

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

锥辊辗轧理论

罗守靖 霍文灿 著



锥辊辗轧理论

罗守靖 霍文灿 著

机械工业出版社

锥辊辗轧理论主要是针对螺旋叶片冷辗轧成形机制而确立的。它的确立实现了引进设备调整、从经验试轧到科学预报的转变。同时,引入异步辗轧原理,提出了一种新的螺旋叶片成形构思,从而发展了金属塑性加工理论。

本书集中反映了哈尔滨工业大学在锥辊辗轧理论及其应用方面的成果,着重阐明了锥辊异面辗轧过程的建立条件,辗轧过程仿真和仿真支持系统,锥辊共面异步辗轧理论数学模型,模拟装置的设计和制造,以及成形规律和力矩的试验研究等内容。

本书是一本理论性、应用性均很强的著作。可作为高等学校、研究院所材料科学和机电工程等学科本科生及研究生的参考书;同时,对从事专业技术开发、研究和应用的科技人员也是一本有价值的资料。

图书在版编目(CIP)数据

锥辊辗轧理论/罗守靖,霍文灿著. —北京:机械工业出版社, 2000. 10
ISBN 7-111-07990-6

I. 锥… II. ①罗…②霍… III. 截锥斜
IV. TG335. 17

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第05686号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:杨燕 版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟
王霄飞

封面设计:李雨桥 责任印制:何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000年6月第1版·第1次印刷

890mm×1240mmA5·6.125印张·170千字

0 001—1 500册

定价:15.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

作者利用金属塑性变形理论，研究了锥辊辗轧不均匀变形过程（即接触区和非接触区并存），协调变形流动的成圆—成螺距理论，其创新点为：

1) 在平辊均匀压下同步轧制理论中，不均匀变形被认为是“有害”而要予以防止的。而锥辊异面辗轧利用轧辊的锥形性质和不对称布置方式，在两辊间形成一楔形扭曲辊缝，产生不均匀成圆和滚弯成螺距两种变形，这正是所希望的。理论揭示了锥辊异面辗轧如何有效利用不均匀变形，达到优质、高效成形螺旋叶片的目的。

2) 在锥辊异面辗轧理论基础上，提出一种新构思，以克服锥辊异面辗轧机调整困难和不能成形小螺距叶片的不足，其创新点是利用了兩辊共面形成楔形辊缝产生的不均匀压下成圆，同时还利用异步轧制中两辊圆周速度差产生“弯曲”的有害变形，使轧件形成螺旋升角，进而形成螺距。以此研究了锥辊共面异步辗轧是如何有效利用“不均匀压下”和“弯曲”两种不均匀变形，从而确立了锥辊共面异步辗轧理论。

锥辊辗轧理论的研究和确立，得益于生产实际的需要，佳木斯联合收割机厂在引进美国约翰·迪尔公司联合收割机制造技术的同时，引进了一台具有国际专利权的英国 LENHAM 公司最新产品—FM-600 型螺旋叶片辗轧机。这种轧机，可将钢带连续辗轧成螺旋叶片，集高效、节能 省料、柔性于一体，工艺先进，改变了我国螺旋叶片生产工艺落后局面。然而，调整却十分困难，即使是英国和引进该设备的美国、原西德、日本等国家，也均采用“经验调整法”来完成。英国专家 H. Mealing 先生来厂传授调整方法时认为：钢带喂入高度、两锥形轧辊的相对位置和轧辊的倾斜度、压力、辗轧速度、支承辊及指辊的位置等是影响螺旋叶片直径、螺距及旋向的七个主要因素。为了轧制一种尺寸的叶片，需要在经验数据范围内进行大量试轧，取得这

七个因素的协调数据。1982年为工厂提供培训的原西德双桥(Zweibrucken)联合收割机厂,在调整1000系列联合收割机上的13种螺旋叶片时,用了近1年时间,前后更换了几次材料,浪费了大量优质钢材,才取得了生产数据。因此,突破“调整”的局限性,是扩展引进设备应用范围的关键。为此,工厂求助于学校,学校又不容辞地开展了艰辛的研究工作,提出了锥辊辗轧理论,完成了引进设备调整从经验试轧到科学预报的飞跃;在锥辊异面辗轧理论研究基础上,又开创了锥辊共面异步辗轧的新思维,进行辗轧新原理、新设备的前期研究工作,并确立其理论。其理论成果,先后获黑龙江省科技进步二等奖,国家技术发明四等奖。本专著就是基于这一背景,撰写而成。

