

滚轧齿轮译文集

第二集

湖南省机械工业局技术情报中心站

1975年8月

编辑者：湖南省机械工业局技术情报中心站
湖南省机械研究所
印刷者：平江县印刷厂
地址：长沙市城南路长塘里24号

0.502

毛主席语录

科学技术这一仗一定要打，而且必须打好。不搞好科学技术，生产力无法提高。

古人，外国人的东西也要研究，拒绝研究是错误的，但一定要用批判的眼光去研究，做到古为今用，洋为中用。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

1、国外滚轧齿轮的试验研究概况.....	(1)
2、齿轮滚轧法.....	(16)
3、齿轮滚轧法.....	(19)
4、齿轮滚轧法.....	(22)
5、滚轧制造齿轮法.....	(25)
6、齿轮滚轧方法和设备.....	(27)
7、齿轮滚轧设备.....	(31)
8、齿轮滚轧.....	(38)
9、滚轧成形工件的设备.....	(43)
10、齿轮精滚轧工具和方法.....	(55)
11、圆柱齿轮冷轧方法的改进.....	(60)
12、齿轮成形的改进.....	(73)
13、伞齿轮滚轧机.....	(79)
14、滚轧小周节人字齿轮.....	(83)
15、在工件上形成键槽的方法和装置.....	(88)
16、齿轮滚轧工具.....	(94)
17、滚轧工具.....	(97)
18、轧机的传动.....	(98)
19、滚轧齿轮用齿坯.....	(101)
20、齿轮滚轧机的齿坯安装装置.....	(103)
21、轧轮.....	(106)
22、轧轮.....	(108)
23、轧轮.....	(110)
24、轧轮.....	(112)
25.瑞士恩思特·格罗布(Ernst Grob)公司花键轴、细齿轴和齿轮冷轧机.....	(115)

国外滚轧齿轮的试验研究概况

一、齿轮滚轧法的沿起

在国外，由于汽车工业的发展，对齿轮的大批量生产提出了迫切的要求。而采用传统的滚齿—剃齿方法生产齿轮，存在着许多缺点，诸如生产率低、成本高等。再加上剃齿机很笨重，为满足大量生产齿轮的需要，须同时使用多台剃齿机，因而所占厂房面积过大。滚齿—剃齿方法的这些缺点，促使人们考虑改进齿轮制造工艺。从十九世纪末期开始，就有人研究用滚轧法来加工齿轮，以代替剃齿作业。但属于试验研究性质，真正用于生产，只是近十几年的事，并且在近十几年中有了迅速的发展。

美国福特汽车公司在1960年初开始研究用精滚轧法生产自动变速行星齿轮，于1965年在美国国内申请专利。1967年美国福特汽车公司的里弗里亚工厂正式采用冷滚法来精滚轧齿轮，以代替剃齿加工。经过几年的实践，到1971年在汽车行星齿轮生产中完全淘汰了滚齿机和剃齿机，建成了一条以冷滚轧为主的生产线。它在一台6工位冷锻机加工齿坯，代替了过去用8台自动车床车齿坯的工序，用4台冷粗轧机代替了25台滚齿机来粗滚轧齿轮，用3台精滚轧机代替了18台剃齿机，从而使过去必须用44台设备的生产线，减少到只用22台就够了。

美国在齿轮制造工艺上的改进，对其他国家发生了影响。日本此时也开始了研究，1967年园池制作所也开始用精滚轧生产齿轮产品。精轧机是由螺纹滚压机床改造成的，并把它正式编入生产线生产产品。

在西欧，美国的福特汽车公司和西德的福特汽车公司也先后向美国福特汽车公司订购了滚轧机，建立了滚轧齿轮生产线。

目前西德、瑞士、苏联等国家的一些齿轮厂也都采用了冷滚轧工艺生产齿轮，其中西德和瑞士的冷滚轧齿轮技术有相当高的水平。1969年西德诺恩第·道林贝格公司生产了三轧轮滚轧机。同年，瑞士玛格公司制造了蜗杆形齿轮滚轧机，既可用于粗滚轧，也可用于精滚轧。1971年，当日本人还认为冷滚轧法只能生产2.5模数以下的齿轮，再大模数的齿轮就只有用热滚轧法生产时，玛格公司已经用冷滚轧法为推土机生产一种5模数、30个齿的正齿轮

