

文章编号:1671-1637(2012)04-0017-08

基于表面构造的水泥混凝土道面抗滑模型

赵方冉, 巩金海, 常媛媛

(中国民航大学 机场学院, 天津 300300)

摘要:利用 T10 型测试车测试了某机场水泥混凝土跑道不同区段摩擦因数, 利用照相法和特征描述法对道面不同尺度的构造进行了特征分析, 基于测试结果, 探讨了道面构造对其摩擦因数的影响规律, 提出了基于构造特征参数的道面抗滑能力表达模型。根据对道面宏观、粗观和细观构造特征参数的相关分析, 构建了基于构造特征的道面抗滑摩擦因数模型。研究表明:构造特征相近的道面, 其构造深度为 0.6~0.7 cm 时, 摩擦因数为 0.40~0.42;构造特征差异较大时, 构造深度分别为 0.70、0.78 cm 的区域, 摩擦因数分别为 0.43、0.75, 构造特征对摩擦因数的影响不可忽视;基于道面构造特征参数化分析, 采用道面抗滑摩擦因数模型可定量分析旧道面抗滑性能。

关键词:水泥混凝土道面;表面构造;抗滑模型;构造参数;摩擦因数

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

Anti-slide model of cement concrete pavement based on surface texture

ZHAO Fang-ran, GONG Jin-hai, CHANG Yuan-yuan

(School of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The frictional coefficients of several parts for cement concrete runway in an airport were tested by an anti-slide-test truck of T10 type. Different textural features were analyzed by photo analysis method and characteristic description method. The influence law of pavement superficial texture on frictional coefficient was discussed based on test results. A model of pavement anti-slide capacity was proposed based on texture characteristic parameters. According to the analysis of macro, rough and micro texture characteristic parameters, a pavement anti-slide frictional coefficient model was proposed based on texture characteristic. Analysis result shows that frictional coefficients vary from 0.40 to 0.42 when constructional depths are 0.6-0.7 cm on the similar texture characteristic roads. For the significant different texture characteristics, frictional coefficients are 0.43, 0.75 when constructional depths are 0.70, 0.78 cm respectively, so the influence of texture characteristic on pavement frictional coefficient can not be neglected. Based on the analysis of pavement texture characteristic parameters, the anti-slide model can be used to analyze the anti-slide capacity of old runway pavement quantitatively. 12 figs, 10 refs.

Key words: cement concrete pavement; surface texture; anti-slide model; texture parameter; frictional coefficient

Author resume: ZHAO Fang-ran(1960-), male, professor, +86-22-24092475, frzhao@cauc.edu.cn.

0 引言

机场道面的主要功能之一就是保证飞机在较高

速度情况下安全起降与可靠制动,而道面的表层构造又是决定其制动过程中抗滑性能的最关键因素。若道面的抗滑性摩擦因数不能满足要求,飞机着陆

收稿日期:2012-03-11

基金项目:中国民用航空局科技项目(MY0421811)

作者简介:赵方冉(1960-),男,山东东平人,中国民航大学教授,从事机场工程研究。

时在高速滑行过程中就很难有效制动,甚至产生横向侧滑而偏出跑道。何杰等研究表明,对于以速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行的车辆,当道面摩擦因数为 0.4 时,其侧向位移仅为 3.85 m;而当车速增大到 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,其侧向位移可达到 7.5 m;当道面摩擦因数下降为 0.28 时,即使运行速度仅为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,其侧向位移也会达到 4.5 m,此外,在雨天行车时的侧向位移还会显著增大^[1],因此,为满足飞机的安全起降,在役机场道面必须保持足够的摩擦因数。

对于机场广泛应用的水泥混凝土道面,往往在其整体结构承载能力尚处于可靠状态的情况下,其表层的抗滑摩擦因数就已经不能满足使用要求。为此,工程实际中需要不断评价其抗滑能力,以便制定合理的维护措施,确保其抗滑性能满足使用要求。

为准确评价道面的抗滑性能,若仅靠摩擦因数检测法来直接评价,不仅其检测速度慢而难以满足大面积的道面评价,而且其检测值往往会受到环境条件的影响而出现较大偏差。为此,人们很早就开始重视利用其表面构造来间接表达其抗滑性的评价方法,并且在工程中通常采用构造深度来间接评价道面的抗滑能力。但是,许多工程结果表明,利用构造深度间接表达道面的抗滑性往往偏差很大。为此,利用表面构造深度来评价道面抗滑性的方法受到广泛质疑,因此,改进利用道面构造参数表达其抗滑能力的分析模型,成为道面抗滑性科学评价技术进步的必然趋势。

目前,人们针对影响刚性道面抗滑性能与构造参数之间的关系研究相对较少,已有研究多集中于沥青道面的抗滑性影响因素,且主要集中于以下几个方面:道面摩擦因数测试和评价方法^[2];改善道面抗滑性能的措施及新的施工工艺技术探讨^[3-4];道面抗滑性能的机理分析及试验研究^[4-5]。

