

关于橡胶以及轮胎的接触压力分布的测定和图像处理的研究

酒井秀男著 管建民译 刘登祥校

摘要 轮胎与路面的接触状态和轮胎性能的关系十分密切,是评价轮胎性能的一个非常重要的特性。为此,在本研究中,我们首先开发了新的测量装置。此装置的测定原理是经均匀研磨或磨损的橡胶面与大型棱镜的全反射面相接触,将接触部分全反射光的吸收率作为点集合进行测定,从这些吸收率计算出接触压力分布。利用此装置,测定利用平板加压橡胶圆盘时的接触压力,结果发现其压力分布并不均匀,随橡胶圆盘厚度和直径的变化而差异很大,并且其变化可用弹性效应、液体效应和边缘效应进行说明。再则通过测定轮胎的接触压力分布以及进行图像处理可以获得实际接触面积、接触形状和压力分布以及与其相关的非常清晰的图像。据此很容易判断轮胎出现的偏磨,进而还能显示出负载轮胎受到横向力作用时,接触面产生的变形和胎面花纹块内的压力变化等。

由于轮胎与路面的接触状态和轮胎的偏磨、耐久性、操纵性、均匀性等有着密切的关系,因此它是评价轮胎性能的一个非常重要的特性。但是以往所采用的测定方法,都是使小型压力检测器移动,在玻璃工作台上铺上带有规则凹凸表面的白色橡胶片(或者塑料片),将轮胎压在其上面通过测定反射率求出压力,这是一种主要根据压敏胶片测定压力分布的装置。

因此,我们首先开发了新型接触压力分布测定装置。这个装置的原理是,将均匀研磨或磨损的橡胶或轮胎与大型棱镜的全反射面接触,由全反射光的吸收率计算出接触压力。用测头在整个接触面上进行细致扫描,得到大约41万个单元的图像,通过对图像进行处理,可以方便地获得测定结果。利用此测定装置能得到橡胶圆盘的压力分布,以及轮胎的实际接触面积和压力分布的清晰图像。下面就对此装置进行介绍。

1 接触压力分布测定和图像处理装置

1.1 装置的说明

通过该项研究而开发的接触压力分布测定装置,其工作台如图1所示。轮胎压着的是

硬质玻璃板,在玻璃板下用透明粘合剂粘着直角棱镜,在这些设施的下面还有由光源、反射镜1、反射镜2、透镜、针孔板、光电元件等组成的光学系统。由光源发出的光,通过反射镜1把光照射到玻璃板与胎面的接触部分A点上,由此点反射的光通过反射镜2和针孔板照射于光电元件上。假定A点到透镜的距离和透镜到针孔板的距离相同,因为A点在针孔上成像,而针孔的直径是0.3mm,所以可以测定A点在直径0.3mm范围内的反射光量。该光学系统装置在与玻璃板平行的可沿相互垂直的两轴移动的X和Y台上。X和Y台如图2所示。由于借助脉冲电机及其控制装置进行移动,所以A点可以沿整个玻璃板面进行扫描,扫描范围X方向为180mm, Y方向为135mm,测定间隔为0.25mm,总体能得到约41万个单元图像。数据的记录由数据处理装置(YHP3852A)进行,图像处理由计算机(YHP9000-382)完成,用高分辨率显示器(YHP A1497)进行显示。