了。瑞士的另一家公司恩思特·格罗布公司制造了三种标准型号的楔形轴、花键轴、细齿轴、齿轮滚轧机和三种特殊型号的滚轧机，这些机器也各有特点。

继齿轮冷滚轧之后，为了解决大模数齿轮的生产问题，发展了齿轮热滚轧新工艺。在齿轮热滚轧方面，以苏联研究得最多。目前苏联的热轧机最大可以滚轧12模数的齿轮。1969年苏联申请专利的伞齿轮热轧机，可以轧制节锥角在 $45^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 范围内的各种角度的伞齿轮。值得注意的是，近年来美国福特汽车公司和日本的公司都先后从苏联进口热滚轧机和有关专利。由于苏联对我国封锁资料，所以我们对苏联在热滚轧齿轮方面的研究成果还未摸清。

目前采用热轧齿轮的主要国家有苏联、匈牙利、西德和日本。

日本在热轧齿轮的研究方面做了不少工作，涉及到轧机、结构（如创制九辊齿轮热轧机，从轧机结构的合理性方面保证齿轮质量）、轧轮的设计、滚轧条件的控制、齿坯夹持装置和齿坯形状等方面。有些成果对于我国从事这方面设计研究工作的同志不无参考价值。

关于滚轧齿轮的优点及其经济效果，已为大家所熟知，我们在《滚轧齿轮译文集》的一篇综述中已详细介绍过，这里就不再重复。

二、滚轧齿轮的试验研究情况

在国外滚轧齿轮之所以能够广泛地用于汽车、拖拉机、推土机等机械，是因为使用滚轧法生产齿轮能够和使用切齿工艺一样保证齿轮的精度。

用滚轧法生产齿轮在国外经历了五十年的过程，只是到了最近十几年、具体地说是1967年才达到在生产上使用阶段。近十几年来国外对如何提高滚轧齿轮的精度做过许多试验研究。仅从近十几年来美国、英国、日本的科技文献中收集到的材料来看，除了公开在杂志上发表的一些学术性论文外，仅仅取得专利权的就不下100项，这还仅限于美国、英国、日本的（其中只包括瑞士、西德、法国和苏联的一小部分）。就其内容而言，包括滚轧方法、滚轧机的设计、轧轮、齿坯、齿坯夹持装置和轧机的传动等。

仅从现在收集到的国外文献来看，国外在提高滚轧齿轮精度方面主要是集中注意轧轮的设计。

美国、西德、瑞士、日本、英国对轧轮的齿形、轧轮的形式、轧轮的设计计算等都进行了试验、研究。此外，对滚轧工艺方面、齿坯和齿坯夹持装置等也都进行了研究。现简要介绍如下。

1、对轧轮的研究和设计

①轧轮材料和使用寿命

目前在国外使用的轧轮材料多为铬系高速钢，在热轧机上多用SKH₂（相当于W₁₈Cr₄V）高速钢做轧轮。这种钢耐热性好，耐冲击力强。其硬度以HRC61为最好。在冷轧中轧轮多用NR2铬钢。这种钢抗压、抗弯、耐冲击性好。其硬度以HRC58为最好。据西德资料报导，西德试用美国的M₂高速钢做轧轮，硬度HRC65，取得了良好的效果。（这种钢的化学成分及轧轮使用情况见《滚轧齿轮译文集》第24页）美国福特汽车公司的精轧轮用的是SKH-9号钢，HRC58~60。

使用上述高速钢制造的轧轮寿命是很长的。热滚轧机的轧轮寿命为3000个左右重磨一次。冷精轧轮的寿命平均为120万个重磨一次，最高可达200万个。一般一个轧轮可磨4次。

②轧轮的设计和制造

国外在滚轧齿轮的过程中，不论是冷滚轧或热滚轧齿轮时，都遇到了同样的问题，这就是当用设计出来的与产品齿轮的齿形相同的轧轮来滚轧时，一定会在齿轮工作面与轧轮工作面的啮合节点上留下凹陷，同时在产品齿轮的齿根部分产生根切。此外，还在齿顶部分产生包顶或齿顶角填充不满及飞边等。倒齿主要是热滚轧齿轮中遇到的问题，将单独叙述。

