

综 述

新型轮胎结构的现状与发展

朱华健^{1,2},牛金坡²,李凡珠^{1*},何 红^{2*},王润国¹,卢咏来¹,张立群¹

(1.北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室,北京 100029;

2.北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

摘要:通过回顾轮胎发展历史,分析了以斜交轮胎和子午线轮胎为代表的传统轮胎的主要结构特点和存在的缺陷,说明新型轮胎亟待发展,并且综述了国内外出现的具有代表性的新型轮胎产品,包括非充气轮胎和新型充气轮胎两类,分别讨论了它们的结构特点和相比于传统轮胎所具有的独特优势,为未来轮胎的发展方向提供参考。与传统轮胎相比,非充气轮胎普遍具有安全、节能、环保和易维护的特点,而新型充气轮胎的开发则是基于其应用场景,在传统轮胎的基础上进行的改进。

关键词:非充气轮胎; 新型充气轮胎; 结构特点; 现状与展望

引言

轮胎作为车辆唯一与地面接触的部位,承担着承受载荷、改变方向、缓冲与减震、驱动与制动四个方面的重要作用。从数千年前的实木轮胎到目前应用最广的子午线轮胎,人们对性能越来越高的追求促进了轮胎结构的变化。时至今日,为了解决传统轮胎存在的缺陷,越来越多新型的轮胎产品和创意不断涌现出来,既有结合新技术对传统充气轮胎进行改进得到的新型充气轮胎,也有打破传统充气轮胎设计理念,追求更高层次安全、舒适、节能、环保的非充气轮胎。通过对发展历史的追溯,说明了传统轮胎结构的由来以及特点,然后指出传统轮胎存在的缺陷,这是新型轮胎发展的背景和原因。接着将新型轮胎产品分为非充气轮胎和新型充气轮胎分别进行介绍,为轮胎在未来的发展方向提供借鉴。如图 1 所示是本文的主要结构框架。

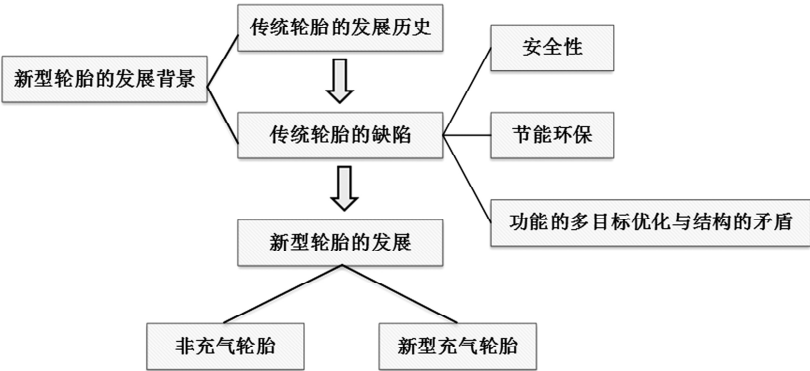


图 1 该综述的结构框架

Figure 1 The frame work of the study

10.14028/j.cnki.1003-3726.2019.11.001

收稿:2019-04-25;修回:2019-09-20;

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1502501),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(ZY1911);

作者简介:朱华健(1997-),男,硕士研究生,主要从事高分子材料及制品有限元仿真研究;

* 通讯联系人,E-mail: lifanzhu@mail.buct.edu.cn;hehong@mail.buct.edu.cn.

1 新型轮胎的发展背景

1.1 轮胎发展溯源

据考证,人类历史上最早的车轮大约诞生于公元前 3500 年左右的美索不达米亚平原,其最初的形式是圆形的实心木头。实心木轮体型笨重、运行缓慢、运输效率低下,最终被大约出现于公元前 1500 年的辐条车轮所取代(见图 2)。由于木制车轮行驶过程中磨损严重,因此寿命很低。通过在车轮外侧覆盖一层铁皮后,这一问题得到了大大改善。于是在这之后的数千年里,车轮还是基本保持着这样的形态^[1]。



图 2 木制辐条车轮
Figure 2 Wooden spoke wheel

直到 1839 年,美国人固特异发明了硫化橡胶以后,橡胶才开始广泛应用于各种车辆。此时的橡胶轮胎采用的是实心结构,吸收地面冲击的效果很差,并且行驶时会产生巨大的噪音。1888 年,英国兽医邓禄普创新性地将充气后的橡胶管套在木制车轮的外面,现代轮胎的原型由此诞生^[2,3]。

1903 年,斜纹纺织品的发明促成了斜交轮胎的发展,由于帘线不易断裂,轮胎的寿命得到大大延长。斜交轮胎的结构如图 3 所示,其相邻层的帘线之间相互交叉,并且与胎面中心线呈小于 90°角排布。斜交轮胎的胎面和胎侧强度较大,胎体坚固,负荷变形小,具有良好的转向与制动性能。但因胎侧刚度较大,导致舒适性差,滚动阻力大,并且高速行驶时帘布层间会产生较大的移动和摩擦,因此不适合高速行驶^[3~5]。

