

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.05.020

环氧树脂基碳纤维复合材料摩擦层的摩擦性能研究^{*}曹伟伟^{1,2}, 龙国荣^{1,3}, 朱波⁴, 朱文韬⁴, 卞志勇^{1,3}, 李胜业¹(1. 泰山体育产业集团有限公司, 山东德州 253600; 2. 天津工业大学材料科学与工程学院, 天津 300387;
3. 国家体育用品工程技术研究中心, 山东德州 253600; 4. 山东大学材料科学与工程学院碳纤维工程技术中心, 济南 250061)

摘要: 为了提高碳纤维 (CF) 自行车轮毂的寿命, 研究了以 SiC 颗粒改性的环氧树脂为基体, CF 平纹布为增强体的复合材料在不同载荷、不同摩擦环境及不同 SiC 含量情况下的磨损量与摩擦系数。结果表明, 增大载荷和湿态 (水润滑) 的摩擦环境会不同程度地增加复合材料的磨损量, 同时随着 SiC 填料含量的增加, 复合材料的耐磨损性能增加。

关键词: SiC 颗粒; 碳纤维; 环氧树脂; 磨损量; 摩擦系数

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)05-0084-05

Study on Friction Performance of Epoxy Resin Matrix Carbon Fiber Composite Frictional Layer

Cao Weiwei^{1,2}, Long Guorong^{1,3}, Zhu Bo⁴, Zhu Wentao⁴, Bian Zhiyong^{1,3}, Li Shengye¹(1. Taishan Sports Industry Group, Dezhou 253600, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 3. Chinese National Engineering Research Center of Sporting Goods, Dezhou 253600, China;
4. Carbon Fiber Technology Research Center, School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to improve the lifetime of the carbon fiber bicycle wheel, the wear mass loss and friction coefficient of composites made by SiC modified epoxy resin system as matrix and carbon fiber plain cloth as reinforcement were studied in the case of different load, different friction situation and different modifier proportion. The results show that the wear mass loss increases with the load increasing and at water lubrication condition, at the same time, the wear-resisting property of composite increases with the content of SiC modifier increasing.

Keywords: SiC particle; carbon fiber; epoxy resin; wear mass loss; friction coefficient

在自行车公路赛中选手们会大量、频繁地使用刹车, 这不仅会产生大量的热量, 如果轮圈材质耐磨性能不佳还会造成轮毂部位力学结构的削弱和破坏, 直接影响到了运动员的比赛成绩和行车安全。目前竞技用自行车的复合材料化是碳纤维 (CF) 复合材料民品应用的一个亮点, 除前后叉、车架等部位外, 自行车轮圈的复合材料化尤其是刹车部位的复合材料结构分析, 成为非常重要的研究工作, 其中树脂的改性和树脂基复合材料摩擦层的研究对于提高自行车刹车系统的耐用性, 特别是改善 CF 复合材料自行车的轮毂寿命, 保证 CF 自行车的质量具有非常重要的意义^[1-6]。

基于此, 笔者从提高耐磨性能的设计思路出发, 采用填充特种 SiC 填料的方法对树脂进行改性, 研制一种公路竞技用自行车轮圈的导热型摩擦层复合材料, 利用磨损试验机, 对轮圈复合材料摩擦层样品进行了磨损性能研究, 确定了耐摩擦复合材料摩

擦层的改性工艺, 为竞技用自行车复合材料轮圈的制动性能提升提供了工艺基础和设计思路。

1 实验部分

1.1 原材料

环氧树脂 (EP): AD-80, 泰山体育产业集团有限公司;

4,4'-二氨基二苯砜 (DDS) 固化剂: 上海三爱思试剂有限公司;

纳米 SiC 颗粒: 北京德科岛金科技有限公司;

CF 平纹布: T300 系列, 济南发尔博科技有限公司。

1.2 设备与仪器

万能液压机: YB32-1000 型, 天津市天锻瑞丰

^{*} 中国博士后基金项目 (2012M511544)

联系人: 曹伟伟, 讲师, 博士, 主要研究方向为树脂基碳纤维复合材料

收稿日期: 2014-02-11

压力机制造有限公司;

模具:自制;

场发射扫描电子显微镜 (SEM): SU-70 型, 日本日立公司;