本成果的完成是群体的杰作。博士研究生杨合充分发挥自己特长,在建立“锥辊异面辗轧”数学模型、多元非线性方程解,优化、建立数据库,工艺参数预报、确认“零”内径必然性、板带面内弯曲理论模型方面进行了创造性劳动,其博士论文受到同行专家赞誉。硕士研究生陆宏,在“锥辊共面异步辗轧”方面同样付出了艰辛的劳动,完成了木质锥辊模型的塑泥试验、设计,加工制造了锥辊共面异步辗轧样机,得出了创新的结论。佳木斯联合收割机厂赵秀峰高级工程师,参与了大量软件开发和带钢国产化的大量试验工作,计算机预报工艺参数的轧制验证工作和“零”内径轧制的验证工作等。尤其值得一提的是,在专著撰写时,霍文灿教授深入地对接锥辊咬入、锥辊异步辗轧理论,进行了卓有成效的开垦工作,为锥辊辗轧理论的完善,做出了重大贡献。

作为一本专著,虽然有创新的东西,但在运用现有的基础理论时可能会有诸多不足的一面,甚至不妥或错误,望阅读本专著的学者、同行不吝赐教。

作者

1998年8月

主要符号表

a_i	轧件 i 点不被压缩长度
a_z	轧辊平动量；轧件宽向被压下之长度
b_0	钢带宽度
d 、 D	螺旋叶片之内、外径
D_0	加工目标
EPS_1 、 EPS_2	加工控制精度
EX_1 、 EX_2	K_j 的下限和上限
F	集中力
fK_j 、 fD_j	j 步长的收敛速度
H	轧件之喂入高度；板带原始厚度
h	辊轧后板带厚度
Δh	压下量 ($\Delta h = H - h$)
H_i	轧件喂入高度控制标尺读数
i	条元编号
K 、 K_j	比例函数
l	变形区长度
M	弯矩
m_1	轧辊压力控制表读数
m_2	轧辊平动控制表读数
M_n	扭矩
n	变速比；轧件宽向分割的条元总数
N_1 、 N_2 、 N_3	轧辊作用于轧件之压力
P 、 p	集中力；单位压力
P^j	j 步最优逼近方向
R 、 r	叶片外缘半径、内缘半径

S_1	辊顶距坐标原点之距离
S'_1	辊顶距坐标原点之距离铅垂方向分量
sgn	符号函数
t	出口的辊缝宽度
T	螺旋叶片之螺矩
t_0	钢带之厚度
T_0	加工目标
t_i	出口 i 处的辊缝厚度
Δt	轧件受到的压下量
TU	黄金分割值 (0.618)
T, T_1, T_2	轧件受到的摩擦力
$V_{0i} (V_0)$	条元在入口的速度
V_{li}	条元在 i 点的出口速度
V_{ix}, V_{iy}	条元 i 出口速度沿 x 、 y 方向分量
W_M	M 做功
W_P	P 做功
X^j	j 步控制点
$X_{ij-1}, X_{ij}, X_{ij+1}$	$j-1$ 步, j 步, $j+1$ 步最优逼近数值 (步长)
α	出口的辊缝方位
α_i	出口 i 处的辊缝方位
$\alpha_n, \alpha_{n1}, \alpha_{n2}$	咬入角
$\beta_b, \beta_1, \beta_2$	摩擦角
γ	中性角
δ_i	条元 i 受到的相对压下量
$\varepsilon_\theta, \varepsilon_t (\varepsilon_h), \varepsilon_\rho (\varepsilon_\gamma)$	轧件切向、厚向、宽向之应变
$\varepsilon_\theta, \varepsilon_{ti}, \varepsilon_{\rho i}$	条元 i 切向、厚向、宽向之应变
θ_0	锥形轧辊顶角之半
$\Delta\theta$	轧辊的弹性张角
μ, μ_1, μ_2	摩擦系数
ξ	辊缝方向之坐标轴