上述缺点的出现，轻者降低产品齿轮的精度，重者使产品报废。对于产生根切的问题，一般只要把轧轮的齿顶倒出圆角就可以解决。最主要的问题是在产品齿轮的工作面上产生凹陷的问题。国外主要研究滚轧齿轮的厂家或科技人员对此进行了许多研究工作。从美国、英国、日本、西德的大量专利文献来看，比较一致的看法认为产生凹陷的原因是由于在滚轧过程中，齿坯和轧轮间的齿面产生滑动，造成接触负荷的变动，因而在工作齿面中央部分产生凹陷。为了消除这个缺点，必须对轧轮的齿形进行修正。目前对于如何解决修正轧轮齿形这个麻烦问题，各国的科技人员都做了大量的试验研究工作。日本不二越公司解决的办法是使用由基圆不同的两条渐开线曲线组合成齿形的轧轮，获得了良好的效果。该公司的发明者声称这种由双渐开线组合成的轧轮齿形很容易加工，只要按着双渐开线组合的轧轮形状制造一个专门的磨削工具就行了。（详参看日本《实用新案公报》昭45—2291号）

美国、英国、瑞士和西德等国仍采用单渐开线齿形的轧轮。美国莱克司·辛格莱尔（Leax Siegler）公司的解决办法则是使修正后的轧轮齿形与工件齿形的啮合节点向齿顶方向或齿根方向移动，错开原来易产生凹陷的地方。该公司提出在轧轮的设计上，轧轮和

工件应保持这样一种关系，即齿轮的工作节圆直径完全位于轧轮齿渐开线齿形区外侧，即靠近齿顶侧或靠近齿根的内侧。这样就可消除滚轧时在齿轮工作面上的缺点。（详见1972年英国专利1278234号，原为美国专利）

法国一个汽车公司（PEUQEOT）研究出了另一种解决办法，就是在轧轮齿数的选择上做文章。该公司发现正确选定轧轮齿数对提高产品齿轮的精度有很大关系。在冷精轧中，避免根切的办法是要使轧轮与齿轮的齿根和齿顶之间保持有一定的间隙，在轧轮的齿顶外径和齿轮的齿顶外径相等时，应使前述间隙增加相当于原来齿根间隙的2倍。但上述齿根间隙的值不得大于齿轮模数乘以0.15。为了避免在齿面上产生缺陷，该公司提出了三项设计轧轮的原则：

- a、轧轮齿数和工件齿数要不同；
- b、轧轮齿数要为工件齿数的2~3倍；
- c、轧轮的转数应低于工件齿数和轧轮齿数同工件齿数之差的最小公倍数。

这个结论是根据下述条件得出的：

已经知道，轧轮的使用寿命和它相应于工件的总尺寸是随着轧轮齿数的增加而增加的。这两个条件取决于下述不等式：

$$2n_1 < n_2 < 3n_1$$

即是否是介于工件齿数 n_1 和轧轮齿数 n_2 之间。

n_1 为工件齿轮齿数。

n_2 为轧轮齿数。

如果轧轮某个齿上有缺点，则在滚轧作业中由于该齿数次与工件齿啮合，因而在工件齿上就会重复地产生同一个缺点。

n_1 和 n_2 之间的关系是：

$$n_2 = n_1 + p \quad (p \text{ 是个整数})$$

$$\text{即 } n_1 = Qr_1$$

$$\text{而 } p = Qr_1$$

这里 r_1 是整数， Q 也是整数，是 n_1 和 p 的最大公约数。

当 $Q=1$ 时，也就是如果 n_1 和 p 是彼此不能相约的数，在轧轮转满 $n_1 \cdot p$ 圈数之后，轧轮齿将落在工件的同一齿上。

因此，为了避免在工件齿上扩散同一缺点，要使 n_1 和 n_2 之间有最小公倍数（详参阅美国

专利3673837号)

日本津上制作所为了解决滚轧中产生内包边和飞边,研究出一种新的滚轧方法。

该公司认为在滚轧齿轮中产生内包边和飞边的主要原因是滚轧压力和进给量不够造成的。该公司认为当滚轧压力小、进给量比较小时,滚轧能量大部分被消耗在齿坯表层的塑性变形上,此时表层的塑性变形主要又是表现在金属沿齿面流动。这种金属流动除一部分向齿根方向外,主要向齿顶方向流动,这就是造成齿顶内包和飞边的原因。因此,防止内包边和飞边的先决条件是制止金属表层组织向齿顶流动。这就要求轧机、轧轮、齿坯在驱动方式上都要有合适的选择,使有足够大的进给量而又要把能量尽可能地消耗在齿坯的内部塑性变形上。