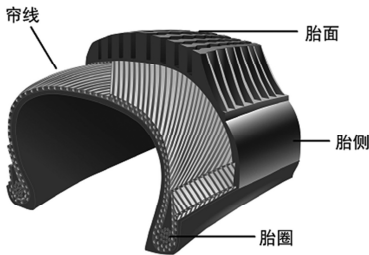


图 3 斜交轮胎的结构
Figure 3 Structure of the bias tire

不久之后的 1946 年,法国的米其林公司获得了子午线轮胎专利。其相邻层帘线相互平行,与外胎断面呈 0°角排列,而位于胎面与胎体之间的带束层对其起着箍紧的作用(见图 4)。相比于斜交轮胎,子午线轮胎径向弹性大,具有缓冲性能好、耐磨、使用寿命长等特点^[3~5]。直到今天,斜交轮胎和子午线轮胎仍然是使用最多的两种轮胎。

1.2 传统轮胎的缺陷

尽管自 1888 年邓禄普发明充气轮胎以来,以斜交轮胎和子午线轮胎为代表的传统充气轮胎凭借其在粗糙路面上的能量损耗低、垂向刚度和接地压力小以及质量轻等优势在 100 多年来始终占据着世界轮

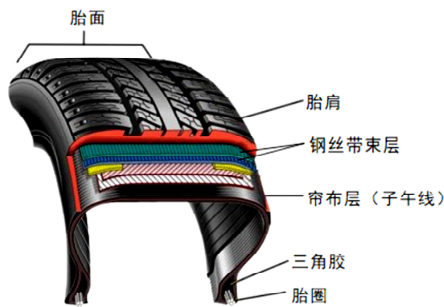


图 4 子午线轮胎的结构
Figure 4 Structure of the radial tire

胎市场,但是传统充气轮胎在以下几个方面仍然存在明显的缺陷。

1. 2. 1 安全性 车辆在行驶中的所有动力学特性都是由轮胎与路面的接触作用决定的,因此轮胎对行车安全的重要性不言而喻。公安部统计数据显示,在高速公路上的交通事故中,46%是由轮胎故障引起的^[6]。而传统轮胎所采用的充气结构使其在安全性方面不可避免地存在巨大的隐患,如易漏气、胎压不稳定、刺扎容易导致爆胎等^[7]。

1. 2. 2 节能环保 对轮胎的节能环保要求主要体现在两方面:一是轮胎的滚动阻力,据米其林(中国)有限公司统计,轮胎的滚动阻力每降低 20%,可使汽车每公里二氧化碳排放量减少 4g,每辆汽车每年可节约 23L 燃油^[8,9];二是表现在轮胎材料上,轮胎的磨损消耗不可避免,胶料各添加体系中的有害物质会散布到空气中,对人和环境造成严重的危害。传统轮胎大量使用橡胶材料,容易造成废旧轮胎难以回收,从而导致环境污染^[10]。

1. 2. 3 功能的多目标优化与结构的矛盾 传统充气轮胎存在着各向力学性能耦合严重的问题,人们对轮胎越来越多的性能要求难以被同时满足,导致其功能的多目标优化与结构之间相互矛盾。比如,要实现车辆行驶过程的省力节能,关键是保证轮胎在运动过程中具有良好的刚性圆柱度和较小的接地面积,从而减小滚动阻力。但是从轮胎制动性能的角度考虑,轮胎接地面积越小,刹车制动的效果越差,对行车安全构成威胁。于是,追求轮胎的节能性和制动性能同轮胎结构的刚性、柔性之间构成了矛盾。诸如此类的还有节能性与越障性能之间的矛盾、节能性与减震性能之间的矛盾等^[11]。

2 非充气轮胎

鉴于传统充气轮胎存在的不足之处,采用弹性填充物或支撑体来取代胎压作用的非充气轮胎成为了轮胎发展的方向之一。与充气轮胎相比,非充气轮胎在使用过程中不存在漏气、爆胎、胎压不足等问题,大大提高了行车的安全性。同时,比之充气轮胎,非充气轮胎在材料和结构上具有更大的设计空间,可以弥补充气轮胎设计上的缺陷。

早在 1911 年和 1969 年,便分别诞生了关于非充气轮胎的第一个专利^[12]和第一篇新闻报道^[13]。而在 2005 年米其林率先推出了其代表性产品 Tweel 后,其它轮胎厂商也开始加大对非充气轮胎的研发力度,各种不同结构的非充气轮胎相继问世。

米其林 Tweel 轮胎的结构如图 5 所示,其主要结构包括轮毂、聚氨酯轮辐、剪切带和橡胶胎面四个部分^[14,15]。其中,可更换的橡胶胎面使轮胎翻新更加容易,并且可以通过在胎面花纹上设计小孔进行排水来提高抗湿滑性能。Tweel 轮胎的轮辐采用聚氨酯材料,具有很好的耐冲击性能和抗震性能。Rhyne 和 Cron 对 Tweel 的承载形式和越障时的滚动阻力进行了分析,指出 Tweel 具有单位质量承载能力较高的顶部承载形式,即通过弹性支撑体除与地面接触区域以外的其它部位来进行承载,且能够实现对轮胎的垂向刚度和接触压力进行单独设计^[16]。目前,Tweel 轮胎已经在滑移装载机、割草机等车辆上得到了应