1.2 光的吸收率与接触压力的关系

光的吸收率和接触压力的关系对本装置来说是非常重要的。采用具有如下节所示表面的圆盘(DSK),即与胎面橡胶具有相同硬

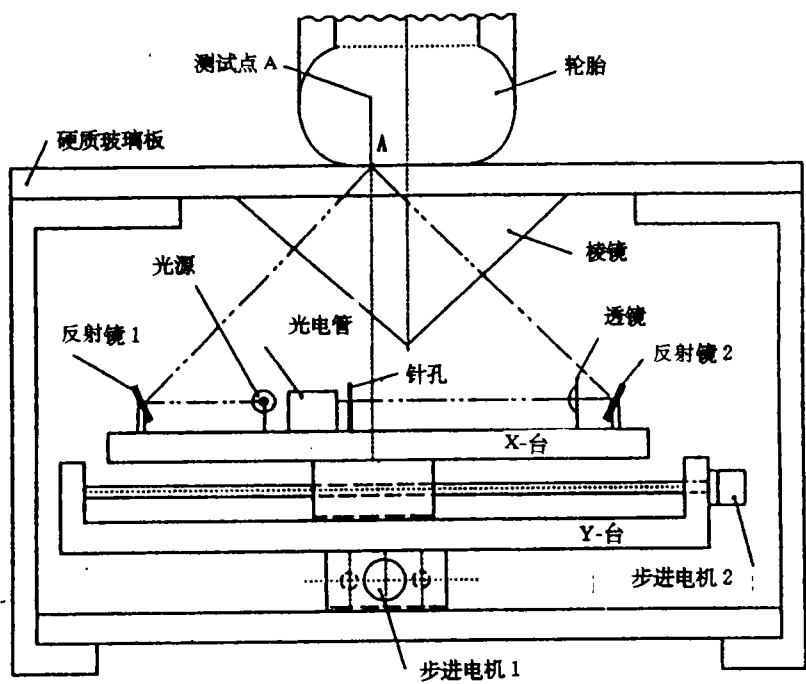


图 1 接触压力分布测量台图示

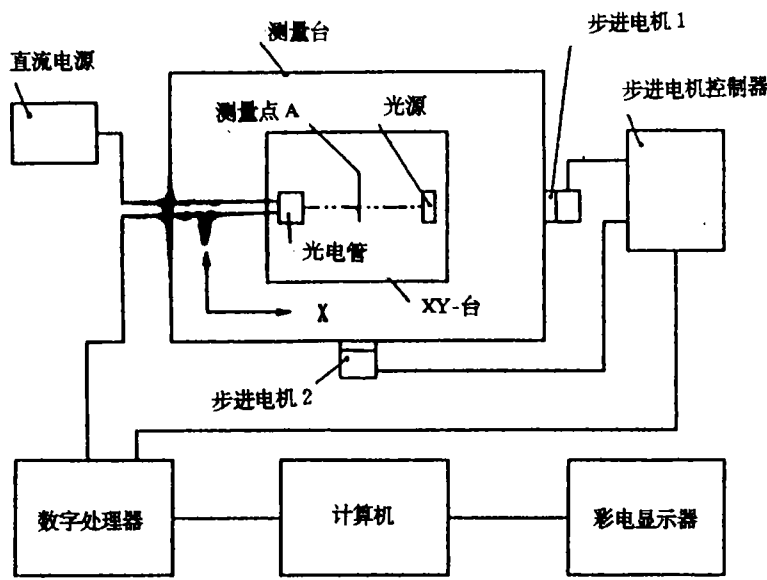


图 2 接触压力分布测量系统图示

度的橡胶圆盘用碳化硅砂纸(No. 400)进行均匀研磨,然后将其与经过预行驶、胎面被均匀磨耗的轮胎(SM)(NR)(ASF)接触,测定在其接触压力变化时光的吸收率。其结果是指稳定状态时(在加载后经过一段充分的

时间)光的吸收率 ρ (如图 3 所示)大致与压力 P 的 0.53 次方成正比。但是对于轮胎来说,其接触压力是指在屈挠变形的一定状态下,改变内压时的平均接触压力,所以接触压力可用式(1)来表示:

$$P = a\rho^{1.88} \tag{1}$$

进而根据下式对整个接触面的接触压力进行积分,假定积分得到的值与负荷 F_z 一致,由此可求出接触压力的换算常数:

$$\int Pds = F_z \tag{2}$$

利用这些公式就能从吸收率求出压力。但是橡胶对于全反射面上的光吸收现象,在橡胶与工作台面的距离接近光的波长的几分之一时发生,而物理接触压力是在接近产生范德华力的距离时产生。此距离非常之小,因此光的吸收在橡胶接触玻璃台面之前就开始了,并且由于光学系统的污点,使之在接触压力接近于零时,易于产生噪声。同时利用式(1)有时会得出异常大的压力结果。考虑到以上诸多因素,我们可按下面方法利用光的吸收系数求出压力。

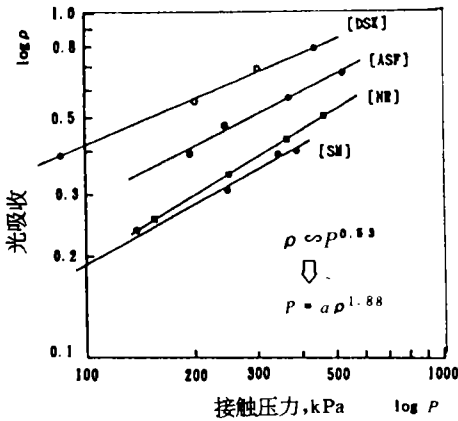


图3 接触压力与光吸收的关系

首先,测定接触面积,根据其与负荷的关系求出接触压力 P_0 ,测定此时光的吸收率,求出平均吸收率 ρ_0 ,利用这些数据由式(3)计算出压力 P 。如图4所示,式(3)是式(1)表示的曲线在 (P_0, ρ_0) 点的切线式:

$$P = a(1.88\rho/\rho_0 - 0.88)P_0 \tag{3}$$

式中比例常数 a 是假定将压力对整个接触面进行积分所得到的值与负荷值一致的前提下,根据式(2)求出的。此计算式的误差如图4所示,吸收率小时误差大。而吸收率(即接

触压力)较小的部分面积只占整个面积的极小部分,所以其影响也是很小的。

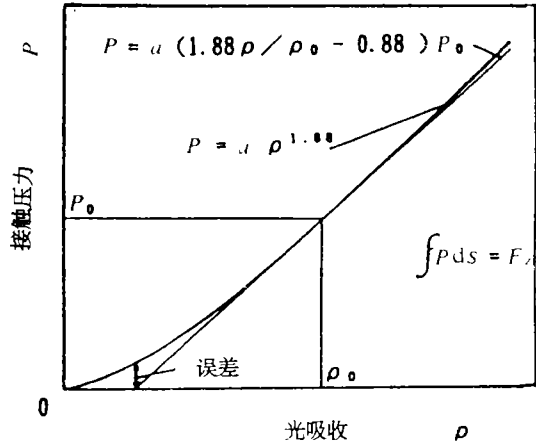


图4 由光吸收计算接触压力的方程式

1.3 橡胶圆盘及实验用轮胎的表面粗糙度

测定面的粗糙度是非常重要的。因此如下所述,橡胶圆盘和测定用的平板要用砂纸研磨表面,测试用的轮胎要选用全新的轮胎和经过试行驶磨耗的轮胎,以保证其表面均匀一致。

[SM]:具有粗糙表面特性的光面轮胎。在粘贴有安全介质的平带式轮胎试验机上,加负荷1kN,使侧偏角在 $\pm 1^\circ$ 、外倾角在 $\pm 2^\circ$ 范围内变化,并行驶约200km,得到表面粗糙度均匀的磨耗轮胎。

