和参数  $B$  值

Table 2 Hardening indexes and parameter  $B$  values for different grades of steel pipes

| 钢级  | 抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$ | 加工硬化指数 $n$ | 参数 $B/\text{MPa}$ |
|-----|-----------------------|------------|-------------------|
| X42 | 415                   | 0.1870     | 685               |
| X52 | 460                   | 0.1270     | 679               |
| X60 | 520                   | 0.0970     | 718               |
| X65 | 535                   | 0.0765     | 703               |
| X70 | 570                   | 0.0600     | 654               |

确定了参数  $B$  和加工硬化指数  $n$  后，根据式 (8) 可以计算回弹前管坯中性层半径，进而确定模具直径尺寸。由于式 (8) 不能直接求解，故采用迭代法计算。针对表 1 中的 6 种规格钢管，考虑加

工硬化指数影响后的计算结果见表 3。

表 3 不同规格钢管考虑加工硬化指数时的计算与实际  
模具尺寸对比

Table 3 Comparison of calculated and practical mold  
dimensions for different specifications of steel pipes  
considering hardening indexes

| 公称外径/<br>mm   | 公称壁<br>厚/mm | 钢级  | 最小屈服<br>强度/MPa | $r_{\text{压}}/$<br>mm | 模具尺寸/mm        |                | 偏差/<br>% |
|---------------|-------------|-----|----------------|-----------------------|----------------|----------------|----------|
|               |             |     |                |                       | $D_{\text{模}}$ | $D_{\text{工}}$ |          |
| $\Phi 406.4$  | 6.4         | X42 | 290            | 177.6                 | $\Phi 342.4$   | $\Phi 345$     | -0.8     |
| $\Phi 457.4$  | 10.3        | X60 | 415            | 198.5                 | $\Phi 376.3$   | $\Phi 377$     | -0.2     |
| $\Phi 828.2$  | 27.2        | X65 | 450            | 369.7                 | $\Phi 685.0$   | $\Phi 690$     | -0.7     |
| $\Phi 914.4$  | 14.3        | X60 | 415            | 376.2                 | $\Phi 723.7$   | $\Phi 725$     | -0.2     |
| $\Phi 1219.2$ | 20.6        | X52 | 360            | 524.4                 | $\Phi 1007.6$  | $\Phi 1016$    | -0.8     |
| $\Phi 1422.0$ | 19.8        | X70 | 485            | 564.9                 | $\Phi 1090.2$  | $\Phi 1100$    | -0.9     |

表 3 中计算的模具尺寸  $D_{\text{模}}$  与生产工艺指定的实际模具尺寸  $D_{\text{工}}$  的最大偏差为 -0.9%，吻合较好，说明加工硬化指数  $n$  的取值和参数  $B$  值的计算合理。比较表 1 和表 3 的  $D_{\text{模}}$  可以看到，考虑加工硬化指数后，表 3 中钢管的  $D_{\text{模}}$  小于表 1 对应值，但差值较小，这也说明表 1 中不考虑加工硬化的计算值也可以满足实际工作要求，且计算更加方便。表 3 中的  $D_{\text{模}}$  小于  $D_{\text{工}}$ ，管坯开口更小，残余应力更小，焊管质量更好。

## 5 结语

针对卷曲式 JCOE 大口径直缝焊管成形过程中存在的直边问题、滑动问题、模具芯轴尺寸不合理以及钢板难以进入钳口问题，以减少设备投资和占地为前提，优化设计了预弯和成形复合模具，给出了钳口压板曲率半径和模具尺寸以及预弯力的计算方法，并与 6 种不同规格钢管的实际模具尺寸做了对比验证。在考虑加工硬化的复杂条件下，研究了不同钢级钢管的加工硬化指数的影响，且得到了参数  $B$  的计算方法，计算了 6 组相应的模具参数，经过生产实践对比，计算结果与生产实践吻合较好。

