

王世定 赵济群 编译
高业倬 董长荣

联小型电动机制造工艺

3.51

机械工业出版社

本书以苏联 4A 系列电动机的专业工艺及其装备的研究成果为背景,着重介绍现代小型异步电动机成批生产采用的专业工艺;较详细地探讨专业工艺及其机械化设备的参数和技术经济特点,并与欧美国家电机制造业所采取的工艺过程组织方案作了对比;本书还论述了小型电动机专业工艺的技术发展趋势。

本书主要对象是电机制造及有关机械工业部门的工程技术人员,本书也可供工科大专院校相应专业的师生参考。

苏联小型电动机制造工艺

王世定 赵济祥 编译
肖业倬 董长荣

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

开本 787×1092 1/32印张 8 3/4·字数 192 千字

1986年7月北京第一版·1986年7月北京第一次印刷

印数 0,001—2,420·定价 2.10 元

统一书号: 15033·6233

前 言

苏联当前生产的0.16~400kW异步电动机4A统一系列是在1969~1975年间完成产品设计和生产工艺准备工作的。在此期间,曾经组织了包括14个部门42个机构的研究、设计及工艺力量,协调进行工作,取得了比较好的技术经济效益。

4A系列采用的专业工艺的制定和机械化、自动化专用装备的研制工作主要由全苏电机工艺科学研究院(ВНИИТ-электромаш)负责。该院对电动机的叠压与装配,绕线与绝缘,浸渍与烘干及检查与试验等,占总制造工时80%的专业工艺领域进行了大量试验研究工作,在此基础上,于1981年出版了由В.Г.Костромин主编的《异步电动机制造工艺(专业工艺)》(《ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ(СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ)》)一书,书中比较全面地对电动机专业工艺及其设备作技术经济分析,并介绍了世界各国在这方面取得的进展。

该书对我国当前中小电机行业进行技术改造有一定参考价值。该书是我们编译本书时取材的主要部分;此外,本书第六章内容还参考了А.А.Осьмаков的《ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН》一书的有关章节,作了补充;本书第九章的内容主要选自В.Б.Мощицкий, Б.И.Черлаков, Г.И.Гагашкин的《ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТ-

РО-ДВИГАТЕЛЕЙ》一书的第七章。

本书在大连电机厂领导支持下，由大连电机厂、大连中小型电机研究所几位同志共同编译，由赵济祥同志负责全文译校，由王世定同志主审。参与本书工作的还有大连电机厂工艺科关铁人，邱耀成、崔晓红同志。

由于编译者水平所限，书中不当之处，希读者指正。

目 录

前言	
第一章 铁心冲片的冲制和热处理	1
一、制造铁心冲片的电工钢及其技术要求	1
二、电工钢的冲压性能	1
三、电动机大量生产中采用的冲压工艺和设备	5
四、铁心冲片热处理的物理基础	9
五、铁心冲片热处理的现代工艺和设备	10
六、4A系列异步电动机铁心冲片热处理的 典型工艺和设备	12
七、冷轧无硅电工钢的电热老化	19
八、缩短转子冲片热处理周期的可能性	22
第二章 铁心叠压工艺	25
一、铁心结构和叠压工艺的现状	25
二、铁心的材料比耗	26
三、铁心的结构工艺性	30
四、铁心的叠片工艺	35
五、冲片的定量工艺	37
六、叠装过程中冲片的定心和取向工艺	39
七、铁心的压装工艺	47
八、铁心叠压的综合工艺过程和设备	54
九、铁心叠压工艺的发展趋势	58
第三章 带绕组定子的工艺特点及其嵌线方法	60
一、定子绕组机械化嵌制的工艺特点	60
二、定子绕组的直接嵌线法和间接嵌线法	75
三、定子绕组的间接嵌线法	84
四、定子绕组的机械绑扎法	100

