

直缝焊管机械扩径工艺技术研究

余大典,王啸修

(宝钢分公司 钢管厂,上海 201900)

摘要:阐述了大口径直缝焊管生产线中扩径工序的作用及机械扩径方式的优势,简析了机械扩径的胀形过程及行程设计方法,分析了决定扩径后钢管几何尺寸精度、残余应力状态和机械性能变化等质量指标的工艺技术参数,指出了扩径工具的结构和轮廓参数对获得良好的钢管扩径质量的意义,讨论了影响机械扩径力大小的因素,并给出了扩径力的简化计算方法。

关键词:直缝焊管;机械扩径;扩径率;扩径力

中图分类号: TG335.75 文献标识码: B 文章编号: 1008-0716(2008)03-0062-04

Study on Mechanical Expansion Techniques for LSAW Pipes

Yu Dadian, Wang Xiaoxiu

(Steel Tubing Plant, Baosteel Branch, Shanghai 201900, China)

Abstract: The function of the expanding process and advantages of mechanical expansion ways of the production line for large diameter longitudinal welded pipes are expounded. The mechanical expanding process and its design were analyzed briefly. Some technological parameters were also analyzed, which have decisive influence on pipe's quality indices, such as its geometric dimension, residual stress status and changes in mechanical properties after the pipe was expanded. It was pointed out that the expanding tool's structure and contour parameters were meaningful to the quality of the expanded pipes. Factors that affected the expanding force were discussed and the simplified calculation formula for the expanding force was also given out.

Key words: LSAW pipe; mechanical expansion; expanding ratio; expanding force

0 前言

当今世界上制造大口径直缝埋弧焊管的成型方法有很多,典型方法有:UOE成型法、排辊成型法(CFE)、辊弯成型法(RBE)、卷板成型法(HU-METAL)、折弯成型法(PFE)、JCOE和CE成型法^[1]。不同的方法有不同的特点,但为保证和提高成品管质量,绝大多数成型方法的最后一道工序都是对焊接后管坯再进行一次全长扩径(Expansion),以提高焊管管形质量,改变焊管残余应力状态,影响焊管机械性能指标,并初步考验焊接接头质量。因此,扩径已成为大口径直缝焊管生产中确保成品管质量的一道重要工序。

扩径是一种利用液压或是机械方式从钢管内壁加力使钢管沿着径向向外扩张成型的压力加工工艺。机械扩径方式与液压扩径方式相比,不仅

设备重量和外形尺寸大大减小、结构简单,而且在生产效率和产品质量方面优势更为突出:生产大口径焊管效率高、扩径率可选范围大、钢管内径尺寸容易控制、钢管圆度好、管端形状和尺寸精度高^[2]。目前世界上最先进的几条大口径直缝焊管制管扩径工序都是采用机械扩径方式。

1 机械扩径胀形过程及扩径行程计算

1.1 机械扩径胀形过程

机械扩径是采用分瓣的扇形块沿径向扩张,使管坯沿长度方向以步进方式,分段实现全管长塑性变形的过程,如图1所示。

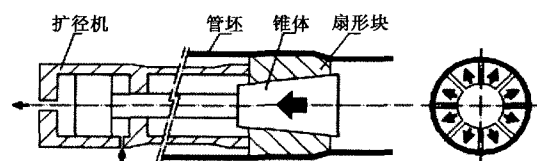


图1 机械扩径示意图

Fig.1 Sketch map of mechanical expansion

余大典 教授级高工 1943年生 1966年毕业于北京科技大学
现从事冶金机械管理工作 电话 26648543
E-mail wangxiaoxiu@baosteel.com

机械扩径胀型每一单步的循环过程可分为五个阶段,如图2所示。

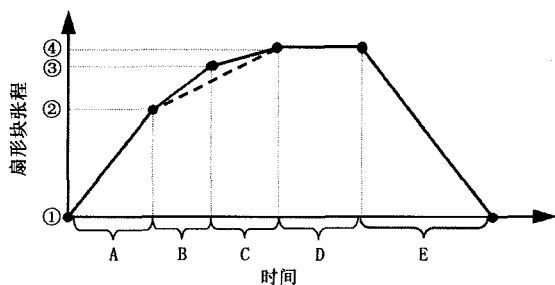


图2 单步扩径运动过程

Fig. 2 Movement process of a single expanding step

初步整圆阶段 A: 扇形块从位置①处开始迅速打开,直到所有扇形块都接触到钢管内壁,也就是抵达位置②处。此时,步长范围内钢管内圆筒中各点半径大小几乎一致,钢管得到初步整圆。在此过程中,扇形块所受负荷很低,径向扩张运动速度较高,适以提高生产节奏。

名义内径阶段 B: 扇形块从位置②处开始降低运动速度,直到抵达位置③处,这是质量设计要求的成品管内圆周位置。在此过程中,扇形块所受负荷迅速增大,径向扩张运动速度较低。

