

汽车制造业的革命性变革： BMW i 系的生产 目录



1. BMW i 系的生产方案：Life 模块和 Drive 模块	2
2. 新纪元的开端 — 用碳纤维强化塑料制造汽车	3
利用水力发电制造碳纤维强化塑料/莫斯湖，美国	3
在瓦科斯多夫加工成碳纤维缝编织物	3
在兰茨胡特和莱比锡进一步加工成碳纤维强化塑料组件	4
在碳纤维强化塑料车身制造中新的高精度工艺流程	5
3. 重量轻、结构牢固：热塑性塑料制成的车身蒙皮	6
4. Drive 模块：产自 BMW 巴伐利亚工厂的结构支架、 高压蓄电池和驱动电机	7
高压蓄电池	7
电动驱动系统	8
5. 驾驶室	9
6. 平行流程：总装	10
整车总装	10
7. 在莱比锡工厂注重发展可持续性的生产	12

1. BMW i 系的生产方案： Life 模块和 Drive 模块



BMW i3 是 BMW 向市场推出的第一款电力驱动量产车型，为市内交通提供了一种新的、注重发展可持续性的选择。这样，BMW i3 就作为第一款电动豪华汽车对于我们这个时代面临的社会、生态和经济挑战作出了有力的回应。实现这个至今为止独一无二的车体结构设计方案，不仅仅需要运用先进的轻质材料，而且还要采用创新的生产工艺。在这方面，BMW Group 注重发展可持续性的理念也起到了关键性作用。BMW i3 是第一个确立了可持续发展目标的车型研制项目，对于这些目标的遵循力度和成本、重量或者质量目标一样。目标是，使汽车生产对于环境的影响保持在最小程度。因此，这方面的侧重点包括例如供电方式、耗水量、溶剂排放和废物处理。这个目标已经下达给 BMW i 系车型全球生产网络的各地工厂。这个网络包括在美国华盛顿州莫斯湖工厂生产碳纤维，以及在德国瓦克斯多夫工厂将其加工成碳纤维缝编织物。这两家工厂都由 BMW Group 和 SGL Group 创立的合资企业 SGL 汽车碳纤维 (ACF) 公司运营。此外，还包括 BMW Group 旗下在德国丁格芬、兰茨胡特和莱比锡的工厂。

BMW i3 创新的车体架构由两部分构成：一个部分是由铝合金材料制成、驱动车辆的 Drive 模块，其中集成了驱动系统、底盘、蓄电池、结构功能组件和防撞功能组件，另一个部分是碳纤维强化塑料 (CFRP) 制成、构成车厢主体的 Life 模块。由于采用了 LifeDrive 设计方案和使用了碳纤维强化塑料，与一般的汽车制造相比，BMW i3 的生产时间缩短了一半。这种工艺并不需要很大的投资，因为取消了通常的冲压车间以及传统的涂装车间，Life 模块和 Drive 模块的生产可以同时进行。在 BMW i 系车型中的碳纤维强化塑料材料的使用规模，在全球汽车业是绝无仅有的。BMW Group 在这个领域也起到了开路先锋的作用。

2. 新纪元的开端 — 用碳纤维强化塑料制造汽车



尤其是对于带有电动驱动系统的车辆而言，轻量化车身设计具有非常巨大的意义，因为除了蓄电池容量之外，车身重量也是限制可行驶里程的一个重要因素。车身重量越轻，可行驶里程越大。因此，为了抵消配备电气组件所带来的额外重量，BMW i 系车型都采用了轻量化车身设计和创新的材料。BMW i3 的 Life 模块主要由碳纤维强化塑料 (CFRP) 制成。这种创新的材料是在一家合资企业 — SGL 汽车碳纤维 (SGL ACF) 公司生产的。

