

贵州大学

硕士学位论文

钢丝在拉拔过程中能量分析及理论应用

姓名：贺成明

申请学位级别：硕士

专业：冶金工程

指导教师：张金柱;张家琦

20080601

详细摘要

本文主要通过对制绳钢丝在原料表面处理，热处理、拉拔过程及在拉拔过程（拉丝模具、润滑剂、水冷效果、拉拔工艺）中产生的热量对制绳钢丝机械性能的影响，以及对这些各种影响因素进行分析，本文借助拉力试验机、扭转试验机、弯曲试验机、光学显微镜、测温仪对钢丝拉力值、扭转值、金相组织进行大量试验研究。对拉拔过程产生热量的原因进行跟踪、试验，并对原料表面处理工艺、热处理工艺、拉拔过程中出现缺陷及拉拔发热原因进行分析，最终确定生产 $\phi 1.20\text{mm}$ 规格的1770级制绳用钢丝时，用70#重钢、新钢、首钢、湘钢原料能获得最佳的成品综合机械性能。

关键词：制绳钢丝 热处理 拉拔 工艺 表面处理

ABSTRACT

This article mainly describe raw material surface treatment, the heat treatment, drawing process and the influence of heat on the mechanism character of steel roping wire, the heat which is result from the drawing process(drawing die, lubricant, the effect of water-cooling and drawing technology, and as well as carries on the analysis to these each kind of influence factor. This article did more research on tensile value of steel wire, torsion value and metallographic organism, with the aid of the tensile testing machine, the machine for testing torsion, the curving testing machine, the light microscope, the meter for measure warm. By both the crystal theory and analyze way for energy, we scout the reason why the heat is result from the drawing process, do experiment on it, and analyze the treatment technology for raw material surface, the technology of heat treatment, the defect resulted from the drawing process and the reason for occurring heat when drawing, base on this, we finally make certain that we can obtain the best comprehensive machine capability when we product the steel wire with of dia of 1.20mm and the T/S 1770Mpa by using the steel wire rod which is produced by CHONG STEEL , XING STEEL , XIANG STEEL

Keywords steel wire for rope; heat treatment drawing; process; surface treatment

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究在做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：贺文明 日期：2008年6月

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解贵州大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权贵州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：贺文明 导师签名：张永平 日期：2008年6月

第一章 前言

1.1 钢丝生产在国民生产中的地位

钢丝生产是以热轧线材（也称盘条）为原料，经冷加工而制成的线材制品。以钢丝为原料再加工而成的钢铁制品，如商品钢丝、钢丝绳等称为二次制品。钢丝生产与其它钢铁生产相比，具有工艺和装备技术较为复杂，产品质量要求较高，生产管理要求严格，生产周期较长等特点，属于技术密集和劳动密集型的钢材生产。因此，钢丝生产的水平，在一定程度上也反映出一个国家的工业规模和制造技术水平。金属制品中的钢丝是国民经济建设重要的基础材料，在国民经济中占着重要地位，其产品广泛应用于冶金、煤炭、石油、交通、通讯、化工、林业、渔业、机械、轻工、建筑等各个部门，因为钢丝具在其它钢材无与伦比的优点，其规格可小达 0.001mm，比头发丝还细 10 倍，且尺寸精度高，断面形状多样化，应用范围广阔，是国家重点扶持并鼓励发展的行业。我国金属制品材料行业经过五十年的发展，已逐步形成了多种经济成分共存、竞相发展的局面^[1]。随着国民经济产业的转型，对金属制品材料行业也提出了新的要求，在中低档次产品供过于求的同时，那些投资大、科技含量高、生产难度大、质量要求严的高档次产品出现了较大缺口，如钢帘线在我国问世已 30 年，但至今其规模、质量、数量都还不能满足市场的需求，缺口很大；又如汽车专用高级弹簧钢丝、高强度耐疲劳的石油专用钢绳、矿山提升用绳、电梯钢绳等，尽管我国均能生产，但由于品种质量规格等问题，目前仍需进口。挑战的背后就是机遇，因此，金属制品材料企业要发展，要壮大必须加大资金投入，致力于产品科技含量和工艺、设备水平的提高。

国内主要金属线材制品产量 2003 年达 4919 万吨，为世界之最。其中高速线材已达到 67.5%。工艺装备水平已达到国际先进水平，线材的尺寸以 $\Phi 5.0 \sim \Phi 13.0\text{mm}$ 为主。低碳钢丝制品企业约 450 家，约占制品行业的 65%。中高碳线材制品企业 150 家，约占金属制品行业的 22%。特殊钢丝企业约 50 家，占金属制品行业的 8%^[2]。

1.2 我国制品行业存在的主要问题

21 世纪我国已跨入线材生产与制品的生产大国，但是与线材生产和制品的强国相比，我们还存在距离。主要存在以下几个方面问题：

- (1) 线材生产、金属制品的企业虽然多，但是经济规模小，经济效益不理想。
- (2) 产品数量多，档次低，绝大多数企业以高能耗、低产出的方式运营，牺牲大量的能源动力换取微薄的利润空间，因此不具备可持续发展长远战略规划。
- (3) 生产工序复杂，连续化、自动化生产线少。大多数国有企业都是国家“三线”建设时引进的欧洲、日本上个世纪五、六十年代的生产设备，和现在国外自动化程度高的生产线相比，技术力量相对比较落后。
- (4) 企业职工队伍技术素质偏低，劳动生产率低。我国加入 WTO 后，国内众多企业面临国际国内双重竞争，所以企业发展规划时，应着眼于市场竞争能力的提高，特别是参与国际市场竞争的能力。引进国际先进技术装备，加速我国制品行业的发展是非常必要的^[3]。

1.3 拉拔基本知识简介

钢丝拉拔过程实际上是钢丝塑性变形产生热量的过程，因此引起钢丝在拉拔时发热的原因主要有：原料表面的表面酸洗、表面润滑涂层、原料热处理、拉丝模具、摩擦、拉拔速度、压缩率等都是产生的过程，它产生的热量将对拉拔成品的强度和韧性产生影响。它的危害表现在：

- 1 引起润滑剂的润滑失效，使润滑膜破坏。
- 2、引起模具寿命的缩短，拉拔时的发热约有 20%热量累积在模具中，若不及时消除，使模具温度很高，模孔温度分布不均匀，致引起模孔局部地区磨损严重，影响模子的使用寿命。
- 3、拉拔时产生的热量，造成钢丝表面温度急剧升高，并且总是高于钢丝中心部份，因而形成残余应力，在高速拉拔时，若润滑不良，往往会产生很大的残余应力，当残余应力很大时，会引起钢丝表面产生裂纹，甚至引起拉断。
- 4、引起钢丝机械性能恶化，由于发热引起温升，使钢丝在拉拔过程中经常处于 150~240℃温度范围，因而极易引起应变时效，其结果使钢丝强度增高，韧性下降，钢丝变脆。

1.4 贵州钢绳股份有限公司概况

贵绳股份公司目前是国内最大的金属制品生产基地，钢丝绳和商品钢丝年产能力 15 万吨。该公司拥有高水平的整体装备、先进的生产工艺和完善的质量保证体系，主体生产设备由德国和日本引进。拥有目前国内最大的 8/1600 成绳机和同行业最大的 4000KN 整绳破断拉力试验设备，能生产直径 0.6-110mm 各种规格的钢丝绳和直径 0.15-9.0mm 各种用途的商品钢丝，具有生产高强度、高韧性、特粗、特长、特殊机构和特殊用途钢丝绳的突出优势。在全国率先研制和采用高性能的聚丙烯绳芯材料。按国家标准、国际标准及国外先进标准生产的“巨龙”牌圆股、异型股、线接触、面接触等光面、镀锌和涂塑钢丝绳，胎圈用钢丝、弹簧钢丝、预应力混凝土用钢丝、伞骨钢丝、钢芯铝绞线用镀锌钢丝、光缆用磷化碳素钢丝等产品享誉国内外市场。广泛使用于煤炭、石油、冶金、化工、船舶、桥梁、电力、橡胶、军工、旅游、水利、轻工等行业。

该公司是我国钢丝、钢丝绳产品最大的专业生产企业之一，主要从事钢丝、钢绳产品及相关设备、材料、技术的研究、生产、加工、销售及进出口业务；科技产品的研制、开发与技术服务。主要产品包括：矿用钢丝绳、船舶用钢丝绳、桥梁用钢丝绳、起重用钢丝绳、石油用钢丝绳、索道用钢丝绳、特大直径钢丝绳、回火胎圈钢丝、碳素弹簧钢丝、钢芯铝绞线用镀锌钢丝、光缆用磷化碳素钢丝、伞具用槽骨钢丝、中低高碳高延伸率镀锌打包钢丝、高碳琴钢丝、特高强度钢丝等。该公司产品品种、结构规格齐全，是目前国内生产钢丝、钢丝绳产品品种规格最全、质量最好、最稳定的厂家。

该公司拥有高水平的整体装备，先进的生产工艺和完善的质量保证体系。具有生产高强度、高韧性、特粗、特长、特殊结构和特殊用途钢丝绳的突出优势。“以质量求生存”是该公司的一贯方针，产品的高质量多年来为顾客所公认，在中质协评比中多次荣获“产品质量和服务质量双满意”荣誉称号，在 2004 年里“巨龙”牌钢丝绳产品被评为全国名牌产品。

贵绳股份公司科技先进，技术领先。公司技术力量雄厚，产品开发基础手段齐全，具有

40 多年行业经验，拥有省级技术中心，承担并完成国家重点技术创新项目两项、国家级新产品试制计划一项等，涂塑钢丝绳被国家经贸委确定为国家级新产品。该公司在大直径、超长、高强度、特殊结构和特殊用途钢丝绳生产方面具有突出优势，是国内唯一一家能够生产直径 60mm 以上钢丝绳产品的厂家。该公司生产的巨龙牌钢丝绳和回火胎圈钢丝为名牌产品，1988 年在全国同行业中率先通过英国劳埃德船级社工厂认可，1997 年通过中国船级社质量认证公司 GB/T19002-ISO9002 质量体系认证，1998 年通过美国石油学会 (API) 认证，同年成立省级技术中心，逐步规划创建国家级技术中心；2000 年矿用钢丝绳、床具用钢丝等多项产品又获得了冶金产品实物质量金杯奖证书，2002 年获得挪威船级社质量认证和全国质量稳定合格产品，顺利通过中国船级社质量认证公司 GB/T19001-2000-ISO9001:2000 质量体系换证，2003 年获得质量管理体系 (UKAS) 认证。公司生产的一批高难度钢丝绳产品先后用于葛洲坝水利枢纽工程、龙羊峡水电站、广州虎门大桥、汕头海湾大桥、长江西陵大桥、厦门海沧大桥、江苏润扬大桥、武汉阳逻大桥、重庆蔡园坝大桥、浙江舟山西喉门大桥以及海上石油钻井、著名旅游区载人索道等国家重点工程上，获得了国内外用户广泛的好评。

1.5 本课题的来源、研究目标及内容本

课题来源于贵州钢绳股份有限公司技术开发项目，主要研究在拉拔过程中影响钢丝综合质量的因素，对现在的表面酸洗工艺、热处理工艺、磷化工艺、拉拔工艺存在的问题及其对产品质量的影响，并分析其存在问题的关键所在，并对关键问题进行攻关，找出解决措施并实施，从而达到改善酸洗工艺、热处理工艺、磷化工艺、拉拔工艺，从而提高 $\Phi 1.20\text{mm}$ 规格的 1770 级制绳用钢丝的综合机械性能质量，达到提高产品质量的目的。

本文首先是对原有酸洗工艺、高温磷化工艺、热处理工艺及拉拔工艺进行分析，对影响钢丝质量的因素进行总结。

然后，针对存在的问题，并对关键问题进行工艺改进，找出解决措施并对其进行有效的实施，从而达到改善酸洗质量、磷化质量、热处理质量及改拉拔条件，并达到提高钢丝的综合机

械性能目的。

最后，对改进后的工艺进行总结，确定改进后工艺的合理性。

本课题正是借助于贵绳股份公司多年来的金属制品生产经验以及公司各种先进的检测仪器、设备等，通过工艺技术改进，研究国内不同原料厂家（70#首钢 70#重钢、70#湘钢、70#新钢）、同一钢号的盘条在经过表面处理、拉制成相同规格半成品后，经热处理（铅淬火）工艺后在进行表面处理，然后拉制成相同规格成品制绳用钢丝理化性能进行分析，通过大量试验，从热能原理考虑，制订出合理的表面处理工艺、热处理工艺、高温磷化工艺、拉拔工艺，使 $\phi 1.20\text{mm}$ 规格的 1770 级制绳用钢丝产品质量综合机械性能达到最佳状态。