该公司认为单纯从滚轧压力和进给量方面去解决是有困难的。经过研究找出了一种解决办法,就是根据以下的参数:轧轮齿数、工件齿数、齿坯直径、齿轮的设计齿高、 $B=0$ 时的进给量,计算出轧轮的直径和在 $B=0$ 时的轧轮和齿轮的中心距。所利用的计算公式如下:

$$\frac{R_a - R_2}{h_0} = B \dots\dots\dots (1)$$

R_a : 滚轧中工件的外圆半径。

R_2 : 工件啮合节圆半径。

h_0 : 正规滚轧齿高。

B : 某瞬间从工件的啮合节圆到外圆的齿高变化。

如果把在某瞬间从工件啮合节圆到外圆的齿高变化 B 做为正规齿高,也就是轧轮齿高轧进深度,它与内包量有密切关系。一般在考虑滚轧中轧轮和齿坯的啮合关系时,都要考虑以下状态:

a、被连续滚轧中的齿坯的齿顶尚未到达轧轮齿底的场合。

b、齿坯的齿顶到达轧轮齿底的场合。

如果在a的场合, $B=0$ 的条件下,其外周和啮合节圆一致。

$$\text{则: } R_b + l - A \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = 0$$

$$\text{故: } A = (R_b + l) \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \dots\dots\dots (2)$$

R_b : 齿坯半径。

l : 齿坯的凸起量。

Z_1 : 轧轮的齿数。

Z_2 : 齿轮的齿数。

A : 轧轮和齿轮的中心距。

如果在 b 的场合:

$$B = \frac{A - R r_1 - R_2}{h_0}$$

当 $B = 0$ 时,

$$A = R r_1 + R_2$$

而 $A = R_1 + R_2$

$$A \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = R_2$$

将其代入下式, 即:

$$A = R r_1 + A \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$\therefore A \left(1 - \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) = R r_1$$

$$\therefore A = R r_1 \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \dots\dots\dots (3)$$

$R r_1$: 轧轮的齿底半径。

R_1 : 轧轮的啮合节圆半径。

以上是使用关系式 (1)、再考虑实验值画出曲线, 根据这个曲线, 采用能够在滚轧出齿坯齿高的 75~85% 时, 工件的啮合节圆和工件的外圆能一致的轧轮, 就能基本控制住由于金属流动而产生的内包边和飞边。

将本发明的轧轮半径代入 (2)、(3) 式, 则得出:

$$(R_b + \Delta h) + R_{o1} = A \dots\dots\dots (4)$$

Δh 为 $B = 0$ 时的内包边量。

该公司发明者根据以上公式计算了一个实例如下表所示:

给 定 数 据					计 算 结 果	
轧轮齿数	工件齿数	齿坯直径	设计齿高	$B=0$ 时的 进 给 量	轧轮直径	$B=0$ 时的轧 轮和齿轮中心距
85	50	75毫米	2.666毫米	1.3毫米	134.33毫米	103.26毫米

发明者声称, 轧轮和齿轮之间的关系合乎上述条件, 就能滚轧出无内包边和飞边的齿轮。

上述结论也是在经过一系列的试验研究后得出的(详参看日本《特许公报》昭43——17915号)。

该公司还研究设计出一种滚轧小模数齿轮、花键轴和细齿轴的轧轮。在一个轧轮上按顺序有粗滚轧、精滚轧、整形三种齿形,自动供给齿坯,每转一周可滚轧两个齿轮。(对齿形的计算修整方法请参看日本《实用新案公报》昭44——29082号)

此外,对轧轮的设计和使用也有过不少的研究。如西德某公司为了减少齿轮渐开线误差,进行了一系列试验研究后,得出的结论是:要想减少模数 $2.1\sim 2.4$ 、压力角 $d=16^{\circ}30'\sim 20^{\circ}$ 、螺旋角 $\beta=30\sim 39^{\circ}$ 的齿轮渐开线误差,就要对轧轮进行正弦法修磨。(参看《滚轧齿轮译文集》第21~25页)

