



图 1 仅由太阳能驱动：这辆高效率的 Punch One 太阳能汽车，参加了在澳大利亚举行的世界太阳能车挑战赛。等离子粘接工艺使 CFRP 车身重量减轻了几公斤（图片来自 Punch Powertrain 太阳能车队）

为加快粘接过程、优化粘接效果以及减轻几公斤的重量，来自比利时鲁汶大学的一个学生团队，采用常压等离子技术，对他们的太阳能赛车的 CFRP 部件作了粘接前的预处理……

文 / 德国 Bad Honnef 公司 Inès A. Melamies（本刊编译）

## 采用等离子技术走向成功

### ——常压等离子处理技术使 CFRP 太阳能汽车更轻

生产经理 Dokus Soetemans 和 15 名与他共同组成了“Punch Powertrain 太阳能车队”的比利时同事一起，正在培育平均年龄在 21 岁的电子和机电一体化工程师。10 多年来，鲁汶大学一直与行业伙伴密切合作，为其硕士生提供一种特殊的研究生课程：那些参加为期两年的太阳能汽车项目的人，必须构建一款完全由太阳能驱动的单座赛车，并参加世界最有效率的电动汽车大赛。首要目标是，在世界上最长且最艰难的太阳能汽车拉力赛——澳大利亚的世界太阳能汽车挑战赛（如图 1 所示）中取得成功。

这个年轻团队对这一 150 万欧元的项目的每

一个细节负有完全责任，他们只有 15 个月的时间来落实这件事。2015 年 6 月，这款车首次向公众亮相；到 8 月底，所有的国内道路测试已经完成；9 月，该团队及其空气动力作品 Punch One 被发送到澳大利亚。然而，在所有这一切发生之前，必须从零开始对太阳能汽车进行设计和制造。

#### 按每克计算

更低的质量意味着更少的能耗。凭借 165 kg 的最大总重量，Punch One 应该比其前代产品轻 10 kg，更比其大多数的竞争产品轻 25 kg。在 6 m<sup>2</sup> 的汽车表面上覆盖了 391 块超薄硅太阳能电池。然



而，尽管它们重量轻，却仍然拥有 8 kg 的总重量。这款太阳能汽车的最重部件是拥有 21 kg 指定最大重量的太阳能电池，对此，没有什么是可以消减的。所以，为使所需重量得到降低，首先采用一个 5 kW 的单台电动机取代了以前的两台发动机，悬架和转向系统也得到了替换，现在它们主要由碳纤维制成。尽管如此，这款车仍然太重，唯一剩下可减重的是车身本身。

### 车身

这款由学生们自己打造的自承载车身，是一个宽 1.72 m、长 4.5 m 的单体结构，由碳纤维增强塑料（简称“CFRP”）制成的上、下壳体组成。采用一种真空灌注工艺，学生们采用不同的预浸料制成了这些壳体，包括一种 0.08 mm 的 Textreme 材料、一种单向碳纤维预浸布和一种 0.23 mm 的斜纹织物，使用的芯材是 Rohacell。这种尺寸的塑料外壳一旦固化和脱模，就材料而言是结实的，但还是会由于重量轻、曲线的形状和超大的表面积而不稳定。因此，上、下壳体需要一种额外加强的由加强肋组成的架构，这种结构也被称为“抗扭箱体”。这种抗扭箱体对于底壳（如图 2 和图 3 所示）而言，可防止基础结构发生弯曲和扭曲。组装后的两个壳体将为太阳能汽车带来最终的空气动力学外形（如图 4 和图 5 所示）。

### 粘接而非层压

包封在 Textreme 材料中的硬质泡沫肋骨之间的连接以及车身都必须很强大，以足



图 2 等离子处理的单体底壳展示出肋骨和抗扭箱体（图片来自 Punch Powertrain 太阳能车队）

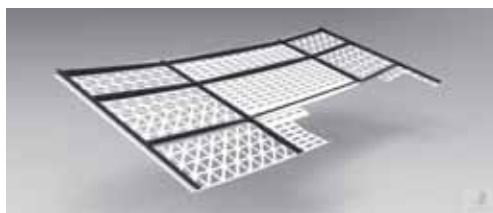


图 3 在上壳体中经等离子处理的加强肋结构（图片来自 Punch Powertrain 太阳能车队）



图 4 不同车身层次的组合（图片来自 Punch Powertrain 太阳能车队）



图 5 最终完成的太阳能汽车 Punch One（图片来自鲁汶大学 Rob Stevens）

以产生一种后拉力，用于抵消壳体内部任意方向的任何的拉伸或压缩应力。基于汽车车身在比赛中必须面对的挑战，以前的学生团队总是选择去层压这些静态元素，他们在肋的每个附着点处都应用了多个层次和长度的预浸带。但这种连接方法不仅非常耗时费力，而且所有额外使用的预浸带都导致了重量的增加。因此，问题在于，采用粘合剂而非层压工艺，

最终是否有可能实现高强度的粘接。

为找到一种合适的替代方案，团队测试了汉高公司生产的各种粘合剂。由于汽车的强烈振动，要求所使用的粘合剂要具有高弹性以及适应快速粘接操作要求的短的开放时间。最终选用了 Loctite EA 466，它是一种快速固化的两组分环氧树脂粘合剂。然而，由于出现了粘接面断裂（如图 6 所示）而非希望的内聚力断裂，导致第一次拉伸 - 剪切 - 强度试验失败。在得到粘接的 CFRP 表面上，尽管已采用一种特殊的清洁剂对其表面进行了预处理，但断裂点处却没有粘合剂。“我们被告知，这个问题不是所用的粘合剂而是所用的材料导致的，它被认为是具有很弱的粘附力，因为其表面能明显太低。汉高公司建议我们采用常压等离子技术（简称‘plasma’）对肋的塑料表面进行处理。”Soetemans 说。该团队采纳了这项建议，并立即与德国的等离子系统供应商 Plasmatreat 的比利时代表处取得了联系。

