

直缝焊管开口孔型中轧辊与管坯间的接触压力分布

杨楠, 陈大融, 孔宪梅

(清华大学精密仪器与机械学系, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 为确定直缝焊管中轧辊与管坯间的接触压力分布规律, 采取全息光弹性方法对该问题进行实验研究, 并且利用有限元方法进行模拟计算, 最终得出直缝焊管开口孔型轧辊与管坯间接触压力的分布规律: 管坯在开口孔型中处于弯曲成型阶段时, 下轧辊与管坯的接触压力分布局限于轧辊的两侧; 上轧辊与管坯的接触压力分布是以轧辊中点为界分为两个部分, 每个部分内接触压力近似呈三角形分布。管坯在开口孔型中处于弯曲成型阶段时, 接触压力分布是在弯曲成型阶段压力分布基础上中部叠加了一个挤压力。

关键词: 直缝焊管; 接触压力; 光弹性方法; 有限元方法

中图分类号: TH 123⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2000)05-0076-04

在现代直缝焊管生产中, 轧辊与管坯间的接触压力分布函数是确定成型滚动直径的位置及张力分析的基础^[1]。直缝焊管开口孔型中轧辊与管坯间的压力分布分为两种情况来考虑: 一是辊缝值与板厚相等, 既不压靠也无间隙, 是理想的成型力, 称之为弯曲成型力 F_r ; 二是辊缝值小于初始板厚, 产生了压靠力 F_e 。有关轧辊与管坯间的压力分布的研究很少, 文[2]曾经对压力分布函数进行了推导, 但是推导的过程过于简化, 并且是建立在两个假设条件的基础之上, 推导的结果也没有进行任何的实验验证, 因此其结果难于在实际生产中应用。本文从实验入手进行有限元模拟计算, 以期揭示直缝焊管生产中轧辊与管坯间的压力分布规律, 使之运用于实际生产之中。

1 实验过程

1.1 实验方法的选择

实验应力分析方法有: 光弹性实验方法、电阻

应变方法、脆性涂层法和电场比拟法等。比较各个实验方法的特点并且结合直缝焊管的生产条件, 本文选择光弹性实验法。

按照应力状态的不同, 可以把光弹分为平面光弹和三维光弹。如果本实验采用三维光弹, 冻结应力将十分困难, 因为在烘箱中的高温状态下很难调整轧辊模型和管坯之间的接触状态, 使之达到临界接触。在轧辊与管坯的接触区内, 其它方向的应力同接触应力相比是非常小的, 可以忽略它们的影响, 所以本实验可归结为平面光弹问题。

将有应力的模型置于光弹性仪的圆偏振光路系统中, 可以在成象屏幕上得到反映主应力差的干涉条纹图, 即等差线。由光性定律得到条纹与主应力差之间的关系为

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n_c \frac{f_c}{d}, \quad (1)$$

式中: n_c 为等差条纹级数($n_c = 0, 1, 2, \dots$), f_c 是等差线材料条纹值, d 是平面模型的厚度。

普通光弹性法只能获得反映主应力差的等差线和反映主应力方向的等倾线, 为了求得模型内部各点的全部应力分量, 通常要采用繁琐的切力差法, 并利用已知边界条件进行求解, 所得结果误差较大。本文所要求解的是边界接触应力, 只利用普通光弹性法更为困难, 近代光测力学提供的全息光弹性法可以获得反映主应力和的等和线, 因而可以根据等差条纹图和等和条纹图简捷而准确地获得模型内部各点的主应力分量的大小。由光性定律得到条纹与主应力和之间的关系为

$$\sigma_1 + \sigma_2 = n_p \frac{f_p}{d}, \quad (2)$$

式中: n_p 为等和条纹级数($n_p = 0, 1, 2, \dots$), f_p 是等和线材料条纹值。

在实验中采取全息光弹性实验方法, 根据由环氧树脂模型所获得的等差线和有机玻璃模型所获得的等和线条纹图, 利用式(1)和(2)便可以很容易地

收稿日期: 1999-09-10

作者简介: 杨楠(1972-), 男(汉), 辽宁, 博士研究生

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(59875046)

求得模型内部各点的主应力分量。

1.2 实验模型的设计

在直缝焊管生产中,中心角小于 180°孔型的轧辊与管坯间的应力分布可以作为开口孔型中轧辊压力分布的代表。结合实际生产与实验条件,模型的主要尺寸参数如图 1 所示。为了获得等差线和等和线,在本文实验中加工环氧树脂和有机玻璃模型各一副,平面模型的厚度为 6 mm。