该公司还找出了精滚轧用滚齿加工出的齿轮时损坏轧轮的主要原因,是由于滚齿粗加工出的齿轮误差过大。滚轧前应用标准齿轮对粗加工的齿轮进行综合检验,才能避免轧轮的损坏。

美国和日本某些公司为了提高冷滚轧和热滚轧齿轮的精度,主张用专门设计制造的齿条式滚轧工具来制造修正齿形的轧轮,以保证轧轮齿形的精度。(详参看《滚轧齿轮译文集》第57~67页)可见轧轮的设计、制造对保证滚轧齿轮的精度有多重要了。

在成批滚轧生产齿轮中,重复消耗的主要是轧轮,因此轧轮材料的选择是很重要的。而一对高速钢的轧轮成本是比较高的。1969年美国福特汽车公司用于滚轧行星齿轮的轧轮每对约为2000美元。该公司由于成批生产,轧轮寿命很高,平均计算滚轧每个齿轮的工具费只有0.0015美元,所以还是划得来的。该公司有一条经验,在轧轮设计经验不足的情况下,也可以采用比较便宜的材料来制造轧轮。目前我国滚轧齿轮工作尚处于试验研究阶段,这个经验似有可借鉴之处。

2、对各种不同形式滚轧工具的试验研究

上面所谈的是圆柱形轧轮的试验研究。此外,有些国家的公司还采用其他形式的滚轧工具。主要有蜗杆式轧辊、齿条式滚轧工具和打轮式等。

例如瑞士的玛格公司采用两个蜗杆式滚轧工具进行冷滚轧,该公司设计的蜗杆式滚轧工具有以下几个特点:

①既可以用它来粗滚轧齿轮,也可以用来进行精滚轧。在粗滚轧时,所用轧辊的蜗杆部分短些;在精滚轧时,所用轧辊的蜗杆部分要长些。用长蜗杆的目的在于纠正齿形误差。

②用同一对轧辊可以滚轧模数相同的园柱形正齿轮和斜齿轮。在滚轧斜齿轮时，只要改变一下角度，就可以滚轧任何螺旋角的斜齿轮。这个专利曾被英国买去。（详参看英国专利1972年1293412号）

齿条式滚轧工具主要是用来滚轧花键轴、细齿轴，主要有美国、西德、日本等国家的某些公司采用。由于它具有一定的优点，因此齿条式滚轧机在某些国家得到一定的发展。例如日本在1968年有37台，到1970年增加到92台。齿条式滚轧机最大的缺点是随着滚轧工件外径的增加，齿条长度也必须增加，因而使轧机的体积也要增大。

打轮式滚轧工具主要是用来冷打花键和齿轮。将在冷打花键部分介绍。

3、在滚轧工艺方面的试验研究

国外除了在轧轮上下功夫外，在滚轧工艺方面也进行了不少的试验研究。从事热轧研究的国家主要有苏联、日本、美国和匈牙利等国。但目前我们收集到的文献不多，仅从现有的材料来看，各国一致的看法是热滚轧法在最好情况下只能滚轧出相当于滚齿机加工出的齿轮精度。因此，美国和日本都把热轧机看做滚轧大模数齿轮的粗轧机。其滚轧精度只能达到8级程度。在对齿轮精度要求不高的机器上可以直接使用，在精度要求再高的地方使用就得进一步精加工，可以用剃齿、精滚轧或磨齿加工。

因此，国外在研究提高热轧精度方面也是以粗加工齿轮为前提的。

在热滚轧中遇到的问题主要是倒齿、中心孔变大。产生飞边、内包边、工作齿面表层有凹陷等是和冷轧中遇到的问题差不多的，解决方法也一样。而倒齿、中心孔扩大以及由此产生的一系列影响齿轮精度的问题都与加热有关。因此，着重介绍与此有关的问题。

①加热方法

目前在热滚轧中，对齿坯的加热方法主要有两种，一种是采用无氧加热炉或保护气氛把整个齿坯都加热到适合滚轧温度后，再夹持到心轴上进行滚轧；一种是用中频感应线圈把齿坯四周加热到适合滚轧温度，再进行滚轧。目前一般使用的中频电机为100~250KW、频率为2000~2500C、P、S。

一个专门从事热滚轧齿轮研究的日本的大学教授认为，在对加热频率的选择上应根据下列关系式而定：

$$S = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot f} \cdot 10^9} \dots\dots\dots (1)$$