关于道面表层构造对其抗滑性的影响研究多侧重于定性分析。黄宝涛等通过对沥青混凝土道面抗滑性与表面构造之间的关系研究表明:沥青混合料级配不同,其路面细观凸凹的分维数值也不同,细观凸凹分维数值与路面抗滑性能具有单调递增的一致相关性^[6]。

关于水泥混凝土道面不同构造对抗滑制动效果影响的研究表明,混凝土道面的细观构造仅对运载工具在较低速度下的制动有效^[6]。为此,通常在道面施工中采取拉毛或压痕等粗观构造处理方式来提高轮胎在较快速度下的制动能力。但是,即使道面

具有足够的粗观和细观构造,也只能在 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下的中低速情况下具有较可靠的抗滑性能,对于覆盖有积水层的道面,或运行速度过高时,仅靠一般的粗观和细观构造难以产生有效制动。显然,对于雨天的道面或高速运行下的制动,尚须借助道面的其他构造抗滑措施才能获得较为可靠的制动效果。

综上所述,为满足飞机在降雨期间或在高速运行情况下的有效制动,混凝土道面需要尽可能充分利用其细观、粗观与宏观等不同尺度的构造抗滑能力。为充分利用这些构造抗滑能力,就需要建立这些构造参数与抗滑性能之间的关联表达式,因此,需要对道面各种构造进行特征参数化,并构建全面表达道面各种构造变化与摩擦因数之间的关系函数,才能实现利用道面构造特征科学评价其摩擦性能的目标。

1 机场道面构造参数与摩擦因数测试结果分析

某机场水泥混凝土跑道始建于 1997 年,跑道刚竣工时测得的道面平均摩擦因数为 0.62,平均构造深度为 0.6~1.0 mm。经过多年使用,道面构造已经产生了显著变化,特别是着陆区域的道面在经多次除胶处理后,其表层构造产生的变化更为明显。2010 年,本文对部分区域利用 T10 型测试车进行了摩擦因数测试,并用人工铺砂法针对道面不同构造变化状态进行了典型区域的构造深度测试,以及采用现场特征描述与照相对比法的构造特征分析。

1.1 跑道不同磨损程度各部位的摩擦因数测试

所检测跑道轴线近似东西走向,其横向按照南北向各分为 5 个条带,南侧包括 $S_1 \sim S_5$,北侧包括 $N_1 \sim N_5$,条带划分情况见图 1。

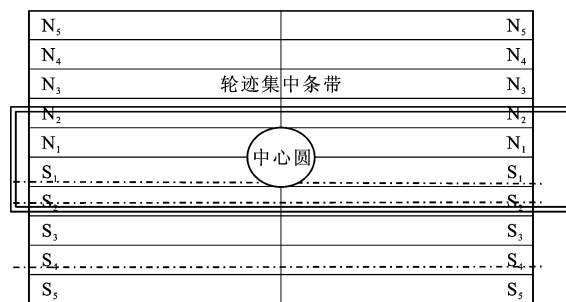


图 1 跑道道面板标记

Fig. 1 Plate label coding of runway

考虑飞机着陆与滑行的主起落架轮胎的轨迹主要分布在距离跑道中心线两侧 2.0~6.5 m(即 $S_2 \sim N_2$ 板块)范围内,根据对着陆区粘胶痕迹来看,距离

跑道中心线 3.4 m 处最为严重,距离跑道中心线 5.5 m 处开始减轻。为此,分别选择距离跑道中心线 3.4、5.5 m 处,以及距离跑道中心线 14.5 m 处磨损很轻微的区域,沿平行跑道中心线方向进行了摩擦因数测试。跑道 480~2 980 m 段的摩擦因数变化趋势见图 2~4。

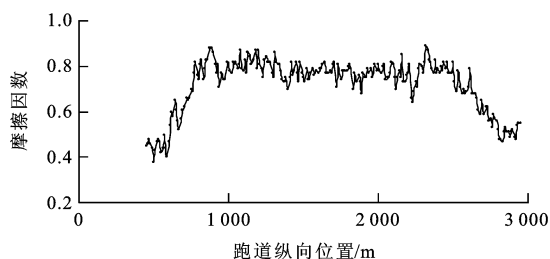


图2 距离跑道中线 3.4 m 处摩擦因数
Fig. 2 Frictional coefficients along 3.4 m line
from runway central line

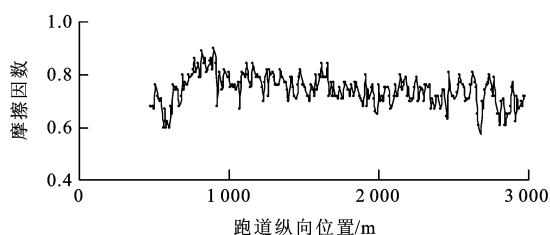


图3 距离跑道中线 5.5 m 处摩擦因数
Fig. 3 Frictional coefficients along 5.5 m line
from runway central line

