

本书根据日本《齿轮的塑性加工》和《齿轮加工手册》两书编译而成。

书中介绍了应用金属塑性变形原理,采取冷加工法(冷轧、冷态锻造、冲裁)和热加工法(热轧、模锻、高速锻造)进行齿轮的少切削或无切削加工的工艺、专用设备、试验数据和应用实例,为研究齿轮的少无切削加工提供了有关资料。

本书可供从事齿轮加工的工人、技术人员以及有关专业人员参考。

齿轮的少无切削加工

朱震午 编译

*

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许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印张19 $\frac{3}{4}$ ·字数476千字

1975年10月北京第一版·1975年10月北京第一次印刷

印数 00,001—42,000·定价1.60元

*

统一书号: 15033·4286

编译说明

为了配合齿轮少无切削加工工艺的推广和提高，遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，编译了《齿轮的少无切削加工》一书，供有关同志参考。

全书共分七章，其中一、四、五、六章译自日本《歯車の塑性加工》（成瀬政男监修），第二、三、七章译自《歯車加工ハンドブック》（槌川武男、渡辺真編）。

书中介绍了应用金属塑性变形原理，采用冷加工法（冷轧、冷态锻造、冲裁）和热加工法（热轧、模锻、高速锻造），进行齿轮的少切削或无切削加工的工艺、专用设备、试验数据和应用实例，为研究齿轮的少无切削加工提供了有关资料。

本书承梁桂明、刘东耀、辛宗仁、饶璐、程鸿舫同志校阅，特此表示感谢。

在编译过程中，对原书的某些错误作了更正，但因译者水平所限，书中难免还有缺点和错误，希望读者批评指正。

目 录

第一章 齿轮的冷轧	1
第一节 自由分度式冷轧法	1
一、冷轧工艺概述	1
二、齿数的分度	2
三、齿坯的尺寸	5
四、轧轮	12
五、冷轧设备	14
第二节 非圆形齿轮的冷轧	18
一、轧制工艺	18
二、椭圆齿轮的冷轧设备	19
三、齿坯的形状与齿数的分度	20
四、冷轧试验实例	22
五、冷轧椭圆齿轮的精度	25
第三节 强制分度式冷轧法	26
一、采用凸轮式轧齿机的冷轧工艺	26
二、采用油压式轧齿机的冷轧工艺	32
三、影响冷轧齿轮精度的因素	38
第四节 冷轧齿轮的质量	49
一、冷轧齿轮的齿面光洁度	49
二、冷轧齿轮的金相组织	50
三、冷轧齿轮的硬度分布	50
四、冷轧齿轮的弯曲强度	51
第二章 齿轮的冷态锻造	53
第一节 概述	53
第二节 基本加工方法	54
一、棒料的正挤压	54
二、管材的正挤压	55
三、反挤压和复合挤压	56
四、轴的颈缩	57
五、镦锻	59
第三节 冷态锻造时的变形状态与成形压力	60
一、挤压的成形压力	60
二、镦锻时的变形	61
三、加工硬化的影响	61
第四节 模具设计	62
一、模具的载荷极限与加强	62
二、模具形状方案	66
三、成形压力与模具的弹性变形	67

第五节 与加工有关的各种因素	69
一、冷态锻造用钢材	69
二、润滑处理	71
三、锻压机械	71
第六节 加工精度	72
一、材料和尺寸变化	72
二、正挤压花键轴的精度	74
三、挤压时模具的温度上升同精度的关系	78
四、表面光洁度	78
五、挤压校正加工的精度	80
六、镦锻加工的精度	80
第七节 制品的特点	82
一、加工硬化	82
二、抗拉、冲击、扭转和抗弯强度	84
三、冷态锻造的经济性	84
第三章 齿轮的冲裁	88
第一节 冲裁齿轮	88
第二节 齿轮的一般冲裁	89
第三节 冲模的制作方法	91
一、利用拉削加工齿轮冲模	91
二、利用电火花加工齿轮冲模	95
第四节 冲裁齿轮的精度	97
一、冲裁齿轮的冲裁断面形状	97
二、冲裁齿轮的弯曲	98
三、冲裁齿轮的外形尺寸	99
四、冲裁齿轮的齿形	100
五、冲裁齿轮的实用试验	102
第五节 齿轮的精密冲裁	103
一、精密冲裁原理	103
二、精密冲裁的轮廓形状与精度	105
三、精密冲裁用的材料	106
四、模具材料与模具寿命	107
五、精密冲裁冲模的制作	108
六、精密冲裁齿轮的实例	109
第四章 齿轮的特殊滚轧	113
第一节 用锥形刀具滚轧螺旋圆锥齿轮	113
一、加工原理	113
二、滚轧装置与滚轧工艺	115
三、锥形刀具的设计与制作	116
四、螺旋圆锥齿轮的设计	118
五、计算举例	120

