

无模成形 理论与应用

王忠堂 夏鸿雁 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无模成形理论与应用

王忠堂 夏鸿雁 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

无模成形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的塑性变形过程,产品的形状及精度通过改变及精确控制速度来实现。本书的主要内容包括无模成形基本特征、无模成形设备及控制系统、无模拉伸成形温度场、无模拉伸成形数学模型、无模拉伸成形力能参数、管类件无模拉伸壁厚变化规律、变断面细长件无模扩径成形、管材无模弯曲成形、无模拉伸成形工艺应用。

本书适合材料成形专业的高等院校师生以及相关专业工程技术人员阅读

图书在版编目(CIP)数据

无模成形理论与应用/王忠堂,夏鸿雁著. —北京:
国防工业出版社,2015.2

ISBN 978-7-118-09939-3

I. ①无… II. ①王… ②夏… III. ①金属管-成
型加工 IV. ①TG376.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024324 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5½ 字数 136 千字

2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

无模成型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的塑性变形过程,产品的形状及加工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,我们可以取消用昂贵的模具来加工轴向变断面的近终拉伸异型变断面细长件。因此它的变形特点是在高温变形和快速冷却时实现的复杂的塑性变形过程。无模成型工艺包括无模拉伸工艺、无模扩径工艺、无模弯曲工艺。

本书的主要内容包括无模成型基本特征、无模成型设备及控制系统、无模拉伸成形温度场、无模拉伸成形数学模型、无模拉伸成形力能参数、管类件无模拉伸壁厚变化规律、变断面细长件无模扩径成形、管材无模弯曲成形、无模拉伸成形工艺应用。

本书第8章由夏鸿雁完成,其余部分均由王忠堂完成。作者结合多年来已取得的研究成果,将近年来发表的论文、报告等文献汇集在一起,并修改成书。

本书所涉及的科学研究工作得到了国家自然科学基金委员会、国家教育部、辽宁省自然科学基金委员会的资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,望读者批评指正。

作 者

于沈阳

2014 年 10 月

目 录

第 1 章 无模成形基本特征	1
1.1 无模拉伸工艺基本特征	2
1.2 无模扩径工艺基本特征	6
1.3 无模弯曲工艺基本特征	9
1.4 无模成形研究进展	10
1.4.1 无模拉伸成形	12
1.4.2 无模扩径	19
1.4.3 无模拉伸成形本构关系	22
第 2 章 无模成形设备及控制系统	25
2.1 问题的提出	25
2.2 直流电动机微型计算机控制基本概念	26
2.3 直流电动机速度控制原理	29
2.4 微型计算机控制数学模型	30
2.4.1 阶梯时间间隔相等	31
2.4.2 阶梯时间间隔不等	33
2.5 直流电动机微型计算机控制硬件和软件	34
2.6 实验研究	37
第 3 章 无模成形温度场	39
3.1 变形过程分析	39
3.1.1 加热过程分析	39
3.1.2 冷却过程分析	41
3.1.3 变形过程分析	42
3.2 无模拉伸温度场及影响因素	43

3.2.1	冷热源移动速度对温度场的影响	44
3.2.2	冷热源间距对温度场的影响	45
3.2.3	变形程度对温度场的影响	47
3.2.4	材料对温度场的影响	49
3.3	无模拉伸温度场数学模型	50
3.4	不锈钢棒材无模拉伸温度场	51
3.4.1	温度场问题的热传导方程	51
3.4.2	应用举例	53
3.5	管材无模拉伸温度场	57
第4章	无模拉伸成形数学模型	61
4.1	无模拉伸变形机制	61
4.2	锥形件无模拉伸速度控制数学模型	62
4.2.1	锥形轴类件无模拉伸	62
4.2.2	锥形细长管类件无模拉伸	64
4.2.3	应用实例	65
4.3	异型变断面细长件无模拉伸速度控制数学模型	66
4.3.1	异型变断面细长轴类件无模拉伸	66
4.3.2	异型变断面细长管类件无模拉伸	68
4.4	计算实例	68
第5章	无模拉伸成形力能参数	70
5.1	轴类件无模拉伸成形力能参数	70
5.1.1	轴类件无模拉伸速度场	70
5.1.2	轴类件无模拉伸力能参数	72
5.1.3	无模拉伸变形力能参数影响因素	74
5.2	圆形管件无模拉伸力能参数物理模型	77
5.2.1	圆形管件无模拉伸速度场	77
5.2.2	圆形管件无模拉伸力能参数	79
5.2.3	圆形管件无模拉伸力能参数影响因素	82
第6章	管类件无模拉伸壁厚变化规律	86