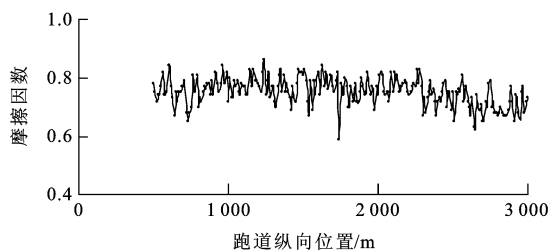


图4 距离跑道中线 14.5 m 处摩擦因数
Fig. 4 Frictional coefficients along 14.5 m line
from runway central line

1.2 不同磨损程度道面构造与摩擦因数对比

比较图 2~4 的测试结果,距跑道中心线 3.4 m 处测试线上的道面摩擦因数差异最大(在 0.4~0.8 之间变化),特别是在接近两端 500~1 000 m 区间内的摩擦因数降低十分明显;中间区段的摩擦因数虽然比两端较大,但也表现出比其他测试线较小的摩擦因数。距跑道中心线 5.5 m 处测试线上的道面摩擦因数也有较明显的差异(在 0.6~0.8 之间变化)。距跑道中心线 14.5 m 处测试线上的道面摩擦因数差异较小(在 0.65~0.80 之间变化),该测试

线上的平均摩擦因数明显高于前二者,而且在两端着陆区与中间段滑行区无明显差异。

为探讨不同构造特征对抗滑性的影响规律,寻求道面不同区段摩擦因数差异的原因,本文分别以构造深度、构造外观照相对比等形式进行了比较分析。如 3.4 m 线上 600~620 m 区段的道面构造均表现出严重损伤,将该区段的道面摩擦因数与构造深度测试结果进行对比,可发现其变化趋势的特征(图 5),尽管该区段的构造深度变化与摩擦因数变化具有大致相近的变化趋势,但存在着显著差异性的干扰。

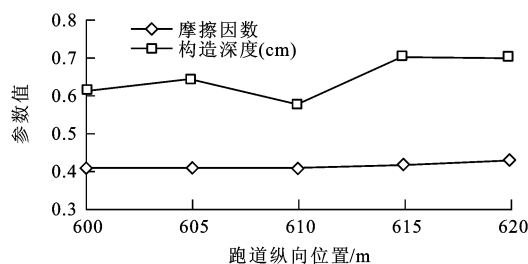


图5 3.4 m 线摩擦因数与构造深度
Fig. 5 Frictional coefficients and texture depths
along 3.4 m testing line

对比 14.5 m 线上的 600~620 m 区段的道面摩擦因数与构造深度测试结果,尽管该区段道面的构造损伤均较轻微,但其摩擦因数的差异却十分显著(图 6)。

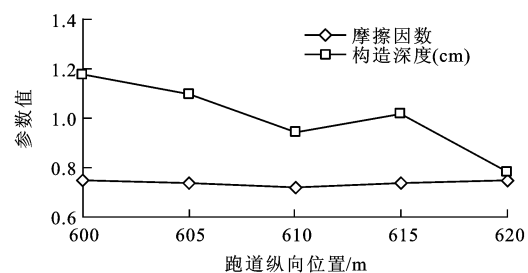


图6 14.5 m 线摩擦因数与构造深度
Fig. 6 Frictional coefficients and texture depths
along 14.5 m testing line

从图 5、6 的测试结果来看,尽管在 620 m 处分别位于 4.3、14.5 m 线上的道面构造深度值差异很小(分别为 0.70 和 0.78),但其摩擦因数差异却很显著(分别为 0.43 和 0.75)。可见,无论是已经产生严重损伤的道面(如图 5),还是产生损伤轻微的道面(如图 6),仅凭构造深度值不能说明其对摩擦因数影响的规律。显然,除了构造深度之外,必然还有其他构造参数在影响着道面的抗滑性能,需要将这些构造参数纳入评价体系,才能建立利用道面构

造表达其摩擦因数的完整模型。

2 基于道面构造参数的摩擦因数影响模型构建与分析

2.1 影响摩擦因数的道面构造参数模型构建

为反映道面其他构造参数对摩擦因数的影响,可利用道面构造外貌照相进行特征分析,通过对构造特征参数化来表达其影响规律。典型的宏观构造棱角和粗观凹凸构造呈现损伤严重的情况见图 7,呈现构造损伤轻微的情况见图 8。

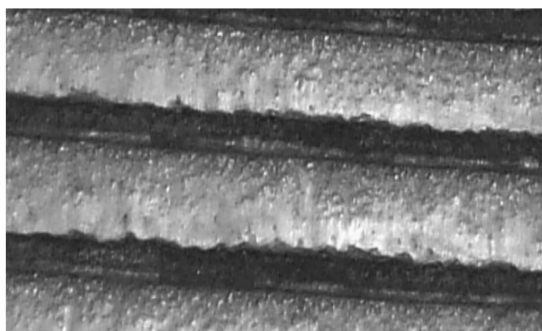


图 7 3.4 m 线上 620 m 处的道面表层构造外观特征

Fig. 7 Superficial texture feature of pavement along 3.4 m testing line at 620 m

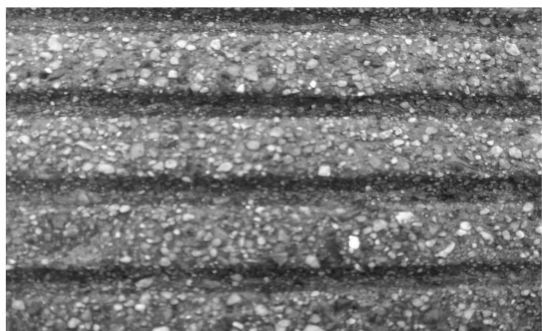


图 8 14.5 m 线上 620 m 处的道面表层构造外观特征

Fig. 8 Superficial texture feature of pavement along 14.5 m testing line at 620 m