第二节 用锥形刀具加工点接触双曲面齿轮	122
一、加工原理	122
二、粗纺机用双曲面齿轮的铸造-滚轧工艺	127
第三节 用锥形刀具加工线接触双曲面齿轮	133
一、加工原理	133
二、粗纺机用双曲面齿轮的铸造-滚轧加工	139
第五章 齿轮的热轧	144
第一节 齿轮的热轧工艺概述	144
第二节 齿坯的高频感应加热	145
一、高频感应加热原理	145
二、频率与渗透深度之间的关系	149
三、适合于热轧齿轮的感应线圈形状	150
四、高频感应加热所需的功率	152
第三节 热轧条件	157
一、材料的可塑性和轧制速度对“齿顶角”的影响	157
二、接触面的滑动对“齿顶角”的影响	162
三、加热条件和轧制速度	164
四、轧制压力与扭转力	174
第四节 热轧齿轮的设备	177
一、齿数的分度	177
二、轧轮的进给方法	178
三、全自动轧齿机	183
第五节 热轧齿轮的精度	188
一、与精度有关的各种因素	188
二、轧轮齿的相位偏移的影响	195
三、热轧齿轮的齿形精度	198
四、热轧齿轮因热处理而引起的变形	203
第六节 热轧齿轮的金相组织	211
第七节 热轧齿轮的弯曲强度	215
第八节 热轧齿轮的精加工	224
第六章 齿轮的模锻	229
第一节 模锻齿轮的模拟试验	229
第二节 模锻圆锥齿轮用锻模的制作	239
一、模锻圆锥齿轮用锻模的制作条件	239
二、模锻直齿圆锥齿轮用上模的制作实例	241
三、模锻螺旋圆锥齿轮用上模的制作实例	245
第三节 模锻法制造圆锥齿轮	251
一、用空气锤模锻圆锥齿轮的实例	252
二、用空气锤模锻螺旋圆锥齿轮的实例	253
第四节 模锻圆锥齿轮的精度	254
第五节 模锻圆锥齿轮的金相组织与齿的弯曲强度	259

一、金相组织与硬度分布	259
二、单向冲击载荷的弯曲试验	261
三、静载荷的弯曲试验	262
第六节 应用实例	262
第七章 齿轮的高速锻造	265
第一节 概述	265
第二节 高速锤的机构与动作原理	266
第三节 高速锤的特点	268
一、成形的特点	268
二、工艺特点	268
三、机械结构的特点	268
第四节 高速锤的锻造精度	268
一、锻锤具有的同心度	268
二、锻模的加工精度	269
三、收缩率	269
四、氧化皮问题	269
五、锻件的厚薄精度	270
第五节 用于高速锤上的锻模	271
一、锻模材料	271
二、锻模的结构	272
第六节 采用高速锻造时齿轮的成形	275
一、收缩率问题	276
二、分模面与余料问题	276
三、空气的积存问题	276
第七节 锻造工艺	277
一、无氧化措施	277
二、锻模的润滑	278
第八节 锻造后的机械加工	279
第九节 锻造齿轮的质量	280
附录 日本工业规格 (摘译)	281
一、直齿圆柱齿轮和斜齿圆柱齿轮的精度等级 (JIS-B1702)	281
二、加工符号与表面光洁度的分类	288
三、日本金属材料的化学成分与强度	289

第一章 齿轮的冷轧

第一节 自由分度式冷轧法

一、冷轧工艺概述

齿轮的冷轧类似机械加工时所常用的滚轧工艺。其具体说明如图 1-1 所示。做成齿轮形状的滚轧工具，紧压在转动着的齿坯上，一面使齿坯外圆产生塑性变形，同时逐渐轧入齿坯。随着轧入量的增加，齿坯外圆部分的金属就相应凸起。这个凸起部分的金属，在滚轧工具与齿坯接触而产生相互转动时，借助范成运动来形成齿形。滚轧工具轧到规定的深度之后，凸起部分即被加工成规定形状的齿形。

为了使滚轧工具与齿坯之间产生范成运动，可以采取使滚轧工具处于自由转动状态，而强制齿坯转动，从而带动滚轧工具回转来进行滚轧。或者采取使齿坯处于自由转动状态，而强制滚轧工具转动，从而带动齿坯回转来进行滚轧。还可以强制滚轧工具和齿坯保持一定转速比的转动来进行滚轧，后一种方法最好。

只对滚轧工具和齿坯两者之一给予强制转动来进行滚轧的方法，叫做自由分度式冷轧法；对滚轧工具和齿坯两者均给予强制转动来进行滚轧的方法，叫做强制分度式滚轧法。不论是自由分度式冷轧法或强制分度式冷轧法，其原理均系利用两个齿轮的啮合作用。因此，可以采用如图 1-2 所示的各种形状的滚轧工具。

图 1-2 (a) 所示为利用齿条与齿轮啮合，以齿条作为滚轧工具。

图 1-2 (b) 所示为利用小齿轮与齿轮啮合，以小齿轮作为滚轧工具。

图 1-2 (c) 所示为利用内齿轮与小齿轮啮合，以内齿轮作为滚轧工具。

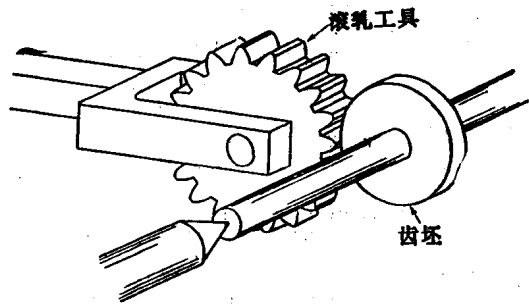


图 1-1 滚轧方法示意图

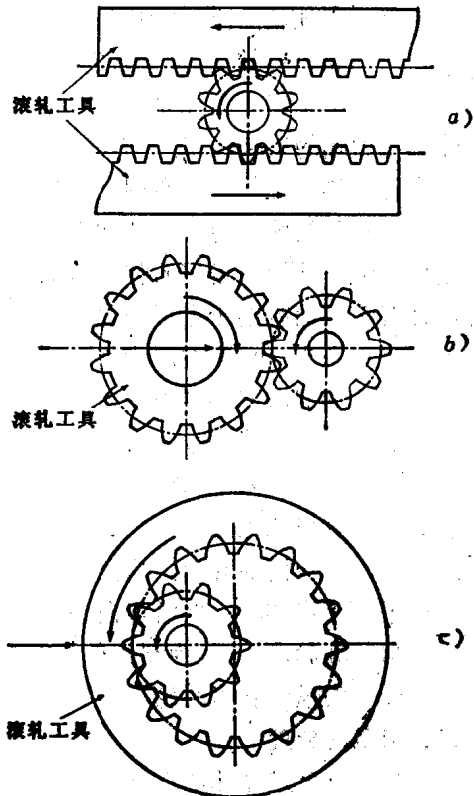


图 1-2 各种滚轧法示例

采用齿条形滚轧工具的滚轧法, 在滚轧花键轴或锯齿形等小齿零件时是方便的^[1]。然而在滚轧一般形状或是尺寸较大的齿轮时, 需要很长的齿条, 这就增加了制造上的困难, 同时由于齿条的往复运动, 还使整台设备的尺寸很大。

