

GUANCAI WUMO CHENGXING JISHU

管材无模成形技术

夏鸿雁 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

管材无模成形技术

夏鸿雁 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 夏鸿雁 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

管材无模成形技术 / 夏鸿雁著. —沈阳: 东北大学出版社,
2014.9

ISBN 978-7-5517-0645-2

I. ①管… II. ①夏… III. ①管材拉制
IV. ①TG356.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 142309 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83680267 (社务部) 83687331 (市场部)

传真: 024—83680265 (总编室) 83687332 (出版部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 三河市天润建兴印务有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 145mm × 210mm

印 张: 6.125

字 数: 171 千字

出版时间: 2014 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 郎 坤 向 荣

责任出版: 唐敏志

责任校对: 文 韬

封面设计: 刘江旻

ISBN 978-7-5517-0645-2

定 价: 36.00 元

前 言

随着工业生产的发展，人们对纵向变断面管件的需求越来越多，变断面管件广泛应用于城市建设、通讯、汽车、化工以及机械制造等工业领域。如热电偶不锈钢套管、特殊用途不锈钢空心连接轴、汽车用直拉管、路灯电柱等。对于列举的异型管件采用传统的塑性加工方法很难实现，因为轴向断面形状的变化，厚管的加工是比较困难的，从工艺和成本考虑，不得不以机械加工实心棒料方法进行生产，而对于变断面的细长薄壁管，采用机械加工的方法无法实现。

管材无模成形是一种新型的金属成形方法，与传统的成形工艺相比，由于不受模具限制，该方法特别适用于常规挤压、拉拔方法难以成形的高强度、高摩擦、低塑性类的管材；同时，完成形变热处理，提高产品的综合性能；生产工艺大大简化，生产效率提高，生产成本下降，材料消耗减小；无模拉伸设备通用性强、容易实现自动控制；可加工各种金属材料的锥形管、阶梯管、波形管、任意变断面异型管材，使轴向变断面管材成形难的问题得到解决。

无模成形研究在国外有近 40 年历史，特别是近 20 年来，随着小轿车 FF（前发动机、前轮驱动）化的流行，人们对相应零部件的设计和生提出了新的更高的要求，为此无模拉伸新技术受到许多企业重视。我国无模成形研究起步于 20 世纪 80 年代。为了开展无模成形研究，1987 年在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室建立了我国唯一的无模成形研究基地，由东北大学栾瑰馥教授主持开展了这项工作的研究，开发设计制造了无模成形试验机，在无模成形实验研究和基础理论研究方面做了大量的工作。

本书共分 11 章, 分别介绍了管材无模成形基本特征及应用前景、管材无模成形系统、管材无模拉伸速度控制模型、无模拉伸速度计算机控制系统、锥形方管无模成形、异型断面锥形电柱无模拉伸、管材无模弯曲、管材无模弯曲扁平化及影响因素、管材无模拉伸变形及拉伸力的理论解析、棒材无模拉伸温度场及管材无模拉伸温度场, 其中包含了管材无模成形工艺和理论研究的最新发展, 可供材料成形研究和生产人员参考。

本书是作者多年来在管材无模成形方面的研究积累, 由于作者水平有限, 难免有遗漏、错误之处, 敬请各方面专家及广大读者不吝指出。

本书的研究工作得到了栾瑰馥教授多方面的帮助和支持, 在此表示衷心的感谢。

作 者

2014 年 3 月

目 录

第 1 章 管材无模成形基本特征及应用前景	1
1.1 管材无模成形工艺基本特征	1
1.2 管材无模成形应用领域及优势	6
1.3 管材无模成形的发展历史	11
1.4 管材无模成形理论与实验研究	13
本章参考文献	23
第 2 章 管材无模成形系统	28
2.1 动力及机械传动系统	28
2.2 加热及冷却系统	31
2.3 电气及控制系统	33
2.4 操作过程	36
本章参考文献	36
第 3 章 管材无模拉伸速度控制模型	37
3.1 管材无模拉伸变形机理	37
3.2 锥形管无模拉伸速度控制模型	41
3.3 任意变断面管件无模拉伸速度控制模型	45
3.4 几种典型变断面管件无模拉伸速度控制模型	52
3.5 管件无模拉伸控制模型中应用的逼近算法	58
3.6 无模拉伸速度控制数学模型研究	71
本章参考文献	73

