

## 摘 要

衡阳钢管（集团）有限公司拥有全球第一套全三辊轧管机组—— $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组，采用独创的三辊穿孔——三辊轧管——三辊微张力减径（SRM）工艺，其设计年产量 3 万吨，到技改前年产量已达到 6.6 万吨。近年来，由于客户对钢管质量，尤其是表面质量要求的不断提高，原生产工艺和装备已经不能适应市场发展的需要。因此，为了解决钢管表面质量问题，作者与同事们进行了为期长达一年的多组、多项试验，探明了钢管表面产生裂纹、发纹的原因，摸索出了最佳的生产工艺路线，确定了有效的工艺技术改造内容。本文从钢管表面裂纹、发纹产生原因的分析入手，通过试验分析不同穿孔工艺对表面质量的影响，确定最佳生产工艺路线；通过对锥形穿孔变形特点的分析，结合本机组品种、规格特点，提出了穿孔轧辊辊型、顶头、导板、穿孔辊子滚花设计模型；优化了三辊轧管工艺，建立了三辊轧管机送进角经验公式，提出了微张力减径椭圆度方程。在技改后 1 年多时间里，108 分厂充分利用技改后工艺、设备优势，开发了大量的品种、规格。机组生存空间得到空前拓展，市场竞争力明显增强，提质降耗的效果非常明显。

**关键词：**无缝钢管，二辊锥形穿孔，三辊轧管，三辊微张力减径

## ABSTRACT

Hengyang Steel Tube (Group )Co.,Ltd has the only set of full three-Rolling Mill in the world – The  $\Phi 108\text{mm}$  Three-Rolling Mill, which adopts the unique craftsmanship of three-roll piercing – three-roll rolling – three roll SRM with the designed capacity of 30,000 tons. It has not actually reached a capacity of 66,000 tons until its technical innovation. During recent years, the previous production process and equipments can not meet the market due to customer's more and more critical quality requirements on tubes especially those on tube's surface quality. In order to solve surface quality problem, the author of the thesis, together with his colleagues, has conducted many experiments and tests for more than one year and finally detected the causes for defects like cracks or crack lines on the surface, We have explored out the optimal production process route, and fixed the most efficient items for technological transformations. By analyzing the reasons of formation of cracks or crack lines on the tube surface and by analyzing the different influences of different piercing processes on surface quality , the model for the optimal production process route was put forward. By analyzing the formation characteristics of the piercing Mill, together with considering the varieties and sizes of this Mill, the designed models of the piercing roll, plug, guidance board, and roll knurl were suggested, which optimized the three roll rolling process ,established the experienced formula of feeding angle of the three roll rolling mill . The SRM ellipticity equation was presented in the thesis.

In the following technological transformations finished year, the  $\Phi 108$  Mill developed various of new varieties and sizes by fully utilizing its advantages of the optimal process and equipments. The Mill's development space is enlarged, the market competition ability enhanced, the quality is improved and the raw material consumption reduced.

**Key words:** seamless steel tube, two-roll cone piercer,  
three-roll rolling, three-roll SRM

## 原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：李超颖 日期：2005年12月10日

## 关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文；学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

511

作者签名：李超颖 导师签名：张华 日期：2005年12月10日

## 第一章 文献综述

根据  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组工艺技术改造的需要,本章着重综述我国无缝钢管的生产状况及展望,尤其是中厚壁钢管的生产、使用情况,锥形穿孔技术发展状况,三辊轧管技术发展状况,微张力减径技术发展状况,超声探伤技术发展状况等相关内容及原三辊轧管机组的工艺特点与存在的主要问题。

### 1.1 钢管

#### 1.1.1 钢管的用途

钢管是一种用钢制作的具有中空截面、长度大于外径(或边长)的一种金属材料,作为多种用途的经济断面材料,在国民经济各部门中的应用愈来愈广泛。

钢管作为输送管广泛地用于输送油、气、水等各种流体,如石油及天然气的钻探开采与输送、锅炉的沸水与蒸汽管道、一般的水煤气管道,化工部门一般用管道化方式生产与运输各种化工产品,所以钢管被称为工业的“血管”;钢管作为结构管大量地应用于机械制造业和建筑业,如用于制作房架、塔吊、各种车轴的构架等;钢管还作为中空的零件毛坯用于制造滚动轴承、液压支柱、液压缸筒体、空心轴、花键套、螺母以及手表壳等,这既节约金属又节省加工工时;钢管又是国防工业中的重要材料,如用于制造枪管,炮筒及其它武器。衡钢  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组产品为中厚壁钢管,广泛应用于机械加工、汽车、石油、塔机、煤机、锅炉、地质钻探、军工等行业。

#### 1.1.2 钢管的种类

钢管按生产方法可分为:无缝钢管和焊接钢管。而无缝钢管又可分为:热轧无缝管、冷拔管、冷轧管、冷旋压管和挤压管等;焊接按成型与焊接方法可分为:电焊管、炉焊管、气焊管、螺旋焊管、双面螺旋焊管、大直径 UOE 成型焊管、UOE 成型双面焊管、焊双层或多层管等。

#### 1.1.3 三辊穿孔机、三辊轧管机国内外发展概况

三辊斜轧穿孔早在 1883~1886 年已进行过研试,但未成功。从 1948 年开

始对三辊穿孔重新进行大量研究,并取得成功。第一台工业用三辊穿孔机于1965年在英国钢管投资公司所属工厂投产。美国钢铁公司格里——埃乐伍德厂1955年开始试验室模拟研究,1966年筹建机组,1968年投入运行。

三辊轧管机组的结构有阿塞尔轧管机和特朗斯瓦尔轧管机两种。最早的是阿塞尔轧管机,它是W. J. Assel于1932年发明的,1935年用于工业生产。特朗斯瓦尔轧管机是在阿塞尔轧管机基础上发展起来的,于1967年获法国专利,其本质还是阿塞尔轧管机,所不同的是可在轧制过程中实现变送进角、变轧制速度。

我国原衡阳钢管厂 $\Phi 108\text{mm}$ 三辊穿孔、三辊轧管中间试验项目,分别于1968年和1974年列为国家中间试验项目。由原衡阳钢管厂、太原重型机器厂、包头钢铁设计院等单位联合进行工艺、设备等研究。三辊穿孔机1968年开始设计,1973年进行安装、试穿孔;三辊轧管机于1974年开始设计,1978年进行安装试轧。1979年进行三辊穿孔、三辊轧管联合试验,1980年该项目通过冶金部技术鉴定,并获国家重大科研成果三等奖。1984年,原衡阳钢管厂将这套中试机组进行了移地改造,同时,从西德曼内斯曼——米尔厂引进十二架三辊微张力减径机,形成了独特的三辊斜轧穿孔——三辊斜轧轧管——三辊微张力减径的生产工艺,建成了国内首套 $\Phi 108\text{mm}$ 三辊轧管机组。

由于 $\Phi 108\text{mm}$ 三辊轧管机组在生产中厚壁钢管方面呈现明显的优势,我国先后投资建成了十几套三辊轧管机组。共有5套成品机组,除衡阳外,另有大冶特殊钢厂 $\Phi 170$ 三辊轧管机组、天津钢管厂 $\Phi 114$ 三辊轧管机组、无锡西姆莱斯 $\Phi 100$ 三辊轧管机组和正在建设的安徽天大集团 $\Phi 140$ 三辊轧管机组及几套不完全机组,表1为我国已投产的三辊轧管机组基本情况。

表1 我国三辊轧管机组的基本情况

| 机组名称       | 大冶 $\Phi 170$         | 天津 $\Phi 114$             | 衡阳 $\Phi 108$           | 无锡 $\Phi 100$        |
|------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|
| 投产日期       | 1995.6                | 1995.5                    | 1987.7                  | 1996.4               |
| 年设计能力, t   | 100000                | 70000                     | 30000                   | 60000                |
| 实际产能, t    | 170000                | 70000                     | 90000                   | 70000                |
| 2003年产量, t | 180000                | 61100                     | 72700                   | 65000                |
| 达产时间, 年    | 1998                  | 1998                      | 1988                    | 2000                 |
| 规格范围       | 70~194 $\times$ 10~56 | 25~159 $\times$<br>3.5~20 | 51~133 $\times$ 6.45~28 | 25~108 $\times$ 3~20 |
| 主要品种       | 结构管、液压支柱管、半轴套管        | 结构管、液压支柱管、石油用管            | 结构管、液压支柱管、半轴套管、锅炉管      | 结构管、石油用管、锅炉管         |

### 1) 大冶特殊钢厂 $\Phi 170$ 三辊轧管机组

该机组于 1995 年投产,主轧机从德国引进,设计年产量 10 万吨。生产规格为  $\Phi 70\sim 203\times 10\sim 50$ ,最大长度 12 米,产品 80%以上为机加工用管,主要品种有半轴套管、液压支柱管、结构管等,钢种以碳钢为主。坯料自供。

### 2) 天津钢管厂 $\Phi 114$ 三辊轧管机组

天津钢管厂  $\Phi 114$  三辊轧管机是 1995 年从英国引进的单机,取代该厂原  $\Phi 100$  自动轧管机。改造后的机组增设了 24 机架张力减径机,产品壁厚范围宽。设计年产量 7 万吨。主要品种有油田用管、船舶用管、高钢管、低中钢、液压支柱管、半轴套管、石油裂化管、流体管、结构管等。坯料外供。

### 3) 无锡西姆莱斯 $\Phi 100$ 三辊轧管机组

无锡西姆莱斯  $\Phi 100$  三辊轧管机是 1996 年从西班牙引进的二手轧机,配有 18 机架张力减径机。设计年产量 6 万吨,产品规格范围为  $\Phi 25\sim 108\times 3\sim 20$ ,产品主要为石油管和少量高压锅炉管,其它还有部分碳素和低合金结构管。

### 4) 安徽天大集团 $\Phi 140$ 三辊轧管机组

2002 年安徽天大集团投资新建一套  $\Phi 140$  三辊轧管机,设计年产量 10 万吨,产品规格范围为  $\Phi 51\sim 159\times 4\sim 25$ ,品种有锅炉管、油管、套管、汽车半轴套管、船舶用管、液压支柱管、结构管等。

除上述 4 套三辊轧管机组外,我国另有几套不完整三辊轧机,即:1979 年沈阳钢管厂与东北工学院联合设计制造的  $\Phi 50$  特朗斯瓦尔轧机、1987 年由西安重型机械设计研究所设计制造的河南孟县  $\Phi 50$  特朗斯瓦尔轧机及大连得胜  $\Phi 60$  三辊轧机、1985 年大冶钢厂和洪都钢厂分别从德国和英国引进的  $\Phi 76$  三辊轧机等。

## 1.2 轧管技术发展状况

### 1.2.1 锥形穿孔

将圆坯轧制成空心毛管,这一斜轧工艺,是由曼内斯曼兄弟于 1885~1890 年发展起来的。它是在两桶形轧辊轴线与轧件轴线成一角度并且轧辊同向旋转的情况下,管坯从中穿过的轧管工艺。虽然曼内斯曼兄弟想通过这种斜轧机生产出成品钢管来,但直到现在,这个想法仍未实现。

为了避开曼内斯曼的专利,美国发明了带导盘的斜轧穿孔机。这种穿孔机能限制毛管的扩径,并因此导致了后来的锥形穿孔机的产生。

1897~1898 年,瑞士人斯蒂芬尔(R·C·Stiefel)为减轻曼内斯曼穿

孔法中轧件在变形区内受到大的扭转而发明了菌式穿孔机。虽然这种菌式穿孔机的金属变形及毛管质量都较好,但从1920年以来,制造的穿孔机几乎都是桶形穿孔机,这是因为:这种菌式穿孔机的传动很复杂,由于轧辊悬臂安装,其强度和刚度也受到限制,而且早期的都是单边支撑轧辊,它的轴承座齿轮磨损较快易产生不稳定的轧制状态。

锥形穿孔机是菌式穿孔机的改进。1970年,原苏联电钢城重机厂对老式穿孔机进行改造,设计和制造了一台轧辊双支撑的菌式穿孔机,即锥形穿孔机。这种穿孔机保留了斯蒂芬尔(R·C·Stiefel)发明的菌式穿孔机的优点(轧件在变形区中扭转变形小),改善了原来较复杂的传动系统,并改单边支撑轧辊为双边支撑。随着双边支撑式锥形穿孔技术的成熟与发展,近10年来国内外新建的连轧管机几乎全部采用锥形穿孔机,其它热轧管机组(如顶管机组、AccuRoll机组等)也开始大量采用锥形穿孔机<sup>[1]</sup>。

锥形穿孔机<sup>[2]</sup>的优点主要表现在:

① 轧辊直径向出口方向逐渐加大,与变形区内金属流动速度逐渐增大相一致,减少了管坯的周向切应力,减少了毛管内外表面缺陷和金属扭曲。

② 采用大的咬入角和辗轧角,增大了变形程度,可使延伸系数高达6,穿孔速度达1.5m/s,穿孔效率达90%,扩径率达40%。

③ 穿孔变形大,可减少后部轧管工序的轧件变形量。正是由于锥形穿孔机有上述突出优点,尽管其设备重量及装机容量较常规二辊穿孔机高20%~30%,仍得到大多数新建机组的应用,并促使少机架限动芯棒连轧管机(MINI-MPM)得到大力发展,也使Assel轧管机、AccuRoll轧管机生产更薄、更长的钢管成为可能。

衡钢在上世纪九十年代初期,引进锥形穿孔技术与连轧管机、张力减径机配套,用于生产小口径薄壁高压锅炉管。经过十多年的消化、吸收和发展,已成功将锥形穿孔技术运用到中厚壁钢管生产中。

## 1.2.2 三辊轧管

自W. J. Assel于1932年发明阿塞尔轧管机以来<sup>[3]</sup>,阿塞尔轧制工艺历经七十多年的发展,其主要产品品种由最初的轴承管和枪炮管等高精度厚壁管,扩展到油管、高压锅炉管、液压支柱管,汽车半轴套管、机械加工用管等十多个品种,D/S值由最先的12提高到目前的40<sup>[4]</sup>。

最初的阿塞尔轧管机只能轧制 $D/S \leq 12$ <sup>[6]</sup>的钢管。当轧制更薄的管子时,钢管会出现尾三角轧卡。对这一问题的解决,使在阿塞尔轧管机基础上发展起

来的特朗斯瓦尔轧机于 1967 年获得法国专利。

我国三辊轧管机组建设起步晚、起点高。在衡钢之后，洪都、大冶、天津等厂陆续建成三辊轧管机组，这些机组有国内设计制造的，也有从国外引进的，在上世纪八十年代中后期，我国三辊轧管技术发展进一步加速。

国内三辊轧管机起步于特朗斯瓦尔轧机<sup>[6]</sup>，国内首先立项的衡钢  $\Phi 108$  mm 三辊轧管机作为中试机组与法国卢勒克公司设计制造的特朗斯瓦尔轧机的主要差别有以下几点：

①  $\Phi 108$  mm 三辊轧管机在轧辊的六根压下丝杆下没有主要用于处理事故的快开油缸。

② 进口回转机架转动时，两侧的缓冲和限位装置， $\Phi 108$  mm 三辊轧管机采用一侧液压缓冲，另一侧刚性，限位采用手动；法国二侧均为液压缓冲和电动调整限位位置。

③ 转动机架和固定机架的二套压下传动和压下指示， $\Phi 108$  mm 三辊轧管机均固定在各自机架架体上；而法国是将其脱离机架，中间分别用可伸缩的万向接轴连接。

④  $\Phi 108$  mm 三辊轧管机具有能进行三种芯棒轧制的装置；法国只能进行全浮式一种芯棒轧制。

⑤ 法国特朗斯瓦尔轧机后台采用成组导套定心和采用升降辊输出钢管的方法； $\Phi 108$  mm 三辊轧管机则采用部分导套和三组液压定心辊定心，液压夹送辊输出钢管的方法。

在轧制薄壁管时，由于受轧制工艺的限制，荒管前端会产生壁厚不均现象，通过采用控制钢管前端的工艺方法：Quick Closing(QC 快关)方法能够避免荒管的不必要的管端切头，减少了切损，这种方法就是在轧制开始时辊缝较大，壁厚较厚，然后通过液压调节达到正常的辊缝位置。为了控制尾部三角形，人们发明了：Quick Lifting(QL 快开)的方法，将轧辊快速打开，增大荒管尾部壁厚，避免尾三角形的形成。

### 1.2.3 微张力减径

国外从十九世纪末开始减径尝试，1899 年获得专利，1920 年建成第一台减径机。张力减径是从美国国家钢管公司 John. W. Offut 于 1932 年获得专利开始的。钢管定、减径是一个空心体不带芯棒的连轧过程。定径的任务是在较小的总减径率和小的单机架减径率条件下将钢管轧成具有要求的尺寸精度和真圆度的成品管<sup>[7]</sup>。减径除起定径作用外，尚要通过采用较大的总减径率，实现用

大坯生产小口径钢管的目的。张力减径则还可实现减壁的目的。总之，定减径的任务主要有：一、使钢管外形尺寸精确化，二、变化成各种钢管规格，实现用一种规格管坯生产多种（外径和壁厚）规格的钢管。

衡钢集团于 1987 年从德国曼内斯曼——米尔公司引进 12 架微张力减径机。此后，国内天津、安阳等地陆续引进或国内生产了数套十二架微张力减径机。由于与其配套的前部轧制工艺的不同，国内各企业及院校研究的方向各异，侧重点不同。衡钢集团的微张力减径机与三辊轧管机配套，其主要产品为中厚壁钢管。因此，衡钢集团的主要研究方向为减轻中厚壁钢管的内孔不规圆现象。目前，衡钢集团微张力减径壁厚系数  $S/D$  值已达 0.353。

#### 1.2.4 电磁超声

上世纪七十年代后期，电磁超声技术（EMAT）开始进入了工业应用阶段。

众所周知，传统的压电超声换能器是用压电晶体产生超声振动的，它必须经水、油等声耦合介质才能将超声波传入被检测工件中去。这样一来，就带来了许多弊端：

① 检测表面粗糙，特别是带氧化皮的工件，由于声耦合的困难，检测灵敏度太低，故必须增加一道表面清理工序。

廿世纪六十年代末，国际上新技术的兴起如雨后春笋。与此相应，NDT 领域中的新方法也相继问世，其中最引人注目的是声发射、声全息和电磁超声技术。

② 在自动水浸探伤中，作为声耦合介质的水会产生很多干扰杂波，使得调试很困难，信噪比很低。

③ 在自动水浸探伤中，工件，例如钢管浸入水中，声波衰减很厉害，因而传播距离很短，为此就需旋转钢管或探头，这样一来就难免出现电火花干扰、同心度变化等，从而导致信噪比、稳定性很差。正因为此，目前国内使用的国产或进口的自动超声探伤设备大都不尽人意。

