

## 摘 要

无缝钢管在国民经济建设中具有重要作用，被广泛使用于石油开采、钻探、航天等领域中。该产品质量与生产它的关键设备—轧管机密切相关，轧管机性能直接影响着无缝钢管的产品质量和品种规格。由于轧管机的构造复杂，导致工作状态、受力情况的分析也很复杂，目前国内外对斜轧轧管机轧制力的特性研究很不充分，普遍应用材料力学方法研究轧管机主机座的受力。而材料力学只适合部分截面的应力、应变分析，不能对总体的应力、应变综合分析。鉴于此，论文研究工作在以下几个方面进行：

本文以二辊斜轧管机为例，着重分析了轧管过程中轧管机主要工作部件的受力情况，得出了影响轧管机工作和轧制优良性能钢管的关键因素是轧管时的轧制力和轧制力矩。轧管机主机座最终承受各部件传来的轧制力、轧制力矩并传递给基础。因此对轧管机机座的应力、应变研究很重要。

本文对  $\phi 140$  轧管机主机座进行了受力分析，采用有限单元法计算分析了它的强度和刚度，由理论证明了轧管机主机座的设计是符合强度和刚度要求的。通过对主机座的应力分析选择合适位置进行分体铸造，再用电渣焊焊接的方法来解决主机座体积庞大致使一般厂家不能整体铸造的问题。通过实际测试主机座的应力和应变信息，证明有限元计算和分析的方法是否正确。

**关键词：** 无缝钢管 ， 斜轧轧管机 ， 主机座 ， 有限元分析 ， 分体铸造 ， 电渣焊

## Abstract

Seamless steel tube has the important action in the country economy construction .It has been used in many fields such as oil exploitation ,drilling and spaceflight .The product quality is nearly correlative with the key facility - rolling pipe mill .The rolling pipe mill performance straightly impacts on the seamless steel tube quality and specs .Because of the pipe mill conformation is complex ,then leading to working state and the analysis of suffering force are complex, at present the research of milling force character is not sufficient at home and abroad. Widespread application material mechanics method study pipe mill housing suffer force .But the material mechanics suit only stress and strain for part section, not to adapt to analyze the whole stress and strain. Considering those, this thesis research works will below a few aspects proceeding:

This paper uses two rollers inclined rolling pipe mill as the example, to research the pipe mill configuration character and working process. It is very important for rolling press and rolling moment to affect on the rolling pipe mill working state and product quality. The rolling pipe mill main housing bears rolling press and moment from the each part, spread and transfer it to groundwork at last. Therefore it is very important to research stress and strain of mill's main housing.

This paper have proceed to suffer force analysis for main housing of  $\phi 140$  pipe mill, adopt calculation of finite element method analyze its stress and strain ,and prove that design of main housing accords with demand on intension and rigidness from theories. By stress analysis to main housing,

we will choice appropriate position to proceed with divided foundry, and then adopt the electric sediment weld way to resolve that main housing volume too big to foundry the whole housing for mostly general factory. By actual testing main housing stress and strain message, it prove viable for the method of the finite element compute and analysis is right or not.

**Key phrase:** the seamless steel tube, inclined rolling pipe mill, main housing, finite element method analysis, divided foundry, electric sediment weld

# 第一章 综 述

## 1.1 引言

钢管是经济建设中重要的原材料之一，世界各国都十分重视钢管生产的发展。钢管工业的发展开始于自行车制造业的兴起。二战后火电锅炉的制造，化学工业的发展以及石油、天然气的钻采和输送等，都有力的推动着钢管业在品种、质量和产量上的发展，钢管比其它轧制钢材与人类生活关系更密切，从自行车、日用家具、供水供电设备，到石油化工，地下资源的开发，国防和航天技术所用导弹、火箭等等，都离不开钢管。钢管作为输送管广泛用于输送油、气、水等各种液体，化工部门一般用管道化方式生产与运输化工产品。钢管还可作为结构钢管大量用于机械制造业和建筑业以及作为中空的零件毛坯用于制造滚动轴承、液压支柱、空心轴等。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。随着航空、航天、原子能与宇宙空间技术等高技术的发展，精密、薄壁、高强度等钢管的需求量正迅速增长。正因为如此，世界各国都十分重视钢管生产技术的发展，钢管生产的增长速度往往超过粗钢生产的增长速度。从1974年世界钢管总产量达到6060万吨之后的20年间，世界钢管总产量一直保持在6000~7000万吨。随着钢管生产技术的不断发展，其品种规格在不断增加，消耗不断降低，质量也不断提高。不同的国家中钢管占钢板生产总量的比例也有所不同，据1996年的统计数字，我国钢管产量约占全国钢材产量的9%，其中无缝钢管产量约占我国钢管产量的4%。工业发达国家的钢管产量占钢材总产量的10%以上，其中原联邦德国、意大利、原苏联等国达到14~16%，且其无缝钢管约占钢管总产量的50%。近几年，大多数世界发达国家的钢管产量占钢材产量的9%~12.8%，而我国钢管产量约占钢材产量的8.5%，钢管消耗量占钢材消耗量的9%~10%。与国外先进国家相比，我国在不锈钢、无缝不锈钢管生产方面也存在较大差距。随着我国电力、化学等工业的发展，对无缝不锈钢管的需求量交越来越大，而目前所需的无缝不锈钢管绝大部分还依靠进口。近年来，我国平均每年进口无缝钢管100多万吨（多数是石油用管、高压锅炉用管，化工用管等），

有时进口量超过国内的生产量。因此，我国应该大力发展无缝钢管产业，特别是加大力度对钢管生产设备的研究和改造，以适应国民经济发展对钢管的大量需求。<sup>[1] [2] [3] [4] [5]</sup>

## 1.2 斜轧轧管机国内外研究现状分析

自 1886 年曼内斯曼兄弟发明斜轧穿孔工艺以来的百年间，从某种意义上，钢管技术的发展主要是轧管机技术的发展。19 世纪 80 年代至 20 世纪 30 年代近半个世纪先后出现了周期轧管机(1892 年)、顶管机(1899 年)、连续轧管机(1901 年)、自动轧管机(1903 年)、狄塞尔轧管机((1932 年)、三辊轧管机(1937 年)和挤压机等 7 种钢管生产设备。当时得到广泛应用的是自动轧管机和周期轧管机。20 世纪 40~80 年代，由于控制技术的突破，连续轧管机得到空前发展，成为轧管技术发展的主流。由于连轧工艺生产效率高、产品质量好，在国内外钢管业内似乎形成共识:连轧工艺是当时(乃至今后)各种制管工艺中最具有竞争力的钢管生产工艺。虽然连轧管机产量高，但一次投资巨大，回收期长，产品缺乏灵活性，这对众多的中小企业而言，只能是望而却步。因此，大家期望有一种投资较少，生产流程短，质量好，规格品种生产灵活的轧管机，用于新建或替代传统老式轧管机。对当时中国大部分拥有自动轧管机的中小企业来说更是如此。为适应这种需求，在 20 世纪 80 年代初，传统斜轧技术在国外开始受到重视。<sup>[6] [7]</sup>

### 1.2.1 狄塞尔轧管机技术的发展

1918 年狄塞尔发明了用两个桶形轧辊带两个大导盘，采用长芯棒轧制的狄塞尔轧管机。第一台狄塞尔轧管机于 1932 年建在美国巴布科克—威尔科克斯公司的比弗福尔斯工厂。狄塞尔轧管机是带有 1 对导盘、芯棒全浮动的二辊斜轧的轧管机，该轧管机设备紧凑，投资少，所轧管壁厚均匀，内外表面质量好。狄塞尔轧管机的主要特点是：用主动旋转导盘来代替导板；用长芯棒代替短顶头；芯棒运动方式为全浮式；控制外径和壁厚的适应性较强；通过调整导盘，可使钢管外径尺寸控制在允许范围内；具有较高的偏心校正功能，可生产壁厚均匀的钢管。由于芯棒全浮动，与钢管内壁不滑动接触，因此钢管内表面不会擦伤，并且高速旋转的导盘对钢管外表面有一定抛光作用，因而狄塞尔轧管机实质上代替了自动轧管机组中的

轧管机和均整机。20 世纪 70-80 年代, 我国的鞍钢无缝钢管厂和英国的英吉利无缝钢管公司都建设了中小型狄塞尔轧管机。这些轧管机均采用桶形辊、全浮动芯棒工艺, 由于生产能力不如自动轧管机, 生产规格范围不宽, 钢管长度受限, 所以没有得到广泛应用。<sup>[6] [7]</sup>

德国 Kummerling 博士在一篇论文中。对狄塞尔轧管工艺的变形特征作了如下阐述:

1. 在狄塞尔轧管机的轧制过程中, 当管壁减薄时, 轧辊促使圆周方向的金属流动, 而不是促使纵向的金属流动, 因此不可避免地产生金属的交变弯曲, 当轧制 D/S 值较大的管子时则产生内表面缺陷;

2. 狄塞尔轧管工艺中大部分变形是由芯棒产生的, 而芯棒对减壁的作用不大, 因此这种工艺变形能力较差, 延伸系数较小;

3. 由于以上两点原因, 所以生产管径范围较窄;

4. 在狄塞尔轧管机中的均整段起始处的钢管横断面, 很明显地出现多角形效应, 由于空心坯频繁地逆向弯曲和管壁在芯棒上的快速减薄, 金属遭受严重损坏从而导致内裂纹的产生。<sup>[8]</sup>

### 1.2.2 Accu Roll 轧管机技术的产生和发展

Accu Roll 轧管机也叫限动芯棒狄塞尔轧管机。狄塞尔轧管机轧制的钢管同心度好, 表面质量高, 变换壁厚也比较方便, 但生产能力低, 所轧钢管外径小, 长度短, 因而自 1935 年投产以来没有得到广泛应用。芯棒限动技术在连轧管机上取得成功后, 美国艾特纳公司, 西德科克斯公司和曼内斯曼公司等都对芯棒限动技术在狄塞尔轧管机上使用进行了研究, 科克斯公司取得了较大进展, 先后制造了三套限动芯棒狄塞尔轧管机。第一套轧管机安装在英吉利钢管公司伯明翰厂, 荒管直径 55~150mm, 年产量 1 万吨, 1978 年投产。西德科克斯公司发展了狄塞尔轧管技术, 在美国普利茅斯钢管公司和意大利法尔科公司的新建狄塞尔轧管机上采用了限动芯棒技术, 从而使钢管长度和直径都大为增加。但由于桶形辊等缘故, 该工艺技术仍存在以下不足:

1. 桶形辊的圆周速度由小变大, 经过辗轧带后又由大变小, 在这个过程中钢管产生二次扭转变形, 由此使其内部产生纵向和周向剪切应力, 这对轧制合金钢管不利, 尤其对轧制薄壁管更为有害。

2. 不能实现减径轧制, 延伸系数较小。

3. 桶形辊辗轧段很短, 重轧系数较小, 壁厚精度较差。

科克斯公司在英吉利公司的新建狄塞尔轧管机上经过充分研究和试验, 为美国印第安那州普利茅斯钢管公司设计了一台新型限动芯棒轧管机, 即 Accu Roll 轧管机, 1988 年投产, 年生产能力为 5 万吨, 意大利法尔科公司用 Accu Roll 轧管机代替了原有的三辊轧管机, 通过一台张力减径机生产  $\text{O}48\sim 203\text{mm}$  的钢管, 1988 年投产, 年产量达 18 万吨。

Accu Roll 轧管机吸收了狄塞尔轧管机的大导盘和连轧管机的限动芯棒等成功技术, 创造性地采用了锥形辊带辗轧角和电子、液压适时控制等先进技术。改进后的狄塞尔轧管机即 Accu Roll 轧管机具有产品尺寸精度高、设备制造费用低和占地面积少的优点, 最适用中等规模的生产厂。

我国从 60 年代鞍钢自行设计制造的  $\text{O}100\text{mm}$  狄塞尔轧管机投产开始, 便一直在探讨改进和提高这种轧管机的技术。

太原重型机器厂于 1988 年研制出 1 台  $\text{O}50\text{mm}$  改进型狄塞尔轧管机, 安装在衡阳钢管厂。西安重型机械研究所于 1989 年研制出 1 台  $\text{O}50\text{mm}$  改进型狄塞尔轧管机, 安装在河南省新乡线材厂。该轧机一次可完成穿孔和轧管两道工序。这两台改进型狄塞尔轧管机均属试验性轧机, 其运行情况为设计制造  $\text{O}100\text{mm}$  以上改进型狄塞尔轧管机创造了条件。

自 1990 年山东烟台钢管总厂西分厂(现为鲁宝钢管有限责任公司)从美国 Aetna-Standard 公司(简称 AS 公司)引进的世界第一台 Accu Roll(简称 AR)轧管机投入生产以来, 国内至今共有 4 台 AR 轧管机组建成并投入使用。如果将轧辊布置带有辗轧角(锥形辊)、采用限动芯棒作为 AR 轧管机的基本特征以区别传统狄塞尔轧管机的话, 那么国内至今共有 8 台 AR 轧管机投入使用(其中 4 台为鞍钢技术, 简称 AG 轧管机)。在 10 年左右的时间里一下子冒出了 8 台 AR (AG)轧管机, 在中国可谓是一枝独秀。因此了解 AR 轧管机产生的背景, 分析目前的使用状况, 探讨今后的发展前景是一件非常有意义的事情。

Accu Roll 轧管机即高精度轧制的意思, 但就本质而言, 工艺上与传统狄塞尔轧管机并未有大的区别, 只是对传统狄塞尔轧管机存在的问题进行了一些改进并融合了一些三辊轧管机技术和现代电控技术而已。工艺上的改进主要有:

1. 由原来采用浮动芯棒改成了限动芯棒(此技术在连轧和三辊轧管机上已成熟应用);
2. 为解决轧制效率低的问题, 一是加大辊径; 二是加入了辗轧角(桶形

辊变成锥形辊), 以提高轴向出管速度;

3. 为减小导盘的磨损和变形孔型的支撑, 加大了导盘直径;
4. 采用芯棒夹持器, 使芯棒在轧制过程中工况稳定。

表 1-1 国内 AR(AG)轧管机组基本情况。

Tab. 1-1 Basic circumstance of domestic rolling pipe mills

厂名	机组型号	生产规格(mm)	设计年产量(万吨)	投产日期	说明
原烟台钢管总厂西分厂	114AR	Ö 6-114(219)	7.1	1990-01	AS 技术
原成都无缝钢管厂	117AR	Ö08-219(273)	20.0	1992-04	AS 技术
上海钢管厂	114AR	Ö 76-108	6.5	1995-12	AS 技术
北满特殊钢公司	114AR	Ö 30-159	9.0	1996	AS 技术
鞍钢无缝钢管厂	117AG	Ö57-133 (159)	8.0	1989-07	AG 技术
青州无缝钢管厂	114AG	Ö 76-133	5.0	1998	AG 技术
磐石无缝钢管厂	114AG	Ö 76-133	5.0	2001-10	AG 技术
合肥无缝钢管厂	90AG	Ö 73-108	2.0	1992	AG 技术

Accu Roll 轧管机使用两个锥形工作辊, 通过在润滑良好的芯棒上对毛管进行横向辗轧, 实现减壁, 提高了轧辊的使用寿命, 改善了对壁厚的均整效果; 同时用两个配有传动装置的大直径导盘引导毛管, 并且改善咬入条件。两个轧辊可以水平配置也可以垂直配置, 导盘则安装在任意一侧, 两种布置方式生产的产品质量相同。在轧制过程中, 芯棒是在可控的速度下向前缓慢移动, 其速度小于延伸毛管的出口速度。由于芯棒限动, 消除了偏心和壁厚不均。有两个导盘在轧辊之间支撑荒管, D/S 值的范围可以扩大。Accu Roll 轧管机将许多无缝轧管机上实用的成功技术结合在一起, 克服了二辊式和三辊式延伸轧管机的缺点, 同时满足了当前生产厂家和用户对经济合理性和钢管高质量的要求。

Accu Roll 轧管机通过增加轧管变形区的长度及增大金属在变形区中

的重轧系数达到钢管表面好，壁厚公差小的目的。要延长变形区的长度，金属入口段的空间直径就要远大于出口段的空间直径，金属在出口段被挤压，流动受阻而不易通过。为解决这个技术问题，需要将轧制速度随变形区长度增加而逐渐增加，入口直径要小于出口直径，而且带有较大的碾轧角以减少入口毛管和出口毛管的转速差，为此，必须把轧辊做成锥形，使轧辊对金属产生一个逐渐增大的纵向拉力，从而减少了毛管的扭转及同向剪切变形。

Accu Roll 轧管机的轧辊设有入口锥，过渡锥及足够长的均整段，以便充分减少毛管的螺旋道壁厚不均，为使钢管稍有扩径以便于脱棒，在轧辊上有一段小的出口反锥。Accu Roll 轧管机采用大导盘可以精确导向，并且很好地支撑荒管，增加推力，减少阻力，改善金属流向，增加金属稳定性。导盘与轧辊组成一个封闭孔型，使钢管的轧制偏心率减小。由于导盘只起支撑作用，寿命长，可以在更长的时间内保持毛管尺寸，并减少毛管外表面被划伤和压痕的可能性。导盘可以做上下、左右、前后三维调整，上下导盘中心线应不在同一直线上。每种导盘可调整一定范围，这样就可以使一种芯棒轧制多种规格的钢管。美国普利茅斯公司的 Accu Roll 轧管机 (RMD) 轧辊的直径 630mm，导盘直径 1300mm。 [13] [14] [15]

传统的狄塞尔轧管机主要工艺特点是在导盘旋转的时候将穿孔毛坯套在一根自由浮动的芯棒上进行轧制，然而这种工艺中即使采用空心芯棒，芯棒的长度和重量仍要受到一定限制，因此，轧出的成品管直径不大于 168.3mm，长度不超过 12m。为了扬长避短，新型 Accu Roll 轧管机将浮动芯棒改为限动芯棒，使芯棒长度大大缩短，这不仅简化了芯棒的加工制造，而且使狄塞尔轧管机所轧钢管的最大直径及最大长度不再受芯棒重量的限制，从而可生产大直径，大长度的钢管。

限动芯棒操作是在阿塞尔轧管机和连轧管机上使用多年的可靠方法，由于 Accu Roll 轧管机采用这种方法，从而减轻了轧制时的震动现象，能轧出精度较高的钢管，其壁厚公差实际上可控制在  $\pm 5\%$  以上。

Accu Roll 轧管机使用的芯棒工作长度只有 2.5~3m，在轧制过程中，不论出的毛管长度如何，芯棒整个工作部分都在工作，这样芯棒磨损均匀，因而寿命也相对延长了，同时改善了毛管的尺寸精度。Accu Roll 轧管机芯棒上作用的压力较小，因此可以使用较便宜的材质，从而降低投资费用。芯棒限动速度应小于轧制速度。Accu Roll 轧管机有在线和离线装芯棒两种工艺，为尽可能降低 Accu Roll 轧管机的辅助时间，在轧制线外将经过冷

却和润滑的芯棒穿入穿孔坯。采用离线穿芯棒(预穿芯棒)装置缩短生产周期时间,提高生产能力。意大利法尔科公司的 Accu Roll 轧管机装配有预穿芯棒装置。离线穿芯棒可比在线穿芯棒节省时间 6~8 秒/支。<sup>[18]</sup>

### 1.2.3 Accu Roll 斜轧管机现状

原烟台钢管总厂西分厂 AR 轧管机投产以后,原成都无缝钢管厂、上海钢管厂、北满特殊钢公司先后通过华美公司(AS 技术)各新建了 1 套 AR 轧管机组,鞍钢无缝钢管厂则将已有的老狄塞尔轧管机改造成 AG 轧管机,并结合烟台的经验重新设计,分别为合肥、青州和磐石无缝钢管厂提供了 AG 技术。目前国内有 7 台 AR (AG)轧管机在正常运转(北满特殊钢公司由于各种原因试产后停产至今)。

原烟台钢管总厂西分厂第一个“吃螃蟹”,在设备安装完毕后试车阶段出现了问题(一个月未轧出 1 支钢管),主要原因是 AS 公司盲目地将三辊轧管机上的一些技术应用到了 AR 轧管机上(在未经过工业性试验的情况下,将轧管机卖给了原烟台钢管总厂西分厂),而忽视了二者的差别。不久,该厂利用其扩径特点,将生产规格由原设计的  $\text{Ö}76\sim 114\text{mm}$  扩大到  $\text{Ö}159\text{mm}$ ,为适应市场需求,1997 年通过前后配套的局部改造,又将规格扩大到了  $\text{Ö}219\text{mm}$ ,生产能力由原设计的年产 7.1 万吨增至年产近 20 万吨,是目前国内 AR 机组中运转最好的 1 套机组。AS 公司借鉴原烟台钢管总厂西分厂经验,对原成都无缝钢管厂、上海钢管厂、北满特殊钢公司新上的 AR 轧管机进行了改进:

1. 为提高生产效率,解决芯棒冷却和润滑问题,采用了线外穿棒方式,产量提高 30% ;
2. 由于对辗轧角的功能了解不透彻,采用了可变辗轧角的灵活方式;
3. 针对轧制负荷大的问题,减小了轧辊直径;
4. 针对轧后钢管尾部扁壁和内疤问题,在轧管机前台安装了几组芯棒夹持器,以使芯棒在轧制过程中稳定;
5. 对轧辊、导盘的材料进行了改进,以解决咬人和粘钢问题。AS 公司尽管做了不少改进,但设备性能并未在本质上有提高。

鞍钢无缝钢管厂在 20 世纪 70 年代参照有限的国外资料,自行设计了国内第一台狄塞尔轧管机。该机设备较简单,延伸系数只有 1.1~1.2,但是钢管壁厚精度较好。随着“AR”概念的推出,1989 年鞍钢无缝钢管厂改

进设计,新建了1台“AG”并投入生产。新AG轧管机的轧辊带的辗轧角为 $5^{\circ}$ ,但芯棒仍采用浮动芯棒。由于性能未能提高,在原烟台钢管总厂西分厂投产后,又将该轧管机的浮动芯棒改成限动芯棒,成为了标准的AR轧管机。但由于该设备的刚性存在问题(电机功率也不够),所以鞍钢无缝钢管厂虽几经改动,轧管机的性能仍未有明显的提高。

表 1-2 国内 AR(AG)机组主要性能和参数

Tab. 1-2 Basic performance and parameter of domestic rolling pipe mills

	AR(AG)机组所在地							
	成都	烟台	上海	北满	鞍钢	合肥	青州	磐石
机组型号	117AR	114AR	114AR	114AR	114AG	90AG	114AG	114AG
轧辊直径/m	1126	812	710	720	800	580	680	700
辗轧角/ $(^{\circ})$	5-12	5-12	6-10	6-10	8	8	8	8
喂入角/ $(^{\circ})$	10-15	5	4-8	4-8	5	5	5	5
主传动功率/kW	1306*4 (DC)	1500*2 (DC)	1000*2 (DC)	1000*2 (DC)	980*2 (DC)	710*2 (AC)	1120*2 (AC)	800*2 (DC)
导盘直径/mm	2540	1750	1750	1730	1350	未知	1500	1500
穿芯棒方式	线外	在线	线外	线外	在线	在线	在线	在线

鞍钢无缝钢管厂根据自己的轧管机设计技术,结合原烟台钢管总厂西分厂AS技术和生产积累的经验,1998年为青州无缝钢管厂新设计了1台AG轧管机,设备性能基本达到了AR水平。值得一提的是该设备与AS公司的标准AR轧管机相比,简单实用,刚性好,易掌握,而设备重量不到AR设备的1/20。2001年10月又提供给磐石无缝钢管厂1台。这两套轧管机目前运行较为正常。

总之 Accu Roll 轧管机在工艺上具有如下特征:

1. 轧辊圆周速度从入口到出口呈单调增大,其在轧制线上的纵向分速度亦为单调增大,这与轧制中金属纵向变形速度递增是相适应的,它有利

于提高变形速度和加强金属的延伸变形。轧辊沿轧制线切向的分速度同样是单调增大，由此避免了狄塞尔轧管机桶形辊所造成的轧件正、反双向扭转，有利于金属的变形；

2. 辊身采用较长的均整精轧段，重轧系数较大，可以很好地消除轧件在斜轧中产生的螺旋道，极大地改善荒管的壁厚不均，获得较高的壁厚精度，实践证明壁厚偏差可达 $\pm 5.0\%$ ；

3. 由于采用了限动芯棒技术，使产品规格范围扩大和钢管长度增加。另外，限动速度的控制，可使芯棒工作段磨损均匀，寿命提高，并改善钢管的尺寸精度；

4. 导盘可作三向调整。沿轧制线上下调整，可改变导盘喉距和变形区椭圆度；沿轧制线左右调整，可根据轧制规格来控制变形区的封闭性；沿轧制线前后调整，可实现对轧件的最佳支撑和前拽作用。导盘的三向可调性对工艺参数的优化提供了很好的条件；

5. 采用一种直径的芯棒，通过调整辊距、导盘距等工艺参数，可以轧制多种壁厚规格的钢管。由此可减少芯棒的储备量，减少换芯棒时间，提高轧机作业率，便于多规格小批量组织生产；

6. 通过辊型设计和参数调整，可实现减径、等径和扩径轧制；

7. 轧辊、导盘为直流电机传动，转速调整灵活可靠。轧辊辗轧角和前进角均可在较大范围内无级调整。

目前，各 AR (AG) 机组的运转水平各有千秋，反映出的最大特点是壁厚精度好，另外利用轧管机扩径的特点，可采用小坯轧大管。但仍存在如下一些共性问题。

#### (1) 轧管机延伸系数低

按 AS 公司原设计，最大减壁量可达 7mm，减径量 18mm，最大延伸系数可达 3。但直到今天，正常生产最大减壁量只有 3mm，减径也受限制（一般采用等径或扩径轧制），正常生产延伸系数一直限制在 1.5 以内，造成了大部分钢管变形量由穿孔机承担这样一种不合理的分配。据 MDM 公司 1985 年统计，在 Accu Roll 轧机出台之前一共有 5 台狄塞尔轧管机被钢管厂使用过，其中 3 台早已停产，1 台情况不明，另一台年产仅 15000t。当时轧机设备制造厂称该轧机的延伸系数可达 4~4.5。20 世纪 80 年代为新狄塞尔轧管机做试验时，MDM 公司声称该轧机的延伸系数可达 2.5~3.0。Aetna-Standard 公司提供的样本资料中 Accu Roll 轧机的延伸系数  $u=1.42\sim 2.68$  而目前在使用中的 Accu Roll 轧机的延伸系数一般不大于 1.5，

正常生产时最大减壁量为 3 mm。20 世纪 80 年代的狄塞尔轧管机和 30 年代的同类轧机相比较,使用者多了 3 家,而延伸系数从 4.5 降为 1.5。

### (2) 轧制薄壁管困难

选择 AR 轧管机而不选择三辊轧管机是因为用 AR 技术可轧薄壁管,这也许是当初各厂家采用 AR 轧管机的初衷。但实际情况是,AR 轧管机生产  $D/S > 30-35$  的薄壁管较困难或者说是经济:一是 AR 轧管机的变形孔型特点造成轧薄壁管工艺事故多,给操作带来困难;二是导盘消耗大,目前生产现场不得不采用减少轧管机减壁量来生产薄壁管(这样就要求穿孔毛管壁薄,所以穿孔机选型时应注意)。

### (3) 钢管存在螺纹和内疤缺陷

由于 AR 轧管机的孔型变形特点和轧制方式,决定了其轧制的钢管内表面较粗糙,并时而出现外螺纹和内疤。通过轧管机的正确调整和芯棒的良好润滑,可以在很大程度上改善钢管表面质量,但要从根本上消除表面缺陷是困难的(有趣的是,同样是斜轧,三辊轧管机轧后钢管内表面却相当的光滑)。

### (4) 工模具消耗较大

主要是导盘和芯棒的消耗较大。尤其是轧制  $D/S > 35$  的钢管时,一个班组可能要用两副导盘;而芯棒目前采用在线插棒方式,1 根芯棒一般轧 2000~3000 支管就报废(采用线外插棒,芯棒冷却条件好,则可进行重车)。

### (5) 关于减径轧制

据资料介绍,传统的狄塞尔轧管机在减径轧制方面似乎是不成问题,但 AR 轧管机辗轧角的出现,带来了减径困难的问题。从多方面看,辗轧角的出现是弊大于利,它只考虑了锥形辊轴向速度的提高(实际上是有限的),而忽略了轧辊径向速度的剧增,导致了钢管的扩径(三辊轧管机也有此问题,20 世纪 80 年代以后引进的轧管机都带有正辗轧角,但无锡西姆莱斯钢管有限公司的除外。)这也是 AR 轧管机轧薄壁管困难的重要原因之一,另外还带来其他众多的副作用。传统的狄塞尔轧管机采用  $0^\circ$  辗轧角或者负辗轧角是有助于改善轧管机延伸能力和轧薄壁管性能的。

AR (AG) 轧管机就目前性能状况,生产  $D/S < 30$  的中厚壁管是较为合适的,导盘磨损消耗相对较小。芯棒采用线外穿棒,除提高生产效率外,可很好地解决芯棒冷却和润滑问题,并降低芯棒消耗。AR(AG) 轧管机精度高是不容置疑的(这也是斜轧管机共有的特点),在选用轧管机时,应在对其性能充分了解的基础上,结合自己的产品定位(规格和品种)慎重选用。

### 1.2.4 最有前途的 3-RCM 型三辊联合穿轧机

3-RCM 是 3-Roll Combined Mill 的缩写。它是最近由 SMS-Mee 公司推出的一种穿轧合一的三辊轧管机组。在轧制过程的第一阶段, 该机组起到穿孔机的作用, 穿孔毛坯轧出后, 通过自动控制系统使轧辊改变旋转方向, 并自动调整好工艺参数, 然后穿入芯棒, 从空心坯轧出端推入轧机, 此时轧机起到三辊轧管机的作用。这种工艺刚经过工业试验, 尚未见到在钢管厂使用情况的报道。3-RCM 三辊联合穿轧机的生产率可达到由三辊穿孔机和轧管机组的机组生产率的 90%, 而设备费用仅为后者的 2/3, 当然其他生产基建费用亦相应降低。

早在 20 世纪 80 年代初就有一台三辊联合穿轧机在英国投产。我国于 90 年代初自行研制开发了 50mm 三辊联合穿轧机, 它和 3-RCM 不同, 它是直通式的。但就轧管工艺而言, 二者是相同的。SMS-Mee 公司称 3-RCM 联合穿轧机组为 mini-Mill, 适用于年产量为 3.5~5 万吨的小型钢管厂。

作为穿轧合一的三辊轧管机 3-RCM 迄今尚无应用实例, 对于中小钢管厂来说。是否可算得上是最适合的工艺还需要经过实践考验。

人们一直在追求一种投资少, 质量好, 产品范围广, 消耗少的理想轧管机, 可惜这种轧管机至今并未出现, 现有的各种轧管机和轧管工艺利弊兼备, 但可以肯定的是人们对这种理想轧管机的追求是不会停止的。

## 1.3 机架强度、刚度分析的发展及工程中的应用

轧管机机架是轧机中最重要的零件, 因为机架上承受和均衡了轧制力、轧制力矩并传递给基础; 机架中的各个零件及相应的调整机构均安置在它的上面。因此对轧机机架有很高的要求:

- 1.要有足够的强度。在设计上要求绝对安全, 一般情况下不允许破坏与更换。否则更换一个新机架不但加工费用昂贵(机架的重量占轧机重量的 35~45%)而且造成的间接经济损失将大大超过机架本身的造价;

- 2.要有足够的刚度。刚度越大产品精度越高, 刚度不够直接引起轧制产品超差。

由于机架的重要性, 机架的应力、应变分析早就引起人们的重视。正确而科学地设计机架一直是设备工程师和设计师所共同关心的事。而且从

力学观点看, 机架是静不定刚架的典型实例, 这点引起了更多人的兴趣。

至今为止, 分析斜轧机机架强度和刚度的方法有: 材料力学法、有限元法、电测法和光弹实验法。下面分别将这几种方法的发展及特点作一简述:

### (1)材料力学法

材料力学方法的理论早在 17 世纪就被提出, 并应用于工程计算中去。多年来, 机架的设计和强度、刚度分析都建立在材料力学的基础上。在分析计算中采用将机架简化的方法, 把梁简化为等截面梁, 空间问题多简化为平面问题求解。

这种方法的优点是: 计算较其它方法简单, 理论公式及计算实例较成熟。

缺点是: 计算机架强度的力学模型与实际形状相差甚远, 计算结果误差较大。由该力学模型建立起来的强度计算公式难以分析应力集中对强度削弱的影响。只能作部份截面的应力、应变分析。

### (2)有限元法

有限单元法是采用电子计算机求解数学物理的一种数值计算方法。特别适合于形状和载荷任意的平面和空间弹性问题。可以较精细地确定其位移场和应力场。对于轧钢机机架这种结构复杂的静不定刚架, 国内外已开始采用有限元法作应力和变形分析。前些年, 各计算中心配有 SAP5 和 SAP6 结构分析计算程序, 现在已广泛被 ANSYS 所取代。使得有限元法广泛地应用在冶金设备设计上。经过实践证明, 只要建立适当的有限元模型, 对机架的有限元分析的应力和应变结果是完全可信的。

### (3)光力学方法

光力学是应用光学量与机械变形量之间的物理联系而发展起来的一种模拟研究。它是一种实验分析方法。光力学方法主要由光弹性应力分析、全息干涉法和云纹法三个分支组成。光弹性应力分析主要用以解决强度问题; 全息干涉法不仅可以进行应力分析, 更主要的是能够进行位移应变和振动问题的分析; 云纹法利用几何光学的原理, 主要用以解决位移与应变问题。

光力学方法在分析过程中对研究对象进行全场分析, 使用了较少的简化处理, 因此所得的分析结果具有较高的精度。作为一种实验分析的方法, 除了可用以证明理论计算的结果外, 光力学法还具有设计的能力, 即可以在设备设计时, 进行设备的强度和刚度分析。但是在设备结构复杂时, 制

造模型的费用较高,而且当设计中要改变结构分析时,又需重新制造模型,使得费用上升。

#### (4)电测法

在机架的强度和刚度分析中,常常使用电测法来取得轧机工作时机架的应变值。

它的优点是:测试的值接近实际值。作为一种实验的方法,可以用来证实理论计算的结果。在一些发达的工业国家里,早在十九世纪末,就有人对轧机的力参数进行电测试研究。由于当时的测试设备比较落后,测试得到的数据精度较低。测试工作仅限于在实验室进行。不能进行现场测试,更无法进行动态测试和多参数的综合测试。

直到本世纪四十年代后,由于电子技术和电阻应变技术的发展,使轧制过程中的一些非电量的参数测量变得容易,测试数据的精度得到提高。特别是60年代以后,由于电子计算机的飞跃发展,自动化控制技术的不断进步。测试技术在轧钢机上得到更多的应用,成为现代化轧钢机上不可缺少的组成部分。我国从1956年开始对轧钢机进行测试研究工作,58年开始对现场轧钢设备进行了综合测试。除了对一些初轧机和板坯轧机进行了测试分析以外,70年代还对成都无缝钢管厂的皮尔格轧机和上钢一厂的钢管轧机作了综合测试并取得了可靠的力参数数据。

随着科学技术的不断发展,由于遥测装置、各种参数的自动检测装置、数据采集和处理技术及计算机在轧钢机测试中的应用,测试技术将得到更大的发展和应用。

它的不足是:它是一种测试的方法,只能在设备实体或实体模型上进行,而且只能分析构件表面有限点,无法对设备的应力应变状况进行全场分析。

由于轧制时设备受力和变形的复杂性,随着科学技术的发展,电测值的精确度不断提高。使用电测法分析机架的应力应变状况的方法,仍然具有重要地位。

通过对上述四种机座强度、刚度分析方法介绍,对比其优缺点。本文通过有限元法进行理论分析,然后用电测法对理论分析进行实验验证。

## 1.4 课题来源及意义

“鞍山安信制管设备设计研究有限公司”针对 Accu Roll 轧管机投资较

少、生产流程短、质量好、规格品种多，适合中、小企业生产的特点，为一家企业设计了  $\phi 140\text{mm}$  Accu Roll 轧管机。在轧管过程中轧辊、导盘、芯棒等的轧制作用力的反作用力最终全部作用在轧管机机架上，机架承受和均衡了这些反轧制力、反轧制力矩并传递给基础；轧管机的各个零件及相应的调整机构也安装在机架内。所以机架强度和刚度对钢管的精度起着至关重要的影响。轧管机主机座是机架（包括主机座和机盖）中重要的零件，因此对轧机主机座有很高的要求：

1. 要有足够的强度。在设计上要求绝对安全，一般情况下不允许破坏与更换。否则更换一个新机座不但加工费用昂贵（机座的重量占

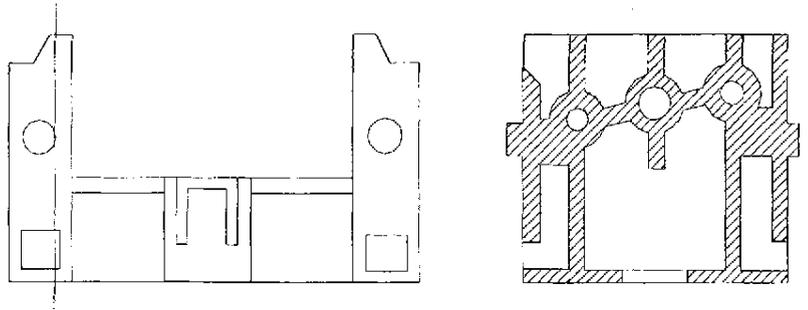


图 1-1 轧管机主机座示意图

Fig. 1-1 The sketch of rolling pipe mill

而且造成的间接经济损失将大大超过机架本身的造价；

2. 要有足够的刚度。刚度越大产品精度越高，刚度不够直接引起轧制产品超差。

为了满足强度和刚度的需求，根据材料力学计算和现有轧管机机架为参照，设计轧管机主机座成复杂的筋板式箱体铸造结构如图 1-1。但材料力学计算轧管机主机座强度的力学模型与实际形状相差甚远；由该力学模型建立起来的强度计算公式难以分析应力集中对强度削弱的影响。只能作部份截面的应力、变形分析。而有限单元法是采用电子计算机求解数学物理的一种数值计算方法。特别适合于形状和载荷任意的平面和空间弹性问题。可以较精细地确定其位移场和应力场，可以计算出主机座各点的应力和变形。所以应用有限元软件对主机座的应力和变形在理论上进行深入探讨。这样可以在满足强度和刚度的情况下，减轻机座的重量，节省机座材料，增加机座的美观和灵活性。

斜轧管机机座比较庞大，一般铸造厂很难铸造成形，只有大型铸造厂能够生产。中、小企业由于各种原因，不容易找到适合的铸造厂家，因此需求分体铸造焊接成形的主机座，但现在轧管机机座还没有分体铸造焊接的先例。学习采用轧钢机焊接机架的经验来分体铸造焊接的工艺方法。另

外机座在满足强度和刚度的情况下分体铸造，不仅易于铸造，而且便于搬运、安装。机座毛坯还可以在分体情况下进行粗加工，在整体情况下进行精加工，便于工艺安排，节约加工费用。

## 1.5 研究内容

本文主要进行以下几方面工作：

1.在对轧管机主机座受力情况全面分析的基础上，通过若干假设条件，将真实复杂的三维实体简化为平面力学模型，计算出了机座所受各力的大小和位置。

2.利用有限元 ANSYS 软件建立了主机座的有限元模型并对机座进行了应力和变形的计算分析，证明了主机座的强度和刚度完全符合设计要求。

3.应用 ANSYS 计算分析的数据，确定轧管机主机座分体铸造的件数及分体铸造的具体分割位置。

4.根据机座结构的具体情况 & 焊接工艺特点，选取电渣焊的焊接工艺方式。

5.对轧管机主机座进行应力测试并与有限元 ANSYS 软件计算的结果作比较和分析，验证有限元计算结果是否正确及分体方案是否合理。

## 1.6 本章小结

本章简要回顾了无缝钢管的发展历程，对斜轧轧管机的发展历程作了充分的论述，并对斜轧管机工艺特征做了概述。本章论述了轧管机机架的重要性，分别介绍了四种用来分析和测试轧管机机架强度和刚度的方法以及它们的发展历程和各自的优缺点，以及本文想要应用的两种方法。就课题来源做了必要说明，指明了论文研究方向，并明确了本论文的研究目的和研究内容。

## 第二章 Accu Roll 轧管机构成及轧管过程分析

### 2.1 设备组成与结构

轧管机主要由前台、主机和后台三大部分组成。

#### 2.1.1 前台和后台

前台由限动系统、冷却系统、芯棒润滑系统、推管系统等组成。工作过程如下：

- 1.穿孔后的毛管由拨料器送入受料活动料筐；
- 2.挡管器闭合；
- 3.限动小车带动预旋转的芯棒穿入毛管，同时全自动的脉冲式喷射器将润滑剂呈雾状喷洒到芯棒工作表面；
- 4.挡管器张开，带有中间支撑的推管小车把毛管送入轧管机；
- 5.轧辊咬入毛管后，带有芯棒的限动小车由限动液压式油缸控制开始限动轧制，推管小车迅速返回；
- 6.轧制完成后，荒管进入轧管机后台，芯棒则由限动小车拖回到原始位置，在通过冷却水套时，芯棒被冷却；
- 7.限动液压缸伸出，下一根毛管进入料筐。