用,如图 6 所示,并且有望进一步推广^[17,18]。

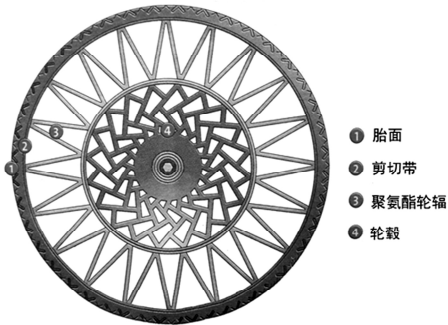


图 5 非充气轮胎 Tweel 的结构
Figure 5 Structure of the non-pneumatic tire-Tweel

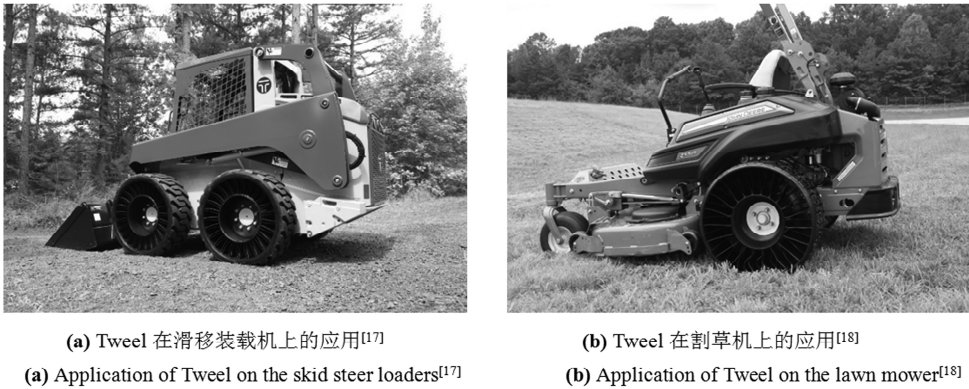


图 6 非充气轮胎 Tweel 的应用
Figure 6 Application of the non-pneumatic tire-Tweel

随后的 2006 年,在美国国家标准技术研究院(NIST)和美国国家航空航天局(NASA)的支持下,米其林与克莱姆森大学合作开发出了一种新型的细观结构剪切带来取代原来的聚氨酯剪切带。改进后的 Tweel 轮胎被应用于 NASA 的月球车上(见图 7)^[19,20]。



图 7 Tweel 轮胎在 NASA 月球车上的应用
Figure 7 Application of the Tweel tires on NASA lunar rover

2006 年,美国 Resilient 技术公司和威斯康星大学麦迪逊分校聚合体工程学中心开始研发一种轮胎。按照要求,它需要具备较高的承重能力,可抵御临时爆炸装置袭击并且能够在遇袭后仍以每小时 50 英里(约合每小时 80 公里)的速度行驶。设计团队在研究了数百个模型后,基于仿生学原理开发出了一款模仿蜂巢结构的轮胎(见图 8)^[21]。这种仿生轮胎由一系列六角形构成,可以使重量均匀分布,具有很强的

承载能力。同时,它拥有极高的坚固度,不必担心爆胎,还有助于减少使用过程中产生的多余热量和噪音,其驾乘感觉非常接近于充气轮胎。



图 8 Resilient 蜂巢轮胎
Figure 8 Resilient honeycomb tire

日本普利司通公司在 2011 年推出了其第 1 代非充气轮胎,如图 9(a)所示^[22,23]。这款轮胎的设计尺寸在 9 英寸左右,装配了两组热塑性树脂材料的辐条,一组以顺时针方向装配在轮辋内部进行导向,另一组以逆时针方向装配在轮辋外部,两组辐条组成了密集的体晶状结构,这种结构不仅能够使车轮完全承受住车子的重量,还能够使其在翻越障碍物时,依然具有一定的弹性,从而保证了乘坐的舒适感。除了外观美观外,这款概念轮胎最大的亮点在于车轮的辐条采用的是热塑性树脂,能够方便地被融化、改铸以实现循环再生。

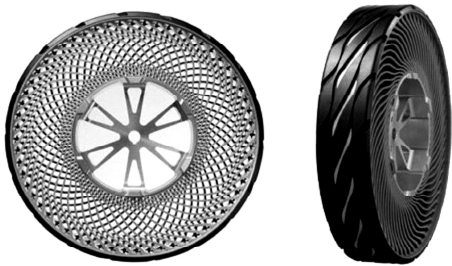
2013 年,普利司通又推出了第 2 代非充气轮胎,如图 9(b)所示^[24,25]。该轮胎结构仍然采用了橡胶胎面和热塑性材料成型的轮辐,但是与第 1 代相比,采用有限元分析对轮胎结构进一步优化设计,提升了轮胎的承载能力、环保性能以及行驶性能。普利司通第 2 代非充气轮胎的最大载重从第 1 代的 100kg 提高至 410kg,最高行驶速度也由第 1 代的 6km/h 提高至 60km/h,同时拥有更低的滚动阻力,可大幅减少二氧化碳排放,实现了更高水平的环保与安全性能。