④ 由于声耦合介质在高速下难以稳定耦合，所以高速的压电超声检测很难实现。

⑤ 在高温下，作为声耦合介质的水会汽化，油要燃烧，所以高温下的压电超声检测也很难实现。

如此等等，压电超声在许多应用领域都遇到了难以克服的困难。客观需要呼唤着一种新的无需耦合介质的超声检测方法。EMAT 技术正是在这种需求下应运而生的。

### (1) EMAT 原理

所谓的 EMAT 技术,实质上就是电磁超声换能器技术。EMAT 这个国际上通用的简称,也就是英文的电磁超声换能器的缩写。EMAT 激发与接收超声的原理主要有三种:① 罗仑兹力(Lorentz)原理,② 磁致伸缩力原理,③ 磁性力原理。

### (2) EMAT 的应用范围

由于 EMAT 不需要声耦合介质,所以在很多领域都有压电超声所无法取代的优势。概括起来 EMAT 应用到高温、高速、表面粗糙(特别是带氧化皮)的工件上具有十分明显的优势,它在以下的工件上的应用都已相当成熟了。

① 钢板检测:由于 EMAT 的辐射角一致,声束可以做得很宽,又无声耦合介质的影响,频谱又可做到很纯,故可在板中激发出很强、很纯的板波来。而且由于其传播衰减很小,往返传播共 5m 的距离衰减才 6dB 左右,这样就可用两支 EMAT 对宽为 2~3m,厚度到 20mm 的钢板进行高速板波探伤。钢板从两支探头下传过去便可完全探到整张钢板的全厚度内的缺陷了,其探伤效率是多探头梳式扫查的压电水浸探伤方法所无法比拟的。它的探伤灵敏度可满足任何钢板探伤标准的要求,同时还能探出深度为 0.3mm 的表面裂纹。用 EMAT 技术还可对深冲薄板的织构和弹性各向异性进行在线检测,这对汽车用钢板的质量控制具有十分重要意义。

② 钢坯探伤:对于钢坯,不论方坯、扁坯还是圆坯都可用 EMAT 对其表面缺陷进行高速探伤。如需探钢坯中的内部缺陷则可用 EMAT 激发出斜入射及垂直入射的 SV 波,其探伤灵敏度至少可探出  $\Phi 2$  柱孔当量的内部缺陷。

③ 钢棒、钢管的探伤:钢棒的表面与内部缺陷的探伤与钢坯差不多。钢管的外壁缺陷探伤也与钢棒相似。但钢管内壁缺陷的探伤则涉及到较复杂的声学问题,因而 EMAT 的设计也较复杂、精细。如 EMAT 设计合理,则对内、外壁缺陷都可获得较高的信噪比。采用 EMAT 对钢管探伤具有许多压电探头所无法比拟的优点,例如调试方便,无水耦合带来的干涉波,不需要(或只需要低速)旋转钢管或探头,更主要的是它对自然缺陷,例如内、外折具有压电超声很难达到的高的探测率。而且,可以用 EMAT 同时探出条状伤、孔伤、折叠类自然伤和人工伤,这是压电超声、涡流、漏磁探伤所无法做到的。EMAT 探钢管的性能完全可以满足 GB5777-96 和 YB-4082 的要求。

④ EMAT 测厚:由于 EMAT 无耦合介质的影响,所以测厚可靠性较高,而且易于实现高速在线测厚,从而有利于实现轧管过程的闭环控制,这对提高成材率、节约能源、降低成本都具有重要意义。EMAT 测厚还可用于较高温度下的冶金设备的测厚,更有吸引力的是可对连铸坯凝固层厚度的测量。

⑤ 其它:由于 EMAT 的无接触检测这一特点,使得高速旋转的火车轮表面

探伤、钢丝绳及管道的高速探伤都较为容易实现，而在这些方面恰恰是压电超声所难以达到的。

### 1.3 原三辊轧管机组的工艺特点及存在的主要问题

#### 1.3.1 工艺流程

原  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组为国内首套全三辊机组，其工艺流程：

坯料酸洗  $\longrightarrow$  坯料检验  $\longrightarrow$  坯料修磨  $\longrightarrow$  坯料验收  $\longrightarrow$  下料  
 $\longrightarrow$  称重  $\longrightarrow$  环形炉加热  $\longrightarrow$  液压热定心  $\longrightarrow$  三辊穿孔  $\longrightarrow$  插芯棒  
 $\longrightarrow$  三辊轧管  $\longrightarrow$  中检取样  $\longrightarrow$  步进炉再加热  $\longrightarrow$  高压水除鳞  $\longrightarrow$   
 三辊微张力减径  $\longrightarrow$  减后取样  $\longrightarrow$  冷却  $\longrightarrow$  矫直  $\longrightarrow$  液压切管  
 $\longrightarrow$  人工检验  $\longrightarrow$  无损探伤  $\longrightarrow$  包装称重  $\longrightarrow$  入库。

#### 1.3.2 主要工艺参数

产品规格： $(\Phi 51\sim\Phi 127)\times 9\sim 25\text{mm}$

管坯规格： $(\Phi 90\sim\Phi 140)\times 1500\sim 3200\text{mm}$

荒管规格： $(\Phi 95\sim\Phi 145)\times 12\sim 25\times 2500\sim 5500\text{mm}$

轧管规格： $(\Phi 76\sim\Phi 133)\times 9\sim 25\times 4500\sim 10500\text{mm}$

步进炉允许加热毛管长度：4500~10500mm

微张力减径机允许

AM 系列：毛管外径 $\leq\Phi 76\text{mm}$ ，成品外径： $\Phi 51\sim\Phi 68\text{mm}$

BO 系列：毛管外径 $\leq\Phi 100\text{mm}$ ，成品外径： $\Phi 70\sim\Phi 89\text{mm}$

CM 系列：毛管外径 $\leq\Phi 133\text{mm}$ ，成品外径： $\Phi 90\sim\Phi 127\text{mm}$

#### 1.3.3 三辊穿孔变形特点

##### 1) 管坯中心无内折形成条件

三辊穿孔时，顶头前管坯中心部位受力情况见图 1。从图 1 中可看出，管坯中心仅受到压缩应力作用，而且合力  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  不平行，不会产生剪切应力。因此，三辊穿孔具有良好的应力状态，在顶头前管坯中心不会形成

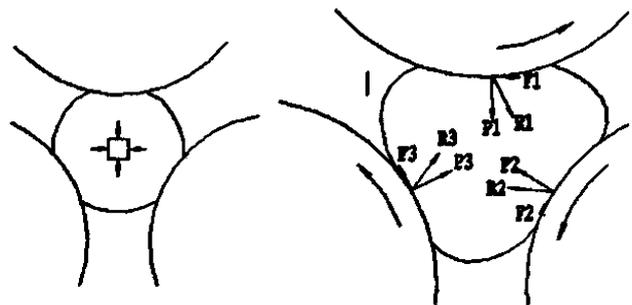


图 1 三辊穿孔时作用力示意

孔隙，消除了形成内折的条件，毛管内表面质量好<sup>[9]</sup>。同时，三辊穿孔以三个主动轧辊和顶头构成“封闭”环形孔型，它有三个主动轧辊并取消了导板，避免了毛管外表面的刮伤。

此外，在减径或等径穿孔过程中，由于附加变形小，三辊穿孔毛管具有较高的几何尺寸精度。

## 2) 三角变形特征的制约

三辊穿孔的横断面变形过程是由圆到圆三角形再规圆的过程，在变形区中，三辊穿孔的管坯自咬入开始，横断面上开始出现圆三角形，随着压缩量的增加，圆三角形趋势增大，顺着顶头均整段向出口方向，圆三角形逐渐被规圆。这种三角形变形特征，使毛管尾部容易出现三角形。一般情况下，钢管外径与壁厚之比  $D/S > 9$  时，就会出现尾三角形，随着  $D/S$  值愈大，则尾三角形也就愈大。由于尾三角形的形成，限制了在三辊穿孔机上穿制薄壁管，这是三辊穿孔机的缺点之一。

## 3) 三辊扩径穿孔对钢管表面质量的影响

中厚壁钢管品(钢)种、规格多，由于受坯料资源的制约，在实际生产中，

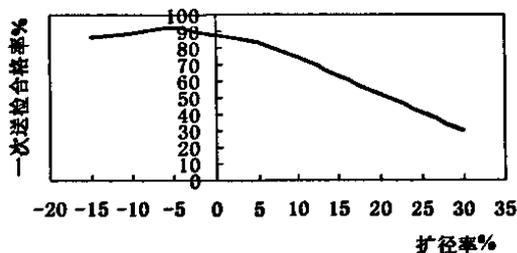


图2 一次送检合格率与扩径率的关系

生产规格与坯料不匹配现象十分普遍，扩径穿孔习以为常，而三辊斜轧扩径穿孔不利于金属在穿孔区的变形和流动。相反，三辊扩径穿孔加剧扭转变形、纵向剪切和横向剪切变形，这些附加变形叠加的结果使钢管表面产生裂纹、发纹等缺陷可能性增加，坯料本身缺陷扩展趋势加大。图2

是本文作者用同一炉  $\Phi 120\text{mm}$  连铸坯（20#钢）生产同一壁厚钢管时，不同扩径率条件下的钢管外表面一次送检合格率，生产实践结果证明了理论分析的正确。

## 4) 三辊轧管机变形量对表面质量的影响

本文作者用同一炉  $\Phi 130\text{mm}$  连铸坯（45#钢）生产同一壁厚钢管时，不同的减径量、减壁量条件下的钢管外表面一次送检合格率，见图3示。坯料与生产规格的不匹配，必然导致穿孔、轧管、微张力减径三大工序变形分配不合理，当轧管机变形量超过理想值时，随着变形量的增加，横向变形加剧，金属被辗轧反复弯曲的次数增加，金属变形抗力增加，金属变形的塑性降低。此外，横向剪切、纵向剪切等各种附加变形增加。这些因素的综合影响，促使裂纹、发

纹等缺陷的形成与扩展<sup>[9]</sup>，见图4、图5示。

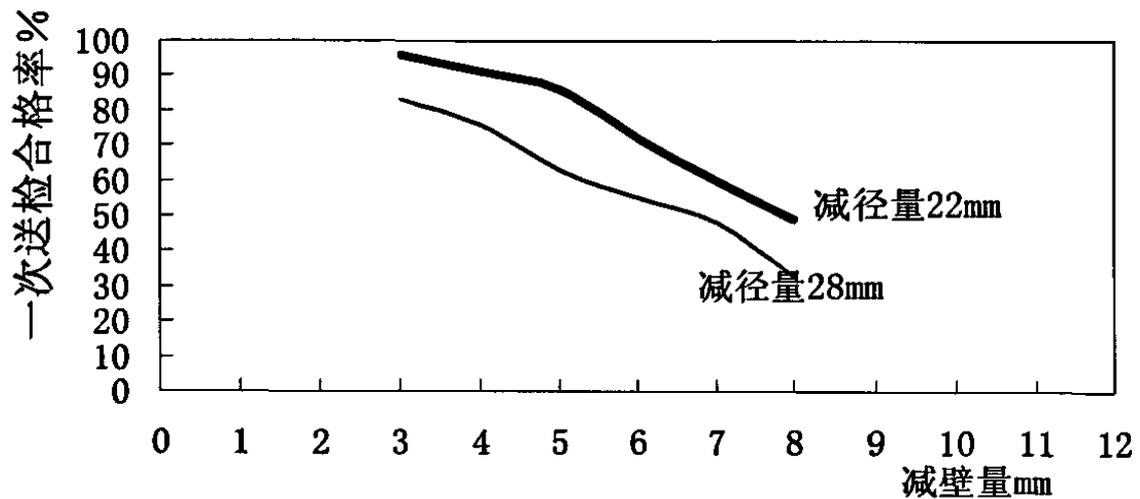


图3 一次送检合格率与减径量、减壁量的关系

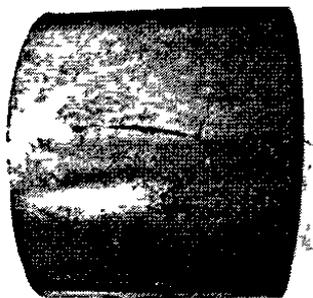


图4 外表裂纹

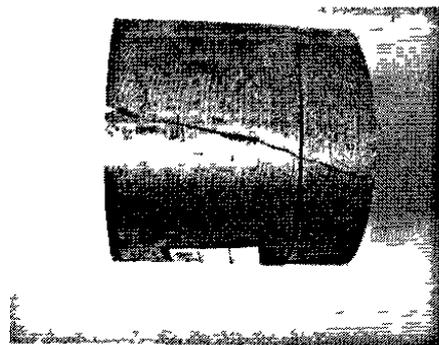


图5 加工后裂纹

综上所述，三辊扩径穿孔在促使坯料本身缺陷扩展的同时，也使钢管产生外表裂纹、发纹等缺陷的可能性增加。三辊轧管机变形量过大，亦可促使钢管外表面裂纹、发纹的形成与扩展。由于钢管用户质量成本意识的加强，机械加工用管的加工余量愈来愈少。因此，钢管外表面（近表面）的裂纹、发纹造成用户的报废量势必增加<sup>[10]</sup>。

## 1.4 本文的研究方法和意义

### 1.4.1 研究背景

作者自 1991 年大学毕业后一直在  $\Phi 108$  分厂从事生产、技术、质量管理, 见证了  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的辉煌, 也经历了  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的艰难。尤其是自 1998 年以来, 本人一直主管分厂的工艺技术与产品质量, 通过与用户的沟通, 熟知国内外客户对本机组产品质量的高标准要求。作者深感压力之大, 在关系机组存亡的关键时刻, 集团公司领导果断决策: 投资技术改造。但改造什么? 如何改造? 这就需要探明影响产品质量的主导因素, 研究相关的科学问题与技术, 寻找解决质量问题的有效途径。

### 1.4.2 研究思路

本文首先对穿孔、轧管、微张力减径的技术特征和实际生产情况进行了分析和研究, 从理论角度分析三辊轧管机组的工艺特点及存在的问题, 从实验中探索产生钢管表面(近表面)裂纹、发纹的原因, 探求解决钢管表面(近表面)裂纹、发纹的途径; 并确定最佳的工艺路线; 提出技术改造的内容和工模具设计模型; 并优化各机组的工艺参数。

### 1.4.3 研究方法

在技改前的原三辊轧管机组上进行不同坯质生产同一规格钢管和同一坯质生产不同规格钢管的对比实验, 每种材质和每种规格均取 10 支坯料进行实验, 数量多, 可对比性强; 在原机组上试验的结果具有代表性。

并将同一炉号的坯料在衡钢集团各分厂用不同穿孔工艺穿孔后, 再经三辊轧管、微张力减径, 实验规模大, 实验周期长, 投入时间、精力多, 但实验效果对比明显。

## 第二章 消除表面裂纹实验研究

### 2.1 引言

生产实践表明, 钢管产生表面裂纹与原始材料的表面质量、穿孔、轧管工艺有很大关系。因此, 有必要通过实验确定其影响性质及程度, 探求消除表面裂纹的方法。

### 2.2 实验一

在原  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组上进行采用不同坯质生产同一规格钢管和同一坯质生产不同规格钢管的对比实验, 探求坯料表面质量、扩径率、D/S 值与表面裂纹的关系; 通过对实验结果的分析, 来探明三辊轧管机组钢管外表面裂纹、发纹的形成原因, 达到消除表面裂纹的目的。

#### 2.2.1 实验方案

##### 1) 实验目的

- (1) 确定三辊轧管机组对坯料表面质量的要求;
- (2) 研究生产不同 D/S 值钢管表面裂纹变化情况;
- (3) 探明钢管外表面裂纹、发纹的来源。

##### 2) 实验方法

取 10 支 20#  $\Phi 110\text{mm}$  长管坯二刀三段, 分 A、B、C 三组, 每组 10 支, A、C 两组坯经酸洗修磨干净; B 组坯剥皮后进行磁粉探伤。坯料检验合格后按表 2 方案试验。

表 2 试验方案

| 工艺方案 | 成品规格<br>(mm)        | 管坯直径<br>(mm) | 穿孔支数 | 轧管支数 | 减径支数 |
|------|---------------------|--------------|------|------|------|
| A    | $\Phi 76 \times 9$  | $\Phi 110$   | 4    | 2    | 4    |
| B    | $\Phi 76 \times 9$  | $\Phi 105$   | 4    | 2    | 4    |
| C    | $\Phi 76 \times 14$ | $\Phi 110$   | 4    | 2    | 4    |

##### 3) 实验工艺参数和其它技术要求

## (1) 工艺参数 (见表 3)

表 3 工艺参数

| 工艺<br>方案 | 穿孔         |            |            |            | 延伸系数  | 芯棒<br>(mm) | 轧管    |            | 减径    |  |
|----------|------------|------------|------------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|--|
|          | 顶杆<br>(mm) | 顶头<br>(mm) | 孔喉<br>(mm) | 规格<br>(mm) |       |            | 延伸系数  | 规格<br>(mm) | 延伸系数  |  |
| A        | 76         | 80         | 92         | 111×14     | 2.161 | 64         | 1.934 | 87×9       | 1.164 |  |
| B        | 76         | 80         | 92         | 111×14     | 1.969 | 64         | 1.934 | 87×9       | 1.164 |  |
| C        | 76         | 80         | 95         | 115×16     | 1.852 | 64         | 1.397 | 95×14      | 1.306 |  |

## (2) 环形炉加热温度

预热段 805℃                      加热 I 段 1200℃  
 加热 II 段 1300℃                  均热段 1250℃

## (3) 其它

- ① 穿孔机轧辊和轧管机轧辊表面状况良好，表面冷却正常；
- ② 穿孔机三个辊子角度一致，轧管机两端压板正常；
- ③ 微张力减径机机架预检状况良好；
- ④ 高压水除鳞效果良好。