在滚轧圆锥齿轮时, 使用冕齿轮来代替齿条, 如图 1-3 所示。由于冕齿轮采取回转运动, 整个轧制设备的尺寸可做得较小, 操作也方便。

采用内齿轮形工具的冷轧方法, 因工具的齿顶具有易于轧入的形状, 所以轧制比较容易进行, 齿坯外圆凸起部分的成形也较良好。而且, 工具的齿形为凹形曲线, 与被轧制的齿形之间很少产生间隙, 故齿形易于成形, 因而容易得到精度较高的轧制齿轮, 故这是一种较好的轧制方法。但也存在内齿轮形工具的尺寸较大, 难以做得精确等缺点。

对于采用小齿轮形滚轧工具●的冷轧方法来说, 轧轮只要是一般的齿轮形状即可。这在制造上就不成问题, 而且操作也比较方便。由于具有轧轮制造容易和轧制机构尺寸较小的优点, 因此, 齿轮的冷轧加工, 主要采用这种方法。

以下就采用轧轮的冷轧方法加以详细叙述。

在使用轧轮进行轧制时, 一般的安装方法是將轧轮轴安装成平行于齿坯轴, 所以在轧制直齿圆柱齿轮时, 使用直齿轧轮; 在轧制斜齿轮时, 使用螺旋角相同而方向相反的斜齿轧轮。

轧轮与齿坯的安装关系, 还有一种特殊的方法, 即将轧轮轴安装成不平行于齿坯轴, 同样也能够进行轧制。在轧制直齿圆柱齿轮时, 使用斜齿轧轮, 并将斜齿轧轮按螺旋角倾斜安装, 其齿向则与被轧制的直齿圆柱齿轮的齿向取得一致, 然后使轧轮朝被轧齿轮边进给边轧制。这样, 由于轧轮与齿坯的相互转动, 沿齿向产生微量滑动。其结果是使齿坯的金属容易产生塑性流动, 而有助于齿形的成形。

如果更进一步, 采取在斜齿轧轮的齿上切出垂直沟槽, 则能够起到剃齿加工的效果, 因此更有助于齿形的成形^[2]。

在图 1-4 中, (a) 为轧制直齿圆柱齿轮时采用的一般直齿轧轮; (b) 为在直齿轧轮的齿上开有垂直沟槽的轧轮。这两种是将轧轮轴安装成平行于齿坯轴, 并沿齿向边进给边轧制时所使用的轧轮; (c) 为斜齿轧轮; (d) 为在齿上开有沟槽的斜齿轧轮。

二、齿数的分度

采用自由分度式冷轧法轧制齿轮时, 只使轧轮或齿坯两者之一强制转动, 而另一个则自

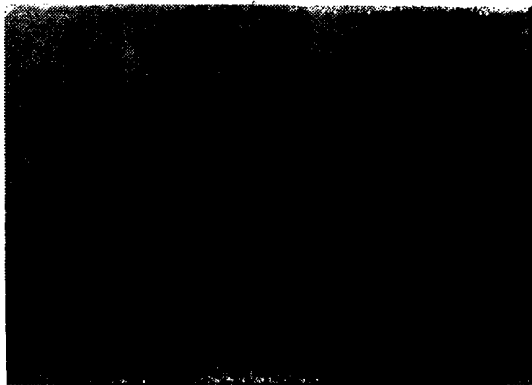


图1-3 轧制设备外形图

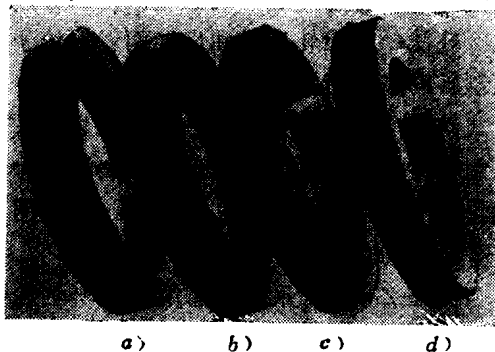


图1-4 各种轧轮

● 小齿轮形滚轧工具简称为轧轮。——译者注

由转动, 并将轧轮压向齿坯。当轧轮一与齿坯接触, 即开始共同回转。然后, 轧轮的齿以齿顶处的周节, 在齿坯外圆上进行分度, 同时轧出凹槽。当凹槽达到一定的深度之后, 轧轮的齿就顺着凹槽逐渐轧入。

就自由分度式冷轧法而言, 由于不具备能将齿坯外圆按规定齿数直接进行分度的装置, 因此, 如果一开始轧出的凹槽不成规定的齿数时[●], 随后就无法加以校正。为了轧制出具有规定齿数的齿轮, 必须使一开始轧出的凹槽, 就精确地在齿坯外圆上分度出规定的齿数。因而必须使用与齿坯的直径具有特定尺寸关系的轧轮。