[NR]:具有轻微粗糙表面特性的一般轮胎。利用与上述相同的试验机,加负荷1kN,使侧偏角在 $\pm 0.5^\circ$ 、外倾角在 $\pm 2^\circ$ 的范围内变化,进行正转、反转各行驶约100km,得到表面粗糙度均匀的磨耗轮胎。

[IR]:具有粗糙的表面特性,但产生少量偏磨的轮胎。按照与上述相同的行驶条件,但是仅正转行驶约100km,获得表面粗糙度均匀,但产生少量(0.3mm)锯齿状磨损的轮胎。

[ASF]:具有光滑表面特性的驱动轮胎。将全天候轮胎装在前置发动机进行前轮驱动的轿车的右前轮,实际行驶约1000km的轮

胎。

〔ASR〕:与上述的不同之点,是把轮胎装在右后轮位置上,实际行驶 1000km 的轮胎。

〔NEW〕:没有使用过的一般新轮胎。

〔NWS〕:利用下述测定板对一般新轮胎测定的情况。

〔SHT〕:具有光滑表面特性的测定用胶板,其硬度与胎面胶硬度相同,厚度为 1mm,表面用金刚砂砂纸(No. 400)在水中进行过研磨加工。

〔DSK〕:具有光滑表面特性的橡胶圆盘(直径 100mm),采用与上述测定用胶板相同的橡胶制造,具有相同的表面特性。

2 橡胶圆盘的接触压力分布

2.1 橡胶圆盘的接触压力分布测定结果

用平板(其表面经过精密加工)夹住橡胶圆盘,利用本装置测定其在玻璃面上加压时的压力分布并进行图像处理,然后显示在彩色显示器上。图 5 是其图像中黑白照片的一个例子。为将接触压力在显示屏的一角用 9 种色标表示,需要把最高压力值 9 等分,最高压力的 1/9 及其以下的压力部分是深蓝色,1/9—2/9 是蓝色,2/9—3/9 是浅蓝色,顺次按色标的顺序进行着色,8/9 及其以上的压力部分用红色表示。但是由于印刷的原因,只有黑白图像,压力用黑白的浓淡来表示,越是

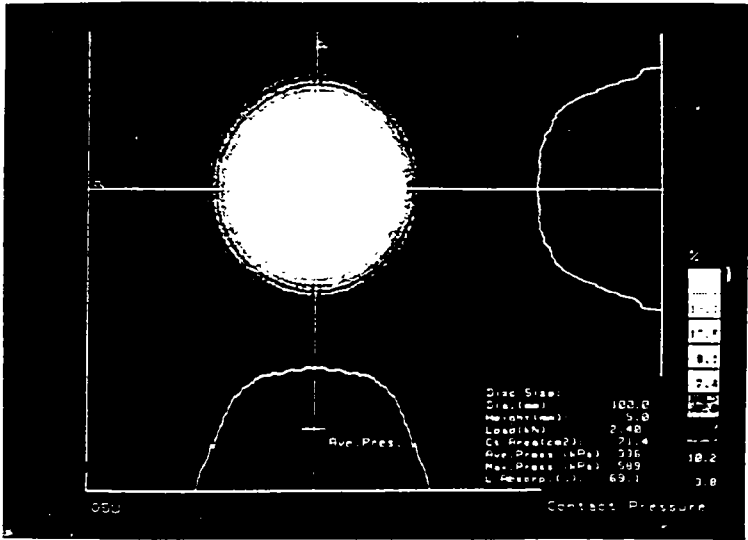


图 5 橡胶圆盘〔DSK〕的接触压力分布的显示(直径 100mm,高 5mm)

接近白的部分接触压力越高,然而黑白照片的浓淡层次少,所表达的信息量也少。

画面的空白处显示上下方向及左右方向中心线上(平均宽 2mm 的范围)的压力分布,在右上角的空白处显示圆盘的尺寸、负荷、接触面积、平均接触压力、最大接触压力、光吸收系数的平均值。此外,色标中的数字表示其压力范围所占面积的百分率。