## 2.2.2 实验结果与分析

## 1) 实验结果

将 A、B、C 三组的穿孔荒管、轧管毛管、减后成品管分别酸洗 25 分钟后人工检验，再进行磁粉探伤检验，检验结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出，A 组和 B 组钢管表面有明显区别；虽钢管都经酸洗检验，穿孔的钢管表面很少发现缺陷（表面致密的氧化皮未完全酸洗掉），经磁粉探伤后，A 组无论是穿孔荒管的表面还是轧后毛管的表面都比较差，尤其是轧后毛管，裂纹数量 ( $Q_a=24$  条) 是 B 组轧后毛管裂纹数量 ( $Q_b=13$ ) 的 1.85 倍。主要是由于 B 组坯经剥皮后，坯料表面和近表面缺陷已基本清除。说明坯料质量对钢管表面质量影响很大。

表 4 不同工艺方案的试验结果

| 工<br>艺<br>方<br>案 | 穿后荒管检验   |   | 轧后毛管检验 |   | 减后成品管检验  |      |
|------------------|--|---|--------|---|--|------|
|                  | 酸洗检验   | 磁粉探伤  | 酸洗检验   | 磁粉探伤  | 酸洗检验   | 磁粉探伤 |
| A                | 四支无缺陷  | A <sub>3</sub> 、A <sub>4</sub> 无缺陷, A <sub>1</sub> 裂纹 1 处, A <sub>2</sub> 有 1 处折叠, 1 处裂纹。 | 未发现裂纹  | A <sub>1</sub> 有 28 处裂纹, 其中 3 根较长; A <sub>2</sub> 有 20 处发纹。   | A <sub>2</sub> 、A <sub>3</sub> 无缺陷, A <sub>1</sub> 有 10 处裂纹, 其中 5 处较长; A <sub>4</sub> 有 9 处裂纹, 其中 4 处较长。 | 未探   |
| B                | B <sub>1</sub> 、B <sub>3</sub> 、B <sub>4</sub> 无缺陷, B <sub>2</sub> 端部有一处小裂纹                            | B <sub>1</sub> 、B <sub>3</sub> 、B <sub>4</sub> 无缺陷, B <sub>2</sub> 端部有一处小裂纹。              | 未发现裂纹  | B <sub>1</sub> 有 15 处小发纹, 其中 1 处较长; B <sub>2</sub> 有 10 处小发纹。 | B <sub>1</sub> 、B <sub>2</sub> 各 1 处小裂纹; B <sub>3</sub> 、B <sub>4</sub> 无缺陷。                             | 未探   |
| C                | C <sub>2</sub> 、C <sub>3</sub> 无缺陷, C <sub>1</sub> 端部有 2 处中间 1 处有小裂纹, C <sub>4</sub> 端部 1 处有发纹, 2 处小裂纹 | 未探  | 未发现裂纹  | C <sub>1</sub> 有 3 处发纹, C <sub>2</sub> 有 2 处发纹。               | C <sub>1</sub> 、C <sub>2</sub> 、C <sub>3</sub> 、C <sub>4</sub> 未发现缺陷。                                    | 未探   |

从表 4 还可看出, A、B、C 三组穿孔后的荒管, 经酸洗肉眼检查和磁粉探伤, 发现钢管表面缺陷相对较少, 真正有缺陷的钢管只有 3 支, 且缺陷不是很严重。其原因是这些穿孔规格与坯料基本匹配, 扩径率控制在 5% 以下, 这样有利于减轻扭转变形, 外层金属所受的附加切向拉应力降低, 有利于改善钢管表面质量。穿孔荒管是在相对较理想的温度下进行的 (1230℃ ~ 1270℃), 此时金属塑性好, 只要保证合适的扩径穿孔, 各种附加变形的大小, 不致于会对钢管表面造成很大的影响。

将 A、B 组与 C 组的结果进行比较, 从轧后毛管和减后成品管可以看出, 无论是酸洗后肉眼检验, 还是磁粉探伤检验, C 组钢管表面的裂纹数量要比 A、B 组钢管表面裂纹数量要少很多, 原因是 A、B 组轧管的 D/S 值较大 (8.7), 且减壁量大 (5mm), 而 C 组的 D/S 值较小 (6.8), 且减壁量小 (只有 2mm)。说明轧管变形量过大, D/S 值越大, 不利于钢管表面质量的提高。

## 2) 分析与讨论

D/S 值越大, 钢管产生塑性变形的极限载荷值越小, 越容易产生塑性弯曲变形, 横向变形越严重, 有利于裂纹的形成和扩展。

D/S 值越大, 三角形的形状系数越大, 横向变形加剧, 由此产生的不均匀变形增加, 各种附加变形增加。也有利于裂纹的形成和扩展。

变形量越大, 金属被轧反复弯曲的次数增加, 随着壁厚的减薄, D/S 值增加, 变形抗力增加, 金属变形的塑性降低; 同时, 变形量越大, 所需变形能量增加, 变形抗力增加, 纵向剪切、横向剪切等各种附加变形增加。

原始材料表面质量的影响, 主要取决于表面上已存在的表面裂纹和材料性能的不均匀性。显然, 这两方面因素消除后, 有利于产品质量的提高。

### 2.2.3 小结

(1) 三辊轧管变形方式易产生钢管外表面裂纹、发纹, 不宜使用坯料材质较差的管坯。管坯表面修磨很重要, 否则, 管坯原始缺陷将会带到钢管表面, 甚至扩大、延伸。

(2) 生产 D/S 值较大的薄壁管, 钢管表面容易产生裂纹。但通过减少变形量, 以及减少影响其三角变形系数的因素, 可减轻钢管表面裂纹、发纹产生。

(3) 合理分配穿孔与轧管两大工序的变形, 有利于减少钢管表面裂纹、发纹的产生, 达到改善钢管表面质量的目的。

## 2.3 实验二

用同一炉号的坯料分别在衡钢集团  $\Phi 89$  分厂及  $\Phi 108$  分厂用不同的穿孔工艺穿孔, 再经三辊轧管、三辊微张力减径。通过对实验结果的分析, 探索不同的穿孔工艺对钢管表面裂纹、发纹的影响。

### 2.3.1 实验方案

#### 1) 试验目的

(1) 研究同一炉号的坯料, 经不同的方式(二辊穿孔或三辊穿孔)穿孔成材后, 钢管外表面质量情况;

(2) 研究同一炉号的坯料, 在穿孔条件基本相同的情况下, 不同的轧管延伸系数对钢管外表面质量的影响;

(3) 研究同一炉号的坯料, 不同的穿孔、轧管变形量对钢管外表面质量的影响。

#### 2) 试验方法

(1) 将炉号为 0121604, 坯径  $\Phi 120\text{mm}$ , 钢号 St35.8 的连铸管坯分成四组(第一组 29 支, 第二组 32 支, 第三组 52 支短坯, 第四组 30 支):

第一组: 在  $\Phi 89$  分厂经二辊锥形穿孔(穿孔规格:  $\Phi 132 \times 13.5$ ), 酸洗后到  $\Phi 108$  分厂减径成  $\Phi 127 \times 13.5$ ;

第二、三、四组: 在  $\Phi 108$  分厂采用三辊穿孔、三辊轧管、三辊微张力减径工艺路线。

(2) 分别取炉号为 891551, 钢号为 12Cr1MoVG,  $\Phi 120\text{mm}$  轧坯 3 支和 4 支, 试验不同的变形量对钢管外表面质量的影响;

(3) 其它工艺条件相同;

(4) 根据生产计划的安排组织试验, 全过程记录、跟踪。

### 2.3.2 试验结果与分析

#### 1) 试验结果

$\Phi 120\text{mm}$  St35.8 连铸圆管坯分组试验的工艺参数和试验结果如下表 5。

表 5 工艺参数及试验结果

| 项目<br>组别 | 穿孔规格<br>D×S            | 顶<br>杆<br>mm | 顶头<br>mm | $\Pi$ 穿 | 轧管规格<br>D×S            | 芯<br>棒<br>mm | 减径<br>量<br>mm | 减壁<br>量<br>mm | $\Pi$ 轧 | 成品规格<br>D×S            | 一次合<br>格率% |
|----------|------------------------|--------------|----------|---------|------------------------|--------------|---------------|---------------|---------|------------------------|------------|
| 第一组      | $\Phi 132 \times 13.5$ |              |          |         |                        |              |               |               |         | $\Phi 127 \times 13.5$ | 100        |
| 第二组      | $\Phi 124 \times 16$   | 76           | 86       | 1.85    | $\Phi 106 \times 12.8$ | 76           | 18            | 3.2           | 1.448   |                        | 62.5       |
| 第三组      | $\Phi 124 \times 16$   | 76           | 86       | 1.85    | $\Phi 112 \times 9.8$  | 86           | 12            | 6.2           | 1.725   |                        | 31         |
| 第四组      | $\Phi 116 \times 16$   | 76           | 80       | 1.997   | $\Phi 78 \times 10.4$  | 54           | 38            | 5.6           | 2.276   |                        | 0          |

炉号 891551, 钢号为 12Cr1MoVG,  $\Phi 120$  mm 轧坯, 经不同的变形量, 钢管外表质量对比情况, 如表 6。

表 6 钢管表面质量研究的试验结果

| 项目<br>组别 | 成品规格                | 穿孔规格                 | 轧管规格                  | $\Pi$ 穿 | $\Pi$ 轧 | $\Pi$ 减 | 试轧<br>支数 | 初检<br>裂纹      | 磁探裂缝     |
|----------|---------------------|----------------------|-----------------------|---------|---------|---------|----------|---------------|----------|
| 第一组      | $\Phi 76 \times 15$ | $\Phi 118 \times 16$ | $\Phi 89 \times 15.2$ | 2.2140  | 1.4551  | 1.226   | 4        | 无             | 3~10 处/支 |
| 第二组      | $\Phi 60 \times 10$ | $\Phi 112 \times 14$ | $\Phi 77 \times 10$   | 2.5712  | 0.2713  | 1.340   | 3        | 30~50 处/<br>支 | 未探伤      |

#### 2) 分析与讨论

从表 5 可以看出,不同的工艺路线生产出来的钢管外表面质量情况截然不同,二辊锥形穿孔后的钢管外表面质量优于三辊(双桶形辊)穿孔后钢管外表。因锥形穿孔与双桶形辊穿孔比较,无用的变形负载要少得多,也就是作用于钢管外表扭转变形,纵向、切向剪切等附加变形少;另一个原因就是二辊穿孔塑性弯曲程度比三辊穿孔塑性弯曲程度要轻。

第二、三、四组比较,随着钢管口径变小,壁厚的减薄,轧管延伸系数的增大,钢管一次送检合格率越来越低,说明大坯不适合于生产小口径薄壁管。否则,会造成钢管表面质量差,这种情况在表 6 中有同样的结果。因为在三辊轧管变形中,变形量的增大,延伸系数增大,变形抗力也增大,横向附加变形和扭转变形等各种附加变形加剧,这样势必会造成钢管外表裂纹、发纹的增加,坯料内原有缺陷的暴露和扩大。在实际生产中,有时变形量太大,钢管会出棱,在棱状处有严重的裂口。

### 2.3.3 小结

(1) 二辊锥形穿孔优于三辊(双桶形辊)穿孔,钢管外表面裂纹、发纹明显减少。

(2) 在三辊轧管机组上,在其它工艺条件基本相同情况下,轧管变形量越大,轧管延伸系数越大,钢管外表面质量越差。

## 第三章 技改设备及工艺改进

### 3.1 引言

围绕解决产品表面质量问题和提高产品几何尺寸精度,考虑到市场价格竞争因素, $\Phi 108\text{mm}$ 三辊轧管机组本次技改的目的可概括为“提质降耗”。根据技改前近一年的实验和技术研究,最后确定了①“环形炉燃烧和控制系统的改造”;②取消穿孔前热定心工序;③改三辊穿孔为二辊锥形穿孔;④三辊轧管机辊型改进及设备改造;⑤高压水除鳞增压改造;⑥矫直机辊子角度调整系统改造;⑦超声探伤技术改造等多项主要技术改造内容。

本次技改,为了解决三辊轧管机组的钢管表面裂纹问题,生产工艺技术改造的重点是将二辊锥形穿孔技术运用到中厚壁钢管生产中,为了充分发挥二辊锥形穿孔技术在中厚壁管钢管生产中的作用,本章着重阐述了二辊锥形穿孔金属变形原理,并在二辊锥形穿孔主要变形工具的设计与开发方面进行了探索。此外,在三辊轧管机的辊型、送进角、轧辊的硬度等方面进行了研究。

### 3.2 技术改造内容

#### 3.2.1 改造后的工艺流程

坯料酸洗 → 坯料检验 → 坯料修磨 → 坯料验收 → 下料 → 称重 → 环形炉加热 → 二辊锥形穿孔 → 插芯棒 → 三辊轧管 → 中检取样 → 步进炉再加热 → 高压水除鳞 → 三辊微张力减径 → 减后取样 → 冷却 → 矫直液压切管 → 人工检验 → 电磁超声探伤 → 包装 → 称重 → 入库。

技改前后工艺流程的主要变化有:①技改后取消了穿孔前热定心工序。②由三辊穿孔改为二辊锥形穿孔。③由电磁超声探伤取代压电超声探伤。技改的具体内容及特点将在下节中进行详细的阐述。

#### 3.2.2 技改的内容

##### 1) 环形炉燃烧和控制系统的改造

为了使钢坯加热更加均匀,确保钢管表面质量,在环形炉加热工序进行了三个方面的改造:加大炉膛宽度;增加内外烧嘴个数;风油控制由原来人工调整,改为仪表定量自动控制。

## 2) 取消穿孔前热定心工序

原  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组工艺流程中的穿孔前液压热定心工序的作用，是在坯的前端中央冲出一个深度约为 35mm 的锥形孔，有利于三辊穿孔机咬入时对准钢坯中心，减少头部壁厚不均。

而采用二辊锥形穿孔后，受料槽高度可调，通过适当将锥形辊入口锥及导板入口段加长后，管坯接触顶头前已被旋转了多圈，实现了自定心，加长段同时起到了导向和对中作用，具备了穿孔前定心工序的效果。技改后，通过两年多的生产实践证明：二辊锥形穿孔前可以取消定心工序。

## 3) 改三辊穿孔为二辊锥形穿孔

二辊锥形穿孔机是在结合斯蒂芬尔 (stiefel) 穿孔机和狄舍尔 (Diescher) 穿孔机设计上的优点，于上世纪八十年代初发展起来的一种新型锥形穿孔机。二辊锥形穿孔机的轧辊是锥形的 (图 6)，其轧辊直径由入口向出口方向逐渐增大，与穿孔时的金属流动速度逐渐增加相一致，因此，减少了作用在管坯上的周向剪切力，有利于减少内外表面缺陷，可穿制高合金钢及管壁较薄的毛管，为轧管机提供高质量的毛管。同时，可灵活分配穿孔、轧管两大工序的压缩比。加大穿孔机延伸率，可以减少三辊轧管机的变形量，从而，减轻三辊轧管因变形量过大带来的钢管外表面裂纹，达到提高钢管表面质量的目的。

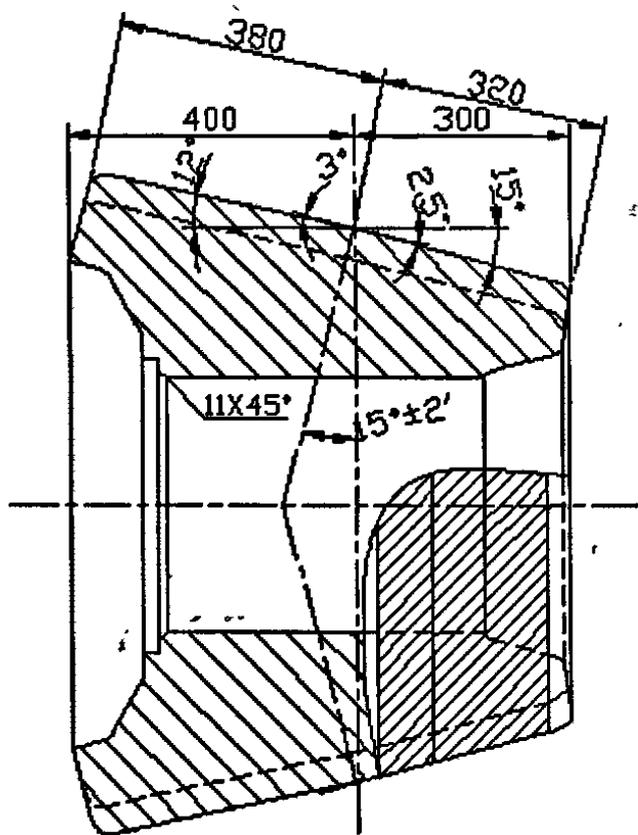


图 6 二辊锥形穿孔辊型示意

实践证明，三辊斜轧穿孔机要求

的坯料质量较高，这给坯料供应和生产组织带来极大的不便，而二辊锥形穿孔机通过采用大的送进角和辗轧角，即使使用具有中心疏松的连铸坯，仍然能穿制出合格钢管，二辊锥形穿孔机的坯料适应性强。

## 4) 三辊轧管机辊型改进及设备改造

试验证明，陡坡型台肩辊型 (见图 8a) 比圆滑型台肩辊型 (见图 8b) 更有利于金属塑性变形和均匀流动，有利于改善钢管表面质量。这是因为圆滑型台肩辊型的变形区

比陡坡型台肩辊型的变形区长，金属辗轧次数增加，而变形区减壁使每个截面的变形速度各异，造成纵向剪切、切向剪切附加变形增加。表面裂纹产生的可能性增加，用圆滑形台肩辊型生产薄壁管时，表面裂纹尤其明显，如图 7 示。