第二章 钢丝工艺流程介绍

2.1 钢丝生产工艺流程

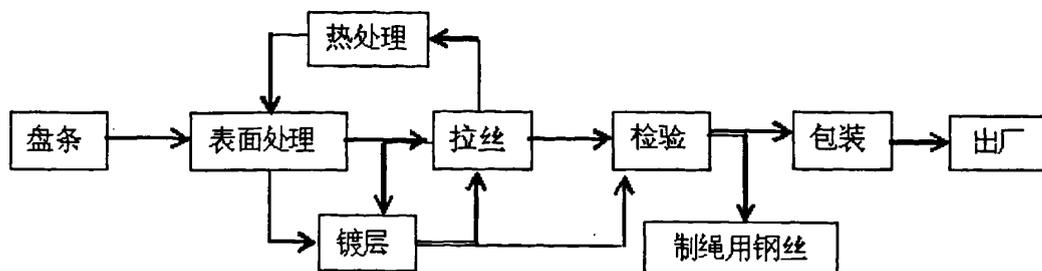


图 2.1 钢丝生产工艺流程图

2.2 钢丝生产各工序主要简介：

1、表面处理：该工序的主要作用有两个：一是清除钢丝表面的氧化铁皮（去除氧化铁皮的方法有机械法和化学法两种）；二是通过物理或化学方法给钢丝表面预涂一层便于后序拉拔时便于吸附拉拔润滑剂，且涂层自身带有一定润滑性能的涂层。表面处理工序在钢丝生产中是过程控制的起源，该工序处理质量的好坏，直接影响并制约着钢丝的表面质量。根据生产作业率情况分为连续生产线和间歇式生产线两种，目前该公司在 $\phi 6.50\text{mm}$ 规格以下且表面质量要求不高的半成品在表面处理过程中通常采用机械剥壳—硫酸酸洗—磷化处理；对表面要求高的在制品通常采用间歇式硫酸酸洗—磷化处理^[4]。

2、热处理：钢丝热处理的目的是主要有三个：一是消除冷加工造成的加工硬化现象，以利于进一步冷加工；二是为了确保成品钢丝的最终机械性能或物理性能（预处理和最终热处理）；三是为了提高热轧线材的塑性及消除组织的不均匀性。常见的钢丝热处理种类有以下四种：

①、索氏体化处理：把钢丝或线材加热到 A_{c3} 以上的温度（ $850\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ），随后在熔融的铅、盐等介质中进行冷却转变，以获得索氏体组织。最早采用铅淬火的是英国人 Jeams·Hors—foll（詹姆斯·豪斯福尔），他在 1854 年发明这种线材热处理方法，从而使高

碳钢丝便于拉拔并取得专利，后来把这一热处理方法称为“Patenting”，汉译英为“派脱登”，英文实际意思为“专利”，今天的“专利”一词也因此而来^[5]。

②、退火处理：按钢丝的不同性能需要，退火通常用球化退火和再结晶退火两种^[6]。

A、球化退火：将钢丝加热到 A_{c1} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 保持一定时间再以一定的冷却速度随炉冷却到 600°C ，出炉冷却使片状碳化物变成颗粒状得到所谓的球化组织。

B、再结晶退火：将钢丝加热到再结晶温度以上，通常略低于 A_{c1} 保温，然后根据钢种不同，进行缓慢或急冷使冷拉钢丝组织生成新的等轴晶粒即再结晶退火。

③、调质处理：将钢丝加热到 A_{c3} 或 A_{cm} 以上的适合温度，在油内淬火并在熔铅、熔盐或其它介质内加热到低于 A_{c1} 的某一温度下进行回火，称为调质处理。调质处理总是作为成品钢丝的最终热处理，其目的在于使成品钢丝获得强度与韧性的良好结合，提高其综合机械性能。

④、回火处理：将冷拉钢丝加热到 $250\sim 370^{\circ}\text{C}$ （预应力钢丝拉拔后回火，通常用铅浴加热，温度 $400\sim 440^{\circ}\text{C}$ ），保温短时间后冷却，称为回火处理。回火处理在于消除残余应力，使钢丝的抗拉强度、屈服极限和伸长率增加，并增大其蠕变性能^[7]。

3、高温、中温磷化处理：目的是使钢丝表面生成一层较厚的、附着力强的、表面较粗糙的润滑层，以便在后序拉拔时吸附润滑剂，利于拉拔粉的带入，同时润滑涂层跟着钢丝一起延展，改进润滑效果，使钢丝拉拔时塑性变形产生热量减少，内能趋于稳定，使得制绳钢丝韧性增加。

4、拉拔工艺处理：冷拉钢丝的生产工艺技术决定了钢丝的产品质量。冷拉钢丝拉拔使金属产生塑性变形得到所需要的产品尺寸；同时金属内部的晶粒及晶间物质，沿着变形方向被拉长，晶格受到破坏，内能发生变化，以致使金属组织发生改变。钢丝在冷状态下的压力加工，由于加工硬化的结果使变形金属的力学性能产生显著的变化。即随着拉拔过程的变形量增大，金属的变形抗力指数有所提高而塑性指数有所降低，这些性能的变化与冷拉加工过程所采用的冷加工变形条件有关，如模具、拉拔速度、水冷、润滑、压缩率等条件变化都将对钢丝力学性能产生大的影响。

（1）模具参数选择对钢丝力学能的影响

① 模具相关尺寸的选择

Wisteich 参数 “ Δ ” [8] [9]

1958年，当 Wisteich 评述拉丝的基本理论时，他重点强调了模具工作部分几何尺寸的重要性，并指出参数 Δ 是加工生产过程的一个关键系数。如图 2：

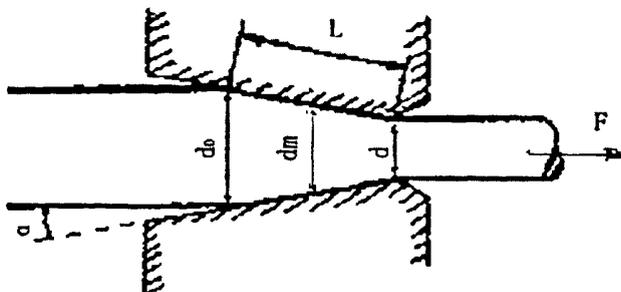


图 2 钢丝在模具内的情况

他把“ Δ ”参数定义为“模具表面中间点的圆弧跨度与模具中钢丝有效接触长度的比”。中间点的圆弧跨度可以理解为通过钢丝和模具接触面的中间点圆的直径相等。

A、现代拉丝生产实践中，提高拉丝速度要求降低工作锥角度，可以提高润滑效果，但同时增加了钢丝与模具的接触长度，这样减少了不均匀变形，降低了不均匀变形产生的热。所以高速拉拔过程中，最后两个拉模子锥角尽量选择小些，当拉拔镀锌钢丝时使用小工作锥角的模具更为重要。

② 定径带参数的确定

Renz、Sweuff 和 Kopp 分析了拉拔过程中模具几何尺寸对残余应力的影响，他们利用有限元素分析的方法，集中分析了定径带长度的过度半径 R 对性能的影响^[10-13]。在拉丝过程中，定径带的长度影响弹性储存能，定径带 $< 27\%$ ，使弹性储存能稳定但特别大，定径带长度 $> 50\%$ 弹性储存能稳定，但同时残余应力低，所以对要矫直的钢丝选用较长的定径带，如果定径带从 $30-50\%$ 自由变化，就会导致钢丝质量不稳定。定径带长度增加使钢丝与模具的摩擦力增大、拉拔力增加、润滑膜破坏，模具迅速磨损以至出现断丝、竹节现象。定径带过短时拉丝模寿命低，被加工金属尺寸精度低。锥体和定径带之间的过渡半径极其重要，当其直径与线径之比为 0.45 时的残余应力比 2.5 时要大得多。故大的半径能改善钢丝的质量。

③、在合适的工作锥角及减面率的条件下而模具几何尺寸不好时产生的影响^[14]。

尽管小的工作锥角度具有很多的优点，但也会产生长的变形区，如果模具太短，润滑剂孔道长度就要减少到最低的水平，这时模具的锥体不能完全参与润滑。模具的锥体长度最好是

实际变形区长度的 2 倍。如图 2.3:

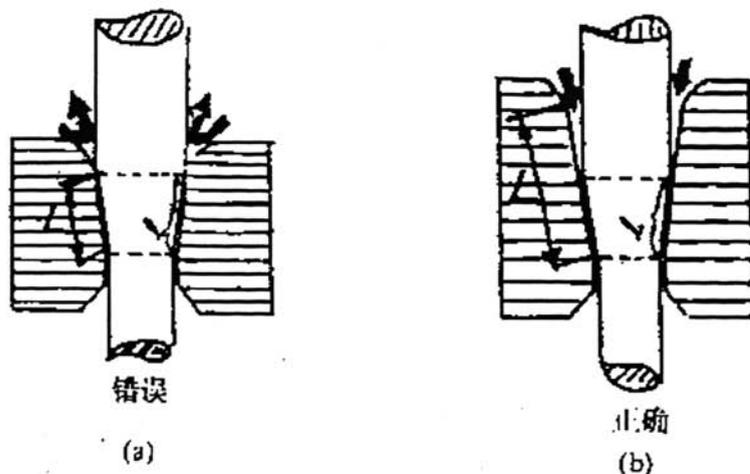


图 2.3: 一个足够长的锥角(b)与一个短锥角(a)的比较

(2) 压缩率对钢丝力学性能的影响

① 总压缩率的影响

几乎所有的碳素钢丝, 不论低、中、高碳钢丝的强度都将随总压缩率的增加而升高。这主要是由于随着冷变形量的加大, 金属内部晶粒不断产生滑移。随着滑移系的减少及晶格产生位错歪扭, 阻止再变形进行, 故使钢丝塑性变形抗力增加, 金属形成的冷加工硬化现象加剧, 因此导致钢丝的破断拉力加大, 即钢丝的抗拉强度升高^[15]。而加工硬化的加剧却使钢丝的韧性(弯曲、扭转值)恶化, 严重的会形成脆性材料, 其弯曲性能极低。钢丝断口形态及断口组织^[16]如图 2.4、图 2.5:

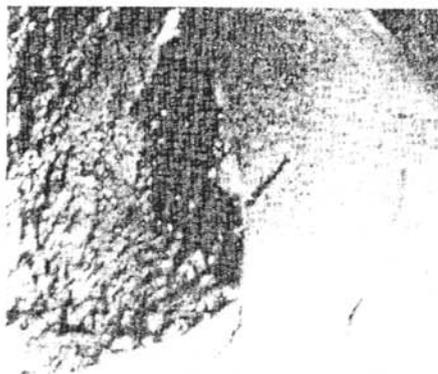


图 2.4: 钢丝过拉拔产生的断口

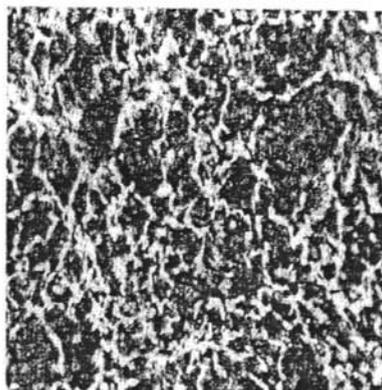


图 2.5: 过拉拔断口处组织

机械性能所带不利的影 响，主要是因为冷拉钢丝发热不能及时散失，产生“时效”硬化作用的结果。

(3) 冷拉钢丝发热机理及危害

①、发热机理：消耗于拉拔钢丝上的机械功率在拉丝模孔变形区内几乎全部(90%)都转变成了热量，而最多只有 10%的功以潜在能(晶格畸变和加工硬化)存在于被拉拔后的钢丝中。而要散出如此多的热量是困难的，因此在拉拔过程中钢丝和模具必将因发热量大而升温。但是，在变形区内钢丝中心和钢丝表面温度值是不同的；我们以变形区内钢丝断面平均温度各变形区内末端钢丝与模具接触表面温度为代表进行研究。

