

齿轮负荷能力的研究
(译文集)

齿轮负荷能力的研究

(译文集)

洛阳矿山机器厂标情组编译

机械工业出版社

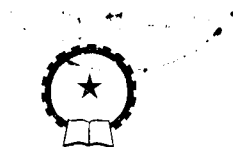
3.246

64

齿 轮 负 荷 能 力 的 研 究

(译 文 集)

洛阳矿山机器厂标情组编译



机 械 工 业 出 版 社

本书是从日本杂志上选择了十五篇关于齿轮负荷能力方面的研究论文,内容包括点蚀、胶合及齿的弯曲疲劳破坏等,最后两篇谈的是圆弧点啮合齿轮的负荷能力和渐开线圆柱齿轮的强度计算。

可供从事齿轮设计和研究的工人、技术人员等参考。

齿 轮 负 荷 能 力 的 研 究

(译 文 集)

洛阳矿山机器厂标情组编

(只限国内发行)

*

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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 10 · 字数 237 千字

1972年4月北京第一版·1972年4月北京第一次印刷

印数 00,001—18,500 · 定价 0.85 元

*

统一书号: 15033·(内)467

毛主席语录

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

毛主席语录

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

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。

编 译 说 明

在党的“九大”精神鼓舞下，在伟大领袖毛主席“**备战、备荒、为人民**”的伟大战略思想指引下，亿万革命人民，遵照“**独立自主、自力更生**”的伟大方针，在全国范围内掀起了社会主义革命和社会主义建设新高潮，机械工业战线上抓革命促生产的捷报频传，形势一派大好。

齿轮传动在机械工业中应用很普遍，目前各厂矿和有关研究单位正努力研究提高齿轮的寿命和承载能力，并取得了显著的成绩。我们遵照毛主席“**洋为中用**”的教导，在日本杂志上选译了十五篇关于齿轮承载能力方面研究的文章，供有关人员参考。

译文中分析了齿轮的点蚀，胶合及弯曲疲劳破坏的物理过程，并分析了影响承载能力的一些因素，譬如：材质，热处理方法，润滑油种类，圆周速度，圆周力等。但必须指出，由于反动腐朽资本主义制度的影响，原文作者难免有为资产阶级学者吹捧和唯心主义观点，又因多是试验资料，文章内容还有脱离实际以及文字烦琐等弊病。我们遵循毛主席“**应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化**”的教导，对原文做了部分删减。希望读者使用时继续批判。

在编译过程中得到了第一机械工业部技术情报所的大力帮助。

由于我们政治思想水平不高，外文和专业知识有限，不当和错误之处必然不少，欢迎读者指正。

目 录

动力斜齿轮的点蚀《铬钼钢齿轮试件的实验》	1
动力斜齿轮的点蚀《材质的影响》	10
动力直齿轮的点蚀《润滑条件与点蚀》	19
关于船用减速齿轮材质用两个圆辊的实验	30
直齿轮的磨损和负荷能力的试验方法《关于FZG直齿轮试验法》	37
齿轮的负荷能力《关于胶合和磨损》	44
润滑油添加剂对蜗轮付性能的影响	52
关于齿轮的弯曲疲劳强度的研究《火焰及高频淬火齿轮的弯曲疲劳强度》	64
关于齿轮的弯曲疲劳强度的研究《渗炭淬火齿轮的弯曲疲劳强度》	75
关于齿轮的弯曲疲劳强度的研究《齿轮弯曲疲劳强度破坏的构成》	85
关于齿轮的弯曲疲劳强度的研究《齿轮的弯曲强度设计》	98
因齿轮偏一端接触而性能低下及鼓形齿的效果	108
关于渐开线齿轮的负荷极限的提高	118
圆弧点接触（诺维柯夫）齿轮的负荷能力	127
渐开线圆柱齿轮的强度计算	137

1103424

动力斜齿轮的点蚀

《铬钼钢齿轮试件的实验》

1 绪 言

本报告叙述了,大模数(法向模数为16)Cr—Mo钢(SCM-1)斜齿轮点蚀状况的研究结果,它是在这样的动力封闭式齿轮试验机上实验的,即在运转中可以随时调整和测出负荷的大小。

2 试验机及试验齿轮

2.1 试验机 试验机的外观如图1,它的平面图如图2所示。试验机的形式是动力封闭式的,最大封闭动力为500马力,主电动机使用的是极数变换式三相感应电动机,试验齿轮的转数为600,1200及1800转/分三级变速。

向齿面加负荷所使用的机构,即由液压装置使它的内齿和外齿各沿斜齿轮的轴向变换其啮合位置而扭转相对的轴,此结构无论是在停止或运转时,在试验轴上都能自由活动,这样就能在运转中调整负荷的大小,也能避免在开始运转时,其油膜还不完全时就带负荷运转。