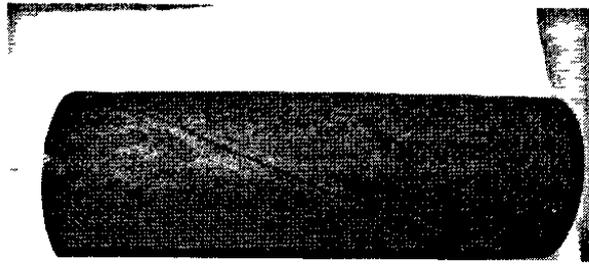
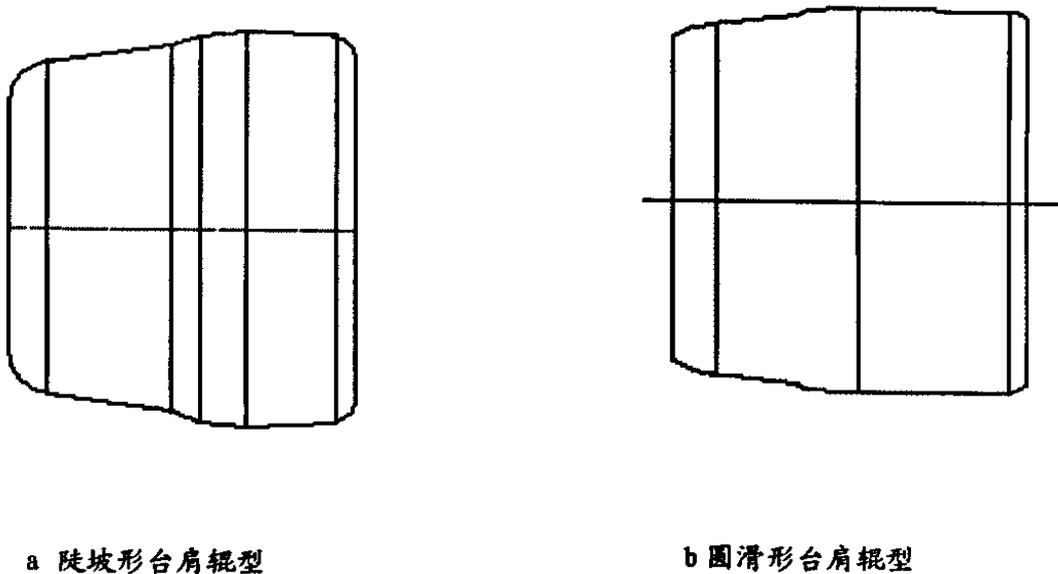


图 7 圆滑形台肩辊型生产 77×10 钢管产生表面裂纹



a 陡坡形台肩辊型

b 圆滑形台肩辊型

图 8 三辊轧管机辊型示意

原三辊轧管机主机座采用圆筒形闭式机架，分固定和回转机架两部分，轧制薄壁管（D/S 值较大）时，通过固定在固定机架上的油缸推动回转机架绕轧制中心线回转，从而避免尾三角形成。尽管如此，因受机架回转速度的影响，轧制薄壁管时，D/S 值受到限制，而压下、送进角、辗轧角的调整均需人工手动调整，也制约了产品几何尺寸精度和产品成材率的提高。

因此，通过建立液压和电控技术，对主机座及电控部分设备进行升级改造，改造后的  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机采用当代国际上先进的轧辊快开式三辊轧管机，具有以下主要

特点：机架为固定式结构，由上机盖和下机座组成，机盖由液压缸锁紧，可快速打开，设备刚性好，便于快速换辊，轧辊的压下、送进角、辗轧角可以无级调整，数字显示。另外，轧辊可根据工艺要求实现轧制过程中的快开，控制灵活可靠，可以避免三辊轧管过程中易于产生的尾三角，D/S 值取值可更大，尾三角长度可缩短至 100mm 内，产品几何尺寸精度及产品成材率均大幅度提高。

#### 5) 高压水除鳞机增压改造

原高压水除鳞机最大压力只有 8MPa，除鳞效果不理想，未冲脱的氧化铁皮经微张力减径后，在钢管表面形成麻面或麻坑。因此，为了保证钢管表面质量，应将原高压水除鳞系统进行增压改造，改造后的最大压力达到 18MPa 以上。

#### 6) 矫直机辊子角度调整系统改造

原矫直机因设计问题，矫直机辊子角度调整十分困难，经常矫伤钢管表面。因此，必须将矫直机辊子角度调整系统进行改造，使辊子角度能根据产品规格调整方便，确保钢管表面质量。

#### 7) 超声探伤技术改造

因原超声探伤设备已接近报废年限，而且原探伤机是采用传统的压电超声探伤，必须经水才能将超声波传入被检测钢管中去，作为声耦合介质的水会产生很多干扰杂波，使得调试很困难，信噪比很低。此外，如果钢管表面粗糙，特别是钢管表面有麻面或麻坑的情况下，由于声耦合的困难，检测灵敏度低。而电磁超声探伤不需要耦合介质，在很多领域都有压电超声所无法取代的优势。概括起来其具有应用到高温、高速、表面粗糙（特别是带有氧化皮）的工件上具有十分明显的优势，更主要的是它对自然缺陷，例如对内、外折具有压电超声很难达到的探测率。在原有超声探伤技术的基础上，引入电磁场理论，可在有质量问题的钢管缺陷部位作标记，并将其分选出来。从而，保证了出厂产品的实物质量。

### 3.2.3 改造后的主要设备及技术参数

#### 1) 环形加热炉

加热钢种：碳结钢、合金钢、轴承钢等

加热温度：1140℃~1320℃

最大生产率：40t/h

管坯尺寸：Φ90~Φ150×1200~3200mm

炉底布料角度：2.303 度

炉子公称直径：Φ12m

炉膛宽度：3480mm

进出料炉门中心夹角：30 度

炉底有效面积:  $120M^2$   
平均炉底强度:  $1.83 \times 10^7 Pa$   
燃料: 重油

## 2) 二辊锥形穿孔机

主电机: 功率 1500kw 转数 750/1000r/min  
主减速机速比: 5.76  
输出扭矩 max: 264KN.m.  
轧辊转速: 110~164r/min  
轧辊尺寸:  $\Phi 680 \sim \Phi 760 \times 700mm$   
送进角:  $10^\circ \sim 15^\circ$   
辗轧角:  $15^\circ$   
管坯规格: 直径  $\Phi 100 \sim \Phi 150mm$   
          长度 1200~3200mm  
毛管规格: 直径  $\Phi 95 \sim \Phi 168mm$   
          壁厚 11.5~30.0mm  
          长度 Max 6000mm

## 3) 三辊轧管机

主电机: 型号 2710-400 额定功率 1500kw 转数 750/1000r/min  
轧辊转速 max: 235r/min  
轧辊尺寸:  $\Phi 380 \sim \Phi 450 \times 400mm$   
送进角:  $0 \sim 12^\circ$   
辗轧角:  $0 \sim 6^\circ$   
入口毛管: 直径  $\Phi 95 \sim \Phi 168mm$   
          壁厚 11.5~30.0mm  
          长度 2500~6000mm  
出口毛管: 直径  $\Phi 73 \sim \Phi 142mm$   
          壁厚 6.35~28mm  
          长度 4500~10500mm

## 4) 微张力减径机

轧机型号: RW355I12M  
机架间距: 325mm  
机架数量: 12  
入口速度: 0.5m/s

单机架最大减径率：3.8%

理想轧辊直径：355mm

最大轧制力： $2 \times 10^5 \text{N}$

轧辊材质：特殊球墨铸铁

毛管直径： $\Phi 70 \sim \Phi 140 \text{mm}$

成品管直径： $\Phi 45 \sim \Phi 133 \text{mm}$

主电机额定传动功率：180KW

主电机传动速度：350~800~1600 r/min

迭加电机额定传动功率：180KW

迭加电机传动速度：350~800~1600 r/min

技改前后工艺参数的主要变化在于对穿孔机、轧管机的轧辊辊径进行了加大、加长。这种变化主要是为了适应机组技改后开发大口径、厚壁钢管的需要，同时，通过加大轧辊辊径来扩大坯料直径及适度提速增量。

### 3.3 生产工艺的设计与开发

#### 3.3.1 二辊锥形穿孔变形工具的设计与开发

##### 3.3.1.1 锥形穿孔金属变形原理

###### 1) 斜轧穿孔变形过程

斜轧穿孔毛管的变形区构成根据不同的机型，分两种情况，对于二辊穿孔机，变形区由轧辊、顶头和导板构成。对于三辊穿孔机而言，变形区则由轧辊和顶头构成。尽管由于工具设计和轧机调整的不同，造成变形区的几何尺寸有差异，但穿孔的整个变形区大致可分为四个区域，如图9所示。

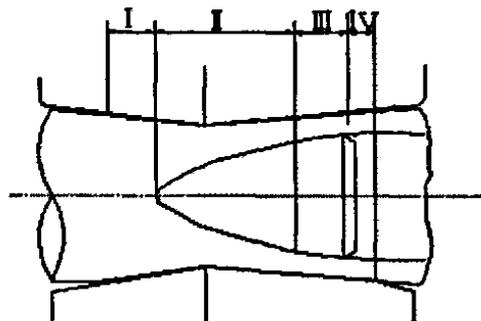


图9 穿孔变形区中的四个区域

I区称为穿孔准备区（即轧制实心圆管坯区）。I区的主要作用是为穿孔做准备和顺利地实现一、二次咬入。这个区的特点是，由于轧辊入口锥表面有锥度，沿穿孔方向（轴向）前进的管坯逐渐在直径上受到压缩，被压缩部分

的金属一部分横向流动，坯料断面由圆形变成椭圆形，一部分金属（主要是表层金属）向轴向延伸，从而在坯料前端面形成一个喇叭口状的凹陷。

II区称为穿孔区。该区的主要作用是穿孔。即由实心坯变成空心的毛管，该区从金属与顶头接触开始到顶头圆锥带为止。这个区的主要特点是压缩壁厚，由于轧辊表面

与顶头间距离是逐渐减小的,因此毛管壁厚被逐渐压缩。壁厚上被压缩的金属,同样可以向横向(扩径)和纵向流动,但由于横向变形受到导板的阻止,纵向延伸变形是主要的。该区延伸最大。

III区称为辗轧区。该区的主要作用是辗轧(均整)管壁,改善管壁的尺寸精度和内外表面质量。由于顶头母线与轧辊母线相互平行,所以压下量很小。

IV区为转圆区。该区的作用是靠轧辊旋转加工把椭圆形毛管转圆。该区的长度很短,变形实际上是塑性弯曲变形,基本上没有延伸变形。

斜轧穿孔变形的动态过程大致如下:推坯机把管坯送入轧辊中而被轧辊咬入。由于两个轧辊向同一方向旋转,而轧辊轴线和轧制线有一倾角,使得轧辊在带动管坯向轧辊反方向旋转时还获得一个前进运动。管坯被咬入后首先进入第I区,在第I区中管坯何时和导板接触将决定穿孔过程能否顺利完成。坯料提早和导板接触可以提前控制横向变形,减小孔型椭圆度,但过早和导板接触将增加管坯的轴向运动阻力和旋转阻力,特别是开始进入第II区时加上顶头轴向阻力,不易实现二次咬入,有时甚至发生前卡。管坯继续向前运动,与顶头相遇后则进入第II区。这时金属在轧辊和顶头之间进行壁厚压缩变形,而导板则起着控制横向变形的作用。管壁的最终定型是在顶头圆锥段和直线段相接的地方。管坯到顶头圆锥段后,由于顶头圆锥段母线与轧辊出口锥母线平行,管壁不再受压缩而是被辗平,这时管坯处在第III区。由于毛管横截面是椭圆形的,而顶头截面是圆形的,因此顶头和毛管内壁之间存在间隙。也正是由于有了间隙,毛管才能自由地脱离顶头。毛管内壁脱离顶头后则进入变形区的第IV区。即毛管转圆区,这时毛管只和轧辊相接触。由于在轧辊出口锥上有锥度,轧辊之间的距离是逐渐增大的,从而在第IV区中毛管直径上的压缩量是逐渐减小的,到毛管脱离轧辊时压缩量为零,毛管原来的椭圆形截面变成圆形截面。一般来说,毛管在离开顶头前,先离开导板,因此,在第IV区中导板不起作用,只有这样才能转圆。

## 2) 斜轧实心圆坯的应力——变形状态(孔腔形成机理)

横轧、斜轧、旋转横锻实心工件时,工件会产生纵向内撕裂,这种现象称为孔腔形成,或称旋转横锻效应,于工件中心产生的撕裂称为中心孔腔。工件中呈环状的纵内撕裂,称为环形孔腔。二辊斜轧、横轧和旋转横锻时产生的多为中心孔腔。二辊锥形穿孔准备区的情况与此类同。

### (1) 孔腔形成的机理

孔腔的形成(或者说内撕裂的产生)与金属的应力——变形状态有关。因此,为了弄清孔腔形成的机理,必须研究实心坯斜轧(或横轧和旋转横锻)时的应力——变形状态。在这方面,国内外学者都进行过大量的研究工作。但是由于斜轧过程比较复杂,往往用一般的轧制理论和旋转横锻效应还不能阐明这一过程的本质。因此,对斜轧时孔腔形成机理的解释并无统一的见解。归纳起来,对孔腔形成机理的解释,有三种理论。

### ① 切应力理论

切应力理论认为,中心撕裂是工件心部金属受交变的剪应力作用的结果,属韧性断裂。这种理论在上世纪二、三十年代比较流行,代表人物是德国人 E. siebel。有如下结论:在圆柱体中心产生压应力和拉应力,外力作用方向为压应力,垂直于外力方向为拉应力;与外力成  $45^\circ$  方向发生切应力,切应力使金属层间产生相对滑移。坯料不断旋转,滑移方向和切应力方向也不断发生改变。在这种交变的切应力作用下,他根据自己的试验提出:斜轧实心圆坯时,由于外作用力具有集中载荷的性质,塑性变形只发生于表层,中心不产生塑性变形而只产生弹性变形,即所谓中心是弹性核。这种不均匀变形导致管坯中心受附加的轴向拉应力 ( $\sigma_x$ ) 和横向拉应力 ( $\sigma_y$ ) 作用。随着不断旋转加工,中心的附加(残余)拉应力不断积累,以致中心在外压力作用方向也产生很大的工作拉应力 ( $\sigma_z$ ),工件中心金属在三向拉应力作用下产生脆性断裂。

### ② 综合应力理论

综合应力理论认为,孔隙形成(中心撕裂)是由于中心部分金属受交变的切应力和很大的拉应力作用的结果,大都属韧性断裂。这是上世纪五十年代后期提出的理论,它的基本论点可归纳为:横斜轧时,单位压下率很小,工件中心将产生撕裂。与此同时,由不均匀变形引起在工件中心产生的轴向拉应力也促进中心撕裂。

有学者通过试验证实,工件中心外力作用方向为压应力,垂直于外力作用的方向为拉应力。但在单位压下率不大的情况下,初始时塑性变形并未深透到中心,此时在与外力成  $45^\circ$  角且过中心的平面上并未发生滑移变形。

### ③ 正应力理论

正应力理论认为,中心撕裂是由于心部金属受拉应力作用的结果,一般属于脆性断裂。随着轧件不断旋转加工,总直径压下率增大,塑性变形不断从表层向中心深入,最终工件中心也可能产生较大的塑性变形。但是变形是不均匀的,在直径压下率不很大的情况下,表层的塑性变形大于中心的;由于具有集中载荷性质的外压力作用和变形不均匀的结果,轧件中心的工作应力状态为:外压力作用方向为压应力 ( $\sigma_z$ ),横向垂直于外压力作用的方向为拉应力 ( $\sigma_y$ ),无顶头作用时轴向为拉应力,有顶头作用时轴向可能是压应力;轧件在上述的异名应力状态(应力场)作用下不断旋转加工时,轧件中心部分金属受不断增大的交变的切应力和横向拉应力作用。切应力使金属产生滑移——塑性变形,并随滑移而产生微裂,拉应力使微裂扩展成裂缝,各裂缝的进一步扩大并互连接而成孔隙。孔隙形成是中心金属韧——脆性断裂的过程。

上述三种理论的主要分歧在于:(1)工件中心的应力状态;(2)塑性变形的发展——中心金属的变形状态是塑性状态还是弹性状态;(3)与前者有关,中心金属是韧性断裂还是脆性断裂;(4)顶头对中心金属轴向力性质和对孔隙形成的影响。

### (2) 孔隙形成机理的应用

人们对孔隙形成的应用是有过重大变化的。二辊斜轧穿孔是曼内斯曼兄弟利用孔隙形成的机理而发明的。1886年初次试用斜轧穿孔时，他们曾试图用孔隙形成而不用顶头即将实心锭（坯）斜轧成毛管，但因内孔小且不规整和内壁粗糙等而不能实用。于是在变形区出口部分（轧辊出口锥间）放置一个顶头，穿孔时圆锭（坯）先在轧辊入口锥（穿孔准备区）受压缩而产生很大的孔隙，有孔隙的空心坯在轧辊出口锥的变形区部分用顶头进行减壁、扩内孔和平整表面而得到厚壁毛管。

后来，随着制造技术的发展，对热轧无缝钢管的质量和品种提出了新的要求，特别是在穿制合金钢管时，上述穿孔工艺已无法适应。经过试验研究，已确定预先形成孔隙是出现毛管内折叠缺陷的根本原因，所以，在保证正常实现二次咬入的条件下，必须使操作所采用的顶头前压下率值小于该钢种的临界压下率，确保在穿孔准备区不预先形成孔隙，但仍利用孔隙形成这种自然现象使穿孔准备区管坯中心金属疏松并受适度的横向拉应力作用，以减小顶头鼻部的单位压力，便于穿正和提高顶头寿命。这种工艺的变革，已经改变了曼内斯曼穿孔法初始的基本原理，预先形成孔隙已不是斜轧穿孔的必要条件，相反人们认为孔隙形成的自然现象已成为曼内斯曼穿孔法中提高毛管质量和扩大钢种范围的障碍。

### (3) 防止预先形成孔隙的措施

综上所述，为了保证毛管质量，必须防止在穿孔准备区预先形成孔隙。为此，要在提高临界压下率和减小实现二次咬入所需的顶头前压下率最小值等两方面采取措施。临界压下率是指工件内开始出现（中心的或环形的）撕裂时所对应的直径压下率。临界压下率与管坯内在质量及工艺条件有关。按照综合应力理论，提高临界压下率的主要途径是：采取各种措施来减轻不均匀变形，发展纵向变形，限制横向变形，减少轧件在穿孔准备区被反复压缩的次数和提高管坯冶炼质量等。可采用的主要措施有：

#### ① 提高管坯冶炼质量

压力加工中，工件原有的缺陷是工件在加工过程中发生破坏的断裂源。生产实践表明，管坯化学成分偏析、非金属夹杂、缩孔或疏松等缺陷都是促进斜轧穿孔时预先形成孔隙的重要因素。 $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组几种典型与管坯冶炼质量有关的外表（近表面）裂纹、发纹如下：

#### I 鱼鳞外折

鱼鳞外折是指钢管表面上类似鱼鳞状的折叠形裂纹，有的呈随机性分布，有的比较有规律性：分布比较均匀，间距与铸坯的拉程和钢管的延伸系数等因素有关，分布方向大致与钢管的扭转变形方向一致。典型鱼鳞外折扫描电镜照片见图10。