为此, 应正确计算出齿坯尺寸同轧轮尺寸之间的关系, 以保证分度齿数的精确性。

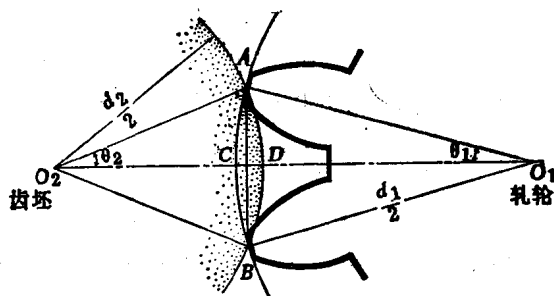


图1-5 轧制直齿圆柱齿轮时的分度情况

图 1-5 表明, 在轧制直齿圆柱齿轮时, 轧轮的齿顶在齿坯外圆上进行分度的情况。轧轮的齿不是以齿顶圆上的周节弧长 $\widehat{ACB}$ 将齿坯外圆进行分度, 而是以相邻齿顶之间的弦长 $\overline{AB}$ 进行分度。若求轧轮上弦长 $\overline{AB}$ 的长度, 则得

$$\overline{AB} = d_1 \sin \theta_1 \quad (1-1)$$

式中 d_1 ——轧轮的齿顶圆直径;

θ_1 ——轧轮每一周节的 $\frac{1}{2}$ 中心角。

设轧轮的齿数为 z_1 , 则

$$\theta_1 = \pi / z_1 \quad (1-2)$$

同样, 求齿坯上弦长 $\overline{AB}$ 的长度, 则得

$$\overline{AB} = d_2 \sin \theta_2 \quad (1-3)$$

式中 d_2 ——齿坯的直径。

设轧制齿轮的齿数为 z_2 。为了使轧轮的齿顶在齿坯外圆上精确地分度出规定的齿数, θ_2 必须是轧制齿轮每一周节的 $\frac{1}{2}$ 中心角。

即:

$$\theta_2 = \pi / z_2 \quad (1-4)$$

由 (1-1) 式与 (1-3) 式得

$$d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_2$$

所以

$$d_1 = d_2 \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (1-5)$$

将 (1-2) 式和 (1-4) 式代入 (1-5) 式得

● 滚轧时由于齿坯与轧轮之间产生滑动, 往往造成“乱齿”现象。——译者注

$$d_1 = d_2 \frac{\sin \frac{\pi}{z_2}}{\sin \frac{\pi}{z_1}} \quad (1-6)$$

此式为给定轧轮的齿顶圆直径与齿坯的直径的关系式。

若轧轮齿数与轧制齿轮的齿数很多时, $\sin \frac{\pi}{z_1} \approx \frac{\pi}{z_1}$, $\sin \frac{\pi}{z_2} \approx \frac{\pi}{z_2}$, 则(1-6)式可以近似地取

$$d_1 = d_2 \frac{z_2}{z_1} \quad (1-7)$$

当轧制齿轮的基本参数已被给出, 则其齿坯直径为已定[●]。齿坯直径一经确定, 就能按(1-6)式或(1-7)式算出轧轮的齿顶圆直径。如果保持轧轮的齿顶圆直径不变, 并且按轧制齿轮已定的齿厚和齿高做成正确齿形就能轧制出规定齿数和齿形精确的齿轮。

在冷轧斜齿轮时, 齿坯的宽度 b 具有如下的关系尺寸 (参看图 1-6)

$$b > t \operatorname{ctg} \beta$$

式中 t —— 轧轮的齿顶周节;

β —— 螺旋角。

因为轧轮的一个齿在脱开齿坯的当时, 下一个齿马上就开始接触到齿坯, 所以齿坯外圆被轧轮的齿顶圆上的周节弧长进行分度, 从而能够精确地分度出规定的齿数。因此下式成立:

$$\frac{\pi d_1}{z_1} = \frac{\pi d_2}{z_2} \quad (1-9)$$

由此得

$$d_1 = d_2 \frac{z_1}{z_2} \quad (1-10)$$

这同滚轧直齿圆柱齿轮的关系式中, 当齿数 z_1 、 z_2 很大时的 (1-7) 式是一致的。

以上所述, 系认为轧轮齿顶与齿坯外圆接触时, 在接触部分不产生滑动。但是, 采用自由分度式轧制时, 不论是以安装齿坯的轴作为主动轴, 或是以安装轧轮的轴作为主动轴, 作为被动轴的一方, 在回转运动中总是有摩擦阻力的。当摩擦阻力较大时, 轧轮齿顶与齿坯外圆之间就产生滑动。

今就齿坯轴为主动轴, 轧轮轴为被动轴, 设每一周节所产生的滑动量为 s_1 , 则下式就成立:

$$d_1 \sin \theta_1 + s_1 = d_2 \sin \theta_2 \quad (1-11)$$

将上式整理可得:

$$d_1 = d_2 \frac{\sin(\pi/z_2)}{\sin(\pi/z_1)} \left\{ 1 - \frac{s_1}{d_2 \sin(\pi/z_2)} \right\} \quad (1-12)$$

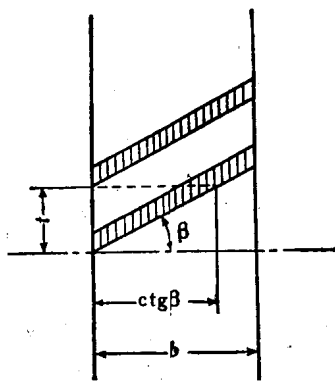


图1-6 斜齿轮齿坯宽度同周节和螺旋角的关系

● 齿坯直径的计算方法, 将在本节三中加以叙述。

在轧轮和轧制齿轮的齿数很多的场合以及对于齿宽较大的斜齿轮，上式可简化如下：

$$d_1 = d_2 \frac{z_1}{z_2} \left\{ 1 - \frac{s_1}{\pi d_2 / z_2} \right\} \quad (1-13)$$