为了研究轧辊与管坯间的压力分布,把管坯的变形过程作如下转换:把经过第 $i-1$ 架成型辊成型后的管坯放入打开的第 i 架成型辊孔型中,第 i 架成型辊上辊抬得足够高,使之不与管坯相接触,然后上辊压下,与管坯逐渐发生作用,使管坯成型。在实验中采用如图 2 所示的方式对平面模型进行加载,进而测量接触区的压力分布。

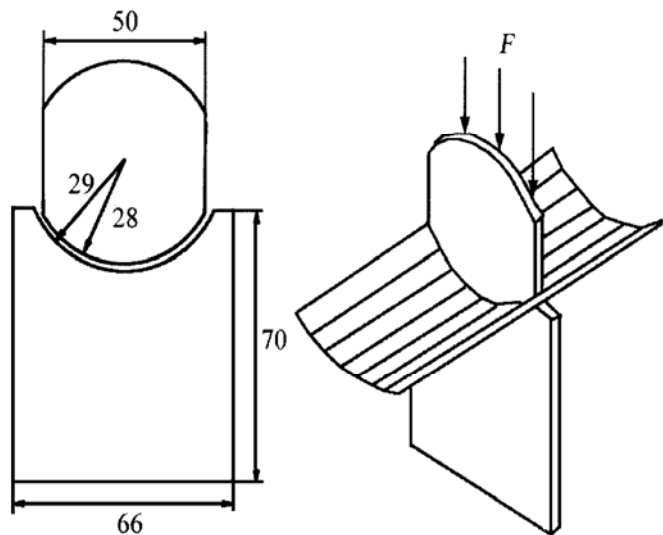


图 1 开口孔型轧辊模型的几何尺寸图(mm) 图 2 模型的加载方式

管坯圆弧外径为 76 mm,弧长 62 mm,壁厚 1 mm,管长 60 mm,材料为低碳钢,屈服强度 $\sigma_s = 215 \text{ MPa}$,弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$ 。

2 接触压力的计算

在轧辊接触圆弧上选取若干点,它们所对应的圆心角为 θ ,各点的应力状态如图 3 所示。各点受到压应力 σ_r 和剪应力 τ 的作用,由等差线和等和线条纹图根据式(1)和式(2)可求得各点的 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 和 $(\sigma_1 + \sigma_2)$,由等倾线可以观察到接触点的等倾线与被测点切线的夹角 $(\theta - \alpha)$,根据应力圆可得:

$$\sigma_r = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \cos 2(\theta - \alpha), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \sin 2(\theta - \alpha), \quad (4)$$

根据各点的 σ_r 和 τ 可以得到接触面的应力分布图。

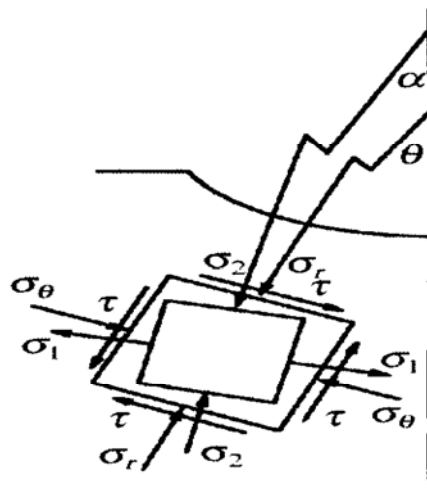


图 3 轧辊接触圆弧上各点的应力状态

3 开口孔型轧辊与管坯间接触压力分布的光弹分析

3.1 弯曲成型阶段时接触面的应力分布

当上辊压下时,管坯开始受力,此时的管坯如同三点弯曲的简支板,与下辊的接触点在管坯左右两侧,与上辊的接触点在管坯的中部,这时管坯主要受弯曲应力作用。当弯曲应力 $\sigma_m < \sigma_s$ 时,表现为弹性变形,随着载荷的加大,管坯中的弯曲应力不断增大,当 $\sigma_m > \sigma_s$ 时材料开始屈服;上辊逐渐压下,管坯中的塑性区也随之扩大,直到管坯的中点与下辊即将接触,这个阶段称为弯曲成型阶段,管坯的变形主要由弯曲应力所致。