S: 浸透深度 (cm)。

P: 电阻比 (Ωcm)。

μ : 导磁率。

f: 频率。

②热滚轧条件

在热滚轧中必须考虑的条件是材料的膨胀、加工精度、加工效率、轧轮寿命。材料的膨胀应该成为重点。齿轮是否产生飞边主要受材料的可塑性和轧进量的影响。如果能在滚轧过程中避免产生硬化状态, 轧轮的轧进量又合适, 就能滚轧出无飞边的齿轮。

在使用S45(45号钢)、SCM3 (35CrMo)、SCM21 (15CrMo) 的普遍钢做齿坯时, 滚轧温度在 $900^{\circ}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 为宜。

滚轧温度的决定不能只从减少材料变形阻力考虑, 必须从有利于材料的再结晶来考虑。如果温度过高, 产生的氧化皮多, 齿轮精度下降, 材料结晶组织粗大。因此要确定一个适合的加热层的深度, 这个深度要根据滚轧时需要的金属流动的塑性变形层的深度而定。其计算方法如下式:

$$dn = 2.5 \cdot m + C + r_b - r_2 \dots\dots\dots (2)$$

dn: 加热层的深度。

m: 滚轧齿轮的模数。

C: 齿顶间隙。

r_b : 齿坯半径。

r_2 : 滚轧齿轮的节圆半径。

当dn小于公式(2)的值时, 则只表层鼓起, 比这再深的地方温度低、膨胀性不好, 因此产生飞边。强制进行滚轧, 轧轮齿容易折损。

如果dn过大, 齿坯中心的刚性减少, 则导致中心孔扩大, 影响加工精度。

轧轮轧进深度, 即每次的进给量用 δ 代表, 则 δ 的适宜值为:

$$\delta = (0.11 \sim 0.13) \cdot m (\text{mm}) \dots\dots\dots (3)$$

当 δ 小于公式(3)的值, 则产生飞边; 过大, 则轧轮齿在强制条件下工作, 齿易折损, 也影响齿轮精度。

苏联采用的 $\delta = (0.1 \sim 0.2) \cdot m \dots\dots\dots (4)$

齿坯的圆周速度对产生飞边没有影响, 但对倒齿影响很大, 采用下列值为宜:

$$V_t = 18 \text{ (米/分)} \dots\dots\dots (5)$$

如果 V_t 值过大, 则向转动相反方向倒齿; 如果过小, 拖长了滚轧时间, 热向齿坯中心传导, 也会降低加工精度。

如果用 (3) 和 (5) 式的值来表示, 轧轮的进给速度则如下式:

$$V_r = (33 \sim 39) \cdot \frac{I R \cdot m}{2 \pi R_b} \text{ (mm/s)} \dots\dots\dots (6)$$

V_r : 轧轮进给速度。

$I R$: 使用的轧轮数。

R_b : 齿坯半径。

m : 滚轧齿轮的模数。

以上是热滚轧不产生倒齿和无飞边的条件。

用热滚轧法大批量生产齿轮时, 为了保证尺寸及精度, 必须使加热时间、滚轧温度、滚轧时间保持一定。正规滚轧时间以 10~15 秒为佳。

在热滚轧时, 关系到精度的一个特别值得注意的地方, 是孔部分的键槽, 如果键槽是非对称的, 在滚轧过程中由于加热、冷却产生的变形, 一个键槽就能影响到 20μ 的误差。

还有, 在热滚轧中, 轧轮与齿轮之间的精度关系还是值得进一步研究的。据日本的资料报道, 在有些情况下, 轧轮的误差并不是原封不动地传给齿轮的, 如以相邻周节误差来看, 在滚轧中, 同时使用 2 或 3 个轧轮时, 在一定转数范围内, 几个轧轮齿互相滚轧, 相邻周节误差反而可以缩小。有些误差则要扩大。例如在使用齿槽振摆为 30μ , 相邻周节误差为 25μ 的轧轮进行热滚轧时, 得到的齿轮的精度是齿槽振摆 (即径跳) 为 48μ , 相邻周节误差却减少到 23μ 。

此外, 热滚轧中, 安装齿坯的心轴的冷却也是个重要问题。在连续滚轧中, 齿坯的温度不断传到心轴, 使心轴温度升高, 使心轴刚性有所改变。心轴变形的大小, 必然影响到齿轮的径向跳动, 这是影响齿轮精度的一个重要原因。因此, 心轴必须经常用流水冷却。

