

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.02.023

纤维增强复合材料传动轴应用及设计技术研究

王丹勇, 陈以蔚, 李树虎, 秦贞明, 贾华敏, 马开宝

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要: 综述了纤维增强复合材料传动轴在工业领域的应用情况, 对复合材料传动轴力学性能影响因素进行了分析, 并探讨了结构承载破坏机制, 同时对目前公开发表的几种复合材料传动轴设计方法进行了介绍与分析, 并对今后研究动向进行了展望。

关键词: 复合材料; 传动轴; 设计; 应用

中图分类号: TB330.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)02-0092-05

Study of Application and Design on Fiber-reinforcement Composite Driveshafts

Wang Danyong, Chen Yiwei, Li Shuhu, Qin Zhenming, Jia Huamin, Ma Kaibao

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

Abstract: The application of the composite driveshafts in the fields of industry were presented. Effect factors for mechanical reinforcement of composite driveshafts and the failure mechanism of structures under loading were summarized. Several methods publicly published for design methods of composite driveshafts up to now were also introduced and analyzed. Finally, the future research trends were outlined.

Keywords: composites ; driveshaft ; design ; application

纤维增强复合材料由于具有高比强度、高比刚度、密度低、抗疲劳性能和减振性能好等优点, 在传动轴机械零件中具有广泛的用途。使用纤维增强复合材料代替原金属材料制备传动轴零件, 可在大幅减轻总体结构自重的同时, 减少噪声, 降低传动系统能量损失, 提高抗振性能(可提高转轴的振动固有频率以及最低临界转速)。

传动轴是众多机械结构中的一个重要零件, 在支承其它转动件回转的同时, 传递转矩动力。传动轴在不同的应用领域, 承载要求也不尽相同, 如在车辆中, 其转速较高, 达几千转/分, 扭转载荷相对较低; 而在大型风力发电机中, 转轴转速较低, 仅几十转/分, 而其扭转载荷达数千 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

传动轴零件端部往往受到径向载荷、轴向载荷、弯矩及扭矩的共同作用, 其设计安全性和合理性直接影响到整个机械系统的性能。为防止由于轴体端部产生过大的变形, 引起机械系统激烈振动, 导致机械系统无法正常运行, 在传动轴设计中, 使用合理的设计方法保证其具有足够的疲劳强度、弯曲强度以及刚度非常关键。由于纤维增强复合材料力学性能呈现各向异性, 原各向同性材料的金属传动轴设计方法已不再适用于复合材料传动轴设计, 需要一种新设计方法用于复合材料传动轴的安全设计。

近年来, 纤维增强树脂基复合材料制备传动轴的研究在国外虽已有一些研究, 但多使用试验方法, 而理论研究分

析尚不成熟, 到目前为止, 尚无可靠、实用的理论设计模型及方法可供工程安全使用。

笔者对近年来公开发表的在各领域应用纤维的增强树脂基复合材料传动轴状况进行总结, 对复合材料传动轴力学性能影响因素、破坏机制以及目前公开发表的几种理论设计方法进行分析, 为今后研究提供借鉴。

1 复合材料传动轴应用领域

纤维增强复合材料已在风力发电机叶片、机舱罩、导流罩、定桨矩风机叶尖刹车段的碳纤维轴等得到了应用, 然而复合材料在传动轴中的研发应用滞后于其在其它零部件中的应用。由于用于大功率输出的金属材料传动轴制造工艺复杂、质量大、安装费用高、抗疲劳性能差, 制约大功率风力发电机组整体发展。使用复合材料可进一步降低其自身质量, 减少对轴承、支撑塔架等结构的作用载荷, 降低磨损, 提高使用安全寿命, 目前使用复合材料制备的传动轴备受关注。德国教育与发展部在 2000 年前开展了“Pro-preform-RTM”项目研究^[1], 以 600 kW 风力发电机组为试验对象, 使用纤维增强复合材料将传动轴与轮毂制造成一个零部件, 解决了以往设计中两个零部件相互连接要大量使用螺栓连接件导致质量过重问题, 大幅降低了部件自身重量, 减轻了发