图 6 所示的是所测厚度不同的圆盘的壓力分布。A 是直径为 100mm、厚度为 5mm

(硬度与胎面胶大致一样,为 JIS 65)的薄的橡胶圆盘。其用平板加压时的压力分布呈中心部分较高的抛物线形分布。

在厚度为 20mm 的橡胶圆盘 B 上用与圆盘 A 相同的负荷加压时,其压力分布表现为中心部分和周边部分压力较高。

最后是厚度与直径相似的橡胶圆盘 C 的情况。在厚度为 80mm 的橡胶圆盘上用与 A 相同的负荷加压时,其压力分布是圆盘的中心部分附近较平坦,而周边部分较高。

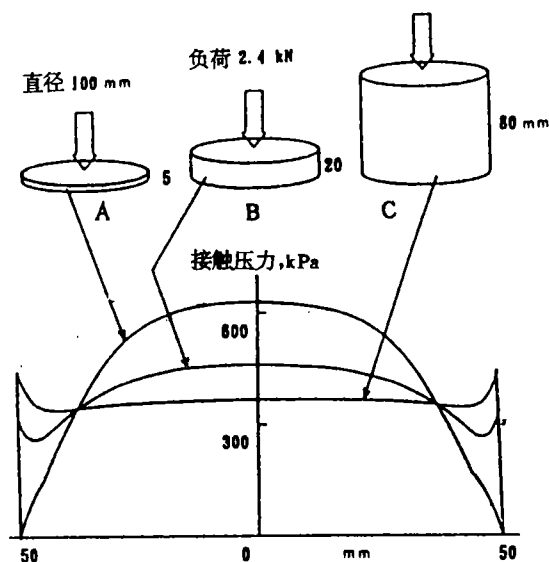


图6 橡胶圆盘的不同厚度所引起的接触压力的变化

2.2 橡胶圆盘的压力分布随厚度变化的原因

橡胶圆盘的压力分布随厚度变化的原因可以归纳为:一般橡胶板的接触压力是弹性效应、液体效应以及边缘效应综合作用的结果,如下式所示:

$$\text{接触压力} = \text{弹性效应} + \text{液体效应} + \text{边缘效应}$$

弹性效应由弹性压缩率与弹性系数的乘积决定,所以弹性效应在圆盘的各个位置的数值都应是相同的。与此相反,液体效应则如图7所示,由于压缩引起圆盘径向膨胀,而作用于橡胶圆盘两面的摩擦力阻止膨胀,引起圆盘中央部分的压力增高。这是积分后中心部处在抛物线分布曲线较高处的原因,并且橡胶圆盘越薄时中心部压力越大。而厚的橡胶圆盘受橡胶面摩擦力的影响小,不存在液体效应,故中心部的曲线比较平坦。边缘效应可以认为是由于橡胶圆盘的侧面向外侧膨胀,该膨胀部分的压力在边缘引起集中,这就是压力分布曲线在边缘部分压力较高的原因。介于此两者之间的情况,即弹性效应、液

$$\text{压力} = \frac{\text{弹性效应} + \text{液体效应} + \text{边缘效应}}{\text{压缩系数} \times \text{弹性系数}}$$

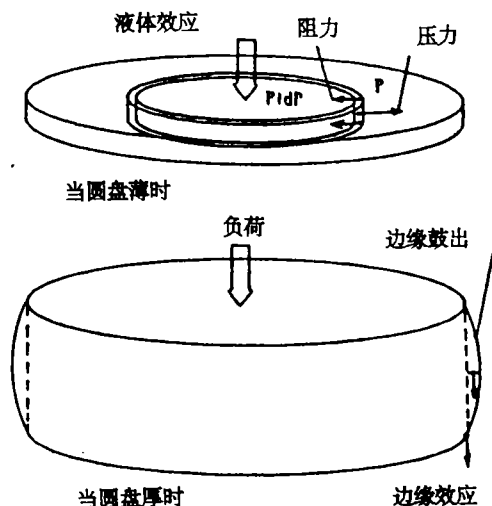


图7 解释弹性效应、液体效应和边缘效应对接触压力的影响

体效应和边缘效应综合作用的结果,则导致压力分布曲线表现为中心与边缘部分压力较高。

图8中的A线表示上述薄圆盘的压力分布,D线表示采用与A线相同的橡胶圆盘,用表面粗糙的平板进行加压〔即在圆盘与平板之间夹有一层较粗的研磨用碳化硅砂纸(No. 400)〕而测得的压力分布曲线。E线也是采用相同的橡胶圆盘,只是为了减小圆盘与平板之间的摩擦力,在其两接触面间涂上了肥皂水而测得的压力分布曲线。这样D线和E线都向比较平坦的方向变化。其原因可能是由于前者(D线)平板表面出现凹凸间隙,导致橡胶体积发生变化,液体效应随之减弱;后者(E线)由于减少了摩擦力,径向膨胀的阻力变小,液体效应也随之减弱。

3 轮胎的接触压力分布

3.1 轮胎的接触压力分布和图像处理结果

测定轮胎接触面的压力分布,并进行图像处理,然后在彩色显示器上显示。其黑白照片用图9—13及图15—18表示。这些图的长

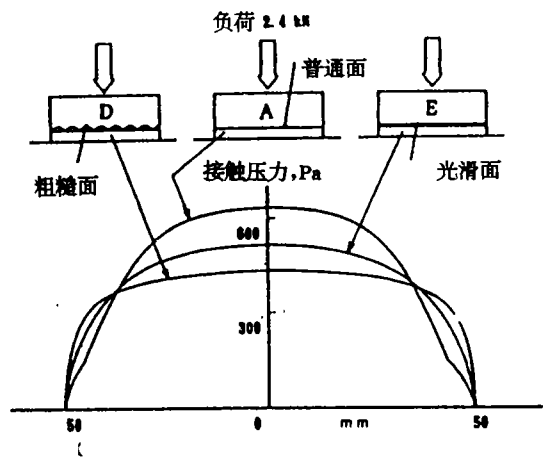


图 8 加压平板与橡胶圆盘的接触面不同而引起接触压力分布的变化

边方向表示轮胎的周向(右侧是接触部位的前部,左侧是接触部位的后部),图的短边方向表示轮胎的横向。接触压力与橡胶圆盘的情况相同,图的右下角从蓝到红(黑白图像是由黑到白的浓淡变化)的 9 种色标变化,彩色的画面信息量多,并且容易辨别。