后台采用方形可调式导槽及升降辊道，对所轧荒管起导向和防止甩动的双重作用。

#### 2.1.2 主机

##### (1)工作机架

该机架为由机盖与机座组成的开式机架。机座与机盖采取铰链联接和液压加斜楔锁紧方式，可以增加机盖稳定性，提高开式机架的刚度。机盖实现液压传动自动开启，有利于快速更换导盘和轧辊。

##### (2)轧辊及导盘调整机构

按轧制工艺要求，上下导盘及左右轧辊应进行三向调整，导盘轴承箱

和轧辊箱势必要在机架里进行各个方向的运动。采用先进的液压技术和新颖的结构，改变轧辊箱和导盘轴承箱与机架的配合形式，实现了无间隙轧制，由此确保了工作机座的稳定以及轧辊、导盘和机盖无任何方向的串动，孔型准确无误。

### (3)入口和出口导卫装置

该装置独自固定在机座上，并采用液压自动保压锁紧机构，使导卫装置能经受管体和芯棒在高速旋转中的甩打，保证管体顺利咬入和沿轧制线运行。

## 2.2 AR 轧管机设备特点

### 2.2.1 液压+链条的限动装置

由直流电机通过减速箱、小齿轮、大齿条驱动的方式是一种较好的限动小车传动方式。齿轮齿条传动因占地面积大，并且限动时小车电机要克服巨大的限动力，故适用于产品规格较大的轧管机。链条加液压限动的传动方式占地面积小，能耗低，限动时液压油缸无需外加动力即可控制限动速度，故适合于中小型限动芯棒轧管机。此外，限动小车还设有吸收冲击力的消震及克服车体惯性的装置，使配件磨损减小，结构更加简单，使用维护更加方便。

### 2.2.2 推管小车和限动芯棒

推管小车既是送管工具，又是中间支撑装置，其位置可变，能有效地防止芯棒甩动。它与活动料筐连接，料筐可随其前后推拉。

限动芯棒由工作棒和联接杆组成，采用元宝楔铁联接，能快速联接和拆卸，更换工作棒方便。由于采用了限动芯棒技术，使产品规格范围扩大和钢管长度增加。另外，限动速度的控制，可使芯棒工作段磨损均匀，寿命提高，并改善钢管的尺寸精度。

### 2.2.3 全自动的芯棒润滑装置

芯棒表面脉动喷涂润滑装置主要组成为：

1. 润滑剂供料装置；
2. 润滑剂搅拌装置；
3. 润滑剂输送分配器；
4. 润滑剂脉动喷涂机；
5. 清洗装置；
6. 空压机；
7. 电气控制系统。

该装置能够全自动地向芯棒表面均匀喷涂雾状润滑剂(石墨水溶液),降低轧制时芯棒外表面与钢管内表面之间的摩擦阻力,提高斜轧速度,降低能耗,提高钢管质量和成材率,提高芯棒的利用率 and 使用寿命。<sup>[23-24]</sup>

#### 2.2.4 导盘轴向无级调整装置

采用先进的导盘轴向无级调整装置,调整范围大,灵活方便,可以自动无级调整,为快速准确实现最佳工艺参数提供了保证。

导盘可作三向调整。沿轧制线上下调整,可改变导盘喉距和变形区椭圆度;沿轧制线左右调整,可根据轧制规格来控制变形区的封闭性;沿轧制线前后调整,可实现对轧件的最佳支撑和前拽作用。导盘的三向可调性对工艺参数的优化提供了很好的条件。

#### 2.2.5 自动化控制

限动芯棒生产线由 1 台 PLC 集中控制。开关量由标准 I/O 模块输入,数字量和模拟量由特殊(智能)I/O 模块输入。常用物理量,如限动力、限动速度、芯棒小车位置、推管小车位置、预旋转转速、钢管长度、芯棒温度等均由 LED 显示器显示,程序采用指令码编写。PLC 系统有手动、自动和半自动三种工作方式。限动小车的位置控制采用光电编码器位控系统,定位准确可靠,调整方便,抗工业干扰能力强。限动小车和推管小车的直流调整装置选用全数字直流调整系统,以单片微机为核心,构成数字调节、给定积分器、逻辑切换装置及运行保护等环节。全部参数由键盘设置。该装置还具有调节器、动态参数自动优化及故障自诊断功能,使小车具有良好的起动和制动特性,优异的定位精度及较宽的调速范围,便于位置调节和操作。

### (1)操作系统

轧管机是由安装在计算机(PC)中并与主控自动系统(PLC)相连的操作系统进行设定和作业的。用于轧管机及其辅助设备,生产多种产品规格的设定数据储存在数据库中,轧机操作人员可方便地调用。此外,数据库中还储存有工具数据、轧制工序和轧制结果。轧管变形区域内,与控制及上下游设备信息相通的原料跟踪系统能储存每支毛管在生产控制下的工艺数据和设定数据。两级系统的接口将把生产计划及生产监控系统连接在一起。这样,操作系统就成为确保工艺可靠和质量优良的基础,从而成为斜轧轧管机工艺控制所必需的先决条件。

### (2)计量装置

毛管的重量可在轧管前测定,在斜轧轧管机上生产的钢管的外径和长度将在机后直接记录下来并显示在操作系统上,钢管的平均壁厚将通过测得的几何数据和坯料重量计算获得,并将计算结果同公称值进行比较。在公称值与实际值之间出现临界偏差的情况下,系统会向操作人员发出报警信息,以便在必要时调整轧管机设定值。为测量整支钢管的壁厚,记录轧件断面壁厚,尤其是断面的同心度,可在适当部位设置多频道测量系统,即以放射原理进行工作的壁厚测量系统。在目前用超声波检测的壁厚测量系统 LASUS 中,钢管的壁厚可以直接在轧管机后测得。此种在线壁厚测量装置使轧件的几何尺寸精度大大提高,工具尺寸的变化对钢管身体形状的影响可以快速而明确地定量,其有关影响因素如坯料温度不均、工具设定不正确、工具磨损等均可得到修正。<sup>[17]</sup>

## 2.3 热轧无缝钢管的工艺流程

Ø140mm Accu Roll 热轧无缝钢管机组生产线按其功能不同,分为管坯精整、热轧钢管、普通管精整及高压锅炉管精整 4 条作业线。<sup>[23]</sup>

### (1)管坯精整工艺流程

管坯 → 喷丸 → 磁粉探伤(如有缺陷,修磨后再探伤) → 切断环 → 环形炉。

### (2)热轧工艺流程

1. 环形炉加热 → (热定心) → 穿孔 → 轧管 → (切头) → 再加热 → 高压水除鳞 → 张力减径 → 冷床冷却 → 冷锯切 → 中间仓库

2. 环形炉加热 → (热定心) → 穿孔 → 轧管 → 定径 → 冷床冷却 → 冷锯

切 → 中间仓库

(3) 一般管精整工艺流程

中间仓库 → 矫直 → 吹灰 → 涡流探伤 → (修磨、改尺) → 检查 → (切管端) → 喷印 → 打捆 → 入库

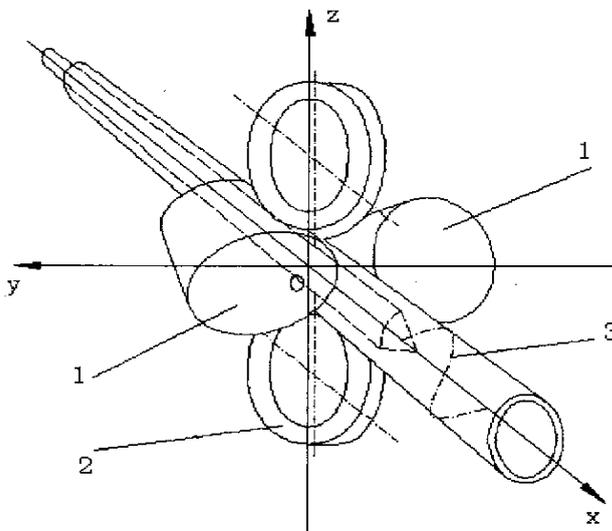
(4) 高压锅炉管精整工艺流程

中间仓库 → 正火 → 回火 → 中间库 → 矫直 → 吹灰 → 涡流探伤 → (修磨、改尺) → 检查 → (切管端) → 中间库 → 超声波探伤 → 钢号 → 鉴别 → 测长喷印 → 涂层 → 称重 → 打捆 → 入库

## 2.4 Accu Roll 轧管机变形区构成及研究

### 2.4.1 空间变形区的特点

Accu Roll 轧管机的特点是轧辊形状呈锥形，轧辊轴线与轧制线呈空间交叉，即有送进角，又有辗轧角，空间结构比较复杂，这就决定了该轧机变形区构成的特殊性。



1—轧辊 2—导盘 3—轧件

图 2-1 轧管机空间变形区

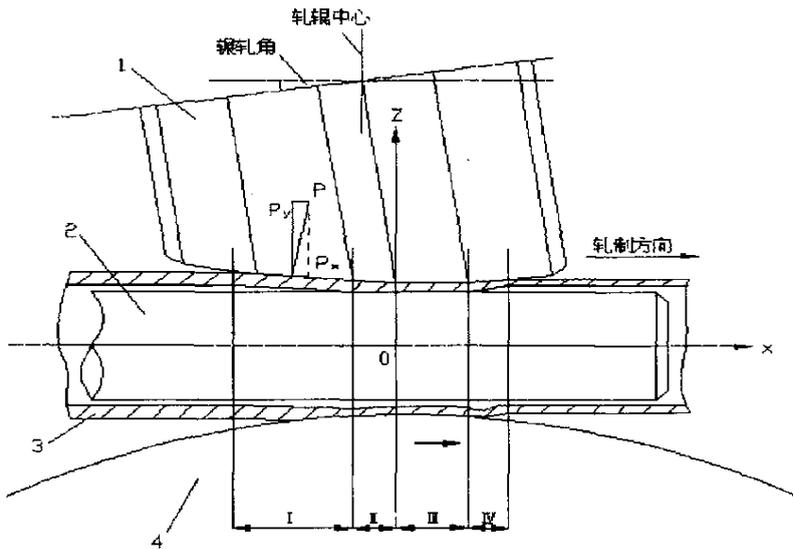
Fig. 2-1 The space transforms area of the rolling pipe mill

1-roller 2-guidedish 3-rollpiece

在 Accu Roll 轧管机的空间变形区，是由一对同方向旋转的带有大辗轧角和喂入角的锥形轧辊与一对主动旋转的大直径导盘构成的一个空间区域。在此空间区域内部，插入一根以限动速度运动的芯棒，构成了一个环形的空间变形区，如图 2-1 所示。轧辊与轧件间的接触可描述如下：假设轧件为刚性体，轧件与轧辊表面连续接触点的集合构成了一条扭曲的空间曲线，（即在轧制中心线的水平面内一系列位于变形区的平面），该空间接触曲线至轧制中心线的距离小于轧辊辊面上其他各点至轧制中心线的距离。

### 2.4.2 Accu Roll 轧管机的变形区构成

Accu Roll 轧管机的变形区由水平布置的轧辊、垂直布置的导盘和轴线与轧制线重合的芯棒构成。变形区的纵向形态如图 2-2 所示。坐标原点为辊喉中心。变形区横向形态如图 2-3 所示。



1-轧辊 2-芯棒 3-毛管 4-导盘 •-减径段 •-减壁段 •-均壁段 •-扩径段

图 2-2 轧管机变形区纵向形态

Fig. 2-2 The vertical appearance of transform area of the rolling pipe mill

根据斜轧延伸的工艺要求，变形区基本上分为四部分，即咬入减径段、减壁段、均整段和规圆扩径段。

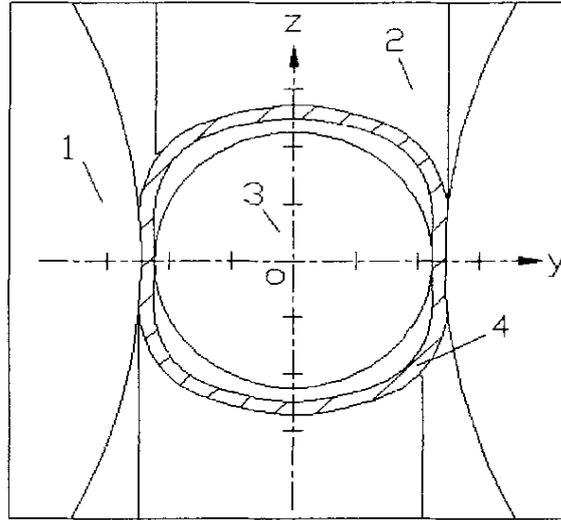
#### (1)咬入减径段

在此段，轧件仅接触轧辊，轧辊辊面角大于辗轧角，轧件实现咬入、

减径，但壁厚基本不变，横截面由圆变为椭圆。

(2)减壁段

在此段，轧件接触芯棒，辊面角仍大于辗轧角。轧件的管壁受到辗轧，实现减壁减径；轧件金属沿切向和纵向流动，外周充满变形区，横截面受导盘弧面的制约形成歪斜的椭圆状。轧件的绝大部分变形在此段完成。



1-轧辊 2-导盘 3-芯棒 4-毛管

1-roller 2-guidedish 3-mandril 4-semifinished pipe

图 2-3 轧管机变形区的横向形态

Fig. 2-3 The across appearance of transform area of the rolling pipe mill

(3)均整段

在此段，辊面角基本等于辗轧角，轧辊母线与芯棒母线近似平行，管壁在此段得到精整。由于该段较长(大于 3 个螺距)，因而使壁厚偏差得到较好的纠正，但轧件横截面仍为椭圆状。

(4)规圆扩径段

此段的辊面角小于辗轧角，且辊距逐渐增大。轧件在此段逐渐离开芯棒和导盘，截面由椭圆形逐渐规整为圆形。

2.4.3 斜轧延伸的金属变形研究

轧件金属在变形区中受到轧辊、导盘和芯棒的作用而产生塑性变形。金属的变形行为是由变形工具所决定的。

(1)轧辊作用力和金属变形

由图 2-2 知, 在咬入段和减壁段, 由于轧辊辊面角大于辗轧角, 使得轧辊对变形金属的正压力  $P$  沿轧制线的分量  $P_x$  的方向与轧件前进方向相反, 对轧件咬入和前进形成阻力。正压力  $P$  沿轧制线垂直方向的分量只对轧件实施压下, 迫使金属产生径向变形。这是轧制变形的主要动力。金属径向受压后, 被迫沿切向和纵向流动。由于轧辊、芯棒与轧件的纵向接触长度远大于切向接触宽度, 因而使金属的纵向流动阻力远大于切向流动阻力, 造成大量金属沿切向变形, 纵向变形受到极大的限制。由此可见, 如何缩短变形区长度, 限制金属切向变形, 是提高纵向延伸率的主要问题, 这对减壁段更重要。在规圆扩径段, 由于辊面角小于辗轧角, 使平行于轧制线的压力分量  $P_x$  的方向朝向轧件前进方向, 对轧件前进形成推力。显然该段辊面角越小, 对轧件的推拉作用越强, 越有利于轧件的前进和扩径。

轧辊对变形金属作用的摩擦力, 在轧制线方向的分量使轧件前进, 沿轧件切向的分量使轧件旋转。二者的共同作用使金属在变形过程中作螺旋运动, 这是轧件运动的主要动力。摩擦力两个分量的大小除与正压力和摩擦系数有关外, 还与前进角  $\alpha$  有关, 而且取决于  $\alpha$  角。 $\alpha$  减小时, 旋转分量将增大, 有利于轧件旋转;  $\alpha$  增大时, 轧制线方向的分量增大, 有利于轧件前进。

### (2) 导盘作用力及金属变形

上下导盘对变形金属的横向限制, 使轧件截面保持一定的椭圆形状。调整导盘位置可改变周向变形程度, 控制截面周长, 实现扩径或减径。由于导盘主动旋转, 其线速度大于金属纵向前进速度, 因而对轧件作用有纵向拽入摩擦力, 由此加强了金属的纵向流动。同时, 轧件的旋转在导盘工作弧上受到切向摩擦阻力的作用, 妨碍轧件的旋转。从有利于轧制变形的角度讲, 在工艺上应力求增大纵向拽入摩擦力以加强纵向变形; 尽量减小切向摩擦阻力, 以减小轧件旋转的阻力。

### (3) 芯棒作用力及金属变形

芯棒对轧件作用有正压力, 配合轧辊对金属产生强制性径向变形。另外, 芯棒限动速度低于轧件前进速度, 因而对金属纵向流动产生摩擦阻力。芯棒的浮动旋转也对金属切向流动产生一定的摩擦阻力。若要降低这两种阻力, 应从减小芯棒和轧件间的摩擦系数着手, 改善芯棒的润滑条件。

## 2.5 Accu Roll 轧管机咬入条件

### 2.5.1 轧制力和摩擦力对轧件的作用力分析

在 Accu Roll 轧管机轧制过程中，导盘和轧辊给予轧件作用力。轧辊的作用力促使轧件在孔型中减径、减壁、延伸。导盘对轧件起径向压缩作用，控制轧件外径，同时因导盘速度在轧制线上的分量大于轧件的轴向运动速度，故导盘对轧件又产生轴向拉力。

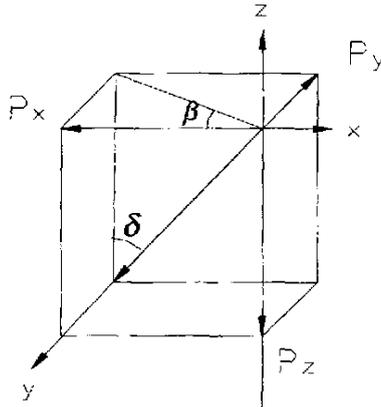


图 2-4 咬入点处轧制力的空间解析

Fig. 2-4 The rolling force's space resolution of the bite into the point

#### (1) 轧制力对轧件作用力的分解

咬入时轧制力的方向始终垂直于轧辊表面。以咬入点为坐标原点，建立空间直角坐标系 O—XYZ，其轧制力 P 的空间解析如图 2-4 所示。

在此空间直角坐标系中，轧制力 P 可分解为  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$ 。其中  $P_y$ 、 $P_z$  参与了轧件的旋转运动， $P_y$  促使轧件旋转运动， $P_z$  阻止轧件旋转运动； $P_x$  是轧件前进的阻力。由图 2-4 可知

$$P_x = P \sin \delta \cos \beta \tag{2-1}$$

$$P_y = P \sin \delta \sin \beta \tag{2-2}$$

$$P_z = P \cos \beta \tag{2-3}$$

#### (2) 摩擦力对轧件的作用力分析

在轧制过程中，轧辊对轧件的摩擦力 T 是由轧制力引起的。咬入过程中，咬入点处轧辊对轧件摩擦力的方向与该点的轧制压力的方向垂直，并且始终与该点的轧辊表面在空间相切。

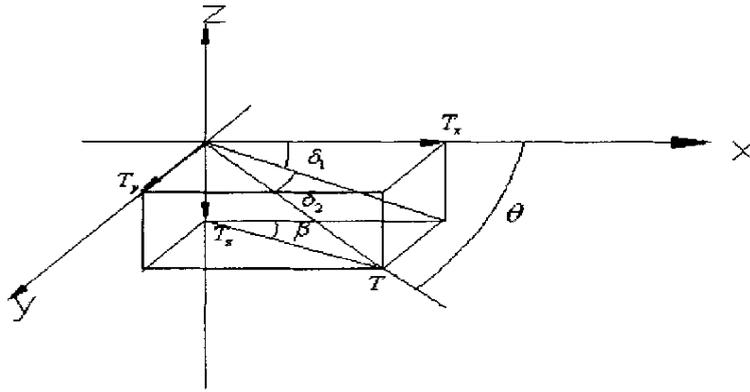


图 2-5 咬入区摩擦力空间分析

Fig. 2-5 Bite into the area the friction space analysis

由于存在大的辗轧角和大的喂入角，T 与轧制线有一空间交角（见图 2-6）在图 2-5 空间坐标系中，可将 T 分解为  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 。其中  $T_x$  使轧件轴向前进， $T_y$  使轧件旋转运动。因两轧辊作用点不在同一平面内，有扭矩作用，故  $T_z$  阻止轧件旋转运动。由图 2-5 可知

$$T_x = T \cos \delta_2 \cos \delta_1 \tag{2-4}$$

$$T_y = T \sin \delta_2 \tag{2-5}$$

$$T_z = T \cos \delta_2 \sin \delta_1 \tag{2-6}$$

由空间关系可知：

$$\gamma = \text{arctg}(tg \beta \cos \alpha) \tag{2-7}$$

$$\delta_1 = \text{arctg}[tg(\psi_1 - \gamma)(1 + tg^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}] \tag{2-8}$$

$$\delta_2 = \text{arctg}(tg \alpha \cos \delta_1) \tag{2-9}$$

式中： $\psi_1$ —咬入段上的辗面角；

$\gamma$ —轧辊轴线与水平面的夹角(或轧辊布置的空间角)。

### 2.5.2 一次咬入条件的建立

在 Accu Roll 轧管机轧制过程中，存在两次咬入。第一次咬入是在轧件与轧辊开始接触瞬间，由轧辊带动轧件运动并把轧件拽入变形区中；第二次咬入是轧件在进入变形区后再与芯棒、导盘接触，需要克服芯棒和导盘阻力才能继续进入变形区中轧制。