联系人: 王丹勇, 高工, 博士, 主要从事复合材料设计及性能研究

收稿日期: 2011-12-18

电机组总体质量,减小了基础作用载荷,降低了风力发电机的安装费用以及风场的运营成本。其设计方案如图1所示。

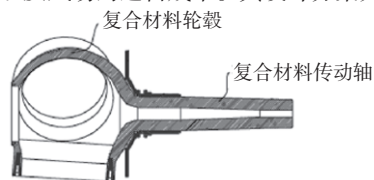


图1 复合材料轮毂与传动轴一体化制造设计简图

Emerson公司^[2]研发了用于风力发电机组变速箱与发电机之间连接的复合材料传动轴系统。对于型号为IXILFLEX-1300制品,额定转矩为186 kN·m,最大转速为800 r/min,质量仅为964 kg,如图2所示,轴体为碳纤维复合材料。LM公司则在风机刹车系统中开发使用了碳纤维增强复合材料传动轴,大大降低了结构自重^[3]。



图2 Emerson公司研发的复合材料传动轴系统简图

复合材料传动轴在航空、航天、船舶、汽车等领域也得到了研究应用。Centa公司研制了船用推进系统复合材料传动轴,如图3所示^[4]。相比传统金属传动轴减重70%,降低了噪声以及热膨胀变形,长度可达20 m,承载扭矩达1 000 kN·m,转速为3 000 r/min。

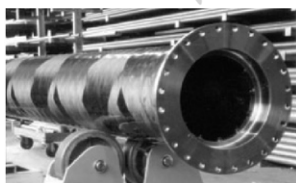


图3 Centa公司研制的船用推进系统复合材料传动轴

在汽车工业中,为减轻车体自重,减少油耗,复合材料传动轴开发已有多年历史。早在1985年,Dana公司在福特经济型厢式货车中研发了第一个车用复合材料传动轴,之后,通用汽车公司也在敞蓬小型载货卡车中采用了此类传动轴^[5]。复合材料的应用使轴体固有频率高出原金属传动轴两倍,轴系抗振能力大大提高。T. Kyono等^[6]认为复合材料传动轴在后轮驱动汽车中使用更有优势,对降低噪声、振动、大幅减重、增加输出功率都有优势。C. D. Kim等^[7]研发了车用新型复合材料传动轴,相比原金属轴系,减重40%。雷诺、丰田、奥迪汽车生产商为提高车辆撞击防护性能、避免原金属传动轴破坏产生的碎片飞溅伤人以及降低对车辆产生的反作用弹射力,上世纪末也相继在一些轿车中应用了复合材料传动轴,试验证明复合材料传动轴相比传统金属传动轴

有较大的扭转挠度,更有利于吸收冲击负载^[8]。

R. B. Ingle等^[9]在高速研磨机以及离心分离机中使用复合材料传动轴代替了传统金属传动轴,传动系统的抗振性能大大改善。D. G. Lee等^[10]使用高模量碳纤维增强复合材料设计了航空高速芯轴,相比不锈钢金属芯轴,静态及动态性能都得到了提高。美国UH-60MU飞机采用了复合材料传动轴代替了传统的铝、钛合金传动轴,有效降低了轴承接触区域热应力对传动系统的影响^[11]。