设
$$L = \frac{s_1}{\pi d_2 / z_2} \quad (1-14)$$

以无因次量 L 代入 (1-13) 式得

$$d_1 = d_2 \frac{z_1}{z_2} (1 - L) \quad (1-15)$$

(1-15) 式为存在滑动的情况下，轧轮的齿顶圆直径与齿坯直径的关系式。

(1-14) 式的 L 叫做滑动系数。滑动系数 L 的值，随被动轴的支承方法、轴承类型以及齿坯材料等的不同而各异。通过试验，测得 L 值的有关数据列于表 1-1。

表1-1 滑动系数 L 的值

轴承类型 \ 齿坯材料	硬 铝	黄 铜	低 碳 钢
	0.0025	0.002	0.001
滚动轴承	0.0025	0.002	0.001
滑动轴承	0.007	0.006	0.004

三、齿坯的尺寸

若将轧轮向齿坯进给轧制，则齿坯外圆部分的金属引起塑性变形，并向半径方向凸起，于是齿坯的外径就变大。图 1-7 表示了随着轧制的继续进行，齿坯外径变化过程的一个例子。在开始轧制时，齿坯外径随轧轮的轧入而有所增加。当凸起部分（齿顶）开始接触到轧轮的齿根时，齿坯外径达到最大。在这种情况下，齿形的成形已不能充分进行。如再增加进给力，则齿形就能继续成形。这时，齿坯外圆（齿顶）受轧轮齿根的挤压而回缩。因此，齿坯外径又略趋减小。但在齿形完全成形后齿轮的外径，总是比轧制前的齿坯外径要大。

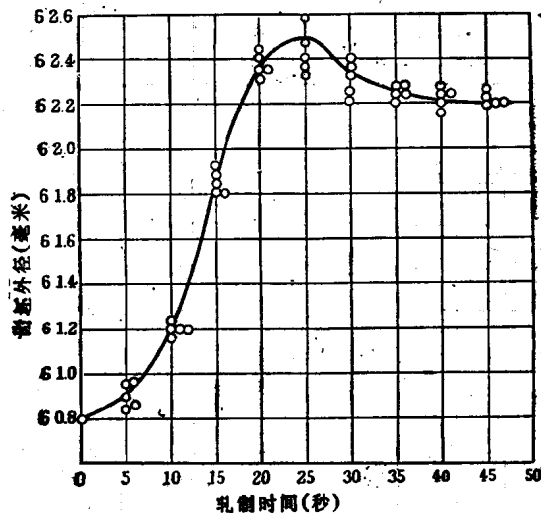


图1-7 轧制时齿坯外径的变化过程

轧制齿轮： $m=1$ 、 $z_2=60$ 、 $\beta=0$ 、 $b=10$ 毫米。齿坯材料S15C
齿坯转速32转/分、滚轧压力3000公斤、使用轧轮数2个

从上述试验实例可知, 齿坯外径一般因受轧制而增大。因此, 在轧制齿轮时所用齿坯的直径, 要把由于金属凸起而带来的外径的增加量考虑在内, 应做成比精轧后的直径尺寸小些。

为此, 要轧制出具有规定精度和正确尺寸的齿轮, 必须研究如何确定齿坯直径的问题。

设精轧后的齿轮的外径(齿顶圆直径)为 d_s , 由于轧制而引起半径方向的凸起量为模数 m 的 K 倍, 则齿坯直径 d_2 可用下式表示:

$$d_2 = d_s - 2mK \quad (1-16)$$

K 为无因次量, 叫做凸起系数。 K 值的大小, 因各种轧制条件的不同而各异。 K 值可通过试验得出, 其结果列于表 1-2 以及图 1-8~1-20。试验时使用的齿坯材料为低碳钢。

表1-2 凸起系数 K 值

螺旋角 β	模数 m	齿数 z	齿宽与 模数之比 b/m	凸起系数 K	螺旋角 β	模数 m	齿数 z	齿宽与 模数之比 b/m	凸起系数 K
0°	1	76	5.4	0.46	30°	2.5	60	3.2	0.29
0°	1	76	5.5	0.51	30°	2.5	60	3.7	0.35
0°	1	76	9.4	0.73	30°	2.5	60	4.5	0.47
0°	1	76	10.4	0.81	45°	1	55	5.0	0.45
0°	1	76	14.0	0.89	45°	1	55	6.0	0.53
0°	1.25	67	8.1	0.72	45°	1	55	8.0	0.69
0°	1.25	67	13.5	0.91	45°	1	55	10.0	0.76
0°	2	38	3.4	0.29	45°	1	55	16.0	0.91
0°	2	38	3.9	0.43	45°	1	55	20.0	0.99
0°	2	38	5.4	0.58	45°	2	30	3.6	0.35
0°	2	38	7.8	0.76	45°	2	30	4.0	0.48
30°	1.25	60	6.1	0.55	45°	2	30	5.0	0.54
30°	1.25	60	7.7	0.69	45°	2	30	5.5	0.57
30°	1.25	60	8.6	0.71	45°	2	30	6.0	0.65