第四章	定子绕组的机械嵌制设备	108
一、	直接法定子嵌线机	106
二、	间接法定子嵌线机	120
三、	多功能间接法嵌线机	144
第五章	续槽、插槽楔、压线、端部整型和 绑扎采用的各种设备	158
一、	定子续槽机	156
二、	定子插槽楔机	167
三、	绕组端部整型机	169
四、	槽内线圈的压线	176
五、	绕组端部绑扎机	178
第六章	绕组浸渍工艺和设备	185
一、	绕组浸渍的主要作用和方法	185
二、	浸渍和热处理的工艺过程及	188
三、	滴浸工艺与设备的典型化和	213
四、	滴浸法的工艺参数计算	214
第七章	电动机的部件装配及总装配工艺	218
一、	鼠笼型转子的装配工艺	218
二、	电动机的机械化装配	229
第八章	电动机的检查试验和设备	238
一、	生产过程中电动机的检查和试验	238
二、	检查与试验的方法和装备	239
三、	检查过程自动化和典型检查装备	245
第九章	小型异步电动机制造及其机械 加工工艺发展趋势	257
一、	小型异步电动机制造的现状和发展	257
二、	小型电动机机械加工工艺的发展趋势	259
三、	电子计算机在自动线中的应用	263
	参考文献	266

第一章 铁心冲片的冲制和热处理

一、制造铁心冲片的电工钢及其技术要求

长期以来,制造交流电机铁心冲片采用含硅量为2%以下的电工钢片。近年,电机工业越来越广泛地使用无硅钢片。在中、强磁场中,在较低的比损耗水平上,无硅钢比含硅的电工钢具有更高的磁感应强度^[3]。

当前,国际上还有一个趋势,即用冷轧电工钢代替热轧电工钢。冷轧钢有一系列优点:如较好的表面光洁度,较小的厚度偏差和波纹度,使铁心压装易于机械化,并提高压装系数。随着冷轧卷料的大量提供,大大有利于节约金属和冲压过程自动化。现代电工钢生产工艺在清除有害杂质和改善电磁性能方面,有较大的进展^[1~3]。

原来,苏联有关电工钢的标准和技术条件仅对电磁性能作出规定。但在新的电工钢标准—ГОСТ 21427.2-75 和 21427.3-75中,对冷轧无取向电工钢片的机械和工艺性能也作出相应规定^[4~10]。

二、电工钢的冲压性能

除电磁性能外,冲压性能是电工钢的基本性能之一,它必须适应于冲片冲压工艺的特殊条件。在实际生产中,钢的冲压性能通常用冲模寿命来评价。影响这项指标的不仅有冲制材料的特性,而且还有设备性能、冲模的制造精度、冲压条件等。提高冲床刚性和材料的冲压变形速度^[11, 12], 保证

上、下模之间的合理间隙^[11, 13]，正确选择冲模材料，提高模刃表面的光洁度^[6, 11, 14]以及遵守操作规程^[11]等，均有助于提高冲模寿命。此外，冲模工作部位的磨损还与润滑剂和冲片的表面绝缘涂层有关^[11, 15, 16]。

因此，规定电工钢的冲压性能时，必须在相同的试验条件下，研究和对比被试材料的物理、机械性能和工艺性能的各项指标。研究表明，这些指标包括：冲模工作部位的磨损，冲压件毛刺和边缘冷加工硬化的形成，以及形状和尺寸的变化等^[6, 45]。

为了对硅钢片的冲压性能作出定量的评价^[12]，可以使用模刃磨损程度、冲片毛刺和边缘冷加工硬化的形成以及形状和尺寸变化等数据。当一套冲模的工作部位开始强烈磨损时所达到的冲次与这些数据相关。将被试材料与标准电工钢（如1211，1212，1213）的相应数据作比较，就可以衡量这种材料的冲压性能。

这种方法虽然能比较科学地研究被试材料的冲压性能，但工作量大，用材料多。还有，上述几项指标也不全是独立参数。例如，毛刺高度与上下模磨损量近似成正比（图1-1），并随冲次的增加而增大（图1-2）^[23]，而冲片边缘冷加工硬化区的宽度与毛刺高度有关（图1-3）^[6]。在不同试验条件下，包括2011、2013在内的其他材料也有与图1-1和图1-2相似的曲线^[10, 14]。

可见，冲模寿命是衡量冲压性能的标准之一，而冲模的寿命是按冲制件在符合规定的毛刺高度（如50 μm ）下所达到的冲次来确定的。衡量冲压性能的第二个标准是环形冲片几何尺寸的各向异性（即不同方向上的尺寸偏差）。