在空白处用实线表示的压力分布曲线,是图中央的轮胎接触面用纵横两实线剖开的断面(宽 2mm)的压力分布曲线,由接触压力

横向的平均值(接触部分横向并列点的平均值)所作的周向压力分布和由接触压力周向的平均值(接触部分的圆周各点的平均值)所作的横向压力分布用点划线表示,并且在作为刻度的中心轴上用短线表示接触压力的总平均值。右下角的黑白深浅色标中的数字表示其压力范围、部分所占面积的百分率。

另外在空白处,还列出了轮胎规格、负荷、内压、横向力等试验条件,以及接触长度、宽度、实际接触面积、平均接触压力、最大接触压力等测得的主要数据。

3.2 光面轮胎的测定例子——无横向力和有横向力作用的情况

图 9 是用不带胎面花纹的光面轮胎 [SM]测试的接触压力图像。在图中能看出三四个圆点,这是毛刺的痕迹。即使是肉眼不能直接分辨的缺陷,也能显示出接触压力的变化。由此可知,胎面胶厚度的细微变化,也能对接触压力产生微妙的影响。该轮胎的平均接触压力为 265kPa,约为其内部空气压力的 1.3 倍,而且胎面是无花纹沟的光面,所以胎肩部位的接触压力较高。图 10 是相同轮胎的回转轴受横向力作用时的接触压力分布图

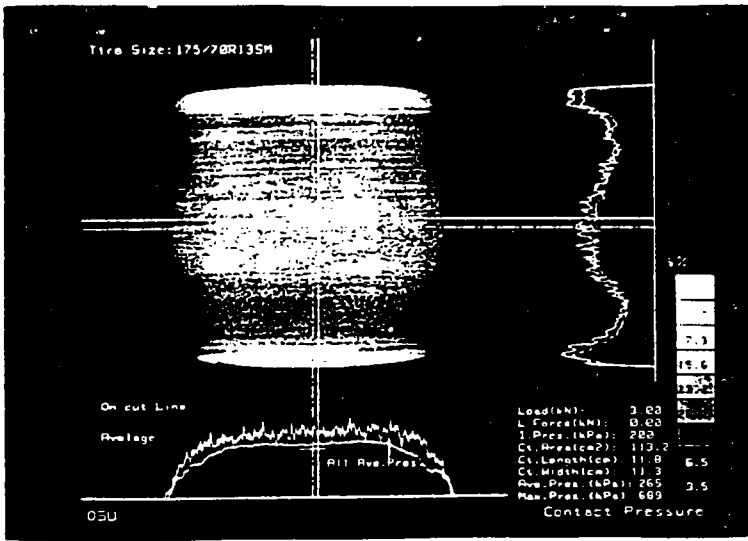


图 9 光滑胎面轮胎(SM)的接触压力分布图像

像。由图 10 可知,当施加横向力时,在横向力方向的胎肩部位接触长度加长,接触形状发生了变化,而且由于横向力的作用,使总接触面积增加。但是由周向的平均值所作的横向压力分布和用横向实线所剖开的断面上的压力分布,即使有横向力的作用也不产生变化。另外由于光吸收率的平均值几乎不受横向力

的影响,因此可忽略切线力对接触压力测定的影响。

3.3 一般轮胎的测定——有横向力与无横向力作用的情况

图 11 是一般轮胎〔NR〕的接触压力分布图像。这种轮胎的实际接触面积是接触长度乘以接触宽度所得矩形面积(表观接触面积)