负荷的测出是在弹性轴上,贴着一个应变电阻,由电压的变化而输出电流,电流通过滑环引到外部的指示装置上,这样就能在运转中随时测出负荷,它的指示精度在2%以内。

用滑动轴承,在止推轴承上使用综合形式使之负荷容量大。传递动力的齿轮比试验用的齿轮其齿宽要宽(200毫米),而且使用的是高硬度(平均硬度 H_v45)研磨齿轮。

2.2 试验齿轮的参数及啮合状态

试验齿轮的参数如表1,它的尺寸图如图3所示,试验齿轮除螺旋方向外其余参数完全相同,本试验,主动轮是右旋,从动轮是左旋,试验齿轮

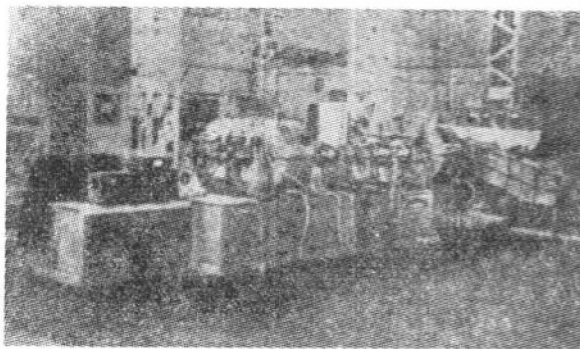


图1 试验台的外观

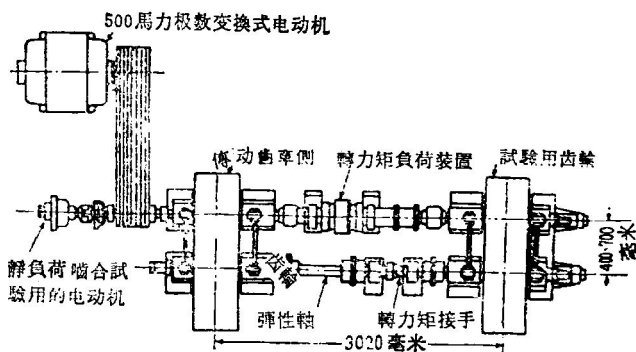


图2 试验机的平面图

表 1 试验齿轮的参数

齿形	渐开线标准齿高	法向压力角	20°	齿顶圆直径	446.111
齿数	25	节圆柱螺旋角	15°	齿宽	45
法向模数	16	节圆直径	414.111		

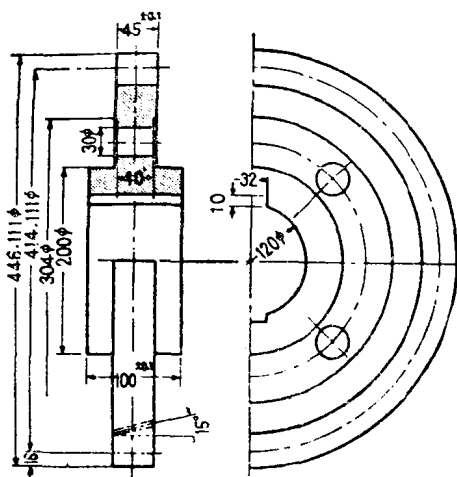


图 3 试验齿轮的尺寸 (单位: 毫米)

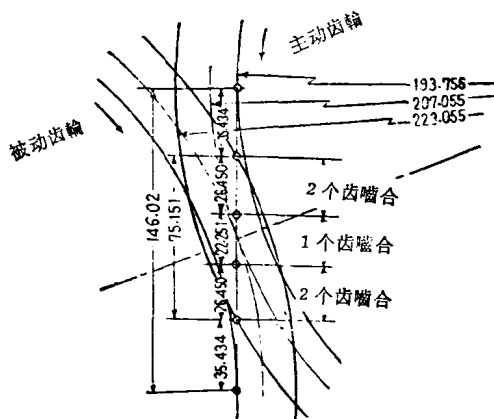


图 4 啮合状态图 (单位: 毫米)

是装在轴上的。

试验齿轮在齿顶不修整的情况下, 其端面啮合状态如图 4 所示, 接触线如图 5 所示, 在这种情况下其端面啮合率为 1.54, 因为是斜齿轮, 所以总的啮合率稍大一点即为 1.77, 但是因为本试验齿轮的齿顶修整了 4.5 毫米, 所以啮合率比上述各值均小, 即为 1.39。由于负荷齿挠曲的影响, 实际啮合率又稍有不同。

试验齿轮在无负荷时两轴间的距离是分度圆重合的标准尺寸安装, 因为使用的是滑动轴承, 在负荷的作用下, 两轴间的距离趋于扩大, 因此在这种情况下试验齿轮则成为正变位啮合, 在本试验里, 齿的法向模数相当大即为 16, 在最大静负荷作用下, 其变位系数为 0.004 左右, 运转中即是有动负荷的作用, 考虑也不会太大, 所以基本上是标准啮合。

