

汽车复合材料应用相关技术问题探讨

应用于汽车行业最早始于 1953 年。55 年来，复合材料在汽车行业中的应用保持着持续增长的发展势头，并且这种发展趋势还将继续。复合材料在汽车行业中的用量之所以会持续增长，是因为它具备了许多优异的性能，如：强度高、重量轻和耐腐蚀。此外，与铝材和钢材相比，其加工成本更低、设计灵活性更强，且更容易成型。总之，复合材料是汽车行业替代金属材料的一个很好的可选项。然而，事实上，汽车制造领域其制作材料并没有完全直接从金属材料转换到复合材料，尤其在大批量生产的汽车方面，复合材料的应用还很有限。这是因为，有许多和复合材料使用相关的技术问题仍然没有很好地得到解决，其中包括准确的材料定性、生产、油漆、维修、与金属材料的连接以及回收等问题。尽管近年来世界上复合材料的新材料、新工艺和新技术不断涌现，从而在很大程度上使上述问题得到了改善，促进了复合材料在各类汽车中的广泛应用，但不可否认的是，复合材料在汽车上的广泛应用、特别是在中国汽车行业中真正意义上的广泛应用，仍然存在应用技术方面的各类问题，需要我们去关注、研究、探讨和实践。为此，本文将围绕汽车复合材料的涂装、连接、维修和回收等四大应用技术问题进行探讨，以期抛砖引玉。

汽车复合材料的涂装

在汽车工业中，车身的外表油漆质量是整车质量最重要的指标之一，因为车身油漆表面不仅起到保护车厢不被腐蚀的作用，而且对美化外观有着十分重要的影响。因此，尽管汽车主机厂承认复合材料与传统的金属相比具有种种优点，但是他们对复合材料经喷涂后的表面是否具有同金属表面一样的质量，仍持保留态度。事实上，复合材料在车身面板应用中遇到的一个最大挑战就是：复合材料经涂装后产生的瑕疵。

现以在车身面板方面使用最多的片状模塑料 SMC 部件为例进行分析。SMC 车身部件在涂装后，一般会产生很多的表面瑕疵，如：针眼、气孔、裂纹和气泡等，尤其在车身面板的边缘区域，气泡问题较为严重。为了弥补这些缺陷，减少不合格产品率，提高部件的表面质量，目前国内生产厂家主要采用大量的涂装后修补手段来加以改进，例如，在破泡、打磨、填腻子 and 抛光后，再按通常的涂装工艺进行表面再涂装。其结果是，虽然减少了不合格品率，但增加了大量的后修补工序和再涂装工序，从而使生产成本大幅上升。另外，也限制了 SMC 在 A 级车身面板上的应用。

通常，SMC 车身面板在涂装后产生表面油漆瑕疵和起泡的原因，除材料本身的原因外，绝大部分要归因于基质中的微小孔隙和微裂纹，而这些微小孔隙和微裂纹常常是在生产及搬运的过程中，因不注意人为形成的。例如，从部件的模压到脱模再到除边的过程，以及从部件

的包装到运输的过程中，由于操作不慎导致部件边缘处产生许多微裂纹。正是这些看似微不足道的微小孔隙和微裂纹，在油漆喷涂的过程中，会积聚空气中的水分和油漆中的挥发性溶剂。当油漆后的 SMC 部件通过烘箱高温烘烤时，水分和溶剂膨胀蒸发变成气泡逸出，造成已喷完漆的部件表面起泡或气泡破裂变成气孔、针眼等油漆瑕疵。

就 SMC 部件在涂装后产生表面瑕疵的问题，目前国外复合材料行业主要的解决办法是消除微孔隙和微裂纹，以从根本上杜绝油漆的表面瑕疵，从而收到了很好的效果。其措施主要包括以下几个方面：

1、生产高强度、高韧性 SMC 树脂

近年来，美国 AOC 公司和 Thyssenkrupp Budd 公司联合开发出了新的 SMC 树脂 Atryl TCA。这种 SMC 树脂强度高，生产出的部件可减少 50% 的表面波痕（与传统的 SMC 表面相比），并增加了 69% 的韧性（与传统的 SMC 树脂相比），从而显著地阻止了在脱模过程中及脱模后产生微裂纹的可能性，即使在重要的边缘区域也不会产生。

