

复合材料传动轴的应用及技术研究进展

常燕¹, 朱涛¹, 孙士祥¹, 唐凯¹, 孟祥武¹, 段立峰¹, 李元哲²

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 临沂市产业技术研究院, 山东临沂 276037)

摘要: 简要介绍了复合材料传动轴的应用及研究情况, 总结了复合材料传动轴设计中的重要技术, 包括轴管的结构、材料、纤维铺设角度及铺层顺序、接头连接的方式, 概述了复合材料传动轴的制备方法, 并展望了复合材料传动轴的设计及制造技术的研究方向。

关键词: 复合材料; 传动轴; 设计; 制造

中图分类号: TH162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)07-0154-04

Application and Advance in Technology Research of Composite Drive Shaft

Chang Yan¹, Zhu Tao¹, Sun Shixiang¹, Tang Kai¹, Meng Xiangwu¹, Duan Lifeng¹, Li Yuanzhe²

(1. Shandong Nonmetallic Material Institute, Jinan 250031, China; 2. Linyi Institutes of Industrial Technology, Linyi 276037, China)

Abstract: The research and application of the composite drive shafts were briefly presented, and the important design technologies on structure of axle tube, material, fiber orientation angle and stacking sequence, joint connection for composite drive shaft were summarized. The processing of composite drive shaft were introduced, and the further research directions about design and fabrication technologies for composite drive shaft were prospected.

Keywords: composite; drive shaft; design; fabrication

1 复合材料传动轴的应用

传动轴大多用金属材料制备, 而金属传动轴质量太大, 不利于节约能源, 复合材料传动轴因其质量轻受到青睐, 特别是一片式复合材料传动轴, 可代替两片式金属传动轴, 减少装配时间, 便于维护, 节约库存成本^[1]。除此之外, 复合材料传动轴还有很多优点^[2-3]: 比如强度和比刚度高、固有频率高、结构简单、耐腐蚀性好、耐磨性好、热膨胀系数小和减振性能好。正是因为这些优越特性, 复合材料传动轴在汽车、航空航天、船舶、机床、冷却塔风机等领域也得到了广泛应用^[4-5]。特别是在汽车工业, 很多研究者和企业都致力于在保证复合材料传动轴质量可靠性的同时, 减轻传动轴质量^[6-8]。

英国 GKN 技术公司^[9] 开发出质量减轻一半以上的纤维增强塑料传动轴, 其弯曲刚度和抗扭性都比钢轴好。日本藤仓橡胶工业公司^[10] 以碳纤维预浸料为原料, 研发出了质量减轻 50%、扭转强度提高 20% 的复合材料汽车传动轴。该传动轴由两端的钢件和中央的碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 管件构成, 连接管件与短轴时, 将短轴的花键部位压入 CFRP 管件, 并在短轴与 CFRP 管件的粘接部位包覆粘

接钢外壳。CG TEC GmbH^[11] 采用预浸料卷绕技术, 制备出高性能的复合材料传动轴。美国 QA1 公司为通用和福特开发了一系列碳纤维传动轴, 比铝和钢的传动轴更轻、更硬、更强和更安全。目前, 很多碳纤维复合材料传动轴已在宝马、奥迪、丰田等车型上得到了成熟的应用^[12]。

2 复合材料传动轴的设计

复合材料轴管和金属接头连接在一起组成复合材料传动轴, 而复合材料传动轴的性能与轴管的性能、轴管与金属接头的连接方式相关, 轴管的性能又取决于轴管的结构及材料, 纤维的铺设角度及铺层顺序。

2.1 轴管的结构及材料

轴管一般分为两种结构, 单一复合材料轴管和混合复合材料轴管。

单一复合材料的轴管是指以碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维、红麻纤维或其它纤维为增强相, 以环氧树脂、不饱和聚酯或其它树脂为基体制备的复合材料轴管^[13]。纤维的种类决定了复合材料轴管的强度和硬度, 碳纤维因密度低, 力学性能优异, 常用于制备飞机用传动轴, 但碳纤维成

通讯作者: 常燕, 研究生, 从事复合材料制备工作 E-mail: chy-2j-1@163.com

收稿日期: 2020-05-19

引用格式: 常燕, 朱涛, 孙士祥, 等. 复合材料传动轴的应用及技术研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(7): 154-157.

Chang Yan, Zhu Tao, Sun Shixiang, et al. Application and advance in technology research of composite drive shaft[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7): 154-157.