摩擦磨损试验机: 上海工业大学附属工厂。

1.3 试样制备

以一定量 SiC 改性的 EP 为基体, CF 平纹布为增强体压制复合材料板, 割成 $5\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的样条, 表面用细砂纸打磨后用超声仪超声水洗后烘干备用。试样配方见表 1。

表 1 试样配方

试样编号	EP	CF	SiC	%
1 [#]	40	59	1	
2 [#]	40	57	3	
3 [#]	40	54	6	

1.4 摩擦磨损性能测试

(1) 干态摩擦磨损性能测试。

将制备好的样品放置在摩擦试验机的样品夹上, 并用半径 40 mm 的铜轮将其压紧; 在低速 (200 r/min) 启动摩擦试验机后, 立即关闭, 然后在高速 (400 r/min) 下启动, 将载荷加至所需的载荷之后开始计时。

(2) 湿态摩擦磨损性能测试。

在样品上方的漏斗架上放置盛水的漏斗, 滴速设置为 60 滴/min, 其它条件同干态测试。

2 结果与讨论

2.1 载荷对复合材料摩擦层的摩擦性能影响

加载条件对于复合材料摩擦层的摩擦性能有着直接关系。图 1 和图 2 分别为不同加载条件下复合材料摩擦层的摩擦系数和磨损量的数据对比。

从图 1 可以发现, 对于相同填料含量的复合材料摩擦层样品, 无论在干态还是湿态环境下进行摩擦测试, 随着加载压力的提高, 摩擦系数普遍降低。在复合材料摩擦层的摩擦过程中, 摩擦性能受到粘着磨损、磨粒磨损和疲劳磨损三者的共同作用, 由于体系中存在 SiC 粉末, 并且存在含碳量极高的 CF 增强体, 二者在摩擦接触面上产生的磨屑均具有一定的润滑作用^[7], 当加载压力变大时, 这种磨屑的润滑作用使得样品与摩擦环的接触面上的摩擦力的增幅小于载荷的增幅, 根据摩擦系数的计算公式可知, 随着载荷增加, 摩擦系数普遍有所降低。

从图 2 可以看出, 对于相同填料含量的复合材料摩擦层样品, 干态和湿态环境下的样品磨损量均随加载压力存在明显变化, 干态环境下样品的磨损

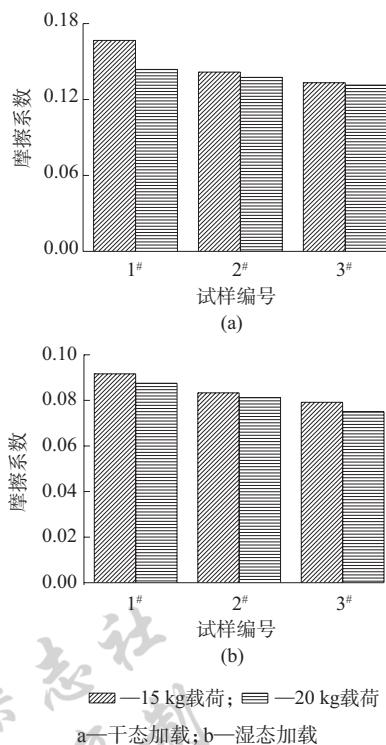


图 1 不同加载条件下复合材料摩擦层的摩擦系数对比

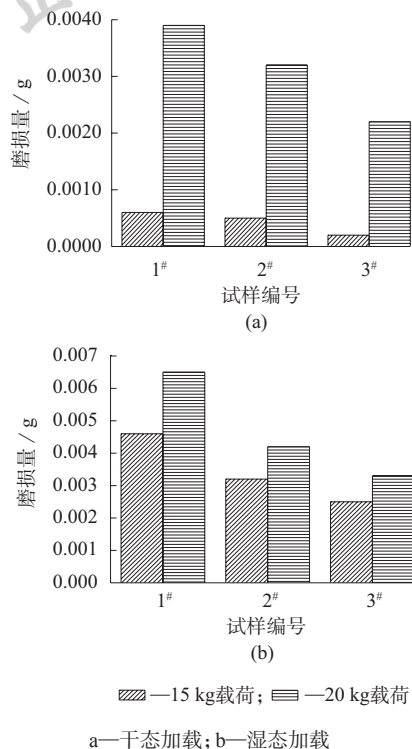
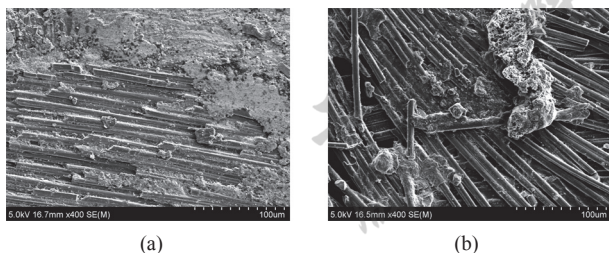