第4章 无模拉伸速度计算机控制系统·····	75
4.1 步进电机计算机控制的基本概念·····	75
4.2 速度控制原理·····	76
4.3 开环控制系统·····	78
4.4 闭环控制系统·····	79
4.5 速度控制模式·····	80
4.6 无模拉伸速度计算机控制系统·····	82
本章参考文献·····	85
第5章 锥形方管无模成形·····	86
5.1 锥形方管无模拉伸实验方法·····	86
5.2 方管断面变形情况·····	87
5.3 锥形方管锥度变化·····	91
5.4 快速加热过程分析·····	94
5.5 快速冷却过程分析·····	97
5.6 拉伸变形过程分析·····	98
本章参考文献·····	100
第6章 异型断面锥形电柱无模拉伸·····	101
6.1 锥形管无模拉伸技术创新点·····	101
6.2 锥形电柱无模拉伸工艺设计·····	104
6.3 速度控制方法及数学模型·····	114
6.4 实验结果及结论·····	127
本章参考文献·····	131
第7章 管材无模弯曲·····	132
7.1 无模弯曲试验装置·····	133
7.2 实验材料·····	134

7.3	圆管无模弯曲	135
7.4	椭圆管成形情况	137
7.5	方管弯曲成形	138
7.6	“十”字花管的弯曲成形实验	139
	本章参考文献	140
第8章	管材无模弯曲扁平化及影响因素	141
8.1	圆管扁平化及影响因素	141
8.2	椭圆管扁平化及影响因素	144
8.3	方管的扁平化及实验结果	147
	本章参考文献	152
第9章	管材无模拉伸变形及拉伸力的理论解析	153
9.1	解析模型及假设条件	153
9.2	拉伸速度场的解析	154
9.3	应力场的分析	156
9.4	变形区外形的确定	157
9.5	待定参数的确定及拉伸力的计算	158
9.6	理论计算结果及实验验证	159
9.7	无模拉伸力能参数实验方法	162
	本章参考文献	166
第10章	棒材无模拉伸温度场	167
10.1	解析模型及假设条件	168
10.2	温度场热传导微分方程及边界条件	170
10.3	有限元计算的基本方程	174
	本章参考文献	180

第 11 章 管材无模拉伸温度场	182
11.1 解析模型	182
11.2 温度场热传导微分方程及边界条件	183
11.3 有限元计算方程	183
11.4 计算结果及讨论	184
本章参考文献	187

第 1 章 管材无模成形基本特征及应用前景

1.1 管材无模成形工艺基本特征

管材无模成形不用模具，是一种新型的金属塑性成形方法。与传统的成形工艺相比，工艺及设备简单，可用一道工序代替传统生产工艺中的全部成形工序，全线计算机协调控制，通过输入参数的变化，改变计算机控制速度模型，实现锥形管、波形管和任意轴向变断面管件的加工，同时，完成形变热处理，提高产品的综合性能。该方法特别适用于常规加工方法难以成形的高强度、高摩擦、低塑性任意轴向变断面管件，可以解决轴向变断面管件难加工的问题。

无模拉伸工艺的基本形式有两种，图 1.1 所示为连续式无模拉伸工艺，图 1.2 所示为非连续式无模拉伸工艺。在非连续式无模拉伸过程中，金属棒材或管材的一端固定，采用感应加热线圈将材料局部加热到高温，然后以一定的速度 v_1 拉伸棒材或管材的另一端，而感应加热线圈和冷却喷嘴（简称冷热源）则以一定的移动速度 v_2 向相同或相反的方向移动，只要给定拉伸速度与冷热源移动速度的比值，就可以获得所需的产品零件，所获得的棒材或管材的断面减缩率由速度的比值确定。由于此方法无摩擦且属于金属热加工的一种形式，故即使材料的可加工性低，也可以获得较大的断面减缩率。

在无模拉伸过程中，对材料施加轴向拉伸载荷的同时进行局部加热。当温度升高时，材料局部的变形抗力下降而产生局部变形，出现颈缩。如果将加热源沿整根材料轴向逐渐移动，并将已变形部分迅速冷却，则材料局部变形会沿着整根材料轴向逐渐移动，即颈缩连续扩散，从而得到预期的产品。