2 复合材料传动轴力学性能影响因素

由于复合材料自身具有各向异性特征,影响复合材料传动轴力学性能的因素要比金属传动轴多,了解这些不同于金属传动轴的影响因素,并在设计中加以考虑非常重要。

2.1 铺层方式的影响

H. B. H. Gubran等^[12-14]对等厚度及变厚度铺层方式复合材料传动轴内部应力分布状况对比研究时发现,在相同轴重情况下,变厚度铺层传动轴与等厚度铺层传动轴相比,轴内应力要小,固有频率提高了12%~17%,力学性能更优越。M. A. Badic^[15]在对玻璃纤维/碳纤维混杂增强复合材料传动轴力学性能研究发现,铺层顺序对结构转动固有频率基本没有影响,但对结构抗屈曲及抗疲劳性能影响很大。C. D. Kim等^[7]使用有限元技术对复合材料高速转轴静、动态特性进行了研究,结果表明,铺层顺序决定了复合材料转轴的弯曲刚度,动态力学性能对缠绕铺层方式非常敏感。

2.2 铺层角的影响

S. A. Mutasher^[16-17]对铝内衬外缠绕复合材料制成的复合传动轴静载扭转性能以及疲劳寿命进行了理论与试验研究,结果表明,纤维增强复合材料的使用,提高了结构弯曲固有频率;在应力比为 $R=-1$ 时,45°缠绕传动轴疲劳寿命明显比90°缠绕时高; $[\pm 45^\circ]_{3s}$ 缠绕的复合传动轴静载最大扭矩比纯铝传动轴高7.5倍。M. A. Badic^[15]在玻璃纤维/碳纤维混杂增强复合材料传动轴研究中给出了 $[\pm 45^\circ/0/90^\circ]$ 铺层方式是抗疲劳及抗屈曲失稳能力最佳的设计方案。Gubran等^[12-14]在类似的研究总结出45°缠绕层对提高扭转强度更有利、90°缠绕层有利于扭转屈曲强度、0°铺层有利于提高旋转临界速度以及缠绕角越大复合材料轴的弯曲刚度越小的结论。

2.3 不同纤维类型的影响

G. Sanjay等^[18]研究了玻璃纤维、高强度碳纤维及高模量碳纤维增强复合材料传动轴的力学承载性能,计算结果表明,与原金属传动轴相比,分别减重48.4%,86.9%,86.9%;高模量碳纤维增强复合材料传动轴固有频率最高,玻璃纤维增强复合材料传动轴固有频率最低。

2.4 材料组分含量的影响

R. Sino 等^[19]对纤维体积含量为 25%、45% 及 65% 的纤维增强树脂基复合材料传动轴转动固有频率以及阻尼因子进行了试验研究。结果表明,转动固有频率与结构阻尼因子随纤维体积分含量的增大,分别呈递增与递减趋势。

3 复合材料传动轴破坏机制

为了能够充分利用和开发纤维增强复合材料的潜在性能,正确地进行材料设计,了解复合材料传动轴的破坏机制是非常必要的。S. A. Mutasher 等^[16-17]研究了铝内衬外缠绕玻璃纤维以及碳纤维与玻璃纤维混杂增强缠绕复合材料制备的复合传动轴静、动态承载破坏机制。静态力学性能试验结果表明:铝内衬外缠绕玻璃纤维制备的复合传动轴在扭转载荷作用下,铝内衬首先发生塑性屈服,随着载荷增大,复合材料层沿纤维缠绕方向出现裂纹,损伤不断累积扩展,最终导致复合材料层与铝内衬产生分层脱离;而碳纤维与玻璃纤维混杂增强的复合传动轴在扭转载荷作用下,首先在复合材料层中出现基体开裂损伤,随着载荷逐渐增大,复合材料层发生纤维断裂,在接近传动轴结构整体破坏前,缠绕复合材料层与铝合金内轴发生分层损伤。对比不同缠绕角铺层,45°缠绕层抗扭能力明显大于 90°缠绕层。动态疲劳试验表明,复合材料缠绕层中,损伤起始于复合材料端部区域,随着疲劳加载次数的增加,损伤不断扩散,复合材料层与铝内衬表面分层损伤也逐渐出现并扩展。