图 2 不同加载条件下复合材料摩擦层的磨损量对比

量随加载压力的提高大幅度增加, 而湿态环境下样品的磨损量随加载压力的提高, 增加幅度相对较小。产生这种变化的主要原因是二者环境条件不同所引起的磨损机理差异。当干态环境条件下, 摩擦接触面上的磨屑主要为 SiC 粉末填料和碳纤维碎屑, 这

二者均有一定的润滑作用,磨粒磨损的作用相对较弱,而此时接触面上的磨损主要是粘着磨损和疲劳磨损,而这两种机理对加载压力存在较大的敏感性,当加载压力变大时,粘着磨损和疲劳磨损加剧,相同条件的样品磨损量大幅度提高。而在湿态环境下,起到润滑作用的磨屑被一定程度地冲走,磨粒磨损的贡献增加,而且由于水的介入使得摩擦面上的温度降低,粘着磨损和疲劳磨损的贡献相对减弱,此时湿态摩擦对压力的敏感程度相对于干态摩擦有所降低,因此随着载荷的增加,磨损量的增加幅度相对小一些。

图 3 为 SiC 含量 3% 的复合材料摩擦层在干态环境不同载荷条件下的摩擦面 SEM 照片。从图 3 可以看出,当载荷为 15 kg 时,摩擦面残留的树脂基体较多,部分 CF 已裸露至摩擦表面;当载荷增加至 20 kg 时,摩擦面上残留的树脂基体较少,出现较多裸露的 CF 且单丝纤维的断头较多。较少的树脂残留量也佐证了在较大的载荷下摩擦层样品的磨损量较大的结论。



(a) (b)

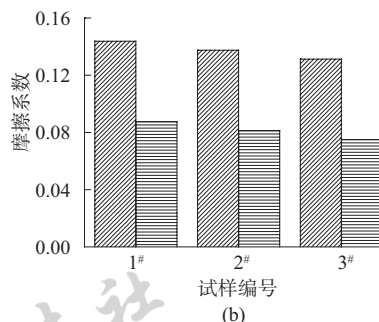
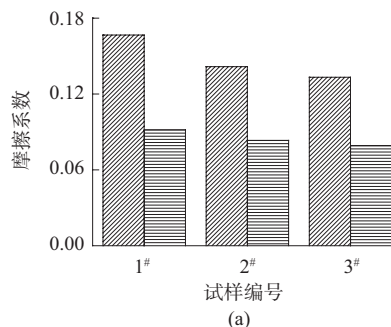
a—15 kg 载荷; b—20 kg 载荷

图 3 不同载荷下复合材料摩擦层的摩擦面 SEM 照片

2.2 环境条件对复合材料摩擦层的摩擦性能影响

环境条件是影响改性树脂基复合材料摩擦层摩擦性能的关键因素,研究不同环境条件下的复合材料的摩擦性能,对于自行车轮圈在不同气候条件下的刹车过程对比具有重要意义。图 4 是不同加载条件下,不同 SiC 含量的复合材料样品的干态和湿态环境的摩擦系数对比。从图 4 可以看出,当 SiC 含量和加载压力一定时,湿态环境条件下的样品的摩擦系数普遍要低于干态摩擦条件所得的数据。这说明水介质的存在,对于摩擦层样品和摩擦环接触面存在一定的润滑作用,并且水的存在减小了基体树脂与摩擦环的有效接触面积,这两方面因素的共同作用使得摩擦力降低,因此造成了摩擦系数的减小。