图 7、8 的道面构造外貌照片分别采集于跑道 620 m 区段,由于其横向位置的差别,使得不同测试线上的损伤程度差异较大。从其测试结果来看,尽管两处的构造深度检测值非常接近,但其构造特征表现出很大的差别,由此可以推断,其摩擦因数的显著差异与其构造特征的差别具有必然的关系。显然,要揭示道面抗滑性变化的规律,就必须考虑道面的构造特征,而且还需要将这些构造特征值参数化,才能将其建立与摩擦因数间的直接关系。

考虑道面构造所产生的抗滑摩擦因数是道面与轮胎胶面相互作用的结果,而且摩擦因数还应该是道

面构造与轮胎表面间相互作用共同效应的,因此,要研究道面构造特征对抗滑性的影响,还应考虑这些构造与轮胎间的相互作用特征与效果,才能构建道面表层构造参数与摩擦因数之间的完整函数关系。

芬兰学者 Holmberg 根据相对尺寸大小($10^{-9} \sim 10^{12}$ m)将摩擦学分为 9 类,即宇宙摩擦学、地球摩擦学、区域摩擦学、厂矿摩擦学、机器摩擦学、构件摩擦学、粗糙峰摩擦学、接触摩擦学、分子摩擦学,不同尺度下的研究对象不同,其研究方法和理论也有所不同^[7]。从形成条件来看,轮胎与道面间的摩擦可能包含上述后 4 种摩擦状态,即轮胎与道面间的摩擦可能涉及到构件摩擦学、粗糙峰摩擦学、接触摩擦学、分子摩擦学等方面的问题。

从构件摩擦学的角度来看,水泥混凝土道面通常具有较大尺度的刻槽,而橡胶轮胎在压力作用下不仅可以产生被动的凹凸变形,而且其本身也具有尺度较大的沟槽。当二者相互接触时,通常会产生宏观上的相互啮合效应,这种啮合效应的形成与恢复都会对高速行驶中的轮胎产生摩阻作用,因此,道面具有基于构件摩擦学原理的宏观构造(刻槽等)抗滑摩阻效应,衡量这种摩阻效应的参数则可称之为宏观构造摩擦因数,并且该摩擦因数是道面宏观构造参数的函数。在此,可将道面宏观构造摩擦因数定义为函数 $\Phi(\delta_i)$ 。

道面表层的拉毛、压痕与粗骨料凸出等粗观构造通常形成一定尺度的刚性粗糙峰,当在外力作用下的橡胶轮胎与这些粗糙峰接触时,很容易产生变形或剪切应力,这些变形过程中必然会产生一定的摩阻力,其摩阻力的大小与其粗观构造的刚性粗糙峰特征也有密切的关系,因此,可认为这些粗观构造对胶面的摩阻力是道面粗观构造参数的函数。在此,可将道面粗观构造摩擦因数定义为函数 $\mu(\eta_j)$ 。

道面表层通常具有粗骨料纹理或细骨料凸出的细观构造,这些细观构造在某些情况下也具有阻止轮胎胶面相对道面滑移的摩阻效应,而且其摩阻效应的大小应主要取决于其细观构造的各种特征参数。为此,可将道面细观构造摩擦因数定义为函数 $\Psi(\theta_k)$ 。鉴于混凝土道面的物理化学性质通常差异不大,各种混凝土道面基于物理化学机理的摩擦因数也不会有显著差异,因此,在建立表达不同道面构造抗滑性差异的数学模型时,可以忽略道面对轮胎胶面的分子摩擦效应。

综合上述分析,基于构造特征参数的道面摩擦因数 f 可以综合表达为

$$f = \Phi(\delta_i) + \mu(\eta_j) + \Psi(\theta_k) \quad (1)$$

式中: $\Phi(\delta_i)$ 为道面宏观构造特征参数 δ_i (深度、宽度、形状等)对抗滑性的影响函数; $\mu(\eta_j)$ 为道面宏观构造特征参数 η_j (粗糙峰凸体的形状与分布状态等)对抗滑性的影响函数; $\Psi(\theta_k)$ 为道面细观构造特征参数 θ_k (表面细观凸体的形状等状态)对抗滑性的影响函数。

2.2 表达道面摩擦因数的构造参数模型分析

2.2.1 宏观构造对抗滑性影响的参数模型分析

目前,对于道面构造特征参数化定义,除了构造深度可以简单参数化外,其他构造特征尚缺乏参数化定义,也缺乏其参数的检测手段。正是这种情况,才造成了目前仅凭构造深度来表达宏观构造摩擦因数的现状。为全面表达宏观构造对抗滑性的影响规律,还必须将其其他影响抗滑性的重要构造特征参数纳入影响函数。