在拉拔过程中钢丝断面的平均温度迅速升高，并在拉拔后由于钢丝的冷却，然后缓慢降低。而在拉拔过程中钢丝表面温度迅速上升，然后从模子拉出后，几乎以同样快的速度降低到钢丝平均温度，此后冷却速度就与拉拔后钢丝的平均温度的降低速度相同^[23]。为了保证拉拔过程的顺利进行和拉拔产品质量，钢丝的平均温度不应超过最大值，即不许超过某一温度允许值。否则引起时效硬化作用，使钢丝韧性低。

③、拉拔发热所引起的危害

根据实测，在一般拉拔条件下，低碳钢丝每拉拔一道次，钢丝平均温度升高约 60-80℃，而高碳钢丝则达 100-160℃。故在连续式拉丝机上拉拔，若不采取有效措施控制温度的升高，则经过多道次拉拔后，钢丝温度累积增加，则在模孔变形区内钢丝与模具间的温度可上升到 500-600℃。拉拔时所产生的热量虽然大部分被钢丝带走，但是，钢丝与模具表面接触处，由于热传导的作用，则约有 13-28%的热量保留在模具之中。这些情况，必给拉拔带来了以下危害及影响：

a、引起润滑剂的润滑失效：对于每一种润滑剂，在某一特定的温度界限内，拉拔温度升高，可以使润滑剂更好的吸附到钢丝表面的微隙中去，但是温度若超过这一界限值，就能引起润滑剂的化学分解和焦化，或使润滑膜破裂和消失，而使拉拔力急剧增大，摩擦系数也急剧升高，钢丝不均匀变形程度加剧，以至有拉断的危险。

b、引起模具寿命缩短：拉拔时的发热约有 20%热量累积在模具中，若不及时的消除，有可能使模具温度很高，但模孔温度分布不均匀，变形区内局部会形成较高温度，由于模子的磨损大部分决定拉拔时模子与钢丝接触面上的温度，因而局部高温易于磨损形成模孔磨损不均，影响模子使用寿命。一般水冷拉丝模，在模子变形区及出口处的局部表层，模子温度升高可达到 400-540℃^[24、25]。

c、引起钢丝表面质量下降。拉拔时的发热，造成钢丝表面温度急剧升高，并且总是高于钢丝中心温度部分，因而形成残余应力，在高速拉拔时，若润滑不良，往往会产生很大的

残余应力，会引起钢丝表面产生裂纹。或者由于润滑层的破坏而引起钢丝表面发白、刮伤^[26]。

d、引起钢丝的时效：钢丝拉拔过程中，由于变形做功和摩擦做功产生的热使钢丝自身温度升高，通常可使钢丝温度高达 200℃左右，因而造成强度增高、塑性下降、拉拔脆断、扭转开裂和变形不均匀，这一现象被称为应变时效机理，它可以用“位错塞积”加以解释。

金属晶体理想状态应该是原子有序而规则的排列，但实际上金属中原子的排列并不规则，一般存在着点、线、面缺陷，其中线缺陷(位错)对钢丝拉拔和扭转的影响较大。当钢丝拉拔横截面积减小，长度伸长形成塑性变形，势必造成位错滑移，随变形时的增加，钢丝发热量增大，钢中碳、氮原子激活，能量增加，产生热扩散，至位错中心，塞积位错空位，形成溶质原子团，钉扎位错使位错不易滑移，反映在宏观上是金属塑性差了，而实质上就是所说的时效^[27]。

第三章 原料酸洗工艺对拉拔钢丝的影响

酸洗的目的是要除去原料盘条表面的氧化铁皮，在金属制品加工行业，一般采用硫酸或盐酸洗。酸洗的质量影响后序拉拔，欠酸洗和过酸洗都是拉拔工艺不容许的。本章主要从氧化铁皮的组成、酸洗反应机理、酸洗缺陷对后序钢丝质量的影响分析。

3.1. 酸洗工艺和酸洗理论

3.1.1 酸洗工艺

原料 $\phi 6.50\text{mm}$ 盘条的酸洗生产工艺为：

H_2SO_4 (g/l) : 80~120

FeSO_4 (g/l) : <200

温度 (°C) : 40~60

时间 (min) : 20~40

注:1、以上规定的酸洗时间，可根据钢丝表面状况，进行适当调整。

2、防止过酸洗，酸槽内应添加 1~1.5%的缓蚀剂。

3、酸洗槽用蒸汽加热，蒸汽压力不得低于 0.2MPa。

3.1.2 酸洗理论

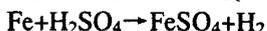
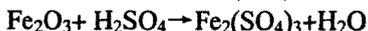
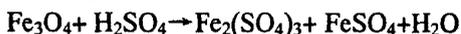
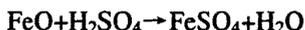
原料盘条酸洗的目的是除去在热加工，如铸造、锻造、热轧过程中表面生成的氧化铁皮或铁鳞。使钢基体表面干净，利于磷化涂层和拉拔。

1、氧化铁皮的组成：氧化铁皮一般分为三层^[28]：最外层是 Fe_2O_3 ，较薄，含氧的比例最高。中间层是磁性 Fe_3O_4 ，较厚。靠近钢基体的一层是 FeO ，含铁量最高。 FeO 被称为魏氏体 (Wustite)。在 570°C 以下， FeO 不稳定，会分解成 Fe 和 Fe_3O_4 ，所以在 570°C 以下生成的氧化皮中不存在 Fe 。酸洗要除去的是原料丝大气和天然水中生成的铁锈，它的主要成分是 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{FeO} \cdot (\text{OH})_{3-2x}$ 。钢铁表面的铁锈常分为内外两层，外层疏松，结合不牢；内层较致密，与钢基体结合较牢。

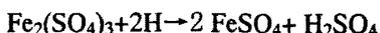
2 酸洗反应机理

盘条的酸洗常用的酸是硫酸或盐酸，根据我公司的实际生产情况，选用硫酸。

反应机理如下^[29]



通过产生氢原子使首先生成的硫酸铁还原：



3 酸洗过程常出现的缺陷及防止方法：

在实际钢丝生产过程中，酸洗质量的好坏会直接影响钢丝的拉拔，因此酸洗的好坏将直接影响钢丝的产品质量，酸洗不当将会产生以下一些缺陷^[30]。

1、氢脆：钢丝酸洗时，酸液与基体的反应生成原子氢，原子氢一部分化合成氢分子，逸出槽外，另一部分原子氢向金属内部扩散，随着基体含氢量的增加将使钢的塑性急剧下降，拉拔时出现脆断。这种由于氢扩散进入钢基体改变了金属内部晶格，使部分晶格发生偏斜，内部晶格能量发生变化，引起金属机械性能恶化的缺陷叫做“氢脆”。

产生氢脆的原因为：酸洗时间和酸洗温度的控制不好造成。

防止氢脆的方法：应掌握好酸洗时间和控制酸洗温度。

2、欠酸洗：指钢丝表面氧化铁皮清除不干净的缺陷。

产生的主要原因是：酸洗时间过短，酸洗时酸液的浓度或温度偏低引起的。

防止方法：严格遵守酸液工艺进行操作。

3、点状腐蚀：酸洗后钢丝表面有凹坑、麻点等腐蚀缺陷称为点状腐蚀。主要由线坯在酸中浸透时间过长，或酸液的浓度、温度过高引起的过酸洗。它将在拉拔过程中无法清除，最后保留到成品，影响拉拔后钢丝表面质量及机械性能。

3.2 原料盘条的酸洗试验方案：

3.2.1.实验条件

硫酸：符合标准 GB/T534

实验机型：LW-9/405 拉丝机。

实验材料:选用 $\phi 6.5\text{mm}$ 70#/ $0.70-0.73$ 重钢、新钢、湘钢、首钢盘条，

3.2.2 实验设备

公司自行设计酸洗槽

LW-9/405 拉丝机

LX-5000A 拉力试验机

NX-3 扭转试验机

10 吨电力拉力机

弯曲试验机

3.2.3 实验工艺

(1) 选用 70[#] 钢的重钢、新钢、湘钢、首钢 $\Phi 6.50\text{mm}$ 盘条，各生产 10 盘，首先破线为每吊 2 吨左右。

(2) 分别在硫酸 (g/l) (80~120、60~100、40~80)，硫酸亚铁 (g/l) (<200、<180、<180)，温度 (°C) (40~60、50~70、40~60)，时间 (min) (20~40、15~30、20~40) 的工艺参数下作正交试验。

3.3 实验结果及分析

具体试验结果见下表：(换原料厂家时，编号按 S01 重新编排。)

表 3.1 不同厂家的 70 酸洗表面处理工艺试验表

试验编号	钢号	硫酸 (g/l)	硫酸亚铁 (g/l)	温度 (°C)	时间 (min)	备注
S1-1	70#重钢	第一种工艺 80~120	<200	40~60	20~40 一般 18~25 分钟	根据原料表面锈蚀, 调整酸洗时间。表面清洗干净, 无欠酸洗发生。当时间超过 30 分钟后, 钢基体表面出现凹坑、麻点, 钢丝过酸洗。
S1-2						
S1-3						
S2-1	70#新钢					
S2-2						
S2-3						
S3-1	70#湘钢					
S3-2						
S3-3						
S4-1	70#首钢					
S4-2						
S4-3						
S5-1	70#重钢	第二种工艺 60~100	<180	50~70	15~30	原料表面清洗干净, 无过酸洗和欠酸洗, 钢基体色泽较好。
S5-2						
S5-3						
S6-1	70#新钢					
S6-2						
S6-3						
S7-1	70#湘钢					
S7-2						
S7-3						
S8-1	70#首钢					
S8-2						
S8-3						
S9-1	70#重钢					
S9-2						
S9-3						

S10-1	70#新钢	第三种工艺	40~80	<180	40~60	20~40	原料表面未清洗干净,存在锈蚀和氧化铁皮
S10-2							
S10-3							
S11-1	70#湘钢						
S11-2							
S11-3							
S12-1	70#首钢						
S12-2							
S12-3							

表 3.2 (将上述三种酸洗产品拉拔到 $\phi 1.20\text{mm}$ 成品钢丝比较其机械性能)

工艺	原料	强度 (Mpa)	扭转 (次)	弯曲 (次)
第一种工艺	70#重钢	1984	34	19
	70#新钢	1997	33	18
	70#湘钢	2016	31	17
	70#首钢	2034	32	18
第二种工艺	70#重钢	1922	41	24
	70#新钢	1941	39	22
	70#湘钢	1957	40	23
	70#首钢	1969	39	22
第三种工艺	70#重钢	1991	32	18
	70#新钢	2007	30	19
	70#湘钢	2046	34	20
	70#首钢	2043	31	17

通过上表比较分析:

1、70#钢的重钢、新钢、湘钢、首钢 $\phi 6.50\text{mm}$ 盘条在硫酸 60~100g/l, 硫酸亚铁 < 180g/l, 温度 50~70℃, 时间 15~30min 的工艺参数条件下, 原料表面清洗干净, 有利于后道工序的涂层和拉拔, 钢丝机械性能最好。

2、原料在第一种工艺条件下, 表面清洗干净, 但出现过酸洗, 在半成品拉拔时温度快速升高, 极易损坏拉丝模子, 造成钢丝表面缺陷, 热处理工序极易挂铅, 造成成品拉拔困难, 使钢丝强度升高、韧性能力降低。

3、原料在第三种工艺条件下, 原料表面存在锈蚀和氧化铁皮, 拉拔时氧化铁皮镶嵌在钢基体内, 严重影响制绳钢丝拉拔机械性能。

3.4 酸洗结论:

经过多次的大量的工艺试验, 得出结论原料盘条的酸洗生产工艺为:

H_2SO_4 (g/l): 80~120

FeSO_4 (g/l): <200

温度 (℃): 40~60

时间 (min): 20~40

- 注:1、规定的酸洗时间,可根据钢丝表面状况,进行适当调整。
- 2、防止过酸洗,酸槽内应添加 1~1.5%的缓蚀剂。
- 3、酸洗槽用蒸汽加热,蒸汽压力不得低于 0.2MPa。

在金属制品加工过程中，润滑涂层是钢丝拉拔前必不可少的工序。润滑涂层是指用来促进钢丝冷加工变形的化学表面处理过程和物理表面处理过程，利于拉拔粉的带入，同时润滑涂层跟着钢丝一起延展，促进钢丝拉拔顺利变形，避免多道次拉拔润滑条件恶化，改进润滑效果，使钢丝拉拔时塑性变形产生热量减少。