轧轮因直接接触高温齿坯, 必须随时冷却, 一般是冷却润滑同时进行, 方法是注入混有石墨的水。

在热滚轧中, 滚轧压力随着模数的增大而增大。滚轧模数 3~12 的齿轮, 轧机的进给压力在 10~75 吨。

③ 滚轧新工艺

为了克服热滚轧中因齿轮中心孔变形而影响齿轮精度，日本的槌川武男教授研究出了一种新方法。槌川认为，齿轮中心孔的变形是因为上千公斤的滚轧压力不能全部在法线方向被吸收，而使金属组织在内部产生流动，于是齿坯的中心孔就变成椭圆形。为了克服这个缺点，应当依靠压力反应装置，保证滚轧压力全为滚轧齿轮所吸收，这样就会大大地减少椭圆度。还剩下的微小椭圆度，可在滚轧完了时，先使轧轮强制微量后退，然后再正反滚轧几周，既可矫正椭圆度，也可以达到光整的目的，这样可使齿轮精度提高。轧轮强制后退量约为0.16（毫米）左右。这样滚轧出来的齿轮中心孔椭圆度能保证在 $10\sim 15\mu$ 范围。这位教授曾在同样条件下做过试验：对一批齿轮从滚轧开始一直到完了，是一个方向一直滚轧到底，轧轮不强制后退，也不正反光整，结果滚轧出的齿轮中心孔椭圆度在 $80\sim 100\mu$ 。这个试验说明，在同一台轧机上由于轧轮强制后退、反转和不后退、不反转光整，其效果是不一样的。（这项专利为日本丰田工机株式会社买去。详参看日本《特许公报》昭43——16628号）

日本丰田工机的另一项专利的发明者认为，目前齿坯的安装单纯利用几吨顶压力将其夹持在心轴上是不合理的。这不仅会造成止推轴承寿命的缩短，更重要的是由于反作用力会造成心轴错位，会使齿轮精度下降。该公司改用一种有螺纹的心轴，用螺母将齿坯夹紧的装置。扭紧和松下齿坯全是液压自动的。这样解决了由于心轴错位造成的精度下降问题。（详参看日本《特许公报》昭43——10222号）

在齿轮热滚轧法中，日本三菱重工业株式会社还研究出一种新方法，即直接用圆钢加热后，边压缩锻粗、边滚轧成齿轮。这种滚轧方法使用的圆钢为 $\phi 30$ ，将其加热到 1000°C ，压缩锻粗压力为80吨，圆钢的变形速度为 $5\sim 10$ 毫米/秒。用一对100个齿的轧轮，其圆周速度为17米/分、平均滚轧进给量为 $0.2\sim 0.3$ 毫米，滚轧压力约2吨。

该公司发明者声称，用这种滚轧法的轧机，可用同一对模数相同的轧轮，滚轧出同样模数的任何直径、任意齿数的齿轮来。（详参看日本《特许公报》昭45——22615号）

苏联的弗拉基米尔·安德罗维奇·卡托夫发明的滚轧伞齿轮的热滚轧机专利，先后为英国、美国和日本买去。这种热轧机的优点是，只要改变轧轮的角度，就可以滚轧出节锥角在 $45^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 范围内的伞齿轮。（详参看英国专利1262924号和日本《特许公报》昭43—28297号）

4、滚轧用齿坯的试验研究

在滚轧齿轮中，影响齿轮精度的因素很多，例如提高轧机的刚性、传动装置和滚轧工具的精度，都是提高精度的重要方面。有人研究过传动机构的误差对滚轧齿轮误差的影响。计

算的结果是强制驱动的主齿轮的误差对滚轧齿轮的累积误差影响很大,其角度误差几乎和主齿轮的误差相等。同时齿坯的精度也是很重要的因素。经验表明,齿坯的精度高,滚轧出来的齿轮精度也会高。例如所用齿坯偏心误差的大小是与滚轧出的齿轮精度成正比的。因此,应对滚轧齿坯的制造给予足够的重视。