T. Kyono 等^[6]研究了轴向压缩载荷作用时碳纤维增强树脂基复合材料传动轴破坏机理形式。结果表明,传动轴在常规设计(与金属轴粘接)时,易发生欧拉屈曲失稳破坏,其结构破坏过程瞬时、短暂,抗冲击能力弱;通过对复合材料传动轴端部与金属连接部位进行环向缠绕,并对其螺旋缠绕增厚设计,可使传动轴结构不发生屈曲失稳破坏,在汽车行业中应用,可提高其耐碰撞性能。试验过程还发现,在受到轴向压缩载荷作用时,复合材料传动轴在环向 90°缠绕内层与螺旋缠绕外层由于剪切应力集中首先发生分层损伤,损伤随着载荷的增加沿着轴向逐渐扩散延伸。

M. A. Badie^[15]在玻璃纤维/碳纤维混杂增强复合材料传动轴破坏机理研究中得出碳纤维缠绕层控制了整个结构破坏方式的结论。

复合材料传动轴破坏机制与缠绕复合材料结构形式密切相关,通过复合材料铺层合理设计,可避免结构低承载破坏模式出现。

4 复合材料传动轴设计方法

目前对纤维增强复合材料传动轴的研究以试验研究为主,由于复合材料传动轴承载行为较复杂,能应用于实际工程中的设计方法很少,主要理论分析模型及设计方法如下。

4.1 壳体模型法

研究人员使用薄壳经典理论或厚壳理论对复合材料传动轴进行结构设计及力学承载性能分析。如 H. Zinberg 等^[20]基于经典壳体理论预测了复合材料传动轴临界转速,并通过试验验证了复合材料传动轴相对铝合金传动轴拥有诸多优势。C. D. Kim 等^[7]使用壳体模型,考虑了 Coriolis 效应,预测了复合材料传动轴临界转速。K. Z. Lam 等^[21]使用 Donell, Loves 壳理论,对薄壁纤维增强复合材料传动轴振动特性进行了分析,并对其临界转速进行了预测,计算结果表明 Donell 壳理论仅适用于分析小长径比及薄壁传动轴,而 Loves 壳理论则适用于分析大长径比传动轴。D. Reis 等^[22]在有限元技术基础上,也应用 Donell 壳体单元计算得出薄壁纤维增强复合材料传动轴临界转速,并分析了动态载荷作用下结构力学性能。

L. W. Chen^[23]使用薄壳理论对轴向压缩载荷及扭转载荷作用下复合材料轴失稳行为进行预测分析。O. A. Bauchau 等^[24-25]使用普通壳体模型预测了石墨纤维增强树脂基传动轴扭转屈曲临界载荷,预测结果与试验结果吻合较好。G. Sanjay 等^[18]使用线性层合壳体理论对复合材料传动轴振动模态、屈曲失稳进行了计算分析。D. Zorica 等^[26]使用壳体单元有限元分析方法对铝内衬外缠绕玻璃纤维复合材料制备的复合传动轴固有频率、临界屈曲扭矩进行了计算分析,结果表明,复合传动轴的振动及抗屈曲性能明显优于钢及铝合金材料传动轴。

4.2 梁模型法

将复合材料传动轴简化成梁模型,对其力学承载性能进行计算分析。S. P. Singh 等^[27-29]将复合材料传动轴简化成 Timoshenko 梁模型,对其振动动态特性进行分析,计算结果表明:当传动轴长径比大于 12 时,与使用壳体模型法计算的结果吻合较好。H. B. H. Gubran 等^[12-14]使用简支 Timoshenko 梁建立了纤维增强复合材料转轴分析模型,分别对其变厚度及等厚度铺层方式结构内部应力应变场进行了计算分析表明,在转轴等重设计条件下,变厚度铺层结构轴内应力相比等厚度铺层结构要小。H. Ghoneim 等^[30]同样采用 Timoshenko 梁理论模型,应用有限元分析技术对复合材料传动轴振动特性进行了分析。C. W. Bert 等^[31-32]则使用 Bresse-Timoshenko 梁理论模型预测了复合材料传动轴的临界转速。