2、加强模压工艺控制，促进模具技术进步

通过改变 SMC 片材的加料方式和片材的铺覆位置，增加材料的流动距离，以及在闭模过程中确保材料的均匀位移等措施，以达到减少 SMC 部件孔隙量的目的。另外采用 PLC、NCN 控制的复合材料压机，对不同部件的模压工艺进行对应编程，以实现模压工艺控制；采用激光定位仪对材料铺覆进行正确定位等。对于大型或复杂零部件，采用真空辅助排气模具，以在真空条件下进行模压成型，从而可显著降低甚至消除 SMC 多孔性缺陷。

3、开发新型底漆涂料和新型涂装工艺

2003 年，BASF 公司针对 SMC“油漆气泡”难题，推出了 DynaSeal™ 紫外固化封孔剂，这种技术使得 SMC 部件在喷漆烘干前，通过紫外引发聚合反应对 SMC 表面进行封孔。在接下来的喷漆油漆固化中，这层紫外固化的封孔剂层可阻止 SMC 基体中吸收的挥发物逸出，从而避免了气孔的产生。另外一种方法是模内涂层(IMC)，即 SMC 在模具内部完全固化后，注入一层液体的涂层材料，这层涂层材料在 SMC 的表面固化并填满所有空隙，同时提供一层类似底漆的表面，防止了油漆气泡的产生。

4、文明生产，文明搬运

SMC 部件产生微裂纹，很大程度上是在部件从脱模到除边的过程中，以及从包装到运输的过程中，因不文明的生产和搬运方式而造成的。因此，加强文明生产和文明搬运的教育至关重要。目前，国外已普遍实行了“产品不着地”的生产方式。通过大力推广零件专用周转箱（架）的物流形式，减少了搬运次数，避免了零件之间的相互碰撞，以杜绝人为因素造成的微裂纹。

以上介绍了国外从新材料、新工艺和新技术等方面着眼，从根源上解决汽车复合材料在涂装方面不尽人意的缺陷的方法。这些方法消除了限制复合材料大规模应用的障碍，使复合材料车身面板能够达到或超过传统的钢铁材料的油漆质量。图 1 所示为涂装生产线中的 SMC 后厢盖外板。



汽车复合材料的连接和固定

随着汽车复合材料应用的日益广泛，汽车复合材料部件之间的组合装配以及复合材料部件与邻近金属零部件的连接固定的问题日益突出，汽车行业中传统的金属零部件之间的连接方式已不能适应客观应用的需求。因此，有必要了解和不断改进汽车复合材料的连接和固定方式，并进行合理选择。根据国外的成熟经验，汽车复合材料连接固定的方式主要有 3 种，包括：机械紧固、粘结剂粘接和焊接/熔接。

“机械紧固”使用的是铆钉和螺栓，是最普及也是最容易理解的一种连接方式。对汽车行业来说，机械紧固有许多不足之处，如：重量增加、应力集中、部件之间的交迭、高公差和电蚀性等。但是，机械连接不需要对表面进行处理或后续的抛光，这样更便于重复拆卸（如：检查、维修和回收）。相对而言，机械紧固对环境的影响（如对温度的影响）不很敏感。

相对于机械紧固，“粘结剂粘接”的方法具有以下优点：减轻结构重量，外观平整光滑，改善疲劳强度，适应性强、最适合薄壁部件的连接，粘接工艺简单，以及可缩短生产周期等。但是，粘结剂粘接也存在一些缺点，如：零部件的工作温度范围不高；粘接质量易受不同因素的影响，产品性能的分散性较大；没有可靠的检验方法；粘接面的表面处理和粘接工艺过程要求较严；需要专用的加热加压处理粘接工装等。因此，在一些重要的部件和连接位置，往往会采用粘结剂与某一种机械紧固的混合连接固定方法，既充分利用了粘结剂的优点，又确保了连接部位的足够强度和可靠性。

“焊接/熔接”主要应用于热塑性汽车复合材料部件，其主要优点是：良好的机械性能、连接处的耐用性、加工时间短、易于在线检测以及部件表面处理要求低等。目前，用于热塑性汽车复合材料的焊接/熔接方法主要有 3 种，即超声波焊接/熔接、电感应焊接/熔接和电阻焊接/熔接。“焊接/熔接”方法的不足之处在于：不易拆卸、需要添加导电性填料（针对电感应焊接/熔接）、需要使用金属网（针对电阻焊接/熔接），以及可允许的碳纤维含量很低（所有 3 种焊接/熔接工艺）等。