2012 年,南京航空航天大学赵又群团队设计出一种采用金属材料的非充气机械弹性车轮,主要由车轮外圈、弹性环、弹性环组合卡、轮毂、回位弹簧、销轴、铰链等构成(见图 10)。这款轮胎利用销轴和螺栓轴将 12 个铰链组的两端分别安装在弹性外圈内侧的弹性环组合卡和轮毂上。在车辆行驶过程中,车身载重、地面冲击及驱动和制动产生的转矩造成铰链的弯曲,再通过铰链下端的回位弹簧回位。这种机械弹性车轮具有弹性幅度大、抗震性能好、经济节能和易于生产等优点^[26,27]。

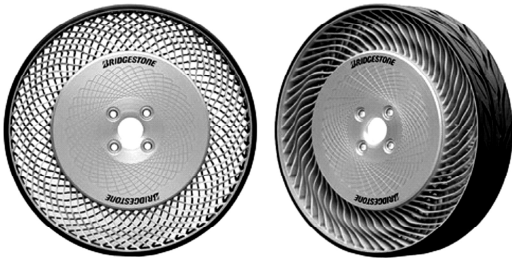
2013 年的法兰克福车展上,韩泰公司发布了一款名为 i-Flex 的非充气轮胎(见图 11)。这种轮胎由聚氨酯材料制成,侧面采用如蜘蛛网状的结构,并有一个花瓣形的强化支撑,其质量远远小于平常的轮辋加轮胎的质量。i-Flex 轮胎的内部结构十分复杂,每个均匀分布的小凸起都是一个微型减震器,可有效改善轮胎的震动、噪声与油耗问题。同时,i-Flex 独特的环保设计使得其回收利用率高达 95%^[29]。

除了 i-Flex 以外,韩泰公司还设计了另外两款概念型非充气轮胎:胎面可变轮胎 Tiltread^[30]和可变花纹轮胎 Motiv(见图 12 和图 13)。Tiltread 轮胎被分为三个部分,由三个独立的电机分别进行控制,可以针对不同路况调整轮胎形态,并且允许它们出现不同的转速,从而在过弯时保证提供最大的抓地力。Motiv 轮胎的胎面由许多聚氨酯块组成,这些聚氨酯块具有柔性内腔,并可以根据不同地形单独移动,从而达到最大抓地力。相比胎面可变轮胎,可变花纹轮胎对于地形具有更高的宽容度。

Big Tyre 在 2009 年开发出了其第 1 款非充气轮胎,如图 14(a)所示。这款轮胎的外径为 250mm,宽度为 160mm,被应用于卡丁车,并且通过了速度为 100km/h 情况下的减速测试,验证了其设计理念。2011 年,Big Tyre 开发了应用于矿井重型车辆的全尺寸非充气轮胎,如图 14(b)所示,其外径和宽度分别



(a) 第 1 代普利司通非充气轮胎^[23]
(a) The first generation of the Bridgestone non-pneumatic tire^[23]



(b) 第 2 代普利司通非充气轮胎
(b) The second generation of the Bridgestone non-pneumatic tire^[25]

图 9 普利司通非充气轮胎
Figure 9 Bridgestone non-pneumatic tire^[25]

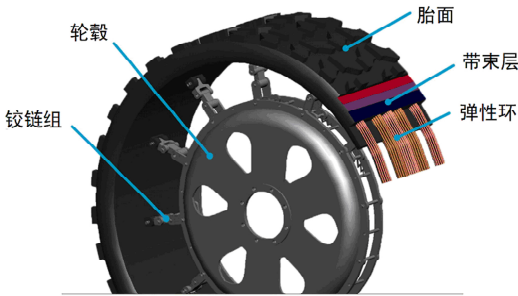


图 10 机械弹性车轮的结构^[28]
Figure 10 Structure of the mechanical elastic wheel^[28]



图 11 概念型非充气轮胎——i-Flex
Figure 11 The concept non-pneumatic tire-i-Flex

达到了 1360mm 和 400mm,轮胎在受到负载时产生变形,增加了接地面积,提供了更加均匀的重量分布,使其在较软路面上也能正常行驶。Big Tyre 的第 3 款非充气轮胎在 2014 年被开发出来,同样应用于矿



图 12 胎面可变轮胎——Tiltread
Figure 12 Tread variable tire-Tiltread



图 13 可变花纹轮胎——Motiv
Figure 13 Pattern variable tire-Motiv

井车辆,如图 14(c)所示。这款轮胎的外径和宽度分别为 1360mm 和 420mm,在 Eimco 913 地下运载车上完成了最高 12t 的负载测试,并且具有良好的抗冲击性能^[31]。

2014 年,北汽集团与马正东团队合作开发了一款基于三维负泊松比微结构的非充气轮胎,被称为“N-轮”(见图 15)。这款轮胎主要由负泊松比结构的 V 型支撑体、橡胶缓冲带、橡胶胎面和轮圈组成。它包括一个转动轴,围绕转动轴的是一系列由负泊松比单元晶胞构成的同心环状结构,而每一个单元晶胞是由一组 V 形的受压结构和受拉结构组成的。轮胎最外圈的单元晶胞和覆盖材料以便于轮胎滚动的方式排列。当轮胎运动时,负泊松比结构的强度和刚度随着接地区域受力的增加而增加^[32]。