6.1	圆形管件无模拉伸壁厚变化规律	86
6.1.1	球形速度场	86
6.1.2	运动学许可速度场建立	86
6.1.3	壁厚变化物理模型推导	90
6.1.4	实验验证	93
6.2	方形管件无模拉伸力能参数及壁厚变化规律	97
6.2.1	方形管件无模拉伸力能参数	97
6.2.2	方形管件壁厚变化规律	99
6.2.3	方形管件断面形状变化规律	103
第7章	变断面细长件无模扩径成形	106
7.1	无模扩径速度控制数学模型	106
7.1.1	锥形轴类件无模扩径	106
7.1.2	任意变断面轴类件无模扩径	108
7.1.3	变断面管类件无模扩径	109
7.2	轴类件无模扩径力能参数	110
7.2.1	轴类件无模扩径速度场	110
7.2.2	轴类件无模扩径力能参数	113
7.2.3	实验验证	115
7.3	管类件无模扩径力能参数	117
7.3.1	管类件无模扩径速度场	117
7.3.2	管类件无模扩径力能参数	119
7.3.3	实验验证	122
7.4	管类件无模扩径壁厚变化规律	124
7.4.1	运动学许可速度场建立	124
7.4.2	壁厚变化模型推导	126
7.4.3	实验验证	129
第8章	管类件无模弯曲成形	132
8.1	无模弯曲成形原理	132
8.2	圆形管件无模弯曲成形	134

8.3	椭圆管件无模弯曲成形	135
8.4	方形管件无模弯曲成形	137
8.5	“十”字花形管件无模弯曲成形	138
8.6	圆形管件扁平化与壁厚变化	139
8.7	椭圆形管件扁平化与壁厚变化	142
8.8	方形管件扁平化及壁厚变化	144
第9章	无模拉伸成形工艺应用	149
9.1	高强度耐热钨合金丝材	149
9.1.1	钨合金丝材	149
9.1.2	钨合金丝材无模拉伸成形温度场	151
9.1.3	钨合金丝材无模拉伸成形流动应力	153
9.1.4	实验验证	154
9.1.5	钛合金丝材	156
9.2	非线性弹簧	156
9.3	变断面细长异型管件	159
参考文献		162

第 1 章 无模成形基本特征

柔性塑性加工技术是塑性成形领域的重要发展方向之一。柔性塑性加工技术具有以下优点:可挠性强,可以实现生产线的省人化、无人化,可构成包括生产管理在内的 CIM/FA 综合生产线;因无模具,易与其他生产过程相结合,特别是与热处理相复合,可望使热处理产品质量提高,可靠性增强。

柔性塑性成形技术构成如图 1.1 所示,包括有模具,但模具被柔性化的柔性成形;其次是不采用模具的无模成形。无模成形又包括完全无模具的无模成形和省略部分模具的半无模成形。原则上讲,全无模成形是指产生主变形区域不与刚体模具接触的一种成形技术。半无模成形是指有部分的或标准的简单模具存在,在加工主变形区域内模具与材料接触,但无最终成形模具的一种成形技术。全无模成形包括无模拉伸、无模扩径、无模弯曲。