从前述跑道构造深度与摩擦因数检测的结果来看,尽管14.5 m测线上和3.4 m测线上的构造深度差别不大,但其摩擦因数差异显著(图2、4)。根据对该跑道所测不同区域道面的外观特征比较结果来看,相对14.5 m测线上的道面构造,3.4 m测线上的表层构造损伤要更严重(图7~10),这些损伤主要体现为刻槽棱角基本消失,甚至凸出体顶部的骨料消失。

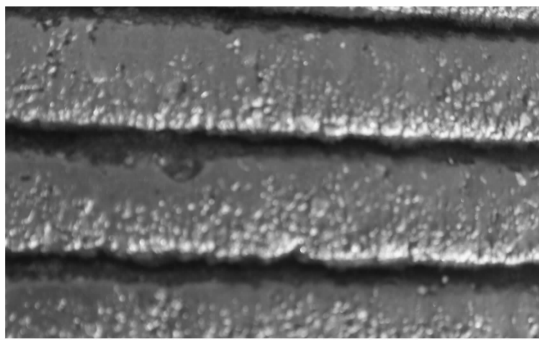


图9 3.4 m线上2 840 m处的道面表层构造外观特征

Fig. 9 Superficial texture feature of pavement

along 3.4 m testing line at 2 840 m

以上情况在其他研究者的研究成果中也有所体现。例如,朱洪涛基于数值模拟的结果认为,混凝土道面刻槽间距越小,单位长度内刻槽条数越多,其刻槽的抗滑附着系数就越大;槽间距不变的情况下,当刻槽宽度在3~6 mm之间变化时,刻槽宽度越宽,轮胎嵌入深度逐渐增大,其附着系数就越大;其他参数不变时,抗滑性随刻槽深度增加而增大,当刻槽深度达到4 mm时,再增加刻槽深度也难以使其附着抗滑系数明显增大^[8]。此外,刻槽的形状也会影响

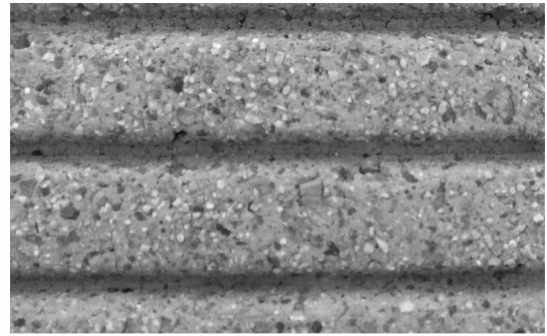


图10 14.5 m线上2 890 m处的道面表层构造外观特征

Fig. 10 Superficial texture feature of pavement

along 14.5 m testing line at 2 890 m

其抗滑性,例如,刻槽的棱角与凸出体形状等会影响其抗滑性。杜浩等对混凝土道面切缝的倒角试验分析表明,将道面切缝槽边沿由90°角倒成45°角后,其平均摩擦因数由0.64降低为0.62,两者相差3.2%^[9]。这种影响程度对于间距很大的板块切缝来说,可以认为该切缝边沿形状对其抗滑摩擦因数的影响不够显著。但是,这种影响对于密集分布的道面刻槽边沿形状变化来说则不容忽视,因此,道面刻槽棱角的变化也是影响道面摩擦因数的显著因素。

关于刻槽方向特征对道面抗滑性的影响,已有研究结果表明,刻槽方向对道面的抗滑性影响并不显著,无论是横向还是纵向刻槽,其抗滑性无明显差别^[10]。这一研究结果表明,在研究刻槽特征对道面抗滑性影响时,可以将刻槽方向排除在外。

综上所述,增大道面刻槽的构造深度并不是影响其宏观摩阻效应的唯一因素,刻槽的形状及分布特征都会影响其对道面抗滑性的贡献。若以函数 $\Phi(\delta_i)$ 来表示刻槽特征等宏观构造对道面抗滑性贡献的规律,则可假设某一瞬间的轮迹压痕所接触的单位面积道面上有 m 条单位长度的刻槽,该 m 值可直接反映刻槽在道面上的分布密度等情况。假设以 K_i 来表达第 i 条刻槽形状特征(分布状态、棱角状态等)对摩阻力的影响系数,且反映刻槽棱角完整性与刻槽宽度分布特征对摩擦因数的影响程度,则1条刻槽对摩擦因数的贡献为 $K_i\delta_i$,而 m 条刻槽构造对摩擦因数的总贡献值为

$$\Phi(\delta_i) = \sum_{i=1}^m K_i \delta_i \quad (2)$$

从式(2)可以看出,轮胎与道面接触面上所包括的刻槽条数较多,表达刻槽棱角与分布状态的特征系数较大,刻槽深度足够大时,其宏观构造对摩擦因数的贡献就越大,反之,对摩擦因数的贡献就越小。