ρ_0	辊底半径；应变中性层半径
ρ_i	圆环 i 处之半径
σ_θ 、 σ_t (σ_h)、 σ_ρ (σ_r)	轧件切向、后向、宽向之应力
τ	摩擦力
ω	轧辊转速

目 录

前言

主要符合表

第 1 章 绪论	1
1.1 螺旋叶片在工业中的应用	1
1.2 螺旋叶片的成形方法	1
1.3 关于螺旋叶片辗轧成形的研究概况	10
1.4 螺旋叶片锥辊辗轧成形理论框架	20
第 2 章 螺旋叶片锥辊异面辗轧理论	22
2.1 锥辊间楔形辗轧过程的建立	22
2.2 变形区参数的确定	33
2.3 变形协调及面内弯曲	48
2.4 运动学条件与螺距形成	54
2.5 力学条件与压力模型	59
第 3 章 螺旋叶片锥辊异面辗轧成形机制	73
3.1 辗轧成形设备及辗轧过程分析	73
3.2 辗轧成形机理及其变形区	76
3.3 轧辊、轧件空间位置参数的特征及其调整	79
3.4 锥形工作辊弹性变形对辗轧成形的影响	86
3.5 辗轧用润滑剂及钢带	89
3.6 成形参数调整对辗轧结果的影响	99
第 4 章 螺旋叶片锥辊异面辗轧成形过程计算机仿真与设备加工前调整	106
4.1 模型的描述	106
4.2 仿真原理	108
4.3 仿真的理论基础之一——最优逐步逼近方向的确定原理	109
4.4 仿真的理论基础之二——最优逐步逼近数值（步长）的确定原理	115
4.5 仿真支持系统 CSR	119

4.6 CSR 系统的工程应用	123
第 5 章 螺旋叶片锥辊共面异步辗轧成形理论	126
5.1 异步辗轧理论的要点	126
5.2 锥辊异步辗轧理论	137
第 6 章 螺旋叶片锥辊异步辗轧实验装置研制及成形的实验 研究	162
6.1 锥辊异步辗轧实验装置技术参数的确定	162
6.2 实验装置的研制	163
6.3 成形实验及分析	169
6.4 建立锥辊异步辗轧机成形“板厚”螺距螺旋叶片的必要性和可 能性	176
6.5 变螺距变螺径螺旋叶片的锥辊异面辗轧成形技术的设想	178
参考文献	180

第1章 绪 论

1.1 螺旋叶片在工业中的应用

螺旋作为技术术语,其概念始终和工程上的传动输送联系在一起。所谓螺旋叶片系指用薄钢板或钢带制成的连续多圈螺旋状零件。它是螺旋输送设备心脏(图 1-1 所示)中的重要零件。螺旋叶片的应用历史可以追溯到古希腊的 Archimedean (阿基米德)时代。当时,希腊著名的数学家和物理学家阿基米德提出用螺旋原理提取水,用以灌溉农田,由此导致螺旋泵的诞生^[1]。到了文艺复兴时代,意大利著名画家、建筑师、数学家和机械师 Leonard da Vinci (达·芬奇)对螺旋泵产生了浓厚兴趣,对它作了种种研究之后提出以螺旋叶片作为螺旋泵的心脏部件,把阿基米德时代的螺旋泵大大推进了一步。这是螺旋叶片在欧洲开始大规模使用的里程碑^[2]。第二次世界大战后,螺旋泵用于取水和排水泵站,特别在污水处理中得到了广泛的应用。此外,也用于农田灌溉、积水排涝、潮位控制等方面。现在,螺旋泵还是唯一能够无空气后泄而将大量物料送入输送线的气力输送设备^[3]。由螺旋泵演变出的螺旋输送机是一种具有输送、混合、搅拌、推压及揉磨等作用的机构,在农机、牧机、化工、轻工、建材、矿山、粮食和食品等各个部门担当输送粉状及颗粒状物料的角色。由此可见,螺旋叶片是个十分重要的零件。