本高,在其它应用时一般选择玻璃纤维或玻璃纤维与碳纤维混杂。材料的种类决定了传动轴的固有频率,同样工艺条件下,碳纤维传动轴比玻璃纤维传动轴的固有频率要小^[14]。

环氧树脂(EP)具有强度高、纤维润湿性好、固化收缩率低、尺寸稳定性好等优点,在复合材料轴管上得到广泛的应用。用球形纳米 SiO_2 改性的EP性能更好,用其制备的复合材料的轴管,压缩强度增加,耐磨性提高,使用寿命更长^[15]。

混合复合材料轴管一般分为两种结构:一种内层为复合材料,外层为金属管;另一种内层为金属管,外层为复合材料。在汽车传动轴中,前一种混合传动轴运用较多,其中的碳纤维一般用作内层的复合材料,铝合金、铝镁合金等一般用作外层的金属管,内层的碳纤维复合材料既能增强整体传动轴的强度和刚度,又能提高轴管的固有频率,外层的金属管主要用于扭矩传递^[16]。一般碳纤维是直接贴合在金属管内表面的,但是,在其固化过程中,碳纤维和金属管的接触面会产生残余热应力,会对碳纤维复合材料层造成损伤,为了减小残余热应力,在金属管与碳纤维铺层中间最好铺放玻璃纤维复合材料。在后一种轴管结构中,由于内层材料为金属管,可使用焊接或螺钉连接金属接头。

2.2 纤维铺设角度及铺层顺序

纤维铺设角度对复合材料传动轴的固有频率影响很大,铺设角度越小,复合材料传动轴的固有频率越高^[17];纤维铺设角度也影响复合材料传动轴的力学性能,纤维铺设角为 45° ,传动轴具有较好的性能,其承载能力、剪切强度和扭转强度较高;当纤维铺设角为 90° 时,传动轴的纵向弯曲强度较高^[18]。

铺层顺序影响复合材料传动轴的扭转强度和重量,不影响固有频率^[19-20]。

在复合材料传动轴中,较薄弱的地方是复合材料轴管与金属接头的连接处,为了更好地传递扭矩,连接处必须足够可靠牢固。复合材料轴管与金属接头的连接方式很多,主要分为三类:胶连接、机械连接、混合连接。

(1) 胶连接。

胶连接是指将复合材料轴管与金属接头用胶粘剂粘接在一起,这种连接方式效率高,操作简单,成本低,但是,胶接质量不好控制,胶接处的剥离强度低且极易老化,胶连接为不可拆卸连接,后期修补困难,且不方便在轴管与金属接头胶接处施加压力。由于胶连接时,且只能通过界面间的胶层传递载荷,故胶连接一般用于承载小扭矩载荷、工作环境不太恶劣的情况。

胶接时,碳纤维传动轴与金属接头的搭接接头处的连接形状一般为圆形连接,也有正多边形连接、椭圆形连接等,搭接接头处的连接形状对扭转性能的影响规律为^[21]:正多边形连接的扭转性能优于圆形连接,圆形连接的扭转性能优

于椭圆形连接,但是正多边形连接加工起来比较复杂,不适合工业化生产。

(2) 机械连接。

机械连接是指将复合材料轴管与金属接头用机械连接的方式连在一起。这种连接方式装卸方便,质量可靠,连接处的剥离强度高,能传递大扭矩载荷,但是,机械连接极易产生应力集中问题。机械连接一般用于承载较大扭矩载荷,可靠性要求较高的情况。

常见的机械连接方式有销钉连接、螺栓连接、齿纹式连接等,其中,螺栓或铆钉连接是指用螺栓或铆钉将复合材料轴管与金属接头沿着径向方向贯穿连接在一起,这两种连接操作简单,成本低,但是因为要在复合材料轴管上打孔,破坏了轴管上纤维的连续性,降低了轴管的强度,为了消除对轴管强度的不良影响,可在连接处的复合材料部位套接补强套管^[22]。

郑总政^[23]在研究汽车碳纤维复合材料混合传动轴时,采用了齿纹式连接,齿纹式连接避免了在轴上打孔,也避免了胶连接容易产生的弱胶接问题,故齿纹式连接承载能力强,应力集中较小。

杨敏超^[24]在设计重型卡车碳纤维复合材料传动轴时,因重型卡车对传动轴的连接强度要求很高,传统的齿纹式连接不能满足要求,故传动轴轴管与金属接头采用了高抗剪抽芯铆连接。经过载荷试验,结果表明,在破坏载荷分别为 $414\,000$, $39\,250\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $42\,900\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,金属轴头失效,而连接部分没有被破坏。