2.3 试验齿轮的诸性质 试验齿轮的材质使用的是铬钼钢第 1 种 (SCM-1), 它的化学成分, 热处理过程及机械性能在表 2 内, 它的显微组织如图 6 所示。化学分析试样和拉伸试棒都是从试验后的齿轮上取下的, 拉伸方向采取了半径为 155 毫米的切线位置。

2.4 试验齿轮的精度 共 3 组试验齿轮全部是滚切加工的, 图 7 表示的是齿轮工作齿面的基节误差测定结果, 齿形误差是在有标准基圆盘的齿形检

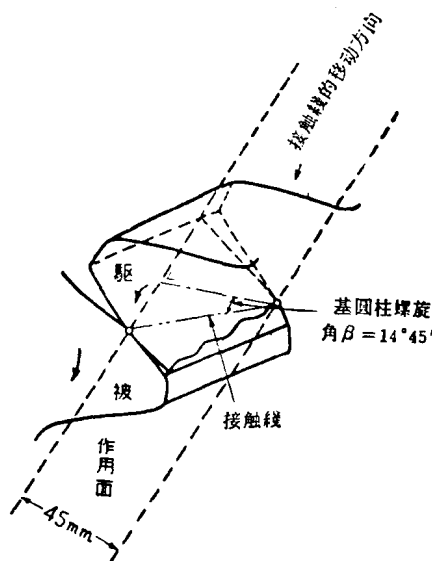


图 5 接触线图

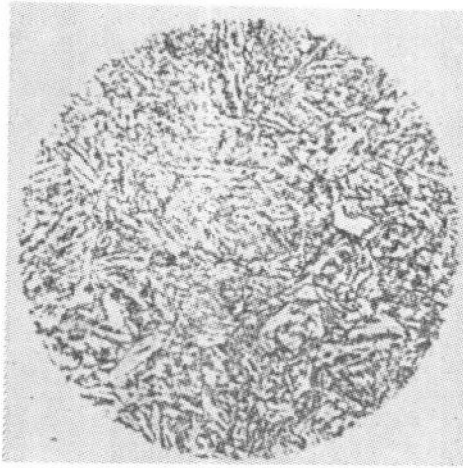


图6 试验齿轮材质的显微组织
(铬镍钢的第1种)

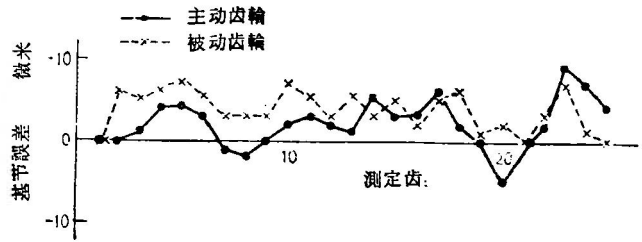


图7 基节误差

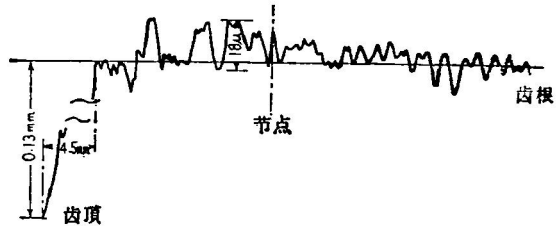


图8 齿形误差

表2 试验材质的化学成分, 热处理方法及机械性能

化 学 成 分 %								热 处 理 过 程	机 械 性 能 公 斤 / 毫 米 ² , %			
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	850°C × 4 小时 油淬 650°C × 8 小时 退火 冷却	σ_s	σ_b	φ	ψ
0.33	0.31	0.55	0.013	0.003	0.1	1.31	0.26		65.3	78.9	18.5	42.8

查仪上测定的, 图8是它的测定结果。在齿顶显然有4.5毫米左右的修整, 齿面粗糙度平均10微米左右, 其他试验齿轮的基节误差及齿形误差与上述的大致一样。

3 实 验 条 件

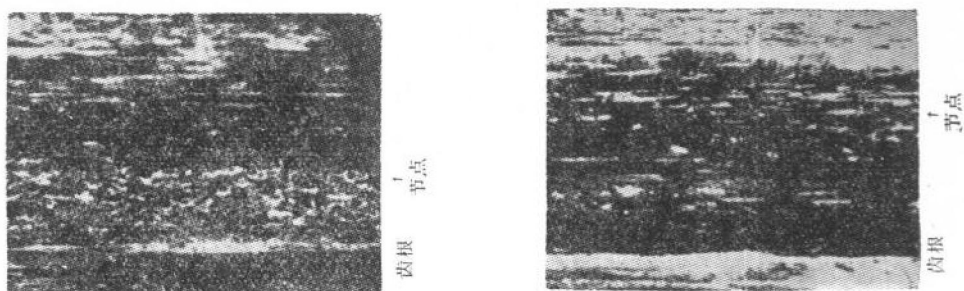
实验条件如表3所示, 即在3种不同的切向负荷下进行的, 表3上的最大法向接触应力是接触线正好通过齿宽中央节点情况下的最大法向静接触应力。润滑油是在啮合齿面的上部喷射的, 本试验的速度较低, 所以使用比透平油更粘的润滑油。