图 4 给出了弯曲成型阶段不同载荷下轧辊的等差线变化状况。图 4 反映了接触点位置的变化规律:管坯与下辊的接触始终保持在两侧,位置不变;管坯与上辊的接触区随着上辊的压下而不断发生变化。当管坯刚开始受力时,接触区处于中部位置;载荷逐渐加大,管坯开始发生塑性变形,接触区在中部逐渐扩大;载荷继续增大,即上辊不断压下,中部的接触区逐渐分成为两个接触区,然后这两个接触区分别向两侧移动。实验中并没有出现文[3]所描述的多点接触现象。

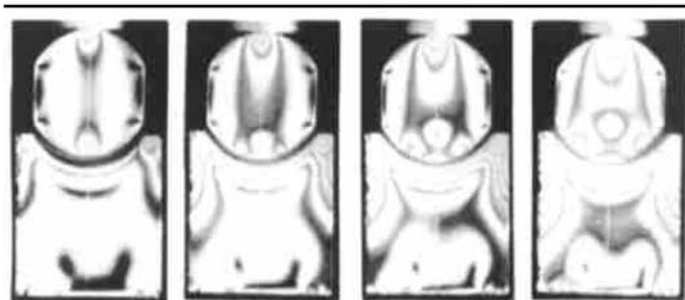


图 4 管坯在开口孔型中不同载荷时轧辊的等差线条纹图

图5是根据管坯在弯曲成型阶段的极限位置(即管坯中点将与下辊接触的临界点)时轧辊等差线和等和线条纹图绘制的等差线、等和线分布图。图6为根据式(3)和(4)得出的接触面 σ_r 和 τ 应力分布图。

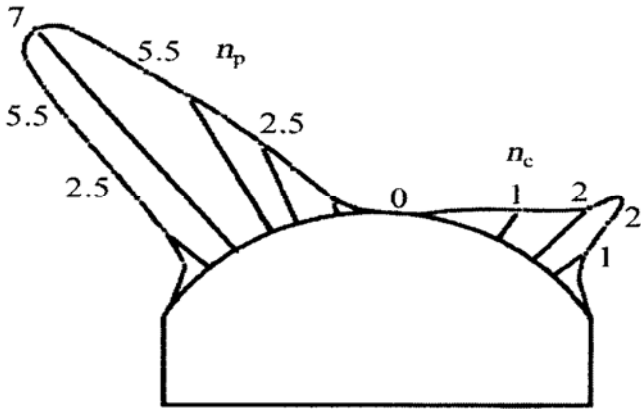


图5 开口孔型在弯曲成型力作用下的等和线、等差线分布图

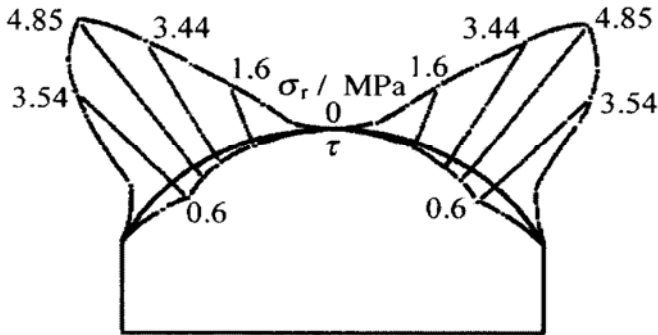


图6 开口孔型在弯曲成型力作用下接触面的 σ_r 和 τ 分布图

3.2 压靠成型阶段时接触面的应力分布

管坯中点与下辊接触后,上辊再继续压下,这时就进入压靠成型阶段,在这个阶段内随着上辊的压下,载荷迅速增大,通常取 $F_c = 2F_f$ (F_f 为弯曲成型阶段的最大载荷)时为该阶段的结束。