弹复补偿阶段 C: 扇形块从位置③处开始进一步降低运动速度,直到抵达位置④处,这是工艺设计要求的弹复前钢管内圆周位置。在此过程中,扇形块所受负荷继续增大,径向扩张运动速度更低。

保压稳定阶段 D: 扇形块在位置④处一段时间内保持不动,这是设备和扩径工艺要求的保压稳定阶段。在此过程中,扇形块所受负荷不变,径向扩张运动速度为零。

卸荷回归阶段 E: 扇形块从位置④处开始迅速回缩,直到抵达位置①处,这是扩径工艺要求的扇形块最小收缩直径。在此过程中,扇形块所受负荷迅速降低为零。

在实际扩径过程中,为方便和简化扩径过程设置,B和C阶段可以合并起来,见图中虚线,这并不影响钢管的扩径质量。

1.2 扩径行程计算

图2中扇形块位置④的位置决定了具体规格钢管扩径后的直径,位置①对应的是扇形块最小收缩位置,位置④对应的是扇形块最大张开位置。在实际扩径参数设置中,扇形块张程是通过控制

锥体(图1所示)的水平方向行程来实现的,也就是设计扇形块从位置①到位置④的张程转化为设计锥体行程 H_C 。

基于材料特性,一般 H_C 设计为:

$$H_C = \frac{(\delta_e + \delta_i + 1) \cdot di + \frac{\delta_i \cdot T}{2(1 + \delta_i)} - D_{win}}{2 \cdot \tan \alpha} \quad (1)$$

式中: δ_e 为扩径率; δ_i 为弹性收缩率; di 为扩径前钢管名义内径; T 为钢管壁厚; D_{win} 为扇形块收缩至最小位置时轮廓外接圆直径; α 为锥体角度。

公式(1)比较复杂,其中的弹复率也因材质和具体规格的不同有一定波动。在扩径参数实际设计时,可先采用下列简化公式初步设置 H_C 行程,而后根据实际测量值进行微调,再最终设定 H_C 行程。简化公式如下:

$$H_C = \frac{Di \cdot (1 + \delta_i) - D_{win}}{2 \cdot \tan \alpha} \quad (2)$$

Di 为扩径后目标内径。

2 扩径参数与钢管质量关系

2.1 几何尺寸精度的控制技术

扩径率是决定管形变化情况的主要工艺参数,也是扩径工艺中最主要的工艺参数。扩径率一般要达到1.0%才有明显的矫圆作用,此时根据泊松比 ν 和最小阻力原理,壁厚减薄约0.2%~0.5%,管长缩短约0.5%~0.8%。钢管材质和规格是影响比值大小的主要因素,但在机械扩径过程中,钢管在沿长度方向收缩时是有阻力的,管长方向的缩短量会偏小。

夹管小车和支撑辊的高度设置(矫直设置),是决定钢管直线度质量的主要参数。通过调整小车夹钳和扩径中心线支撑辊组的高度,首先使被扩径钢管的头部呈水平状,此后钢管尾部高度每步合理下降,以跟随钢管的弯形,使正在被扩径的管段保持水平,实现在扩径过程中矫直钢管。

润滑工艺参数不仅决定了扩径工具的使用寿命,也影响钢管扩径质量。扩径过程中,工具和钢管内壁之间会发生相对运动,润滑效果必须良好。如果整圈内壁润滑都不足,除了损害工具之外,钢管内表会被摩擦拉伤,壁厚也会不均匀;如果一圈中局部区域内润滑不足,此部分的变形程度将和其它区域的不同,弹复后会造造成圆度差,钢管的壁厚不均匀,此区域的内表也会被摩擦拉伤。

合适的步长重叠量,能够保证两扩径步重叠(过渡带)区域内的外形质量。正重叠量过大影响生产节奏,负重叠量过大影响管体局部区域内直线度和直径大小;一般可取重叠量为扩径工具工作长度的 $-5\% \sim +5\%$ 。此外,重叠量的选择影响扩径力大小,也影响工具使用寿命。

原料板材机械性能及尺寸精度的差异,会造成制管过程中变形程度不同,影响直线度、圆度和壁厚分布。管材成型和焊接过程形成的机械性能和尺寸精度差异,会造成扩径过程中变形程度不同,也影响着钢管的直线度、圆度和壁厚分布。

2.2 残余应力状态和机械性能改变的控制技术

钢管经过扩径工序之后,抗拉强度基本无变化,屈服强度会有不同程度的变化。其中铁素体+珠光体钢屈服强度改变不大,甚至会降低,而针状铁素体钢屈服强度会有比较明显的增加。这两种材质经过扩径后的强化趋势见图3。