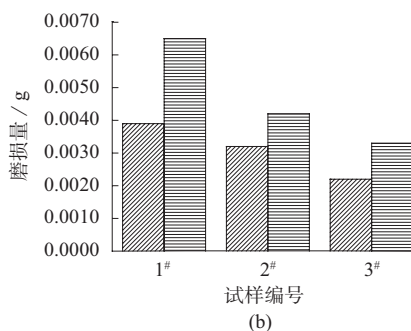
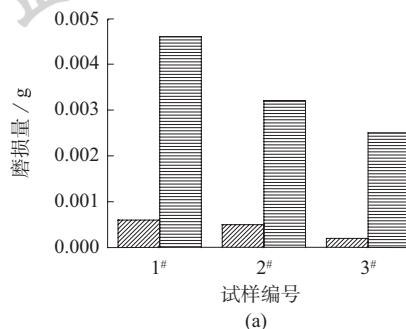
图 5 为不同环境条件下复合材料摩擦层的磨损量对比。从图 5 可以发现,当改性填料含量和加



—干态摩擦; —湿态摩擦

a—15 kg 加载; b—20 kg 加载

图 4 不同环境条件下复合材料摩擦层的摩擦系数对比



—干态摩擦; —湿态摩擦

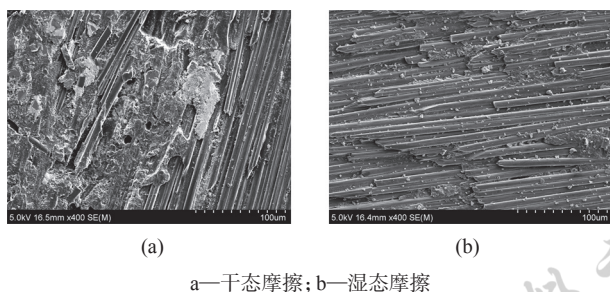
a—15 kg 加载; b—20 kg 加载

图 5 不同环境条件下复合材料摩擦层的磨损量对比

载压力一定时,在湿态环境条件下样品的磨损量均大于干态环境下的数据。这是由于当干态环境时,摩擦接触面上存在 SiC 填料粉末和 CF 碎屑二者的磨屑润滑作用,这使得样品的磨损量相对较小,而当摩擦过程中有水参与时,大量的 SiC 填料和 CF 碎

屑均被水冲走,一方面这使得整体磨损量提高,同时起润滑作用的磨屑减少,在摩擦接触面上复合材料基体表面小凸起的磨粒磨损贡献较大,同时摩擦环与样品表面的实际接触面积减小,这均使得摩擦破坏严重,这可能是造成磨损量较大的主要原因^[8-9]。

图6为不同环境下SiC含量6%的复合材料在20 kg载荷下摩擦面SEM照片。从图6可以看出,当干摩擦时,摩擦面残留的树脂基体较多,只有小部分CF裸露;在水润滑的湿态条件下摩擦时,摩擦面上树脂缺损严重,大量的CF裸露,出现较多的断头。较少的树脂残留和大量的纤维断头说明在加水的条件下增大了样品的磨损量。