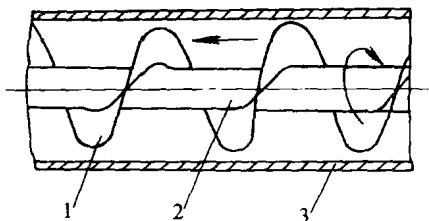


图 1-1 螺旋输送设备心脏

1—螺旋叶片 2—传动轴 3—输送筒

1.2 螺旋叶片的成形方法

1.2.1 螺旋叶片成形的分类

目前,螺旋叶片主要用于螺旋输送设备。螺旋叶片和转轴组成输

送设备心脏的螺旋（俗称搅龙）。除少数螺旋是采用整体或分段铸造的结构外^[1]，绝大多数螺旋是采用焊接结构型式，即将成形后的叶片组焊在转轴上构成螺旋。本文所研究的螺旋叶片成形工艺就是指后一种。

由于对叶片使用要求的不断提高，随着科学技术的发展，现在已有的多种螺旋叶片成形工艺也在不断地发展。根据叶片的作用性能、批量的大小和已有的生产条件，可以确定经济合理的成形工艺。螺旋叶片的成形工艺很多，其分类如下所示。

1. 单片成形工艺 单片成形所用的毛坯有两种形状，见图 1-2、图 1-3。叶片毛坯是板料经过落料冲孔，最后经切口或切缝而制成。其中图 1-2 所示带缺口的毛坯用于成形恰为一个螺距的螺旋叶片，毛坯尺寸可用式（1-1）确定^[4]。

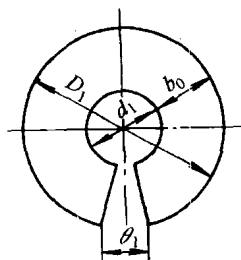
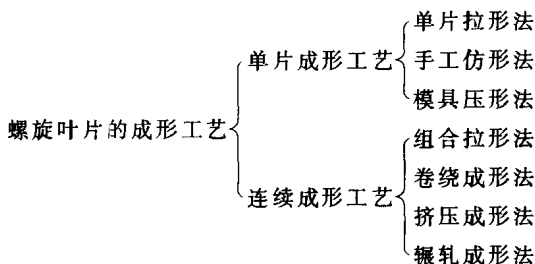


图 1-2 带缺口的叶片毛坯

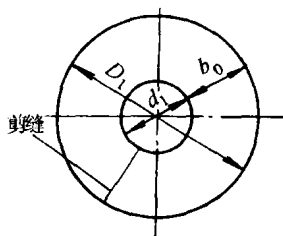


图 1-3 开缝叶片毛坯

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \frac{b_0 l_n}{l_m - l_n} \\ D_1 &= d_1 + 2b_0 \\ \theta_1 &= 2\pi - \frac{2l_1}{d_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

$$l_n = \sqrt{(\pi d)^2 + T^2}$$

$$l_m = \sqrt{(\pi D)^2 + T^2}$$

式中 d_1 、 D_1 ——毛坯的内外径；

d 、 D ——叶片的内外径，且 $D = d + 2b_0$ ；

b_0 、 T ——叶片的宽度和螺距；

l_n 、 l_m ——一个螺距的内外边缘螺旋线长度；

θ_1 ——毛坯缺口弧度。

图 1-3 所示的开缝整环坯料可以成形出多于一个螺距的螺旋叶片。这种叶片能充分利用材料，还能减少工作螺旋中叶片间的焊缝，且使各螺旋叶片的接头相互错开不在同一轴向平面内，从而使螺旋输送设备工作更为平稳。整环坯料尺寸按式 (1-2) 确定^[4]。

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \sqrt{d^2 + \left(\frac{T}{\pi}\right)^2} \\ D_1 &= d_1 + 2b_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

(1) 单片拉形法^[5,6]。如图 1-4 所示，先将毛坯的一端套入芯轴 3，再用压板 5 和夹紧斜楔 4 固定，毛坯的另一端用牵引设备（如行车，葫芦等）来牵引，同时用手锤不断敲打毛坯的外缘，使毛坯在变形过程中能较好地与芯轴吻合，并边拉边校。