由于钢板在应力状态下产生不均匀变形，使冲制件内外

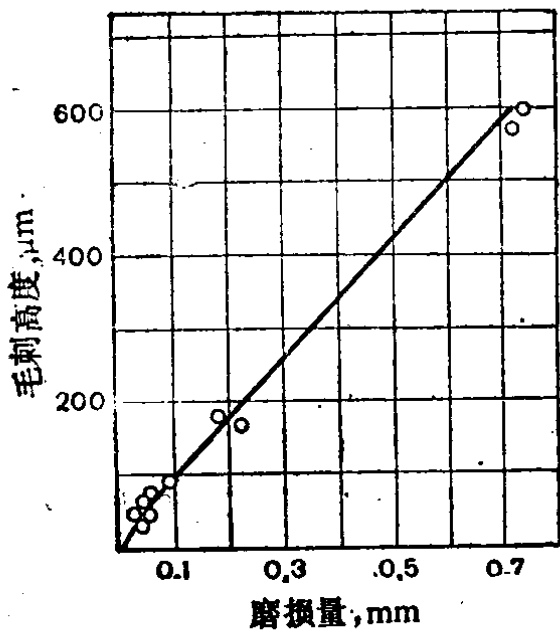


图1-1 冲片毛刺高度与上下模磨损量的关系曲线

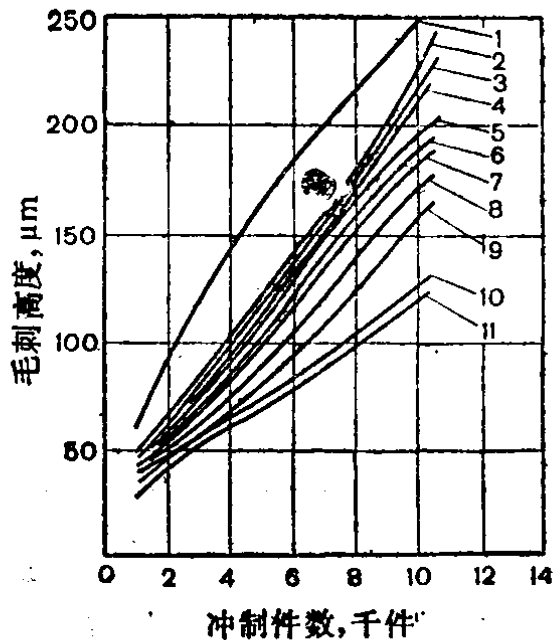


图1-2 冲片毛刺高度与冲制件数量的关系曲线

冲制材料：带涂层、电工钢，冲模的工作部位用以下牌号钢制成：

- 1—ЭИ-366 2—Xr2Φ4 3—X3Φ4
4—Xr2Φ6 5—X12M 6—X3Φ6
7—X6Φ4M 8—X3Φ8 9—Xr2Φ8
10—X12Φ4 11—X3Φ12

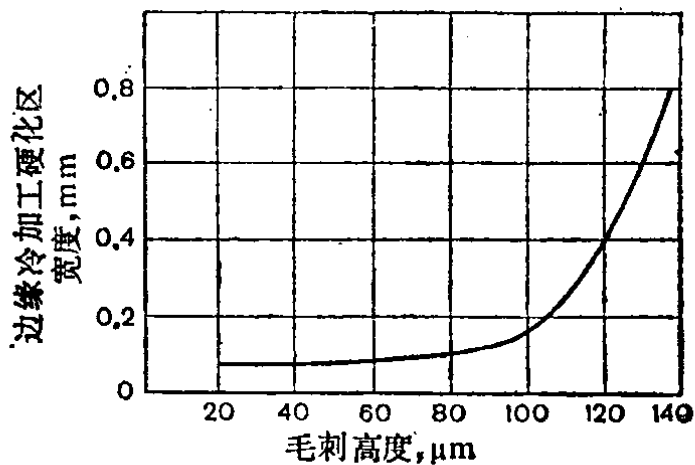


图1-3 边缘冷加工硬化区宽度与冲片毛刺高度的关系曲线

圆都近似椭圆形。其形状偏差：

$$\varphi = D_{\max} - D_{\min}$$

式中 $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ ——椭圆的长径和短径。

实际上，为了比较铁心冲片变形程度，可用椭圆直径限值之比：

$$K = (D + 0.5\phi_{\max}) / (D - 0.5\phi_{\max})$$

式中 D ——孔径的名义尺寸。

材料为1211~1213，2011~2013电工钢，孔名义直径为30~214 mm的定转子冲片，其 K 值在各种尺寸情况下都相当稳定，因此，可用来评价电工钢材料的变形的不均匀性——冲压性能。 K 值可用环状试样（如内径为100 mm和外径300 mm）确定^[6]。