在毛管被咬入瞬间，因毛管内径大于芯棒直径，故毛管在被咬入瞬间的受力状况如图 2-6 所示。由图 2-6 可知

$$\delta = \arcsin[\frac{tg \delta_1}{(1 + tg^2 \beta + tg^2 \psi_1)^{\frac{1}{2}}}] \tag{2-10}$$

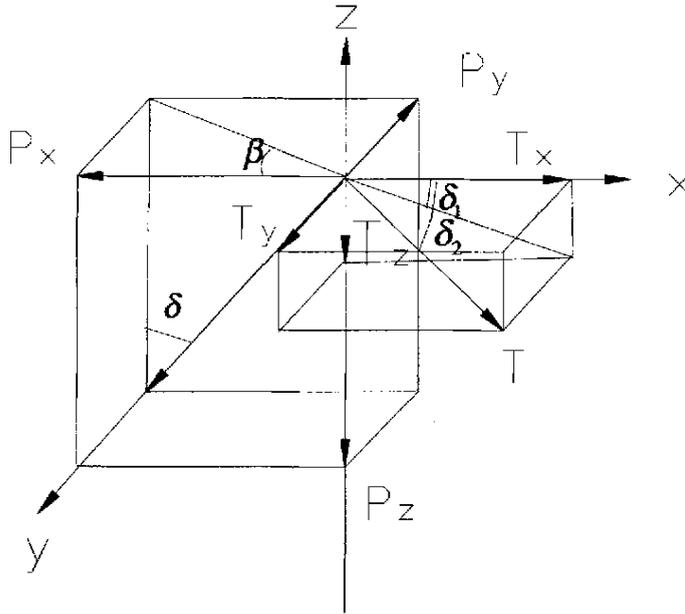


图 2-6 咬入点处轧件受力的空间分析

Fig. 2-6 The space analysis of the piece suffering force at the bite into point

(1) 旋转条件的建立

由于咬入点 O 所在的 XOZ 平面不通过轧制线，可设 XOZ 平面到轧制线的距离为 E(即作用力臂)，因此参与轧件旋转的力有  $P_y$ 、 $P_z$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 。由旋转条件可知

$$M_t - M_p \geq 0 \tag{2-11}$$

$$M_t = (T_y - P_y)(d_0 / 2) \tag{2-12}$$

$$M_p = (T_z + P_z)E_1 \tag{2-13}$$

$$E_1 = (b / 2)(1 + d_0 / D) \tag{2-14}$$

式中  $M_t$ —一次咬入时轧辊带动轧件旋转的摩擦力矩；  
 $M_p$ —由正压力产生的阻止轧件旋转的摩擦力矩；  
 $E_1$ —咬入点力臂；

B—咬入时轧件与轧辊接触面的平均宽度；

D—与咬入点对应的轧辊直径。

设摩擦系数为  $\mu$ ，则有  $T = P\mu$  由此：

$$\mu = [(d_0 / 2) \sin \delta \sin \alpha + E_1 \cos \delta] / [(d_0 / 2) \sin \delta_2 - E_1 \cos \delta_2 \sin \alpha_1] \tag{2-15}$$

(2) 轴向前进条件的建立

由上述分析及图 2-6 可知, 轧件轴向前进的作用力为  $P_x$ 、 $T_x$ , 则轴向前进的条件为:  $T_x - P_x > 0$  (2-16)

将式(2-1)、式(2-4)代入上式, 可得

$$\mu \geq \sin \delta \cos \alpha / (\cos \delta_2 \cos \delta_1) \quad (2-17)$$

式(2-15)、式(2-17)为 Accu Roll 轧管机一次咬入条件。

### 2.5.3 二次咬入条件的建立

二次咬入条件的建立, 基础在于一次咬入条件的建立。在轧制过程中, 轧件首先接触的是轧辊, 在建立了一次咬入条件后, 轧件再与导盘和芯棒接触。因导盘速度沿轧制线上的分量大于轧件速度的轴向分量, 故导盘对轧件起拽入作用, 即起主动力的作用。在旋转方向上, 导盘对轧件的旋转运动起阻碍作用, 由轧制工艺可知, 导盘的转速较快, 在导盘的轧件咬入点, 导盘根部线速度在轧制线上的分量大于轧件沿轧制线的前进速度, 故导盘对轧件的作用如下:

1. 导盘对轧件的径向压缩作用减小了导盘方向上的横向拉应力, 甚至在椭圆度很小的情况下变拉应力为压应力;
2. 导盘压缩金属和导盘的轴向拉力作用减小了变形区中轧件的椭圆度, 从而减少了横向拉应力;
3. 导盘的拽入作用减小了轴向滑移, 从而减少了轧件在孔型中的反复压缩次数, 也减少了拉应力的积累。

假设导盘对轧件作用力的作用点在导盘的根部, 则在轧件的前进方向上受到  $P_d$  和  $T_d$  的作用, 在轧件的旋转方向上受到  $T_d'$  的作用。其中  $P_d$  为正压力, 而  $T_d$  和  $T_d'$  为摩擦力。

$$\text{由经验可确定 } P_d = (0.15 \sim 0.27)P \quad (2-18)$$

在导盘布置方向上起径向压缩作用。芯棒对轧件的咬入起阻碍作用。

#### (1) 导盘对轧件的作用力分析

以下导盘为例分析导盘对轧件咬入的影响。在导盘上, 轧件咬入点处力的分解示意如图 2-7 所示。

$$\text{又 } T_d = \mu_1 P_d \quad (2-19)$$

$$T_d' = \mu_2 P_d \quad (2-20)$$

式中  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、—导盘与轧件间摩擦系数。

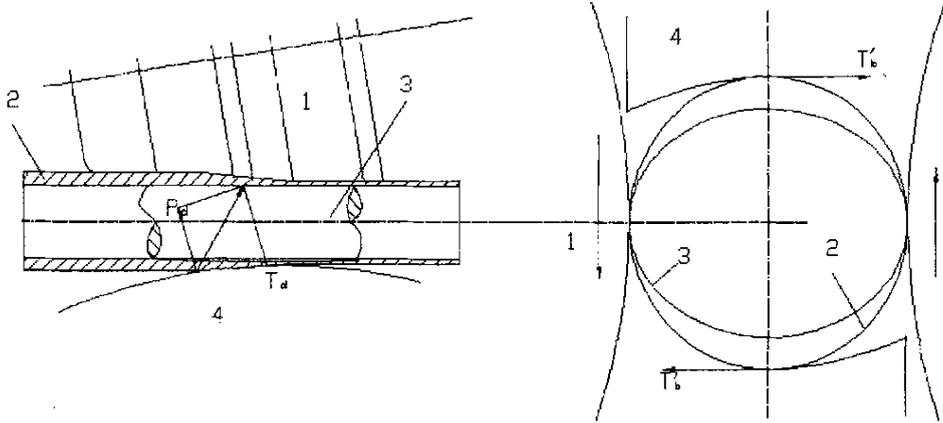


图 2-7 导盘对轧件的作用力

1—轧辊 2—轧件 3—芯棒 4—导盘

Fig. 2-7 The force of the guide dish to the rolling piece

1-roller 2-rolling piece 3-mandril 4-guide-dish

(2)芯棒对轧件的作用

芯棒本身的工作方式是限动运动。在轧件进入孔型之前，芯棒在限动小车的带动下，以恒速  $v_0$  向前运动，同时以角速度  $\omega_0$  作旋转运动。

当轧件被咬入时，芯棒的运动状态处于限动状态，即芯棒向前运动的速度由最初的  $v_0$  调整为  $v_1$ ，芯棒的自身旋转停止，而由轧件对芯棒的抱紧力带动芯棒旋转，故芯棒本身对轧件咬入的影响是阻碍轧件在孔型中的旋转和前进。其具体分析如下。

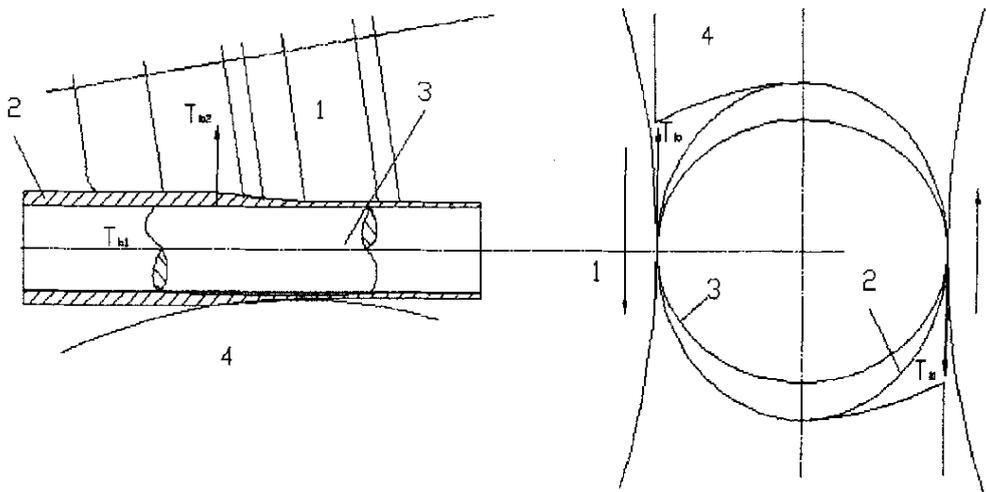


图 2-8 芯棒对轧件的作用力

1— 轧辊 2—轧件 3—芯棒 4—导盘

Fig. 2-8 The force of the mandril to the rolling piece

1-roller 2-rollpiece 3-mandril 4-guide-dish

如图 2-8 所示，咬入时芯棒对轧件的作用力有：轧制线上的摩擦力  $T_{b1}$ ，其方向与轧制方向相反；过芯棒轴心线的抱紧力  $T_{b2}$ ；圆周方向上的摩擦力  $T_b$ ，其方向与轧件的旋转方向相反。

为了确定芯棒本身对咬入条件的影响，首先应确定在轧件给芯棒反作用力的作用下，芯棒产生相应运动所需力的大小，即使芯棒旋转的转动动力矩和使芯棒前进的动力大小。

由轧制工艺条件可知，在轧制过程中，芯棒向前运动的力的大小为限动小车限动力的大小，该力的方向与芯棒本身的运动方式有关，芯棒在孔型中随轧件的旋转而旋转。设轧件的转动惯量为  $J_1$ ，其角加速度为  $\epsilon_1$ ；芯棒的转动惯量为  $J_2$ ，其角加速度为  $\epsilon_2$  (芯棒小车轴承旋转摩擦阻力力矩很小，可忽略不计)。由刚体的定轴转动的微分方程式可知，对于芯棒： $J_2 \epsilon_2 = T_b (D_x / 2)$ ；而对于轧件： $J_1 \epsilon_1 = M - T_b (d_0 / 2)$ 。由运动学可简化为： $\epsilon_1 / \epsilon_2 = D_x / d_0$ ，则有

$$M = [J_1 + J_2 (d_0 / D_x)^2] \epsilon_1 \tag{2-21}$$

$$T_b = (J_2 / d_0) (d_0 / D_x)^2 \epsilon_1 = \epsilon_1 J_2 (d_0 / D_x)^2 \tag{2-22}$$

设轧件和芯棒的质量分别为  $m_0$ ， $m_x$ ，轧件内、外径分别为  $d_{01}$ ， $d_0$ ，芯棒在轧件未咬入前的角速度为  $\omega_0$ ，咬入后为  $\omega_1$ ，从  $\omega_0 \rightarrow \omega_1$ ，所需的时间为  $t$ ，则有

$$\epsilon_2 = (\omega_1 - \omega_0) / t \tag{2-23}$$

$$J_1 = (m_0 / 2) (D_x^2 / 4) \tag{2-24}$$

$$J_2 = (m_x / 2) (D_x^2 / 4) = m_x (D_x^2 / 8) \tag{2-25}$$

将上述各式代入式(2-21)，即可求出芯棒转动动力矩  $M$  的大小。

(3) 旋转条件的建立

由图 2-4 可知，使轧件旋转的条件由下式确定

$$M_T \geq M_P + M_L + M_I \tag{2-26}$$

$$M_P = (T_y - P_y)(d_0 / 2) - (T_z + P_z)E \tag{2-27}$$

$$M_L = 2T_b (d_0 / 2) = T_b d_0 \tag{2-28}$$

$$M_I = [J_1 + J_2 (d_0 / D_x)^2] \epsilon_1 \tag{2-29}$$

式中： $M_T$ —第二次咬入前轧辊带动轧件旋转时的摩擦力矩；

$M_P$ —由正压力产生的阻止轧件旋转的摩擦力矩；

$M_L$ —导盘给予轧件的阻力矩；

$M_I$ —轧件带动芯棒旋转时的惯性矩。

#### (4)前进条件的建立

由图 2-7 可知, 使轧件前进的条件由下式确定

$$T_x \geq T_p + T_L + T_M \quad (2-30)$$

式中:  $T_x$ —第二次咬入前轧辊带动轧件轴向运动的摩擦力;

$T_p$ —正压力的轴向分力;

$T_L$ —导盘上的轴向摩擦阻力;

$T_M$ —芯棒对轧件的轴向摩擦阻力。

## 2.6 分析与结论

在外在条件不发生变化的情况下, 对影响 Accu Roll 轧管机咬入条件的因素分析如下。

### (1)喂入角对咬入条件的影响

由式(2-15)、式(2-17)可知, 当喂入角减小时, 轧件的咬入条件改善, 特别是改善了轧件的旋转条件, 但降低了轧制速度, 即降低了轧管效率; 当喂入角减少过多时, 也可造成轧件在孔型中只旋转不前进的情况, 破坏了咬入条件。故喂入角的调整原则是:在满足生产率的基础上, 尽量减小喂入角。其减小范围应有一定的限制。

### (2)辗轧角对咬入条件的影响

由式(2-15)、式(2-17)可知, 当辗轧角加大时, 增加了使轧件轴向前进的作用力, 改善了轧件的咬入条件。但值得注意的是, 从理论上讲, 一种辗轧角应只对应于一种轧辊辊型。因此, 辗轧角的调整应在允许的调整范围内尽量取上限。

从保证产品质量的角度出发, 在轧制薄壁管和厚壁管时应采用不同的轧辊辊型。适合于轧制薄壁管的轧辊不要用于轧制厚壁管, 以免对轧薄壁管造成困难。

### (3)导盘对咬入条件的影响

如图 2-7 所示, 导盘和导板对轧件的作用力和摩擦力有着本质的区别。在使用导板的情况下, 由于导板固定不动, 因而其总摩擦力  $T_z$  的方向与轧件运动方向相反,  $T_z$  即为轧件螺旋前进的阻力; 在使用主动导盘的情况下, 导盘的圆周速度大于轧件的轴向速度, 此时  $T_z$  的方向发生变化。在一定范围内导盘旋转速度愈大, 对轧件的轴向摩擦力则愈大, 导盘对轧件产生轴向拉力(有利于轧件的咬入)。但该旋转速度过大, 反而降低了对轧件的摩

擦力，从而影响轧件咬入。

#### (4) 芯棒对咬入条件的影响

一方面，芯棒的润滑十分重要，润滑良好的芯棒既可保证钢管内表面光滑，又可减轻对轧件咬入的影响。另一方面，芯棒预旋转装置的存在，也有利于轧件的咬入。 [28] [29] [30] [31] [32] [33]

## 2.7 本章小结

本章介绍了无缝钢管生产的重要工序轧管的设备—轧管机的基本构成及特点，着重论述了轧管机的技术改进及优化产品质量的自动化系统，热轧无缝钢管生产的工艺流程。通过本章可使我们对轧管机构成一个基本了解，为后章轧管机轧制力分析打下基础。

以 Accu roll 轧管机为例，从轧管变形过程开始，分析毛管在轧制过程的运动特点，即在变形区中毛管表面上每一点都作螺旋运动，一面旋转一面前进；分析了轧管过程的咬入条件，并对各种因素对咬入条件的影响作了分析和总结。

## 第三章 Accu Roll 轧管机主机座有限元分析

### 3.1 引言

Ö140 斜轧管机的机架为开式机架。开式机架由于受力和断面形状都相当复杂, 进行精确的计算比较困难。因此, 人们在分析机架时作了大量的简化, 将空间问题简化为平面问题, 忽略了斜轧时产生的轴向力的影响, 使用材料力学方法进行计算分析。由于忽略了轴向力的影响以及材料力学计算方法的特点 (不能进行全场的应力和变形分析), 必然使得计算结果不够精确和全面。现在, 随着弹性有限元理论的飞跃发展, 弹性力学有限单元法已成为目前工程上应力和变形分析的最有力的工具之一。特别是在使用大型通用软件 ANSYS 分析结构方面, 已经取得可喜的成果。实践证明: 使用有限元法分析机架结构方面, 完全可以取得可靠的分析结果。

### 3.2 有限元法的基本思想及 ANSYS 软件的简介

#### 3.2.1 有限元法的基本思想

有限元法的思想最早出现于 20 世纪 40 年代初期, 但是直到 1960 年, 美国的克拉夫在一篇文章中首次使用“有限元法”这个名词。20 世纪 60 年代末 70 年代初, 有限元法在理论上已基本成熟, 并开始陆续出现商业化的有限元分析软件。

有限元法的出现与发展有着深刻的工程背景。20 世纪 40~50 年代, 美、英等国的飞机制造业有了大幅度的发展。随着飞机结构的逐渐变化, 准确了解飞机的静态特性和动态特性越来越显得迫切, 但是传统的设计分析方法已经不能满足设计的需要, 因此工程设计人员便开始寻找一种更加合适的分析方法, 于是出现了有限元法的思想。

如今该方法已经在航空、航天、造船、建筑等方面得到了广泛的应用; 在机械、化工、海洋、水利、核能、地质、生物等方面的应用也在发展中。从力学领域来说, 有限元法除了用来求解一般的线性静力学问题外, 在求

解动力、非线性和各种场问题等方面也有了一定发展。

有限单元法的基本思想是将连续的结构离散成有限数量的单元，并在每个单元中设定有限数量的节点，将连续体看作是只在节点处相连的一组单元的集合体；同时选定场函数的节点值作为基本未知量，并在每个单元中假设一近似插值函数以表示单元中场函数的分布规律；进而利用力学中的某些变分原理去建立用以求解节点未知量的有限元法方程，从而将一个连续域中的无限自由度问题化为离散域中的有限自由度问题。一经求解就可以利用解得的节点值和设定的插值函数确定单元上以至整个集合体上的场函数。

由于单元可以设计成不同的几何形状，因而可灵活地模拟和逼近复杂求解域。显然，如果插值函数满足一定要求，随着单元数目地增加，解的精度会不断提高而最终收敛于问题的精确解。虽然从理论上说，无限制地增加单元的数目可以使数值分析解最终收敛于问题的精确解，但是这却增加了计算机计算所耗费的时间。在实际工程应用中，只要所得的数据能够满足工程需要就足够了，因此，有限元分析方法的基本策略就是在分析的精度和分析的时间上找到一个最佳平衡点。

### 3.2.2 ANSYS 的发展历史及功能

1970年，John Swanson 博士洞察到计算机模拟工程应该商业化，于是创建了 ANSYS 公司。30多年来，ANSYS 公司致力于设计分析软件的开发，不断吸取新的计算方法和计算技术，领导着世界有限元分析技术的发展，并为全球工业广泛接受。ANSYS 第一个版本仅提供热分析及线性分析功能，与今天的版本相比有很大的区别。20世纪70年代初，ANSYS 软件中融入了新的技术以及用户的要求，非线性、子结构以及更多的单元类型被加入到子程序。70年代末，图形技术和交互操作方法的使用使 ANSYS 的程序法得了很大的改善，前后处理技术进入了一个崭新的阶段。今天 ANSYS 软件更加趋于完善，功能更加强大，使用更加便利。

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体，以有限元分析为基础的大型软件。ANSYS 的功能主要包括：建立模型、结构分析、非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、接触分析、压电分析、结构优化。

ANSYS 具有强大的建模功能。建模的时候，需要先建立结构的几何

模型，给出材料的参数和单元类型，最后划分网络，形成结构的有限元模型。建立几何模型有两种方法：自底向上和自顶向下。ANSYS 软件提供了 160 多种单元，分别对应不同的分析类型和不同的材料。ANSYS 提供了自适应网格的划分功能，程序可以自动分析网格划分所带来的误差，根据误差自动细化网格。