因此，润滑涂层必须具有以下特点^[31]：

- ① 要求具有与钢基体有结合强度，不会使钢丝进入拉丝模前或拉丝模内被破坏或被刮掉。
- ② 具有抗热性，不致被高速拉拔所破坏。
- ③ 要具有足够的塑性，能随同钢丝一起延展，始终覆盖在钢丝表面上。
- ④ 易于吸附润滑剂，从而提高润滑效果。
- ⑤ 具有防锈性能，并且无其它有害影响。

要具有以上特点要求的涂层，我公司积累多年实际的经验，在生产 $\phi 1.20\text{mm}$ 1770 级制绳钢丝半成品 $\phi 3.0\text{mm}$ 原料时，主要采用高温快速磷化涂层，因为高温快速磷化涂层基本具有以上特点，同时还具备磷化时间短（传统中温磷化需要 6~10 分钟，而高温磷化仅需 40~55 秒），磷层薄而致密，利于规模生产，但缺点是工艺技术控制要求高。

4.1 磷化涂层工艺及磷化理论

4.1.1 磷化生产工艺：

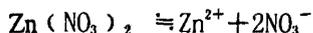
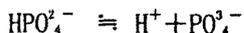
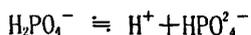
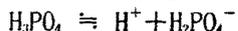
生产过程中磷化生产工艺为见表 4.1：

总酸度 点	游离酸 点	ZnO g/l	NO ₃ ⁻ g/l	PO ₄ ³⁻ g/l	时间 秒	温度 ℃
70~90	10~15	20~40	25~45	20~40	50	80~90

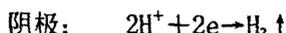
4.1.2 磷化涂层反应的基本原理：

磷化涂层它是含磷酸二氢锌、硝酸锌和磷酸为主剂的弱酸性溶液。经磷化处理后使钢丝基体表面形成以 Fe₂(HPO₄)₃、FePO₄ 及 Zn₃(PO₄)₂·ZnHPO₄ 为结晶层的磷化膜。

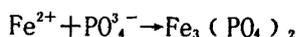
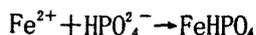
磷化膜生成的机理为：按电化学观点，在磷化溶液中有如下离子存在：



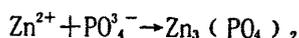
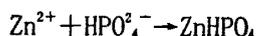
由于钢丝成分（夹杂）及酸洗后表面粗糙的不均匀性，存在一定量的电势差，在电解质作用下，使钢丝表面产生无数的微电池，在微电池作用下，阳极金属区溶解，发生铁的氧化、氢离子的还原：



而 Fe^{2+} 离子和钢丝周围溶液中的 H_2PO_4^- 、 PO_4^{3-} 离子结合成磷酸盐膜沉积在钢丝表面上:



在钢丝的阳极区同时还存在以下反应:



生成难溶的磷酸一氢锌和磷酸锌也沉积在钢丝表面形成外层晶体,从而加厚并形成了磷酸膜。为了保证阳极附近的 HPO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 离子的浓度,溶液中游离磷酸必须保持一定的工艺值。

4.1.3 影响磷化膜质量的因素分析

在钢丝生产过程,都希望表面磷化膜薄而牢、细而密,要求它与拉丝润滑剂能配合得当,又具有耐蚀性和润滑性。

因此,磷化膜的质量主要取足于下列因素的影响^[32]:

(1) 总酸度和游离酸度的影响:总酸度来源于磷酸盐和硝酸盐,是酸的总和。总酸度偏高,将加速磷酸化反应,晶粒生成速度快,磷层薄而结晶致密。但过高的总酸度将使磷与铁的反应减弱,反而不易生成磷化膜。总酸度含量低时,磷化速度缓慢,磷酸盐膜结晶粗糙、疏松。

游离酸的影响,游离酸主要来源于磷酸盐,如果游离酸度偏高,阳极附近的 HPO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 及 Zn^{2+} 离子消耗大,因此阴极不断析出氢气。大量氢气析出,在溶液中起到搅拌作用,破坏了金属与溶液界面的 Fe^{2+} 、 HPO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 Zn^{2+} 离子的浓度,使锌盐与铁盐浓度均达不到饱和状态,造成结晶生成困难加长了磷化而疏松,和钢丝表面结合力减弱。

若游离酸度偏低,则同样使反应速度减慢、磷化膜薄而易破,生成 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ 量少,磷化膜色泽不好,且不好拉拔。

(2) 锌离子、铁离子的影响:如果锌离子含量较高,或说 ZnO 含量较高,则加速钢丝磷化结晶容易饱和,生成的膜层致密细薄、闪烁光泽、有磷光。若含量较低,则磷化膜疏松、颜色发暗。此外,磷化液中含有必要的铁离子,能促进金属与溶液界面很快达到离子浓度过饱和程度,否则,会延长磷化时间。所以,新配的磷化液中,要通过一定的措施,使其铁离子浓度有所增加。

(3) 硝酸根离子的影响:硝酸根离子是在磷化液中作为氧化性离子,夺去铁的电子,从而加速铁的溶解,使电离过程加快。如果硝酸根含量过高,能加快磷化反应,同时防止磷化液聚集铁盐、成膜快、细薄、致密、牢固。但过高的硝酸根离子,还会钝化钢丝表面,反而阻止电离反应产生。当其含量不足时,磷化速度减慢,磷化膜与钢基体表面结合力弱,容易脱落。

(4) 磷化温度的影响:磷化温度为 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 时,即开始有磷化反应,只是磷化反应速度慢,结膜不牢固。而温度升高,能加速磷化反应产应速度,提高磷化膜牢固度,缩短磷化时间。但磷化液的温度超过 95°C 时,其反应速度过快,可使部分 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ 直接沉淀。达到 100°C 左右时,槽内将大量出现 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀。

通常按磷化温度,将磷化处理分为高温磷化和中温磷化。高温磷化指温度在 $80\sim 95^\circ\text{C}$ 之间,处理时间不长,其优点是磷化膜结合牢固、耐蚀、耐热、磷化速度快,因此应用广泛普遍。而其缺点是加热时间较长,水分蒸发快,沉积物多,易使磷化膜沾有白色沉渣而影响润滑效果,成本费用高。

所以,快速磷化液配制工艺要求较高,我的课题是拉拔前半成品采用连续磷化线处理。优点是磷化膜成膜速度快,磷化膜与钢基体结合好,并且磷化膜能随钢基一起延展,不致被高速拉拔所破坏,同时生产效率高,因此它是很好的磷化方式。

(5) 磷化时间的影响:相同条件下,同一成分的磷化液,处理时间越长,析出的磷酸盐膜

越厚但不成比例。中温磷化膜的正常厚度在 5~10 克/平方米，高温磷化膜正常厚度在 3~5 克/平方米。

(6) 钢的性质对磷化的影响：不同材料在同一磷化盐溶液中进行磷化时，其效果则不相同，一般来说高碳钢较低碳钢易于磷化，而合金钢最不易形成磷化膜。

(7) 杂质对磷化的影响：磷化液中混入硫酸根和盐酸根时影响最大。

4.1.4 磷化溶液对磷化膜的影响^[33]

钢丝随着磷化过程的不断进行，溶液中的各种溶液成分都存在一定的消耗，各种成分比例也将发生变化。即锌离子、硝酸根离子、磷酸含量逐渐下降，铁离子、硫酸根离子的含量将逐渐增多。为了保证钢丝正常磷化，生产过程必须定期对磷化液的成分进行化验（每班生产前化验），并根据化验结果和实际生产经验和工艺技术要求，对溶液的成分进行必要的调整，使溶液各成分保持在一定的工艺控制范围之内。以确保磷化膜的内在质量。

1、总酸度的调整，一般说来，当溶液中总酸度达不到工艺要求时，提高溶液的总酸度要靠补充新液。

2、游离酸的调整，游离酸度是磷酸盐含量的反映，主要靠调整磷酸盐含量，并且它的调整往往牵扯着总酸度的变化。

3、亚铁离子的调整，溶液中即要有必要的亚铁离子，但又不能使其含量过高，若亚铁离子含量过高，先化验总酸度和游离酸度浓度是否偏高，将其先调整好，然后再调整偏高的亚铁离子含量。办法是采用提高磷化液温度，提高溶液中硝酸根离子的氧化能力，或加入硝酸钠、氧化锌及亚硝酸钠、或加入稀释的硝酸，我公司根据实践用硝酸钠来消除亚铁离子比硝酸好，但不可过量加入，否则会出现大量沉渣而使溶液成分减少，造成浪费。

4、表面粘附沉淀物，磷化钢丝表面，有时会粘附白灰色的粉末。因此应按时清除槽子底部沉渣，不要使槽子底部沉渣过厚，并严格按工艺操作，改进加热方式，否则沉渣沾在钢丝表面，将导致拉拔时润滑性能下降。

5、磷化液变色处理，磷化液在使用过程中，正常颜色应由草绿色变成乳白色，如果磷化液颜色不正常变成褐黑色，这说明溶液中产生了过量的亚铁离子，未能及时氧化为铁离子，则亚铁离子与 NO 结合成络合离子（ $Fe+NO \rightarrow FeNO$ ）呈棕色。处理方法是适当升温，或加入适量的 ZnO。这样就可确保磷化膜质量。

4.2 高温快速磷化工艺试验方案：

4.2.1 实验条件

磷酸：符合标准 GB/T2091，氧化锌：符合标准 GB3494，硝酸锌：符合标准 Q/GS08。

实验机型：LW-9/405 拉丝机。

实验材料：选用 $\phi 3.0\text{mm}$ 70#/0.70-0.73 重钢、新钢、湘钢、首钢半成品，

4.2.2 实验设备

公司自行设计连续磷化槽

LW-9/405 拉丝机

LX-5000A 拉力试验机

NX-3 扭转试验机

10 吨电力拉力机

弯曲试验机

4.2.3 实验方案

1、工艺流程。放线—热处理—水洗—电解碱洗—热水洗—电解酸洗—水洗—连续磷化液—皂化—烘干—工字轮收线

2、选用 70# 钢的重钢、新钢、湘钢、首钢 $\Phi 3.0\text{mm}$ 半成品，各生产 10 吨。

在总酸度（点）（55~80、80~105、105~130），游离酸（点）（6~12、12~18、18~24），氧化锌（g/l）（10~25、25~45、45~60），硝酸根（g/l）（15~35、35~55、55~70），磷酸根（g/l）（10~25、25~45、45~60），温度统一在 80~95℃，磷化时间统一在 50 秒的工艺参数下作正交试验。

4.3 实验结果及分析

表 4.2（换原料厂家时，编号按 S01 重新编排）

试样编号	钢号	总酸度 (点)	游离酸 (点)	氧化锌 (g/l)	硝酸根 (g/l)	磷酸根 (g/l)	备注
S1-1	70# 重钢	55~80	6~12	10~25	15~35	10~25	钢丝磷化层薄，磷层分析结果 1.7~2.5 (g/kg)
S2-1	70# 新钢						
S3-1	70# 湘钢						
S4-1	70# 首钢						
S1-2	70# 重钢	80~105	12~18	25~45	35~55	25~45	钢丝磷，磷层分析结果 3.1~3.7 (g/kg)
S2-2	70# 新钢						
S3-2	70# 湘钢						
S4-2	70# 首钢						
S1-3	70# 重钢						钢丝磷层分析结果 5.1~
S2-3	70# 新钢						

S3-3	70 [#] ·湘钢	105~130	18~24	45~60	55~70	55~70	5.8 (g/kg), 但磷化渣产生时间快,原料消耗较大
S4-3	70 [#] ·首钢						

通过以上三种工艺生产的产品在拉拔分析比较:

1、一种工艺: 钢丝在第 5 卷筒开始钢丝发亮, 说明磷层簿, 磷层以经消耗, 在后 4 个卷筒拉拔时, 钢丝容易超差, 带不进拉拔粉, 润滑效果差, 并且拉拔速度由 800m/min 降低到 400m/min, 取 $\phi 1.20\text{mm}$ 拉拔成品磷层分析为 0.13~0.17 (g/kg)。

2、第二种工艺: 钢丝拉拔到成品 $\phi 1.20\text{mm}$ 时, 钢基体未发亮, 说明磷层满足于拉拔润滑, 拉拔速度为 800m/min 钢丝未出现拉拔困难, 取拉拔成品磷层分析为 0.74~0.83 (g/kg)。