a—干态摩擦; b—湿态摩擦

图6 不同环境下复合材料摩擦层的摩擦面SEM照片

2.3 填料含量对复合材料摩擦层的摩擦性能影响

SiC填料的加入对于复合材料摩擦层的耐磨性能改善有着至关重要的作用。图7是不同SiC填料含量条件下摩擦层样品的摩擦系数对比。从图7可

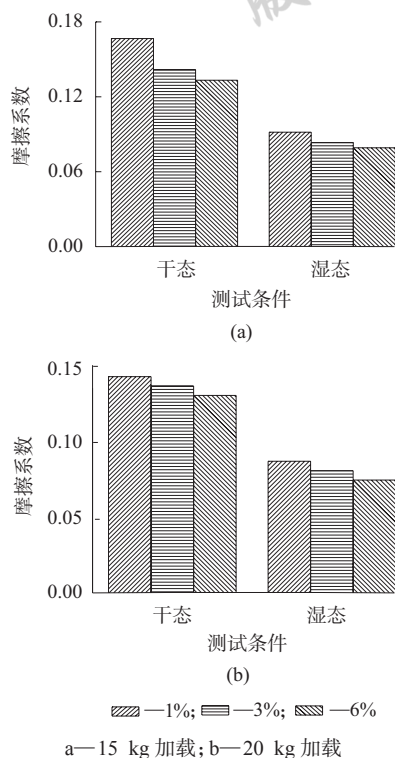


图7 不同填料含量下复合材料摩擦层的摩擦系数对比

以看出,随着SiC填料含量的增加,摩擦系数逐渐降低。由于所采用的基体为耐高温型AG80 EP体系,该树脂体系完全固化后的交联度较大,固化树脂的硬度较高,在摩擦过程中一旦出现磨屑,接触面上由树脂磨屑颗粒所导致的磨粒磨损较为严重,同时树脂体系在摩擦过程中产生大量摩擦热可能引起树脂的塑性变形,也会导致粘着磨损的程度加重,这两种磨损机理的共同作用使得纯树脂体系的耐磨性能较差。SiC填料本身属于一种耐磨材料,当树脂基体中加入SiC粉末填料后,在摩擦环的高速转动过程中SiC颗粒参与接触面的摩擦作用,其自身的耐磨性和球形润滑作用得到充分体现,减小了摩擦接触面积,有效降低了摩擦力,并且这种作用随着填料含量的增加而增大。

图8是不同SiC填料含量的摩擦层复合材料样品的磨损量对比。从图8可以看出,随着SiC含量的增加,磨损量逐渐降低。这同样是因为EP基体中加入了SiC粉末填料,一方面SiC的导热性能较高,在摩擦过程中可以将接触面上产生的大量摩擦热散失掉,避免产生较大程度的粘着磨损;另一方面SiC填料球状颗粒具有一定的润滑作用,在有效降低摩擦力的同时也减少了样品的磨损量,因此当SiC加入比例提高,样品的磨损量降低。

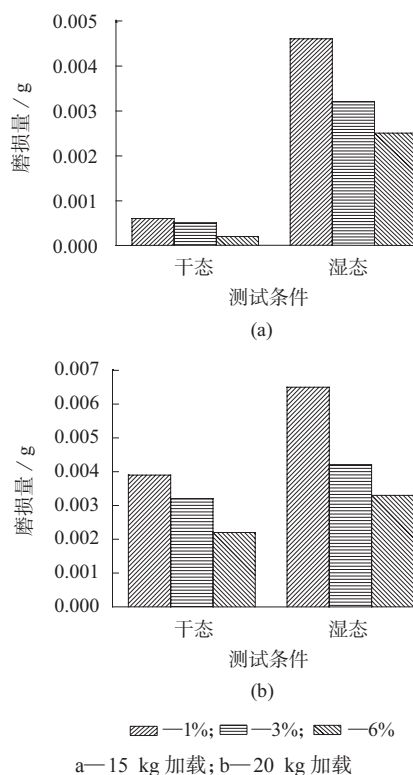


图8 不同填料含量下复合材料摩擦层的磨损量对比

图9为不同SiC含量复合材料摩擦层在干态环境20 kg载荷条件下的摩擦面SEM照片。从图9可以看出, SiC含量为1%时,摩擦面残留的树脂基体较少,大量的CF已裸露至摩擦表面;当SiC含量增加至3%时,摩擦面上残留的树脂基体增加,纤维裸露的情况也大有改观;当SiC含量增加至6%时,摩擦面有大量的树脂残留,仅有少数纤维外露。随着SiC含量的增加,摩擦面的树脂残留量不断增加,纤维磨损程度降低,说明SiC填料的加入能有效降低样品的磨损,增加产品的耐磨性能。