(3) 混合连接。

混合连接是指在复合材料轴管与金属接头连接时,同时使用胶连接和机械连接。混合连接可以提高传动轴连接处的破损安全性和抗剥离性能,适用于对安全破损性要求较高的情况。

3 复合材料传动轴的制备方法

制备复合材料传动轴时,一般需要两个重要的环节,一是复合材料轴管与金属接头连接,另一个是复合材料轴管的制备,其中复合材料轴管的制备方法是传动轴制备的难点。

3.1 单一复合材料轴管制备方法

制备单一复合材料轴管的方法很多,常见的有纤维缠绕工艺、搓卷工艺、树脂传递模塑(RTM)工艺以及由此衍生的真空辅助RTM,气囊/真空辅助RTM工艺等。较常用的纤维缠绕工艺是将浸过树脂胶液的连续纤维(或布带、预浸纱等)按照一定的角度和铺层顺序缠绕在芯模上,再经固化、加工、脱模等工序,获得制品。在固化时,为了增加产品的致密性,也可以采用热压罐固化^[25]。有研究者使用膨胀轴作为芯模,把预浸料缠绕在膨胀轴上后,在外面装配圆柱形型腔,并置于热压罐中成型,开罐后收缩膨胀轴,打开圆柱形型

腔,脱模得到复合材料轴管,这种制备方法可排除轴管内的气泡,减少成型缺陷,相比于一般的缠绕成型,能在大扭矩传递时承受较大的拉压应力^[26]。

比较常用的还有一种制备工艺是搓卷(也称卷搓)成型工艺,它是利用上台面的移动将放在下台面上的预浸料缠绕在芯轴上,加热并借助于热收缩膜施加压力而制造管件的成型方法。很多研究者^[24,27]用该方法制备了高屈服扭矩的复合材料传动轴。

RTM工艺也是比较常见的制备方法,该工艺的具体做法是:在模具的型腔中放置纤维增强材料预成型体,闭模并加温加压,将树脂胶液注入模腔,浸透纤维增强材料,经固化、脱模得到制品。纤维增强材料预成型体可以采用三维编织技术制备,构成预成型体的纤维丝束在空间交织,使产品没有层的概念,增强了传动轴的抗损伤、抗冲击的能力^[28]。

传统的RTM工艺纤维极容易浸渍不良和出现气孔,为了克服这些缺点,衍生出了真空辅助RTM、气囊/真空辅助RTM、软模辅助RTM工艺。

真空辅助RTM工艺的具体做法是:在RTM模具的出胶口上连接真空系统,在树脂注入模腔前将浇注口密封,在出胶口持续抽真空,抽去纤维层中的气体,在真空形成的负压作用下,树脂浸渍预成型体上的纤维,固化脱模后得到制品。这种制备方法成本低,使用广泛,适合整体成型传动轴。

如果预成型体所用的织物壁厚较厚,利用真空RTM工艺很难一次整体成型,可以利用气囊作为型芯并结合真空辅助RTM工艺制造方法,这种方法称为气囊/真空辅助RTM工艺,具体做法为:将预成型体铺放在气囊上,置于刚性的凹模中,借助抽真空的方法把树脂注入模腔,通过气囊充气膨胀控制气囊压力,对预成型体施加压力,固化、脱模后得到制品。利用气囊增压可压实构件,减少成型缺陷,提高传动轴力学性能。

相比传统RTM工艺,气囊/真空辅助RTM工艺制造的制件较易脱模。相比传统真空辅助RTM工艺,气囊/真空辅助RTM工艺制造的制件致密性和力学性能更好,主要是因为气囊有加压挤胶的作用,可以降低制件的树脂含量。

3.2 混合复合材料轴管的制备方法

内层为复合材料外层为金属管的混合复合材料轴管通常采用共固化工艺,这种共固化工艺是指:在同一个固化周期中,同时完成内层复合材料的固化成型和外层金属管与复合材料的胶接成型,进而制备出整体制件的工艺方法。

张静等^[29]用热膨胀组合法方法制备混合复合材料轴管,具体方法为:在热膨胀组合模(铝制芯模及其外部的硅橡胶软模组成)外表面上涂上脱模剂,贴上一层脱模布,将浸渍有树脂胶液的碳纤维织物和玻璃纤维织物紧贴在热膨胀组合模上,将贴有织物的热膨胀组合模塞入金属管,加热