3、第三种工艺: 拉拔速度为 800m/min 钢丝拉拔顺畅, 钢基体颜色发暗, 取拉拔成品磷层分析为 1.84~2.07 (g/kg), 但是此工艺条件下, 原料磷酸、硝酸锌、氧化锌消耗大, 磷化槽反应剧烈, 磷化渣产生时间快, 打渣时间为 4 至 5 天, 而采用第二种工艺打渣时间为 25 至 28 天。

因此现场生产采用第二种生产工艺。

以上三种工艺生产产品拉拔到 $\phi 1.20\text{mm}$ 制绳钢丝机械性能比较如下表: 见表 4.3:

试样编号	原料厂家	线径 (ϕ 1.20mm)	扭转 (次)	弯曲 (次)	强度 (Mpa)
S1-1	70 [#] ·重钢	第一种工艺	31	16	1984
S2-1	70 [#] ·新钢		29	17	1993
S3-1	70 [#] ·湘钢		30	16	2001
S4-1	70 [#] ·首钢		28	14	2036
S1-2	70 [#] ·重钢	第二种工艺	39	23	1904
S2-2	70 [#] ·新钢		41	24	1913
S3-2	70 [#] ·湘钢		38	23	1936
S4-2	70 [#] ·首钢		40	22	1949
S1-3	70 [#] ·重钢	第三种工艺	40	25	1897
S2-3	70 [#] ·新钢		36	23	1908
S3-3	70 [#] ·湘钢		41	23	1928

S4-3	70 [#] 首钢		39	24	1941
------	--------------------	--	----	----	------

经过大量试验，通过上表比较分析：第一种工艺严重影响了钢丝产品质量，第二种工艺、第三种工艺拉拔成品综合质量较好，为了节约能源，减少浪费，快速高温连续磷化工艺公司采用第二种工艺。

4.4 实验结论：

经过反复试验，现场采用改进后第二种生产工艺能获得较好的综合质量。

表 4.4：磷化液工艺参数

总酸度 点	游离酸 点	ZnO g/l	NO ₃ ⁻ g/l	PO ₄ ³⁻ g/l	时间 秒	温度 ℃
80~105	12~18	25~45	35~55	25~45	50	80~95

第五章 热处理工艺对拉拔钢丝综合性能的影响

钢丝热处理为了获得均匀一致的索氏体组织，因为等温索氏体组织冷拉极限值高，它的渗碳体相和铁素体相弥散度较高，层片较细，渗碳体片极薄。当进行拉拔时，金属晶体位错数目随变形程度增大而不断增加，它所能承受的位错密度愈高，则其承受的冷变形能力愈好，亦即冷拉极限值愈高。金属晶体在外力作用下产生塑性变形，通常是不均匀的，因而位错的分布也不均匀，若冷加工时晶体上位错分布愈不均匀，则其所能承受的变形能力愈差。碳素钢丝冷拔时，承受滑移变形主要是靠铁素体相，故随着变形过程增加，而位错的数目增加和发展主要在铁素体相区域。由于索氏体组织中的铁素体相分布得较均匀，铁素体片层又薄又多，故位错的分布即均匀又分散，不易发生位错的早期堆集现象，从而能承受更多的位错数目而不致破坏，此外，索氏体的极薄片层装渗碳体相，在承受外力时也稍能产生塑性变形，弯曲时不易破断，而粒状渗碳体相受外力时几乎不产生塑性变形，从而使周围铁素体相交界处极易造成位错集中，故球化体和回火索氏体的冷拉极限低于等温转变的索氏体。而拉拔碳素钢丝的最佳组织结构，通常认为是均匀一致的索氏体组织，当钢丝具有这种组织结构时，则不仅具有较高的冷抗极限值，能承受很大的变形程度，而且经拉拔后可获得高强度、高韧性的综合性能良好的制绳钢丝。

本章主要进行热处理工艺改进，获得均匀一致的索氏体组织。

5.1、钢丝热处理工艺及理论基础

5.1.1 热处理工艺：热处理工艺参数表 5.1:

钢丝直径 mm	线温 ℃	铅淬火温度℃		收线速度 m/min
		碳量%		
		0.68~0.75		
3.0	920~930	540±5		22~24

注:铅槽前后段温差不得超过 15℃。

5.1.2 钢丝热处理的理论基础

1、钢丝的冷加工硬化现象^[34]

由于钢丝的塑性变形拉拔过程是在常温下进行的，即在再结晶温度以下的这种加工过程处理称为冷加工。各种金属有各自的再结晶温度，对于碳素钢来说，再结晶温度一般为 450~550℃左右，因此凡低于此温度下的变形加工都属于冷加工范围。金属在冷加工过程中，使其强度、硬度增加而变形抗力加大和塑性变形降低的现象称为冷加工硬化。

金属的塑性变形按塑性变形理论解释是由于金属晶体内原子晶格发生“位错”，并沿滑移

面移动，微观上是晶体滑移，而最终表现在宏观上就是产生金属的塑性变形。冷加工时，使原子晶格歪扭，晶粒破碎，阻止了原子“位错”沿正常滑移面移动，影响了“滑移系”的产生，同时在晶格与晶格之间由于晶粒的破碎也产生了所谓“嵌银块”，这些都阻止了晶体滑移的顺利形成，使金属变形阻力增加，变形抗力加大，金属的强度、硬度上升，塑性下降，形成钢丝的冷加工硬化现象^[35]。当变形程度达到一定值后，硬化现象严重，金属无法继续进行冷加工变形，钢丝则体现为拉拔脆断。这是冷加工硬化不利的一面，但有利的是可以利用加工硬化在一定范围内来提高金属的抗拉强度。冷拉钢丝就是利用热处理后原料钢丝进一步加工硬化而获得较高的强度。

2、冷加工的最佳组织结构^[36]

被变形金属所能承受最大的变形程度而不发生脆断的数值称为该金属的冷加工极限。显然冷加工极限是标志金属塑性好坏的指标。对于冷加工由于变形金属只发生加工硬化而无恢复再结晶现象，在加工前必须考虑该金属的冷加工极限值。在拉拔碳素钢丝中当变形条件一定时，则冷拉极限值主要与钢丝的含碳量和钢丝的组织结构有关，尤其是钢丝的内部金相组织影响较大。

实践表明：中、高碳线材的冷拉极限取决于组织结构，当组织具有结构均匀的索氏体金相组织的原料钢丝冷拉极限值最高^[37]。这是因为索氏体组织中渗碳相弥散度较高，层片薄，渗碳体片极薄。当冷加工时，金属晶体内位错数目随变形程度增大而不断增大，当位错密度愈高，则其承受的冷变形能力愈好，即冷拉极限值愈高。

金属晶体在外力作用下产生塑性变形，通常是不均匀的，因而位错分布也不均匀，若冷加工时晶体上位错分布愈不均匀，则其承受的变形抗力愈差。碳素钢丝拉拔时，承受滑移变形主要是靠铁素体相，故随变形过程增加而位错数目的增加和发展主要集中在铁素体区域。由于索氏体组织中的铁素体分布得较均匀，铁素体片层又薄又多，故位错的分布即均匀又分散，不易发生位错的早期堆集现象，从而能承受更多的位错数目而不致破坏，内能分布相对稳定。

所以，索氏体组织经拉拔后可得到高强度、高韧性的综合机械性能。索氏体组织的金属经冷拉强度升高，而塑性并不降低，这是因为厚的渗碳体片变形时易发生断裂，而薄片渗碳体反而能承受一定的拉伸变形，同时薄片状的渗碳体还能承受一定的弯曲变形。韧性是受强度和塑性两者影响的综合指标，强度高而塑性良好的金属，其韧性比较好。因此，索氏体组织经拉拔后可获得较高的综合机械性能。

3、钢丝热处理的目的及作用

钢丝热处理按照它在钢丝生产工艺流程中的位置和作用，可分为预先热处理、中间热处

理和最终热处理三种，它的目的和作用在于^[38]：

(1) 为了提高热轧线材的塑性和消除其组织的不均匀性，要进行拉拔前的预先热处理，是指钢丝原料-线材所进行的热处理，亦称坯料热处理。对于经轧制后采用控制冷却索氏体化处理的线材，由于其组织均匀冷拉性能良好，低碳钢线材均不需要预先热处理。

(2) 为了消除拉拔过程中所造成的冷加工硬化现象，恢复钢丝的塑性，要进一步继续冷加工的中间热处理。一般末说中间热处理在钢丝生产过程中是必不可少的，例如钢丝在拉拔过程中的完全退火、中高碳钢丝的正火等。

(3) 为了确保成品钢丝的机械性能和最终热处理，一般若成品钢丝要求热处理状态交货，那么在成品钢丝拉拔后，对成品钢丝进行的热处理称为最终热处理。若为使拉拔后具有高综合机械性能的成品钢丝，而其半成品钢丝所进行的热处理。若拉拔制绳用钢丝或轮胎钢丝，对成品钢丝的坯料所进行的铅淬火索氏体化处理，使其具有高强度和良好的韧性。

所以，预先热处理、中间热处理和最终热处理在具体的某种钢丝生产工艺过程中是否全需要或者部分需要及中间热处理要进行几次，这就要根据线材状况、采用的工艺和设备以及产品的性能和要求而定。

4、钢丝的等温淬火热处理

(1) 热处理过程中的几种金相组织^[39]

不同钢种在不同热处理情况下的组织状态是不相同的，在这里主要讨论碳素钢在热处理过程中常出现的几种组织及主要性能。

a 铁素体（简写 F） 它是碳溶解于 α 铁中的固溶体，晶体结构呈体心立方晶格。

b 奥氏体（简写 A） 它是碳溶解于 γ 铁中的固溶体，晶体结构呈面心立方晶格。

c 渗碳体（简写 C） 它是由 93.3% 铁和 6.67% 碳化合而成的碳化铁（ Fe_3C ）。渗碳体呈复杂的正交晶格，每个晶格由 12 个铁原子和 4 个碳原子构成。

d 珠光体（简写 P） 它是铁素体和渗碳体的机械混合物（共析产物），渗碳体分布在铁素体基体上，珠光体中含碳 0.8%。由于珠光体是铁素体和渗碳体的混合组织，所以它的性能也介于这两种组织之间。

由于热处理方法不同，珠光体可有两种形态：即渗碳体是片状分布的和粒状分布的两种。在显微镜下片状珠光体有珍珠般的光采。

e 贝氏体（简写 B） 又叫“针状屈氏体”。它是奥氏体冷却到低温 $300\sim 500^\circ\text{C}$ 和 $300^\circ\text{C}\sim M_s$ 之间，并保持一段时间，使过冷奥氏体在此温度下分解的产物。

f 马氏体（简写 M） 它是碳在 α 铁中的过饱和固溶体。这是由于冷却速度太快，原末奥氏体中的碳来不及呈渗碳体析出，而溶解在铁素体中，而铁素体中含碳量远远超过它的溶解

度。这种组织硬度很高，但塑性和韧性几乎等于零，即很脆无法进行冷拉拔加工。

钢丝的铅淬火原理在于将加热到 A_{c3} 或 $A_{cm}^{[40]}$ 温度以上奥氏体均匀化了的半成品钢丝（加热温度通常在 $860\sim 960^{\circ}\text{C}$ ），随后在熔融的铅液介质中（铅液温度通常在 $460\sim 550^{\circ}\text{C}$ ）快速冷却，并在此温度下保持一段时间，最后在空气中冷却。它对于共析钢可以获得细片状的、分散度很大的渗碳体在铁素体基体上的共析产物细珠光体。

5.2、热处理工艺试验方案

5.2.1.实验条件

实验机型：LW-9/405 拉丝机。

实验材料:选用 $\phi 3.0\text{mm}$ 70#/0.70-0.73 重钢、新钢、湘钢、首钢半成品，

5.2.2 实验设备

公司自行研发热处理加热炉 3# 炉。

LW-9/405 拉丝机

LX-5000A 拉力试验机

NX-3 扭转试验机

10 吨电力拉力机

弯曲试验机

5.2.3 实验方案

- 1、选用 70# 钢的重钢、新钢、湘钢、首钢 $\phi 3.0\text{mm}$ 半成品，各生产 10 盘（每盘 0.4 吨左右）。
- 2、分别在线温（ $^{\circ}\text{C}$ ）（ $920\sim 930$ 、 $930\sim 940$ 、 $940\sim 950$ ），铅淬火温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）（ 540 ± 5 、 530 ± 5 、 520 ± 5 ），收线速度（ m/min ）（ $22\sim 24$ 、 $20\sim 22$ 、 $18\sim 20$ ）的工艺参数下作正交试验。