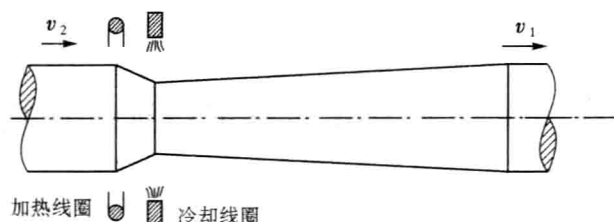


图 1.1 连续式无模拉伸工艺

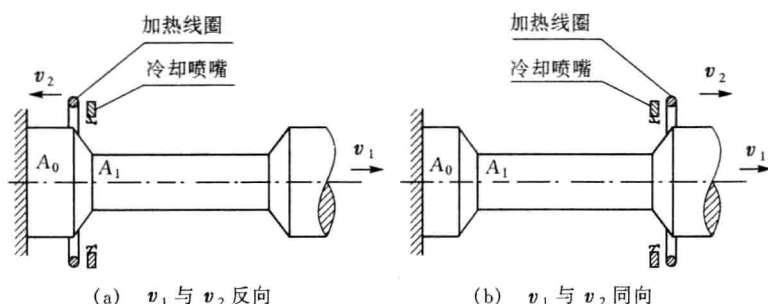


图 1.2 非连续式无模拉伸工艺

无模拉伸的基本原理是不使用模具，仅靠金属变形抗力随温度变化的性质实现塑性变形过程，产品的形状及精度通过改变及精确控制速度来实现。通过对金属的快速加热、快速冷却与加载、加工速度的配合，不需要昂贵的模具，加工长尺轴向变断面棒材和管件。它属于特殊的塑性变形理论系统，是塑性加工研究的前沿。

无模拉伸工艺的变形判据是断面减缩率，而断面减缩率只与拉伸速度和冷热源移动速度的比值有关。由于连续式无模拉伸与非连续式无模拉伸断面减缩率的计算方法是相似的，所以在此只对非连续式无模拉伸进行分析研究。

变断面棒材或管材无模拉伸的变形机制，就是在无模拉伸过程中的每一瞬间都满足体积不变定律，非连续式无模拉伸 [见图 1.2 (a)] 中，拉伸速度与冷热源移动速度方向相反，根据体积不变条

件, 有

$$A_0 v_2 = A_1 (v_1 + v_2)$$

断面减缩率为

$$R_s = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{v_1}{v_1 + v_2} \quad (1-1)$$

如图 1.2(b) 所示, 拉伸速度与冷热源移动速度同向变化, 根据体积不变条件, 有

$$A_0 (v_2 - v_1) = A_1 v_1$$

断面减缩率为

$$R_s = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-2)$$

式中: A_0, A_1 ——材料变形前、后断面面积;

v_1, v_2 ——拉伸速度、冷热源移动速度。

由式(1-1)和式(1-2)可见, 无模拉伸断面减缩率只与拉伸速度和冷热源移动速度的比值有关, 只要给定断面减缩率, 则拉伸速度与冷热源移动速度之比值就一定。无模拉伸时, 控制拉伸速度与冷热源移动速度到给定的比值, 就可获得所需的拉伸变形程度。

在变形过程中, 如果使拉伸速度与冷热源移动速度的比值按照一定规律发生连续变化, 就可以获得任意轴向变断面零件。如锥形棒或锥形管的非连续式无模拉伸工艺, 如图 1.3 所示。

由图 1.3(a) 可知, 拉伸速度与冷热源速度反向, 在 x 处断面减缩率

$$R_s = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = 1 - \frac{D_1^2}{D_0^2} = 1 - \frac{(D_0 - 2x \tan \alpha)^2}{D_0^2} = \frac{v_1}{v_2 + v_1} \quad (1-3)$$

式中: D_0, D_1 ——材料变形前、后断面直径;

A_0, A_1 ——材料变形前、后断面面积;

α ——锥半角。

显然, 断面减缩率 R_s 是位置 x 的函数, 因而冷热源速度与拉伸速度之比值(v_1/v_2)也是 x 的函数。

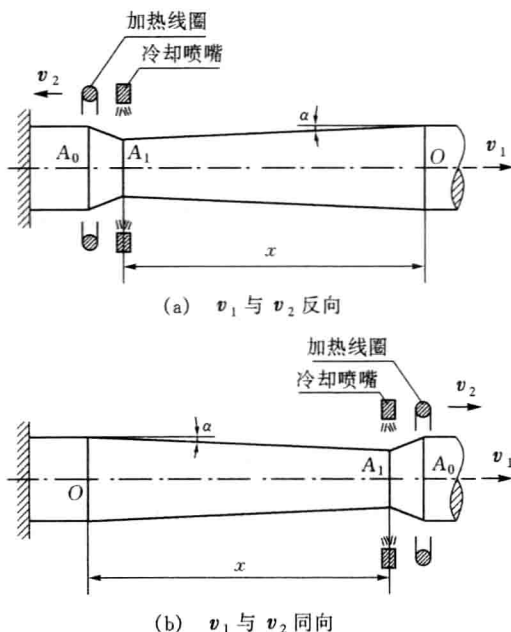


图 1.3 锥形件无模拉伸工艺

由图 1.3(b)可知, 拉伸速度与冷热源速度同向, 在 x 处断面减缩率

$$R_s = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = 1 - \frac{D_1^2}{D_0^2} = 1 - \frac{(D_0 - 2x \tan \alpha)^2}{D_0^2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.4)$$