利用水力发电制造碳纤维强化塑料/莫斯湖，美国

在美国莫斯湖的 SGL ACF 公司，利用碳纤维原丝和热塑性聚丙烯腈纺织纤维生产出碳纤维材料。为此，用一种复杂的多级工艺流程将纤维的各种元素分解成气态，直至纤维几乎完全是由碳元素构成并且具有稳定的石墨结构。这种碳纤维的直径仅有 7 微米 (0.007 毫米)，与此相比人的头发丝直径大约为 50 微米。然后，为了应用于汽车行业，将大约 50,000 个这种单纤维整合成“粗纱”或“重纱”，并将其缠绕起来用以下一步加工。

目前，莫斯湖工厂生产碳纤维所需的电力完全来自当地的水力发电，从而实现了 100% 无 CO2 排放。在能源效率方面，这家坐落于美国华盛顿州的现代化化工厂也为业界树立了标杆。

莫斯湖工厂从 2011 年底开始生产这种重量极轻的高科技纤维材料。该厂拥有两条生产线，生产能力达到每年 3,000 吨。至今，两家母公司 BMW Group 和 SGL Group 已经为莫斯湖工厂的生产设备投资了大约 7,200 万欧元 (1 亿美元)，创造了 80 个新的工作岗位。

在瓦科斯多夫加工成碳纤维缝编织物

第二个合资企业位于德国瓦科斯多夫的创新工业园，这里将莫斯湖工厂生产的纤维束按照工业标准加工成轻质的缝编织物。投资 2,000 万欧元、同时创造大约 150 个新工作岗位之后，现在瓦科斯多夫工厂每年可以生产几千吨的碳纤维缝编织物。

然后将不同纤维方向的缝编织物组合成多层的、不同朝向的碳纤维叠层，再进行裁剪。这就构成了在兰茨胡特和莱比锡的 BMW 工厂生产碳纤维强化塑料部件和组件所需的原材料。碳纤维强化塑料下脚料在瓦科斯多夫工厂经过再加工，重新用于 BMW i 系车型的生产。目前，BMW i3 所使用的碳纤维中大约 10% 来自回收材料。

在兰茨胡特和莱比锡进一步加工成碳纤维强化塑料组件

在德国兰茨胡特和莱比锡的 BMW 创新和生产中心，将瓦科斯多夫工厂所提供的碳纤维叠层加工成 BMW i3 和 BMW i8 的车身零件，这两家工厂总共有三条碳纤维强化塑料车身组件生产线。

经过过去的十年间的不断研发，BMW Group 的专家成功地将碳纤维强化塑料部件的生产流程实现了自动化，从而使这种部件的大规模生产如今既经济、质量可靠又工艺稳定。例如，在这段时间内碳纤维强化塑料车身组件的生产成本已经降低了大约 50%。

首先，用一种加热工具使裁剪下来的碳纤维缝编织物具有稳定的三维形状。然后，多个这种预制的预成型坯件就可以组装成一个较大的部件。这样就可以生产出大面积才车身部件，这是用铝合金材料或钢板很难实现或者以高昂的成本才能实现的。在预制和预成型之后，下一个工艺步骤就是利用树脂传递模塑 (RTM) 工艺在高压下进行树脂固化。此时，在高压下将液态树脂注射到预成型坯件中。首先使碳纤维与树脂连接起来，然后进行固化，从而使这种材料具有刚性和优异的性能。

根据精确设定的、自行确定的时间、压力和温度参数进行冲压，直到树脂与固化剂连接牢固，并且已经固化。由于采用了这种自动化的生产工艺，就不必在锅炉里进行十分费时的固化处理，这一点与通常的碳纤维强化塑料部件人工操作生产工艺不同。

碳纤维强化塑料生产工艺与普通的钢板生产没有可比性。这种工业化的生产工艺具有很高的经济性，只有这样才能生产出汽车工业所需的大面积碳纤维强化塑料复合组件。

即使集成了很多车身结构元件的复杂组件，例如 BMW i3 Life 模块的整个侧车架，也能用这些设备以极高的自动化程度生产出来。接下来的工艺步骤就是精加工，例如将部件轮廓裁剪整洁以及钻出缺失的开口。为此，利用一种特殊的喷水切割机对这种部件进行加工，在水流的喷射下形成下一步加工所需的粘接面。与碳纤维强化塑料车身部件相反，在生产通常采用钢板材料的侧车架时，必须连续将多个内部和外部部件拼合起来。