2.2.2 粗观构造对抗滑性影响的参数模型分析

凸出于混凝土道面的拉毛、压痕与粗骨料都可形成不同特征的粗糙峰。当高速滚滑的橡胶轮胎表层与道面粗糙峰接触时,除了垂直压力产生的弹性变形外,还有黏着力造成的局部变形,从而使该变形过程表现为黏弹性变形。此时,可以将轮胎胎面与道面粗观构造的接触状态简化为一个弹性体与一个刚性表面凸体的接触问题,其中轮胎表层的弹性体承受法向荷载 W 、水平推力 F 的作用,沿 v 方向滑行的接触状态见图 11。

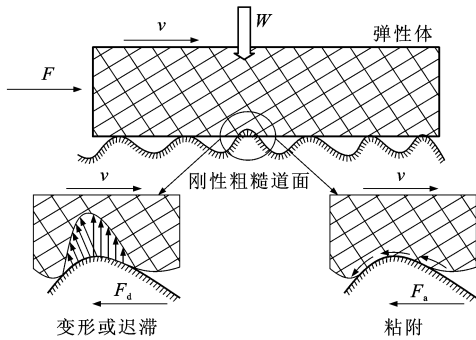


图 11 弹性胎面与道面粗糙峰构造的接触状态

Fig. 11 Contact state of elastic tyre with pavement asperity texture

当弹性体同时受法向荷载及水平推力作用,并且弹性体与刚性体间产生相对滑移时,界面上可产生两部分摩擦阻力,一部分是在接触界面上产生的粘着摩擦力 F_a ,另一部分是由于凸体部分压入弹性体内做切向运动时,由于弹性体变形发生延迟恢复所造成的迟滞变形摩擦力 F_d ,则粘着摩擦系数和迟滞摩擦系数分别为

$$\mu_a = F_a / A \quad (3)$$

$$\mu_d = F_d / A \quad (4)$$

式中: μ_a 为胶面与道面粗构造之间的粘着摩擦系数; μ_d 为胶面与道面粗构造之间的迟滞摩擦系数; A 为胶面与道面的实际接触面积。

根据 Moore 等研究结果^[10],橡胶轮胎与道面上某一粗糙峰间的摩擦因数为

$$\mu_a = K_a \frac{E_1}{P} \tan(\eta_j) \quad (5)$$

$$\mu_d = K_h \frac{\bar{P}}{E_1} \tan(\eta_j) \quad (6)$$

式中: $\tan(\eta_j)$ 为与道面粗糙峰几何特征有关的橡胶滞后系数; E_1 为胶面弹性模量,即储能模量; K_a 、 K_h 分别为与界面物理化学性质、变形特征有关的常数; P 为粗糙峰顶部所承受的正压应力; \bar{P} 为胶面所

承受的平均压应力。

若道面单位面积上有 x 个粗糙峰,且第 j 个粗糙峰所占面积为 u_j ,则其对轮胎产生的摩擦因数应为 x 个粗糙峰凸体的粘附摩擦因数与滞后摩擦因数之和,即

$$\mu(\eta_j) = \sum_{j=1}^x u_j \tan(\eta_j) \left(\frac{K_a E_1}{P} + \frac{K_h \bar{P}}{E_1} \right) \quad (7)$$

基于式(7)中的参数影响规律,轮胎与道面接触单位面积上粗糙峰个数 x 越多,橡胶滞后系数 $\tan(\eta_j)$ 越大,胶面所承受的平均压应力 \bar{P} 越大,粗糙峰表面所承担的正压应力 P 越小,道面-胶面界面的物理化学性质常数 K_a 和胶面的变形特征常数 K_h 越大,则其摩擦因数就越大,反之,摩擦因数就越小。而与粗糙峰几何特征有关的胶面弹性模量 E_1 ,则在不同条件下会表现出不同的影响规律。

2.2.3 细观构造对抗滑性影响的参数模型分析

当道面上的细小凸体达到可以使平滑胶面产生变形的尺度时,承受法向力的轮胎橡胶表层就会产生弹性变形,这种弹性变形就会迫使道面上的细观凸体产生几何状态下的嵌入效应。当胶面在水平推挤力作用下产生与道面间的相对滑动时,已经产生的凹陷胶面会产生水平方向的滑移,其滑移过程中将会在胶面上形成动态犁沟槽。在此过程中,道面上的刚性细观凸体会对胶面产生明显的切削作用,从而表现为对界面相对滑移的摩阻效应。

借鉴金属间摩擦的犁沟效应原理,当低刚性橡胶胎面与高刚性道面产生细观凸体接触时,道面的高刚性细观凸体可假定等效为半角为 θ 的圆锥体。胎面受法向荷载作用时,其等效圆锥体的细观凸体可嵌入胎面的深度为 h ;当界面发生相对滑动时,细观凸体前沿面与橡胶面就会产生张紧状态下的紧密接触,其状态见图 12。