采用这种加工方法还可以加工阶梯件、波形件和任意变断面棒或管件。

具体的无模拉伸可以采用不同的加热方法、冷却方法和加热区域移动形式, 在拉伸设备上进行, 如图 1.4 所示。

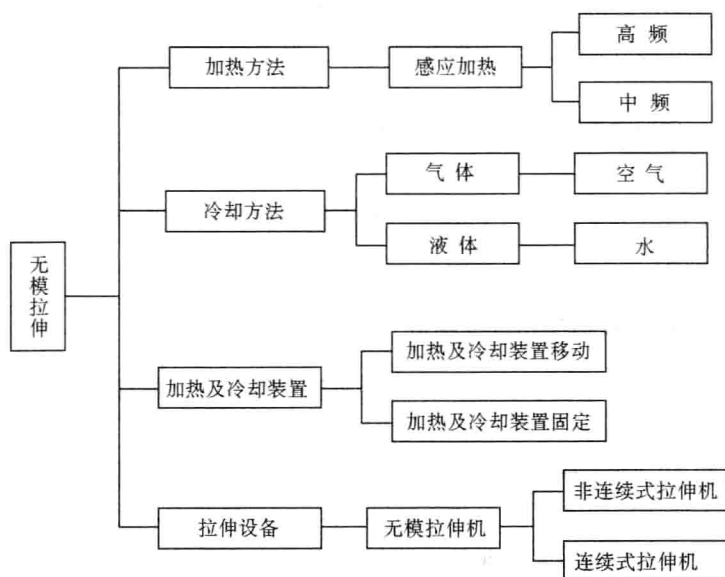


图 1.4 无模拉伸方法及设备

管材的无模弯曲是在无模拉伸基础上发展起来的，把无模拉伸工艺局部加热成型的方法用于管材的弯曲加工。无模弯曲是对管材进行局部加热与快速冷却使局部弯曲成形，是管材弯曲的理想加工方法，特别是对于高强度、高摩擦、低塑性类的材料，用有模弯曲很困难，用无模弯曲则轻而易举；对于异型断面管材，则不需要弯曲模具和芯棒，很容易进行弯曲。由于不受模具设计和制造的限制，对于难加工的各种异型断面管材，可采用无模弯曲加工方法。

无模成型的基本特征如下：

- ① 不采用模具，通过改变工艺控制参数获得预期的变形；
- ② 稳定变形条件及极限断面减缩率取决于温度差；
- ③ 工艺控制参数：拉伸速度 v_1 、冷热源移动速度 v_2 及其比值 v_1/v_2 ；
- ④ 材料变形过程是在其局部区域内发生的，并且通过局部区域

材料变形过程的稳定扩展，使材料整体都得到变形；

⑤变形过程可以实现形变热处理，改善产品综合性能。

1.2 管材无模成形应用领域及优势

根据有关文献介绍及预测，无模成形将在以下几个方面得到发展和应用。

1.2.1 高强度耐热钨合金丝材

1909年，用钨粉试制延展性金属丝获得成功，象征着难熔金属制作高温材料的开始。目前，钨已成为电子、原子能、航天等领域不可缺少的重要材料之一。钨具有熔点高等多种有益的性能，在电真空工业中被广泛用于各种灯丝以及电子管材料中。目前，对钨丝的需要已从电灯照明工业领域扩展到电子工业领域，所以对钨丝的质量要求更高。

传统钨丝的生产工艺是将经过旋锻的钨合金棒料再经过拉拔工艺加工成各种规格的钨丝，即拉丝工艺，拉丝过程原理见图1.5(a)。

圆断面棒材和丝材的拉拔加工具有以下特点：断面受力和变形均匀对称；存在拉应力状态；由于旋锻的钨合金棒材塑性差，因此断面减缩率小，如钨合金丝材从大直径拉拔成直径为0.1mm时，需要经过35道次拉拔；在拉拔过程中，拉丝模承受较大的摩擦力、压力和拉力；拉丝模一般采用硬质合金或金刚石模，成本较高；由于摩擦的存在，在拉拔过程中加剧应力和变形不均匀分布，使金属的变形抗力增加，降低模具的使用寿命及产品的表面质量；拉拔时提高温度可以使加工硬化过程减弱，金属变形抗力降低，拉拔力减小，但由于温度的提高也可能降低润滑剂的润滑性能，使摩擦力增加，变形力增大，因此拉拔时金属的最佳变形温度较难确定。