表3 实验条件

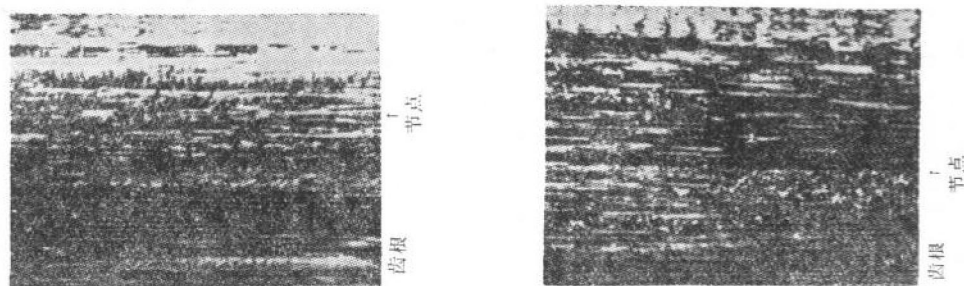
实 验 编 号		1	2	3
切 向 负 荷 公 斤 / 厘 米		521	456	335
在节点处的最大静接触应力 公 斤 / 毫 米 ²	端 面	75	70	60
	法 向	72.5	67.9	58.2
转 数 转 / 分		600		
节 圆 的 圆 周 速 度 米 / 秒		13		
润 滑 油	种 类	E. P. スロコール油(丸善石油厂制)		
	粘 度 公 斤 秒 / 毫 米 ²	2.38~2.50		
	油 量 毫 升 (每 分 钟 1 厘 米 长)	500		

4 试验结果

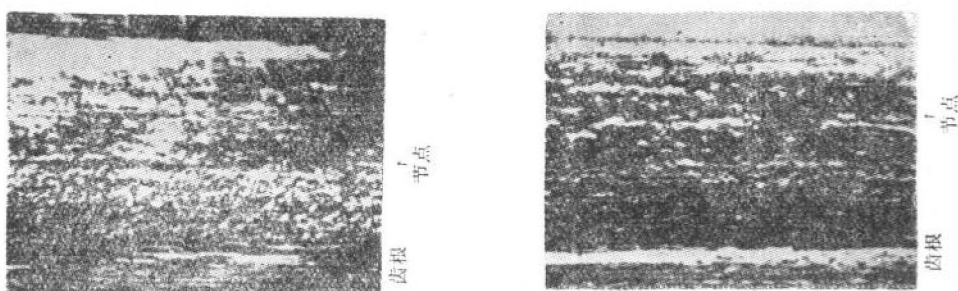
4.1 点蚀的形状及发生状态 图9表示了在各切向负荷作用下的主动轮和被动轮的点蚀发生状态,即随负荷的增大而点蚀的发展也增大,并且深度也深,另外点蚀的发生期也早。但是,无论在那一种负荷的场合下,其点蚀部分占的面积,在本试验的齿轮上,主动轮要比被动轮大。



(a) 切向负荷 521公斤/厘米 循环次数 2×10^6



(b) 切向负荷 456公斤/厘米 循环次数 10^7



(c) 切向负荷 335公斤/厘米 循环次数 1.5×10^7

主动齿轮

被动齿轮

图9 点蚀发生状态图 $\left(\times 2.5 \times \frac{2}{3} \right)$

在点蚀中,齿根高齿面上的蚀坑,在主动轮上则多系贝壳形状,而且它的尖部向着齿根方向。在被动轮上多系圆形或椭圆形并搀杂着其他不规则形状,贝壳状的蚀坑要比主动轮的少。总之两齿轮的点蚀形状有明显的不同。

在主动轮和被动轮的齿顶高齿面上，点蚀所占的面积比在齿根高齿面上所占的面积小。细小的点蚀有沿齿向排成一条褶状的倾向。

图 10 是在切向负荷为 521 公斤/厘米，循环次数为 2×10^6 后，所取的剥离照片中特别大的一个，从齿面的反面看，蚀坑同样是贝壳状，这一点在齿面剥离后就明白了。

4.2 硬度的分布 把上述有切向负荷和经过负荷循环过的齿面，在齿宽的中央沿法向切断，所测定的表面附近的硬度分布状况如图 11 所示。所用硬度计是个微型硬度计（明石制造厂制），其测量负荷为 100 克。负荷运转前的硬度，在没有参加啮合的齿根部测定，根据测定结果断定主动轮和被动轮的硬度都在 H_v253 左右。经本试验可知，大致有 H_v32 的加工硬化，距齿面的不同位置其加工硬化的差异也很清楚，距表面约 0.15 毫米处其硬度最大。