在冲压性能的评价方法中，如引入瞬时尺寸精度作为衡量标准，可使这一方法的应用范围更加广泛；不仅对圆形零件而且对其他形状的零件也适用^[10]。但首要的问题，还是确定冲压性能与材料机械特性之间的关系，并相应对机械特性做出规定。

零件的变形及其尺寸的偏差分布与冲压材料机械特性具有一定的关系^[9]。冲压材料的机械特性是决定冲模寿命和冲片精度的一个主要因素^[45]。

为了保证有良好的冲压性能，材料的强度极限应为300~600 MPa，延伸率 δ_{10} 为10~35%。按文献[10]中的数据 $\sigma_b \leq 400$ MPa， $160 \leq \sigma_r \leq 250$ MPa。对2011，2013冷轧电工钢已考虑了以上推荐值，其机械性能要求已列入苏联国家标准ГОСТ21427.2-75中，（ $\sigma_b = 300 \sim 500$ MPa， $\delta_{10} = 30\%$ ）。在良好的工艺和设备条件下，采用机械性能符合以上规定的冷轧无硅钢片，可提高冲片的生产率和质量。

但是,采用现代高速冲床冲制冷轧钢片 2012 的经验表明,尚需进一步探索强度极限和延伸率的最佳值;并从定子冲片落料过程中钢板的变形机理出发,来选择屈服极限和硬度的最佳值^[11]。例如,在民主德国,对无硅冷轧钢片除规定 $\sigma_s=350\sim 550\text{ MPa}$ 外,还推荐了 $\sigma_T/\sigma_B\geq 0.7$ 和 $HV=130\sim 160$ 。

三、电动机大量生产中采用的冲压工艺和设备

由于异步电动机定、转子之间气隙很小,为了保证气隙的均匀度,对铁心冲片的精度和同心度提出了较高要求。铁心冲片的冲制工艺主要有三种类型:单工序自动冲压法,即采用多工位级进式冲模;多工序冲压法,即采用复式冲模;混合冲压法即在大型下料冲床上落圆形胚料,然后用冲槽机冲制。

在使用卷料时,第一种工艺最先进,适用于直径为 250 mm 以下冲片的单排或双排冲压^[17]。对于直径为 170 mm 以下的冲片,最好采取双排方案,可节约材料约 6~11%。由于可利用负连接边,单排或多排的级进冲压均可提高材料利用率。当采用负连接边结构时,因条料宽度和进给节距均小于定子冲片直径,因此,在冲片外圆上会出现缺边。如果不采用缺边设计,则可使条料宽度等于定子冲片直径,即取消连接边留量。对于不采用缺边设计的定子铁心,最后必须加工外圆,车去加工余量,以保证铁心尺寸公差。

冲压工艺自动化对自动冲床提出了较高要求,主要是高冲次,送料节距的高精度,结构刚性好,并且间隙小,不变形。

国外精密高速自动冲床的特点是:有刚性好、耐振动的双柱式底座,滚柱结构的导向板和较轻又平衡良好的滑块。

在冲床的额定压力为400~4000kN范围内，送料速度可达50 m/min（联邦德国 Schuler 公司和瑞士 Eccca 公司），甚至60 m/min（法国Grimar公司）。

采用 Ferguson 分度机构（图 1-4），可使送料精度达到 $\pm 0.1\text{mm}$ ，分度机构是蜗轮、蜗杆机构，蜗杆有可变提升角，而蜗轮为星轮。

在级进式冲压中，冲好的定、转子冲片借槽来定位并自动送出。对于外径在 200 mm 以上的冲片，则采用空心胎架和冲片定位装置。

当冲片直径太大时，因冲床维护复杂，价格昂贵，而且冲模外形尺寸又很大，就不宜采用多工位冲模进行级进式冲压。所以，对冲床作《串列》布置的级进冲压系统就应运而生。这种系统包括两台冲床（图1-5），其中第一台用于冲制转子片，第二台冲制定子片。两台冲床同步运行，可以使它们之间的条料补偿长度最小。这种方法适用于冲制直径 630mm 以下的冲片。