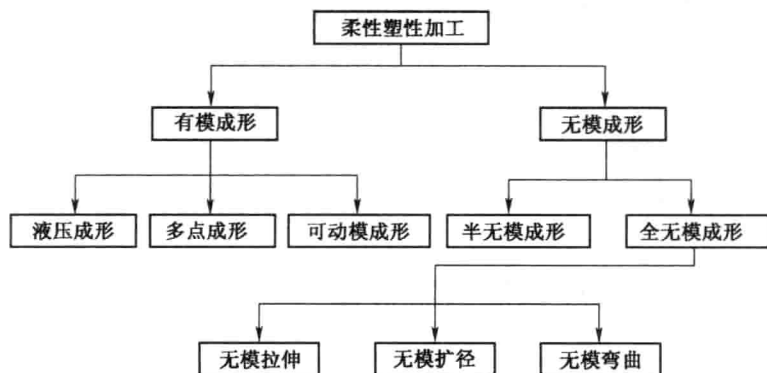


图 1.1 柔性塑性加工技术构成

对金属坯料进行局部加热,在一定的外力作用下,通过适当的加热和冷却方法,不采用模具而使金属得到预期的塑性变形,这种金属塑性加工称为无模成形。无模成形工艺是一种不采用模具而进行金属拉伸的柔性塑性加工技术,是一种高精度、高效率、低能耗、无污染、少或无切削柔性近终成形技术,能够直接生产零件。由于无模扩径可看成是无模负拉伸,所以也可以将无模拉伸和无模扩径归为一类,即无模拉伸工艺。

无模成形时的断面减缩率只与拉伸速度和冷热源移动速度的比值有关。如果在变形过程中,使拉伸速度与冷热源移动速度的比值发生连续的变化,就可以加工出所需形状的变断面细长件,包括锥形细长件、阶梯形细长件、波形件等。

快速加热与快速冷却相结合而形成的温度梯度是无模成形形成稳定进行的前提条件,因此温度场的分布是无模成形应用基础研究中的重要组成部分。无模成形速度场及变形力能参数是无模成形工业应用的技术关键,无模成形速度场及变形力能参数的确定为设计或选择无模成形设备提供了重要的工艺参数。对无模拉伸过程进行数值模拟可以预测无模拉伸金属流动规律、变形区形状及加工件外形尺寸等。

不足之处是由于无模成形的挠性强,形状变化的自由度增多。影响因素也就增多。另外,在加工过程中,需要测定、控制形状影响因素,装置必须智能化。由于受形状影响因素,加工件要达到一定温度,这样,又附加一部分热能。装置的智能化,相应地要求工人具有更高的技术水平。在实际应用中,都有相应措施解决上述缺点。

1.1 无模拉伸工艺基本特征

无模拉伸工艺是柔性塑性加工的一种形式,其技术构成如图 1.2 所示。与传统的拉拔工艺相比,无模拉伸的优点有:可以加工

具有高强度、高摩擦阻力、低塑性、用有模拉伸工艺很难拉伸的金属材料;对材料可以进行某些热处理,提高产品的组织性能;可加工各种金属材料的锥形管件、阶梯管件、波形管件、纵向外形曲线给定的细长变断面异型管件以及复合异型管等。