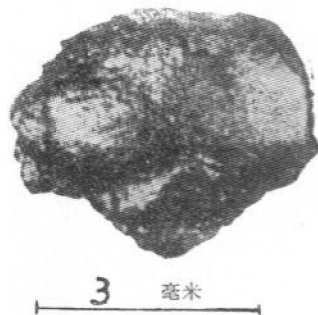


图10 剥落片的形状

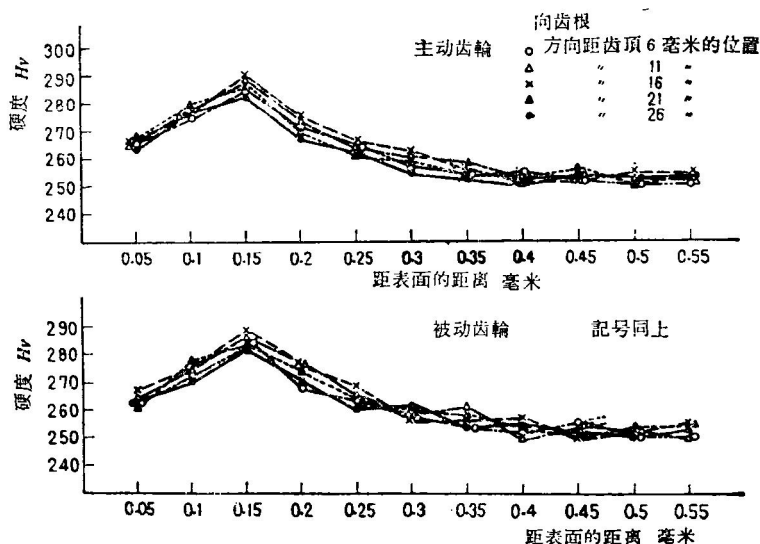
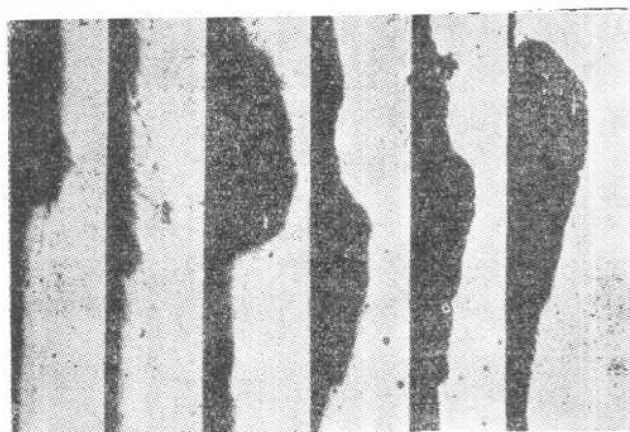
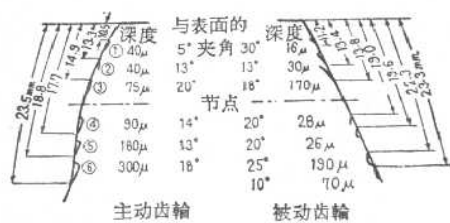


图11 试验后齿面的硬度分布

以往用辊子做试件进行的试验，也是在距表面很近的位置得到最高的硬度，本试验齿轮也得到同样的结果。

4.3 裂缝特性 在上述的齿面上，在一个法向截面及其非常靠近这个截面的同样截面上，所测定的裂缝例子如图 12 所示。这个图上与表面的两个夹角其锐角是裂缝进展的方向，这个图上的照片是主动轮的例子。裂缝不管点蚀的多少而在整个工作面上发生。另外主动轮和被动轮是不同的，即在相同位置齿面上的裂缝发生方向是不同的，在主动轮的齿顶高齿面和齿根高齿面上，裂缝的末端朝着节点，在被动轮上则是背着节点，两个轮上的裂缝发展方向正好相反。这和以前一些试验的规律是一致的。在法向截面上与表面无连系的裂缝，与表面倾斜的在内部进展的很少，大多是与表面平行进行的。

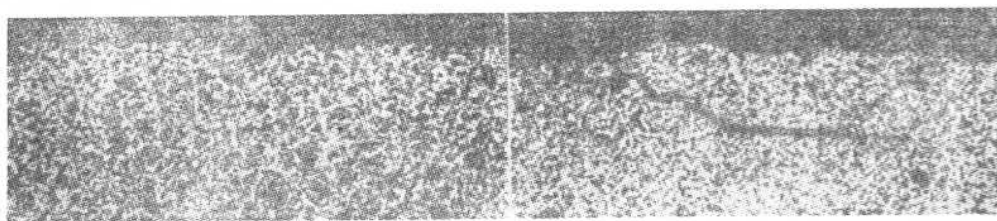
4.4 塑性流 图 13 是上述齿面塑性流的测定结果，主动轮和被动轮的塑性流方向与裂缝发生方向一样，正好相反，而且在两个轮上，其齿顶高齿面和齿根高齿面的也相反，塑性



$$\begin{aligned} & \text{①} \quad \text{②} \quad \text{③} \quad \text{④} \quad \text{⑤} \quad \text{⑥} \\ & \times 200 \times \frac{2}{3} \quad \times 100 \times \frac{2}{3} \quad \times 50 \times \frac{2}{3} \end{aligned}$$