①齿坯的材料及制造

目前各国制造滚轧齿轮的齿坯材料,尽管钢的型号不同,但基本上用炭素钢和合金钢。例如日本多用S20C(相当国内20#钢)、S35C(相当国内30#钢)、S45C(相当国内45#钢)、SCM3(相当国内35CrMo)、SCM21(相当国内15CrMo)。滚轧后要进行淬火、渗炭等热处理,以提高其硬度。美国福特汽车公司使用的SAE4027-H、5140-H、SAE4024、4620、5130、5132、8620、8617皆为合金钢。其中的5130、5132相当于我国的30Cr、5140相当我国的40Cr。上述钢的硬度范围大致在HB143~207。滚轧后的齿轮也要进行热处理硬化。西德使用的钢材型号和美国大致相同。

目前滚轧齿坯的制造不外以下几种方式:

车齿坯;精锻齿坯;滚轧齿坯。

随着生产技术的提高,老的车齿坯的工艺已逐渐为精锻、滚轧所代替。例如美国福特汽车公司齿轮生产自动线的第一道工序就是用一台六工位冷锻机精锻齿坯,效率很高,可达2230个/小时。日本的本田株式会社技术研究所研究出一种滚轧齿坯的方法,是在板材的坯料四周加热,然后进行滚轧,用这种方法可以很快地滚轧出外缘有凹槽的齿坯。(详参看日本《特许公报》昭45——15871号)此外,热精密锻造也是国外普遍采用的方法。

②齿坯尺寸的计算方法及形状

用滚轧法生产齿轮与切齿法根本的不同点在于前者是无切削的,后者都是切削加工的。故用滚轧法生产的齿轮重量基本上是不变的。在热滚轧中,即或产生一点氧化皮也是很少的,可忽略不计。因此在计算齿坯体积时,可以按滚轧前后一样来计算。

设:

d_k : 滚轧加工后标准外径(齿顶圆直径)。

K : 凸起系数。

m : 模数。

如果由于滚轧,半径方向凸起量为模数 m 的 k 倍,则滚轧后直径的增加为 mk 的2倍。

故齿坯的直径 D_2 可用下式表示:

$$D_2 = d_k - 2mk \dots\dots\dots (1)$$

设: Z: 齿 数。
 α : 压力角。
 β : 扭转角。
 b: 齿坯厚度。
 c: 齿顶间隙比。
 v: 向侧面突起量。
 S: 齿形部分断面积。

则k为:

$$k = z/2c \cos \beta + 1 - \left\{ (z/2c \cos \beta - 1 - c)^2 z / \pi c \cos \beta \cdot (s + mv/b) \right\}^{1/2} \dots\dots (2)$$

按上式计算出的齿坯, 滚轧出来的齿轮齿顶两端面有填充不满的现象。在齿坯外圆中央开凹槽的办法效果可以好些。

上述计算方法是日本井上和夫教授的计算法。井上例举滚轧斜齿轮的实例说, 在滚轧模数2的斜齿轮时, 如果齿坯厚度为b, 开凹槽两侧的凸缘是一侧为0.1b、一侧为0.2b, 开进的深度应为模数 $m \times 0.4$ 。井上没有说明开凹槽的道理。(详参看《齿轮滚轧法的现状》《日本机械学会志》1961年第7期第1036页) 日本丰田工机株式会社的一项专利详细说明了这个问题。主要是在齿坯两侧有凸缘, 可以防止金属向两侧外流。该公司又研究出一种两侧有凸台的齿坯, 可解决热滚轧齿轮的齿顶角填充不满问题。(详参看日本《特许公报》昭42——646号)

5、精滚轧齿轮的试验研究

用精滚轧法可以代替剃齿机精加工齿轮今天已为国外所公认。这一点也为许多著名公司先后采用精滚轧工艺来生产齿轮的实践所说明。例如美国的福特汽车公司、通用汽车公司、切雷斯诺尔公司, 英国、西德的福特汽车公司、瑞士的玛格公司、恩思特·格罗布公司、西德的卡尔·霍斯公司、日本的三菱重工、园池、津上、不二越、丰田工机等都先后采用了精滚轧齿轮工艺。这说明精滚轧工艺的成熟已达到可以代替剃齿加工的程度。

美国、日本、西德、瑞士等国家对精滚轧条件和减少齿形误差、周节、齿向、啮合误差的关系都做过一些试验研究, 其中以日本的冈本隆和小川昌平、西德的《工厂技术》发表的论文最为详细。对滚轧压力的大小、时间长短、正反滚轧对提高齿轮精度的关系都做了试验