ANSYS 软件的分析功能包括结构分析、非线性分析、热分析、电磁场分析、电场分析、流体流动分析和结构的优化分析等。

### 3.3 应用材料力学方法求解机座所受静不定力

应用有限元对 AR 轧管机的主机座进行应力和变形分析，首先应了解轧管机所受的力并计算出它的数值，才能加载到有限元模型上。主机座分别受到轧辊轧制力的水平分力、轧辊轧制力的向下垂直分力、机座盖（由于受到上导盘垂直向上的轧制力和轧辊轧制力向上垂直分力而产生的）的向上拉力、下导盘垂直向下的轧制力和静不定力对机座的作用。静不定力的求解是主机座受力分析的一个难点。

#### 3.3.1 对主机座的结构分析与简化

斜轧轧管机主机座的结构和受力非常复杂，其结构基本可视为箱体结构。从结构上看，大部分地方具有一定的对称性。主要的差别在于两轧辊之间具有一定的倾斜角，致使两边机座上的孔的位置一边高、一边低。两孔中心线位置高低差为 132mm，考虑结构受力相对危险状况，即孔的位置均按高者计算，这样整个机座视为对称结构。

从机座受力分析，载荷是不对称的。过去由于受到有限元计算软件运算能力的限制，进行有限元结构分析时，遇到对称的结构，如载荷是不对称的，把载荷分解为一组对称的和一组反对称的载荷，按半个结构计算两次，分别得出位移和应力，再组合出原结构的位移和应力。这个组合过程需要编程序用计算机计算，相对比较麻烦。因此，由于有限元软件的发展，本文仍然按整体机座进行有限元计算，只是按对称结构把机座分成前后两片机架计算静不定力。

把主机座分成前后两片机架，且两片机架受力相同。由图纸计算可知一片机座受力值列表 3-1。

表 3-1 机座受力值

Tab. 3-1 The suffering force value of the rolling pipe mill main housing

力参数	轧制水平分力 $P_h$	轧制垂直分力 $P_v$	导盘轧制力 $Q$
参数值 (kN)	380	123.6	125

用材料力学方法计算静不定力较困难，因此本次计算作了以下几点简化：

1. 导辊轧制力和导盘轧制力以平面力作用在前后两片机座上；
2. 机座的立柱及下箱体与机座盖的变截面均近似的用等截面代替；
3. 将前后两片机座视为对称，取前片（荒管输入口）机座作为分析和计算对象；
4. 取轧辊轧制力水平分力作用点较高的点为计算点。

这样把机架(主机座和机座盖)简化成如下图 3-1 所示的框图。在图中实线为机座身与机座盖的中性线，各部尺寸如图所示。 $P_h$  为轧辊轧制力的水平分力分到一片机座的作用力； $P_v$  为轧辊轧制力的垂直分力分到一片机座上的作用力； $Q$  为导盘作用到一片机座上的作用力。

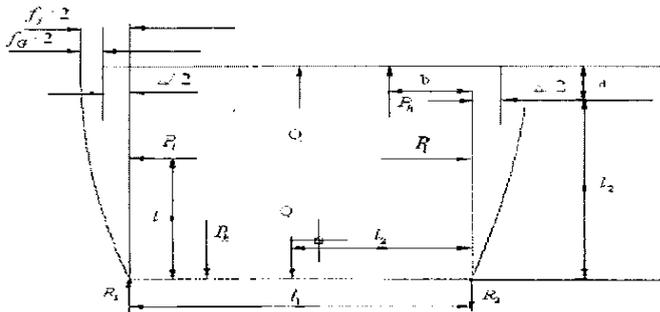


图 3-1 主机座受力、变形及各部尺寸图

Fig. 3-1 The main housing suffers the force、transform and its each size

表 3-2 上图中几何参数计算结果列表

Tab. 3-2 Previous fig parameter calculating results table

几何参数	$l$	$l_1$	$l_2$	$d$	$b$
尺寸 (mm)	969	3050	1525	335	695

机架的主要尺寸如图 3-2 所示

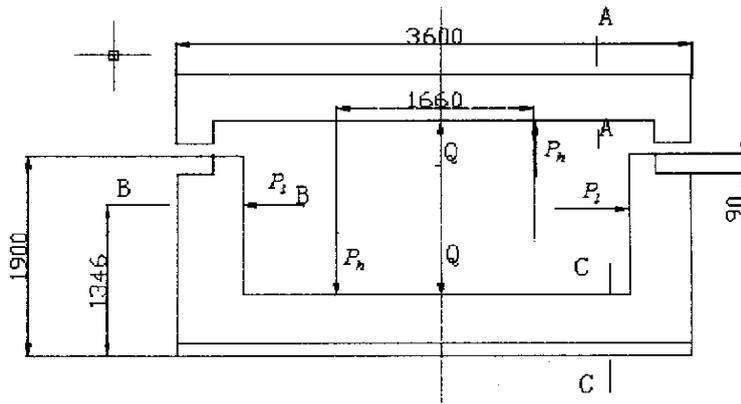


图 3-2 轧管机机架图

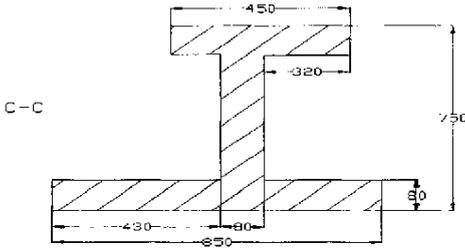
Fig. 3-2 The main housing of the rolling pipe mill

A—A、B—B、C—C 三个截面的面积 ( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ) 和惯性矩 ( $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ) 表

表 3-3 截面的面积和惯性矩

Tab. 3-3 Area and moment of inertia of section

截面形状	面积 $mm^2$	惯性矩 $mm^4$
	548000	27342625356
	208730	16234523654



3.3.2 轧制力水平分力  $P_l$  引起的静不定力  $T_1$

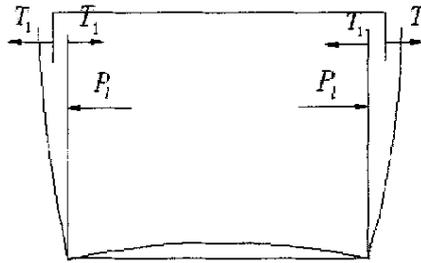


图 3-3 主机座只受  $P_l$  力的变形图

Fig. 3-3 The transforming of the main housing only suffering  $P_l$  force.

由  $T_1$  的变形谐调条件为： $f_{J1} = f_{G1} + \Delta$  (3-1)

式中  $f_{J1}$ —只考虑  $P_l$  力时，主机座在 A 处的变形；

$f_{G1}$ —只考虑  $P_l$  力时，机座盖在 A 处的变形；

$\Delta$ —主机座与机架盖在 A 处（配合处）的间隙；

应用莫尔定理可以求出

$$f_{J1} = \frac{2}{EI_2} \left[ \int_0^{l_2} (-T_1 x) x dx + \int_0^l P_l x (l_2 - l + x) dx \right] + \frac{1}{EI_3} \int_0^h (P_l l - T_1 l_2) l_2 dx$$

$$= \frac{1}{3EI_2} (3P_l l_2 l^2 - 2T_1 l_2^3 - P_l l^3) + \frac{1}{EI_3} (P_l c l l_2 - T_1 l l_2^2)$$
(3-2)

同理可求出机盖在配合处间隙  $f_{G1}$  为

$$f_{G1} = \frac{T_1 l_1}{EA_1} + \frac{1}{EI_1} \int_0^h T_1 d^2 dx = \frac{T_1 l_1}{EA_1} + \frac{T_1 d^2 l_1}{EI_1}$$
(3-3)

因为  $f_{J1} = f_{G1} + \Delta$

$$\text{代入得 } T_1 = \frac{P_1 l^2 [(l_2 - \frac{l}{2}) + \frac{l_1 l_2 I_2}{I_2}] - E \Delta I_2}{\frac{2l_2^2}{3} + \frac{l_1 l_2^2 I_2}{I_3} + \frac{l_1 I_2}{A_1} + \frac{l_1 d^2 I_2}{I_1}} \quad (3-4)$$

机架盖与主机座之间的配合间隙  $\Delta = 0.21$  时，引起的静不定力  $T_1 = 97$  (kN)

### 3.3.3 由轧制力垂直分力 $P_h$ 引起的静不定力为 $T_2$

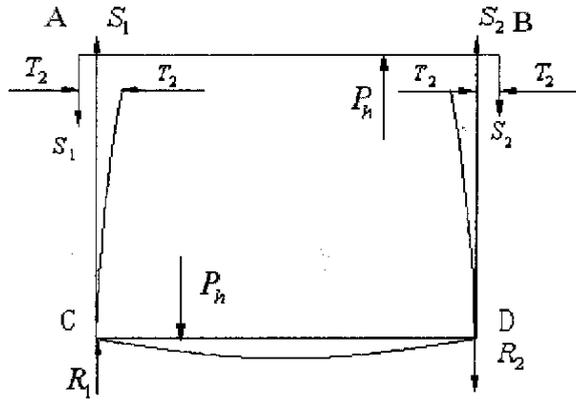


图 3-4 只主机座只受  $P_h$  力引起的变形图

Fig. 3-4 The transforming of the main seat only suffering  $P_h$  force.

静力平衡时求  $S_1$  和  $S_2$ ，取机盖分析有：

$$\sum M_A = 0 \quad S_2 = \frac{P_h(l_1 - b)}{l_1} = 97.6(kN) \quad (3-5)$$

$$\sum M_B = 0 \quad S_1 = \frac{P_h b}{l_1} = 27.5(kN) \quad (3-6)$$

取主机座分析有：

$$\sum M_C = 0 \quad (R_2 - S_2)l_1 + P_h b = 0 \quad (3-7)$$

$$R_2 = \frac{P_h(l_1 - 2b)}{l_1} = 69(kN)$$

$$\sum M_D = 0 \quad (R_1 + S_1)l_1 - P_h(l_1 - b) = 0 \quad (3-8)$$

$$R_1 = \frac{P_h(l_1 - 2b)}{l_1} = 69(kN)$$

求静不定力  $T_2$ ，变形谐调条件为  $f_{J2} = f_{G2} + \Delta$

式中：

$f_{J2}$ —只考虑轧制力垂直分力  $P_h$  时，主机座在配合处的变形；

$f_{G2}$ —只考虑轧制力垂直分力  $P_h$  时，机座盖在配合处的变形；

应用莫尔定理可以求出  $f_{J2}$  为

$$\begin{aligned} f_{J2} &= \frac{1}{EI_3} \left[ \int_0^b S_1 x l_2 dx + \int_0^{l_1-b} S_2 x l_2 dx + \int_0^b (-R_1 x l_2) dx + \int_0^{l_1-b} R_2 x l_2 dx \right] \\ &+ \frac{1}{EI_3} \int_0^{l_1} (-T_2 l_2^2) dx + \frac{2}{EI_2} \int_0^{l_2} (-T_2 x^2) dx \quad (3-9) \\ &= \frac{P_h b l_2 (l_1 - b)}{2EI_3} - \frac{T_2 l_2^2}{E} \left( \frac{l_1}{I_3} + \frac{2l_2}{3I_2} \right) \end{aligned}$$

同理可以求出  $f_{G2}$  为

$$f_{G2} = \frac{1}{EI_1} \left[ \int_0^{l_1-b} \left( T_2 d + \frac{P_h b}{l_1} x \right) ddx + \int_0^b \left( T_2 d + \frac{P_h (l_1 - b)}{l_1} x \right) ddx \right] + \frac{T_2 l_1}{EA} \quad (3-10)$$

代入  $f_{J2} = f_{G2} + \Delta$ ，当  $\Delta = 0.21$  时

$$T_2 = -1.6(\text{kN})$$

### 3.3.4 由导盘力 Q 引起的静不定力 $T_3$

取机盖分析计算  $S_1$  和  $S_2$

$$\sum M_B = 0 \quad S_1 = Q \frac{l_1}{2} / l_1 = 62.5(\text{kN}) \quad (3-11)$$

$$\sum M_A = 0 \quad S_2 = Q \frac{l_1}{2} / l_1 = 62.5(\text{kN}) \quad (3-12)$$

计算  $R_1$  和  $R_2$  力取机架作为分析对象

$$\sum M_D = 0 \quad (R_2 + S_2) l_1 - Q \frac{l_1}{2} = 0 \quad (3-13)$$

$$R_2 = 0$$

$$\sum M_C = 0 \quad (R_1 + S_1) l_1 - Q \frac{l_1}{2} = 0 \quad (3-14)$$

$$R_1 = 0$$

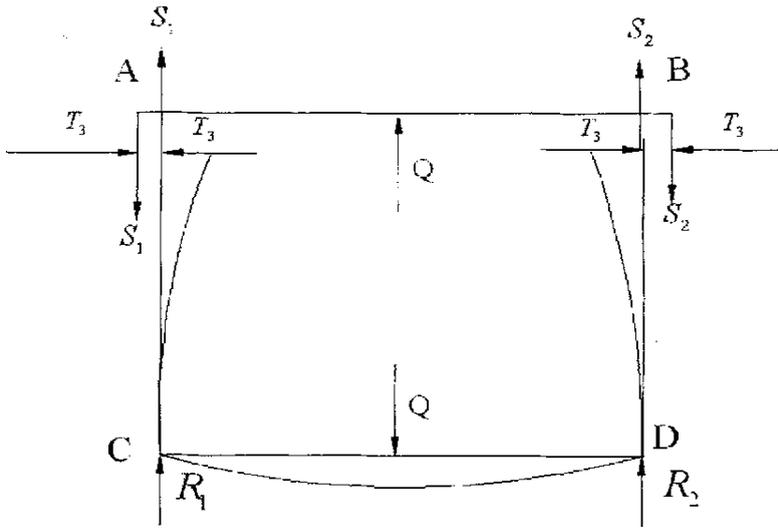


图 3-5 主机座只受 Q 力引起的变形图

Fig. 3-5 The transforming of the main housing only suffering Q force.

求静不定力  $T_3$ ，变形谐调条件为  $f_{j3} = f_{G3} + \Delta$

式中：

$f_{j3}$ —只考虑导盘存轧制力 Q 时，主机座在配合处的变形；

$f_{G3}$ —只考虑导盘存轧制力 Q 时，机座盖在配合处的变形；

应用莫尔定理可以求出  $f_{j3}$

$$f_{j3} = \frac{2}{I_2} \left[ \int_0^{l_2} (-T_3 x) x dx \right] + \frac{2}{EI_3} \left[ \int_0^{\frac{l_1}{2}} (-T_3 l_2) l_2 dx \right] + \frac{1}{EI_3} \left[ \int_0^{\frac{l_1}{2}} (S_1 + R_1) x l_2 dx \right]$$

$$= \frac{2}{EI_3} \frac{(S_1 + R_1) l_2 l_1}{4} - \frac{2T_3}{E} \left( \frac{l_2^3}{3I_2} + \frac{l_2^2 l_1}{2I_3} \right)$$

(3-15)

同理可求出  $f_{G3}$  为

$$f_{G3} = \frac{2}{EI_1} \left[ \int_0^{\frac{l_1}{2}} (T_3 d + S_1 x) dx \right] + \frac{T_3 l_1}{EA_1} = \frac{S_1 d l_1^2}{4EI_1} + \left[ \frac{d^2 l_1}{EI_1} + \frac{l_1}{EF_1} \right] T_3 \quad (3-16)$$

当  $\Delta = 0.21$  时，  $T_3 = -3.7$  (kN)

$T_2$  与  $T_3$  为负值说明  $T_2$  与  $T_3$  力方向与假设力方向相反。

### 3.3.5 主机座总静不定力 2T

作用在一片机座上的静不定力  $T = [T_1 - (T_2 + T_3)] = 102.3$  kN (3-17)

则作用在主机座总静不定力  $2T = 204.6$  kN

## 3.4 机座有限元计算模型的建立

### 3.4.1 建立实体模型

机座实体模型的建立有两种方式：由 pro/E 建立实体导入到有限元软件 ANSYS 中或由 ANSYS 软件直接建立实体模型。由 pro/E 建立实体模型方便简单，一般实体用 pro/E 建模导入 ANSYS 中运算都很适合，但本机座结构特别复杂，导入 ANSYS 中运算产生一些麻烦，反而不如由 ANSYS 直接建模（尽管 ANSYS 建模比 pro/E 麻烦一些）运算方便。因此本文采用 ANSYS 直接建立实体模型。机座采用铸钢材料的弹性模量  $E=210\text{Gpa}$ ，材料的泊松比  $\nu=0.3$ 。

### 3.4.2 对模型施加载荷、约束及进行网格划分

有限元的加载过程是 ANSYS 分析中非常重要的部分，它主要包括确定分析类型、施加载荷到实体模型。本课题主要是研究静态下的机座的变形和应力集中处的受力情况，所以选择静态分析类型。机座受力在前面求静不定力时说过有四个轧辊轧制水平分力  $F_i$  分别作用在四个压下螺丝内孔壁上；四个轧辊轧制力的垂直分力  $F_{i\perp}$ ，其中在轧辊高处的两个垂直分力  $F_{i\perp}$  垂直向上作用到机盖上，通过机盖反作用到机座上，另两个在轧辊低处产生的垂直分力  $F_{i\perp}$  向下直接作用在机座上；两个下导盘轧制力  $Q$  向下作用在机座上，两个上导盘轧制力  $Q$  向上作用在机盖上，通过机盖作用在机座上；静不定力  $2T$  作用在机座与机盖配合处的机座配合面上。应该指出的是作用在机座上的载荷均为面力，因此轧制力与所施加载荷的换算关系是：

$$F/A=P$$

式中  $F$ —轧制力（单位：牛顿）

$A$ —面积（单位：平方毫米）

$P$ —压强，也就是作用于模型的面力（单位：兆帕）

确定了机座的载荷后，确定机座的边界条件。由于机座通过六个地脚螺栓与地基固定，因此六个地脚处沿  $X$  方向、 $Y$  方向、 $Z$  方向都是  $0$  位移约束。

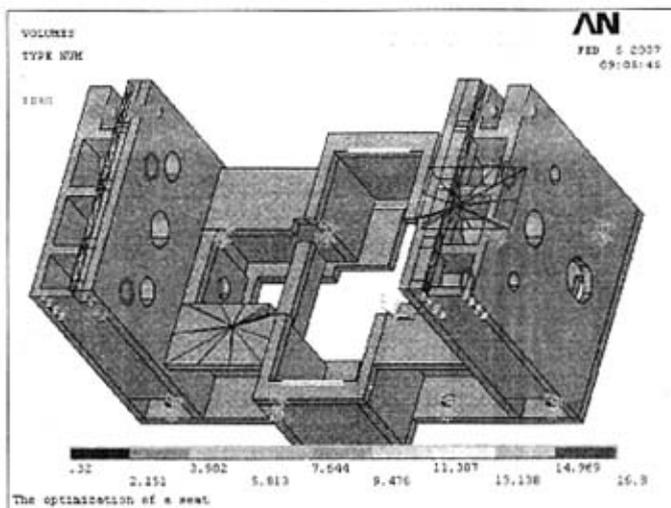


图 3-6 主机座受力及约束图

Fig. 3-6 The suffering force and restriction of the main housing

由图 3-6 我们从图形的颜色可清楚看出轧管机主机座所受压强的数值及位置，还有八个地脚螺栓孔的约束情况。

四个红圈是轧辊轧制水平分力  $P_h$  分别作用在四个压下螺丝内孔壁上的压强为 16.8MPa；在机座箱板上的两个蓝色平面是轧辊轧制垂直分力  $P_v$  作用在平面上的压强为 0.32MPa；机座箱板上的两条黄色长条是下导盘轧制力  $Q$  产生的压强为 12.5MPa；机座两侧立柱上两个蓝色长条是静不定力  $2T$  产生的压强为 1.96MPa；立柱上的捌个黄色和捌个绿色的螺纹孔及立柱后面蓝色的销孔是轧辊轧制力的两个分力  $P_h$  及上导盘轧制力  $2Q$  垂直向上作用到机盖上，通过机盖反作用到机座上的力产生的压强；分别为左侧捌个绿色螺纹孔压强是 6.65MPa，右侧捌个螺纹孔压强是 10.6 MPa，后面左侧销孔压强是 3.95 MPa,后面右侧销孔压强是 2.47MPa。

实体模型建立之后，对机座进行网格的划分。首先定义单元的类型，机座的体单元采用的是 10 个节点的 SOLID92 四面体单元。然后划分网格，这一步非常重要，主要用于定义对象元素的大小和数目，它将直接影响分析时的正确性和经济性。网格的划分方式有自由网格和对应网格两种，采用对应网格的划分使计算更加精确。由于本机座体积很大，结构复杂，采用对应网格划分繁琐，所以采用自由网格划分。