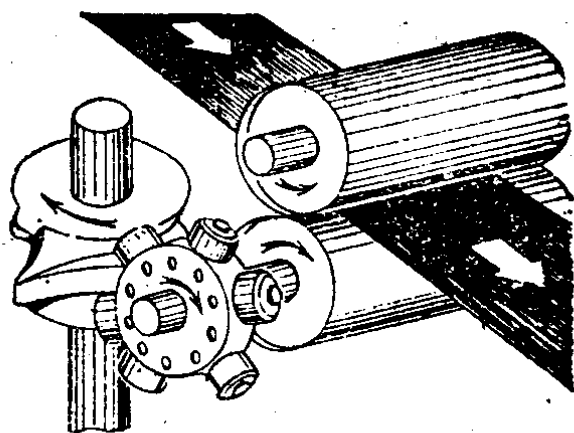


图1-4 Ferguson凸轮分度机构

直径为 400~900mm 的铁心冲片可采用复式冲模在压力为5000kN 以下的通用冲床上冲制；或用混合冲压法，在通用冲床上进行落胚料，然后，在冲槽机上冲槽。并按串列布置原则安装 2 台定、转子冲槽机。

现代高速冲槽机的冲次可达1500次/min，装有Ferguson

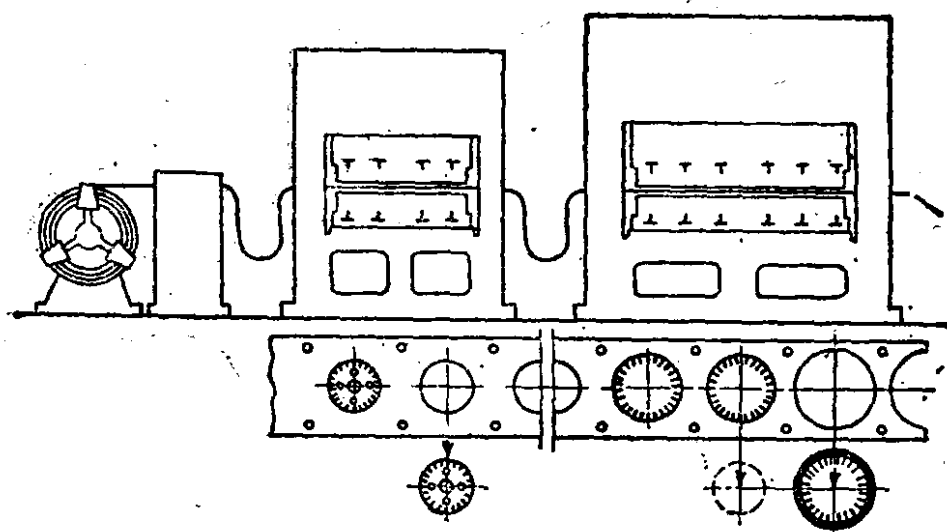


图1-5 采用串列系统的冲压方案

机构可自动上料，夹紧，并将完工的冲片自动卸下，叠放在铁心装压胎上。

对于小直径的铁心冲片，可采用混合冲压法，先在下料冲床上多排落圆胚料，冲槽等工序则借多工位冲模在另外冲床上完成。民主德国建立的一条用于直径 180mm 以下冲片的冲压自动线（以 PASR-250 和 PASZ-160 冲床为基础组成）和全苏电机工艺科学研究院巴库分院设计的一条用于直径为 250mm 以下冲片的冲压自动线^[17、18]，都属于这一类型。

提高冲模寿命是自动冲压工艺中的重要问题。冲模寿命关系到冲制件的质量和成本（约占冲片工艺成本的 90%）。提高冲模寿命的基本途径是改善冲模结构、提高制造精度和采用新材料。

级进冲模典型结构^[19]的特点是：

冲模闭合高度尽可能选择最大允许值（根据冲床参数确定），以增强主要支承和导向零件（上、下模座、垫板、脱

料板等)的厚度和刚性,提高冲模寿命;

冲模采用五工位,即在传统四工位基础上增加一空工位,以保证转子冲片的尺寸精度和冲模刚性;