2015 年,美国布里特克轮胎橡胶公司开发出了一种新型的非充气轮胎——“能量返回轮胎”(ERW)(见图 16)^[33,34]。它由两层橡胶组成:一层位于内侧,由可调节的棒条拉伸和固定;另一层位于最外侧。两层橡胶的中间部分,也就是传统的充气内胎所在部位,这里采用一系列弹性垫进行填充。棒条和弹性垫提供的内部支架让轮胎具有弹性并且能更好地对抗挤压。当内侧橡胶层受到由碰撞路面而带来的挤压时,车胎内储存的弹性势能可以转化为向前的动能。

2017 年的 Movin’On 峰会上,一款由米其林开发的 3D 打印概念轮胎 Vision 得以亮相(见图 17)。这款轮胎由可生物降解的材料经过 3D 打印制成,结构类似于人体肺泡,具有抗压、防爆等特点。其胎面可以由用户根据实际需要进行打印,在磨损后只需通过简单的“上胶翻新”即可修复,大大延长了轮胎的使用寿命。另外,Vision 轮胎安装有嵌入式传感器,可以对轮胎使用状况进行实时监测,方便车主随时查看^[35]。

作为开发 Vision 概念轮胎过程中的重大进步,米其林公司在 2019 年的 Movin’On 峰会上又发布了一款与通用汽车公司合作开发的非充气轮胎,用于乘用车,名为“Unique Punctureproof Tire System (Uptis)”(见图 18)。这款轮胎采用了玻璃纤维填充的高强度树脂材料,具有安全可靠、几乎无需维护以及节省原材料等特点。两家公司将于 2019 年内开始在雪佛兰 Bolt EV 等车型上对 Uptis 轮胎进行测试,并计划于 2024 年前实现在乘用车上的应用^[36]。

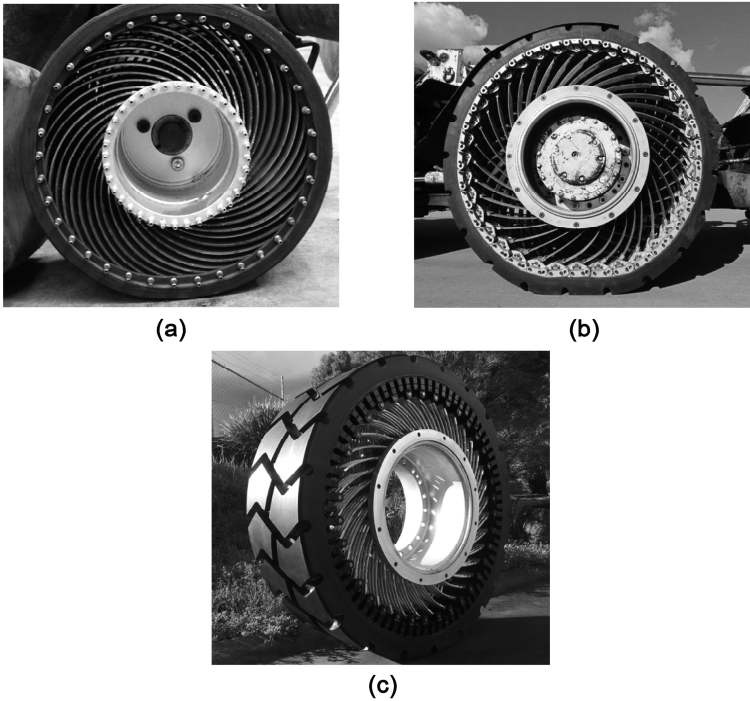


图 14 Big Tyre 非充气轮胎^[31]

(a) 应用于卡丁车的第 1 款 Big Tyre 非充气轮胎;(b) 应用于矿井车辆的第 2 款 Big Tyre 非充气轮胎;
(c) 应用于矿井车辆的第 3 款 Big Tyre 非充气轮胎

Figure 14 Big Tyre non-pneumatic tires^[31]

(a) The first Big Tyre non-pneumatic tire for go-karts; (b) the second Big Tyre non-pneumatic tire for mining vehicles;
(c) the third Big Tyre non-pneumatic tire for mining vehicles



图 15 负泊松比非充气轮胎(N-轮)

Figure 15 The negative Poisson's ratio non-pneumatic tire (N-wheel)

固特异在 2017 年推出了一款名为“TurfCommand”的非充气轮胎,作为升级配置应用于 Bad Boy Mowers 旗下的 Outlaw XP 系列割草机(见图 19)。这款轮胎通过热塑性材料制成的轮辐将胎面和轮毂连接起来,使其在保证刚度的情况下兼具柔韧性,即使处于重载状态也能保持平稳的行驶并减少对草皮的损坏^[37,38]。