5.3 试验结果及分析

表 5.2（换原料厂家时，编号按 S01 重新编排。）

试样编号	钢号	线温（ $^{\circ}\text{C}$ ）	铅温（ $^{\circ}\text{C}$ ）	收线速度（ m/min ）	备注
S1-1	70# 重钢	第一种工艺			热处理产品强度偏低，拉拔困难，同时脆断严
S1-2					
S1-3					
S2-1	70# 新钢				
S2-2					
S2-3					

S3-1	70 [#] ·湘钢	920~930	540±5	22~24	重，拉制绳丝产品扭转值、强度偏低。			
S3-2								
S3-3								
S4-1	70 [#] ·首钢	第二种工艺	530±5	20~22				
S4-2								
S4-3								
S5-1	70 [#] ·重钢				930~940	530±5	20~22	热处理产品强度适宜，拉拔顺利，拉制绳丝产品扭转值、弯曲值较好。
S5-2								
S5-3								
S6-1	70 [#] ·新钢							
S6-2								
S6-3								
S7-1	70 [#] ·湘钢	930~940	530±5	20~22				
S7-2								
S7-3								
S8-1	70 [#] ·首钢				940~950	520±5	18~20	
S8-2								
S8-3								
S9-1	70 [#] ·重钢	第三种工艺	520±5	18~20				热处理产品强度较高，钢丝出现轻微挂铅，拉拔困难，脆断严重，拉制绳丝产品扭转值、弯曲值较差。
S9-2								
S9-3								
S10-1	70 [#] ·新钢							
S10-2								
S10-3								
S11-1	70 [#] ·湘钢	940~950	520±5	18~20				
S11-2								
S11-3								
S12-1	70 [#] ·首钢				940~950	520±5	18~20	
S12-2								

S12-3					
-------	--	--	--	--	--

原因分析:

(1) 第三种工艺钢丝加热温度过高, 一方面使碳在奥氏体中继续扩散, 晶粒继续长大, 晶粒过大时使其在淬火时奥氏体一部份转变成索氏体, 一部份转变成粗片状珠光体组织, 另一方面, 钢丝加热温度过高会使钢丝表面氧化严重, 增加能耗和金属的烧损, 在淬火时易使钢丝表面挂铅, 而且还会对于中, 高碳钢丝带来严重的脱碳等缺陷, 不利于拉拔, 从而降低钢丝的质量, 从而降低弯曲疲劳性能, 使钢丝提前断裂, 第一种工艺钢丝加热温度过低也不允许, 因过低加热温度使碳在奥氏体中扩散不完全, 在钢丝淬火时, 索氏体转变不充分, 得不到均匀索氏体组织, 同样不得于拉拔, 从而使钢丝提前断裂。

(2) 钢丝淬火温度过高, 因为过高的淬火温度使奥氏体在较高温度下转变, 容易析出先共析铁索体, 使其得不到均匀一致的索氏体组织, 从而给拉拔带来困难, 而过低的淬火温度, 使钢丝抗拉强度增加, 也不利于拉拔。

(3) 钢丝淬火速度过短。淬火速度过短, 使其奥氏体分解所需要的时间缩短, 奥氏体等温转变不会完全残留的过冷奥氏体全在钢丝离开铅槽以后, 将在低温时转变为马氏体, 于是, 铅淬火后的钢丝将出现脆性, 从而不能进行拉拔就发生断裂。

以下为 70 钢 $\Phi 3.0\text{mm}$ 半成品, 在线温 $930\sim 940$ ($^{\circ}\text{C}$), 铅淬火温度 530 ± 5 ($^{\circ}\text{C}$), 收线速度 (m/min) $20\sim 22$ (m/min) 的热处理工艺条件下所得金相组织 5.1 图:

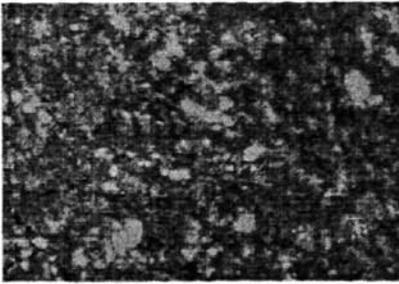


图 5.3.1 70# 重钢热处理后金相组织 ×500

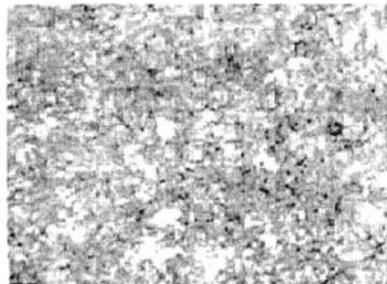


图 5.3.2 70# 新余钢热处理后金相组织 ×500

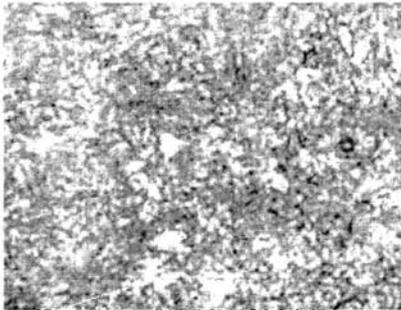


图 5.3.3 70# 湘钢热处理后金相组织 ×500

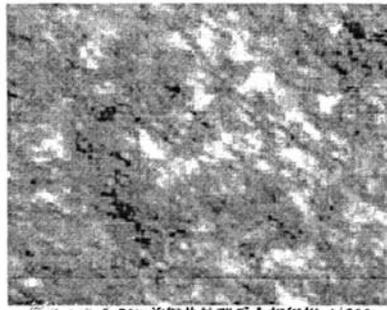


图 5.3.4 70# 首钢热处理后金相组织 ×500

通过对 70 钢类的重钢、新钢、湘钢、首钢 $\Phi 3.0\text{mm}$ 半成品，在线温 $930\sim 940$ ($^{\circ}\text{C}$)，铅淬火温度 530 ± 5 ($^{\circ}\text{C}$)，收线速度 (m/min) $20\sim 22$ (m/min) 的热处理工艺条件后在同一拉拔条件下拉制成 $\Phi 1.20\text{mm}$ 的光面制绳用钢丝，各原料厂家的成品机械性能的检验数据。

见表 5.3

试样编号	原料厂家	线径 (mm)	扭转 (次)	弯曲 (次)	强度 (Mpa)
S1-1	70# 重钢	$\Phi 1.20\text{mm}$	37	22	1820
S1-2			39	23	1837
S1-3			36	20	1842
S2-1	70# 武钢		38	21	1846
S2-2			35	19	1862
S2-3			37	22	1881
S3-1	70# 湘钢		36	19	1879
S3-2			37	17	1907
S3-3			33	21	1921
S4-1	70# 首钢		35	17	1957
S4-2			33	19	1943
S4-3			36	19	1971

原因分析：从以上各厂家原料经奥氏体化并进行铅淬火后金相组织图片和拉拔产品可以明显得出这样的结论：重钢 70[#]的热处理强度 < 新钢 70[#]热处理强度 < 湘钢 70[#]热处理强度 < 首钢 70[#]热处理强度。塑性指标 (δ 、 ϕ)：70[#]重钢 > 70[#]新钢 > 70[#]湘钢 > 70[#]首钢。完全满足该公司内控标准 GK01-2006^[41]。

本标准与国家标准 GB8919-1996 相比的区别主要在于扭转和弯曲指标上。该公司内控标准 GK01-2006 与国标 GB8919-1996 中的重要用途绳丝 (K 级绳丝) 的扭转、弯曲值相比，同规格同强度级的该公司要高 2~3 次。

表 5.4 内控标准 K 级光面和 B 类镀锌、AB 类镀锌和 A 类电镀锌钢丝最小扭转次数 (扭转试验标距 100d)

钢丝公称直径 d (mm)	抗拉强度级别 MPa							
	1470	1570	1670	1770	1870	1960	2060、2070	2160
0.50 ≤ d < 0.75	37	36	35	34	33	31	27	27
0.75 ≤ d < 1.0	37	36	35	34	31	29	26	26
1.00 ≤ d < 1.30	35	34	33	32	30	29	25	25
1.30 ≤ d < 1.50	34	33	31	30	29	28	24	24
1.50 ≤ d < 1.80	34	33	31	30	28	27	24	24
1.80 ≤ d < 2.30	32	31	30	29	27	27	22	22
2.30 ≤ d < 2.50	30	29	27	27	26	26	22	22
2.50 ≤ d < 3.00	30	29	27	26	24	23	20	20
3.00 ≤ d < 3.40	28	27	25	24	22	22	19	19
3.40 ≤ d < 3.50	26	25	23	22	20	20	17	17
3.50 ≤ d < 3.70	24	23	21	20	18	18	15	15
3.70 ≤ d < 4.00	22	21	20	19	17	17	14	14
4.00 ≤ d < 4.20	21	20	19	18	16	16	12	12
4.20 ≤ d < 4.40	20	19	18	17	15	15	11	11

表 5.5 内控标准 K 级光面和 B 类镀锌、AB 类镀锌和 A 类电镀锌钢丝最小弯曲次数

钢丝公称直径 d mm	弯曲圆柱半径	抗拉强度级别 MPa							
		1470	1570	1670	1770	1870	1960	2060、2070	2160
0.5≤d<0.55	1.75	19	18	18	17	17	16	14	14
0.55≤d<0.6		18	17	17	16	16	15	13	13
0.6≤d<0.65		16	15	15	14	14	13	11	11
0.65≤d<0.7		15	14	14	13	13	12	10	10
0.7≤d<0.75		20	19	19	18	18	17	15	15
0.75≤d<0.8	2.5	19	18	18	17	17	16	14	14
0.8≤d<0.85		19	18	18	17	17	16	14	14
0.85≤d<0.9		17	16	16	15	15	14	12	12
0.9≤d<0.95		16	15	15	14	14	13	11	11
0.95≤d<1.0		16	15	15	14	14	13	11	11
1.0≤d<1.1	3.75	21	20	20	19	19	18	16	16
1.1≤d<1.2		16	18	18	17	17	16	14	14
1.2≤d<1.3		17	16	16	15	15	14	12	12
1.3≤d<1.4		16	15	15	14	14	13	11	11
1.4≤d<1.5		15	14	14	13	13	12	10	10
1.5≤d<1.6	5.0	18	17	17	16	16	15	13	13
1.6≤d<1.7		17	16	16	15	15	14	12	12
1.7≤d<1.8		16	15	15	14	14	13	11	11
1.8≤d<1.9		15	14	14	13	13	12	10	10
1.9≤d<2.0		14	13	13	12	12	11	9	9
2.0≤d<2.1	7.5	19	18	18	17	17	16	14	14
2.1≤d<2.2		18	17	17	16	16	15	13	13
2.2≤d<2.3		17	16	16	15	15	14	12	12
2.3≤d<2.4		17	16	16	15	15	14	12	12
2.4≤d<2.5		17	16	16	15	15	14	12	12
2.5≤d<2.6	7.5	16	15	15	14	14	13	11	11
2.6≤d<2.7		15	14	14	13	13	12	10	10
2.7≤d<2.8		14	13	13	12	12	11	9	9
2.8≤d<2.9		13	12	12	11	11	10	8	8
2.9≤d<3.0		13	12	12	11	11	10	8	8
3.0≤d<3.1	10	16	15	14	14	13	13	11	11
3.1≤d<3.2		16	15	14	14	13	12	10	10
3.2≤d<3.3		15	14	13	13	12	11	9	9
3.3≤d<3.4		15	14	13	13	12	11	9	9
3.4≤d<3.5		14	13	12	12	11	10	8	8
3.5≤d<3.6	15	13	12	11	11	10	9	7	7
3.6≤d<3.7		12	11	10	10	9	8	6	6
3.7≤d<3.8		11	10	9	9	8	7	5	5
3.8≤d<3.9		11	10	9	9	8	7	5	5
3.9≤d<4.0		10	9	8	8	7	7	5	5
4.0≤d<4.1	15	16	15	14	14	13	12	10	10
4.1≤d<4.2		15	14	13	13	12	11	9	9
4.2≤d<4.3		14	13	12	12	11	10	8	8
4.3≤d<4.4		14	13	12	12	11	10	8	8
d=4.4		13	12	11	11	10	9	7	7