可以看出，缺陷处有一些白色或灰色颗粒状夹杂物（6~10点，少量的为簇状），70%的颗粒大小为100~200 $\mu\text{m}$ 左右，属于大型夹杂物。能谱仪显示这些大型夹杂物的主要成分为Si、Al、Ca、O或Ti、O等元素。

鱼鳞外折缺陷处夹杂物主要成分为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 等。根据其组成，夹杂物主要有两类：一类为铝硅酸盐夹杂，占70%左右；第二类为氧化铝、氧化钛、铝酸钙夹杂等。由于缺陷处夹杂物数量较多、尺寸较大，且缺陷的表面和内部均存在一定数量夹杂物，可以推断，这些夹杂物是形成鱼鳞外折缺陷的主要原因。

这几类夹杂物在钢管轧制过程中当所受轧制力较大时，夹杂物破碎，沿钢管的轧制方向呈链状或颗粒状分布，或部分夹杂物脱落，造成基体不连续，产生缺陷。另外，由钢管的显微夹杂的扫描照片可以看出，这些夹杂物呈球形颗粒状，与钢基体粘连性较差，存在较大的缝隙，因而在钢中形成球形包裹物。在钢管的轧制过程中，夹杂物破碎、脱落，形成一定大小的球形坑洞，这些球形坑洞同时转变成折叠状缺陷。



图10 鱼鳞外折缺陷扫描照片(注:试样已进行打磨处理)

## II 夹渣性大外折

夹渣性大外折是指伴随着大量夹渣的大型折叠性裂纹，肉眼可在缺陷处观察到白色或褐色的夹杂物。该种缺陷长度一般在20mm以上，在钢管表面上随机分布，具有一定的连续性。典型夹渣性大外折扫描电镜照片见图11。由图可见，缺陷处主要为白色大型夹杂物，也有一些夹杂物与基体颜色一致，呈褐色。夹杂物的主要成分为Al、Si、Ca、Mg、Mn、O等元素。

夹渣性大外折处夹杂物主要为含 $Al_2O_3$ 、CaO、 $SiO_2$ 、MgO及MnO的复合夹杂物，部分缺陷中 $Al_2O_3$ 含量较高。该类夹杂物呈块状或条状，为500 $\mu m$ 以上的特大型夹杂物。由于夹杂物尺寸大、数量多，且比较集中，可以推断，这些夹杂物是产生夹渣性大外折的主要原因。其产生机理是钢管在轧制过程中，由于这类大型夹杂物易破碎及部分夹杂物脱落，留下较大的坑洞被延展变形，从而产生这种大外折缺陷。

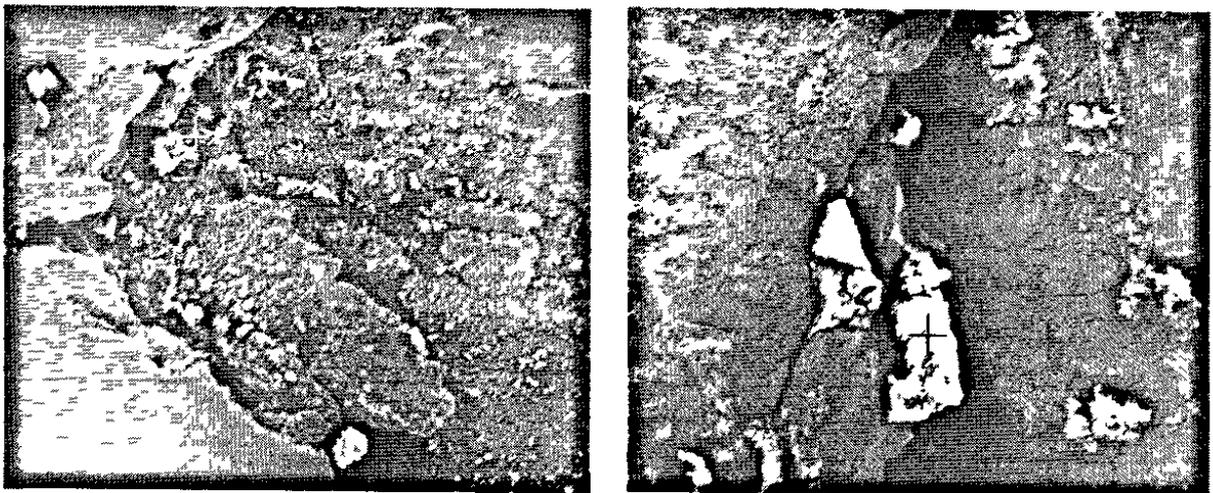


图11 夹渣性大外折扫描照片(注:右边试样已进行打磨处理)

## III 横裂

横裂是指存在于钢管表面的横向裂纹，几乎与钢管纵向方向垂直，一般在钢管表面上呈螺旋型分布。见图12，缺陷处存在较多的夹杂物，主要成分为Al、Si、Ca、Mg、O等元素。夹杂物一般呈块状或颗粒状，块状夹杂物为500 $\mu m$ 以上的特大型夹杂物，颗粒状夹杂物大小为100 $\mu m$ 左右。

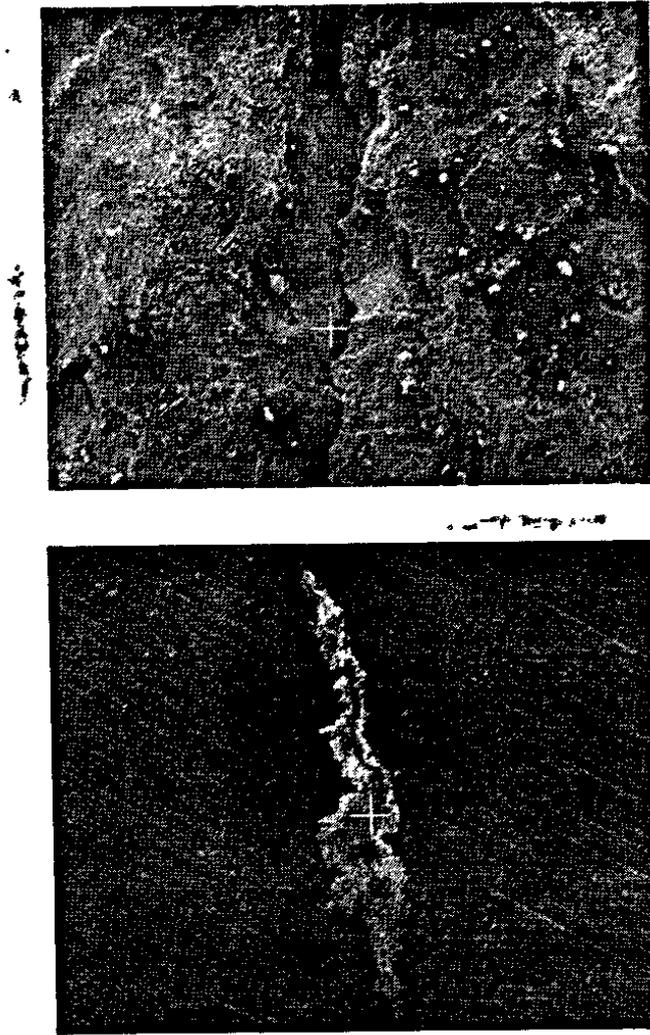


图12 横裂缺陷扫描照片(注:上边试样已进行打磨处理)

夹杂物主要有两类:一类为含 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 的复合夹杂,且部分试样中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量偏高;另一类为单个 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂。根据扫描电镜分析结果,结合夹杂物的形状和特征,可以判定各类夹杂物是产生横裂缺陷的主要原因。形成机理是尺寸中等的大型夹杂物在钢管的轧制过程中因受 $\phi 108$ 三辊轧管机组钢管纵向变形不大、横向变形相对较大的特点影响,夹杂物被横向辗轧,从而形成近似线状的横向裂纹缺陷,横向裂纹的宽度 $0.1\sim 1.0\text{mm}$ 不等,深度 $0.3\sim 2.5\text{mm}$ 不等,长度与横向变形大小有关。

#### IV 隐形(近表面)裂纹

隐形(近表面)裂纹指存在于钢管表皮下的裂纹,该缺陷有时在钢管表面可肉眼观察到,有时需要通过探伤才能发现其位置。较典型的隐形裂纹长度约 $10\sim 50\text{mm}$ ,深度约 $1\sim 2\text{mm}$ 。通过修磨后,这类缺陷明显地暴露出来。图13为隐形裂纹缺陷扫描电镜照片。通过扫描照片可观察到部分试样缺陷处存在较多、

较大的夹杂物，而有些试样缺陷处夹杂物不明显，且夹杂物粒度较小。部分试样缺陷处大型夹杂物的主要成分为Si、Ca、O等元素或Fe、S元素。

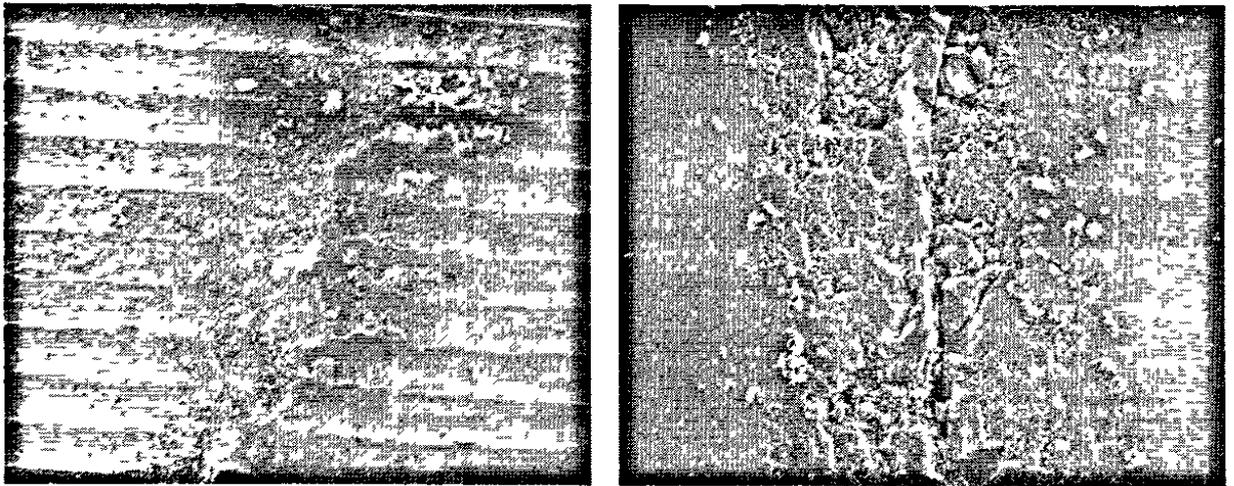


图13 隐形(近表面)裂纹缺陷扫描照片(注:试样已进行打磨处理)

根据能谱仪分析结果，部分试样夹杂物主要有两类：一类为FeS，另一类为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO等。另外，部分隐形裂纹缺陷很少存在有夹杂物。隐形裂纹缺陷的产生原因主要有2种：一种是硫化物或硅酸盐类夹杂物在钢管轧制过程中，随钢管塑性变形被纵向拉伸，从而形成直线形的裂纹；另一种是钢坯各种内部裂纹在钢管轧制过程中被纵向拉伸，也对应地形成裂纹。

### ② 采用大送进角

采用大的送进角可显著提高临界压下率并提高实际穿孔速度。根据试验和从金属疲劳强度分析，大送进角可使临界压下率提高的原因主要在于：减轻变形的不均匀性，这一点在送进角大于12°时才有明显作用；减少轧件在穿孔准备区受反复应力的循环次数，使之在减少因不均匀变形引起的附加拉应力的同时，金属还保持有较高的抗拉强度。

### ③ 采用小的椭圆度

采用小的孔型椭圆度可以减小工件的横向变形和因此在管坯中心产生的横向拉应力，从而可以提高临界压下率。

### ④ 采用合适的穿孔温度

一般来说，各种钢的塑性最好的温度，也是它的临界压下率最高的温度。通常，在过热温度以下的温度区间，钢的塑性是随着温度升高而提高的。因此，各种钢都有其塑性最好、临界压下率最高的温度区间。在此温度区间进行穿孔，有利于防止预先形成孔隙。

### ⑤ 采用锥形穿孔

锥形穿孔机是带辗轧角的、轧辊双支撑的斜轧穿孔机。由于有辗轧角，使辊径沿轴向逐渐加大，从而有利于变形区中轧辊与轧件间的速度（轴向速度与旋转速度）的相互匹配，减少了变形区中的金属堆积，减少了轧件在变形区各截面的角度差，减轻了横向剪切变形和扭转变形，孔腔形成的倾向得以抑制。

### 3) 斜轧穿孔时的金属变形

斜轧穿孔时存在两种变形：基本变形和附加变形。

#### (1) 基本变形

基本变形是人们期望的变形。对斜轧穿孔来说，基本变形是指实心坯穿轧成毛管时的几何形状和尺寸的变化。基本变形的大小与变形区的几何形状（工具形状尺寸和轧机调整参数）有关，而与轧件材质无关。

#### (2) 附加变形

附加变形是由于变形不均而在金属内部产生的变形，是有害的变形。它既增加能耗，又会引起附加拉应力而使毛管产生表面缺陷和内部缺陷。

斜轧穿孔发生的附加变形有：表面变形、扭转变形、横向剪切变形、纵向剪切变形和管壁反复塑性弯曲变形等。

##### ① 表面变形

在穿孔准备区，塑性变形主要发生在表层。由于表面变形的结果，使管坯心部金属受轴向附加拉应力和横向附加拉应力的作用，引起管坯心部金属疏松。如果这种附加拉应力的过分积累，将导致预先形成孔腔。在有顶头轧制的区域，塑性变形也是逐步深透的。开始是靠近辊面和顶头工作表面的表层金属先发生塑性变形，而后逐步渗透至整个管壁厚度。但是，内表层的横向和径向变形大于外表层。

##### ② 扭转变形

扭转变形是指在变形区中，管坯—毛管各截面产生相对角位移。扭转变形的大小与变形量（延伸系数）和横变形（扩径）的大小等因素有关。延伸系数大或横变形大，则扭转变形也大。由于轧辊给轧件的速度是靠摩擦传给轧件的，轧件本身有一定的刚性，延伸系数越小，管壁越厚，刚性越大，扭转变形越小。

##### ③ 纵向剪切变形

纵向剪切变形是指内外层金属沿纵向产生附加的相互剪切。它是由于顶头的轴向阻力造成的。穿孔时，轧辊带动轧件的外层金属轴向流动，而顶头阻止内层金属沿纵向流动，结果各向的纵向流动产生差异，而管体金属是一个整体，各层间必然产生相互的附加剪切起加速旋转作用；反之，在顶头直径较大的区域中顶头起阻碍毛管旋转的作用。结果，自由旋转的顶头使变形区中部和出口附近毛管截面的转速加大，促进扭转变形。而扭转变形除增加能耗外，还会引

起毛管外表面因受拉应力而产生缺陷。

#### ④ 横向剪切变形

横向剪切变形是指穿孔时毛管内外层金属沿横向产生附加的相互剪切变形。在穿孔准备区，实心坯由于表面变形的结果，外层金属沿横向流动的角速度大于内层，使金属纤维歪曲。在带顶头轧制的区间，毛管的外表层和内表层有较大的变形，故切向流动的角速度大于过渡层，使全层纤维弯曲成C型。减壁量越大，则纤维的弯曲程度越大。这种金属切向流动角速度的不一致，引起各层金属间相互的附加横向剪切变形。而横向剪切变形是造成毛管纵裂、折叠和分层缺陷的原因之一。显然，A. 送进角越大，横向剪切变形和横向剪切应力越小；B. 在同等送进角条件下，辗轧角越大，则横向剪切变形越小；C. 同时采用大辗轧角和大送进角，有可能实现无横向剪切变形的穿孔过程。

#### (3) 管壁反复塑性弯曲

由于穿孔过程中孔型和毛管均有椭圆度，因此毛管在变形区中每转一周将产生  $2n$  次 ( $n$  为轧辊数目) 塑性弯曲。这种反复塑性弯曲，对毛管表面质量也有影响，尤其是对厚壁部分影响更大。管壁越厚，弯曲阻力越大，管壁内外表面将产生很大的弯曲拉应力 (主要是横向)，使钢管内外表面出现裂纹和折叠等缺陷。采用较小的孔型椭圆度，或加大送进角使反复弯曲的次数减少，都可以减轻管壁反复塑性弯曲带来的有害影响。

### 3.3.1.2 二辊锥形穿孔工模具设计

#### 1) 轧辊

我们在辊型设计时采用了入口锥长小于出口锥长，入口锥角小于出口锥角的锥型辊型<sup>[11]</sup>。由于出口锥长度较大，而轧辊的辊长与辊径之比较大，进而促使毛管在较长的出口锥变形区内得到充分辗轧，达到改善毛管质量的目的。

轧辊尺寸由以下经验公式确定：

$$\text{轧辊高点直径 } D_0: \quad D_0 = (5 \sim 6) D_{R\max}$$

$$\text{轧辊总长 } L: \quad L = (0.7 \sim 1) \cdot D_0$$

$$\text{入口锥长度 } L_1: \quad L_1 = (0.4 \sim 0.5) \cdot L$$

$$\text{出口锥长度 } L_2: \quad L_2 = (0.5 \sim 0.6) \cdot L$$

$$\text{最小轧辊直径 } D_{\min}: \quad D_{\min} = D_0 - 2 \cdot L_1 \cdot \operatorname{tga} \cdot \frac{D_B - E}{\operatorname{COS} a}$$

$$\text{最大轧辊直径 } D_{\max}: \quad D_{\max} = D_0 + 2 \cdot L_1 \cdot \operatorname{tga} - \frac{D_B - E}{\operatorname{COS} a}$$

式中： $a$ 、 $E$ 、 $D_R$ 、 $D_B$  分别为辗轧角、轧辊间距、毛管直径、管坯直径。

Φ108 分厂锥形穿孔机轧辊形状及部分尺寸见图 6。

#### 2) 顶头

在二辊穿孔时，顶头前管坯中心部分承受着不利的拉、压应力的反复作用及剪切应力的共同作用，当这些应力超过金属的强度极限时，管坯中心就会被撕裂形成孔腔。 $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组产品主要为中厚壁钢管，其中合金钢及低变形性能材料所占比例较大，为了解决穿孔毛管的内表质量问题，我们采用了较大的送进角和辗轧角的方法来抑制轧件在二次咬入前的孔腔现象<sup>[12]</sup>。由于锥形穿孔时，送进角及辗轧角越大，切向剪切力越小，当送进角与辗轧角选择合适后，切向剪切可以完全避免<sup>[13]</sup>。但是，当送进角或辗轧角分别增加时，顶头所受阻力增加，顶头磨损加剧。这正是顶头形状与尺寸设计时应当考虑的<sup>[14]</sup>。