这种工艺的优点是模具结构简单，采用一般动力装置。缺点是毛坯变形不均匀、叶片质量差、校正工作量大、生产效率较低、材料利用率低，对大尺寸和大螺距的叶片成形困难。一般只适用于单件小批量生产，目前采用较少。

另外，还可以通过一定的装置，在机械压力机或液压机上成形，例如文献 [5] 介绍的如图 1-5 所示模具。将毛坯 3 套入套筒 2，然后将夹紧块 4、6 套入圆柱销 5 和 7，并用内六角螺钉 10 把套入夹紧槽的毛坯 3 顶紧。芯轴 1 在压力机上滑块的作用下压缩弹簧 9，并通过圆柱销 5 带动夹紧块 4 将毛坯向下拉，同时沿着套筒上的滑槽 8，作预定的移动。当达到预定的行程后，松开螺钉，退出夹紧块 4、6，撤去压力，取出叶片，即完成成形。

这种方法适用于大批量生产，模具比较简单，经久耐用，而且成形效率较高，但操作麻烦。

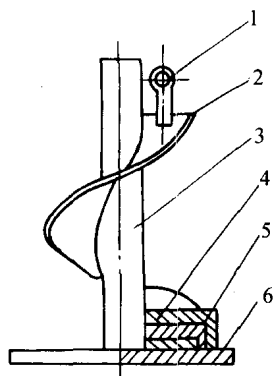


图 1-4 单片拉形模具（采用一般动力装置）示意^[5]

1—牵引夹头 2—叶片 3—芯轴
4—夹紧斜楔 5—压板 6—底板

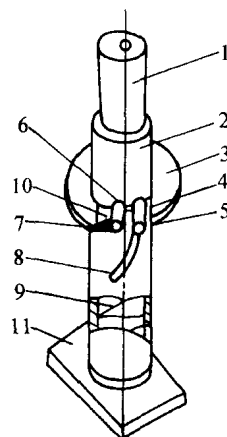


图 1-5 单片拉形模具（采用压机）示意^[5]

1—芯轴 2—套筒 3—毛坯 4、6—夹紧块
5、7—圆柱销 8—滑槽 9—弹簧
10—内六角螺钉 11—底板

(2) 手工仿形法^[5,6]。手工仿形模如图 1-6 所示。将毛坯加热后拉开一段距离，然后放在手工仿形模上。毛坯的一端用卡板固定好后，用手反复敲打煨弯，使坯料沿着仿形模的螺旋面逐渐贴合制成叶片。

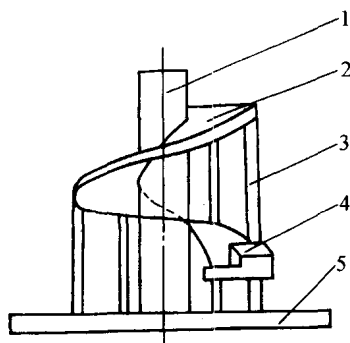


图 1-6 手工仿形模具^[6]

1—芯轴 2—螺旋面 3—筋板
4—卡板 5—底板

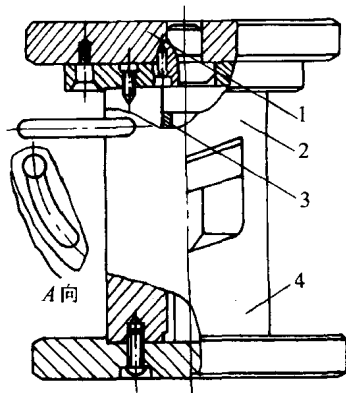


图 1-7 压形模具示意^[9]

1—上底座 2—上模块
3—定位轴 4—下模块

这种工艺的模具结果简单，便于制造。但所成形的叶片表面质量差，生产率低，只适合于单件试制产品，目前已很少采用。

(3) 模具压形法^[5~8]。一般压形模的结构如图 1-7 所示。模压时的操作顺序为：将毛坯加热初拉后放在模上，开动压机（一般采用液压机）。当上模的突出部分低于下模块的突出部分后停机，用手柄按图示方向转动上模，然后继续使上下模压至图 1-7 所示的闭合位置。按相反顺序退出上模，叶片即模压完毕。如果采用剪缝的整环毛坯，为适应这种模具动作的要求，只能采用液压机，如果毛坯是缺口的并使上下模螺旋面母线的旋转角度 $\theta < 360^\circ$ ，也可以在机械压力机或摩擦压力机上完成。模块螺旋面母线旋转角度由式 (1-3) 确定：

$$\theta = \frac{\pi D_1}{\sqrt{(\pi D)^2 + T^2}} \times 360^\circ + (10^\circ \sim 15^\circ) \quad (1-3)$$