总之，上述 3 种汽车复合材料的连接固定方式各有优缺点，分别适应不同的应用场合。相对而言，粘结剂粘接的连接固定方法最有发展潜力。随着粘结剂向着功能性不断提高、具有双重效力（既可以粘接热固性复合材料，又可以粘接热塑性复合材料）以及绿色环保方向的发展，粘结剂粘接的连接固定方法正日益为汽车复合材料工业所重视、接受并盛行起来。限于篇幅，本节汽车复合材料的连接和固定，主要讨论粘结剂粘接的连接固定方法。

1、 粘结剂粘接的连接固定方法的优点

近年来，由于高性能结构粘结剂的出现，使得采用粘结剂粘接的连接方式不断受到人们的认可。作为一种最有发展潜力的连接固定工艺，它有许多突出的优点，包括：可以根据具体的设计要求(如防撞击性能)来决定粘结剂的机械性能；粘结剂的超抗疲劳和耐腐蚀的优点可以延长产品的使用寿命；粘结剂具有很好的密封性；将两种材料或结构粘接在一起，可以获得比较光滑的表面，具有造型设计上的优势；通过整个粘接区域，来分散部件承受的负荷，从而避免了局部最大应力的集中；粘结剂填充空隙的特点可允许部件有一定的公差；可对粘结剂的硬度进行调整，以优化整个产品的硬度。

2、 常用结构粘结剂的种类

通常，以环氧树脂、聚氨酯树脂和丙烯酸酯树脂为基础的粘结剂是常用的三大类汽车复合材

料结构粘结剂，它们各具特点，使用时应针对不同的材料和要求进行选择。

环氧基粘结剂对复合材料、热固性塑料和金属的粘接性极好，其强度、挠度和弹性都很高，且固化过程收缩性最小。该类型的粘结剂分为单、双组份两种。单组份的环氧粘接剂要求热固化，应用条件相对苛刻。

聚氨酯基粘结剂对绝大部分的复合材料和塑料的粘接性极好，对金属的粘接性较好。其机械性能较宽泛，从刚性到挠性均可。同时，该粘结剂的持久性也很好，固化速度的范围较广。但是，其在加工过程中对湿度比较敏感。

丙烯酸基粘结剂对复合材料和热固性塑料的粘接性均极好，对金属的粘接性也不错。它允许对预处理效果不好的部件进行粘接，且能实现高强度与高韧性的最佳结合。此外，它还具有耐化学性好，有效使用期长以及固化速度快的优点。但是，这种粘结剂有恶臭，固化过程中收缩性较高。

汽车复合材料结构粘结剂的典型性能

	单组份环氧	双组份丙烯酸酯	结构双组份聚氨酯	备注
拉伸模量 (MPa)	100 ~ 700	100 ~ 800	90 ~ 300	5 ~ 50
搭接剪切强度 (MPa)	10 ~ 26	10 ~ 24	9 ~ 20	2 ~ 5
断裂延伸率 (%)	3 ~ 60	10 ~ 80	10 ~ 95	290 ~ 390

表中数据为汽车复合材料 3 类结构粘结剂的典型性能。由于结构粘结剂的品种繁多，使用的要求又各不相同，所以应以实际使用结构粘结剂的性能为准，表中数值仅供参考。

3、粘接前的表面处理

汽车复合材料（尤其是热塑性汽车复合材料）的表面能都相对较低，所以在使用结构粘结剂之前，需要对其表面进行适当的处理，以去除表面的污垢、粉尘、油污、油脂、水分、脱模剂和增塑剂等，同时，提高基材的表面能，使其高于结构粘结剂的表面能量，以确保结构粘结剂能够充分润湿基材表面，这对于实现坚固可靠且持久的粘接至关重要。下面介绍 3 种常用的表面处理方法。

（1）溶剂擦拭法。这是最简单的表面处理方式，能够去除粘接表面的蜡质、油污和其他小分子量的污染物。这项技术要求污染物可溶于溶剂，且溶剂本身不含溶解的污染物。为此，对溶剂的选择非常重要。一般，常用的溶剂包括：丙酮、丁酮、甲基异丁基酮、二甲苯、三氯乙烯、乙醇和异丙醇等。在擦拭中，应注意使用清洁的无尘擦布或纸巾。这种表面处理方

法的缺点是：溶剂可能会对基材产生不良影响，如热塑性复合材料可能会被溶解，显现出应力裂纹或龟裂；可能会造成交叉污染，如样品与样品之间的污染、重复使用或浸入到溶剂中的抹布的污染等；产生的蒸汽可能会危害工人的健康；不适用于大规模的生产要求（大规模的工业生产可选用蒸汽脱脂和超声波蒸汽脱脂的方法）。