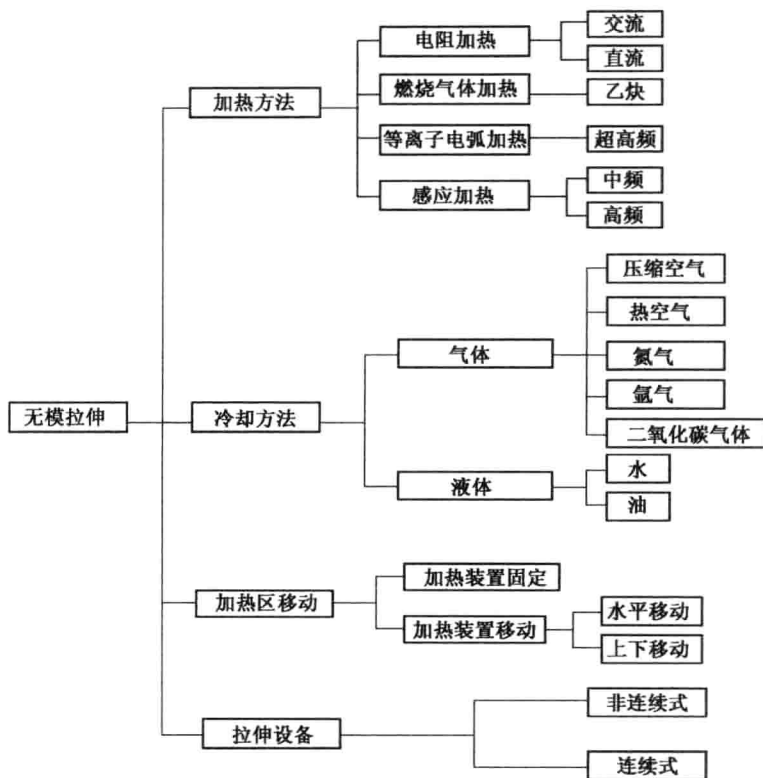


图 1.2 无模拉伸方法与设备

无模拉伸工艺是将金属的轴类件或管类件的一端固定,采用感应加热线圈对材料进行局部加热到高温,然后以一定的速度拉伸轴类件或管类件的另一端,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向相反或相同的方向移动(图 1.3 和图 1.4),只要给定拉伸速度与冷热源移动速度的比值,就可以获得所需断面

尺寸的产品零件。所获得的轴类件或管类件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。

无模拉伸成形工艺的基本形式有两种,图 1.3 所示为连续式无模拉伸工艺,图 1.4 所示为非连续式无模拉伸工艺。

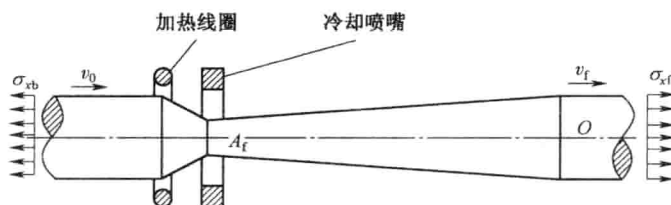


图 1.3 连续式无模拉伸工艺原理

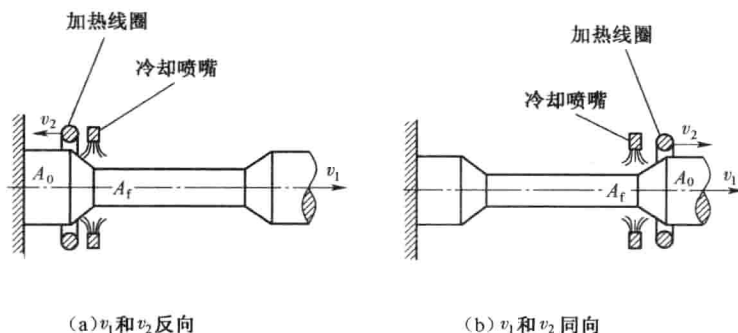


图 1.4 非连续式无模拉伸工艺原理

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。加热采用高频感应加热,冷却采用风冷或水冷。其变形机制是由于金属的变形抗力随加热温度的变化而变化这一特性而进行塑性变形,即当温度升高时,材料局部的变形抗力下降,塑性好,从而产生局部变形,出现缩颈,而且金属易变形且变形程度较大。相反,当加热温度降低时,材料局部的变形抗力增大,塑性差,则金属不易变形,该处金属变形量较小或不变形。

无模拉伸工艺的变形程度是断面减缩率。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的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。

如图 1.4(a)所示,拉伸速度与冷热源移动速度方向相反,根据体积不变的条件有

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

速度与断面减缩率的关系为

$$R_s = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = \frac{v_1}{v_1 + v_2}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{R_s} - 1 \quad (1.1)$$