固化,热膨胀组合模可依靠热膨胀对织物施加压力,使其紧贴金属管内壁上,冷却后,取出热膨胀组合模,撕下脱模布,得到复合材料传动轴轴管。

内层为金属管外层为复合材料结构的混合复合材料轴管采用的制备方法为:直接在金属管上用缠绕法做成坯件,再经热压罐固化得到混合传动轴管。

3.3 一体成型复合材料传动轴制备方法

一体成型复合材料传动轴的制备方法是指在制备复合材料轴管的过程中,将金属接头与复合材料轴管一起固化连接起来,这种制备方法省去了复合材料轴管加工后的连接工序,更容易进行工业化生产。

该工艺一般先将金属接头连接在芯模上,形成缠绕轴管,然后再经湿法缠绕固化成型^[30]。也可以将三维编织管预成型体套装在金属端部接头的一端,然后经过复合材料成型工艺固化成一体结构^[31]。还有一种带硬质泡沫管复合材料传动轴的一体成型方法^[32],这种方法先在芯模上套装硬质泡沫管,将法兰套在硬质泡沫管轴向两端,经湿法缠绕、固化,脱除芯模得到由法兰、硬质泡沫管和浸胶纤维组成的复合材料传动轴,内层的硬质泡沫管可以减少振动和噪声,提高复合材料传动轴的刚度。

B.博弗鲁^[33]发明了一种一体成型方法,这种方法主要靠特殊的芯轴实现的,该芯轴包括两端膨胀部分和中间段的不可膨胀部分,先在整个芯轴上缠绕预浸渍纤维长丝,然后将金属接头分别套装在芯轴两端的膨胀部分,然后让膨胀部分膨胀,使浸渍纤维填充金属接头内表面上的花键基部的凹槽,经一体固化,脱出芯轴,修整后得到复合材料传动轴。

还有一种一体成型的方法^[34]是将法兰颈的内表面加工8个半圆,在复合材料轴管的外表面上也加工8个半圆,这样法兰和复合材料轴管装配后会形成一个圆孔,销钉插入圆孔就可以起到定位的作用。为了加强法兰和复合材料轴管的连接强度,销钉插入后,再将传动轴整体进行固化。

在一体成型工艺中,为避免复合材料层从金属接头上脱落,增加连接的可靠性,一般在金属接头与复合材料轴管连接的周向表面上设置凹凸结构(凹凸结构可以是凹槽、锯齿、旋转方向不同的螺纹等),使不被破坏的连续浸胶纤维或预浸纱填充这些凹凸结构,也有在金属接头和预浸布上嵌入微细杆(Z-pin)以增加连接强度,这种连接方式比相同条件下的胶接效果要好,Z-pin连接端的扭转强度约是胶接的1.66倍^[35]。

4 展望

复合材料传动轴的应用领域变得越来越广泛,复合材料传动轴的设计和制备技术就显得尤为重要。做好未来复合材料传动轴设计和制造研究工作需从以下方向努力:

(1) 合成纤维制备的复合材料难以降解,给环境造成了

很大的压力,天然纤维因其具有环境友好的特点,有望成为制备传动轴的新型材料。但是天然纤维复合材料强度低,还需要进一步研究增强天然纤维及其复合材料的方法。

(2) 复合材料传动轴中的轴管一般为复合材料制品,接头为金属件,为了传动轴更加轻量化,需要将金属接头制备成复合材料。

参考文献

- [1] Tataroğlu S, et al. Key Engineering Materials, 2016, 706:73–77.
- [2] Nadeem S K S, et al. Materials today:Proceedings, 2018, 5(1):2 738–2 741.
- [3] 时玉艳,等. 振动与冲击, 2017, 36(7):45–56.
Shi Yuyan, et al. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7):45–56.
- [4] 廖仁,等. 设备管理与维修, 2018(10):150–152.
Liao Ren, et al. Plant Maintenance Engineering, 2018(10):150–152.
- [5] 张纯金,等. 机械设计与制造, 2019(9):67–70.
Zhang Chunjin, et al. Machinery Design & Manufacture, 2019(9):67–70.
- [6] Reddy P S K, et al. Materials Today:Proceedings, 2017, 4(2):2 390–2 396.
- [7] Karthikeyan P, et al. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2017, 197.doi:10.1088/1757-899X/197/1/012048.
- [8] Hatwar P K, et al. International Journal of Science and Research, 2015, 4(4):1955–1 960.
- [9] 陶雷. 碳纤维复合材料汽车传动轴结构优化及性能评价 [D]. 上海: 东华大学, 2017.
Tao Lei. Structural optimization and performance evaluation of carbon fiber composite materials automotive driveshaft[D]. Shanghai:Donghua University, 2017.
- [10] 佚名. 高科技纤维与应用, 2016, 41(3):58.
Anon. Hi-tech Fiber & Application, 2016, 41(3):58.
- [11] 杨珍菊. 纤维复合材料, 2016(3):27–40.
Yang Zhenju. Fiber Composites, 2016(3):27–40.
- [12] Liu Jiancai, et al. Study of the design and torsion performance for carbon fiber composite material automobile drive shaft[C] // Proceedings of SAE–China Congress 2016:Selected Papers. Berlin:Springer, 2016:303–312.
- [13] Misri S, et al. Materials and Design, 2015, 65:953–960.
- [14] James P R B, et al. Materials today:Proceedings, 2016, 3(10):3 673–3 679.
- [15] Anon. Reinforced Plastics, 2015, 59(3):106.
- [16] Kim H S, et al. Composite Structures, 2005, 70(1):33–47.
- [17] Arab S B, et al. Composite Structures, 2017, 178:135–144.
- [18] Badie M A, et al. Materials and Design, 2011, 32:1 485–1 500.
- [19] Kim T Y, et al. Modern Physics Letters B, 2019, 33(1). doi:10.1142/S0217984919400293.
- [20] Sevkati E, et al. Materials and Design, 2014, 60:310–319.
- [21] 章莹. 连接形状对碳纤维传动轴扭转性能的影响 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
Zhang Ying. Research of joint shapes on torsional performance of CFRP drive shaft[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2013.
- [22] 王钧,等. 车用复合材料传动轴及其制备方法 :CN, 108799315 A [P].2018-11-13.
Wang Jun, et al. Composite drive shaft for vehicle and its preparation :CN, 108799315 A[P].2018-11-13.
- [23] 郑总政. 科技与创新, 2016(8):81.
Zheng Zongzheng. Science and Technology & Innovation, 2016(8):81.
- [24] 杨敏超. 科技与创新, 2017(11):25–26.
Yang Minchao. Science and Technology & Innovation, 2017(11):25–26.
- [25] 马祥禹,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(8):5–9.
Ma Xiangyu, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017(8):5–9.
- [26] 吕保杰,等. 一种复合材料轴及其制备方法和应用 :CN, 109109340 A [P].2019-01-01.
Lyu Baojie, et al. Composite shaft and its preparation and application:CN, 109109340A[P].2019-01-01.
- [27] 杨兆国,等. 汽车工艺与材料, 2017(7):33–37.
Yang Zhaoguo, et al. Automobile Technology & Material, 2017(7):33–37.
- [28] 申付朋. 编织复合材料传动轴的数值模拟及分析软件开发 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
Shen Fupeng. Numerical simulation and development of analysis software about braided composite materials transmission shaft[D]. Qinhuangdao:Yanshan University, 2016.
- [29] 张静,等. 整体式金属–复合材料传动轴及其成型工艺 :CN, 105003525 A [P].2015-10-28.
Zhang Jing, et al. Integral metal-composite drive shaft and its molding process:CN, 105003525A[P].2015-10-28.
- [30] 颜永生,等. 一种玻璃纤维传动轴 :CN, 108150518A [P].2018-06-12.
Yan Yongsheng, et al. A kind of glass fiber composite drive shaft:CN, 108150518A[P].2018-06-12.
- [31] 刘念. 三维编织管预成型体与端部接头的一体化结构 :CN, 208468854U [P].2019-02-05.
Liu Nian, et al. Integrated curing structure of 3–D braiding tubes performs and end joint integration structure composite drive shaft and its molding process:CN, 208468854U[P].2019-02-05.
- [32] 张乾仁,等. 复合材料传动轴及该复合材料传动轴的成型工艺 :CN, 106545566A [P].2017-03-29.
Zhang Qianren, et al. Composite drive shaft and its molding process:CN, 106545566 A[P].2017-03-29.
- [33] B. 博弗鲁. 传动轴及其生产方法 :CN, 106794643A [P].2017-05-31.
B. Bofulu. Transmission shaft and its production method:CN, 106794643A[P].2017-05-31.
- [34] 刘畅,等. 科学家, 2017(23):76–79.
Liu Chang, et al. Scientist, 2017(23):76–79.
- [35] 任庆. 碳纤维复合材料传动轴 Z-pin 连接增强机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
Ren Qing. Research on Z-pin connection enhancement mechanism of carbon fiber composite transmission shaft[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2017.