2018 年的日内瓦车展上,固特异发布了一款名为 Oxygene 的概念轮胎(见图 20)。该轮胎采用开放式的免充气结构,由回收废旧轮胎得到的橡胶粉经 3D 打印加工制成,并且在其轮胎侧壁内,种植有许多活苔藓。这款轮胎除了具有一般非充气轮胎防爆、抗刺扎等特点外,其开放结构还可以从路面吸收水分,提供给苔藓进行光合作用,从而吸收空气中的二氧化碳并释放出氧气。同时,苔藓进行光合作用所产生

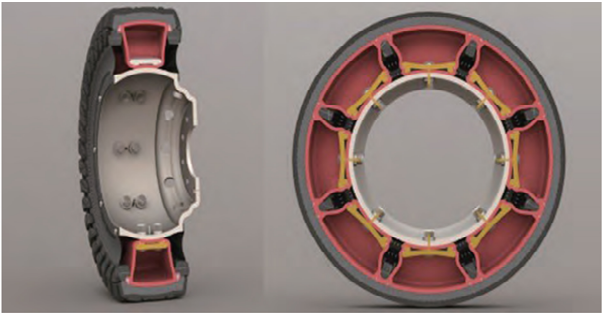


图 16 能量返回轮胎
Figure 16 Energy return wheel

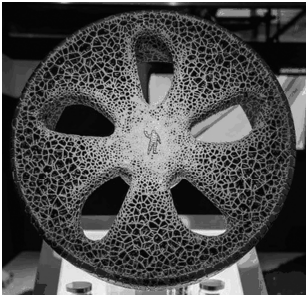


图 17 米其林 3D 打印概念轮胎——Vision^[35]
Figure 17 Michelin 3D print concept tire-Vision^[35]



图 18 米其林与通用汽车合作开发的非充气轮胎——Uptis
Figure 18 Michelin and General Motors Non-pneumatic tire-Uptis

的能量可以为轮胎上的传感器、灯带等电子元件供电^[39]。

北京化工大学和山东玲珑轮胎股份有限公司联合开发了 3D 打印聚氨酯轮胎(规格为 165 70/R12), 并进行了相应的轮胎测试,这是国内首次通过 3D 打印的方式制备出标准规格的聚氨酯轮胎(见图 21)。该轮胎采用热塑性聚氨酯(TPU)材料,通过熔融沉积法(FDM)完成 3D 打印,其内部为正六边形空心结构,为非充气轮胎。这款 3D 打印聚氨酯轮胎存在着结构简单、承载有限、耐热性不足等问题。

在上述基础上,吉林大学,北京化工大学,玲珑轮胎股份有限公司通过三方合作,采用 3D 打印的方式,制备出了具有精细结构的非充气轮胎(规格为 205 55R16),并进行了三项刚度、滚动阻力等台架测试(见图 22)。研究发现,该非充气轮胎具有操控稳定性优异、滚动阻力低的特点。

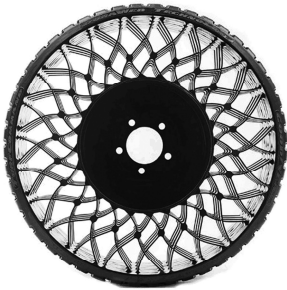


图 19 固特异应用于割草机的非充气轮胎——TurfCommand^[38]

Figure 19 Goodyear non-pneumatic tire for lawn mowers-TurfCommand^[38]

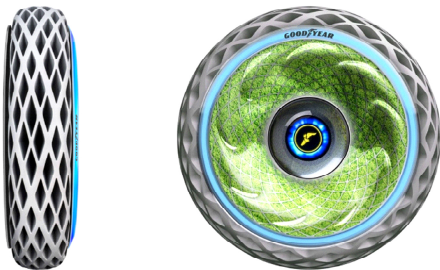


图 20 固特异 3D 打印概念型轮胎——Oxygene^[39]

Figure 20 Goodyear 3D print concept tire-Oxygene^[39]



图 21 3D 打印聚氨酯轮胎

Figure 21 The 3D printed polyurethane tire

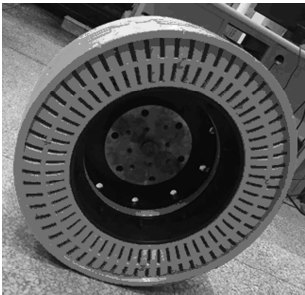


图 22 3D 打印全尺寸非充气聚氨酯轮胎

Figure 22 The 3D printed full-size non-pneumatic polyurethane tire

3 新型充气轮胎

除了非充气轮胎以外,为了克服传统充气轮胎的不足,各大轮胎生产厂商也开始尝试在传统充气轮胎的基础上进行改进,开发出了许多性能更好、功能更全面的新型充气轮胎。

2007 年,固特异公司为日产 Terranaut 概念 SUV 专门设计了一款非充气轮胎(见图 23)。这款概念胎可以通过对胎内压力的调整,在“城市越野胎”和“山地越野胎”两个功能中转换。在平缓路面行驶时,Terranaut 轮胎可以提供传统“城市越野胎”所具备的静音、舒适、省油的特性;而在山地路面行驶时,通过调整胎内压力,胎面块形花纹将突出胎面,变身成为“山地越野胎”,提供足够的抓地力。