顶头由半径为  $R_0$  的圆弧段，圆锥段（辗轧段）和反锥段组成（图 14），顶

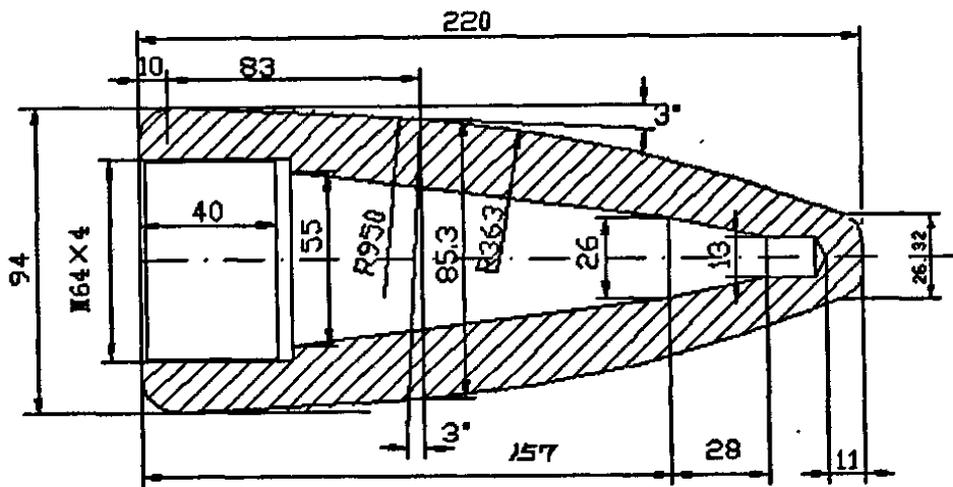


图 14 二辊锥形穿孔用顶头设计图

头前端采用平头设计，顶头圆弧长度较大，可使穿孔减壁的过程缓和。减小变形过程的顶头阻力，达到降低顶头磨损的目的。顶头辗轧锥长度设计为大于一个管坯螺距（约 80mm），毛管任一截面都在变形区顶头辗轧段轧制两次，保证了毛管的均壁和平整，辗轧段锥角较轧辊出口锥角稍大，这主要考虑由于送进角影响使轧辊实际工作锥角增大，辗轧段实际上只分配很小的减壁值。

反锥段长度根据经验值进行选取，并考虑到与顶杆的装配方式，一般取值在 30mm 以下。

$\Phi 108$  分厂二辊锥形穿孔机  $\Phi 94\text{mm}$  顶头形状及部分尺寸见图 14。

### 3) 导板

导板与轧辊及穿孔顶头一起形成封闭的轧制孔型。它不仅对轧件的入口、出口进行导向，还直接参与变形。所以，它的外表形状要与变形匹配，适应金属的流动。导板的过渡带位于轧辊孔喉位置，与机器中心线重合，导板工作面

长度约为变形区实际长度，而且，导板工作面入口段及出口段的长度分别与变形区入口段及出口段长度大致相等。同时，导板尺寸的设计要确保轧辊和导板边缘间隙尽量小，达到封闭孔型的目的。如果间隙过大或导板边缘缺损，穿孔时就会出链带。

Φ108 分厂二辊锥形穿孔机穿 Φ120mm 坯用导板形状及部分尺寸见图 15。

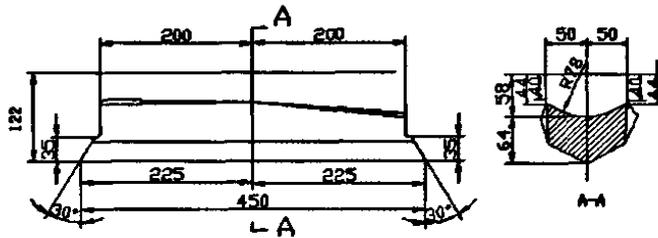


图 15 二辊锥形穿孔用导板设计图

### 3.3.1.3 穿孔轧辊滚花

轧辊入口锥部分采用滚花处理，以增大轧辊和轧件之间的磨擦，有利于管坯咬入，由于 Φ108 分厂产品为中厚壁钢管，延伸系数小，滚花的形状、深度、长度、角度布置对穿孔生产、质量影响很大。滚花深度不够，轧件磨擦力不够，易前卡；

滚花过深，影响钢管表面质量，尤其对高压锅炉管的压扁性能影响极大；滚花区长度过短，易后卡；过长，则影响钢管的表面质量。此外，滚花的设置与送进角、辗轧角有密切关系。

生产实践证明，Φ108 分厂二辊锥形穿孔机在送进角 15°，辗轧角 15° 时，穿孔滚花深度  $H_{min} \leq 0.2\text{mm}$  时，出现前卡；而滚花深度  $H_{max} \geq 1.0\text{mm}$  时，穿孔毛管表面微裂。此外，滚花的影响与辊距等调整参数有关。

Φ108 分厂穿孔滚花间距 2.5mm，其方向由上到下与辊轴成 30°，前段部分滚花深度为 0.6mm，后段部分深度为 0.4mm，滚花部位控制在轧辊前端到高点前 80mm（图 6）。

### 3.3.2 三辊轧管工艺优化

三辊轧管机由三个主动轧辊和一根芯棒组成环形封闭孔型。三个轧辊绕中心线呈 120° 布置，与轧件中心线距离相等，各轧辊间距相等。在轧制过程中，旋转的轧辊带动轧件螺旋前进，使金属产生塑性变形，轧辊辊面速度直接影响钢管表面质量。轧件从咬入到抛离轧辊表面，轧件不仅要发生形状的变化，同时发生多余的附加变形。而这种与变形无关的附加变形主要来源于轧辊表面速度场的状况。轧辊表面上各点的速度变化依赖于轧辊的形状、轧辊各段的具体尺寸及调整参数的变化。

三辊轧管机的轧辊辊型主要分为四个部分：

### (1) 进口锥

其作用是将轧件咬入，使其旋转并前进，同时使轧件减径。在有送进角的情况下，轧辊与轧件接触所产生的摩擦力的轴向分力使毛管咬入。进口锥越长，对校正壁厚越有利。

### (2) 台肩

即轧辊的工作台肩，这是实现轧管变形的主要区域。其作用是使毛管与芯棒进一步接触，以便顺利减径减壁。台肩的高度大体等于减壁量。

由于钢管的减壁是靠台肩来完成，因此，台肩的设计要充分考虑钢管减壁量的需要。一般说来，轧辊台肩越高，则三辊轧管机的延伸率就越大。为避免薄壁管在轧制过程中产生严重的外表缺陷，设计轧辊的台肩时应考虑所轧钢管的壁厚。轧制薄壁管不宜采用高的台肩<sup>[15]</sup>，只有生产厚壁管才使用具有较高台肩的轧辊。若轧辊的台肩过低，则容易使荒管产生“喇叭口”而引起轧卡<sup>[16]</sup>。

### (3) 均整锥

在这一区域，轧辊母线平行于轧制中心线，因而在该区域中变形很小，其作用是辗轧管壁和定径。均整锥长度必须保证荒管的任意截面金属均在此区域辗轧两次以上，以确保其壁厚均匀。

### (4) 出口锥

这一区域的主要作用是规圆。

在 3.2.2 节中，从理论上分析并得出如下结论：陡坡型台肩辊型比圆滑形台肩辊型更有利于金属塑性变形流动，更有利于改善钢管表面质量，但是我们在生产实践中发现：陡坡型台肩极易打坏，导致钢管表面出现螺旋形分布的横向细小裂纹。经研究，台肩易打坏的原因在于轧辊硬度偏低，同时，我们在生产实践中也发现，轧辊硬度过高时，台肩处极易龟裂。综合本机组的变形分配及品种规格的需要，我们确定的轧辊形状见附图 8a，本文作者最后将 60CrMnMo 轧辊的硬度从 HB269~303 提高到 HB303~330，解决了台肩易打坏和易龟裂的问题。

在实际生产过程中，我们发现三辊轧管机送进角对钢管表面质量影响很大。这主要有以下两点原因：①随着送进角的增大，轧管变形区缩短，轧辊每转 1/3 转时送进量增加，变形区内各段的扭转变形加剧。②随着送进角的增大，金属将抛出轧辊的开口度增大，钢管内扩径增大，D/S 值增大，横向变形加大，变形区内各段不均匀变形作用对钢管表面的附加应力增大，造成表面裂纹数量增加。此外，随着送进角的增大，D/S 值增大，轧辊孔型封闭性更差，钢管自由度增大，轧制跳动加剧。因此，为了减小钢管表面裂纹、发纹等缺陷的产生，确保钢管表面质量及轧制稳定、顺畅，在实际生产过程中，特别是在生产 D/S

值 $>12$ 的薄壁钢管时,应选择适宜的送进角。本文作者根据现场工作经验,回归以下经验公式:

$$\alpha = 12 - \frac{D_{\text{毛}}}{2S_{\text{毛}}}$$

上式中: $\alpha$ 、 $D_{\text{毛}}$ 、 $S_{\text{毛}}$ 分别为送进角、毛管外径、毛管壁厚。

### 3.3.3 微张力减径工艺优化

衡阳华菱钢管(集团)有限公司 $\Phi 108\text{mm}$ 三辊轧管机组所配置的减径机是从西德曼内斯曼——米尔厂引进的十二架微张力减径机。原工艺设计范围:壁厚系数 $0.055 \leq S/D \leq 0.200$ ,轧制规格 $\Phi 51 \sim \Phi 121 \times 9 \sim 22\text{mm}$ ;由于市场的需要,通过技改,拓展了轧制规格范围:壁厚系数达到 $0.055 \leq S/D \leq 0.353$ ,轧制规格达到 $\Phi 51 \sim \Phi 133 \times 6.45 \sim 28\text{mm}$ 。由于壁厚系数的大幅度提高,减径过程中的内不规圆问题将严重制约了我公司中厚壁钢管的开发和生产,为巩固和开拓中厚壁钢管市场,结合我公司具体的生产工艺条件,对中厚壁钢管微张力减径时内不规圆形成机理进行分析研究,提出预防和改善措施。

#### 3.3.3.1 内不规圆的状态

当壁厚和直径的比值较大时,在减径管上可观察到壁厚不均,这种横向壁厚不均,在管子内表面呈现不规圆现象,简称内不规圆。生产实践表明:壁厚系数 $S/D \geq 0.275$ 时,微张力减径管有可能出现程度不同的内不规圆,共有两种方式:内六方和内三角,见图16所示。根据内六方的形成位置又可分两种类型,见图17所示。

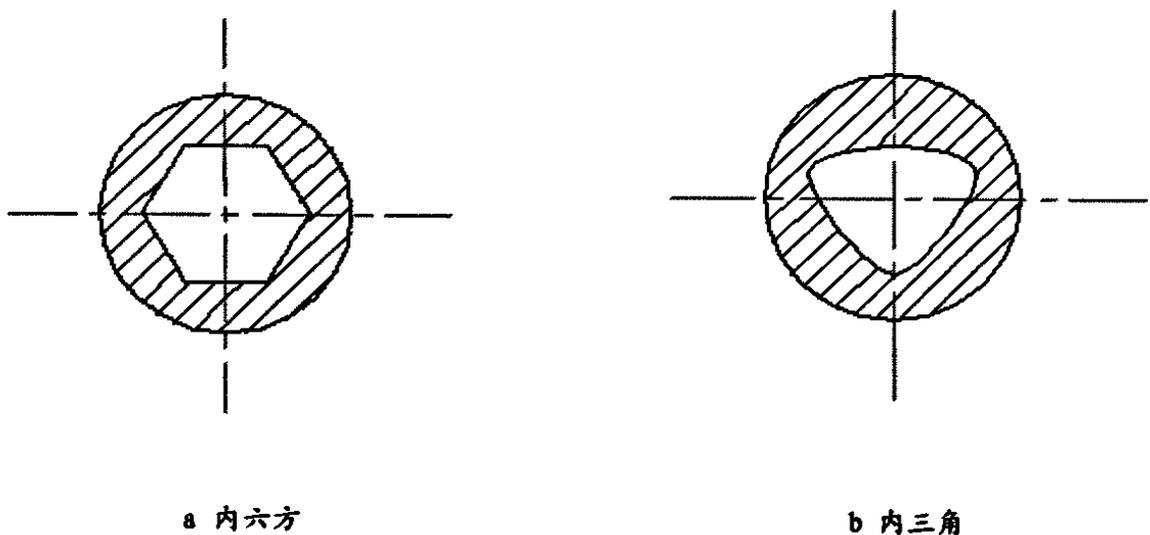


图16 微张力减径内不规圆示意图

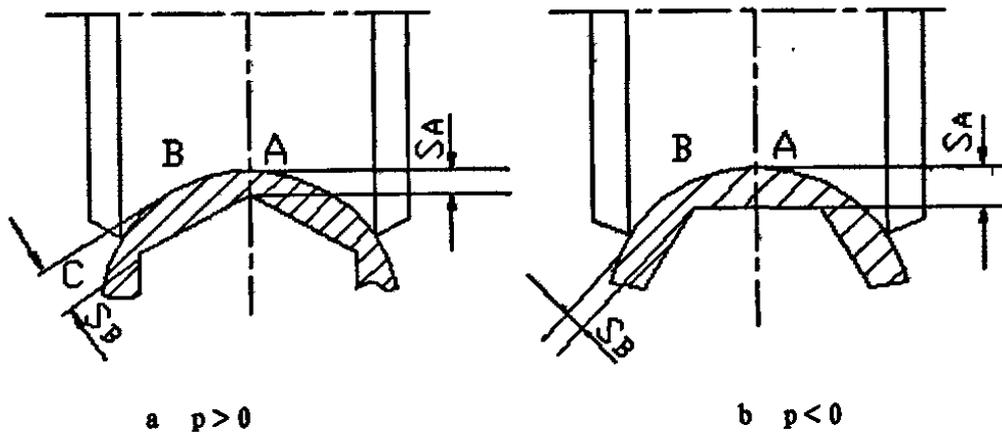


图 17 内六方位位置示意图

### 3.3.3.2 内不规圆的形成机理分析

#### 1) 内六方

##### (1) 纵向张力

张力是通过轧辊与钢管之间的摩擦力及两个机架之间的附加速度差  $\Delta v$  产生的。张力值的大小是以张力系数来表示的。张力系数  $Z$  是纵向应力  $\sigma_L$  和变形抗力  $K_f$  之比, 即  $Z = \sigma_L / K_f$ 。Φ108 三辊轧管机组产品为中厚壁钢管, 采用微张力减径, 通过调整叠加比来控制张力系数  $Z$ , 实际采用的  $Z \leq 0.49$ <sup>[17]</sup>, 实践表明: 当壁厚系数达到一定值时, 每个壁厚系数都对应一个最佳张力系数  $Z$ , 在生产操作时, 偏离了最佳张力系数, 则钢管有可能产生内六方。通常用 Biller 叙述法分析内六方的两种形式。

在两种形式的成品管同一截面分别测取 6 个点值  $S_A$ , 6 个点值  $S_B$ , 则:

$$\bar{S}_{AM} = \frac{\sum S_A}{6} \quad \bar{S}_{BM} = \frac{\sum S_B}{6}$$

$$\text{设 } P = \frac{\bar{S}_{BM} - \bar{S}_{AM}}{\bar{S}_{AM} + \bar{S}_{BM}} \quad (1)$$

$P$  值为内多边形值, 该值不仅可以表明内多边形的程度, 同时也可以确定其位置,  $P$  值为正, 则厚壁部分在 B 处, 即图 17a 示;  $P$  值为负, 则厚壁部分在 A 处, 即图 17b 示;  $P=0$ , 则钢管内表为圆形。本文作者用钢号为 20#, 加热温度 980℃, 在壁厚系数  $S/D$  分别为 0.111、0.153 与 0.185、0.201 条件下,

采用不同张力系数时的内多边形值见图 18 示。

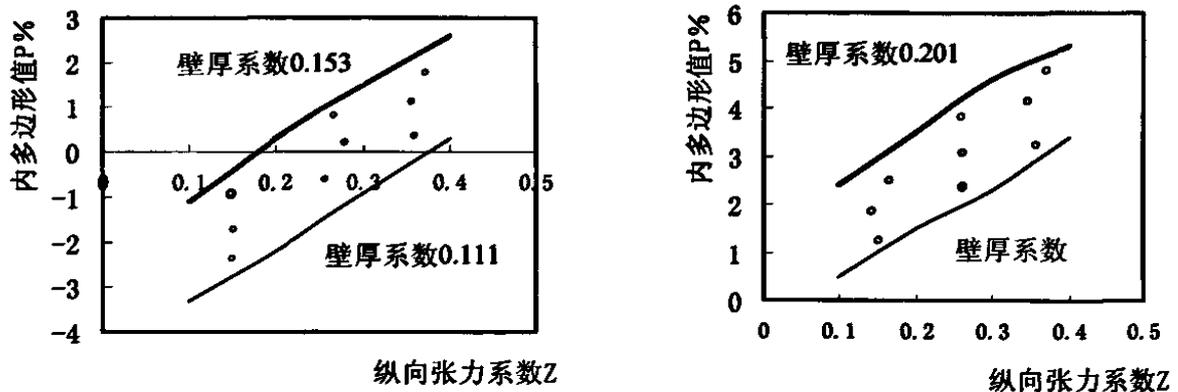


图 18 内多边形值与壁厚系数及纵向张力系数的关系

在生产厚壁钢管时，由于椭圆孔型孔槽顶部 A 处的压下量、单位压力最大，辊缝 C 处最小，中间 B 部分次之，整个横截面存在不均匀变形，在变形体内产生相互平衡的附加应力。A 处的轴向磨擦阻力最大，B 处次之，C 处最小，根据 C·U 古布金的最小阻力定律和自由变形理论<sup>[18]</sup>，如果钢管受到较小的纵向张力作用时，A 处被压缩的金属以展宽（壁厚增厚）为主，B 处被压缩金属纵向流动与展宽（壁厚增厚）并举，C 处由于本身压下量小，单位压力甚至没有，轴向磨擦阻力小，金属变形以纵向流动为主<sup>[19]</sup>，由于相邻机架辊缝互为 180° 布置，经过多机架减径后，便形成了图 17b 示的内六方，即  $P < 0$  时情形。反之，当钢管受到较大纵向张力作用时，在较大张力的作用下，A 处被压缩的金属主要向纵向和切向（横向）流动，B 处被压缩的金属切向（横向）、纵向流动趋势递减，展宽（壁厚增厚）趋势增加，辊缝 C 处金属则以展宽（壁厚增厚）为主，经过多机架减径，便形成了图 17a 示的内六方，即  $P > 0$  时情形。当减径量相同时，壁厚越厚，即壁厚系数  $S/D$  值越大，金属流量越大，内六方更严重。