### 参考文献：

- [1] 张金虎. 大直径直缝焊管机组建设热急需降温 [J]. 焊管, 2009, 32 (3): 5-8.  
Zhang J H. Sharply slow down the construction of large diameter longitudinal welded pipe production line [J]. Welded Pipe and Tube, 2009, 32 (3): 5-8.
- [2] 刘林, 代以斌, 张洪洲, 等. 直缝埋弧焊钢管的成形方式及选择 [J]. 油气储运, 2004, 23 (9): 52-54, 61, 6.  
Liu L, Dai Y B, Zhang H Z, et al. Forming way and selection for longitudinal submerged-arc welded pipe [J]. Oil & Gas Storage

- and Transportation, 2004, 23 (9): 52-54, 61, 6.
- [3] 范亚皎. 大口径直缝焊管预弯工艺参数分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.  
Fan Y J. Analysis Crimping Technique Parameter of Large Straight Welded Pipe [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [4] 宋聪惠. 直缝焊管 JCO 成形过程理论分析与实验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.  
Song C H. Theory Analysis and Experimental Research on Longitudinal JCO Forming Process [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [5] 范利锋, 高颖, 云建斌, 等. 大型直缝焊管预弯成形工艺稳健性设计 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (8): 1112-1116.  
Fan L F, Gao Y, Yun J B, et al. Robustness design for crimping of large diameter straight welded pipe [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26 (8): 1112-1116.
- [6] Liu Q C, Wan X C. Design of curvature radius of finishing roll for crimp JCO formed welded pipe [J]. Open Access Library Journal, 2019, 6 (9): 1-7.
- [7] 徐根涛, 黄杰, 徐伟. 大直径焊管矫直机设计研发与制造 [J]. 钢管, 2020, 49 (6): 25-31.  
Xu G T, Huang J, Xu W. Design, development and manufacture of straightener for large-sized welded pipe [J]. Steel Pipe, 2020, 49 (6): 25-31.
- [8] 王金亮, 温慧华, 何文武, 等. 扩孔变形模式对筒形件成形的影响规律 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 1-7, 22.  
Wang J L, When H H, He W W, et al. Influence laws of reaming deformation modes on forming of cylindrical parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 1-7, 22.
- [9] 常金福, 樊建成. 大口径直缝焊管机组扩径模研制 [J]. 冶金设备, 2018 (2): 12-17.  
Chang J F, Fan J C. Research on repiercing die in UOE mill [J]. Metallurgical Equipment, 2018 (2): 12-17.
- [10] 徐刚, 边晋, 葛玉红, 等. JCOE 焊管扩径后椭圆度的控制与改进 [J]. 焊管, 2015, 38 (7): 38-43.  
Xu G, Bian J, Ge Y H, et al. Control and improvement for ovality of JCOE pipe after expanding [J]. Welded Pipe and Tube, 2015, 38 (7): 38-43.
- [11] 刘庆才, 陈淑荣. 48 英寸海底输油管线钢管的生产 [J]. 机械工程师, 2009 (4): 117-118.  
Liu Q C, Chen S R. Development of 48 inches LSAW submarine oil linepipe [J]. Mechanical Engineer, 2009 (4): 117-118.
- [12] 谢仕强, 王波, 章传国. 酸性环境用 UOE 焊管的开发及应用 [J]. 钢管, 2018, 47 (6): 30-37.  
Xie S Q, Wang B, Zhang C G. Development and application of UOE welded pipe for service under acidic conditions [J]. Steel Pipe, 2018, 47 (6): 30-37.
- [13] API 5L—2013, Specification for line pipe [S].
- [14] 肖景容, 姜奎华. 冲压工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
Xiao J R, Jiang K H. The Theory of Stamping Process [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [15] 孙明明, 方宏远, 王念念, 等. 应变硬化指数取值模型及其对钢管管道失效压力影响分析 [EB/OL]. <http://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20231016.1139.002.html>, 2023-10-17.  
Sun M M, Fang H Y, Wang N N, et al. Strain hardening exponent model and its influence on failure pressure of steel pipeline [EB/OL]. <http://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20231016.1139.002.html>, 2023-10-17.