图 23 Terranaut 概念轮胎
Figure 23 Concept tire for Terranaut

芬兰轮胎制造厂商 Nokian 针对冬季雨雪频发而使得轮胎抓地力减弱的问题,开发了一款胎面配备可伸缩螺栓的轮胎——Nokian Hakkapeliitta 8(见图 24)。螺栓的伸缩通过按钮来控制,当路况不需要螺栓的辅助时,与地面接触的是橡胶材料,保证了轮胎能提供良好的舒适性及操控性;而当遭遇湿滑路面时,启动螺栓则可以大大增强抓地力^[40]。



图 24 带有可伸缩螺栓的轮胎——Nokian Hakkapeliitta 8^[40]
Figure 24 The tire with retractable bolt-Nokian Hakkapeliitta 8^[40]

2016 年的日内瓦车展上,固特异发布了针对无人驾驶汽车的 Eagle-360 球形概念轮胎(见图 25)。这款轮胎采用磁悬浮的方式与车身连接,车身实际上一一直处于悬空状态,因此即使在越障时也能保持车身平稳。由于轮胎采用的是球形,可以 360°旋转,因此便于在停车场等狭小环境中行驶。轮胎的胎面由超弹性聚合物经过 3D 打印成型,采用了仿生学原理,其形状类似人类的大脑,具有与人体皮肤相似的柔韧

性,可以扩展和收缩。这种沟壑材料的功效类似于海绵,干燥时很硬,而当吸水后会变软,从而增加了与地面的接触面积,大大提高了防滑性能。



图 25 球形概念轮胎(Eagle-360)

Figure 25 Spherical concept tire (Eagle-360)

4 结语

本文在分析了传统轮胎的结构特点和存在的缺陷后,分别对 20 款非充气轮胎和 3 款新型充气轮胎进行了介绍。其中已经产品化的非充气轮胎结构比较多样,除了具有抗刺扎、防爆胎的特点外,每款产品的性能以及应用场合不尽相同。比如由米其林开发的 Tweel 轮胎具有承载能力高、耐冲击性能和抗震性能好等特点,目前主要应用于滑移装载机等工程车辆;而普利司通先后两代非充气轮胎都以环保作为最大的卖点,主要应用于代步车等低速轻载车辆。还有一些停留在概念阶段的非充气轮胎,它们的出现更像是对未来轮胎发展方向的探索,将一系列诸如磁悬浮、仿生学、智能控制等前沿技术融入到其设计之中。相比于非充气轮胎对传统轮胎充气结构的颠覆,新型充气轮胎则是在保留充气结构的基础上,对其存在的缺陷进行改进,得到的新型轮胎产品具有更加优异的性能,比如稳定胎压、适应不同路况等。

无论是非充气轮胎还是新型充气轮胎,它们的发展都是技术进步和人们追求更佳性能的结果。因此,未来必定会有更多的新型轮胎出现在市场上,新型轮胎的发展也必将拥有广阔的前景。

参考文献:

- [1] Aleksander G. World's oldest wheel found in slovenia[EB/OL]. Republic of Slovenia; Government Co-munication Office[2003-03]. http://www.ukom.gov.si/en/media_room/background_information/culture/worlds_oldest_wheel_found_in_slovenia/.
- [2] Calzonetti J A, Laursen C J. Rubber Chem Technol, 2010, 83(3): 303~321.
- [3] Koza C. The History of the Pneumatic Tire[EB/OL]. [2018-02-14]. <http://inertion.org/history-pneumatic-tire/>.
- [4] 刘勇, 杨卫民. 轮胎工业, 2002, 22(3):131~135.
- [5] 马双华, 田栢苓, 胡慧杰, 窦立谦. 轮胎工业, 2009, 29(7):387~390.
- [6] 姜成, 赵又群, 阮米庆, 汪伟, 李波. 机械设计与制造, 2013, 9:266~272.
- [7] 佟金, 杨欣, 张伏, 张书军, 陈秉聪. 农业机械学报, 2007, 38(3):182~186.
- [8] 王丽丽. 轮胎工业, 2012, 32(5):259~262.
- [9] 蔡为民. 轮胎工业, 2010, 30(8):457~458.
- [10] 岳现杰, 许冠英. 工业安全与环保, 2010, 36(1):37~39.
- [11] 杨卫民. 轮胎工业, 2013, 32(2):515~521.
- [12] Doty G S, Show J D. USP, 1002046. 1911-08-29.
- [13] Newsfocus. Chemical and Engineering News, 1969, 47(22):54~55.DOI:10.1021/cen-v047n022.po54.
- [14] Cron S M, Pompier J P, Rhyne T B, Thompson R H, Demino K W. USP, 7418988. 2005-10-27.
- [15] Rhyne T B, Thompson R H, Cron S M, Demino K W. USP, 7201194. 2004-02-20.