（2）打磨法。打磨可去除表面污染物，并获得高度毛化的表面，从而增加结构粘结剂的粘接触面，以产生“咬合效应”。常用的打磨方法包括：采用钢丝刷、砂纸或锉削等的手工打磨；采用砂带、砂轮或喷丸/喷砂等的自动打磨；以及相对较快，对操作者依赖性低，且重复性和成本效益均较好的机械打磨等。

（3）火焰处理法。火焰处理是利用气体或气体/氧气火焰，对表面进行部分氧化，以产生极性基，从而提高聚合物的表面能。此技术所处理的基材厚度较采用电晕预处理的基材厚度大，尤其适用于不均匀的热塑性复合材料制品。其优点是：气体与氧气的比例、流量、暴露时间和火焰与基材的距离易于调节，已被证实是适用于聚丙烯类复合材料的较有效的方法。

目前，汽车复合材料粘接前的表面处理，除了以上介绍的 3 种常用方法外，还有一些相对先进，以及适应特殊粘接要求的复杂的表面处理技术，如等离子体处理、电晕放电处理和化学处理等。但无论采用那种方法，必须获得清洁的粘接表面，以确保粘结剂能够充分润湿基材，这是我们应该严格关注的。

4、粘接接头的设计

除了粘结剂的选择与配制，以及表面处理等关键步骤外，粘接接头设计的好坏同样将直接影响到粘接的性能和强度。汽车复合材料粘接接头设计的一般原则是：保证粘接面上的应力分布均匀；使应力最小化，从而使粘接面纯粹受拉力和剪切力的作用；尽可能扩大粘接面积等。汽车复合材料粘接接头的结构设计形式多种多样：根据被粘物的形状，可分为平面搭接、角形搭接、T 形粘接和管、棒形粘接等；根据材料的粘接方式，又可分为对接、搭接、插接以及对切双搭接等。从接头形式看，一般认为，插接结构比较理想，其次是搭接和斜搭接。在实际应用中，主要根据被粘接制品的结构和需粘接的部位而具体分析和确定。图 2 所示为采用机械手涂胶工艺在白车身上预涂结构粘结剂。



汽车复合材料部件的维修

对于碰撞受损后的汽车维修，传统上只是简单地将受损变形的车身固定，用加热、机械拉伸的方式进行维修，然后再靠榔头等简单工具调整和修复车身钢板、车门和立柱等的间隙和形状，最后靠腻子、原子灰以及修补漆等使其恢复原貌。目前，人们对钢板车身的维修已驾轻就熟了。但随着汽车复合材料在汽车车身上应用的日益广泛，对它的维护修复却开始成为汽车行业新的困惑。那么，汽车复合材料部件在碰撞受损后，究竟能不能修复？如果可以，怎么进行修复？经修复后的车身能否恢复到受损前的状态？对于这些问题，答案是明确的：目前，在汽车上所使用的复合材料部件都是可以修复的，而且完全能达到受损前的状态。之所以会得出这样的结论，是因为在过去的若干年中，维修汽车复合材料所用的粘结剂等产品已得到了极大的改进，维修的工艺技术也日臻成熟。从某种意义上讲，汽车复合材料的维修工序要比钢板材料更加简便和易于操作。

当然，汽车复合材料部件是否需要修复，主要取决于碰撞的程度。一般，有三种碰撞情况：一是轻微撞击。由于汽车复合材料本身具有良好的抗撞击性能，如能经受普通手推车的撞击而不会产生凹陷，也不会损坏，因此这种状况不需要维修；二是猛烈的撞击，即汽车复合材料严重受损，这时通常建议更换部件而不做维修，因为维修成本会大于更换部件的成本；三是虽经碰撞而受损不严重，在经济上值得维修。这是本节讨论的重点。

目前，大多数维修部门已经掌握了手工铺层玻璃纤维增强塑料的维修技术，而对在车身面板方面使用最多的片状模塑料 **SMC** 部件的维修却缺乏认识，仍采用传统的手工铺层玻璃纤维增强塑料的维修方法，结果常导致维修失败的现象。这是由于，**SMC** 的化学组成成份和手工铺层玻璃纤维增强塑料是不相同的。维修 **SMC** 部件通常需要专用的 **SMC** 材料制成的粘结剂，而 **SMC** 维修专用粘结剂的玻纤含量要与被维修 **SMC** 部件的玻纤含量基本一致，这