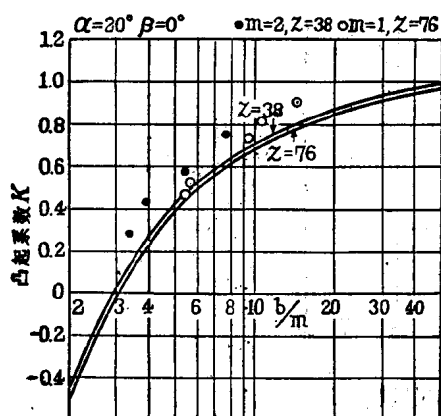


图1-8 凸起系数 K 值

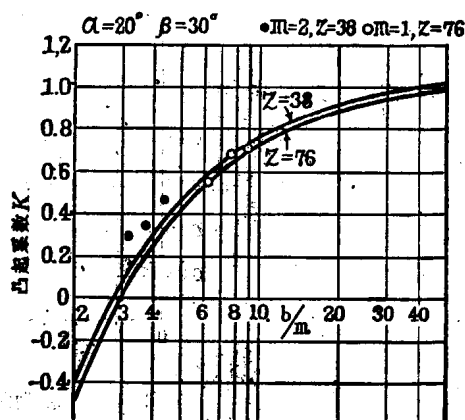


图1-9 凸起系数 K 值

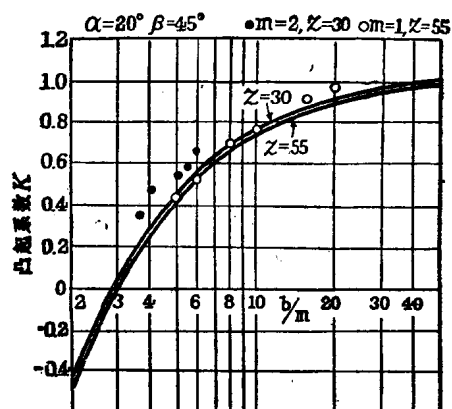


图1-10 凸起系数K值

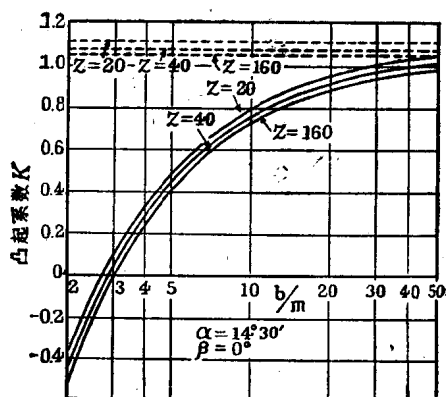


图1-11 凸起系数K值

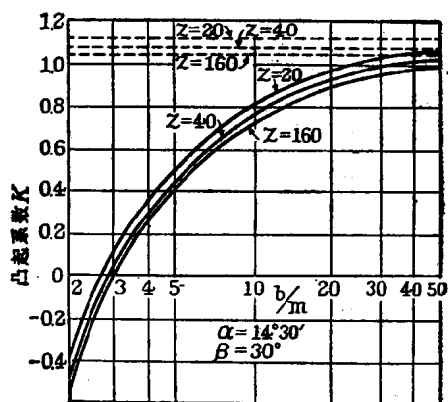


图1-12 凸起系数K值

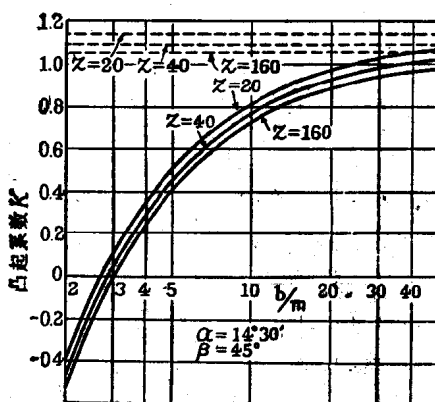


图1-13 凸起系数K值

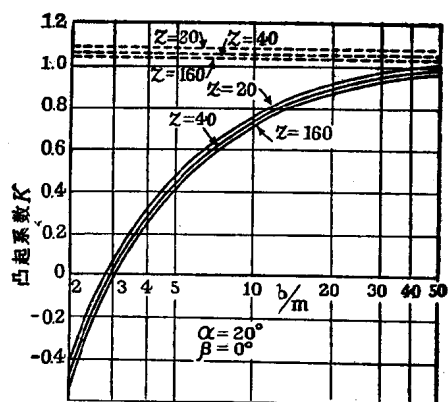


图1-14 凸起系数K值

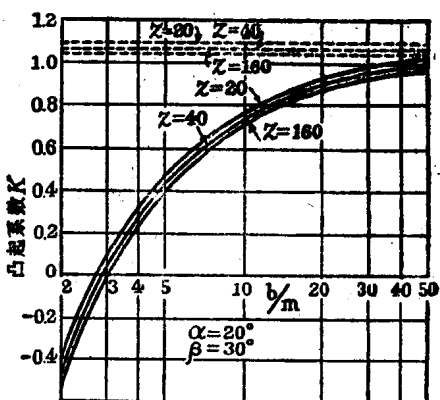


图1-15 凸起系数K值

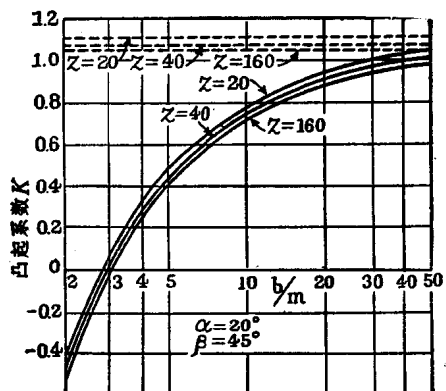


图1-16 凸起系数K值

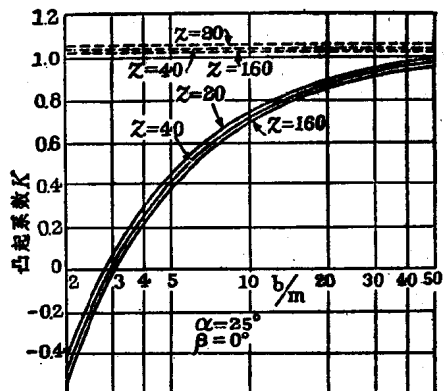


图1-17 凸起系数K值

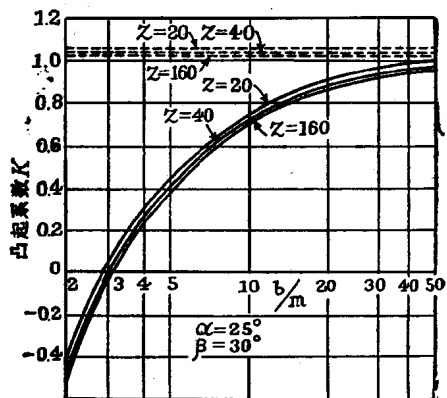


图1-18 凸起系数K值

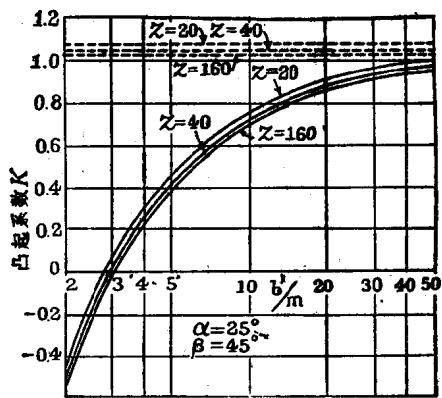


图1-19 凸起系数K值

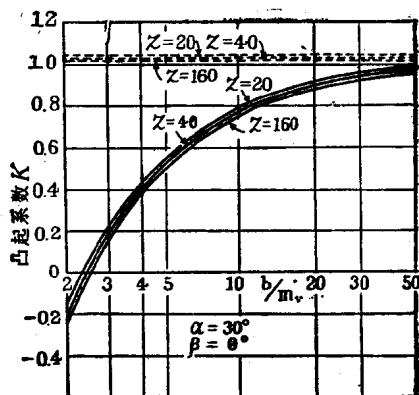


图1-20 凸起系数K值

从这些结果可以看出, K 值随齿数 z 、压力角 α 以及螺旋角 β 等的不同而变化。尤其是因齿宽 b 与模数 m 之比 $\frac{b}{m}$ 值的不同而变化较大。

若 $\frac{b}{m}$ 值在 10 以上, 则 K 值大致接近于 1。 $\frac{b}{m}$ 值小于 5, K 值显著减小。如 $\frac{b}{m}$ 值在 3 以下, 则 K 值成为负数。

这种变化可用如下的理由来加以说明。即当轧轮一经轧入齿坯, 齿坯外圆部分的金属就起塑性变形, 并向半径方向凸起。此时, 靠近齿坯两端面部分的金属, 在向半径方向凸起的同时, 也容易引起向齿坯轴线方向的塑性流动。所谓向轴线方向的塑性流动, 也就是在齿坯的两端面上形成鼓出部分。这个端面鼓出量, 根据试验结果证明, 不受齿宽尺寸变化的影响, 而呈现为常数。齿坯的金属向端面鼓出时, 就减少了向半径方向的凸起量, 因而 K 值变小。当 $\frac{b}{m}$ 值较大, 亦即轧制齿宽很大的齿轮时, 其两端面的鼓出量, 比半径方向的凸起量要小得很多, 因此, 受到它的影响也很小, 其结果为 K 值变大, 大致接近于 1。与此相反, $\frac{b}{m}$ 值较小时, 两端面的鼓出量与半径方向的凸起量的比例增大, 因此, 受到它的影响也大, 所以 K 值变小。如果 $\frac{b}{m}$ 值在 3 以下时, 两端面的鼓出量比半径方向的凸起量反而要大, 所以凸起系数 K 值变为负值。因而在轧制齿宽不到模数 3 倍的薄片齿轮时, 必须把齿坯的直径做成比精轧后的齿顶圆直径大些。