主动齿轮的裂缝

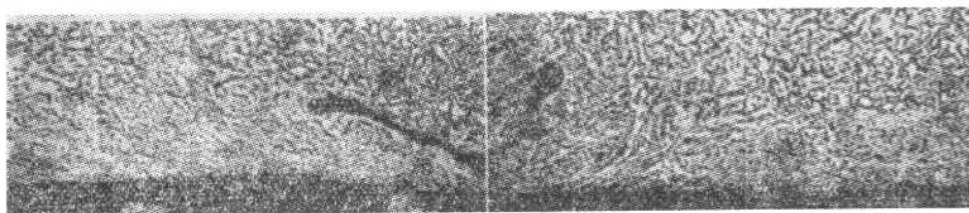
图12 裂缝的测定例子



←齿顶方向 距节点2.5毫米

距节点2毫米 齿根方向→

主动齿轮



←齿顶方向 距节点1.3毫米

距节点2.7毫米 齿根方向→

被动齿轮

图13 塑性流(×320)

流在整个齿面上不是连续的，是局部的发生。流层依齿面的位置而不同，最深在表面下80微米左右。

5 分 析

5.1 点蚀发生的分布状态 影响点蚀产生和进展的主要因素，是齿面压力和滑动率，现以切向负荷 521 公斤/厘米的情况为例，把齿面各位置的点蚀差别定量做个统计，把试验齿轮的齿根高齿面，在半径方向每隔 1 毫米画一个区，每一个区的点蚀面积率（点蚀面积与总面积之比）与循环次数的关系，其主动轮的情况如图 14 所示。本试验，在主动轮和被动轮的齿顶高齿面上，点蚀的面积率比较小，细小的点蚀集成褶状，要正确的求出点蚀面积率比较困难，因此只讨论前一种情况。

点蚀，在距节点向齿根方向 2~4 毫米的齿面上发生的比较多，随循环次数的增加这部分点蚀也增加，循环次数为 2×10^6 时，在距节点向齿根方向的 2~3 毫米的齿面上点蚀发生的最多。依这个位置为中心随着向齿顶及齿根方向的远离而变少，在距节点向齿根方向 6 毫米以下的位置其点蚀急剧的减少。一个齿，在节点附近的啮合区域内其齿面压力不怎么变化（齿面压力最大变化率在 1% 以下），可是在这同一领域内点蚀面积率却有很大的变化，这说明，对点蚀的影响除齿面压力外，还有影响颇大的其他因素。在本试验的齿轮上，在点蚀最易发生的位置即距节点向齿根方向 2~3 毫米的齿面上，其滑动率在负值的 18~30% 的范围内。