图7是根据管坯在压靠成型阶段时轧辊等差线和等和线条纹图绘制的等差线、等和线分布图。图8为根据式(3)(4)得出的接触面 σ_r 和 τ 应力分布图。

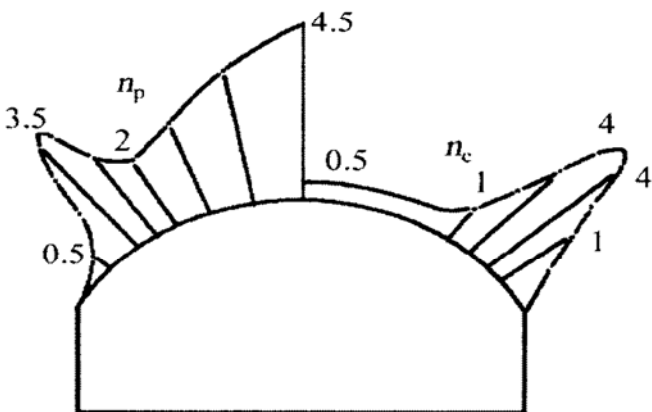


图7 开口孔型在压靠成型力作用下的等和线、等差线分布图

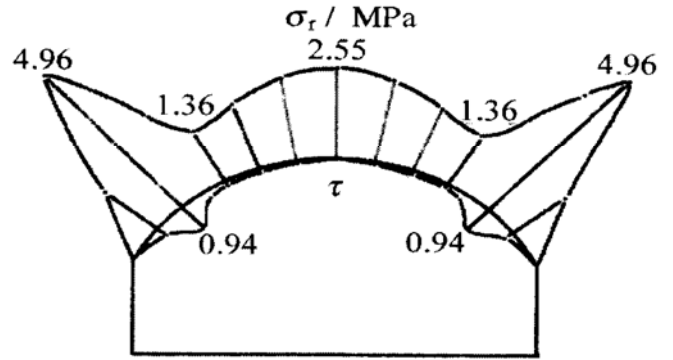


图8 开口孔型在压靠成型力作用下接触面的 σ_r 和 τ 分布图

4 实验的可靠性分析

轧辊模型由机加工成型,尺寸精度高,尤其是接触面处均采用车削加工.尺寸与光洁度均满足实际要求.管坯也由车削成型,管坯的光洁度和管径都符合实验要求.等差线和等和线的条纹分布对称性好,证明模型、管坯的加工以及加载的对中性符合要求。

检验实验结果可靠性的另一个标准是静力平衡:接触面上的应力在垂直方向上的合力应与所加载荷平衡,即:

$$F = F', \quad (5)$$

$$F' = \int_s (\sigma_r \cos\theta + \tau \sin\theta) ds, \quad (6)$$

其中: F' 是接触面上的应力在垂直方向上的合力, F 是所加的载荷.由式(6)可以求出接触面上的 σ_r 和 τ 在垂直方向的应力分量,再根据实际载荷可以得到实验中的相对误差。

开口孔型在弯曲成型力作用下的实验误差为

$$\frac{F'_1 - F_1}{F_1} = 0.4\%.$$

开口孔型在压靠成型力作用下的实验误差为1.8%。通过静力平衡校核可见,相对误差 $< 5\%$,符合实验及工程要求。

5 有限元模拟计算

5.1 有限元模型

由直缝焊管的成型工艺可知,焊管的成型经历了较大的几何改变并发生了弹塑性变形,变形情况属于大位移、大应变且应力关系是非线性的,整个成型过程属于几何和材料双重非线性问题.管坯的接触问题和管坯成型过程紧密相连,因而计算接触压力分布属于要同时考虑双重非线性的接触问题。

在本文中采用三维模型,其几何形状和模型的网格划分如图9所示.为了减少计算机的计算量,根据对称性对模型进行简化.轧辊、管坯材料的 $\sigma_s =$

250 MPa, Poisson 比为 0.3, $E=200$ GPa。边界条件是: 上辊在 x 和 z 方向上受到约束, 在 y 方向受到向下的位移载荷; 下辊在 x, y 和 z 方向上受到约束; 管坯的 EF 边在 x 和 z 方向上有约束。