样才能使修补的部分与被修部件保持相对一致的热膨胀或收缩比率，否则，维修数周后会出现类似“牛眼”或“晕环”的形状，导致维修工作的失败。另外，无论在维修过程中使用何种材料，都必须按照粘结剂供应商的指导说明正确操作，尤其要特别注意维修材料的固化时间。

下面就汽车复合材料的维修方法用图示的方式做一简单介绍。

1、汽车复合材料部件的双侧维修方法

如图 3 所示，在维修前，先在 **SMC** 部件正面的裂缝处劈出 V 型凹口，然后清理、打磨，并用溶剂清洗所有要维修的区域。当正面一侧准备好后，将 **SMC** 专用维修粘结剂充分地涂抹在凹口里。



图 4 所示为粘结剂涂好之后，用刮板延展器抹平，使其光滑、平整，待固化后再作后处理。如图 5 所示，在需要维修部位的后部，使用维修复合材料的专用玻纤网状织物，其大小和形状应和所需维修的部位大致相同。



如图 6 所示，在维修用的玻纤网状织物上涂抹粘结剂后，将其粘贴到需要维修部位的后部，将二者粘接在一起，直到粘结剂完全固化。

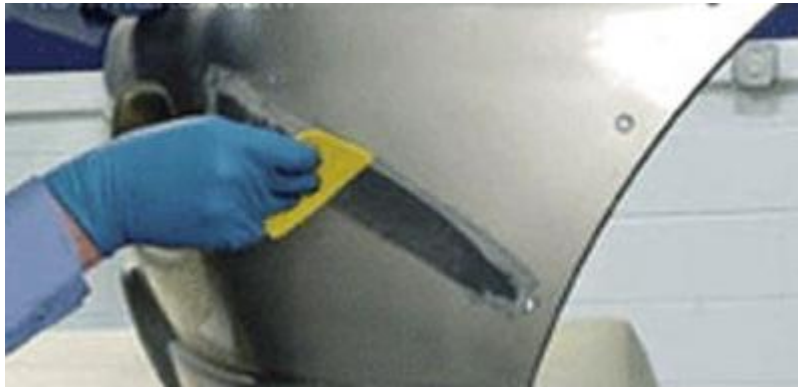


2、汽车复合材料部件的单侧维修方法

如图 7 所示，当受损的 SMC 部件为 V 型时，先对其进行清理，并用溶剂清洗好待维修区域后，直接将专用的 SMC 维修粘结剂涂抹在上面。



如图 8 所示，当专用的 SMC 维修粘结剂被均匀地填充到需要维修的部位后，等待粘结剂的固化，然后再用打磨机慢速地对粘结剂进行打磨。



如图 9 所示，如果粘结剂涂抹的有任何缺陷，可将修整用的填料涂抹在已固化的粘结剂上面，进行后整理。



汽车复合材料的回收

出于经济和环保的原因，回收工艺在汽车行业中的应用已有很长的历史。早期的汽车，如轿车、客车和卡车等，由于使用的几乎全是金属，因此回收方法主要是将废旧的金属部件熔化掉，以再次利用。这种回收方法对于金属材料来说是相当理想的。通过熔化处理，金属部件可以成为新的材料。但遗憾的是，汽车复合材料却不能像金属材料这样回收，这就是人们常问及的问题：汽车复合材料是否属于可回收的材料？如果是，怎样才能方便地对其进行回收？

众所周知，汽车复合材料包括热固性和热塑性材料两大类，其中热塑性汽车复合材料可以通过再熔化进行回收利用，这已为大家所熟知。实际上，人们更多关注的是热固性汽车复合材料的回收和再利用问题。在此需要明确的是，热固性汽车复合材料同样属于可回收的材料，这在汽车复合材料应用最为发达的美国、欧洲等国家早已有定论，只是热固性汽车复合材料因为具有化学、热力学和机械稳定性较高的特点，一方面使它们成为汽车许多应用领域的首选材料，另一方面也存在着其回收有一定困难的客观事实。热固性汽车复合材料不像传统金属材料 and 热塑性汽车复合材料那样，可以通过简单再熔化的方式来回收，它们必须用不同的回收方法进行处理。