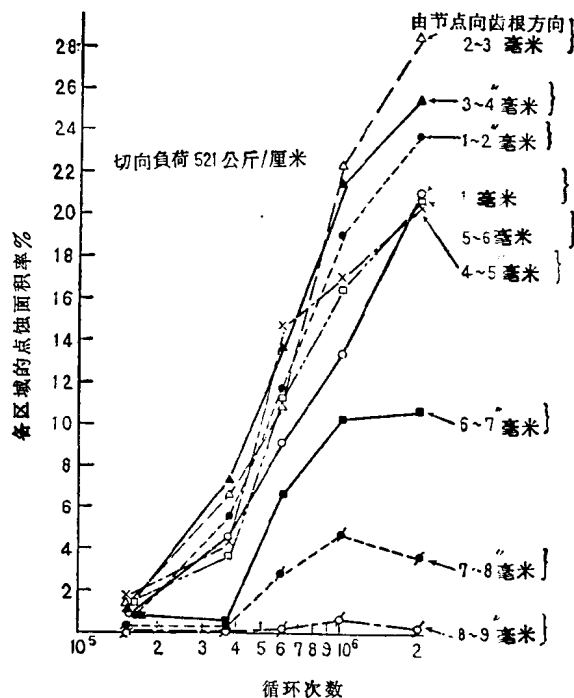


图14 各区域的点蚀面积率

5.2 裂缝特性与在齿面上发生位置的关系 以前叙述过裂缝的深度与在齿面上发生位置的关系，把测定点增加其所表示的图像如图 15 所示。这个情况的测定范围是由节点开始向齿顶及齿根方向各 9 毫米，10 微米以下的裂缝深度，因易与齿面粗糙度混淆，所以取消了。像前述那样，在点蚀较大的主动轮的齿根高齿面上，除深的裂纹外没有别的易混淆的东西。在主动轮和被动轮的齿顶高齿面上，点蚀面积虽然少，但裂缝的发生多数是很清楚的。在图上白圈圈表示尚未剥落状态的裂缝，黑圈圈表示已剥落了，一般前者比后者少，前者对两者总和的比例：在主动轮的齿根高齿面上约为 15% 左右，在被动轮的齿顶高齿面和齿根高齿面上大致都一样，约为 40% 左右，它都比主动轮的多，也就是说主动轮和被动轮的比值是有差别的。一般裂缝要保持原来形状是困难的，很容易进展到剥落。在主动轮的齿根高齿面上，裂缝较深，这点从这部分的点蚀较大也可断定出。

在齿根高的齿面上，产生点蚀多的理由，向来都是讲因为在这一部分的裂缝内，有高压

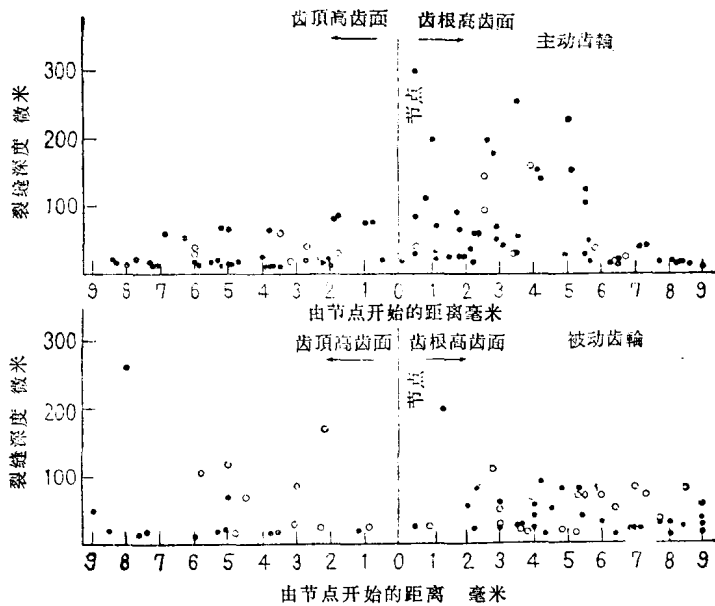


图15 裂缝的发生位置与深度的关系

的润滑油，使其易发生剥落而增加剥落点。本试验的情况是，在两个齿轮的齿面上的点蚀有明显的不同，即主动轮上的点蚀比被动轮上的大，说明裂缝容易发展到剥落。本试验的主动轮和被动轮除螺旋角方向不同外，其他参数都一样，所不同的是，相对曲率半径在主动轮的齿根部分是随着啮合的进行而变大，被动轮则变小，在齿面间的润滑油对前者来说易产生高压化。另外被动轮比主动轮在工作齿面上的润滑油容易扩散，这样提高了齿面的冷却效果。但这种影响程度的大小，是进一步研究的重要课题。

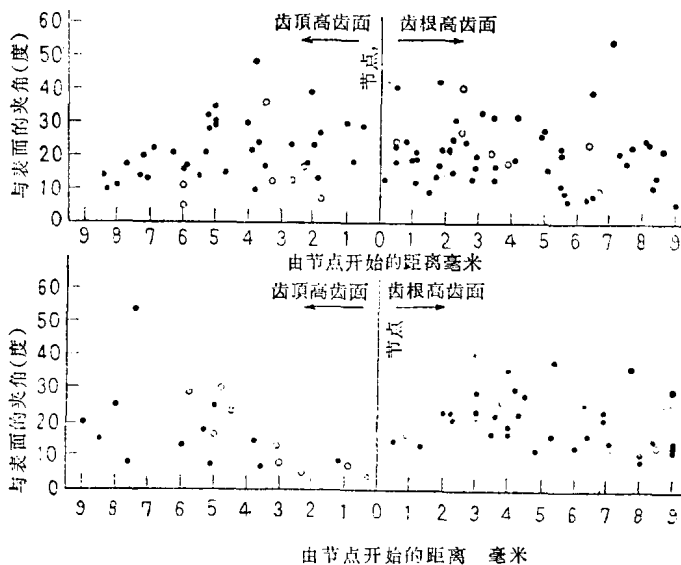


图16 裂缝的发生位置与表面夹角的关系

图 16 表示了, 裂缝在齿面上发生的位置与表面夹角的关系 (二角中的锐角), 这两者被认为是无关的, 但裂缝大致在 40 度以内进行的这一点是很明了的。

5.3 塑性流与加工硬化 在负荷运转后的船用齿轮上, 过去有关于塑性流及裂缝方向等的报告, 根据它所谈的裂缝方向变化的分界位置, 在主动轮和被动轮上都是较节点偏齿顶的一方。本实验的结果, 裂缝在两齿轮上的方向变化大致是以节点为分界, 塑性流也是在靠近节点很近的地方测定的, 如图 13 那样, 在齿顶高齿面和齿根高齿面上塑性流的方向是相反的, 并不像过去的报告那样, 这个考虑到可能是本试验的速度较低的原因。