考虑到工件材料的回弹和冷却后的收缩，模块螺旋面的螺距 T_1 按以下经验公式确定（见图 1-8）

$$T_1 = (1 + 2.5\%)T \quad (1-4)$$

模块突出部分的角度 θ_1 （图 1-8）为

$$\theta_1 = \theta - 360^\circ \quad (1-5)$$

压模定位轴的外径 d 取叶片内径的下限尺寸。这种工艺生产率较高，叶片质量较好，可用于批量生产。但模具加工困难，模具费用较高，材料利用率低，对大尺寸叶片成形困难。这种工艺是我国目前应用较多的一种成形方法。

文献 [9] 介绍了一种大型螺旋叶片成形方法。大型螺旋叶片如钻凿隧道或孔洞的 $\phi 1500\text{mm}$ 钻孔机上的螺旋叶片，其内外径分别为 $\phi 193\text{mm}$ 和 $\phi 1200\text{mm}$ ，螺距为 1000mm ，材料是合金结构钢且厚而重。像这样的大型叶片用手工仿形法制造很困难，用模具压形法则需要一台行程为 3.5m 的压力机和一套 22t 的模具及相应装卸起重机。该叶片的成形模具如图 1-9 所示。模具的基体是以非金属水泥掺进一定比例的铁屑和黄砂，而不像一般模具那样是用钢或铸钢制成。成形

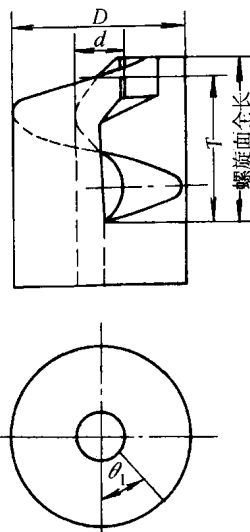


图 1-8 压形模具的
模块^[7]

过程是将坯料加热→行车将模具的上模沿模具导轴吊起至预定高度→加热毛坯置于模具中→行车放下上模；当通过上下模中心孔的钢丝绳7的绳套出下模底后，马上插上横杆10→开动卷扬机8以合拢和拉紧上下模→待至一定范围后将拉紧套9套于千斤顶5上，并启动千斤顶。这样上下模就相互夹紧，从而成形所需工件。取件动作顺序：反向开动卷扬机以松掉钢丝绳→除去钢丝绳套中的横杆→吊起上模→取出工件→放下上模。

根据以垂直于轴的一段直线作为母线，绕轴作匀速旋转，并同时作匀速（或变速）轴向移动就形成螺旋面的原理，可以设计出螺旋面的制作和检验工具来。文献[10]给出了变螺距变直径螺旋叶片主要设计参数的确定方法。

2. 连续成形工艺 连续成形工艺所用毛坯（组合拉形法除外）是条料或带料。

（1）组合拉形法^[5,6,11,12]。将带有开缝的环状毛坯逐个拉开，再把若干片逐个地组焊在一起穿在芯轴上，如图1-10所示。然后用人工或机械拉力成形，连拉边校边焊接在芯轴上。相对单片拉形来说改善了变形不均匀的缺点。这种工艺可以制造普通的叶片，也可以制造在同一螺旋轴上螺距变化或叶片大小变化的特殊叶片。这种工艺适合于小批量生产，但叶片质量较差，材料利用率低。此外该工艺模具简单，不需要大型设备或专用机床，生产周期短、成本低。