采用超声波振动拉模拉拔钨丝时可使拉拔力降低50%，同时还

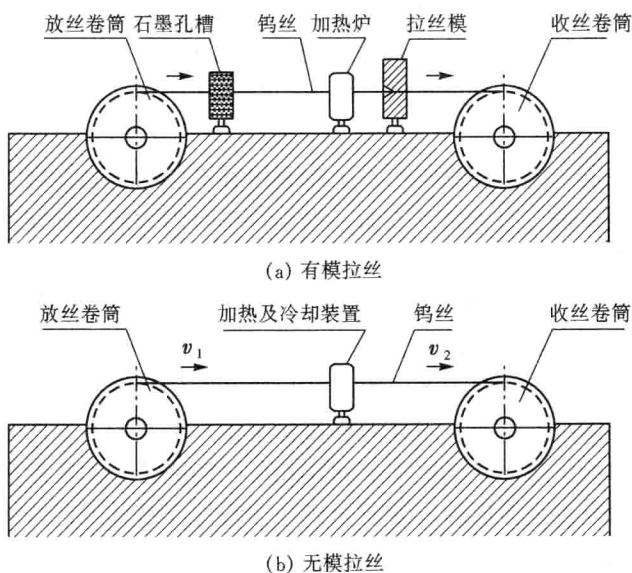


图 1.5 拉丝过程原理示意图

可以减少和消除断丝现象，而且随着钨丝直径的减小，超声波效应加强，因此应用超声波拉细丝不易产生断丝现象。此外，还可提高断面减缩率，减少拉拔道次以及提高丝材精度等。但是，采用超声波振动拉模仍然需采用模具以及润滑剂，而且超声波装置价格昂贵。

如果采用无模拉伸方法，就可以克服以上缺点，而且装置简单[如图 1.5(b)所示]，另外，在拉伸过程中还能对钨丝进行某些热处理。无模拉伸时采用电磁感应加热方法，采用水冷却或空气冷却。

1.2.2 非线性弹簧

随着工业生产发展，对纵向断面形状非均匀线材的需求越来越多，锥形线材就是其中的一例，用这样的锥形线材可以优化设计并达到节省材料和减轻构件质量的目的。在汽车工业中就需要这种锥形线材。由于中小型客车前置前驱(FF 驱动)与前置后驱(FR 驱动)

相比具有很多优点,如不需驱动轴、乘坐空间增大、实现轻型化、减少燃料消耗以及操作性能提高等,因此中小型客车 FF 化驱动在世界上已经取得了飞速发展。目前,国内外中小型客车基本实现了前轮前驱化。

一方面,为了使汽车在不平地面接触平稳和重心稳定,希望支承弹簧刚性低一些;另一方面,汽车转弯时因为向心加速度大,则支承弹簧刚性高比较稳定。采用线性支承弹簧不能满足这种要求,而采用非线性支承弹簧则可以使这一矛盾得到解决。另外,对于 FF 驱动的中小型客车,前后轮负担载荷有很大差别,前轮负荷集中、质量大,后轮负荷随乘客人数、载荷质量的变化而变化。线性弹簧具有一定的特征参数,因此对操作稳定性、重心稳定性两方面都带来不良影响,采用非线性支承弹簧就可以消除这些不良影响。这种支承弹簧就是用锥形簧丝卷制而成的非线性支承弹簧。非线性支承弹簧广泛应用于 FF 驱动的中小型客车,因为它控制平衡与悬浮的载荷范围比线性支承弹簧大得多。非线性支承弹簧在工作时,当载荷增加,支承弹簧细径部分开始压缩,同时,变形抗力呈非线性增加,FF 驱动车后轮力矩问题得到解决。目前,由于这种非线性支承弹簧制造成本高,普通中、低档车没有采用非线性支承弹簧,国外仅有少数高级豪华轿车使用了非线性支承弹簧。但如果这种非线性支承弹簧生产成本能够降低,那么,普通中、低档车也可以采用非线性支承弹簧以提高汽车的稳定性能。

1.2.3 变断面管件无模拉伸

目前,汽车后窥视镜支杆为实心棒材经机械加工而成,如图 1.6(a)所示。若采用无模加工,其主要部分可用管件代替,如图 1.6(b)所示,从而可大量减少材料消耗,提高生产效率。

小型汽车转向器零件见图 1.7(a),其中锥形部分的加工目前采用锻造生产,生产效率低、噪声大、生产环境恶劣,如果采用无模拉伸工艺加工[见图 1.7(b)],那么一次可同时加工两个零件,不