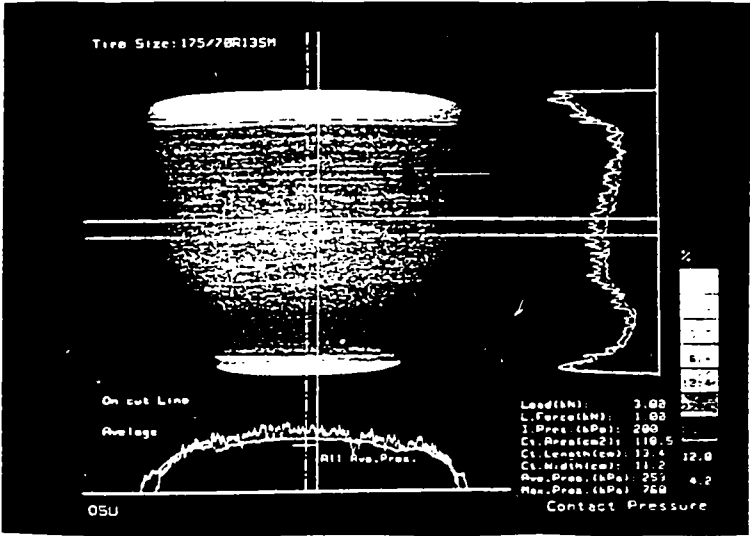


图 10 当横向力作用于光滑胎面〔SM〕时的接触压力分布图像

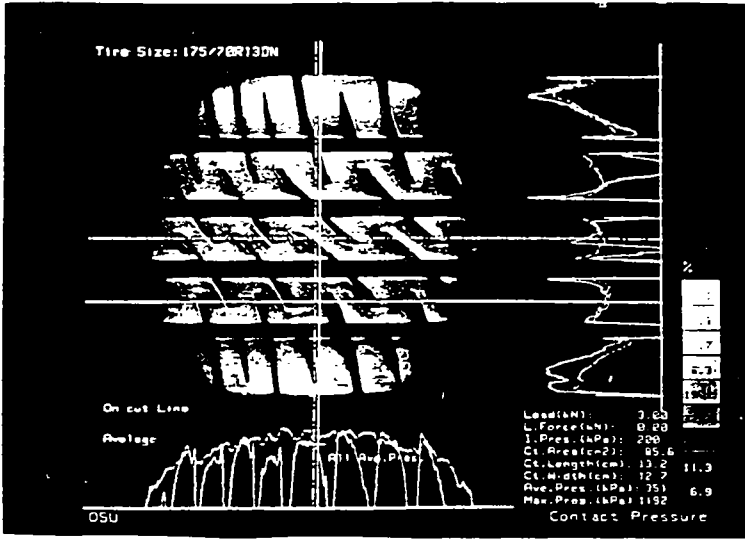


图 11 普通轮胎〔NR〕的接触压力分布图像

的一半,平均接触压力约是内部空气压力的 2 倍。由横向平均值所作的周向压力分布大致呈抛物线形状,而且橡胶花纹块的边缘接触压力较大。据认为边缘部分的压力之所以变大,除了边缘效应之外,还有花纹沟部分弯曲的缘故。

图 12 是对同一轮胎的回转轴施加横向力作用的情况。横向力加上后,胎肩花纹条的

接触长度加大,接触形状发生变化,而且在花纹块内部由于受横向力的影响,在横向力方向的接触压力增加。由此可知,边缘部分的作用加强了。

3.4 转弯对磨损的影响

图 11 和 13 均是在平带式轮胎试验机上以较小的侧偏角进行预行驶时的图像。图 11 是分别正反转相同距离的情况〔NR〕,图 13

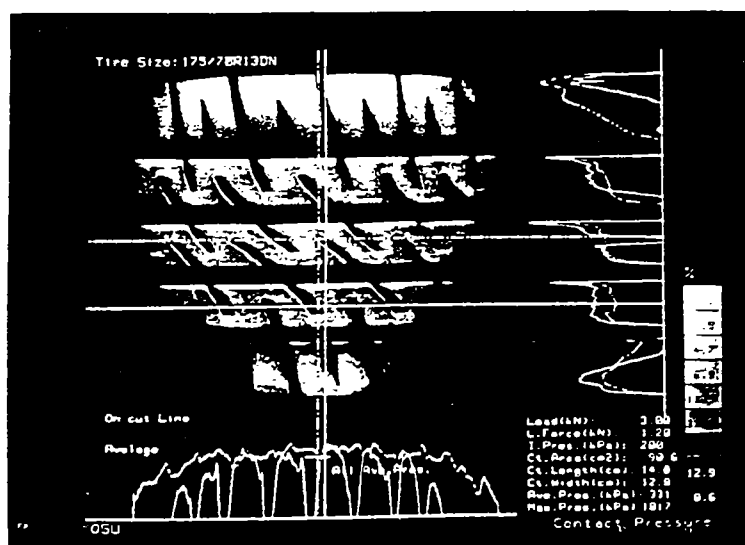


图 12 当横向力作用于普通轮胎〔NR〕时的接触压力分布图像

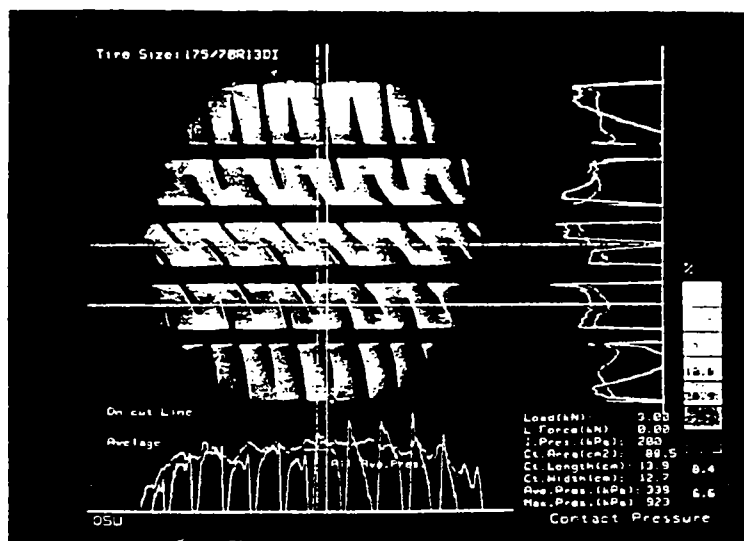


图 13 带有一点锯齿磨损的普通轮胎接触压力分布图像

只是单方向行驶的情况(IR),后者产生了极小的(约0.3mm)锯齿磨损。为此,若将两图接触面的前部和后部的花纹块进行比较,可看出前部花纹块的前端压力变小,后端压力变大。其原因是行驶前的新胎受负荷作用时,其接触面内的花纹块的压力分布如图14中的虚线所示,相对于轮胎中心轴呈前后对称的抛物线形状。行驶过的轮胎,转弯时发生侧滑的部位只限制在接触面的后部,后部花纹块压力高的前端已很快被磨耗,当前端已磨耗的花纹块移到接触面的前部时,前端的接触压力变得更小,后端的压力随之增大。