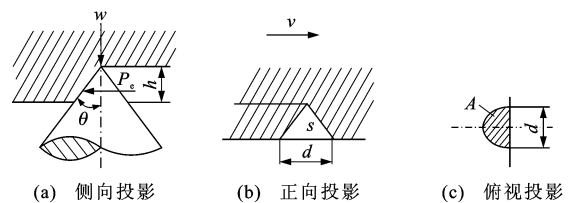


图 12 道面细观凸体对胎面切削效应

Fig. 12 Cutting action of pavement raised particle to tyre

图 12(a)~(c) 分别表示凸体与胎面间接触时沿作用力方向的侧向投影、正向投影和俯视投影,其中参数 w 为单个凸体所承受的法向荷载(N); P_s 为凸体所承受的犁沟力(N); s 为凸体峰尖与轮胎胶面

的接触在作用力方向上的投影面积(mm^2); d 为嵌入轮胎的凸体的水平宽度(mm)。

根据上述受力状态,等效为圆锥体的细观凸体与胎面间的接触面在水平面上的投影面积可表示为 $\pi d^2/8$,其接触面在垂直面上的投影面积为 $dh/2$ 。假设胎橡胶的塑性屈服性能各向同性,屈服极限为 σ_s ,则在胎面上产生犁沟效应的单个凸体所承受的法向载荷 w 和犁沟力 P_e 分别为

$$w = A\sigma_s = \pi d^2 \sigma_s / 8 \quad (8)$$

$$P_e = s\sigma_s = dh\sigma_s / 2 \quad (9)$$

单个细观凸体犁沟效应对摩擦因数的贡献 f_τ 为

$$f_\tau = P_e / w = 4h / \pi d = 2\cot(\theta) / \pi \quad (10)$$

从式(10)可以看出,当细观凸体峰尖的夹角较大时, f_τ 值就很小,此时的摩擦效应很小;当细观凸体峰尖夹角较小时, f_τ 值显著增大,此时,就必须考虑犁沟效应对抗滑性能的影响。可见,该犁沟效应摩擦因数 f_τ 可以体现细观凸体本身的尺寸和形状特征对摩擦阻力的贡献。假设道面单位面积上有 n 个有效的细观凸体,且第 k 个细观凸体所占面积为 A_k ,则可将式(10)扩展为道面上细观凸体的总犁沟效应,并且等效于该表面的细观摩擦因数 $\Psi(\theta_k)$,即

$$\Psi(\theta_k) = \sum_{k=1}^n \frac{2A_k \cot(\theta_k)}{\pi} \quad (11)$$

根据式(11)可以看出,轮胎与道面接触单位面积上的细观凸体个数较多,细观凸体峰尖夹角较小时,其摩擦因数就越大;反之,摩擦因数就越小。从该式所反映的规律来看,当角度很小时,尽管其单个细观凸体摩擦阻会很大(如角度为 30° 时的摩擦因数将大于1),但由于其产生的水平剪力过大,可能造成该凸体峰尖被剪断,或者使胶面被撕裂而形成粘胶现象。显然,道面上的细观凸体只有在峰尖夹角在适当范围内时,才能持久保持其对摩擦阻力的贡献。

2.2.4 道面构造对抗滑性影响的综合参数模型

基于上述对道面构造特征参数化分析,以及不同构造状态特征的摩擦效应分析,道面的抗滑系数主要由其宏观构造摩擦因数、粗观构造摩擦因数和细观摩擦因数等构成,即带有刻槽的水泥混凝土道面单位面积上的摩擦阻力为

$$f = \Phi(\delta_i) + \Psi(\theta_k) + \mu(\eta_j) = \sum_{i=1}^m K_i \delta_i + \sum_{j=1}^x u_j \tan(\eta_j) \left(\frac{K_a E_1}{P} + \frac{K_b \bar{P}}{E_1} \right) + \sum_{k=1}^n \frac{2A_k \cot(\theta_k)}{\pi} \quad (12)$$

利用式(12),可依据道面不同的构造参数特征值来比较其抗滑性差异,并可根据道面的具体构造参数来评价其抗滑能力,在道面抗滑构造设计中进行抗滑性改善的构造优化分析,以满足不同条件下的道面使用要求。当道面某些构造参数变化过大时,可利用式(12)来评价道面抗滑性的衰减程度,以及计算道面未来短时间内的抗滑性能预测值。对于道面抗滑性出现严重异常时,可利用式(12)对造成其异常的原因进行分析,从而针对性改进道面的构造抗滑特征。

3 结 语

(1)探讨了满足飞机不同滑行速度状态下的制动效应特点,以及不同滑行速度状态下的道面抗滑性构造的有效性适应规律。根据某机场水泥混凝土道面不同部位抗滑摩擦因数与构造参数的对比分析结果,提出了利用道面宏观构造、粗观构造和细观构造参数的综合表达式。

(2)通过对道面与橡胶轮胎胎面之间相互作用的机理分析,分别建立了基于道面宏观构造特征参数的宏观构造摩擦因数计算式、基于道面粗观构造特征参数的粗观构造摩擦因数计算式以及基于道面细观构造特征参数的细观构造摩擦因数计算式。对这些构造特征参数的定义,可为后续的深入研究与测试分析提出了明确目标。