H. Zinberg 等^[20]使用等效模量梁方法将复合材料传动轴假定为一个薄壁圆管结构,对其临界转速进行了预测。A. Boukhalfa^[33]使用阶谱梁单元对复合材料转轴自由振动特性进行了分析。

M. Y. Chang 等^[34-35]基于第一阶剪切变形梁理论,分析

了横剪切变形、转动惯量、陀螺回转效应、层合板耦合效应对复合材料传动轴力学性能的影响,并预测了其振动性能。O. Song 等^[36]也使用梁理论模型对复合材料传动轴固有频率以及稳定性能进行了计算,并对不同缠绕角对转轴承能力的影

4.3 实体层合模型法

由于壳体模型及梁模型都对复合材料传动轴进行了过多简化处理,并不能用来全面地分析整体结构应力应变场、材料损伤机理及破坏机制,因此, R. B. Ingle 等^[9]使用实体层合模型对碳纤维增强复合材料传动轴进行几何建模,并应用层合板宏—细观力学分析方法对结构损伤失效及破坏强度进行了分析,计算结果表明,在几种不同缠绕铺层方式的传动轴结构中, $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{2S}$ 或 $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3S}$ 缠绕方式的传动轴力学承载性能较好。

4.4 优化设计方法

可设计性是纤维增强复合材料应用于传动轴结构中的优势特点,使用合理的优化设计方法可使复合材料传动轴达到结构设计与材料设计的高度统一。

O. A. Bauchau 与 M. S. Darlow 等^[24-27]使用常规数学规划设计技术对复合材料轴等厚度及变厚度铺层角进行了优化设计,该方法设计变量是连续的。而实际结构的工程优化,设计变量往往是不连续的。

一些基于离散设计变量的优化技术被应用于复合材料传动轴铺层数、铺层角、层厚等参数的结构优化设计。T. Ranganwamy 等^[38-39]使用遗传算法对车用玻璃纤维及碳纤维增强复合材料传动轴总体质量参数进行了优化设计,使用玻璃纤维增强复合材料传动轴可比原金属钢结构传动轴减重 48.36%,使用碳纤维增强复合材料传动轴同比减重 86.90%。O. Montagnier 等^[40]采用遗传算法对混杂纤维增强复合材料传动轴缠绕角及铺层顺序进行了优化分析。H.B.H. Gubran 等^[14]使用模拟退火法优化了复合材料传动轴等厚度、变厚度铺层角及壁厚参数。

4.5 抗振设计方法

转轴和轴系在工作时会产生两类主要振动形式:横向振动和扭转振动。如何有效提高复合材料传动轴抗振性能,科研人员也进行了研究探讨。

(1) 预埋形状记忆合金法 S. P. Singh 等^[29]在纤维增强复合材料转轴中预埋了形状记忆合金金属丝,结果显示可有效降低振动幅值。A. Baz 等^[41]在复合材料转轴中预埋镍钛金属互化物金属丝,通过激发金属丝可使转轴振动幅值降低 50%。K. Nayaga 等^[42]在转轴支撑处使用形状记忆合金,有效控制了转轴临界转速, K. Gupta^[43]在类似的研究中也得出相同的结论。

(2) 增加约束层法 H. Ghoneim 等^[30]通过在复合材料传动轴中增加一个轻质、刚性约束空心轴体(如高模量碳纤维增强树脂复合材料)实现提高传动轴整体结构弯曲频率与阻尼比。

(3) 固有频率设计 对于复合材料传动轴固有频率的预测,研究人员给出了简化计算公式。S. S. Rao^[44]在忽略横向剪切变形影响条件下,基于 Bernoulli-Euler 梁理论,给出了传动轴固有频率计算公式:

$$f_{nb} = \frac{\pi p^2}{2L^2} \sqrt{\frac{E_x I_x}{m}} \quad (p = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: L 为轴长, E_x 为轴向模量, I_x 为惯性矩, m 为轴质量。