图 3-7、图 3-8、图 3-9 是主机座各个方向带网格的图，从这些图中可知主机座的形状和网格划分情况。

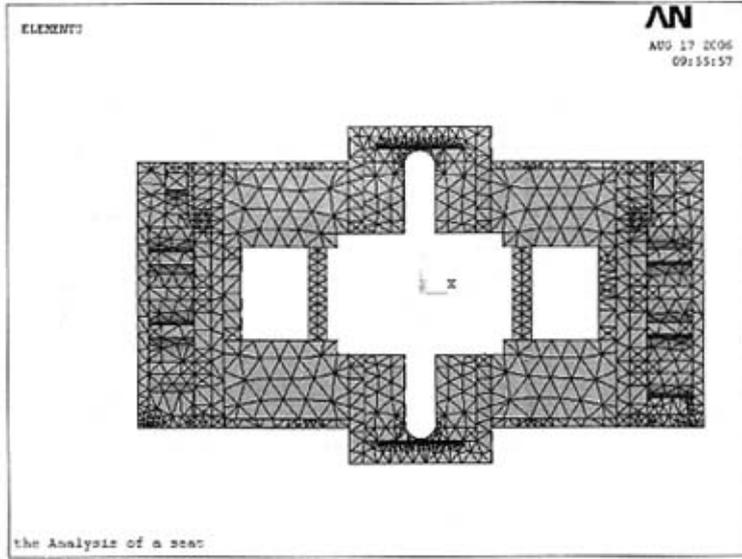


图 3-7 轧管机主机座俯视图及网格

Fig. 3-7 The bow and grid of the rolling pipe mill main housing

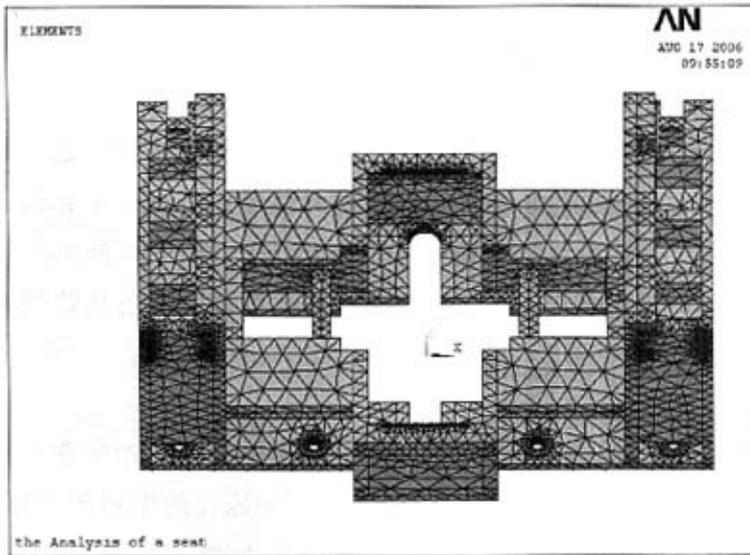


图 3-8 轧管机主机座立体图及网格

Fig. 3-8 The solid and grid of the rolling pipe mill main housing

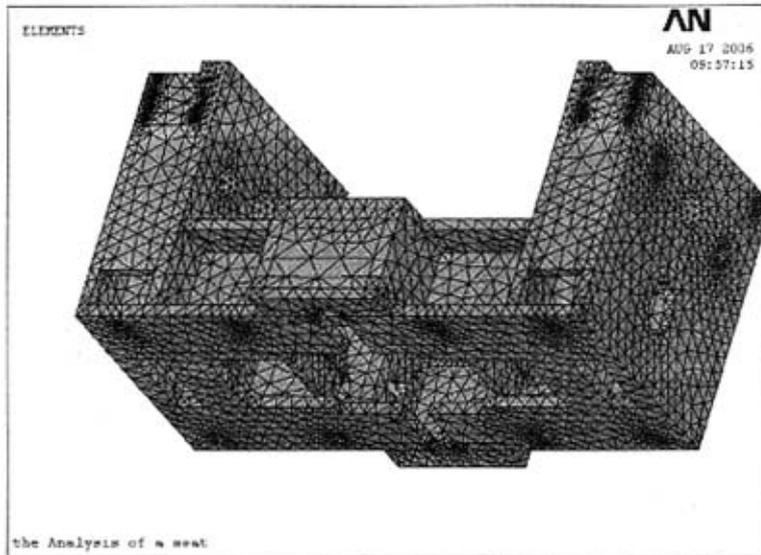


图 3-9 轧管机主机座立体图及网格

Fig. 3-9 The solid and grid of the rolling pipe mill main housing

### 3.4.3 机座有限元计算求解和结果分析

求解后，在 ANSYS 的通用后处理器进行数据的处理，这也就是后处理过程。后处理的结果可以用图形和列表两种形式进行表示。机座的变形情况用位移云图、机座的受力情况用等效应力图。图中不同的颜色代表不同的数值，蓝色代表较小数值，红色代表较大数值，颜色从蓝到红代表数值逐渐增大。

#### (1) 机座应力分析。

从主机座等效应力图 3-10 上可看出最大等效应力产生在主机座两侧立柱与箱体上表面接合处，其次应力集中在地脚螺栓的中间四个螺孔处。最大应力值及其它应力值可从结点应力值列表中查出。

轧管机主机座最大应力值为 43.771MPa，位于主机座两侧立柱与箱体上表面接合处，呈两条带状分布。根据一般设计规范<sup>[49]</sup>，采用 ZG270-500 制造的机座，许用应力对于中间箱体 $[\sigma] \leq 60.0 \sim 70.0 \text{MPa}$ ；对于两侧立柱来说 $[\sigma] \leq 40.0 \sim 50.0 \text{MPa}$ 。从计算结果分析，最大应力值  $43.771 \leq [\sigma]$ ，因此说本机座是安全的。

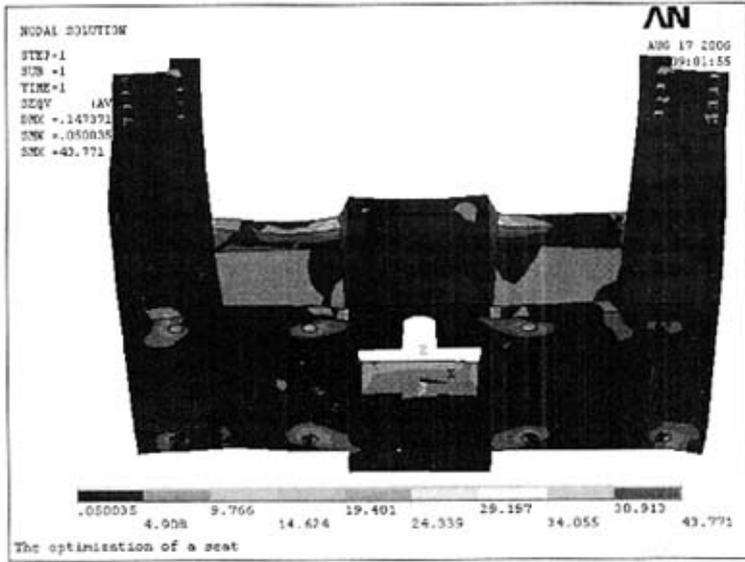


图 3-10 主机座等效应力图

Fig. 3-10 The equivalent stress of the rolling pipe mill main housing

(2)机座变形分析。

从机座的结构和作用来分析，机座立柱顶部以及侧压进螺孔处的刚度大小，最为设备设计师和工艺工程师所关心。从机座受力分析，这两点的变形也是相对大的。从位移云图上可以直观看出机座立柱向两侧外移，机座箱向上微微的隆起。这是由于主机座受静不定力、轧辊轧制水平分力、轧辊轧制垂直分力、下导盘轧制力和上盖拉力共同作用的结果。

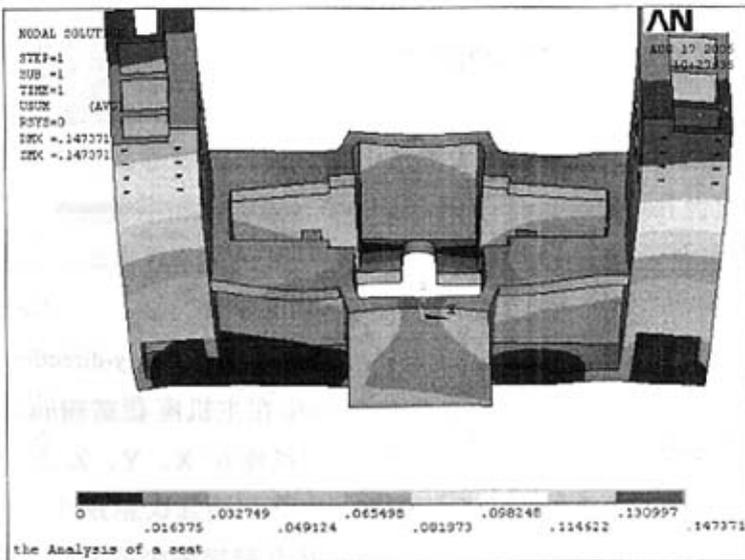


图 3-11 主机座位移云图

Fig . 3-11 The displacement nephogram of the main housing

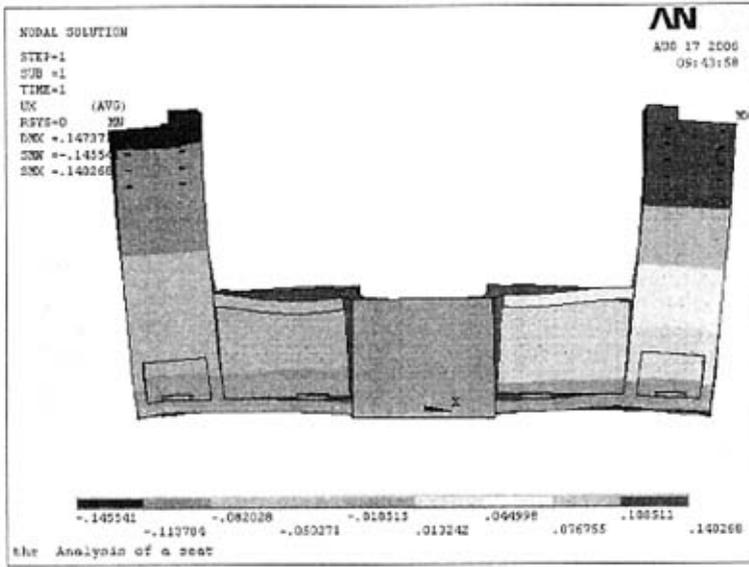


图 3-12 主机座 X 方向变形图

Fig . 3-1 The deformation of the main housing along X-direction

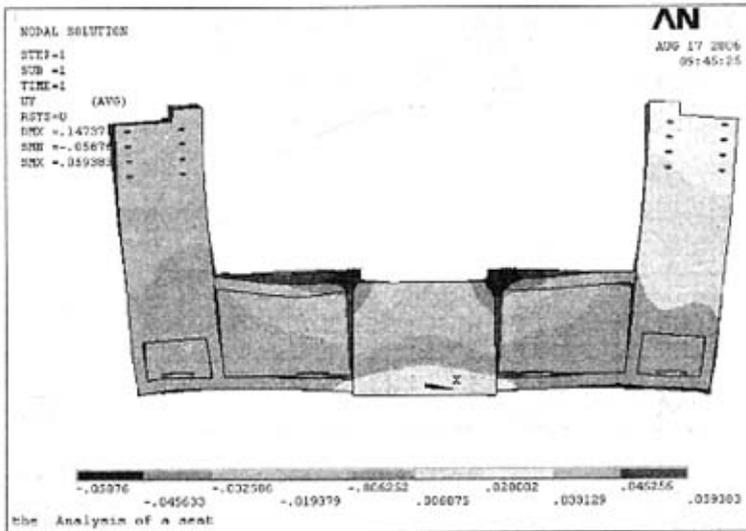


图 3-13 主机座 y 方向变形图

Fig . 3-13 The deformation of the main housing along y-direction

从主机座位移云图可看出最大位移部位在主机座右立柱的前角和左立柱的后角，最大位移为 0.147mm。比较主机座在 X、Y、Z 方向变形图可知，主机座在 X 方向变形量最大为：

$$X=0.140268-(-0.145541)=0.285809\text{mm}$$

对于机架的许用变形量没有一个确定的标准，X 方向变形量很小在下

一道定径工序上完全可以得到纠正，因此满足刚度要求。

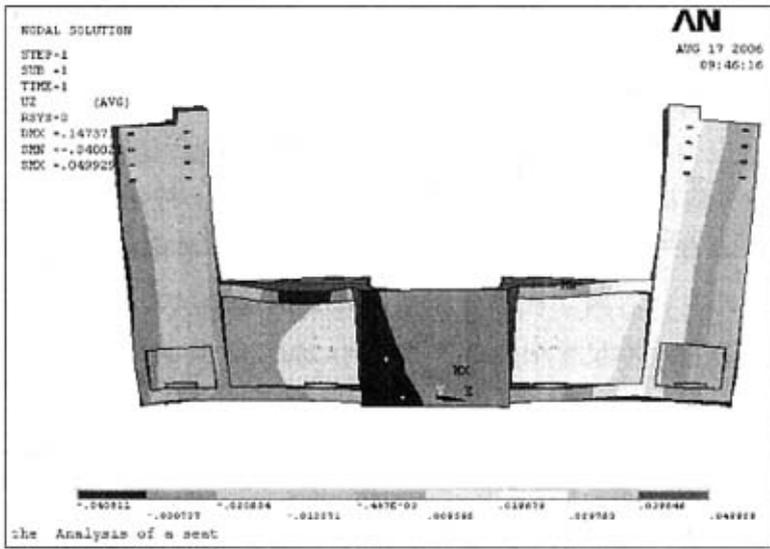


图 3-14 主机座 z 方向变形图

Fig. 3-1 The deformation of the main housing along z-direction

### 3.5 主机座分体铸造焊接

斜轧管机主机座结构复杂，体积比较庞大，长近 4 米、高近 2 米，重达 20 吨。一般铸造厂很难铸造成形，只有大型铸造厂能够生产。斜轧管机由于投资少、见效快，适合于中、小企业，而中、小企业由于资金等原因，又较难找到适合的铸造厂家。这样中、小企业强烈需求将轧管机主机座由整体机座变为组装或焊接机座。而且将机座在满足强度和刚度的情况下分体铸造，不仅易于铸造，而且便于搬运。机座毛坯还可以在分体情况下进行粗加工，在整体情况下进行精加工，便于工艺安排，节约加工费用。从料质和结构方面出发，采用轧钢机焊接机架的方法，制定分体铸造、焊接成形的方案。

#### 3.5.1 主机座分体铸造

从主机座有效应力云图可看出，主机座应力比较大的值主要在各面力施加处；底面中间四个固定螺孔及上箱水平板与装导盘箱接合处；两侧立柱与箱体上表面接合处。

从主机座位移云图可看出机座变形主要集中在两侧立柱上，在两侧立柱上变形从上至下逐渐减小。下面箱体的变形远小于立柱上的变形。从 X、Y、Z 方向变形来看，X 方向的变形远远大于 Y、Z 方向的变形，且变形也主要发生在两侧立柱上。

从以上应力和应变分析知分割部位应选在箱体上。根据轧管机主机座尺寸和形状，将机座分成三部分铸成。在主机座中心线沿 X 方向两侧各一米的地方用垂直于 X 轴的截面将机座分成三部分。在截面处的尺寸分别缩小 10mm，即左、右两立柱部分在截面处分别缩小尺寸 10mm，中间部分在两侧截面分别缩小尺寸 10mm，即缩小 20mm，作为焊接间隙。

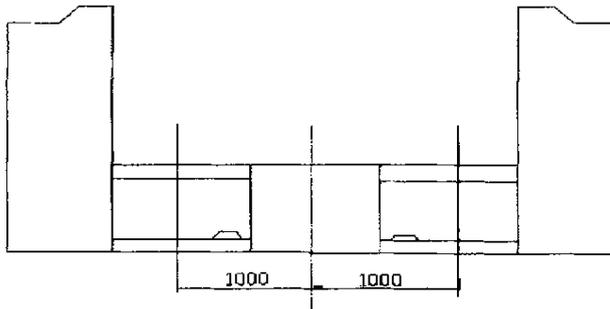


图 3-15 主机座分割位置示意图

Fig. 3-15 The partition position sketch of the main housing

### 3.5.2 主机座焊接方式

电渣焊简介：

(1) 焊接过程。利用电流通过液体熔渣所产生的电阻热进行焊接的方法称电渣焊，根据使用的电极形状，可分为丝极电渣焊、板极电渣焊、熔嘴电渣焊等。焊前先把工件垂直放置，在两工件之间留有约 20~40mm 的间隙，在工件下端装有起焊槽，上端装引出板，并在工件两侧表面装有强迫焊缝成型的水冷成形装置。开始焊接时，使焊丝与起焊槽短路起弧，不断加入少量固体焊剂，利用电弧的热量使之熔化，形成液态熔渣，待渣池达到一定深度时，增加焊丝送进速度，并降低焊接电压，使焊丝插入渣池，电弧熄灭，转入电渣焊接过程。

(2) 特点和应用。它主要用于焊接厚壁压力容器、大型铸-焊结构、锻-焊结构或厚板拼焊，还可用于堆焊轧辊、高炉料钟等大型工件。电渣焊可焊接低碳钢、低合金钢、中碳钢、某些不锈钢和纯铝等。电渣焊生产效率

高，焊缝金属缺陷少，劳动卫生条件好，是重型机械製造中重要的焊接方法之一。它具有优质、高效、低成本等优点，缺点是接头过热严重，焊后一般需经正火处理。一般宜焊接板厚在 30mm 以上的金属材料。

主机座壁厚一般在 70~80mm, 参与焊接的壁厚为 80mm，属于厚板焊接，因此采用电渣焊，焊缝宽度 20mm。

### 3.6 本章小结

本章首先介绍了应用有限元 ANSYS 分析轧管机主机座的应力和应变的理由，简单介绍了有限元 ANSYS 的基本思想、发展历史和基本功能；应用材料力学方法求解了机座的静不定力；通过有限元 ANSYS 建立了机座的实体模型，在模型上加载力、确定约束条件、划分网格、计算求解和结果分析，证明主机座满足强度和刚度的要求；通过对应力和应变的分析，确定了主机座分体铸造的数量和具体分割位置以及焊接工艺方法。

## 第四章 电子测量电路设计及误差消除

### 4.1 电测量技术<sup>[48]</sup>

在机械工程测量中，大多数测量为非电量测量，如力、位移、速度、噪声等等。将非电量转变为电量，运用电量的测试技术对其进行记录分析，称为非电量的电测技术，简称电测量技术。电测量技术与其他测量技术相比，具有准确、灵敏、能连续测量、便于自动记录和分析，可与电子计算机和微处理机连接做成智能化仪器等优点，因而是机械工程中的一种主要测量方法。一个完整的电测量系统通常由传感器、测量电路与放大器、记录仪、指示器、数据处理分析仪等几个部分组成。

传感器是整个测量系统的最初输入环节，它获得数据的正确与否决定了测量系统的精度。因而对传感器的性能一般有下列要求：

- (1)输入、输出有良好的线性关系，且灵敏度高。滞后、漂移误差小。
- (2)使用维修方便，对被测物或被测状态影响小。内部噪声小，不易受外界的干扰。
- (3)能耗低。在实际应用中，使用者应根据测试的目的、环境、测量的精度等具体要求，综合考虑，合理选用传感器。

### 4.2 金属结构应力、应变测量

应力、应变测量是机械工程测试技术中应用最广泛的测量方法，其目的是掌握被测体的实际应力大小及分布规律，进而分析结构的破坏原因，寿命长短，强度储备；验证相应的理论计算，合理安排工艺；提供生产过程或属物理现象的数学模型；同时它也是设计制造用于测试许多机械量的各种应变式传感器的理论基础。应力测量可分为单向应力测量和平均应力测量，前者可用单个应变片测量，后者一般要采用应变花测量。对于每个具体问题一般都可按下面步骤进行：对被测件进行应力应变分析—确定贴片方式—确定组桥方式—根据测得数据进行结果计算。

### 4.2.1 金属结构应力测量的任务

金属结构体的理论计算是根据简化了力学模型来进行的，实际体受力情况要复杂得多。因此，要求出较为真实的结构内力，就必须进行结构的应力应变测量。应力应变测量主要有以下几个方面：