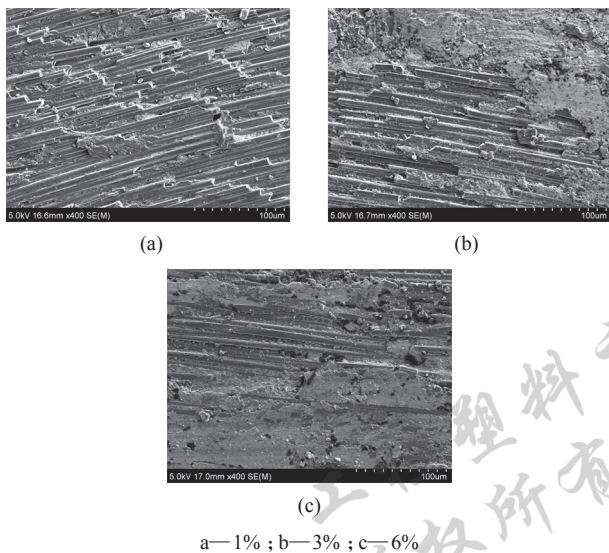


图9 不同SiC含量的复合材料干态环境摩擦面SEM照片

3 结论

(1) 在15 kg和20 kg加载条件下,复合材料摩擦层的摩擦系数和磨损量均随着载荷的增加而增大。

(2) 复合材料摩擦层的磨损量随着摩擦界面水润滑环境的持续而增大,摩擦系数有所降低,水润滑湿态环境不利于复合材料摩擦层摩擦性能的提升。

(3) 随着SiC含量的增加,复合材料摩擦层的耐

磨性能有一定程度提高, SiC含量6%时有利于复合材料摩擦层摩擦性能的整体提高。

参考文献

- [1] 严备战. 碳纤维复合材料在自行车上的应用[J]. 中国自行车, 2010(9):12-14.
Yan Beizhan. The application of carbon fiber composite in the bicycle[J]. China Bicycle, 2010(9):12-14.
- [2] 陈坚, 李树华, 戴维盛, 等. 碳纤维自行车产品的特点及其质量问题[J]. 中国自行车, 2007(4):32-34.
Chen Jian, Li Shuhua, Dai Weisheng, et al. The characteristics and quality problem of carbon fiber bicycle[J]. China Bicycle, 2007(4):32-34.
- [3] 江国强. 名为“MACHIVIA 30”的轻量化自行车车圈[J]. 中国自行车, 2008(5):63.
Jiang Guoqiang. Named by “MACHIVIA 30” Light-weighting Bicycle Wheel[J]. China bicycle, 2008(5):63.
- [4] 邢志国, 吕振林, 谢辉. SiC/环氧树脂复合材料冲蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3):291-295.
Xing Zhiguo, Lv Zhenlin, Xie Hui. Erosion wear behaviors of SiC/epoxy resin composites[J]. Tribology, 2010, 30(3):291-295.
- [5] Xu Yuanhua, Luo Meng, Peng Hua, et al. Synthesis and characterization of a novel high heat-resistant epoxy resin[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2011, 34(4):43-50.
- [6] Malek J. Kinetic analysis of crystallization processes in amorphous materials[J]. Thermochimica Acta, 2000, 355:239-253.
- [7] Khedkar J, Negulescu I, Meletis E I. Sliding wear behavior of PTFE composites[J]. Wear, 2002, 252(5):361-369.
- [8] Bramham R W, King K B, Lancaster J K. The wear of PTFE-containing dry bearing liners contaminated by fluids[J]. ASLE Transactions, 1981, 24(4):479-489.
- [9] 王军祥, 葛世荣, 张晓云, 等. 纤维增强聚合物复合材料的摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(1):76-80.
Wang Junxiang, Ge Shirong, Zhang Xiaoyun, et al. Progress of research on tribology of fiber reinforced polymer composites[J]. Tribology, 2000, 20(1):76-80.

美国 Sierra Resins 公司与 3D Printlife 公司合作推出生物基 3D 打印塑材

美国生物塑料配制商 Sierra Resins 公司正在与 3D Printlife 公司合作推出一种用于 3D 打印的生物塑料基长丝体。

位于美国马萨诸塞州的 Sierra Resins 公司表示, 对未公开的生物塑料配方的初步测试显示其具备可加工性、平滑性。

该公司总裁兼 CEO John Tersigni 说, 将把这种特殊级别

的 3D 生物长丝体提交给一家独立的 ASTM 认证的生物可降解测试实验室。测试中的生物塑料目前用于薄膜生产和注塑用途。

Sierra Resins 公司选择 3D Printlife 公司作为合作伙伴, 是因为这家洛杉矶的公司经销 3D 打印设备、供给品和应用软件, 且对市场非常了解。

3D Printlife 公司的创始人之一 Buzz Baldwin 表示, 这种生物长丝体的性能和其它高品质塑料一样, 且将有助于推动 3D 打印的可持续发展。(慧聪网)