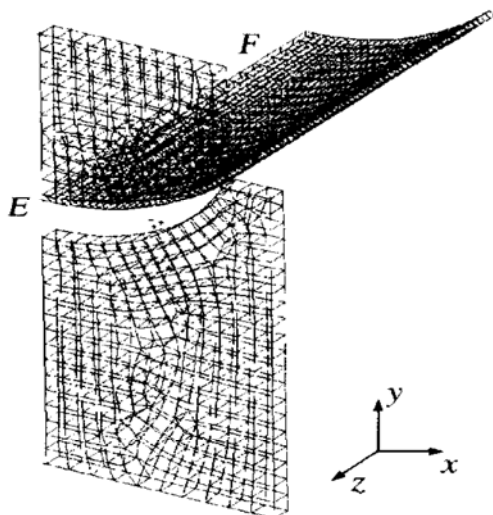


图 9 模型几何形状以及网格划分

5.2 计算结果

观察上辊压下过程中轧辊与管坯间接触压力的变化状况, 可以看到与光弹实验相类似的现象: 当管坯开始受力时, 接触区处于管坯和上辊的中点, 随着上辊的压下, 接触区逐渐扩大并分为两个接触区。然后, 两个接触区分别向两侧移动, 直至上辊到达弯曲成型阶段的极限位置, 即管坯与下辊临界接触。在这个过程中, 管坯与下辊的接触位置始终保持在两侧, 不随上辊的压下而变化。当上辊继续压下时, 就进入压靠成型阶段, 管坯与上下辊的接触区逐渐扩大, 几乎扩展到整个接触面。

当处于弯曲成型阶段临界位置时, 接触面上各个节点的压力分布如图 10 所示。当处于压靠成型阶段时, 接触面上各个节点的压力分布如图 11 所示。

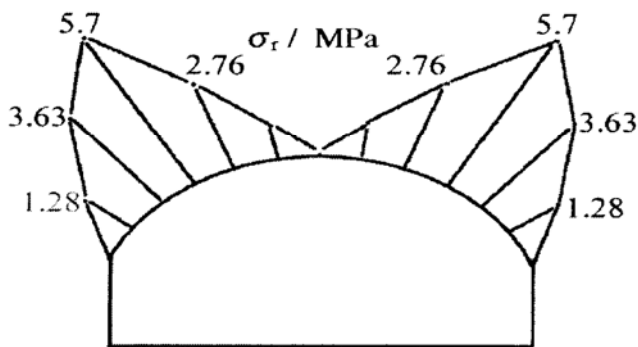


图 10 开口孔型弯曲成型阶段接触区各节点的压力分布图

本文利用全息光弹性实验和有限元法对该问题进行了研究, 对图 6 与图 10, 图 8 与图 11 进行对比, 可以看到, 实验与模拟计算所得到的接触压力数值有差别, 这是由于实验和模拟计算所选取的轧辊

几何和材料性能参数不同, 以及实验和计算误差而引起的, 但所得到的接触压力分布规律是一致的。

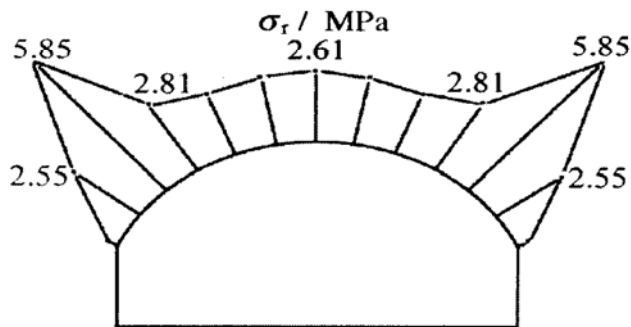


图 11 开口孔型压靠成型阶段接触区各节点的压力分布图

[参考文献] References

- [1] Lee Y J. Tension analysis for triple-welded brazed tube's roll-forming process[J]. Tube & Pipe Technology, 1995, (1/2): 61 - 65.
- [2] 蔡松庆. 直缝焊管轧机力能参数研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 1982.
Cai Songqing. Research on the Mechanics Parameters of the Longitudinally Welded Pipe Mill[D]. Qinhuangdao: YanShan University, 1982. (in Chinese)
- [3] Yu T X, Stronge W S J. 在圆柱模间板料的冲压和回弹[J]. 世界塑性加工最新技术译文集, 1987, (12): 475 - 480.
Yu T X, Stronge W S J. Drawing and rebounding of the plate in the cylindrical mould[J]. Translation on the Advanced Technology of the Plastic Working in the World, 1987, (12): 475 - 480. (in Chinese)

Contact pressure between roller and pipe blank of the longitudinally welded pipe open pass

YANG Nan, CHEN Darong, KONG Xianmei
(Department of Precision Instruments and Mechanology,
State Key Laboratory of Tribology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Holo-photoelastic experiments and finite element analysis were used to investigate the distribution of the contact pressure between rollers and a pipe blank. Analysis of the open pass showed that during bending the contact pressure on the lower roller occurs only on two sides of the roller. The contact pressure on the upper roller is divided into two triangular shape parts. During extrusion, an extrusion force is added to the contact pressure that occurs during bending.

Key words: longitudinally welded pipe; contact pressure; holo-photoelastic method; finite element method