J.W. Lim 等^[45]则基于 Timoshenko 梁理论,给出了考虑横向剪切变形影响因素时传动轴固有频率计算公式:

$$f_{nt} = K_s \frac{30\pi p^2}{L^2} \sqrt{\frac{E_x r^2}{2\rho}} \quad (p = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中: K_s 为横向固有频率的剪切系数, r 为传动轴内径。

由式(1)及式(2)可以看到,增加轴向弹性模量、轴内径、选择轻质材料均可提高传动轴固有频率。

4.6 抗屈曲失稳设计方法

对于长、薄壁复合材料传动轴,在扭转载荷作用下,易发生扭转屈曲失稳破坏,使传动轴承载水平大大降低。S.R. Swanson^[46]对此进行了研究,并给出薄壁复合材料传动轴临界扭转屈曲载荷 T_{cr} 简化计算公式:

$$T_{cr} = 2\pi r^2 t \times 0.272 \times (E_x E_y)^{0.25} \times (t/r)^{1.5} \quad (3)$$

式中: t 为轴壁厚, E_x 为轴向材料模量, E_y 为周向材料模量。

由式(3)可以看出,提高相应设计变量皆可提高传动轴抗屈曲承载能力。

5 展望

纤维增强复合材料应用于传动轴零件上的研究已由单一试验研究过渡到以试验和计算方法相结合的理论设计研究。由于纤维增强复合材料传动轴破坏机理较为复杂,建立适合工程需要的设计方法仍然是一个难题,也是工程界迫切需要解决的关键问题之一。

未来复合材料传动轴应用及设计研究工作主要包括:

- (1) 使用低成本制备技术解决其造价偏高问题;
- (2) 建立有效、准确、便于工程应用的通用设计方法,指导传动轴设计;
- (3) 深入揭示复合材料传动轴损伤失效机制,为可靠提升传动轴承载能力提供基础依据。

要充分发挥复合材料在传动轴零件中应用的最大潜力,尚需对其进行大量设计技术研究。随着纤维增强复合材料传动轴研究的深入,对有关增强复合材料的主要物理本质及破坏强度预测会更加准确。