在碳纤维强化塑料车身制造中新的高精度工艺流程

在莱比锡工厂新建的车身制造车间，将碳纤维强化塑料复合组件拼合起来。这样就制造出 Life 模块的基本结构。由于 BMW i3 Life 模块的碳纤维强化塑料结构几何融合性高，其车身部件的数量只相当于普通钢制车身的三分之一——整个基本架构由大约 150 个碳纤维强化塑料组件组成。

在使用碳纤维强化塑料制造车身时，既没有拧紧螺丝或铆接时所发出的噪音，也没有焊接时飞溅的火星——只使用最先进的粘合技术，并且实现了 100% 的自动化。为此，采用 BMW 研发的独一无二的车身连接工艺，将各个部件在不接触的情况下拼合为相互之间形成精确设定的粘合缝，以便在粘合工艺完成后达到最佳的车身刚性。从数量上来看，每辆 BMW i3 的粘合缝长度达到了 160 米。

为了尽量缩短大批量生产 BMW i3 时的材料固化时间，BMW 大大加快了粘合工艺。因此，一种精心研制的粘合剂如今在涂敷到车身部件之后仅仅经过 90 秒就可以接受加工，然后才产生粘性。在经过一个半小时之后，粘合剂就已经固化，使车身组件具有完全的刚性。与普通的粘合工艺相比，这个工艺的速度加快了十倍。为了将固化时间进一步降低至几分钟的数量级，BMW 研发了另外一种热学工艺。为此，额外地加热需要粘合的碳纤维强化塑料部件上的某些粘合部位，以便进一步加快固化过程。

3. 重量轻、结构牢固： 热塑性塑料制成的车身蒙皮



BMW i3 是第一款完全采用塑料蒙皮的 BMW 车型。只有用回收利用的碳纤维强化塑料制成车顶是例外。塑料件比钢板的重量轻了一半，同时是一种不受侵蚀的表面防护层，其生产也非常节能。此外，这种材料对于轻微损坏不太敏感。这种热塑性车身蒙皮所使用的材料有 25% 是回收利用的，或者是用可再生资源生产的。

BMW i3 的车身蒙皮全部是在 BMW 莱比锡工厂生产的。和生产 BMW 传统车型的前、后裙板时一样，根据车身组件不同，塑料件是用三种不同的热塑性塑料注塑工艺生产的：或者是采用标准工艺，即双色注塑工艺，先生产出车身蒙皮和车身下部结构，然后再粘合起来；或者是采用注塑粘合工艺。这种工艺是同时生产车身蒙皮和车身下部结构，在这个工艺过程的最后将两者自动地连接起来。

在进行最后的涂装工作时，车身蒙皮就会光亮四射，并且对例如石击或者阳光辐射等环境影响具有耐抗性。在莱比锡的新建涂装车间采用了干燥分离技术，不会产生污水，耗电量只有同类水平的四分之一。此外，涂装一辆 BMW i3 的用水量比普通车型降低了 70%。因为与传统的车身不同，在生产 BMW i 系车型时不再需要将整个车身分几个工作步骤进行防腐、涂漆和干燥处理。保险杠、车头、车尾和车身侧面的部件都可以单独地用节约资源的方式进行涂装。由于取消了常规的阴极电泳涂装工艺，每辆车的重量可以减轻 10 kg。莱比锡工厂有大约 300 名员工从事 BMW i3 的塑料蒙皮工作。

4. Drive 模块：产自 BMW 巴伐利亚工厂的结构支架、高压蓄电池和驱动电机



在德国丁格芬的 BMW 工厂生产的 BMW i3 Drive 模块结构支架由涂有阴极电泳涂层的铝合金支架和铝合金铸件组成。这种框架结构为蓄电池提供了理想的护罩，从而可以实现最佳的重量分配比例，同时使车身重心很低，这对于提高车辆动态行驶性能极有裨益。所使用的铝合金材料既重量轻又具有优异的耐撞性能，也是 BMW i 系车型整体安全方案的一部分。