3.5 实际行驶时驱动轮与从动轮的差别

图15和16是将全天候轮胎装在用前置发动机进行前轮驱动的轿车的右侧,经实际

行驶1000km后的轮胎接触压力的分布图像。图15是前轮驱动轮胎[ASF],图16是从动轮胎[ASR]。由于前轮的驱动力、制动力及转向力的作用,加速了花纹块前端和后端的磨耗,在胎肩的花纹条内,横向细长的花纹块的接触面变细。对后轮轮胎来说,由于其只受转向力和制动力的影响,因此只加速花纹块前端(图右侧)的磨耗,从图上可看出这部分的压力变小。另外由于全天候轮胎比其它轮胎的实际接触面积小,接触压力高,而且由于压力高的部分面积比率大,因此色标白的部分较多。为实际行驶而完成的预行驶,其目的是使轮胎表面的粗糙度均匀一致。可以认为这一点完成得足够充分,同时还能够直接观察实际行驶后轮胎接触面的状态。

3.6 新轮胎和使用测定用橡胶板时

图17是新轮胎[NEW]的接触压力分布图像。本装置不仅能测定新轮胎,也能对胎面胶硬度有差异的轮胎进行测定。前者可表现出毛刺痕迹的影响以及模具表面粗糙度的影响;后者由于橡胶硬度存在部分差异,测定结果可能会产生较大的误差。图18是在新轮胎与玻璃测试台面之间铺上测定用橡胶板