(3)综合不同构造摩擦因数计算式,提出了基于构造特征参数化的道面抗滑能力表达模型,该模型为全面表达道面构造对抗滑摩擦因数的影响规律提供了较详细的信息,可以作为对旧道面抗滑性进行量化评价的依据,并可为改进道面抗滑性提出针对性的构造特征优化途径。

参考文献:

References :

- [1] 何 杰,刘 霞,陈一锴,等.恶劣天气路面条件对行车安全的影响[J]. 交通运输工程学报,2011,11(1):58-63.
HE Jie, LIU Xia, CHEN Yi-kai, et al. Influence of road condition on running safety in atrocious weather[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 58-63. (in Chinese)
- [2] 和 松,夏礼秀.高速公路路面摩擦因数的测试与评价[J]. 公路交通科技,2002,19(1):8-11,15.
HE Song, XIA Li-xiu. Friction coefficient measurement and evaluation for lane surface of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(1): 8-11, 15. (in Chinese)

- [3] 李 波, 韩 森, 滕旭秋. 混凝土路面的表面纹理与抗滑性[J]. 交通标准化, 2008(7): 154-157.
LI Bo, HAN Sen, TENG Xu-qiu. Surface texture and skid resistance of concrete pavement[J]. Communications Standardization, 2008(7): 154-157. (in Chinese)
- [4] 刘 宽, 李 华. 水泥混凝土路面抗滑措施的改进[J]. 公路, 1993(2): 9-10.
LIU Kuan, LI Hua. The improvement of skid measures of cement concrete pavement[J]. Highway, 1993(2): 9-10. (in Chinese)
- [5] 曹 平, 严新平, 白秀琴. 沥青路面形貌对抗滑性能影响的理论分析[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(4): 306-310.
CAO Ping, YAN Xin-ping, BAI Xiu-qin. Theory analysis of effect of topography on skid resistance of asphalt pavements[J]. Tribology, 2009, 29(4): 306-310. (in Chinese)
- [6] 黄宝涛, 田伟平, 李家春, 等. 沥青路面抗滑性能定量评价的分形方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 12-17.
HUANG Bao-tao, TIAN Wei-ping, LI Jia-chun, et al. Fractal method based on quantitative evaluation of asphalt pavement anti-slide performance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 12-17. (in Chinese)
- [7] 周仲荣, 钱林茂. 摩擦学尺寸效应及相关问题的思考[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 22-26.
ZHOU Zhong-rong, QIAN Lin-mao. Tribological size effect and related problems[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 22-26. (in Chinese)
- [8] 朱洪涛. 水泥混凝土路面抗滑机理及测试技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
ZHU Hong-tao. Research on the cement concrete pavement friction mechanism and test technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [9] 杜 浩, 周正峰, 凌建明, 等. 机场水泥道面切缝倒角应力分析[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(6): 44-48, 52.
DU Hao, ZHOU Zheng-feng, LING Jian-ming, et al. Stress analysis on joint chamfer for cement concrete airport pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6): 44-48, 52. (in Chinese)
- [10] DRAKOPOULOS A, ORNEK E. Effect of concrete pavement surface texture on traffic safety: longitudinal or transverse times? [C]//Iowa State University. Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Ames: Iowa State University, 2007: 1-11.

(上接第 8 页)

References:

- [1] HAYHOE G F. Traffic testing results from the FAA's national airport pavement test facility[C]//HAYHOE W J. 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing. Minneapolis: University of Minnesota, 2004: 1-23.
- [2] RODNEY N, JOEL P E. AC 150/5320-6E and FAARFIELD[R]. Washington DC: FAA, 2008.
- [3] LI Qiao-sheng, ZHAO Hong-duo, LING Jian-ming. Method of airport concrete pavement design for large military transport aircrafts[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 121-126.
- [4] WANG Zhen-hui. Pavement design for airport based on cumulative damage optimization model[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2010.
- [5] LI Qing, ZHAO Hong-duo, YAO Zu-kang. Aircraft load repetition calculation methods based on pavement responses[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12): 1637-1641.
- [6] YAO Bing-qing. The computation theory of pass-to-coverage ratio of airport pavement[J]. Airport Engineering, 2008(4): 2-11.
- [7] XING Zhen-zhen. Study on design method of cement concrete strips pavement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [8] WU Ai-hong, CAI Liang-cai, GU Qiang-kang. Analysis of pavement traffic volume using pass-to-coverage ratio[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 82-87, 110.
- [9] GAO Tao, LIU Zheng-guang, YUE Shi-hong, et al. Moving vehicle tracking algorithm used for intelligent traffic[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 89-94.
- [10] WANG Xing-ju, GAO Gui-feng, CHEN Jin-jie, et al. Traffic flow simulation model based on desired speed[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 79-84.
- [11] NIU Kai-min, TIAN Bo. Equivalent fatigue thermal stress coefficient of cement concrete pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 23-28.
- [12] TAN Zhi-ming, YAO Zu-kang, TIAN Bo. Analysis of loading stresses in cement concrete pavements[J]. Highway, 2002(8): 15-18.