### 采用常压等离子体的清洁与活化

20 年前由 Plasmatreat 公司开发的 Openair 等离子喷枪，目前几乎被应用于所有的行业生产领域中。该工艺是采用无电势的



图 6 等离子处理前的粘接失效（图片来自 Punch Powertrain 太阳能车队）

等离子对表面进行处理。通过密集的脉冲电弧放电，在等离子喷枪内产生等离子体。沿放电路径有针对性的气流分离出等离子部分，并通过喷嘴头将它们送到被处理材料的表面上，同时，等离子流的带电部分保留在喷嘴头内。喷嘴头还决定了被射出的等离子束的形状。

该工艺在只需几秒钟的单步操作中即可完成 3 项任务：它可同时实现对塑料表面的微细清洁、静电中和和表面活化。这样的三重功效远胜于传统预处理系统所能发挥的作用，其结果是：材料表面得到了均匀润湿，粘合剂的粘接或涂层可获得长久稳定的附着力，即使在具有挑战性的负载条件下也同样如此。

通过等离子的化学和物理交互作用，表面得到活化。当常压等离子体接触塑料表面时，含有氮与氧的基团被反应到主要由非极性结构构成的聚合物基体中，等离子活化带来了表面能的增加，使材料表面产生极性（如图 7 所示）。

### 令人信服的试验结果

以前从未有过学生体验过采用等离子对材料进行预处理，

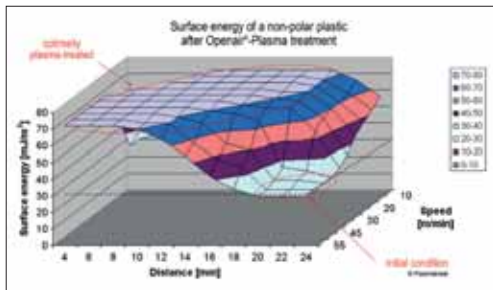


图 7 此图显示了一个得到常压等离子处理的非极性塑料表面（图片来自 Plasmamatreat 公司），它是距离与速度的函数。预处理后呈现的极性，表面能提高到大于 72 mJ/m<sup>2</sup>

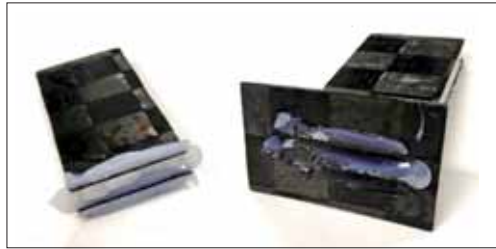


图 8 等离子处理后出现的粘接内聚断裂（图片来自 Punch Powertrain 太阳能车队）

并且他们希望看到这一过程。为验证其效果，必须进行两个不同的试验，一个是在粘接前，一个是在粘接后。第一个试验的目的是确定等离子处理前、后的 CFRP 表面能。Plasmamatreat 公司采用 Krüss 公司提供的 Mobile Surface Analyzer (MSA) 移动表面分析仪测量了接触角。这种便携式的测试仪器在一个持续不到 1 s 的过程中，自动地施加了两个平行液滴，然后测量接触角并计算自由表面能。测量结果为水或有机液体对表面的润湿性提供了有价值的信息。研究表明：在用于粘接的 CFRP 样品的光滑一侧，处理前的表面能只有 24 mJ/m<sup>2</sup>，但等离子处理后的表面能提高到 74 mJ/m<sup>2</sup>——这对于后续的粘接是理想的条件。第二个试验，即重复的拉伸 - 剪切 - 强度试验表明：断裂行为已发生了改变，这一次不再是早期的粘接面断裂，而是理想的内聚断裂（如图 8 所示）。

### 更轻且更快

在 Dokus Soetemans 的指导和监督下，他的 3 名同学随后进行了等离子处理，并将所有的加强肋粘接到两个车身壳体上。为了使这项工作变得更加轻松，Plasmamatreat 公司提供



图 9 采用 Openair 等离子旋转喷枪对 CFRP 表面预处理，同时实现了对塑料表面的微细清洁、静电中和与强力活化，从而显著提高了塑料表面的润湿性和粘附能力（图片来自 Plasmamatreat 公司）

了一种手持式旋转喷枪（如图 9 所示），这种喷枪仅重 2.5 kg，通常被用于实验室或小规模的生产中。事实证明，这一操作过程非常简单：在一个人引导等离子喷枪扫过表面进行处理的同时，另一个人跟随其后施加粘合剂。对粘接的肋施加一定的压力，将壳体放入 90℃ 的烤箱中持续 1h，以固化粘合剂。

在以前，层压这些加强肋需要花费远多于一周的时间，现在借助于等离子处理，这项工作只需 3 天即可完成。而更为重要的是：该新的等离子粘接工艺还将太阳能车身重量减轻了大约 3 kg，现在 165 kg 的目标总重量已经实现。

在运行 3 000 km 穿越温度超过 40℃ 的澳大利亚内陆后，一个骄傲而快乐的太阳能车队于 2015 年 10 月 25 日抵达澳大利亚的阿德莱德，从 30 个竞争团队中脱颖而出，获得第五名。比赛开始时出现的轮胎漏气以及一个小时的处罚（这一不幸的处罚让车队被一些竞争者超过）很快就被遗忘。2016 年在南非的 Sasol 太阳能汽车挑战赛正在期待中，Punch One 有望再次取得成功。 AI