因此, 以上述试验结果为基础, 可推导出凸起系数 K 值的计算式。

齿轮在轧制过程中不产生切屑。因而可以认为, 齿坯在轧制前后几乎没有减轻重量。现以试验测定的实例来加以说明。轧制齿轮的基本参数为: 模数 $m = 1.5$, 压力角 $\alpha = 25^\circ$, 齿数 $z = 48$, 螺旋角 $\beta = 30^\circ$ 的斜齿轮, 齿坯材料采用 S 20 C。轧制前的齿坯重量为 400 克, 因轧制而减轻的重量为 30 毫克。这个重量还不到齿坯重量的 0.01%, 为数很小。所以齿坯的重量变化可以忽略不计。

此外, 由于轧制而引起的齿坯比重的变化, 也是为数极微的。

因此, 可以把轧制前后的齿坯体积看做不变来进行计算。

今设轧制前后齿坯的体积为常数, 则下式成立。

$$\frac{\pi}{4} d_r^2 b = \frac{\pi}{4} d^2 b + z_2 S b + V \quad (1-17)$$

式中 d_r ——轧制齿轮的齿根圆直径;

S ——垂直轧制齿轮轴线的截面处, 齿根圆以上的面积;

V ——平行于轧制齿轮轴线方向的两端面鼓出部分的体积。

公式的左边表示轧制前的体积, 右边分别表示为轧制后的体积加上两端面鼓出部分的体积。

齿根圆直径 d_r 可用下式表示:

$$d_r = m \left\{ \frac{z_2}{\cos \beta} - 2(1 + c) \right\} \quad (1-18)$$

式中 c ——轧制齿轮的齿顶间隙。

设模数 $m = 1$ 的直齿圆柱齿轮, 在齿根圆以上的齿面积为 s 。其齿形部分的面积 S 一般可用下式表示

$$S = \frac{sm^2}{\cos \beta} \quad (1-19)$$

又设模数 $m = 1$ 的直齿圆柱齿轮每一齿两端面鼓出的体积为 v , 并假定对于法向模数

$m = 1$ 的斜齿轮也产生类似的鼓出部分, 则全部齿数 z_2 的两端面鼓出的体积 V 为:

$$V = v m^3 \frac{z_2}{\cos \beta} \quad (1-20)$$

V 值可在轧制后, 将齿轮两端面的鼓出部分车削去, 根据实际测得的重量来求出, 从而也就可以算出 v 值。

今就低碳钢材料, 按实测值 V , 算出 v 值的结果列于表 1-3。 s 值可用如下方法进行计算。

表1-3 两端面鼓出部分的体积 v 值

径节或模数	螺旋角	v (毫米 ³ /每齿 $\times$ 模数)
$DP=30$	$\beta=0^\circ$	12.4
$m=1$	$\beta=0^\circ$	8.6
$m=1$	$\beta=45^\circ$	11.4
$m=2$	$\beta=0^\circ$	6.6
$DP=12$	$\beta=30^\circ$	8.7
$m=2.5$	$\beta=20^\circ$	8.4