#### (1)校核性测量

校核性测量的目的主要是验证强度计算的结果。通常情况是测量那些理论分析不成熟处或某些特定点的应力。例如，新产品样机试制完成，验证其是否达到设计要求。

#### (2)改进性测量

改进性测量主要是找出结构破坏的原因或结构破坏性试验。测量重点是确定结构的最大应力。

#### (3)节约性测量

节约性测量的目的是为了节约材料或减轻设备重量，其重点应放在测定那些强度储备较大的结构上。

#### (4)优选性测量

为了比较几种设计方案的优劣，只须选取几种产品（或模型）几个对应点处进行应力测量就可以了，而不必进行全面测量。

#### (5)增潜性测量

增潜性测量主要是针对老产品或进口的某些设备，其结构件可能有潜在的承载能力，经过应力测试确认后，对设备进行适当的改造，就可以挖掘利用其潜力。

#### (6)其他特殊要求的应力测试。

### 4.2.2 测量截面的选择与应变片的布置原则

应力应变测量中，首先遇到的问题就是应该测哪些截面；截面上测点如何布置以及应布置几枚应变片等。

#### (1)测量截面的选择原则：

1. 设计计算书（含内力图）提供的应力较大的截面；
2. 受力分析中承载较大的截面；
3. 有损伤或曾经发生过损伤的截面；

4. 具有代表性，便于分析与计算的截面。

现场测量中，应选取对布置应变片这一工作是安全和方便的截面。在满足测量目的的前提下，测量截面宜少不宜多，以便突出重点，提高效率，保证质量。

(2)测量截面上的应变片的布置原则

1. 主应力方向已知

轴向受力件—应变片可在截面上、下或左、右沿轴向布置。

受弯件—最大弯矩处截面的边缘或四角沿轴向布置。

受弯矩与轴向力共同作用件—截面上四角不少于四片轴向布置的应变片。

2. 主应力方向未知

正应力与剪应力共同作用的区域，截面形状不规则或有突变处。这些部位的主应力的大小、方向都是未知的量，应力应变测量时，应选取用三片  $45^\circ$  或三片  $60^\circ$  的应变花。

4.2.3 电阻应变片灵敏系数 K 的误差及确定方法

在应变电测试验中，由于受很多因素的影响，总是存在着误差，为了在测试中能够获得较高的精度和可靠性，必须掌握误差分析的基本知识及方法，找出误差可能产生的原因和它们的规律，设法减少误差对测量结果的影响。

所谓灵敏系数，是指单位应变所引起的应变片阻值的相对变化，可由下式表示

$$K = \frac{\frac{\Delta R_x}{R}}{\frac{\Delta L_x}{L}} = \frac{1}{\varepsilon_x} \frac{\Delta R_x}{R} \tag{4-1}$$

式中：  $\varepsilon_x$ —平行于应变丝方向的应变；

$\frac{\Delta R_x}{R}$ —由  $R_x$  引起的电阻相对变化。

由于应变片丝栅横向应变  $\varepsilon_y$  也能引起电阻的变化，产生了横向效应，故实际电阻变化为

$$\frac{\Delta R_x}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y \tag{4-2}$$

由材料力学知,  $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x$ , 所以铭牌的电阻应变片的灵敏系数  $K$  为

$$K = \frac{1}{\varepsilon_x} \frac{\Delta R_x}{R} = \frac{K_x \varepsilon_x - \mu K_y \varepsilon_y}{\varepsilon_x} = K_x - \mu K_y \quad (4-3)$$

若以横向效应系数  $C$  来表示  $K_x$  与  $K_y$  的关系, 即

$$C = \frac{K_y}{K_x}$$

$$\text{故} \quad K = (1 - \mu C) K_x \quad (5-4)$$

#### 4.2.4 电测应力实验中应变片的粘贴技巧<sup>[50]</sup>

在电测技术中, 应变片的粘贴质量的优劣对测量的可靠性影响很大, 是一个非常关键性的环节, 必须予以注意。为提高电测结果的准确性, 我们应在应变片的粘贴做到认真操作, 一丝不苟。

在选取好应变片准备粘贴之前, 我们应对应变片作严格仔细地检查, 检查的内容包括:

1. 应变片的外形检查, 即检查应变片是否存在断路、短路现象, 片中各部位是否有损伤、折断发生, 片中是否夹有气泡或霉变现象等等。应变片电阻值的检测。为保证使用的应变片的电阻值误差不超过允许范围(这个范围通常在加减  $0.5 \Omega$ ), 可事先用精度较高的欧姆表或采用直流电桥对其进行检测, 以免因同组使用的应变片的阻值误差太大而造成测量结果欠佳。

2. 检查应变片上是否有中心线。若无, 则应在其基盖上补画出纵、横线条, 这样可方便粘贴应变片。与此同时, 被测试件的表面上应画出定位线, 以确保应变片的粘贴到位。若被测试件的表面质量不高, 将会影响应变片的粘贴, 为此, 我们应对试件粘贴表面进行打磨以清除被测点处的氧化皮及污垢, 再用细砂皮纸在试件粘贴部位(一般应大于应变片面积  $3 \sim 5$  倍左右的面积)进行打磨, 以保证表面的足够光滑, 从而保证应变片能牢固顺利地粘贴。粘贴应变片前, 还需用脱脂棉球蘸上清洁剂, 如丙酮、无水酒精、四氯化碳等溶剂擦洗被测点处的油污, 直至棉球上无明显油渍为止, 且注意此时不要用手触摸清洗后的表面。然后在应变片的粘贴面涂上一层胶水, 一般宜薄不宜厚。将应变片的方位线对准事先在试件上的划线, 此时应密切注意应变片的方位线与试件的划线是否重合, 这时可在应变片上盖上一层透明纸(或蜡纸), 一只手捏住应变片的引出线, 另一只手的

手指反反复复轻轻滚压透明纸表面,以使将里面多余的胶水和气泡挤出后,还应保持手指不动约一分钟左右,以保证应变片粘贴牢固。

粘贴后的应变片可让其在室温中自然干燥 15~24 小时。为节省时间,也可在自然干燥数小时后,用红外线灯进行烘烤,但温度应控制在不超过  $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$  之间。若一开始就烘烤,则应变片敏感栅材料的电阻系数将会随温度的骤然变化而变化,这对于后面的测试工作不利。

上述工作完成后,还应对应变片的粘贴质量进行检查,例如可通过放大镜观察应变片的位置和方位角是否准确,粘贴表面有无气泡,应变片是否粘贴牢固,用万用表测量应变片有无断路、短路现象。若无异常,则再用低压变阻表测量应变片的引出线和金属试件之间的绝缘电阻是否符合要求,这一阻值通常应达到  $100 M\Omega$  以上才可用。

3. 接下来,我们在应变片的引出线附近粘贴一片接线端子,同时在引出线下面粘贴一层绝缘胶布,此举意在保证引出线焊点处绝缘。然后将测量导线的一端靠近应变片的引出线,在测量导线焊接端去皮约 3mm 并涂上焊锡后,用电烙铁将应变片引出线与测量导线焊接。焊接时要快且准,以免产生氧化物而影响焊接质量。

应变片接好导线后应立即在应变片的焊接端子处涂上一层防护层,以其进行防湿、防潮、防老化处理,短期防护可采用凡士林作防护剂。

## 4.3 静态应力应变的测量技术及误差分析 [51] [52]

### 4.3.1 静态应力应变的测量技术

#### (1) 应变计栅长选择

应变计是以栅长范围内的平均应变来表示这一长度内某点的应变的。其误差由栅长大小和应力应变梯度决定。

#### (2) 粘贴方向的影响

应变计粘贴的方向如果与测点要求的方向不重合,则会给测量结果带来误差,与主应变方向夹角愈大,误差也愈大。在粘贴应变计时,应力求减少方向偏差。如采用同一基底上有多轴敏感栅的应变花则有助于粘贴方向的准确性。

#### (3) 应变计横向效应的影响

应变计工作特性之一是横向效应系数  $H$ ，它是横向灵敏系数和轴向灵敏系数之比，一般应变计  $H < 3\%$ ，修正方法是在主应力方向分别粘贴应变计或用应变花，得到应变值代入横向效应的修正公式即可得出实际应变。

#### (4)长导线影响及其修正

应变测量中如结构尺寸很大或由安全考虑测量仪器需距离结构件有很大距离（如压力容器充压的应力测量），这就需要很长导线连接应变计和测量仪器。这时导线电阻  $R_L$  与应变计电阻  $R$  相比不可忽略，导线分布电容也较大这将影响应变测量结果，导线电阻存在会使应变测量值偏小，可按不同桥路用不同公式进行修正。

### 5.3.2 静态应力应变测量的误差分析<sup>[52]</sup>

应力应变测量从测量系统组成来看，它由应变计、导线和测量仪器三部分组成，在分析测量误差时必须分别加以考虑。

#### (1)电阻应变计

对于正确选择和安装并正常温度补偿的应变计，基本消除了由于粘贴方向不准以及热输出等影响，引起测量误差的主要原因是应变计灵敏系数分散、机械滞后、蠕变等工作特性，其中  $K$  的分散属于随机误差，由厂家给出。应变计横向效应引起的系统误差，可用公式进行修正，修正时需已知应变计  $H$  及厂家测定  $K$  时所用梁材料的泊松比  $\mu_0$ 。若应变计产品说明中未提供  $H$  和  $\mu_0$  可向厂家索取。

#### (2)导线

导线电阻影响可按公式修正，此外还有导线分布电容、湿度引起绝缘防护以避免绝缘电阻变化，保证导线接头的接触稳定，并采用三线布置导线以消除导线受温度影响。采取以上措施后导线引起的测量误差将很小。

#### (3)应变测量仪器

静态应变测量仪器主要的工作特性是基本误差和稳定性，一般国产静态应变仪基本误差为  $\pm 0.1\% \sim \pm 1\%$ ，稳定性为 4 小时内零漂  $(1 \sim 5) \mu m/m$ 。测量前应检测测量仪器的基本误差和稳定性。国外的静态电阻应变仪或数字式应变测量系统一般基本误差为  $0.05\% \sim \pm 0.1\%$ ，但稳定性一般为  $(1 \sim 2) \mu m/m$ 。为了消除操作者或仪器的读数误差，通常在静态应变测量时要求重复加载 2~3 次，取平均值。

### 4.4 电阻应变方法浅析

在解决结构的应力应变分析时，实验应力应变分析是与理论应力应变分析相并列的一个重要分支。应力应变电测技术是实验应力应变分析方法中应用最广泛和适用性最强的方法之一。电阻应变测量依据电阻丝的电阻率随电阻丝的变形而变化的关系，把力学参数转换成与之成比例的电学参数，通过测量电学参数并依照一定的比例关系将其转换成试件的应变值。笔者综合考虑了温度、磁场对测量的影响，对导线电阻引起的误差进行了修正，推导了精确的应变计算公式，消除了通常的应变计算公式中包含的线性误差。

#### 4.4.1 电阻应变测量分析与设计

由于机械应变一般都很小，要把微小应变引起的微小电阻变化测量出来，同时要把电阻相对变化  $\Delta R/R$  转化为电压或电流的变化。因此，需要设计专用于测量应变变化而引起电阻变化的测量电路，本方法采用了直流电桥。

##### (1) 直流电桥平衡条件

如图所示， $E$  为电源， $R_1, R_2, R_3$  为桥臂电阻， $R$  为负载电阻。当  $R \rightarrow \infty$  时，电桥输出电压为

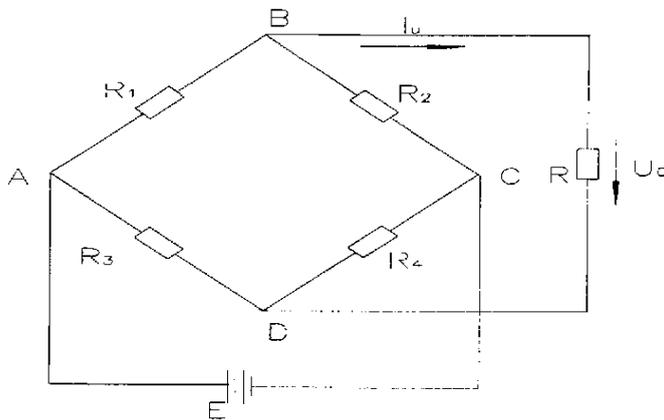


图 4-1 直流电桥

Fig. 4-1 DC bridge circuit

$$U_0 = E \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] \quad (4-5)$$

当电桥平衡时,  $U_0=0$ , 有

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \text{ 或 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (4-6)$$

### (2)直流电桥工作原理

应变片工作时, 若应变片电阻  $R_1$  变化为  $R_1 + \Delta R_1$ , 其他桥臂固定不变, 则桥路不平衡输出电压为

$$U_0 = E \left[ \frac{R_2}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] = E \frac{-\frac{R_4}{R_3} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left[ 1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R} \right] \left[ 1 + \frac{R_4}{R_3} \right]} \quad (4-7)$$

设桥臂比  $n=R_2/R_1$ , 由于  $\Delta R_1 \ll R_1$ , 分母中  $\Delta R_1/R_1$  可忽略, 并考虑到平衡条件  $R_2/R_1=R_4/R_3$ , 则上式可写为

$$U_0 = -E \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (4-8)$$

$$\text{电桥电压灵敏度 } K_U = -\frac{U_0}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = E \frac{n}{(1+n)^2} \quad (4-9)$$

$dK_U/dn=0$ , 求得  $n=1$  时,  $K_U$  为最大值。此时

$$U_0 = -\frac{E}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}, \quad K_U = -\frac{E}{4} \quad (4-10)$$

### (3)线性误差及其消除

由(4-10)式求出的输出电压因略去分母中的  $\Delta R_1/R_1$  项而得出的是理想值, 含有非线性误差。为了减小和克服非线性误差, 通常采用差动电桥, 如图 4-2 所示。在试件上安装两个工作应变片, 一个受拉应变, 一个受压应变, 接入电桥相邻桥臂, 构成半桥差动电路, 该电桥输出电压为

$$U_0 = E \left[ \frac{R_2 - \Delta R_2}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] \quad (4-11)$$

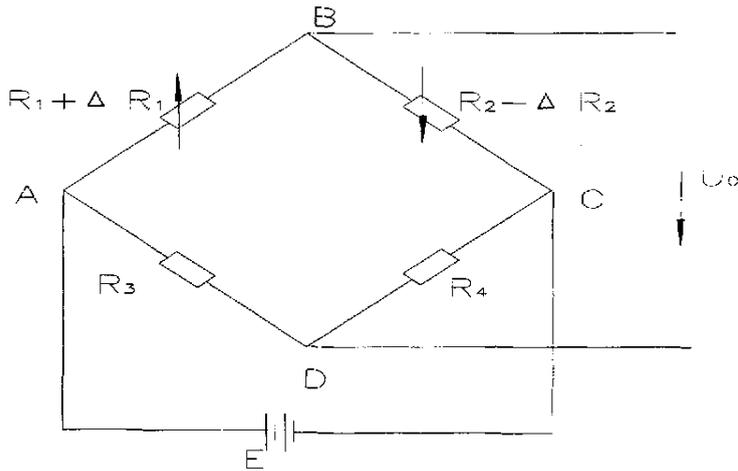


图 4-2 差动电桥

Fig. 4-2 Differential bridge circuit

若  $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ,  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$  则

$$U_0 = -\frac{E \Delta R_1}{2 R_1} \quad (4-12)$$

由上式可知,  $U_0$  与  $\Delta R_1/R_1$  呈线性关系, 差动电桥无非线性误差, 而且电桥电压灵敏度  $K_U = -E/2$ , 比单臂工作时提高一倍。但是有些情况下, 试件受力特点决定无法采用差动电桥, 本方法推导的应变计算公式, 直接从公式中消除了线性误差。

#### (4)利用半桥电路进行温度效应的补偿

电阻片是金属材料制成的, 它的阻值随着温度的变化也要产生变化。另外由于试件和电阻片材料的线膨胀系数不同, 从而也会使电阻片的阻值发生变化。温度变化引起的电阻变化是客观存在的, 但不希望在测量结果中反映出来。

利用电桥的加减特性来消除由温度变化引起的电阻变化。在电桥的 AB 臂接入感受机械应变的电阻片, 即工作片; 电阻片电阻变化中包含了两个部分, 一部分由于应变引起的电阻变化  $\Delta R_\epsilon$ , 另一部分是由于温度变化引起的电阻变化  $\Delta R_t$ , 如下图所示。设电阻片的起始电阻为  $R$ , 当它感受应变并随着温度变化时, 它的电阻由  $R$  变为  $R + \Delta R_\epsilon + \Delta R_t$ 。

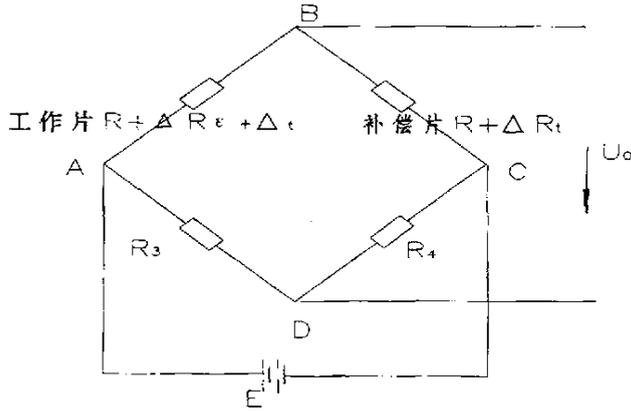


图 4-3 温度补偿电路

Fig. 4-3 Temperature compensate circuit

在电桥的 BC 臂接入一个同样的电阻片，其起始电阻值也为 R，将此电阻片贴在与被测件同样的材料上，但它并不感受应变。要求第 2 枚电阻片与工作片处于同样的环境温度中，它因温度变化引起的电阻变化  $\Delta R_t$  与工作片因温度变化引起的电阻变化  $\Delta R_t$  相同，称为温度补偿片。

这时电桥的输出电压变化量为

$$U_0 = A \left[ \frac{\Delta R_\epsilon + \Delta R_t}{R} - \frac{\Delta R_t}{R} \right] = A \frac{\Delta R_\epsilon}{R} \quad (4-13)$$

式中 A 为比例常数，只与供桥电压和桥臂比有关。这时，电桥的输出电压仅与应变引起的电阻变化率成正比，与温度变化引起的电阻变化率  $\Delta R_t/R$  无关，起到了温度补偿的作用。

#### (4) 桥路预调平衡的问题

为测量方便起见，在试件变形前，要求电桥起始输出电压等于零，即  $U_{BD} = 0$ 。而要挑选完全一样的电桥电阻是很困难的，可以采取在电桥上调零的措施来达到使其平衡的目的。因此，采用并联电阻法，如图 4-4 调整  $R_A$ ，使  $R_3$ 、 $R_4$  上并联的电阻得到调整，以达到调零的作用，从而使电桥满足平衡条件。经分析易知，对同样的电桥来说，选用电阻较大的电阻片可增大零位平衡的范围。另外，要求的平衡范围愈大，则并联的电阻应愈小。

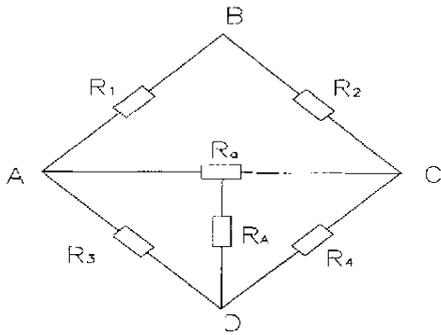


图 4-4 调零电路

Fig. 4-4 Modulating zero circuit

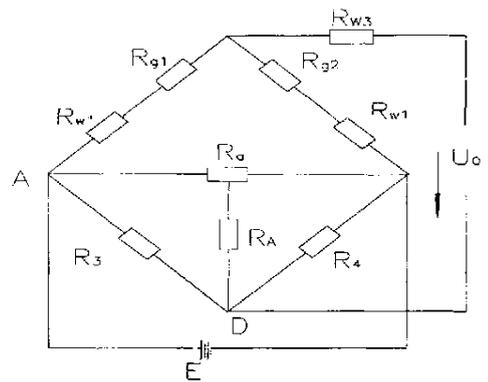


图 4-5 桥式测量电路

Fig. 4-5 Bridge-pattern measuring circuit

(5)长导线电阻引起的误差及修正

应变片与测量电路之间需要用导线连接，由于导线本身存在一定的电阻，而且它和电阻片是串联在测量电路的桥臂上，所以导线的电阻也是桥臂电阻的一部分，但它本身不参加变形。若不考虑导线电阻的影响，测量结果存在一定的误差。为了提高测量精度，有必要对导线电阻引起的误差进行修正。本方法推导的应变计算公式考虑了导线电阻的影响，消除了由导线引起的误差。

(6)电阻应变测量电路

根据以上分析，采用直流电桥，运用三线制电阻应变测量技术，设计应变测量电路如图 4-5 所示。其中 E 为供桥电压； $R_3$ 、 $R_4$  为固定桥臂电阻； $R_{g1}$  为工作应变片； $R_{g2}$  为补偿应变片； $R_{w1}$ 、 $R_{w2}$ 、 $R_{w3}$  为导线电阻； $R_0$  为并联电阻； $R_A$  为调零电位器； $U_0$  为桥中输出电压。

4.4.2 应变计算公式推导

参照图 4-5 应变片与测量电路间采用三芯屏蔽线连接，取 3 根导线长度相等，易保证： $R_{w1} = R_{w2} = R_{w3}$ ，记作  $R_w$ 。又  $R_{g1} = R_{g2}$ ，记作  $R_g$ ，所以： $R_{g1} + R_{w1} = R_{g2} + R_{w2}$  通过调整  $R_2$ ，保证  $R_3 / R_4 = (R_{w1} + R_{g1}) / (R_{w2} + R_{g2}) = 1$ ，达到调零的目的，同时使得电桥电压灵敏度最高。