针对热固性汽车复合材料的处理和回收，人们通过不断的探索和实践，已研发出了多种回收处理技术，其中为行业普遍接受的回收处理方法有 3 种：热解法、粉碎法和焚烧法。

1、热解法

热解法又称为“化学回收处理法”。简单地讲，热解法是在无氧的环境中加热，将有机物质有控制地热分解成可回收的一种或多种物质的方法。热固性汽车复合材料热解处理的一般过程为：先将废旧的热固性汽车复合材料制品切割成 50mm×50mm 大小的碎块，用水蒸气蒸煮后，置于热解炉中处理。结果显示，热固性汽车复合材料在处理系统中很容易被蒸馏，苯乙烯-聚酯树脂基材料很快挥发而转变为可燃气体和可燃油。这样，有机物质便完全从玻璃纤维和 CaCO_3 中分离出来。热解法处理后，即得到 3 种可回收物质，包括：热解气、热解油和固体副产物。

2、粉碎法

粉碎法又称为“物理回收处理法”，是一种直接利用废旧热固性汽车复合材料，而不改变其化学性质的一种回收方法，也是目前最直接、最有效的方法。其处理一般过程为：先将废旧的热固性汽车复合材料切成 50mm×20mm 大小的碎块，并通过除铁处理，然后用锤磨机对碎块进一步粉碎，粉碎后的粉料通过二级气旋式分离器进行分级分理，粗料重回锤磨机再粉碎，粉料进入振动筛进行分级处理。接着，将各种不同颗粒直径的粉料分别贮存于相应的收集箱内，供各种不同应用场合再利用。通常，粉碎法的效果较好，效率较高，实用性也强，可以制成大至 9.5mm 的有用颗粒粗料，也可制成小至 200 目(60μm)或更细的粉状填充料。图 10 所示为通过粉碎法回收的粉状填充料。



3、 焚烧法

焚烧法又称为“能量回收法”，是一种将废旧热固性汽车复合材料作为燃料进行焚烧，以获取能量的回收方法。其处理一般过程为：先将废旧的热固性汽车复合材料粉碎为粒径 10mm 大小的粉末，然后吹入水泥窑炉内，作为燃料燃烧，从而以能量的方式对其进行回收。焚烧中，交联的聚酯可产生热能，而经煅烧的灰分可作为水泥原料使用。这种方法的特点是：把废旧热固性汽车复合材料的一部分转化成能源，可以减小部分燃料用量，也减少了 CO₂ 的排放。另外，由于窑炉内温度高，产生的有害气体极少，因而不存在有害气体污染空气的问题。通常，经煅烧的灰分与水泥的化学成分相同，因而完全可作为水泥原料使用。显然，焚烧法能将能源利用和材料回收结合起来，从而对废旧热固性汽车复合材料一次性全部回收，因此具有很好的推广价值。

通过上述 3 种回收处理方法的介绍，我们可以更加明确地知道，汽车复合材料部件不仅是可回收的，而且其回收技术没有任何障碍。根据国外回收处理的经验，汽车复合材料回收存在的最大问题是回收后材料的最终使用以及成本方面的问题，这些问题需要我们今后认真去研究和关注。

结束语

复合材料在汽车中的应用已有 55 年的悠久历史。在世界范围内，复合材料被广泛地应用到汽车的车身内、外饰件以及部分半结构件和结构件，为汽车工业的轻量化做出了巨大的贡献。在此过程中，人们积累了丰富的设计、制造和应用经验，以及大量的成功范例，这是汽车复合材料行业的骄傲，也是汽车工业引以为荣的成就。但是，我们应该清醒地认识到：尽管汽车复合材料具有很大的发展潜力，汽车复合材料行业也需要展示这些复合材料产品的优点，

以及和金属件相比所存在的优势,但这并不意味着汽车复合材料在未来就一定或必然会替代金属材料。可以预见的是:在相当长的一段时间内,复合材料应用于汽车行业的数量将不断增加,但决不会完全替代金属材料。在汽车工业中,复合材料一种比较理想的应用情况是:汽车设计师将同时采用复合材料和金属材料进行设计和制造,分别利用它们各自最佳的性能特点,设计制造出真正意义上的高性价比的新一代汽车。当然,采用这种混合材料进行汽车的设计和制造时,必须要谨慎地考虑复合材料和金属材料间的相容性问题。另外一个必要条件是,需要拥有产品设计、模拟和生产方面的软件。希望有一天,汽车工业能像制造波音787 [飞机](#)一样,50%采用复合材料,这将从节能、环保、安全和舒适性方面,对世界的汽车工业产生重大的影响!我们期待着这一天,并为这一天的早日到来而努力!