式中: R_s 为断面减缩率; A_0, A_f 分别为拉伸前、后的断面面积; v_1, v_2 分别为拉伸速度和冷热源移动速度。

如图 1.4(b)所示,拉伸速度与冷热源移动速度方向相同,根据体积不变的条件有

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

断面减缩率为

$$R_s = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{R_s} \quad (1.2)$$

由于 $R_s < 1$, 则 $v_1 < v_2$ 。

由上可见,只要断面减缩率给定,则拉伸速度与冷热源移动速度的比值就一定。无模拉伸时,控制拉伸速度与冷热源移动速度到指定的比值以后就可以获得所需形状的细长件。

在变形过程中,使拉伸速度与冷热源移动速度的比值发生连续的变化,就可以获得任意变断面零件。如锥形棒的非连续式无模拉伸工艺也有两种形式,如图 1.5 所示。

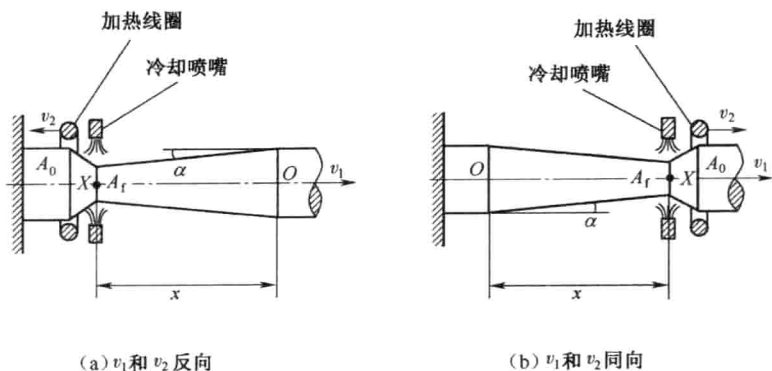


图 1.5 锥形件无模拉伸工艺原理

如图 1.5(a) 所示, 拉伸速度与冷热源移动速度方向相反, 在 X 点处的断面减缩率为

$$R_s = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = 1 - \frac{(d_0 - 2x \tan \alpha)^2}{d_0^2} \quad (1.3)$$

式中: α 为锥半角。

显然断面减缩率是 x 的函数, 从而使冷热源速度与拉伸速度的比值 (v_2/v_1) 也是 x 的函数。

如图 1.5(b) 所示, 拉伸速度与冷热源移动速度方向相同, 在 X 点处, 断面减缩率按式 (1.3) 计算。

1.2 无模扩径工艺基本特征

无模扩径工艺是在无模拉伸基础之上发展起来的柔性塑性加工技术。将无模拉伸速度方向改变以后, 就获得无模扩径工艺, 也可以称为无模负拉伸。金属的轴类件或管类件的一端固定, 采用感应加热线圈对材料进行局部加热到高温, 同时以一定的压缩速度压缩轴类件或管类件的另一端, 而感应线圈及冷却喷嘴则以一定的移动速度向相反或相同的方向移动, 加工出所需要形状的轴类件。