对于连续进行的铅淬火处理主要有两个过程，先将热处理的钢丝加热到均匀的奥氏体区

组织，然后在铅液中冷却，等温转变为索氏体组织。因此钢丝铅淬火的主要工艺参数为钢丝的加热温度、加热时间、铅液温度和铅液淬火时间及影响这些参数的主要因素。

5.4 实验结论：

针对 $\phi 1.20\text{mm}$ 制绳用钢丝的半成品原料 $\phi 3.0\text{mm}$ 的热处理工艺参数，经过大量工艺试验及后序拉拔，确定出以下热处理工艺能满足 GK01-2006 标准 $\phi 1.20\text{mm}$ 制绳钢丝，并且钢丝的综合机械性能较好，扭转值较好，提高了钢丝绳的抗疲劳性。

表 5.6（热处理工艺参数）

钢丝直径 mm	线 温 ℃	铅淬火温度℃	收线速度 m/min
		碳量%	
		0.68~0.75	
3.0	930~940	540±5	20~22

注:铅槽前后段温差不得超过 15℃。

第六章 钢丝拉拔产生热量对钢丝机械性能的影响

拉拔生产中钢丝发热，是普遍存在的现象和问题，它影响钢丝生产的关键问题。一切拉拔工作条件，对冷拉后钢丝性能的影响都可以归纳为“热量”内能变化对钢丝力学性能的影响。

钢丝拉拔实际上是钢丝塑性变形的过程，钢丝在拉拔时引起发热的原因主要有，原料表面的润滑涂层、原料热处理强度、拉丝模具、摩擦、拉拔速度、压缩率等，产生的热量将对拉拔成品的强度和韧性产生影响。它的危害表现在：

1 引起润滑剂的润滑失效，使润滑膜破坏。

2、引起模具寿命的缩短，拉拔时的发热约有 20%热量累积在模具中，若不及时消除，使模具温度很高，模孔温度分布不均匀，致引起模孔局部地区磨损严重，影响模子的使用寿命。

3、拉拔时产生的热量，造成钢丝表面温度急剧升高，并且总是高于钢丝中心部份，因而形成残余应力，在高速拉拔时，若润滑不良，往往会产生很大的残余应力，当残余应力很大时，会引起钢丝表面产生裂纹，甚至引起拉断。

4、引起钢丝机械性能恶化，由于发热引起温升，使钢丝在拉拔过程中经常处于 150~240℃温度范围，因而极易引起应变时效，其结果使钢丝强度增高，韧性下降，钢丝变脆，韧性急剧下降。

本章主要从拉拔产生热能的关键点作手（产生热能环节主要是：拉丝模具、压缩率、冷却条件、拉拔速度、润滑条件），分析其产生原因，通过试验选择最佳的拉拔工艺，减少热量的产生和加快热量的散发，使制绳钢丝满标准要求。

6.1 拉丝模具参数工艺试验方案：

6.1.1. 模具工作锥角度对钢丝力学性能影响的试验及结果

1、实验方法：

实验条件

拉拔工艺：选用九道次

拉拔路线：3.0-2.70-2.41-2.16-1.96-1.78-1.61-1.46-1.32-1.20

公差范围：±0.02

实验机型：LW-9/405 拉丝机。

实验材料：选用 $\phi 3.0\text{mm}$ 70# / 0.70-0.73 首钢半成品，

实验设备

LW-9/405 拉丝机

LX-5000A 拉力试验机

NX-3 扭转试验机

10 吨电力拉力机

弯曲试验机

2、分别选用半角为 5° 、 6° 、 7° 、 $(0.85d)^\circ$ 及按照经验参数选择的工作锥进行实验。

按照 0.85d 和经验参数选择的工作锥角度对拉拔绳丝机械性能及拉拔产生热量对比结果：

如表：

表 6.1：不同工作锥角对钢丝机械性能及热量的影响

		5°	6°	7°	0.85d	经验角度
3.0	强度 (Mpa)	1200	1200	1200	1200	1200
	扭转 (次)	31	31	31	31	31
	弯曲 (次)	16	16	16	16	16
	热量 (KJ)	0	0	0	0	0
2.70	强度 (Mpa)	1302	1341	1308	1299	1297
	扭转 (次)	32	29	31	33	32
	弯曲 (次)	17	16	17	16	18
	热量 (KJ)	15.01	15.90	15.76	15.32	15.07
2.41	强度 (Mpa)	1379	1423	1372	1368	1364
	扭转 (次)	32	30	33	34	34
	弯曲 (次)	18	17	19	19	20
	热量 (KJ)	16.62	17.72	16.94	16.86	16.59
2.16	强度 (Mpa)	1456	1507	1461	1457	1452
	扭转 (次)	34	32	34	33	34
	弯曲 (次)	19	16	18	21	20
	热量 (KJ)	18.16	19.54	18.51	18.67	18.22
1.96	强度 (Mpa)	1529	1576	1536	1540	1536
	扭转 (次)	35	31	34	35	36

	弯曲 (次)	18	16	20	22	21
	热量 (KJ)	19.73	21.05	20.17	20.21	19.64
1.78	强度 (Mpa)	1604	1657	1601	1607	1591
	扭转 (次)	35	33	35	36	37
	弯曲 (次)	21	18	20	22	22
	热量 (KJ)	21.22	22.84	21.78	21.75	21.18
1.61	强度 (Mpa)	1687	1739	1679	1681	1668
	扭转 (次)	37	34	34	38	37
	弯曲 (次)	20	21	21	23	22
	热量 (KJ)	22.41	24.34	23.09	23.04	22.48
1.46	强度 (Mpa)	1771	1825	1768	1759	1749
	扭转 (次)	38	35	37	39	41
	弯曲 (次)	22	19	21	24	22
	热量 (KJ)	23.75	25.81	24.39	24.41	23.69
1.32	强度 (Mpa)	1863	1921	1852	1847	1836
	扭转 (次)	38	33	37	40	39
	弯曲 (次)	21	18	22	22	24
	热量 (KJ)	25.01	27.38	25.72	25.80	24.99
1.20	强度 (Mpa)	1954	2018	1947	1944	1939
	扭转 (次)	39	34	38	41	43
	弯曲 (次)	21	19	22	23	24
	热量 (KJ)	26.27	28.81	26.98	27.10	26.16

以上数据分析:

拉丝模工作锥角为 6° 时钢丝抗拉强度最高、扭转值最低、弯曲值最低、放出的热量最高、,按照经验参数选择的工作锥角度钢丝抗拉强度最低,扭转值、弯曲值最高、放出的热量最低。考虑成品钢丝的综合力学性能,实际生产过程中拉丝模工作锥角度选择为 $0.85d^\circ$ 时最好。当工作锥角越大则钢丝与模子的接触长度越短、钢丝的不均匀变形越严重,使索氏体中的渗碳体片间距减小和增大了其受弯曲折破的机率。

一: 它使单位变形力增大:变形不均匀分布时,将使物体内部产生相互平衡的附加。附加应力使变形能量消耗增加,也使单位变形力增大。

二：使塑性降低：在具有应力不均匀分布的变形物体内，当一处的工作应力达到金属断裂强度时则在该处首先断裂，从而导致金属的塑性下降。

三：使产品质量降低：由于变形的不均匀分布使物体内部产生附加应力，若变形后物体的温度较低，不足以消除此附加应力时在物体内部将存有残余应力，从而使变形体的力学性能下降。同时，由于变形体内各处的变形不同，其再结晶后各处晶粒大小也不同，造成组织残余能分布不均。同时由于工作锥角的影响使钢丝单位时间内的变形量、发热量加大，内能受到影响，使其分布不均匀。

3、实验结论：拉丝模工作锥角度选择为 $0.85d^\circ$ 时钢丝力学性能最好，拉拔产生热量最少，模子使用寿命最长。

6.1.2.定径带长度对钢丝力学性能影响的试验及结论

1、实验方法：

实验条件

拉拔工艺：选用九道次

拉拔路线：3.0-2.70-2.41-2.16-1.96-1.78-1.61-1.46-1.32-1.20

公差范围： ± 0.02

实验机型：LW-9/405 拉丝机。

实验材料：选用 $\phi 3.0\text{mm}$ 70#/0.70-0.73 首钢半成品，

实验设备

LW-9/405 拉丝机

LX-5000A 拉力试验机

NX-3 扭转试验机

10 吨电力拉力机

弯曲试验机

2、分别选用定径带长度为 1~2mm、2~3mm、3~4mm 进行实验。

表 6.2：对拉拔制绳丝机械性能及拉拔进出模温度对比

		1~2mm	2~3mm	3~4mm
3.0	强度 (Mpa)	1200	1200	1200
	扭转 (次)	31	31	31

	弯曲 (次)	16	16	16
	进模温度 (°C)	28	28	28
	出模温度 (°C)	134	141	137
2.70	强度 (Mpa)	1302	1308	1341
	扭转 (次)	31	32	29
	弯曲 (次)	17	18	15
	进模温度 (°C)	97	102	121
	出模温度 (°C)	204	221	247
2.41	强度 (Mpa)	1379	1372	1423
	扭转 (次)	32	33	30
	弯曲 (次)	18	19	17
	进模温度 (°C)	109	127	142
	出模温度 (°C)	231	243	264
2.16	强度 (Mpa)	1456	1461	1507
	扭转 (次)	34	34	32
	弯曲 (次)	19	18	16
	进模温度 (°C)	124	141	137
	出模温度 (°C)	226	240	259
1.96	强度 (Mpa)	1529	1536	1576
	扭转 (次)	34	35	31
	弯曲 (次)	18	20	17
	进模温度 (°C)	116	131	134
	出模温度 (°C)	231	251	275
1.78	强度 (Mpa)	1604	1601	1657
	扭转 (次)	35	35	33
	弯曲 (次)	21	22	19
	进模温度 (°C)	113	127	121
	出模温度 (°C)	229	256	268
1.61	强度 (Mpa)	1687	1679	1739
	扭转 (次)	37	36	34

	弯曲(次)	20	21	21
	进模温度(℃)	134	127	126
	出模温度(℃)	243	255	283
1.46	强度(Mpa)	1771	1768	1825
	扭转(次)	38	37	35
	弯曲(次)	22	23	19
	进模温度(℃)	124	131	142
	出模温度(℃)	237	271	269
1.32	强度(Mpa)	1863	1852	1923
	扭转(次)	36	38	34
	弯曲(次)	21	22	19
	进模温度(℃)	132	137	142
	出模温度(℃)	251	264	286
1.20	强度(Mpa)	1954	1942	2016
	扭转(次)	38	39	34
	弯曲(次)	23	23	20
	进模温度(℃)	142	131	146
	出模温度(℃)	256	274	291

从上表分析可以得出结论:

钢丝拉拔时定丝长越长,当定径带长度为3-4mm时,其发热量、进出模具的温度、强度、硬度最高,而扭转、弯曲值最低。其原因是:定径带增大的影响主要是使钢丝与模具的摩擦力与磨损增加、钢丝的弹性恢复消除弹性后效的影响,增加钢丝的发热。内此时钢丝在变形时除了由位错增殖产生的硬化作用,还存在由于温度升高而产生静、动态回复与再结晶的作用从而使钢丝在抗拉强度和硬度上升过程中韧性变化不大。当定径带长度为2~3mm,钢丝的弯曲及扭转值最高。定径带长度增加使钢丝与模具的摩擦力增大、拉拔力增加、润滑膜破坏,模具迅速磨损以至出现断丝、竹节现象。定径带过短时拉丝模寿命低,被加工金属尺寸精度低。考虑成品钢丝的综合力学性能,拉丝模定径带长度为2~3mm时最好。钢丝温度升高,其时效产生的临界温度值就越高。因此,要想保持和提高钢丝的韧性质量,保证钢丝内部能量分布均匀,则必须采取有效的冷却措施,使钢丝出模后的平均温度急速降低到260℃以下,可有效的防止时效作用对钢丝内能分布的影响

6.2 压缩率对钢丝力学性能影响的试验及结论

试验方案:

1、实验方法:

实验条件

拉拔工艺: 选用九道次

拉拔路线: 3.0-2.70-2.41-2.16-1.96-1.78-1.61-1.46-1.32-1.20

拉拔工艺: 选用十道次

拉拔路线: 3.0-2.78-2.52-2.28-2.08-1.90-1.73-1.58-1.45-1.32-1.20

公差范围: ± 0.02

实验机型: LW-9/405 拉丝机。

实验材料: 选用 $\phi 3.0\text{mm}$ 70#/0.70-0.73 首钢半成品,

实验设备

LW-9/405 拉丝机

LX-5000A 拉力试验机

NX-3 扭转试验机

10 吨电力拉力机

弯曲试验机

2、不同压缩率试验结果及分析对钢丝力学性能的影响见表

表 6.3: 不同压缩率试验结果

钢丝直径 (mm)	总压缩率 (%)	拉拔道次 (次)	平均部分 压缩率 (%)	成品钢丝机械性能		
				抗拉强度 (Mpa)	扭转值 (次)	弯曲值 (次)
3.0→1.2	84	9	18.4	1943	36	18
		10	16.7	1894	39	20