参考文献

- [1] Schmidt R, et al. Global Windpower Conference, Paris, France, 2002 : 1-16.
- [2] Jaure S A. IXILFLEX Coupling, 2011 : 1-16.
- [3] LM Corporation. LM NewsLetter, 2002 : 1-5.
- [4] Centa Corporation. Centa carbon fibre technology [EB/OL]. <http://pdfszone.com/pdf/centa.html>.
- [5] Kim J K, et al. Journal of Composite Materials. 2001, 35 (11) : 999-1021.
- [6] Kyono T, et al. Carbon fiber composites applications for auto industries [EB/OL]. <http://www.docstoc.com/search/auto-industries>.
- [7] Kim C D, Bert C W. Composites Engineering, 1993, 3 : 633-643.
- [8] Pollard A. Journal of Composite Structures, 1989, 25 : 165-175.
- [9] Ingle R B, et al. Journal of Scientific and Industrial Research, 2005, 64 : 571-580.
- [10] Lee D G, et al. Journal of Composite materials, 2000, 34 : 1150-1175.
- [11] Garhart J. 19th AeroMat Conference & Exposition, 2008 : 1-11.
- [12] Gubran H B H, et al. International Journal of Rotating Machinery, 2000, 6 (4) : 235-244.
- [13] Gubran H B H, et al. International Journal of Rotating Machinery, 2002, 8 (4) : 275-283.
- [14] Gubran H B H, Gupta K. International Journal of Rotating Machinery, 2002, 8 (4) : 285-293.
- [15] Badie M A. Thesis of the degree of master of science in university of putra malaysia, 2007 : 1-14.
- [16] Mutasher S A. Dissertation for the degree of doctor of philosophy, 2006 : 1-15.
- [17] Mutasher S A, et al. American Journal of Applied Sciences, 2005, 67-71.
- [18] Sanjay G, et al. Department of mechanical engineering blekinge institute of technology, Karlskrona, Sweden, 2007.
- [19] Sino R, et al. Composites Science and Technology, 2008, 68 (2) : 337-345.
- [20] Zinberg H, Symonds M F. 26th Annual Forum of The American Helicopter Society, Washington D C, June 1970.
- [21] Lam K Z, Loy C T. Composites Engineering, 1994 (4) : 1153-1167.
- [22] Reis D, et al. Journal of Composites Technology and Research. 1987 (9) : 58-62.
- [23] Chen L W. Journal of Composites Structures, 1998, 41 : 253-263.
- [24] Bauchau O A. Journal of Composite Materials, 1983, 17 : 170-181.
- [25] Bauchau O A, et al. Journal of Composite Materials. 1998, 22 : 258-270.
- [26] Zorica D, et al. Scientific Technical Review, 2008, 2 (8) : 3-7.
- [27] Singh S P, et al. International Journal of Rotating Machinery, 1997, 3 (3) : 189-198.
- [28] Singh S P, et al. Proceedings of the international conference on advances in mechanical engineering, 1995, 1205-1221.
- [29] Singh S P, et al. Journal of Sound and Vibration, 1994, 172 : 171-190.
- [30] Ghoneim H, et al. Journal of Vibration and Control, 2006, 12 (1) : 25-55.
- [31] Bert C W, et al. Journal of Vibration and Acoustics, 1995, 117 : 17-21.
- [32] Bert C W, et al. Dynamics and Stability of Systems, 1995, 2 : 125-147.
- [33] Boukhalfa A. Advances in Vibration Analysis Research. Ebrahimi F edition, 2011 : 161-186.
- [34] Chang M Y, et al. Composite Structures, 2004, 63 : 21-32.
- [35] Chang M Y, et al. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41 : 637-662.
- [36] Song O, et al. Journal of Sound and Vibration, 2002, 257 (3) : 503-525.
- [37] Darlow M S, Creonte J. Journal of American Helicopter Society, 1995, 40 (2) : 50-60.
- [38] Rangaswamy T, et al. Materials Science, 2005, 11 (2) : 133-139.
- [39] Rangaswamy T, et al. International symposium of research students on materials science and engineering, Chennai India, 2004 : 1-9.
- [40] Montagnier O, et al. 13th European conference on composite materials, Stockholm, Sweden, 2008 : 1-2.
- [41] Baz A, et al. Smart Structure and Intelligent Systems, 1993, 1917 : 791-808.
- [42] Nayaga K, et al. Journal of Sound and Vibration, 1987, 113 (2) : 307-315.
- [43] Gupta K. International Journal of Rotating Machinery, 2000, 6 (3) : 201-213.
- [44] Rao S S. Mechanical vibrations. New York: Addison-Wesely publishing Company, 2002 : 537-541.
- [45] Lim J W, et al. Journal of American Helicopter Society, 1986, 31 (1) : 75-83.
- [46] Swanson S R. Introduction to design and analysis with advanced composite materials. NJ : Prentice-Hall. 1997.

全球 LLDPE 需求稳步增长

LLDPE 全球市场需求稳步增长,主要推动因素是亚太地区及东欧国家 LLDPE 行业的持续发展。

亚洲地区 LLDPE 需求占近 42%,预计将居首位。而北美及欧洲的成熟市场 LLDPE 需求增长有限,据报道,这些地

区已达到市场饱和水平。因此 LLDPE 产能增长因这些市场而受限。至 2017 年,全球 LLDPE 消费量将以 4%~4.5% 的预计年增长率上升。包装及建筑行业是 LLDPE 需求上涨的主要推动力。此外,发展中国家扩产计划将进一步促进 LLDPE 行业增长。(中塑在线)