在冲孔过程的瞬间固定脱料板,在落料成型工位采用浮动冲头(плавающие пуансон)[⊖],上下模借滚珠导柱相对移动,以保证间隙均匀。

卷料在下模表面的导向,用锥体心轴代替传统的导板结构,可减少带料移动时的摩擦并改善高速冲压性能。

一般钢质冲模的很多结构件,如刚性和强度符合要求,都可用于带硬质合金模刃的冲模,否则需改变设计。

为保证有良好的冲片精度,上、下模零部件要求特殊精密加工。苏联一些电机厂在3Г71型平面磨床上,采用成型磨削工艺不能完全达到规定的精度要求。下模拼块在梯形角和大弧的弦距方面要做到完全互换,废品率就很高^[21]。但采用一种摇杆式夹具固定钻石磨笔来修正磨轮,可保证拼块的弦距尺寸的精度稳定。采用钻石校正滚轮来修正磨轮,可保证下模拼块和冲头的槽形和尺寸符合公差要求,同时可提高成型磨削效率将近20%。

硬质合金材料的下模拼块及冲头的加工工艺也可借平面磨床进行成形磨削^[22]。

由于硬质合金材料较缺,使用条件特殊,目前钢质冲模的使用仍较为广泛。由于高铬钢X12、X12M、X12φ1中碳化物的不均匀性,明显影响冲模寿命。为改善并提高钢的性能,冲模工作部位所用的材料毛坯要经多次锻压加工^[11]。

新型模具钢X6φ4M和X12φ4M在耐磨性方面不低于

⊖ 浮动冲头在精密冲压技术中在上模(冲头)的反方向上,采用推顶机构施加反作用力,使冲片在剪切过程中,不致因单向受力而变形。——译者注

X12M (见图1-2), 并有较好的机械和工艺特性^{〔11、23、24〕}。用X6 ϕ 4M代替X12M, 冲模寿命可提高40%^{〔24〕}。

四、铁心冲片热处理的物理基础

目前, 苏联100kW以下统一系列异步电动机的铁心冲片采用冷轧无硅电工钢 2013, 其厚度为 0.5mm。为保证规定的磁性能指标, 铁心冲片要进行退火。考虑到冲片借热氧化来形成片间绝缘, 并借焙烧进行去油最为有效, 因此, 在冲压后, 对铁心冲片进行包括焙烧、退火和氧化在内的热处理, 是获得高质量冲片所必不可少的工艺。焙烧的作用是消除在轧制和冲压后留在冲片上的油污, 这是因为在退火过程中, 油会在中性气体或还原气体中分解, 在冲片表面形成烧结性沉积物, 并阻碍均匀氧化膜的形成。焙烧温度和时间的选择与润滑油的牌号有关。根据油是否完全气化和燃烧的状况, 一般焙烧温度可选择在400℃以下, 保持时间30分钟。普通工艺用润滑油的闪燃温度在160~280℃范围内^{〔25〕}。

由于冷轧过程中, 在金属整体内部以及冲压过程中沿铁心冲片剪切处的边缘, 都会出现晶粒的破碎和畸变, 即钢板的结晶组织有改变, 因此, 其物理和机械特性, 其中包括磁特性, 也随之改变。在室温条件下, 经受冲压而强烈变形的金属的硬度会提高, 内应力增大。随着温度提高, 金属出现恢复现象即软化, 内应力减小, 而结构并无明显变化。变形的结晶体趋于细化, 其取向近似于初始晶粒的方向, 这一过程称为多边形化。随后, 当新的, 特别小的晶粒出现并增多时, 开始产生再结晶过程^{〔26〕}。这三个过程, 即恢复, 多边形化和再结晶很难明确区分, 因为它们的温度区域部分有重叠。

再结晶过程对电工钢铁心冲片的质量至关重要，经过这一过程，可使因冷加工硬化而变坏的磁特性得到恢复，退火的目的也就在于此。退火在中性气体或还原气体中进行。在后一种情况下，再结晶过程还伴随有脱碳。退火的温度为 $750\sim 850^{\circ}\text{C}$ 。

冲片退火后，要注意调节冷却速度，使老化效应减轻并使温度逐渐降到氧化温度 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。冲片借空气或水蒸气进行氧化，表面形成以四氧化三铁 (Fe_3O_4) 为主要成份的均匀氧化膜。