从表中可得出结论:

当总压缩率相同时, 影响冷拉钢丝力学性能的其他变形条件相同时, 成品钢丝的力学性能依其拉拔中所采用的平均部分压缩率而改变。 $\phi 3.0\text{mm}$ 的原料拉制成 $\phi 1.20\text{mm}$ 的制绳钢丝时, 当部分压缩率不同时其性能不同, 由表可知当平均部分压缩率为 16.7% 时其强度比压缩

率为 18.4%的要低 49Mpa。而弯曲值高 2 次、扭转值高 3 次。总之从上面的数据可以看出平均部分压缩率增加则钢丝的抗拉强度极限提高，而弯曲与扭转值降低。所以当压缩率越高则钢丝内部的晶粒择优取向的趋势越大，造成晶粒间的各向异性较大，内能变化较大，从而使钢丝的变形量分布不均匀甚至造成局部应力集中，其最终结果是使钢丝强度上升而塑性、韧性降低。而塑性变形能引起金属内部能量状态的改变，显然必然导致金属在塑性变形后发生一系列的组织结构变化。故金属的塑性变形的物理本质及特点决定了钢丝的最终机械性能。

3 实验结论：压缩率越大，拉拔产生热量越多，钢丝组织结构变化越大，使钢丝强度上升而塑性、韧性降低。

6.3 拉拔速度、冷却条件、润滑条件对钢丝力学性能的影响的试验及结论：

1、实验条件

拉拔工艺：选用九道次

拉拔路线：3.0-2.70-2.41-2.16-1.96-1.78-1.61-1.46-1.32-1.20

公差范围：±0.02

实验机型：LW—9/405 拉丝机。

实验材料：选用 $\phi 3.0\text{mm}$ 70#/ $0.70-0.73$ 首钢半成品，

2、实验设备

LW—9/405 拉丝机

LX—5000A 拉力试验机

NX—3 扭转试验机

10 吨电力拉力机

弯曲试验机

3、拉拔速度、冷却条件、润滑条件对钢丝力学性能的影响：

表图 6.4： $\phi 3.0\text{mm}$ 拉制到 $\phi 1.20\text{mm}$ 制绳钢丝的比较

			30℃	40℃	50℃	60℃
500m/min	钠系拉拔粉	强度 (Mpa)	1845	1867	1904	1962
		扭转 (次)	42	39	35	31
		弯曲 (次)	23	22	19	17
	钙系拉拔粉	强度 (Mpa)	1873	1897	1924	1997
		扭转 (次)	38	38	34	32

		弯曲 (次)	21	19	17	15
700m/min		强度 (Mpa)	1859	1884	1926	1983
		扭转 (次)	40	39	33	30
		弯曲 (次)	24	21	22	16
	钙系拉拔粉	强度 (Mpa)	1947	1994	拉拔脆断严重、无法正常生产	
		扭转 (次)	34	29	18	7
		弯曲 (次)	17	14	9	5
900m/min	钠系拉拔粉	强度 (Mpa)	1875	1891	1927	1958
		扭转 (次)	39	37	34	29
		弯曲 (次)	21	19	19	13
	钙系拉拔粉	强度 (Mpa)	拉拔脆断严重、无法拉拔，不能组织生产			
		扭转 (次)				
		弯曲 (次)				

从以上数据分析可以看出：

随着拉拔速度、润滑剂、冷却条件的变化，钢丝的各项性能指标也相应的发生改变。在拉拔速度为 500~900m/min、润滑剂为钠系拉拔粉 (AT₂)、冷却水温度为 30~40℃时制绳钢丝的力学性能最好。在拉拔速度为 700m/min 时、润滑剂为钙系拉拔粉、冷却水温度为 50℃以上时，钢丝不能拉拔，原因为在拉拔过程中润滑剂、冷却水是通过减小摩擦和最快扩散摩擦产生的热量来间接影响钢丝机械性能的。在拉拔过程中随钢丝拉拔时温度升高，时效机理被加快。在温度较低时，位错运动的障碍只有晶界和渗碳体片；温度升高时铁素体中的间隙原子变得活跃起来，内能活动加快，造成运动位错锚固，其结果是钢丝塑性降低，强度升高，扭转及弯曲性能下降。所以说在冷拉拔生产中钢丝发热，是普遍存在的现象和问题，也影响钢丝生产的关键问题。所以，一切拉拔工作条件，对冷拉后钢丝性能的影响都可以归纳为“热量”变化对钢丝力学性能的影响。

第七章 结论

1、70 钢原料盘条酸洗工艺是金属制品加工的第一步，表面处理技术对成品钢丝存在严重影响，因此应选择硫酸 40~120g/l，硫酸亚铁 <200g/l，温度 60~80℃，时间 10~40min 的条件下，原料表面清洗效果较好，能获得较好的制绳钢丝机械性能。原料酸洗过程出现过酸洗或欠酸洗

2、热处理工艺是决定后序钢丝拉拔的基础，热处理工艺制订和实施对成品的强度和韧性有很大影响。70 钢 $\Phi 3.0\text{mm}$ 半成品，在线温 930~940 (℃)，铅淬火温度 530 ± 5 (℃)，收线速度 20~22 (m/min) 的热处理工艺条件下能获得较好的制绳钢丝成品力学性能。

3、模具定径带越长对钢丝拉拔后的弹性后效越小，其定径效果也就越好，但随着定径带的增长钢丝与模具的摩擦增大，从而加剧磨损并造成拉拔力增大，此时同样使钢丝温度升高，造成抗拉强度与硬度升高，而弯曲、扭转值降低。因此，经过大量实验定径带选择为 2~3mm 时拉拔过程对钢丝内能影响最小，成品制绳钢丝机械性能塑性最好。

4、模具的工作锥角越大则钢丝拉拔时产生的拉拔力也就越大，钢丝与模子的接触长度越短，其变形越剧烈，钢丝变形时单位时间内放出的热量也就越多，最终导致钢丝出模子时的温度较高，造成内能严重分布不均，造成钢丝抗拉强度、硬度升高而弯曲与扭转值降低。因此，工作锥角应根据其具体的压缩率（拉拔的实际线径）来选择，其值为钢丝直径的 0.85 倍较好。

5、对高速拉拔过程（500~900m/min），润滑剂采用钠系 AT₂ 耐高温拉拔粉，循环冷却水温度控制在 30~45℃ 时，能提高润滑条件，减小钢丝加工硬化，使塑性变形能力产生热量下降减，保证了制绳钢丝的塑性能力，提高了钢丝的综合质量。

致 谢

攻读工程硕士研究生的三年中，学习上得到了贵州大学材料科学与冶金工程学院各位领导 and 老师的指导及帮助，在此表示感谢。

本硕士学位论文得到了导师张金柱教授、张家琦高级工程师的极大关怀和帮助，特别在研究方法、论文写作等方面给予了细心指导，也得到了贵州钢绳股份公司相关领导的大力支持和帮助，特向他们表示感谢。同时在三年的学习过程中，得到了父母及家庭的支持，在此向他们表示感谢。

最后，向评审本论文的各位老师表示最衷心的感谢。

附 录

一、 发表论文

1. 贺成明, 张家琦, 张金柱. 影响电镀紫铜胎圈钢丝粘合力因素的工艺探索, 贵州工业大学学报(自然科学版), 2006, VOL. 35, (1)

2. 参加科研项目

1. “提高回火轮丝粘胶力”项目荣获 2000 年贵州钢绳(集团)有限责任公司科学技术进步奖三等奖。

2. “青铜钢丝生产中镀液成份稳定性探索及稳定青铜胎圈钢丝半成品平直度、消除半成品钢丝竹”项目荣获二〇〇一年度贵州钢绳(集团)有限责任公司科技成果一等奖。

主要参考文献

- [1] 李志深. 钢丝生产[M]. 湖南: 湘潭钢铁公司职工大学, 1992.
- [2] 余永宁 编. 金属学原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000 .
- [3] 宋维锡 主编. 金属学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1980.
- [4] 何吉林主编. . 钢丝生产[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [5] 李磊 译. 线材工业的过去、现在和未来[J]. 金属制品, 1984, (6) :46~49
- [6] J. W. Christian. The theory of transformations in metals and alloys : an advanced textbook in physical metallurgy pt. 1. Equilibrium and general kinetic theory. / Edition 2d ed. Imprint Oxford New York Pergamon Press, 1975.
- [7] 大连工学院. 金属学及热处理[M]. 北京: 科学出版社, 1975.
- [8] 艾伦·德福. 冷拉中的变形和它的影响[J]. 钢丝, 第一卷 80-92
- [9] 文一元. 如何提高模具使用寿命[J]. 金属制品, 1991.21(1): 15-19
- [10] Steel Wire Handbook (D) Carbide Dies and Die Finishing Equipment [M]. 1980
- [11] Steel Wire Drawing Dies [M]. 1985. №5
- [12] Wire Industuy [J]. 1979 (11): 817~820
- [13] Wire Technology [J]. 1978 (10): 77~79
- [14] Bogdan Colis. Janw. Pilarczyk. Zbigniew Blzgjowski and Eugeniusz FiliPCzyk. Prawing Practice of steel with pressure dies[J]. WIRE JOURNAL INTERNATIONAL 1997 (4): 54-67
- [15] 蒋克昌. 钢丝拉拔技术[M]. 轻工业出版社, 1994, 54
- [16] 陈联满. 施友方. 钢铁材料金相图谱[M]. 上海: 科技出版社, 1981.343-344
- [17] 杨觉先. 金属塑性变形物理基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994, 88
- [18] 殷森. 钢丝拉拔自断原因分析[J]. 金属制品, 1987,31(4): 3-4
- [19] 韩观昌, 程皖. 钢丝生产工艺装备(下) [M]. 北京: 科技大学出版社, 1988, 88-100
- [20] 梁秀宁. 钢丝拉拔时的直接水冷装置[J]. 金属制品, 1983, 20(2): 25-31
- [21] 戴宝昌. 重要用途线材制品生产新技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001, 65
- [22] 秦方信. 钢丝的高速拉拔[J]. 金属制品, 1990, 25(2): 28-31
- [23] 杨多新. 模具磨损与润滑机理[J]. 金属制品, 1982,25(5): 32-35
- [24] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980, 414
- [25] K. Keun. An Upper bound soluteion of tube Drawing [M]. J. Nlat. Protech. 1997
- [26] V. Nagpal. A simplifyied Analysis of The Lubricated Shape-Extrusion [M]. 6th NAMRC. USA. 1978
- [27] 安小雪. 拉拔过程中的残余应力[J]. 金属制品, 1987,24(1): 34-39

- [28] 包永千.金属学基础[M].北京:冶金工业出版社,1986,45-61
- [29].钱苗根,吴以南 主编 材料表面技术及其应用手册 北京:机械工业出版社,1998年:
104~106
- [30] William G Wood. Metals Handbook. Ninth Edition. Ohio: American Society for Metals,
1982
- [31].钱苗根,吴以南 主编 材料表面技术及其应用手册 北京:机械工业出版社,1998年:
104~106
- [32] William G Wood. Metals Handbook. Ninth Edition. Ohio: American Society for Metals,
1982
- [33] 李志深. 钢丝生产工艺[M]. 湖南:湘潭钢铁公司职工大学,1992.
- [34] 戚正风. 金属热处理原理[M]. 北京:机械工业出版社,1986
- [35] 刘国勋, 主编. 金属学原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.
- [36] 过均一. 盘条—钢丝热处理[J]. 河南:金属制品,1991(3):8~10.
- [37] D. A. Porter and K. E. Easterling , Phase transformations in metals and alloys / London:
Chapman & Hall, 1992. TG111.5 FP84 1992.
- [38] 史美堂. 金属材料及热处理[M]. 上海:上海科技出版社,1989.117
- [39] 索科洛夫. 钢的热处理工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1959.
- [40] R. W. Cahn , Physical metallurgy / Edition 3rd rev. & enl. ed. Imprint Amsterdam :
North-Holland Physics Pub., 1983.
- [41] 房义萍. 贵绳股份分公司内控标准 GK01-2006.