## (2) 总减径率

生产实践表明，过大的总减径率亦可促成内六方的形成，而且一般是图 17a 示  $p > 0$  的情形。根据文献[17]，张力系数可由下式求得：

$$Z = \frac{\sigma_s}{K_f} = \frac{[\Phi_r(2 - E_m) + (1 - 2E_m) \Phi_l]}{[\Phi_r(1 - E_m) - 2(E_m - 1) \Phi_l]} \quad (2)$$

$$(2) \text{式中: } \Phi_r = \ln \frac{S_n}{S_o}$$

$$\Phi_t = \ln \frac{D_n - S_n}{D_o - S_o}$$

$$E_m = \frac{1}{2} \left( \frac{S_n}{D_n - S_n} + \frac{S_o}{D_o - S_o} \right)$$

$\Phi_r$ 、 $\Phi_t$ 、 $D_o$ 、 $S_o$ 、 $D_n$ 、 $S_n$ 、 $E_m$ 、 $Z$  分别为总壁厚对数变形, 总切向对数变形, 来料毛管的外径、壁厚, 减径管的外径和壁厚, 平均壁厚系数和张应力系数。

由(2)式可知, 减小总减径率, 可以降低张应力系数, 拉金属轴向流动的张应力相对较小了, 从而, 孔型顶部 A 处金属相对较多的展宽 (壁厚增厚), 横向壁厚趋于均匀。P 值也就减小了, 即图 17a 示情形将好转。

### (3) 单机架减径量

实践表明, 单机架减径量的影响机理与总减径率的影响相同, 过大的单机架减径量, P 值较大, 内不规圆恶化, 减小单机架减径量后, 减径管内表面规圆度明显改善。

### (4) 椭圆度

椭圆度很大的孔型, 钢管内表面形状将恶化, 适当的椭圆度, 是良好内表面形状的保证。

本文作者根据多年的孔型设计实践, 利用最小二乘法回归出不同单机架减径率条件下, 椭圆度的函数关系式如下:

$$\text{对 AM 系列 } a = e^{0.608692514q + 0.002027502qd} \quad (3)$$

$$\text{对 BO 系列 } a = e^{0.766605448q + 0.003129955qd} \quad (4)$$

$$\text{对 CM 系列 } a = e^{0.630915683q + 0.001753451qd} \quad (5)$$

式中: q、a、d 分别为机架减径率、椭圆度及理论孔槽直径。

用(3)(4)(5)式设计出来的孔型系列, 在其它条件正常情况下, 可保证  $S/D \leq 0.353$  的钢管内孔较圆。

### (5) 摩擦系数

生产质量统计数字表明: 摩擦系数  $\mu$  对内不规圆有一定的影响, 高压水除鳞机压力调低, 钢管表面残留的氧化铁皮使摩擦系数增加, P 值就会降低, 钢管内表面规圆度得到改善, 但是, 钢管表面残留的氧化铁皮使钢管表面质量受到影响。

### (6) 轧制温度的影响

轧制温度主要通过摩擦系数来影响 P 值的, 按 Ekelund 先生的观点, 当轧制温度为 T 时, 轧辊的摩擦系数  $\mu = 1.05 - 0.0005T$ , 故随着轧制温度的下降, 摩擦系数便会提高。由此可知, 轧制温度降低, 内六方的 P 值也会降低。

#### (7) 轧制速度的影响

由于摩擦系数  $\mu$  随轧制速度的提高而下降。故可得如下结论: 入口速度增大, 则 P 值也增大。

综上所述, 当壁厚系数恒定时, 微张力减径管的内六方与纵向张力、总减径率(量)、椭圆度、摩擦系数、轧制温度、轧制速度有关, 可能是由其中一个、几个或多个因素作用的结果<sup>[20]</sup>。

#### 2) 内三角

根据多起微张力减径管“内三角”质量事故记录的分析, “内三角”主要是由成品机架、或半成品机架的单机架减径量过大, 或纵向张力较小而个别单机架减径量过大引起的。

由于半成品、成品机架纵向张力的减小, 或由于中后部基本机架给定的纵向张力较小, 而单机架减径量过大, 被压缩的金属大部分向孔型顶部 A 及侧部 B 流动, 减径后, 形成了钢管的内三角(图 19)。

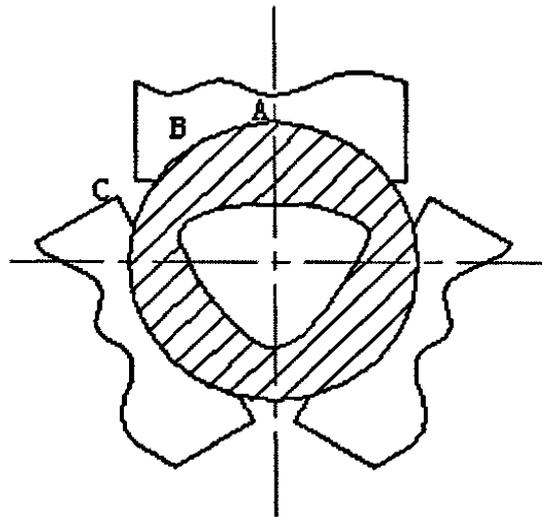


图 19 内三角位置示意

### 3.3.3.3 消除内不规圆的措施

#### 3) 内六方的消除

当微张力减径管产生内六方时,见图 20 示,通过取样,测量、计算内六方程度  $P$  值,并判断其位置。

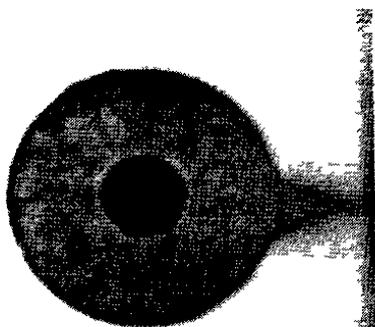


图 20 内六方

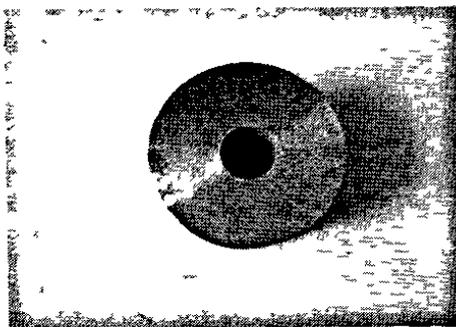


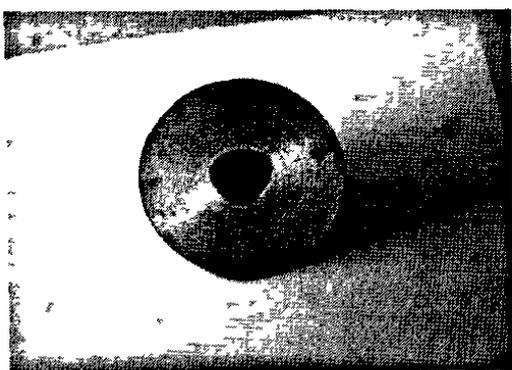
图 21 内表面合格管

对  $P > 0$  即图 17a 示情形,可降低微张力减径机的叠加比以降低纵向张力,降低轧制速度,降低轧制温度,降低高压水除磷机水压。

对  $P < 0$  即图 17b 示情形,可提高微张力减径机的叠加比以提高纵向张力,提高轧制速度,提高轧制温度,提高高压水除磷机水压。

对  $P > 0$ 、 $P < 0$  两种情形均可结合更换磨损较大的旧机架,采用小芯棒并调小轧管孔型(即降低单机架减径量和总减径率),采用孔型椭圆度适当的机架,达到消除内六方的目的。

## 2) 内三角的消除



当微张力减径管出现内三角时,见图 22 示.查清具体原因,一般情况下,更换磨损较大的成品、半成品或某个中后部基本机架,调整叠加比,修正张力系数,减少过大的单机架减径量。

## 3.4 三辊轧管机组轧制表编制

$\Phi 108$  mm 三辊轧管机组主要用于生产中厚壁钢管,其产品几何尺寸精度

高,机械性能稳定,轧机调整方便,生产组织灵活,能满足多品种、多规格生产需要。因此,三辊轧管机组轧制表的编制在保证产品质量的前提下具有多重性和灵活性,现场轧制表的编制更大程度上受制于坯料规格、工模具情况及各机组的生产能力。

### 3.4.1 生产工艺流程

管坯酸洗、修磨→管坯复检→下料→环形炉加热→二辊锥形穿孔→三辊轧管→步进炉再加热→高压水除鳞→微张力减径→冷却→矫直→切头尾→人工检验→无损探伤→包装→入库

### 3.4.2 编制原则

编制轧制表的总原则是优质、高产、低耗。

#### 3.4.2.1 穿孔机

为了避免二辊锥形穿孔机轧辊滚花对钢管表面质量的影响,尤其对高压锅炉管的压扁性能的影响,轧制薄壁管时应采用扩径穿孔。生产其它规格时也尽量避免采用等径穿孔和减径穿孔。

#### 3.4.2.2 轧管机

减径量控制在 12~24mm 为宜。

减壁量控制在 3~6mm 为宜(特厚壁管除外)。

#### 3.4.2.3 微张力减径机

总减径率控制在 10%~25%为宜,壁厚变化一般采用等壁减径或壁厚微增减径。

### 3.4.3 编制方法

#### 3.4.3.1 逆轧制次序

以冷状态成品的尺寸为计算的主要原始数据,逆轧制顺序依次计算微张力减径机、三辊轧管机、二辊锥形穿孔机的轧制参数及管坯的尺寸。

#### 3.4.3.2 顺轧制次序

从原始管坯开始顺轧制次序依次计算二辊穿轧,三辊轧管,微张力减径的产品尺寸及相应的轧制参数。

#### 3.4.3.3 现场实际法

在现有坯料资源紧张,产品规格繁多及工模具尺寸局限条件下,上述两种方法,很难单独顺利实施。而更实用的是利用现有条件,综合上述两方法,适

当调整的现场实际法。

### 3.4.4 用现场实际法计算轧制表

工艺设计师在为生产计划部门提供原材料采购依据时,往往采用逆轧制次序计算轧制表,而顺轧制次序在计算几何尺寸有特殊要求的钢管时又很麻烦,现场工程技术人员和广大一线工人更多的采用现场实际法计算轧制表。

#### 3.4.4.1 坯料选择

通常情况下,在制定生产计划时,根据不同的规格系列和不同的D/S值,按表7选取坯料规格。

表7 不同的规格系列和不同的D/S值时的坯料直径 单位: mm

| 坯径<br>D/S | 外径 | φ51~ | φ60~ | φ68~ | φ76~ | φ83~ | φ95~ | φ114~ | φ127~ |
|-----------|----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|           |    | φ60  | φ68  | φ76  | φ83  | φ95  | φ114 | φ127  | φ133  |
| <5        |    | φ100 | φ110 | φ120 | φ130 | φ130 | φ140 | φ150  | φ150  |
| 5~8       |    |      | φ100 | φ110 | φ120 | φ130 | φ130 | φ140  | φ150  |
| >8        |    |      |      | φ100 | φ110 | φ120 | φ120 | φ130  | φ140  |

#### 3.4.4.2 总延伸系数

已知管坯和成品尺寸,则总延伸系数为:

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\eta \times D_{\text{坯}}^2}{4(D_{\text{成}} - S_{\text{成}}) \times S_{\text{成}}} \quad (6)$$

式中  $\eta$  为烧损系数,取连铸铸坯  $\eta_{\text{连}}=0.97$ ,轧制坯  $\eta_{\text{轧}}=0.98$ 。

#### 3.4.4.3 管坯下料长度

$$L_{\text{坯}} = \frac{L_{\text{成}} + L_{\text{头尾}}}{\mu_{\Sigma}} \quad (7)$$

式中:  $L_{\text{成}}$  为成品钢管交货长度

$L_{\text{头尾}}$  为钢管切头尾总量,一般为400~700mm,视壁厚厚薄而定。

Φ108 mm 三辊轧管机允许下料长度1.2~3.2m。

#### 3.4.4.4 各机组延伸系数分配

$$\mu_{\Sigma} = \mu_{\text{穿}} \cdot \mu_{\text{轧}} \cdot \mu_{\text{减}} \quad (8)$$

一般情况下,对碳素管取  $\mu_{\text{穿}}: \mu_{\text{轧}}: \mu_{\text{减}} = 5: 3: 2$

对合金管取  $\mu_{\text{穿}}: \mu_{\text{轧}}: \mu_{\text{减}} = 4: 3: 2$

#### 3.4.4.5 轧后毛管尺寸确定

根据微张减总减率 $\geq 10\%$ 及等壁或壁厚微增减径两个原则,利用微张减延伸系数,计算轧后毛管尺寸。

$$\mu_{\text{减}} = \frac{(D_{\text{毛}} - S_{\text{毛}}) \times S_{\text{毛}}}{(D_{\text{成}} - S_{\text{成}}) \times S_{\text{成}}} \quad (9)$$

一般情况下按表 8 选取  $S_{\text{成}} - S_{\text{毛}}$

表 8 不同成品外径范围的  $S_{\text{成}} - S_{\text{毛}}$  值 单位: mm

| 成品外径范围                        | $\phi 51 \sim 68$ | $\phi 70 \sim 94$ | $\phi 95 \sim 133$ |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| $S_{\text{成}} - S_{\text{毛}}$ | 0.7~0.3           | 0.5~0.1           | 0                  |

根据式(9)和表 8 可确定毛管尺寸外径  $D_{\text{毛}}$  和壁厚  $S_{\text{毛}}$ , 进而可计算毛管内径  $d_{\text{毛}}$ 。

芯棒直径可由下式确定。

$$d_{\text{棒}} = d_{\text{毛}} - \Delta d_2 \quad (10)$$

式中  $\Delta d_2$  为毛管内扩径量, 通常取 1~10mm。

轧管机孔喉直径

$$\Delta_2 = d_{\text{棒}} + 2S_{\text{毛}} - \Delta h_2 \quad (11)$$

(11) 式中  $\Delta h_2$  为轧管机辊子弹跳值, 通常取 0~0.5 mm。

#### 3.4.4.6 穿后荒管及工模具尺寸确定

顶杆直径由下式确定

$$D_{\text{顶杆}} = D_{\text{棒}} + (3 \sim 8 \text{mm}) \quad (12)$$

顶头直径由下式确定

$$D_{\text{顶头}} = D_{\text{顶杆}} + (2 \sim 8 \text{mm}) \quad (13)$$

根据轧管机通常减壁量为 3~6mm 及毛管壁厚  $S_{\text{毛}}$  确定荒管壁厚  $S_{\text{荒}}$ , 则

$$D_{\text{荒}} = D_{\text{顶头}} + 2S_{\text{荒}} + \Delta d_1 \quad (14)$$

(14) 式中  $\Delta d_1$  为荒管内扩径量, 通常取 8~15mm。

辊距的确定

辊距  $E$  由管坯直径总区下率  $\epsilon_{\text{Hp}}$  所决定的。

$$E = D_{\text{B}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{Hp}})$$

上式中  $D_{\text{B}}$  为管坯直径。针对同一规格顶头, 根据荒管壁厚由小到大,  $\epsilon_{\text{Hp}}$  取值由大到小。相应发, 所确定的辊距  $E$  由小到大,  $\epsilon_{\text{Hp}}$  的实际取值在 10~13% 之间, 主要考虑钢种的变化,  $\epsilon_{\text{Hp}}$  的最大值不宜过大。

例如, 顶头直径  $D_{\text{顶头}} = 98 \text{mm}$  时, 所轧最薄荒管  $S_{\text{荒}} = 11.5 \text{mm}$ , 此时  $\epsilon_{\text{Hp}} = 12.3 \%$ ,

$D_B=120\text{mm}$

$$E = D_B (1 - \varepsilon H_p) = 120 \times (1 - 12.3\%) = 105.2\text{mm}$$

顶头前伸量的确定

顶头前伸量  $b=c-a$

$c$ —顶头工作段长度

$a$ — 轧辊高点的顶头工作段长度，由下式确定：

$$a = \frac{(D_{\text{顶头}} + 2 \cdot S_{\text{顶}}) - E}{2 \cdot \lg \alpha A'} \quad (15)$$

$\alpha A'$ ——变形区实际出口工作锥角

导板距的确定  $A$

$$A = \alpha \cdot E$$

椭圆度系数  $\alpha$  变化的范围在 1.10~1.14 之间。

### 3.4.5 轧制表实例

根据生产规格的不同， $\Phi 108$  mm 三辊轧管机组轧制表的编制共分两大类。

#### 3.4.5.1 薄、中厚壁管

此类型指符合壁厚  $6.45 \leq S \leq 21\text{mm}$  的钢管。例如用  $\Phi 120$  坯生产  $\Phi 89 \times 10\text{mm}$  钢管，其轧制表见表 9。

表 9 轧制表实例

单位：mm

| 生产规格 |       | $\Phi 89 \times 10$ | $\Phi 105 \times 25$ |
|------|-------|---------------------|----------------------|
| 穿    | 使用坯径  | $\Phi 120$          | $\Phi 140$           |
|      | 顶杆    | $\Phi 76$           | $\Phi 83$            |
|      | 顶头    | $\Phi 78$           | $\Phi 90$            |
|      | 顶头前伸量 | 96                  | 73                   |
| 孔    | 导板距   | 116                 | 140                  |
|      | 荒管直径  | 123                 | 150                  |
| 机    | 荒管壁厚  | 14                  | 22                   |
|      | 芯棒    | $\Phi 76$           | 空轧                   |
| 管    | 孔喉    | 95.8                | 125                  |
|      | 毛管直径  | 99                  | 125                  |
|      | 毛管壁厚  | 9.9                 | 25                   |
| 减径机  | 减后直径  | 89                  | 105                  |
|      | 减后壁厚  | 10                  | 25                   |