假定应变片在试件上的粘贴方式为与轴线垂直，试件单方向受力，工作片  $R_{g1}$  由于应变引起的阻值变化为  $\Delta R_{g1}$ ，记作  $\Delta R_g$ ，相应地，补偿片  $R_{g2}$  的阻值变化  $\Delta R_{g2} = -\mu \Delta R_g$ ， $\mu$  为试件材料泊松比。

为了消除非线性，修正导线电阻引起的误差，提高测量精度，重新推导应变计算公式如下：

试件未受力，电阻片电阻变化之前，电桥输出电压为零。当工作应变片的电阻  $R_{g1}$  变为  $R_{g1} + \Delta R_{g1}$ ，补偿应变片的电阻  $R_{g2}$  变为  $R_{g2} + \Delta R_{g2} = R_g - \mu \Delta R_{g1}$  时，电桥的输出电压变为

$$U_0 = U_{BD} = \left[ \frac{R_{w2} + R_{g2} - \mu \Delta R_{g1}}{R_{w1} + R_{g1} + \Delta R_{g1} + R_{w2} + R_{g2} - \mu \Delta R_{g1}} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] U_{IN} \quad (4-14)$$

将  $R_{w1} = R_{w2} = R_w$ ， $R_{g1} = R_{g2} = R_g$ ， $\Delta R_{g1} = \Delta R_g$  代入上式，并解得

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = - \frac{4U_0 / U_{IN}}{[(1 + \mu) - 2U_0 / U_{IN}(\mu + 1)]} \left[ 1 + \frac{R_w}{R_g} \right] \quad (4-15)$$

在一定范围内，应变片阻值相对变化量  $\Delta R_g / R_g$  与试件应变量成线性关系，即：

$\Delta R_g / R_g = K \varepsilon$ ，式中  $K$  为应变片的灵敏度系数。

因此试件的应变

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_g}{R_g} = - \frac{4U_0 / U_{IN}}{K [(1 + \mu) - 2U_0 / U_{IN}(\mu + 1)]} \left[ 1 + \frac{R_w}{R_g} \right] \quad (4-16)$$

此应变计算公式不含线性误差，导线电阻引起的误差也得到了修正，精度较高。

#### 4.5 本章小结

本章主要介绍了电测量技术的内容任务及意义，如何选择测量面，怎样布置应变片及应变片的粘贴技巧；静态应力测量技术及误差分析在电路设计中的影响，在电路设计中消除误差的方法；计算公式的推导。

## 第五章 轧管机主机座应力测试的方案设计

### 5.1 实验目的与意义

本次实验的目的在于应用电阻应变片将非电量的机械变形量转变成电信号的特性，将应变花测得测点的三个方向的应变数值输入计算机中，应用第三、四强度理论计算出测点的应力，验证有限元计算结果的正确与否。

轧管机主机座的应力测量是重要的，因为机座上承受轧制力、轧制力矩并传递给基础；机座中的各个零部件及相应的调整机构均安置在它的上面。因此对轧机机座有很高的要求：要有足够的强度。在设计上要求绝对安全，一般情况下不允许破坏与更换。否则更换一个新机座不但加工费用昂贵（机座的重量占轧机重量的 35~45%）而且造成的间接经济损失将大大超过机架本身的造价，所以应实验验证。

### 5.2 静态应变测试系统简介

静态测试仪器主要包括 DH3815 静态数据采集与处理系统与微型计算机。

DH3815 静态应变测量系统由数据采集箱、微型计算机及支持软件组成。可自动、准确、可靠、快速测量大型结构、模型及材料应力试验中多点的静态应变应力值。广泛应用于机械制造、土木工程、桥梁建设、航空航天、国防工业、交通运输领域。若配接适当的传感器，也可对多点静态的力、压力、扭矩、位移、温度等物理量进行测量。

特点：

1. 数据采集箱与微型计算机通过 RS-232 串行通讯口进行数据传输；
2. 通过微型计算机由支持软件完成所有操作功能；
3. 计算机自动完成初始值、长导线、灵敏度系数的修正，方便迅速；
4. 计算机完成应力计算和多种应变花计算；
5. 计算机直接打印测量及计算结果；
6. 自动预调平衡，自动采样，定时采样；

7. 直流供桥，差动直流放大器完成了低漂移、低噪声、高精度测量。  
技术指标：

1. 测量点数：每台计算机可控制 16 台数据采样箱；每台数据采样箱可测 60 点；
2. 采样速度：12 点每秒；
3. 适用应变片电阻值：50~10000Ω 任意设定；
4. 应变片灵敏度系数：1.0~3.0 自动修正；
5. 电桥电压：2V (DC)；
6. 测量应变范围： $-2 \times 10^4 : 2 \times 10^4 (\mu\epsilon)$ ；
7. 最高分辨率：1  $\mu\epsilon$ ；
8. 系统不确定度：不大于 0.5%  $\pm 3 \mu\epsilon$ ；
9. 零漂：不大于 4  $\mu\epsilon$  /4h(开关切换前考核)；
10. 自动平衡范围： $\pm 6000 \mu\epsilon$  (120Ω 应变片阻值误差 0.5%)；
11. 长导线电阻修正范围：0.0~100Ω；
12. 电源：220V  $\pm 10\%$ ，50HZ  $\pm 2\%$ ；
13. 使用环境：GB6587.1-86-II；14.外形尺寸：450mm×330mm×160mm (宽×深×高) 便携机箱。

测量原理：以 1/4 桥、120Ω 桥臂电阻为例对测量原理加以说明。如图 5-1 所示。图中： $R_i$  为测量片电阻，R 为固定电阻， $K_f$  为低漂移差动放大器增益。

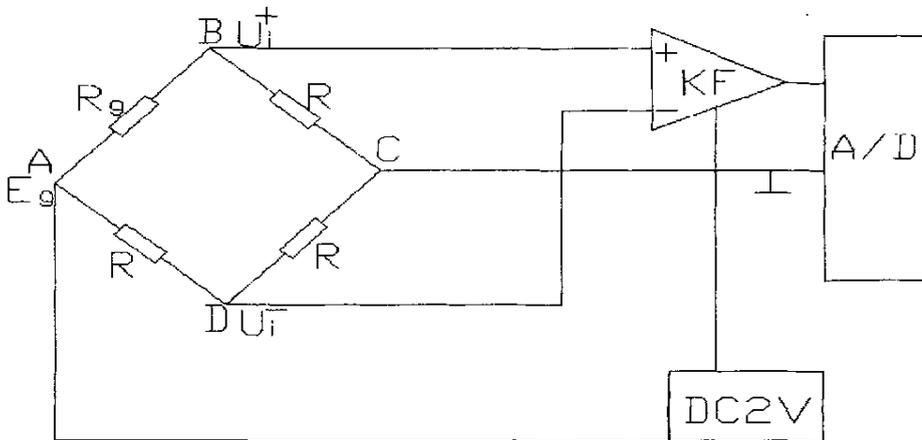


图 5-1 测量系统原理图

Fig. 5-1 Principle fig for measuring system

因  $V_i = 0.25 E_g K \epsilon$ ，即  $V_o = K_f V_i = 0.25 K_f E_g K \epsilon$ ，所以

$$\varepsilon = \frac{4V_0}{E_g K K_F} \text{ 则} \quad (5-1)$$

式中： $V_i$ 为直流电桥的输出电压；

$E_g$ 为桥压（V）；

K为灵敏度系数；

$\varepsilon$ 为输入应变变量（ $\mu\varepsilon$ ）；

$V_0$ 为低漂移仪表放大器的输出电压（ $\mu V$ ）；

$K_f$ 为放大器的增益。

当  $E_g=2V$ ,  $K=2$  时,  $\varepsilon = V_0 / K_f (\mu\varepsilon)$ 。 (5-2)

对于 1/2 桥电路,  $\varepsilon = 2V_0 / E_g K K_f$ ; (5-3)

对于全桥电路,  $\varepsilon = V_0 / E_g K K_f$ 。 (5-4)

这样, 测量结果由软件加以修正即可。

软件功能: 系统的控制软件工作于 WIN9X 操作系统, 软件实现了文件管理、参数设置、平衡操作、采样控制、数据查询、打印控制等功能。

平衡结果上传功能: 系统在进行平衡操作后自动保存平衡结果数据, 当发生突然断电恢复工作机箱状态, 保证试验继续进行。

### 5.3 测试程序

1. 检查应变片, 保证应变片和导线完好。

2. 调校静态应变测试采集与数据处理系统, 保证仪器正常工作, 将应变片按顺序连接至数据采集与处理系统, 设置相关参数, 保证测试系统工作正常, 清除一切不正常现象。

3. 每项测试重复进行, 比较测试数据有无重大差别。如果差别较大查明原因, 并重复测试。

### 5.4 测试应力点的选取

由于电测的特点是: 只能对局部和外表面测试。轧管机主机座大致可看作左、右对称, 取右侧作为测试对象。根据理论分析的结果, 如图 5-2 选择了在轧管机进料侧一面: 立柱上部止口和销孔附近的测点 1、立柱和箱体联接处侧面的测点 2、在焊接处侧板中间部位的测点 3、中间地脚螺栓孔的侧面的测点 4。出料侧一面: 立柱上部止口和销孔附近的测点 5、

立柱和箱体联接处侧面的测点 6、在焊接接口侧面中间部位的测点 7、中间地脚螺孔的侧面的测点 8。

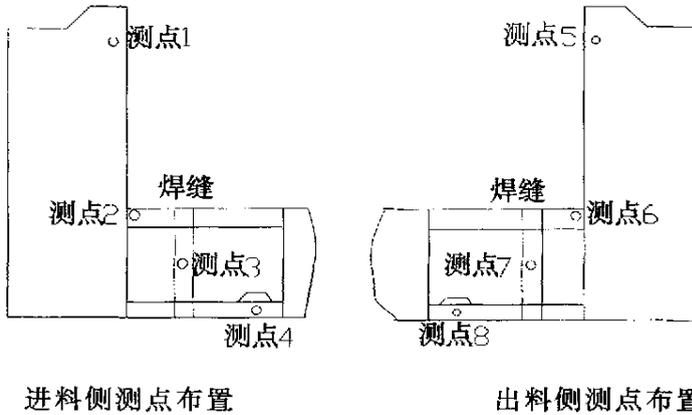


图 5-2 平面应力测点示意图

Fig. 5-2 The measure dot of the entering material side

轧管机主机座应力状态非常复杂，就某一测点来讲，其主应力的方向和大小在轧制过程中不断变化，因此，此次测试中采用了应变花进行点应力测试。共使用 8 个应变花，一根钢管测试了 24 个应变变量，测了一个品种规格的 6 根钢管，选用其中 5 根钢管的最大主应力值测量值并求出 5 根钢管的最大主应力测量值的平均值作为此测点的最大主应力值列表。

直角应变花求最大主应力公式：

$$\sigma_1 = \frac{E}{2} \left[ \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{1 - \mu} + \frac{\sqrt{2}}{1 + \mu} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right] \quad (5-5)$$

式中：E-弹性模量， $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ；

$\mu$ -材料的泊桑比， $\mu = 0.3$

$\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$ -三个方向电阻 R 的应变,单位为微应变；

$\sigma_1$ -最大主应力；单位为 mPa；

下面给出进料侧和出料侧最大主应力的计算值列表 5-1

表 5-1 测试点的最大主应力计算值

Fig. 5-1 The most main stress calculation result of the testing dot

进料侧	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
计算值	-4.78	20.74	14.63	2.48
出料侧	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8
计算值	-3.32	22.96	16.47	3.57

应用表 5-1 中这些最大主应力计算值同在实验中得到的实测最大主应力值（注：现无实测值）相比较计算出误差，验证有限元分析的正确性。

## 5.5 本章小结

本章阐述了实验的目的，意义；所应用的测试系统的原理、技术指标、测试程序、测点的选择；设计了应用实测最大主应力与计算最大主应力值相比较，计算出误差来验证有限元分析的正确性的方案。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

鉴于我国目前钢管紧缺的供需情况，改进提高斜轧管机对我国无缝钢管的生产非常重要，轧管机机座要有足够的强度和刚度，因此对它进行强度和刚度的分析研究，是很有实际意义的。斜轧管机由于投资少、见效快，又因主机座分体铸造焊接改善了铸造条件，降低了设备成本，适合于中、小企业的需要。本文采用 ANSYS 有限元计算软件对轧管机主机座进行了应力、应变的计算分析，搞清楚了应力、应变的变化规律，确定了分割的具体位置，并设计了证实有限元计算分析的准确性和可靠性的实验的方案，得到如下结论：

- 1.通过对 Pro/E 和 ANSYS 有限元软件的分析比较和建立相对简化模型的试用，最终确定使用 ANSYS 有限元软件建立计算模型。
- 2.计算了主机座强度和刚度分析中不可缺少的静不定力，然后使用 ANSYS 有限元软件建立合理的实体模型并划分网格、施加作用力、施加约束条件，计算出了轧管机主机座的应力、变形及分布规律。表明该主机座的强度、刚度是满足标准要求的，是安全可靠的。
- 3.通过对应力和变形的特点、规律的分析，确定了分体铸造的数量和具体分割位置以及焊接的工艺方案。
- 4.样机主机座的实际应力测试和有限元计算结果相比较来验证有限元计算结果的正确性和可靠性的实验方案的制定。

### 6.2 展望

本文对轧管机主机座进行了 ANSYS 有限元计算和分析，得到了它的应力和变形规律，并由此确立了分体铸造的方案。但由其的结构过于复杂和计算机硬件条件限制，以及结构尺寸变化导致静不定力随之发生变化的原因，尽管建立了 ANSYS 有限元优化设计的参数分析模型，进行了优化计算，但并没有优化出主机座的形状和尺寸的最佳方案，有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 张才安. 无缝钢管生产技术, 重庆大学出版社, 2001 年
- [2] 许祥云. 钢管生产冶金工业出版社 1999
- [3] 韩观昌, 李连诗. 小型无缝钢管生产, 冶金工业出版社, 1997
- [4] 李长穆. 现代钢管生产, 冶金工业出版社, 1988
- [5] 郑治平, 钟倩霞. 当代热无缝钢管生产技术, 钢管, 1996. 2
- [6] Hans Tachim Pahle. Position of the seamless steel tube on the world market and in China steel&tube. 1998.13(4) . pp23-33
- [7] 王廷溥主编. 轧钢工艺学, 冶金工业出版社, 1981
- [8] 黄庆学. 我国无缝钢管轧制设备技术发展概述, 钢管, 2005
- [9] 易兴斌. 新型狄塞尔轧管机组在国内外的的发展, 钢管, 1992
- [10] 李国祯. 我国小型热轧无缝钢管机组的发展, 钢管, 1996
- [11] Capoferriet AL, Pieta S.P.A, Italy. FEM Analysis of Rotary Tube Poercomg process. TUBE&PIPE technology. 2002(9) . pp48-54
- [12] 狄塞尔轧管机和福伦轧机, 钢管, 2000
- [13] 王旭午, 于波. Accu Roll 轧管机的工艺改进, 钢管, 1996
- [14] 戴鹏程, 李武, 李传永. Accu Roll 轧管机下导盘调整机构的改进, 钢管, 2000
- [15] 张小平, 柴跃生, 李善, 刘京江, 黄大兵. Accu Roll 轧管机导盘缺陷分析, 钢管, 1999
- [16] 阮林. Accu Roll 轧管机导盘偏心距的调整, 钢管, 1999
- [17] 王士俊. 狄塞尔轧管机限位芯棒选材与应用研究, 钢管, 1998
- [18] Capoferriet AL, Pieta S.P.A, Italy. FEM Analysis of Rotary Tube Poercomg process. TUBE&PIPE technology. 2002(9) . pp48-54
- [19] Chen Shuxun, Engineering Quality by Design, Marcel Dekker, inc, 1997
- [20] 张锦. Accu-Roll 轧管机, 包钢科技, 1992. (3)
- [21] 祝春清. Ø140mm 热轧无缝钢管生产线简介, 钢管, 1996
- [22] 轧管机 Accu Roll 轧管机的背景、现状及前景. 钢管 2003
- [23] 刘宏, 冯宝峰, 杨培友, 李绍光, 于凌河. Ø100mm Accu Roll 轧管机改

- 造, 鞍钢技术, 1996.
- [24]隋国贤.  $\text{O}114\text{mm}$  Accu Roll 轧管机结构的改进, 钢管, 1995.
- [23]赵德祥, 陈占军.  $\text{O}100\text{mm}$  改进型狄塞尔轧管机组简介, 钢管, 1995
- [25]E.Morishita, et al. Some Design Problems of Piercer. JSME, 1986. 3(29). pp 4139-4136
- [26]Ullman D G. The Mechanical Design Process. McGraw-Hill, Inc, 1995
- [27]A. E. Baumal, et al. Mathematical Modeling of Piercer-part I: Roller Modeling. Steel&Tube, 2002. 25. pp73-75
- [28]席正海. Accu Roll 轧管机的空间解析及运动学分析, 钢管, 1994
- [29]阮林. Accu Roll 轧管机咬入条件的探讨, 钢管, 1997
- [30]李雷, 钟锡汉. 斜轧管机速度和咬入条件的计算, 钢管, 1995
- [31]王海文主编. 轧钢机械设计. 机械工业出版社, 1983
- [32]A. Geleji. et al. A Study of Rolling Mechanism and its Applications to Metallurgy Machinery. Mech. Mach. theory. 1996. 31(5) . pp705-716
- [33]A. Geleji, et al. A about the roller Design of the Piercer. International Journal of Refrigeration. 1996. 18(5) . pp308-317
- [34]Capoferri et al. Pieta S.P.A, Italy. Dimensional Angle of Roller. Proc of 1986 ICEC. Purdue University, West Laffette, U.S.A. 1986. pp840-855
- [35]宋勇, 艾宴清, 梁波等. 精通 ANSYS 7.0 有限元分析, 清华大学出版社, 2004
- [36]郭志强. 整体机架刚度特性的有限元法研究, 包头钢铁学院学报, 1994
- [37]刘为庆, 杨庆东. ANSYS 工程应用教程—机械篇, 中国铁道出版社, 2002
- [38]博家科技. 有限元分析软件—ANSYS 融会与贯通, 中国水利水电出版社, 2002.
- [39]龚曙光, 罗显光, 赵又红等. ANSYS 基础应用及范例分析, 机械工业出版社, 2003
- [40]篮宇, 张连杰. 大型有限元分析软件 ANSYS 应用科技, 2000
- [41]王国强. 实用工程模拟技术及其在 ANSYS 上的实现, 西北工业大学出版社, 1999
- [42]龚曙光, 邱爱红, 谢贵兰. 基于有限元分析的零部件优化设计研究与应

- 用，机械工业出版社，2002
- [43]陈精一. 电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南，中国铁道出版社 2001
- [44]王祖城，汪家才. 弹性和塑性理论及有限单元法. 冶金工业出版社  
1983
- [45]王俊领.Ö420mm 轧机机架的三维有限元分析， 重型机械， 1996
- [46]关振群，宋超，顾元宪等. 有限元网格生成方法研究的新进展， 计算机辅助设计与图形学学报， 2003
- [47]谢贻权，何福保. 弹性和塑性力学中的有限单元法，机械工业出版社，  
1981
- [48]罗正声. 钢管斜轧机机架的有限元分析，钢管，1996
- [49]北京钢铁设计研究总院，轧钢设计参考资料通用部份（二）
- [50]刘培基，王安敏著. 机械工程测试技术，北京：机械工业出版社，2003.  
173-175
- [51]戴娟，汪大鹏等. 电测应力实验中应变片的粘贴技巧，湖南工程学院  
学报，2003. 9. 55-57
- [52]安根旺. 应变电测技术中的误差分析及确定方法，兰州铁道学院学报，  
1998. 12. 31-36
- [53]Chang, Shuenn-Yih. An improved on-line dynamic testing method.  
Engineering Structures Volume: 24, Issue: 5, May, 2002, pp. 587-596
- [54]李小华. 浅谈应变电测在工程中的应用及应注意问题，计量与测试技术，  
2002. (3). 22-25

## 致谢

本论文的全部工作是在我的导师黄秋波老师的悉心指导下完成的，从课程学习，论文选题，资料收集，到论文的定稿，都凝聚老师的心血。在三年紧张的学习期间，导师渊博的学识，严谨求实的治学态度，以及虚怀若谷、宽厚待人的品格，使我终生难忘。所有这些使我受益非浅，学会了知识，开阔了眼界，锻炼了能力。在此，谨向导师致以我最崇高的敬意和衷心的感谢！

感谢安信有限公司的高工，感谢张德臣老师的关心和指导，感谢工程培训中心的领导和所有员工。

我要感谢我身边每一个关心和帮助过我的人，特别感谢我的妻子和家人对我的关心和支持。感谢在研究生阶段共同学习和工作的同学们，让我拥有一段值得怀念的美好时光！