在图 1-21 中, 因齿形为左右对称, 所以加画出 BO 、 CO 斜线后, 就齿形的二分之一进行计算。若将这部分再加以细分为: s_1 (渐开线部分的面积 $BCDEB$); s_2 (齿顶圆扇形部分的面积 $ABEFA$) 以及 s_3 (齿根圆弧部分的面积 $DCHD$)。则

$$S = 2(s_1 + s_2 + s_3) \quad (1-21)$$

从图中看出:

$$\begin{aligned} s_1 + s_2 &= [\text{面积 } OBCDO] + [\text{面积 } OABO] - [\text{面积 } OFDO] \\ &= (s_1 + s'_1) + (s_2 + s'_2) - (s'_1 + s'_2) \end{aligned} \quad (1-22)$$

若取渐开线的特性 (参看图 1-22) 为:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \text{inv} \alpha = \text{tg} \alpha - \alpha \\ r &= r_g \sec \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

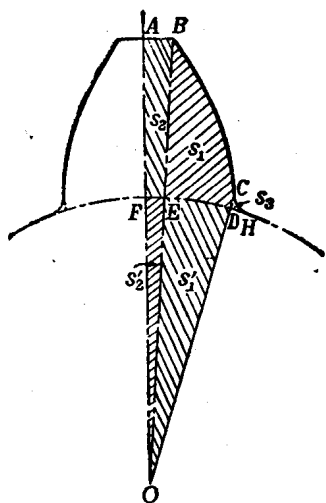
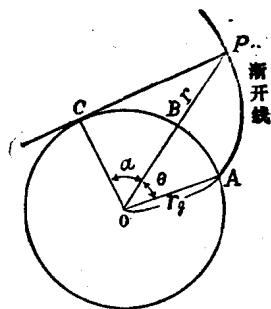


图1-21 齿形断面



$$\begin{aligned} \widehat{ABC} &= PC r_g (\alpha + \theta) = r_g \text{tg} \alpha \\ \theta &= \text{tg} \alpha - \alpha = \text{inv} \alpha \end{aligned}$$

图1-22 渐开线齿形

则对于从中心 O 画出的渐开线部分的面积为

$$\frac{1}{2} \int r^2 d\theta = \frac{r_g^2}{2} \int \sec^2 \alpha d\theta = \frac{r_g^2}{6} (\operatorname{tg}^3 \alpha + k) \quad (1-24)$$

式中 k ——积分常数。

设齿顶和齿根处的压力角分别为 α_a 、 α_r ，并将 α_a 、 α_r 分别取上式定积分的上限和下限，则得：

$$s_1 + s'_1 = \frac{1}{6} r_g^2 (\operatorname{tg}^3 \alpha_a - \operatorname{tg}^3 \alpha_r) \quad (1-25)$$

其次，求扇形部分 ($s_2 + s'_2$) 的面积，若在分度圆上取齿厚为周节的二分之一，则：

$$\angle AOB = \frac{\pi}{2z_2} + \operatorname{inv} \alpha_a - \operatorname{inv} \alpha_r \quad (1-26)$$

由此得

$$(s_2 + s'_2) = \frac{1}{2} r_k^2 \left(\frac{\pi}{2z_2} + \operatorname{inv} \alpha_a - \operatorname{inv} \alpha_r \right) \quad (1-27)$$

式中 r_k ——齿顶圆半径；

α_r ——分度圆上的压力角。

同样，

$$\angle DOF = \frac{\pi}{2z_1} + \operatorname{inv} \alpha_a - \operatorname{inv} \alpha_r \quad (1-28)$$

由此得：

$$(s'_1 + s'_2) = \frac{1}{2} r_r^2 \left(\frac{\pi}{2z_1} + \operatorname{inv} \alpha_a - \operatorname{inv} \alpha_r \right) \quad (1-29)$$

将(1-25)式、(1-27)式和(1-29)式代入(1-21)式得：

$$S = \frac{1}{3} r_g^2 (\operatorname{tg}^3 \alpha_a - \operatorname{tg}^3 \alpha_r) + r_k^2 \left(\frac{\pi}{2z_2} + \operatorname{inv} \alpha_a - \operatorname{inv} \alpha_r \right) + r_r^2 \left(\frac{\pi}{2z_1} + \operatorname{inv} \alpha_a - \operatorname{inv} \alpha_r \right) + 2s_a \quad (1-30)$$

对于压力角 α 为 $14^\circ 30'$ 、 20° 、 25° 以及 30° 的四种齿轮，用(1-30)式计算出的 S 值，示于表 1-4 和图 1-23。

表 1-4 齿形截面积 S 的值

(毫米²)

压力角 α	14°30'	20°	25°	30°
齿数 z				
12	—	—	3.018	3.088
18	—	3.113	3.188	3.272
24	3.132	3.205	3.292	3.352
30	3.182	3.272	3.348	3.399
36	3.222	3.319	3.382	3.431
48	3.288	3.372	3.426	3.470
60	3.327	3.401	3.449	3.493
90	3.383	3.439	3.489	3.528
120	3.408	3.455	3.501	3.542
150	3.422	3.468	3.508	3.548
180	3.431	3.476	3.514	3.554