BMW i3 的 Drive 模块是一种由大约 160 个零件组成的复杂焊接结构，通过 19 米长的焊缝将这些零件连接在一起。i3 的 Drive 模块所采用的压铸件产自位于德国兰茨胡特的 BMW 工厂，特点是功能集成度很高：完成铸造后几乎可以就用来安装。在丁格芬的工厂，大约有 120 名员工从事 BMW i 系车型 Drive 模块的装配工作。在常年生产铝合金前桥和后桥的过程中，丁格芬工厂的员工掌握了设计全自动高技术生产设备所需的设计专业知识以及处理铝合金材料的高超专业技能。

高压蓄电池

蓄电池，或者称为高压蓄能器是产自丁格芬工厂的另一个 BMW i 车型核心组件。在生产工艺的初始阶段要进行一次生产线始端检测，即首先检查供应的锂离子电池单元是否性能符合要求。然后对蓄电池单元进行等离子清洗。再将各个蓄电池单元全自动地相互挤压成模块、粘合和焊接。为此使用超过 20 个机器人。

BMW 丰富的专业技术和知识也体现在这种蓄电池特殊的组装和组合工艺中。它的生产需要 400 个安装步骤。蓄电池外壳既可以保护锂离子电池单元，也有助于提高车身刚性。在各个蓄电池单元组装成蓄电池模块后开始安装，也就是将蓄电池模块依次抬高放入一个铝合金制的蓄电池槽中，然后插入一个通讯线缆束，人工将其串联起来。最后安装蓄电池盖和蓄电池底板，完工的蓄电池还要接受一次生产线终端性能检测。这种蓄电池的设计，使各个蓄电池模块在维修时很容易更换。

为了制造 BMW i 系车型的高压蓄电池，在丁格芬工厂新建了一个占地面积超过 2,000 平方米的、高度自动化的高科技生产车间。这里也生产 3 系、5 系和 7 系混合动力车型的高压蓄电池。大约有 100 名高素质员工在这里工作，他们负责生产设备的装料、控制和监控，并进行质量检查。为了对高压蓄电池进行作业，相关员工也通过了专门的培训。

电动驱动系统

BMW 汽车的驱动系统从来都是一个主要的差异化标志。因此，BMW Group 自行研发了这个功率 125 kW 的电动机和驱动系统电子元件。BMW i3 的驱动电机在兰茨胡特的 BMW 工厂生产。在这个驱动电机的内部有一个内壳、定子和转子。定子是电机的内部核心组件，由大约 2 km 长的铜线缠绕而成。BMW i3 驱动电机的特别之处在于：与同等功率的其它电机相比，由于采用了特殊的铜线缠绕方式，这种电机的尺寸很小、非常紧凑，这样既减轻了重量，又节省了占用空间。在将定子安装到内壳中之前，在其表面涂上薄薄的一层树脂层。然后将定子、转子和为了装配而加热到大约 150 °C 的内壳拼合起来。

5. 驾驶室



兰茨胡特的 BMW 工厂也生产 BMW i3 的仪表板。为此，首先将薄膜加热，然后成型为三维形状。在采用背部发泡工艺时，使用了一种硅胶制成的代用表皮，在完成背部发泡之后可将其重新从仪表板上揭下。然后在揭下代用表皮的位置铺上饰板，也就是塑料制或者皮制的仪表板可视表面。这种经济性极佳的解决方案优点在于，一个系列车型只需使用一种工具就可以生产出多个版本的仪表板（基本款车型和特殊配置车型）。

在对仪表板进行切削加工时，BMW Group 使用了全世界独一无二的一种设备。驾驶室和车辆配置生产部门已经为此申报了一项专利。在采用这种“无尘”切削工艺时，集成在加工设备中的抽吸装置立即将碎屑和微尘吸出。这样就将对空气和生产设备的污染降低了 98%。抽出的过剩物质被送去回收利用，从而可以重新纳入生产循环。