### 3.4.5.2 特厚壁管

对壁厚管  $S \geq 21\text{mm}$  的特厚壁管,  $\Phi 108\text{ mm}$  三辊轧管机采用特殊的生产工艺——空轧法生产。即通常在二辊锥形穿孔机上穿出壁厚均匀、内表面质量良好的荒管, 然后将荒管在三辊轧管机上进行空心斜轧减径, (注: 实际采用的小芯棒只起导向作用而不参与变形), 使之有较大的增壁和均壁, 然后毛管经微张力减径而获得最终的产品, 空心斜轧减径增壁量由下式确定:

$$\Delta S = S_{\text{荒}} \times (0.0099 + 0.88 \frac{\Delta D}{D_{\text{荒}}}) \quad (16)$$

⑬式中  $D_{\text{荒}}$ 、 $S_{\text{荒}}$  分别为荒管外径、壁厚。

例如用  $\Phi 140\text{mm}$  坯生产  $\Phi 105 \times 25$ , 其轧制表见表 9。

## 第四章 技术改造及经济技术指标分析

### 4.1 引言

技改从2002年12月10日开始,2003年2月10日结束,试生产当月恢复了大部分品种规格,第3个月即2003年4月份产量达到8000多吨,创造历史最高纪录。在随后1年多,轧钢工程技术人员充分利用技改后工艺、设备优势,开发了大量的品种、规格,尤其是高效品种(如S135钻杆、ASME材料高压锅炉管等)、特大管(如 $\Phi 133\text{mm}$ 规格系列)、特薄管(如 $\Phi 88.9 \times 6.45$ 油管)、特厚管(如 $S_{\max}$ 由25mm增厚到28mm)的开发取得巨大成功<sup>[21]</sup>,机组生存空间得到空前拓展,市场竞争力明显增强,提质降耗的效果非常明显。

### 4.2 技术改造前后质量状况对比分析

技改前后质量状况对比分析见下表10。

表10 技改前后质量状况

| 项    | 目         | 2002年(技改前) | 2003年(技改后) |
|------|-----------|------------|------------|
|      | 产品规格      | 76×10      | 76×10      |
|      | 壁厚精度      | ±10%       | ±8%        |
|      | 外径精度      | ±1.0%      | ±0.8%      |
| 尺寸精度 | 长度精度 mm   | 0 ~ +10    | 0 ~ +8     |
|      | 壁厚不均 mm   | ≤1.6       | ≤1.0       |
|      | 弯曲度 mm/m  | ≤1.5       | ≤1.0       |
| 表面质量 | 表面一次送检合格率 | ≤75%       | ≥90%       |

由表10可见,用同一种规格钢坯生产同一规格钢管时,技改后的几何尺寸精度及表面质量一次送检合格率均大幅度提高。

### 4.3 技术改造后产品的开发情况

#### 4.3.1 品种开发情况

由于技改后钢管外表面质量的大幅度改善,  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组陆续开发生产了一些对表面质量要求较高的高效品种, 如 S135 钻杆管, 用于东方锅炉厂、哈尔滨锅炉厂等单位的 60 万千瓦超临界发电机组、100 万千瓦超超临界发电机组的 ASME 材料高压锅炉管等。实现了由以机加工用管为主的单一品种向机加工用管、高压锅炉管、接箍料管等并重的多元化品种结构发展。

#### 4.3.2 产品规格的开发情况

##### (1) 向大的方向扩展

技改前,  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的产品组距为  $\Phi 51\sim\Phi 127\text{mm}$ 。技改后, 充分利用锥形穿孔的工艺优势, 产品组距扩大到  $\Phi 133\text{mm}$ 。

##### (2) 向薄的方向扩展

由于轧管机用陡坡型台肩辊型取代了圆滑形台肩辊型, 而且轧管机采用当代国际上先进的轧辊快开式三辊轧管机, 促使壁厚向更薄的方向迈了一大步。现已成功开发出  $\Phi 88.9\times 6.45\text{mm}$  油管。

##### (3) 向厚的方向扩展

通过利用二辊锥形穿孔适应扩径穿孔的特点, 三辊轧管机减径量的增大, 使三辊轧管时空轧增厚的空间增大。最大壁厚由技改前的  $S_{\text{max}}=25\text{mm}$  扩展到  $S_{\text{max}}=28\text{mm}$ 。

### 4.4 技改前后产量、金属消耗、油耗、电耗四大指标对比分析

图 23 示出了技改前  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的主要技术经济指标, 从图 23 可看出:

(1) 技改后机组生产能力大幅度提高, 既便是在试生产的当年, 产量达到 72733.314 吨, 比上年的 65877.679 吨增长 10.4%, 生产工艺成熟后的 2004 年产量达到 88899.591 吨, 比 2002 年增长 34.9%。

(2) 金属消耗及油耗显著降低。由于技改后产品表面质量的大幅度改善及几何尺寸精度的提高和稳定, 2004 年金属消耗由技改前的 1.145 下降到 1.123, 每吨节约金属料 22kg; 2004 年油耗由技改前的每吨 105kg 下降到每吨 91kg。

(3) 吨管电耗略有增加, 因技改后由于机组总装机容量增加 2000kw, 但是, 2004 年吨管电耗仅增 1kwh。

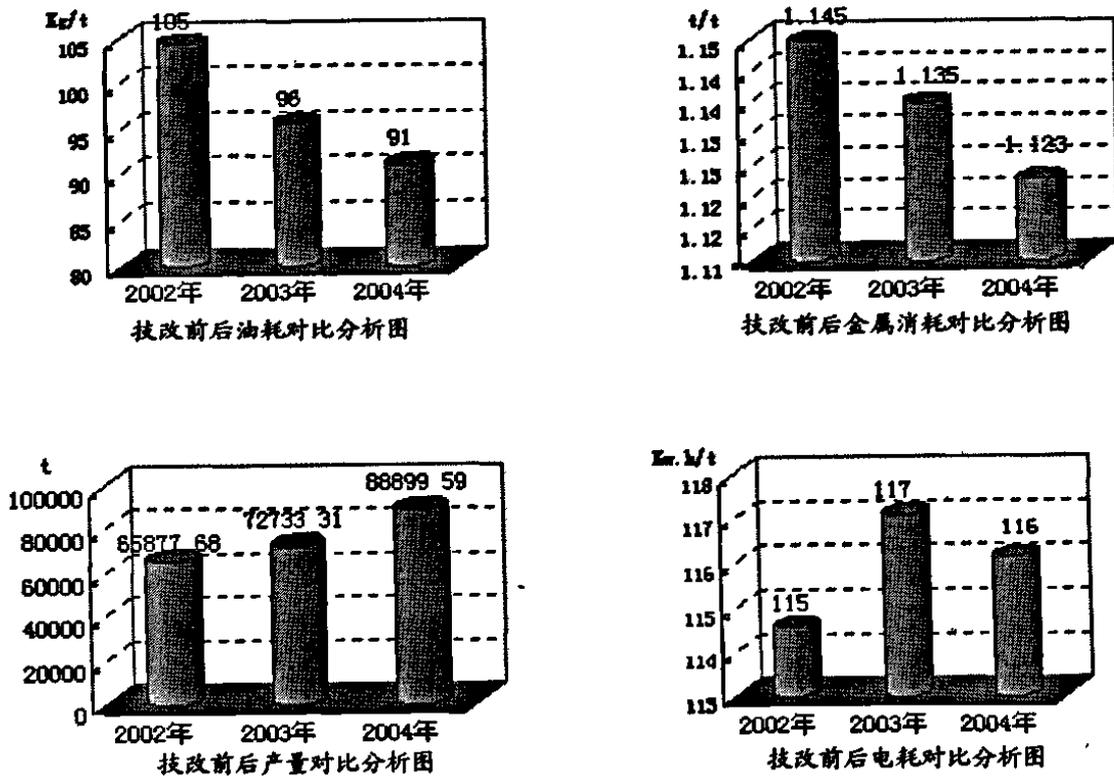


图 23 技改前后指标对比分析

## 第五章 续研究的内容

### 5.1 引言

锥形穿孔技术复杂，工艺要求高，根据  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组技术改造的情况，总结出以下在今后的生产和技改中应予以重视的问题。

### 5.2 生产中应注意的问题。

#### 5.2.1 穿孔工艺的选择

尽管二辊锥形穿孔可实行减径穿孔，且减径率已超过 5%，但减径穿孔时，由于受变形特点的影响，顶头、导板等工模具消耗高，生产实践表明：二辊锥形穿孔更适宜扩径穿孔。因此，在工艺设计及生产组织时应尽量避免采用等径穿孔和减径穿孔。

#### 5.2.2 穿孔机轧辊滚花的设计及生产组织

由于  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的产品主要是中厚壁钢管，压缩比小，有利于穿孔咬入的锥形穿孔机辊子滚花对高压锅炉管等产品的压扁性能影响较大。滚花过长、过深导致压扁性能不合格；滚花过短、过浅，穿孔时坯料无法咬入。目前， $\Phi 108$  分厂采用的滚花方案，其轧辊需经生产 1000 吨左右普通结构管的自然磨损后，方可能生产有压扁性能要求的高压锅炉管等品种。

### 5.3 需要解决的工艺技术问题

#### 5.3.1 管坯下料应改用管坯锯

从生产实践中发现管坯下料端面的切斜度对钢管头部壁厚不均影响较大。切斜度越大，头部壁厚不均愈严重，金属切损越大。而目前  $\Phi 108$  分厂采用的下料方式为人工火焰切割，很难保证坯料的平直度。此外，由于技改后产量规模的提高，人工下料量大幅度增加，工人劳动强度亦增加不少。因此，下次技改时，应考虑用管坯锯替代人工火焰切割。

### 5.3.2 芯棒循环系统的配套改造

随着象  $\Phi 133*10$  这样的大口径、薄壁管的开发,  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组最大芯棒由原来的  $\Phi 95\text{mm}$  增大到目前的  $\Phi 108\text{mm}$ , 芯棒在循环过程中, 输送辊道、拨料气缸动作缓慢、吃力。就目前机组能力而言, 大口径管还可进一步轧薄。但在此之前, 芯棒循环系统必须改造, 使大芯棒运行方便、畅通。

### 5.3.3 轧管脱棒后小冷床应加宽, 便于在线常化

随着技改后一些高效品种的开发, 在线常化技术已广泛应用到如 37Mn5 接箍料管、210C 高压锅炉管等品种的生产过程中, 但  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组现有的轧管脱棒后小冷床过窄, 影响空冷效果和轧制节奏的加快。

## 第六章 结 论

本文以提高  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组产品表面质量为中心, 在实验的基础上, 对钢管外表面(近表面)裂纹、发纹的产生原因进行了分析研究, 又通过实验, 寻找解决问题的方法, 摸索最佳的生产工艺路线, 确定最有效的工艺与技术, 并结合  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的品种结构, 着重工模具的设计与生产工艺的优化, 在理论结合实践方面进行了重点研究。通过研究得出如下主要结论:

(1) 技术改造后, 钢管表面裂纹、发纹明显减少, 几何尺寸精度显著提高, 产品质量大幅度改善, 金属消耗、油耗明显下降, 并且开发了大量的品种规格。

(2) 采用“三辊斜轧穿孔+三辊斜轧轧管+三辊微张力减径”的组合工艺已不适应中厚壁钢管用户的机械加工需要。

(3) 三辊轧管变形方式容易产生钢管外表面(近表面)裂纹、发纹。合理分配穿孔与轧管两大工序的塑性变形, 有利于防止钢管外表面(近表面)裂纹、发纹的产生。

(4) 试验与生产实践表明: 二辊锥形穿孔优于三辊穿孔, 钢管外表面(近表面)裂纹、发纹率明显大幅度减少。

(5) 重新确定了  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组最佳的工艺路线为: “二辊锥形穿孔+三辊斜轧轧管+三辊微张力减径”。

(6) 提出了二辊锥形穿孔的工模具设计模型; 优化了三辊轧管机辊型及轧辊硬度等工艺参数; 建立了符合现场实际操作的送进角经验公式。

(7) 针对厚壁钢管的内孔不规圆突出现象。本文优化了微张力减径工艺, 并提出了中厚壁钢管微张力减径的椭圆度方程。利用此方程设计开发出的孔型, 在其他条件正常的情况下, 可保证  $S/D \leq 0.353$  的钢管内孔较圆。

## 参考文献

- [1] 兰兴昌, 刘卫平. 无缝钢管生产技术的新进展. 钢管, 2003, NO.5:1~6
- [2] T.Leisten. The cross-roll pierler as a key component in modern seamless tube production. Tube & Pipe Technology, May/June 2001, 14(3):91~95
- [3] 彭的新. 浅谈三辊轧管机的发展 ( I ) . 钢管, 1933, NO.3:5~10
- [4] S.Hamauzu. The new compact Mandrel Seamless Mill. Tube & Pipe Technology, 1994, 7(2):83~85
- [5] 丁大字. 钢管张力减径工艺的切头控制 . 钢管, 1994, NO.4:23~26
- [6] 太原重型机器厂等.  $\Phi 108$  三辊穿孔机、三辊轧管机中间试验研究报告. 1979(内部资料), 57~114
- [7] 张才安. 无缝钢管生产技术. 重庆:重庆大学出版社, 1996, 12:149~157
- [8] 李连诗. 钢管塑性变形原理 (上册). 北京:冶金工业出版社, 1985, 138~139
- [9] 李阳华. 三辊轧管轧制的钢管表面裂纹缺陷分析. 轧钢, 2002, NO.2:28~30
- [10] 王廷溥. 轧钢工艺学. 北京:冶金工业出版社, 1981, 402~406
- [11] 姜长华. 穿孔机锥型辊改造概述. 鞍钢技术, 2003, NO.6:46~50
- [12] 侯风桐. 日本住友金属公司新开发的菌式穿孔机. 钢管, 1985, NO.2:57~66
- [13] 田党等. 关于锥形辊穿孔机的穿孔原理及应用问题的讨论. 钢管, 2003, NO.6:1~4
- [14] 卢于速等. 二辊斜轧中心金属断裂机理和穿孔变形工艺实质. 钢铁, 1980, NO.6:7~15
- [15] 杨志强. 三辊轧管辊型设计探讨. 钢管, 1995, NO.4:30~33
- [16] 王海文, 李绍山. 三辊轧管机的发展及轧辊辊型设计. 钢管, 1992, NO.2:13~16
- [17] 王丽君, 钟锡汉. 微张力定径机的工艺计算方法. 钢管, 1994, NO.6:26~29
- [18] C.U.古布金. 金属压力加工原理. 梁炳文译, 北京:高等教育出版社,

1957

- [19] 王占学. 塑性加工金属学. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989
- [20] 李赤波. 微张力减径机增壁规律研究:[硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2002
- [21] 金如崧. 无缝钢管生产工艺的过去现在与将来. 宝钢技术, 1995, NO.6:9~15

# 附录

《轧钢》编辑部工作单 (1)

## 《轧钢》录用通知单

李超毅 同志:

您好! 惠寄 "《轧钢》108mm 上辊轧管机组的技术改造

\_\_\_\_\_" 稿 (554号) 经审阅, 决定刊用, 并将在 2005 年第 6 期发表。如有修改处, 请速告知编辑部。请勿一稿两投。联系地址等如有变动, 请及时与本编辑部联系。稿件如属国家、省、部级基金资助项目, 或省、部级以上科技获奖项目等, 请注明并提供相关证件复印件。

此致

敬礼!



地址: 北京学院南路76号 邮编: 100081 电话: (010)62182474, 62182887 E-mail: sr@263.net.cn

## 致 谢

本文所述的是华菱衡钢集团  $\Phi 108$  分厂的技术改造项目。由于本人在该分厂一直主管工艺技术和产品质量,本文论述的情况是我亲身经历的研究、设计、实践的过程和思考的结果。本文的完成,得到了导师中南大学材料学院张新明教授的精心指导和不倦的教诲。导师严谨的治学态度、渊博的科学知识使作者受益非浅。在此,作者向恩师表示最衷心的感谢。

论文最后由王孟君老师、王德志老师、邓运来老师进行评审,感谢三位老师的指导和帮助。

同时,感谢工厂导师华菱衡钢集团左少怀高级工程师多年来对作者的关心和帮助。

在本文的实验阶段和技改实施过程中,得到了集团公司胡衡华总经理、胡克勤副总经理、副总经理陶芳国总工、赵建辉副总经理、肖松良副总工程师、 $\Phi 108$  分厂程思祥硕士、黄定华工程师、胡福新工程师、曹志阳工程师、唐玄孟工程师、张国胜工程师、徐俊辉高级技师等的大力支持;在论文撰写期间,得到了华菱衡钢集团技术中心教授级高工李阳华主任的支持和帮助。在此表示感谢。

最后,谨以此文献给所有关心、支持我的亲人和朋友。

作者 李超颖

二〇〇五年三月十八日

## 攻读学位期间主要的研究成果和参加的项目

### 一、学习期间所完成的主要科研工作

(1) 作为  $\Phi 108$  分厂工艺技术负责人, 参与策划了 2002 年年底  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的技术改造。并独立设计了技改后  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的所有工模具。编制了技改后试生产方案。

(2) 主持开发了 S135 钻杆管、100 万千瓦超超临界发电机组用 ASME 材料高压锅炉管及  $\Phi 130\text{mm}$ 、 $\Phi 133\text{mm}$  等产品系列。

### 二、学习期间所获的奖励

(1) 作为  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组子课题负责人, 参与的衡钢集团公司重点技术创新项目“提高高压锅炉管压扁合格率”于 2003 年 3 月通过鉴定, 并获集团公司重点科技攻关项目奖。

(2) 作为第二负责人参与的衡钢集团公司重点技术创新项目“ $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组表面裂纹的攻关”于 2003 年 3 月通过鉴定, 并获集团公司重点科技攻关项目奖。

### 三、学习期间发表的论文

(1) 李超额, 张新明。中厚壁钢管微张力减径时内不规圆的研究。钢管, 2004, 33(5): 25~27。

(2) 李超额, 张新明。锥形穿孔技术在中厚壁钢管生产中的应用。轧钢, 2005, 22(5): 54~56。

(3) 李超额, 张新明。衡钢  $\Phi 108\text{mm}$  三辊轧管机组的技术改造。轧钢, 2005, 6。(已录用, 待发表, 见附录)。