上述过程通常在隧道型多室加热炉内进行。这种炉与封闭型炉相比有很多优点：生产率高，退火均匀、可连续进行工艺过程的控制，减轻冲片变形以及占地面积小等。

五、铁心冲片热处理的现代工艺和设备

当前，外国公司广泛采用退火与脱碳相结合的热处理工艺^[27, 48]，这是钢铁工业制造成品钢板的典型工艺。对半成品无硅钢板进行热处理的典型设备有丹麦 Thrige Titan 公司^[47]和联邦德国 M·Ludwig 公司的工业炉^[27, 48]。这些炉在原理和结构上基本类似。

M·Ludwig 公司采用的退火和氧化工艺过程如下：

1. 在放热型气体中进行无氧化加热至 $760\sim 780^{\circ}\text{C}$ ，其气体成分如下 (%)：

一氧化碳 (CO) 0.4

二氧化碳 (CO_2) 0.6

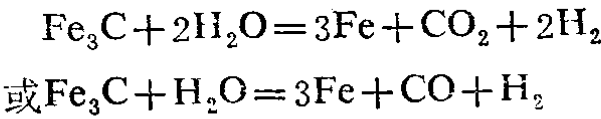
氢 (H_2) 13

氮 (N_2) 其余

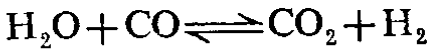
气体湿度按露点温度，为 $+8^{\circ}\text{C}$

2. 在上述气体中，钢的脱碳温度为 760~780℃，湿度按露点温度为32℃。为此，要向炉中送入水蒸汽，以保持 $H_2O/H_2=0.33$ ，即 8~12kg/h。

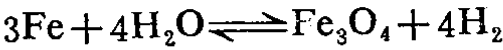
脱碳过程有下列反应：



气态成份之间的相互作用按下列化学方程式进行。



3. 在潮湿的保护气体中冷却至570℃。
4. 在温度560~570℃状态下氧化，其方程式如下：



此时，向炉内送入水蒸汽，其数量需保持 $H_2O/H_2 = 7$ ，约为120kg/h。

5. 在与氧化过程相同的气体中，冷却至400℃。
6. 在空气中冷却至30~50℃。

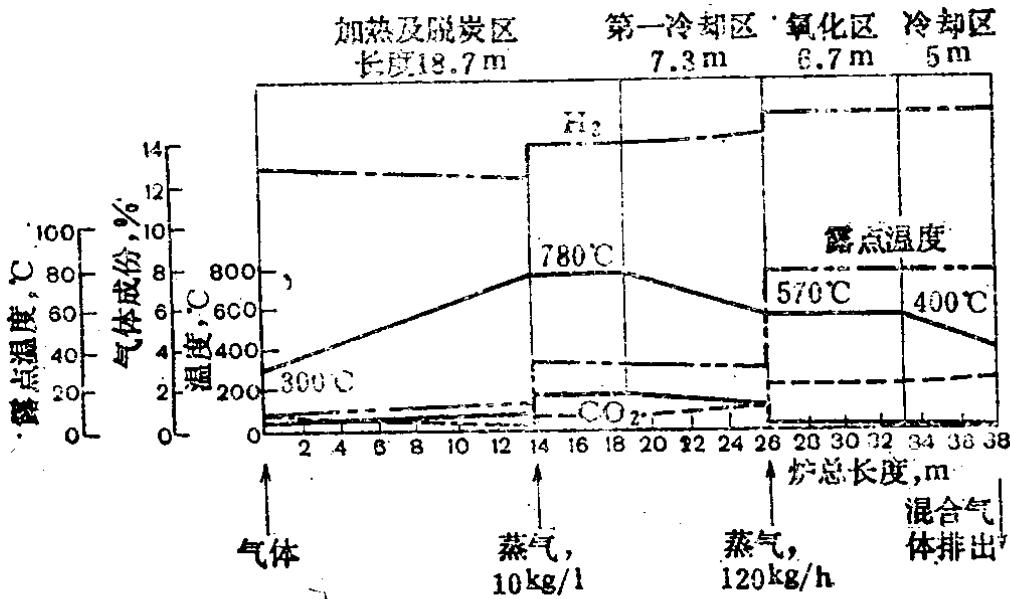


图1-6 联邦德国M.Ludwig公司热处理加热炉采用的温度-时间和介质气体输送规范