6. 平行流程：总装



与采用自承载式车身的车辆相反，LifeDrive 车身结构基本上是由两个水平方向分开、相互独立的功能单元组成。因此在莱比锡的生产车间里，在 BMW 历史上首次使用了一种双线系统，也就是在一条独立的生产线装配 Life 模块，在另一条生产线装配 Drive 模块。这样就在工作岗位的人际功效设计方面取得了重大进步，并且所有的装配对象都非常容易够到。

在莱比锡工厂装配 Drive 模块时，先将蓄电池装入铝合金底盘，然后放上发动机变速箱总成。首先将这个重量 230 kg 的高压蓄电池集成到底板总成中，然后用螺钉将其与 Drive 模块连接起来。高压蓄电池安装到铝合金底盘的底板中，确保了最佳的车身重量分配比例和优异的动态行驶性能。由兰茨胡特工厂生产的发动机变速箱总成同样要用螺钉与 Drive 模块连接起来。也可以选装一种增程器（双缸汽油发动机），可以将该车的可行驶里程提高到 300 km。在装配了在丁格芬工厂已经预装好的前桥支架和其它车身结构件之后，BMW i3 的 Drive 模块就可以进行最后总装了。

整车总装

碳纤维强化塑料车厢从车身制造车间进入总装车间。在 Life 模块装配线上为车厢加装客户指定的各种配置。然后铝合金 Drive 模块将迎来最佳时刻。将碳纤维强化塑料车厢和铝合金底盘相互粘合起来。此外，还有四个螺钉固定点。这样就确保了最佳的刚性和稳定性。

两个工业机器人将粘合剂涂到 Drive 模块上。然后将这个模块送入车身拼装站，抬起并且对准中心。一个抓取式机械手再将 Life 模块放到 Drive 模块上。在车身自重的作用下开始执行拼装工艺。

只有在这之后，BMW i3 车身表面才有最终的塑料蒙皮。涂装的、由多个部分组成的车身蒙皮主要使用了热塑性注塑塑料。

车身制造和总装的流程时间为 20 小时，只相当于普通的车辆生产时间的一半，因为很多生产步骤是同时进行的，并且碳纤维强化塑料车身架构上安装的车身零件数量要少一些。

然后，和在莱比锡工厂生产的其它 BMW 车辆一起，BMW i3 要完成包括全面质量检查在内的最后工序。这样就确保了 i3 作为 BMW Group 的首款纯电动量产车型，也符合 BMW 始终坚持的高质量标准。同时，这样可以利用宝贵的协同作用。

对莱比锡工厂的总投资额为 4 亿欧元，BMW i 系车型的生产为当地新创造了 800 个工作岗位。

7. 在莱比锡工厂注重发展可持续性的生产



BMW i 系车型的生产为业界树立了新的标杆，与能源效率已经非常高的 BMW 车辆生产平均水平相比，耗电量减少了大约一半，用水量降低了 70%。莱比锡工厂生产 BMW i 系车型所需的额外用电来自设立在厂内场地上的四个风力发电机。

为了表彰按照可持续发展原则设计的建筑物，世界知名的美国绿色建筑委员会向莱比锡工厂新建的建筑物颁发了“LEED 金质认证”（绿色能源与环境设计先锋奖）。

通过一系列技术措施，大大降低了在车间里的耗电量。采用一个智能化的通风控制系统，每天通过车间天花板上的顶窗和侧窗给生产车间完全换气几次。在车身制造和总装车间中，自然通风减少了异味和灰尘给人们带来的麻烦。此外，在生产过程中变热的冲压车间，自然通风确保了必要的冷却。整个通风系统无需采用额外的鼓风机和空调装置。此外，车间天花板灯带上的白色薄膜反射阳光，减少了人工照明的使用率。而且从生态环保的角度来看，莱比锡工厂的新建筑也在汽车工业起到了典范作用。