加工硬化像前述那样, 距表面约 0.15 毫米的位置上其硬度最大, 考虑到这部分是因为有激烈的剪断作用所致, 假定滑动率为零的情况下在节点上加负荷, 求得最大剪应力的发生位置则是表面内 0.39 毫米, 实际上因为在表面上有滑动作用, 所以这个位置靠表面更近些, 关于这个要进行正确的研究, 在试验时必须测定摩擦系数。

以上叙述了用封闭式齿轮试验机, 对大模数斜齿轮点蚀的实验结果, 在试验运转中其负荷可以随时调整并测出值的大小。

6 结 束 语

关于对同参数大模数 Cr—Mo 钢斜齿轮所进行的负荷运转, 主要讨论了切向负荷为 521 公斤/厘米, 循环次数为 2×10^6 后的齿面状况, 所得结果概括如下。

(1) 蚀坑的形状, 在主动轮和被动轮上是有区别的, 即在齿根高齿面上发生的点蚀, 在主动轮上是贝壳状, 在被动轮上是圆形并搀杂着椭圆形, 它与主动轮比较, 不规则的形状相当多。在齿顶高齿面上的点蚀, 在两个齿轮上都很细, 而且沿齿向连成褶状。

(2) 点蚀发生最多的位置是在主动轮的齿面上, 而距离节点向齿根方向约 2~3 毫米, 这个地方的滑动率为负的 18~30%。

(3) 裂缝在整个齿面上都发生, 点蚀发生少的地方裂缝发生的也相当多。裂缝在齿面上的发生位置与它的深度及与表面夹角之间, 被认为没有什么特别关系。

裂缝方向, 主动轮与被动轮的方向相反, 而且在一个齿面上都是齿顶高齿面与齿根高齿面的裂缝方向相反, 并且大致以节点为分界。塑性流的方向和裂纹的方向变化是相同的。

裂缝的深度, 比假定摩擦系数为零时的最大剪应力位置还要浅。

(4) 没有剥落状态的裂缝与裂缝总和 (包括已剥落的) 的比值, 主动轮约为 15%, 被动轮约为 40%。

(5) 加工硬化在主动轮和被动轮上, 都是距表面约 0.15 毫米处其值最大。

动力斜齿轮的点蚀

《材质的影响》

1 绪 言

笔者, 以前用动力封闭式齿轮试验机, 对 Cr—Mo 钢 (SCM-1) 大型斜齿轮进行过负荷运转实验, 曾详细讨论过同参数斜齿轮的点蚀。本报告对炭素钢 (S 45 C) 齿轮用同样的试验, 然后对两种材质的点蚀进行比较, 从而明确它们在特性上的差异。

因本报告主要是对上述两种齿轮材质的比较, 所以对前一篇报告, 必要的部分可能再提出。

2 试验机及试验齿轮

2.1 试验机 关于试验机前一篇报告已详细叙述过, 表 1 只列出了它的主要规格。

表 1 试验机的规格

形 式 驱 动 电 动 机 最大 负 荷 力 矩 公 斤 米		动 力 封 闭 式 50 马 力 极 数 变 换 式 三 相 感 应 电 动 机 700 (可在运转过程中变换负荷大小)
最 高 转 数	大 齿 轮	1800
转 / 分	轴 齿 轮	3000
最大封闭动力 马力		500
轴齿轮和大齿轮的中心距范围		400~700 毫米
试验齿轮的最大宽度		400 毫米

2.2 试验齿轮 试验齿轮的各参数如表 2 所示, 试验齿轮除螺旋角方向不同外其余参数完全相同。主动轮是右旋, 被动轮是左旋, 即和前一篇报告试验齿轮的参数是相同的, 关于齿形的修整和啮合状态图前一篇报告已详细叙述过, 这里不再重复。

表 2 试验齿轮的参数

齿 形	渐 开 线 齿 形 (齿高系数 $f = 1$)	齿 形	渐 开 线 齿 形 (齿高系数 $f = 1$)
齿 数	25	节圆直径 毫米	414.111
法向模数	16	顶圆直径 毫米	446.111
法向压力角	20°	齿宽 毫米	45
节圆柱螺旋角	15°		

试验齿轮的主动轮和被动轮其材质是相同的, 它的化学成分及热处理过程如表 3 所示, 机械性能如表 4 所示, 为便于比较把 SCM-1 试验齿轮的对应数值也列在下边。图 1 是 S 45 C 材质的显微组织照片。