（2）卷绕成形法^[5,6,11,12]。将条料或带料经切角和预弯后，在专用机床或车床上通过一对卷辊（图1-11）连续卷绕成叶片。毛坯在冷态

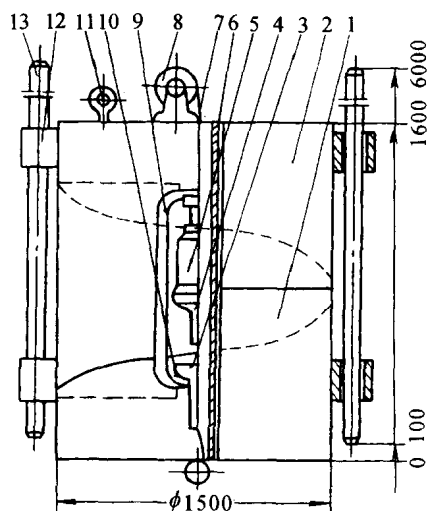


图 1-9 一种大型螺旋叶片成形模具^[9]

- 1—下模 2—上模 3—支座 4—座
- 5—40t 千斤顶 6—中心管 7—钢丝绳
- 8—50t 卷扬机 9—拉紧套 10—横杆
- 11—吊耳 12—导套 13—导轴

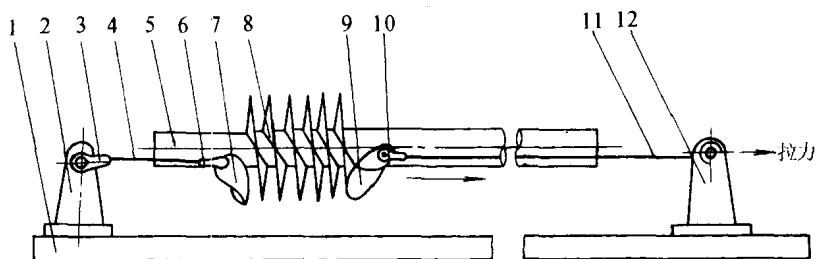


图 1-10 螺旋叶片组合拉形装置示意^[6]

1—底板 2、12—支架 3、6、10—卸扣 4、11—钢丝绳

5—芯轴 7、9—工艺接头 8—螺旋叶片

下卷绕，所以坯料的变形量受到一定限制，要求采用塑性好的 08 或 08F 低碳钢材料。当叶片宽度较大内径较小时，叶片外缘易产生裂纹，而叶片内缘容易起皱。

该工艺的生产率较高，材料利用率高，叶片质量较好，劳动强度低。但卷辊制造困难，加工成本高，周期长，对不同规格的叶片需加工相应尺寸的卷辊，故一般只适用于成批或大批量生产中小尺寸的叶片。

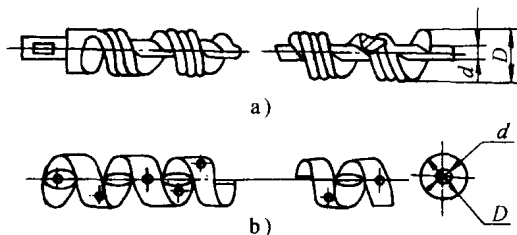


图 1-11 卷绕叶片的卷辊示意^[6]

a) 固定卷辊 b) 活动卷辊

文献 [5] 介绍了一种不需专用机床的卷绕成形法。其模具如图 1-12 所示。先将毛坯一端用工艺夹头 3 固定，然后将回转板 2 套入芯轴 1 上，使毛坯内缘贴合芯轴，外缘进入模块 9 的槽内，推动推杆 8 旋转，同时回转板 2 相应地往上移动，直至叶片成形完毕。

这种方法仅适用于单件或小批量生产的情况，且只能制造

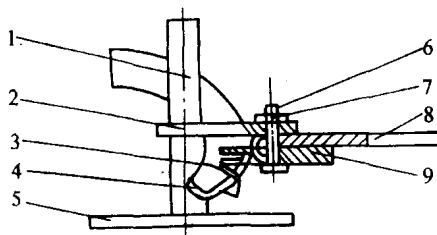


图 1-12 叶片卷绕成形模具^[5]

1—芯轴 2—回转板 3—工艺夹头
4—毛坯 5—底板 6—螺栓
7—销 8—推杆 9—模块