无模扩径成形工艺的基本形式也有两种,图 1.6 所示为连续式无模扩径工艺,图 1.7 所示为非连续式无模扩径工艺。

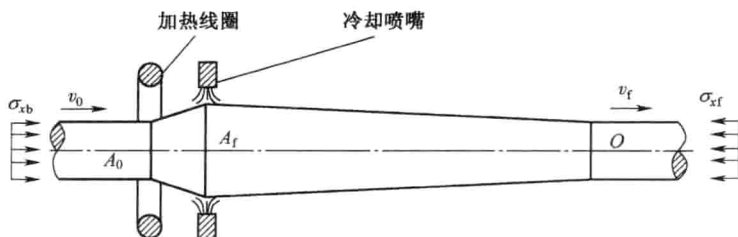


图 1.6 连续式无模扩径工艺原理

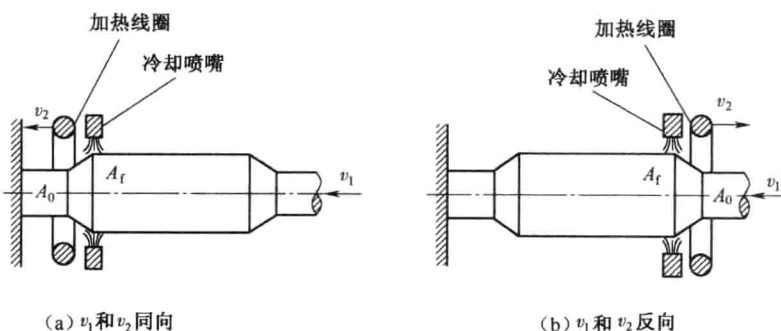


图 1.7 非连续式无模扩径工艺原理

在无模扩径过程中,对材料施加轴向压缩载荷的同时进行局部加热。加热采用高频感应加热,冷却采用风冷或水冷。

无模扩径工艺的变形判据是断面变化率。而断面变化率只与压缩速度和冷热源移动速度的比值有关。由于连续式无模扩径与非连续式无模扩径的断面变化率的计算方法是相似的,所以在此只对非连续式无模扩径进行分析研究。

如图 1.7(a) 所示,压缩速度与冷热源移动速度方向相同,根据体积不变的条件有

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

断面变化率为

$$R_s = \frac{A_f - A_0}{A_0} = \frac{v_1}{v_2 - v_1}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{R_s} + 1 \quad (1.4)$$

如图 1.7(b)所示,压缩速度与冷热源移动速度方向相反,根据体积不变的条件有

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

断面变化率为

$$R_s = \frac{A_f - A_0}{A_0} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{R_s} \quad (1.5)$$

如果将式(1.1)和式(1.2)中的拉伸速度以负值代入,可以得到式(1.4)和式(1.5)。显然,无模扩径的实质是负无模拉伸。

由上可见,只要断面变化率给定,则压缩速度与冷热源移动速度的比值就一定。无模扩径时,控制压缩速度与冷热源移动速度到指定的比值以后就可以获得所需要的轴类件。同样,如果在变形过程中,使压缩速度与冷热源移动速度的比值发生连续的变化,就可以获得任意变断面轴类件。锥形轴类件也可以通过无模扩径工艺进行加工。

锥形轴类件的非连续式无模扩径工艺也有两种形式,如图 1.8所示。

如图 1.8(a)所示,压缩速度与冷热源移动速度方向相同,在 X 点处的断面变化率为

$$R_s = \frac{A_f - A_0}{A_0} = \frac{(d_0 + 2x \tan \alpha)^2}{d_0^2} - 1$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{R_s} + 1 \quad (1.6)$$

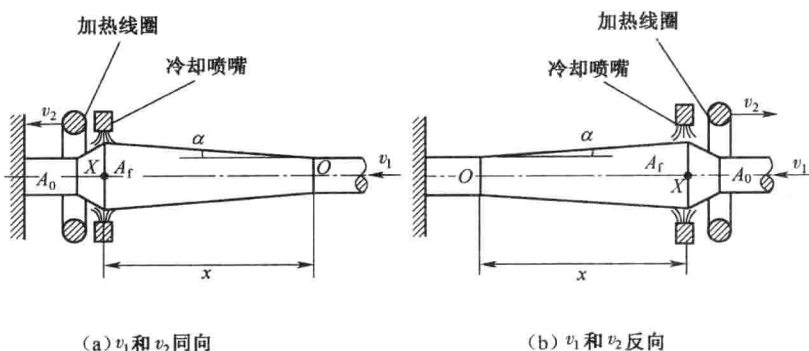


图 1.8 锥形轴类件的非连续式无模扩径工艺原理

如图 1.8(b) 所示,压缩速度与冷热源移动速度方向相反,在 X 点处,断面变化率为

$$R_s = \frac{A_f - A_0}{A_0} = \frac{(d_0 + 2x \tan \alpha)^2}{d_0^2} - 1$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{R_s} \quad (1.7)$$

显然,对于锥形件的无模扩径,断面变化率是 x 的函数, v_2/v_1 也是 x 的函数。

1.3 无模弯曲工艺基本特征

无模弯曲是对管材进行局部加热与快速冷却相结合的局部弯曲成形,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,用无模弯曲则易于实现;对于异型断面管材,则不需要弯曲模具和芯棒,很容易弯曲各种异型管材。由于不受模具设计和制造的限制,对于难加工的各种异型管材,可采用无模弯曲加工方法。

无模弯曲包括无模压弯和无模拉弯,如图 1.9 所示。