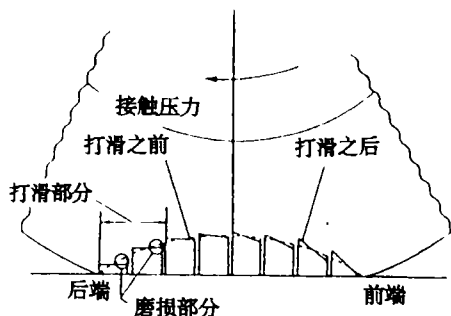


图14 转弯磨损和花纹块的接触压力分布的改变

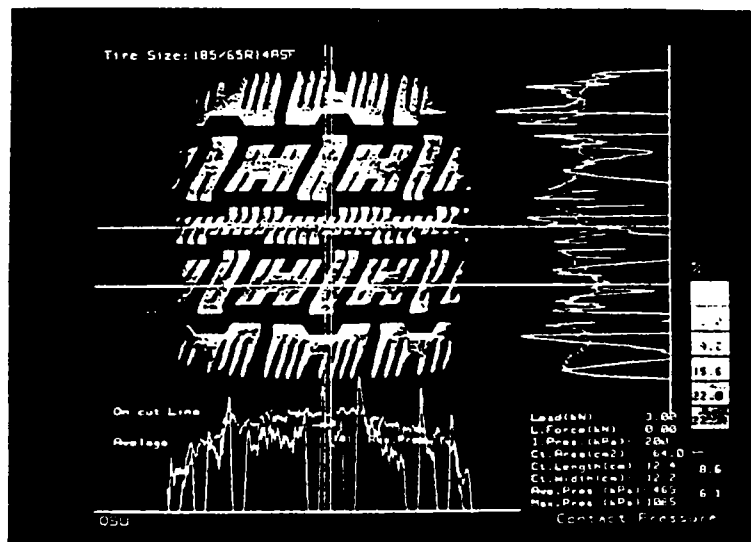


图15 全天候前轮驱动轮胎[ASF]的接触压力分布图像

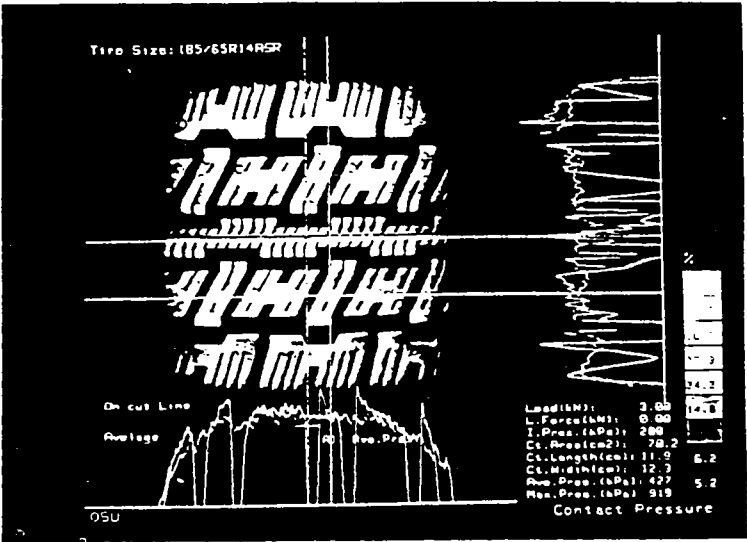


图 16 全天候后轮从动轮胎(ASR)的接触压力分布图像

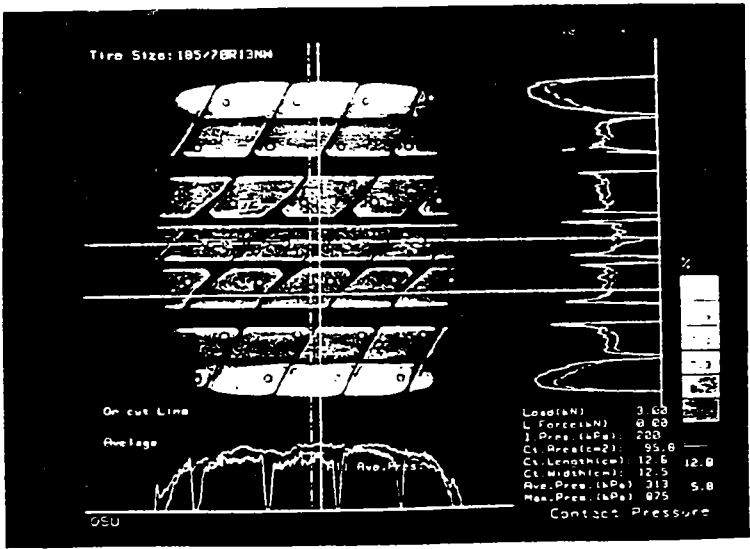


图 17 带毛刺的新轮胎(NEW)的接触压力分布图像

[SHT]时测定的接触压力分布图像。由于使用了测定用的橡胶板,使压力变化被平均化,导致误差减小,接触面积增大。为此,要求橡胶板尽可能有良好的弹性,且在硬度相同的情况下,橡胶板越薄越好。另外,当胎面胶硬度和表面粗糙度有差异时,也有必要使用此

橡胶板。

4 结语

我们研制了轮胎接触压力分布的测定和图像处理装置。利用此装置首先测定了用平板加压于橡胶圆盘时的接触压力分布。其结

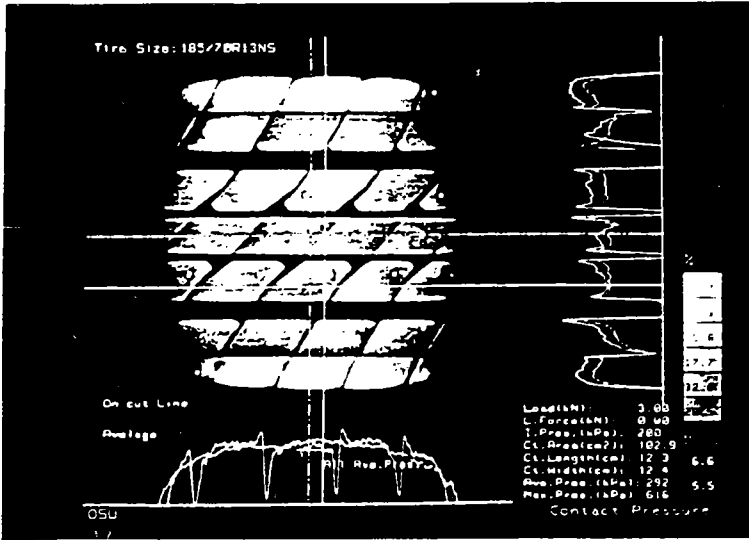


图 18 利用测定用橡胶板测定的带有毛刺的新轮胎(NWS)的接触压力分布图像

果是橡胶圆盘的压力分布并不一样,从而明确了压力分布与圆盘的厚度、直径、表面粗糙度、表面摩擦系数有关,而且了解到其变化可以用弹性效应、液体效应及边缘效应进行解释。本研究的最初目的是通过对轮胎接触压力的图像处理获得接触压力和真实接触面积以及与其相关的非常清晰的图像,但是由于

胎面花纹块厚度的极小变化也会表现为接触压力的变化,因此比较容易由此发现偏磨现象。在胎面花纹块内,通过提高边缘部分压力,同时施加横向力作用,可使花纹块单侧的边缘部分压力得以提高。

译自“日本ゴム協会志”,[5],
359—368(1994)

印第安纳州橡胶沥青的应用

美国《橡胶和塑料新闻》1995 年 6 月 5 日报道:

在印第安纳州,橡胶材料不久将会更多地满足公路建设需要——用于铺设公路。

5 月 12 日,印第安纳州商业部分别给印第安纳州所属 4 个县的高速公路部门拨款 25000 美元,该部门将用这笔钱铺设 20 英里长的废胶粉改性沥青高速公路,这种废胶粉是用废轮胎粉碎后制成的。

该州第 5 个县必须考虑是否参加这一行动。

这笔款项是州政府靠从每条在印第安纳州售出的新轮胎收 25 美分的税中抽取一定

比例而筹集的。这笔费用于 1993 年纳入管理。

州政府商业部回收利用部门负责人说,政府拨出这笔钱是为了鼓励各县试用橡胶改性沥青。在印第安纳州波利斯 5 月 7—9 日举行的印第安纳州回收利用联盟年会上,她论述了这笔款项的意义。她说,佛罗里达州高速公路部门认为开始改性沥青的价格比一般沥青贵 25%—40%,然而,一旦操作人员掌握工艺并对加工过程熟悉后,差价会降到 10%。

该部门估计新路的使用寿命比常规铺设的高速公路约长 25%。

(黄家明译 涂学忠校)