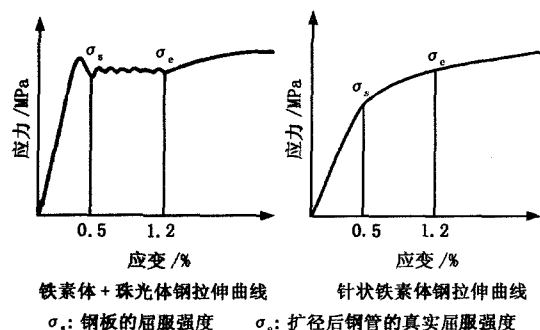


图3 扩径后屈服强度变化

Fig.3 Variation in yield strength after expanding

铁素体+珠光体钢具有不连续的屈服行为,这种材质的钢管在扩径后的屈服强度只稍有增加,而由于包辛格效应,由压平拉伸试样测定的屈服强度低于原钢板的屈服强度。针状铁素体板条中存在着高密度的可移动位错,这种组织特征使得针状铁素体钢具有连续的屈服行为,这种材质的钢管在扩径后的形变硬化作用大于压平拉伸试样的包辛格效应,钢管的测试强度比钢板的强度高,屈服比值一般会升高 $0.02 \sim 0.08$ ^[3,4]。

对于UOE成型法,在工艺设计中必须选择与压缩率相匹配的扩径率,才能够比较好地改善残余应力状态并适度改变机械性能。一般来说,合理范围内选择较大的压缩率和扩径率能够获得更理想的管形质量,但这会降低生产节奏、增加资源消耗,也不利于合理发挥设备的使用价值。如果压缩率相对较大,扩径率相对不足,尽管可以获得

较低的残余拉应力甚至压应力,但可能会降低管形质量,甚至局部应力峰值也无法合理消除。如果扩径率相对较大,压缩率相对不足,残余拉应力会偏高,钢管屈服强度提高明显,屈强比也可能不合格,冲击韧性也会明显降低。

因此,选择适中的扩径率,匹配相对大一点的压缩率,能获得良好的管形质量,也能获得良好的残余应力分布状态和合格的管体机械性能。通过研究,扩径率 δ_o 和压缩率 δ_c 之间关系如下:

$$\frac{(1+\delta_o)}{(1+\delta_c)} = k \quad (3)$$

一般取 $k = 0.90 \sim 0.94$,钢管材质和具体规格是决定 k 值大小的主要因素,不同类型成型机组的制管能力是限制 k 值大小的客观因素。

3 扩径工具与钢管质量关系

3.1 工具扇形块数量——钢管圆度

理论上,扇形块的数量较多时,张开后各扇形块之间的间隙比较小,扇形块轮廓连接线的圆滑程度也就比较高。但一般在扇形块数量达到10块之后,不同的块数对钢管扩径后圆截面质量影响的差异就很小,再通过对扇形块具体形状进行精细设计,已能满足目前各类大口径直缝焊管技术规范的相关要求。

3.2 扇形块边部形状——钢管过渡带质量

合适的扇形块边部形状参数直接影响钢管的细节质量。主要形状参数是侧边圆角半径、尾部形状和头部形状。侧边圆角半径影响圆周方向(径向)过渡带的质量,尾部和头部形状影响管长方向(轴向)过渡带的质量。

3.3 扇形块表面曲率——圆度与壁厚分布

为减少工具储备和降低成本,同一组扇形块通常是按照对同一直径在一定壁厚范围内的不同壁厚钢管都可以适用的原则设计的。这使得实际扩径过程中,扩厚壁管时,是扇形块两侧先接触管壁;扩薄壁管时,是扇形块顶部先接触管壁。拉伸形变过程不同,从而造成壁厚分布不均匀,回弹量也不均匀,圆度受影响。这里,定义相对直径比值为扇形块直径与钢管内径的比值,它与扩径后钢管椭圆、壁厚情况的关系见图4^[5]。

针对不同钢级、规格的钢管,考虑扩径质量、生产率、扩径力能条件和工具寿命控制等方面的要求,理论上同一规格扇形块可制造钢管壁厚变化范围越小越好。一般而言,小口径钢管所用扇

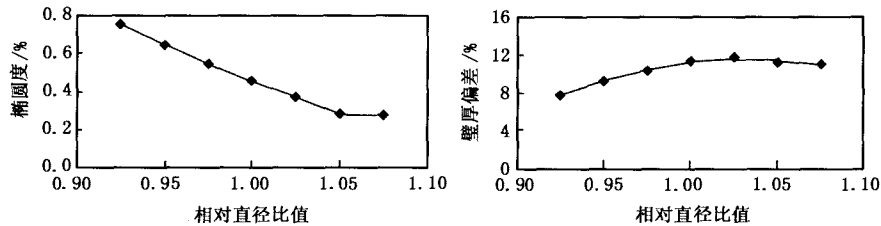


图4 相对直径与椭圆度和壁厚偏差关系

Fig.4 Relationship between the relative diameter and deviation of the ellipse and wall thickness