- [16] Rhyne T B, Cron S M. Tire Sci Technol, 2006, 34(3):222~225.
- [17] Michelin Tweel Technologies Expands Its Line of Airless Radial Tires for Skid Steers[EB/OL]. [2016-10-19]. <https://michelinmedia.com/pages/blog/detail/article/c0/a542/>.
- [18] Michelin to Provide Airless Radial Tire for John Deere ZTrak 900 Series Lineup[EB/OL]. [2014-10-22]. <https://michelinmedia.com/c0/michelin-provide-airless-radial-tire-john-deere-ztrak-900-series-line-up/>.
- [19] 徐立. 轮胎工业, 2015, 35(11):643~653.
- [20] Fazelpour M, Summers J D. Evolution of Meso-structures for Non-pneumatic Tire Development: A Case Study[C]//ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2015.
- [21] Manesh A, Tercha M J, Meliska B, Ceranski F, Howland G, Stark L, Hauch K, Petersen T. USP, 8944125. 2015-02-03.
- [22] 张仲志, 吕建刚, 宋彬, 郭劭琰, 高飞. 轮胎工业, 2014, 34(9):523~527.
- [23] Bridgestone Announces Development of Non-Pneumatic (Airless) Concept Tire[EB/OL]. [2011-11-29]. <https://www.bridgestone.com/corporate/news/2011112901.html>.
- [24] Bridgestone Corp. JP, 2013151292. 2013-08-08.
- [25] Bridgestone Corporation Reveals Second Generation "Air Free Concept (Non-Pneumatic) Tire"[EB/OL]. [2013-11-21]. <https://www.bridgestone.com/corporate/news/2013112101.html>.
- [26] 岳红旭, 赵又群. 中国机械工程, 2012, 23(11):1380~1385.
- [27] 杜现斌, 赵又群, 林菜, 肖振. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(3):569~574.
- [28] Zhu M, Zhao Y, Xiao Z, Deng Y. Numer Heat Transfer Part B, 2018, 73(6): 399~414.
- [29] Hankook Tire's Future-oriented Tire Succeeds High-speed Driving without Air Pressure[EB/OL]. [2015-07-13]. <https://www.hankooktire.com/global/about-hankook-tire/media-center/press-room.54727.html>.
- [30] Hankook Tire's Innovative Concept Tires Honored with the International Design Excellence Awards 2014[EB/OL]. [2014-06-12]. <https://www.hankooktire.com/global/about-hankook-tire/media-center/press-room.52288.html>.
- [31] Non-Pneumatic, Non-Solid Wheel[EB/OL]. <https://bigtyre.com.au/development/wheel/about>.
- [32] 马正东, 刘园园, 刘晓明, 孙策, 崔玉顺. 中国, 102529583. 2012-07-04.
- [33] Russell B A. USP, 8127809. 2013-08-08.
- [34] Russell B A. USP, 9004120. 2015-04-14.
- [35] Vision, the Michelin Concept Tire, An Expression of Mobility for the Future[EB/OL]. [2017-06-15]. <https://michelinmedia.com/michelin-vision-concept-tire>.
- [36] Michelin, GM Take the Air Out of Tires for Passenger Vehicles [EB/OL]. [2019-06-04]. <https://www.michelin.com/en/press-releases/michelin-gm-take-the-air-out-of-tires-for-passenger-vehicles/>.
- [37] Goodyear Introduces Airless Tire Technology for Commercial Mower Application[EB/OL]. [2017-09-25]. <https://corporate.goodyear.com/en-US/media/news/goodyear-introduces-airless-tire-technology-for-commercial-mower-application.html>.
- [38] Goodyear Advances Development of Airless Tire Technology for Commercial Mower Application [EB/OL]. [2017-09-27]. <https://www.goodyear.co.in/goodyear-advances-development-of-airless-tire-technology-for-commercial-mower-application>.
- [39] Goodyear Unveils Oxygene, A Concept Tire Designed to Support Cleaner and More Convenient Urban Mobility[EB/OL]. [2015-07-13]. <https://corporate.goodyear.com/en-US/media/news/goodyear-unveils-oxygene-a-concept-tire-designed-to-support-cleaner-and-more-convenient-urban-mobility.html>.
- [40] Nokian Hakkapeliitta 8 [EB/OL]. [2015-07-13]. <https://www.nokiantyres.com/winter-tyres/nokian-hakkapeliitta-8/>.

The Current Situation and Development of Novel Tire Structure

ZHU Hua-jian^{1,2}, NIU Jin-po², LI Fan-zhu^{1*}, HE Hong^{2*}, WANG Run-guo¹,
LU Yong-lai¹, ZHANG Li-qun¹

(1. *Center of Advanced Elastomer Materials (CAEM), Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*; 2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

Abstract: By reviewing the history of tire development, the main structural characteristics and existing defects of traditional tires represented by the bias tires and radial tires were analyzed, indicating that novel tires were in urgent need of development. And the representative novel tire products including non-pneumatic tires and new pneumatic tires were summarized. Then, their structural characteristics and unique advantages compared with traditional tires were discussed. The study provided a guide for the direction of the development of tires in the future. Compared with traditional tires, non-pneumatic tires are generally safe, energy-saving, environmentally friendly and easy to maintain. The development of new pneumatic tires is actually improvement of traditional tires based on the scene of application.

Key words: Non-pneumatic tires; Novel pneumatic tires; Structural features; Current situation and prospects