形块的可扩壁厚跨度不超过 10 mm,大口径钢管所用扇形块的可扩壁厚跨度不超过 20 mm。

4 扩径力的计算

扩径力的大小直接反映了扩径机组的工作能力,也是衡量扩径机组是否先进的主要技术参数之一。当机组力能范围固定之后,通过计算具体钢级、规格钢管所需的扩径力大小,能够设置阈值,以保护工具、保护设备;另外,从工艺角度来说还可以用于与实际值比较,大致判断润滑状态,以评价和优化润滑工艺。

筒形件扩径力的理论计算方法如下:

$$F_e = 2\sigma_\theta r_a \ln \frac{r_b}{r_a} \cdot L_e n \sin \frac{\pi}{n} \cdot \frac{(\tan\alpha + \mu)}{1 - \mu^2 - 2\mu \cdot \tan\alpha} \quad (4)$$

式中: σ_θ 为切向应力,MPa; r_a 为钢管内径,mm; r_b 为钢管外径,mm; L_e 为扇形块工作长度,mm; n 为扇形块数量; α 为锥体角度; μ 为摩擦因数。

公式(4)中切向应力 σ_θ 是无法直接得出的,为方便实际计算,可取 $\sigma_\theta = \sigma_{0.5}$ ($\sigma_{0.5}$ 取规范中屈服强度的中值);对于大口径钢管,它的壁厚 T_0 (r_b 与 r_a 的差值)相对于 r_b 或 r_a 来说都很小,可

取 $r_a \ln \frac{r_b}{r_a} \approx r_b - r_a = T_0$;在扇形块数量比较多的情况下,计算力能时也可不考虑扇形块数量 n 的影响,近似取 $n \sin \frac{\pi}{n} \approx \pi$;同理,在 μ 和 α 都比较小

的情况下,可取 $\frac{(\tan\alpha + \mu)}{1 - \mu^2 - 2\mu \cdot \tan\alpha} \approx \tan\alpha + \mu$ 。

综上所述,公式(4)可简化为:

$$F_e = k \cdot 2\pi \cdot T_0 \sigma_{0.5} L_e (\tan\alpha + \mu) \quad (5)$$

公式(5)中 k 是简化系数,根据钢管直径与壁厚的关系,并考虑扩径时钢管过渡带的影响,取 $k=1 \sim 1.5$ 。 k 值的取值原则为:壁厚大则 k 值取大,直径大则 k 值取小。

这里以 X70 钢级、 $\Phi 1016 \times 25.4$ mm 规格钢管为例,对比两式计算结果的差异。根据规格,则有 $r_b = 508$ mm, $r_a = 482.6$ mm, $T_0 = 25.4$ mm;根据钢级,按 X70 钢级屈服中值取 $\sigma_{0.5} = 551$;根据工具参数取 $L_e = 500$, $n = 12$, $\tan\alpha = 0.06$;在润滑效果良好的情况下,计算时取 $\mu = 0.05$;根据管径和壁厚关系,取 $k = 1.07$ 。

代入公式(4)计算得(此处以 F_e' 代表) $F_e' = 4.708$ MN,代入公式(5)计算得 $F_e = 5.175$ MN。 F_e 约是 F_e' 的 1.1 倍,但公式(5)的计算结果与实际加工中的扩径力更接近。

因此,采用公式(5)计算扩径力,计算过程简单,计算结果准确度也高。

5 结束语

扩径的每一循环步按照行程、速度和力能的关系可分为 5 个阶段,工业生产中一般分为 4 个阶段完成。扩径率、润滑制度和矫直设置是决定钢管扩径质量的主要工艺参数。扩径工具轮廓参数也对钢管扩径后局部区域内的质量有不可忽略的影响。影响扩径力计算的因素比较多,但工业化生产中可以先简化设计再进行精确调整。

参 考 文 献

- [1] 李鹤林. 天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题[J]. 焊管, 2002, 23(3): 50.
- [2] 王啸修, 王小宝. 大口径直缝埋弧焊管工程评析[J]. 世界钢铁, 2006, 6(6): 29.
- [3] 李延丰. 管线钢管的包辛格效应与质量[J]. 焊管, 2000, 23(1): 1-3.
- [4] 刘世泽, 王利树, 谢仕强. UOE 焊管制造过程中影响屈服强度的因素分析[J]. 焊管, 2004, 27(3): 13.
- [5] 郭宝锋, 聂绍珉, 金森, 等. 扩径模具直径对成型件品质的影响[J]. 塑性工程学报, 2003, 10(4): 56.

(收稿日期:2007-09-03)

(改稿日期:2007-10-25)