

Module 1 Introduction

Unit 1 Evolution of Aviation Materials

航空材料的演变

“一代材料，一代飞机。”在某种程度上，航空材料的发展决定着航空工业的发展。性能的提高，即更高的结构效率，取决于材料的选择和加工。飞机结构设计和航空航天材料开发的主要推动力是减轻重量。一般来说，高刚度、高强度、重量轻的材料最适合飞机应用。飞机结构材料的发展经历了四个阶段，目前已进入第五个阶段。这五个阶段是：

- ★ 第一阶段（1903—1919年）：木材、布料。
- ★ 第二阶段（1920—1949年）：铝、钢。
- ★ 第三阶段（1950—1969年）：铝、钛、钢。
- ★ 第四阶段（1970年—21世纪初）：铝、钛、钢、复合材料（以铝为主）。
- ★ 第五阶段（21世纪初—）：复合材料、铝、钛、钢（以复合材料为主）。

随着飞机的发展，飞机骨架上各种材料的用量不断变化，总的趋势是复合材料和钛合金用量逐渐增加。

1903年，莱特兄弟成功地制造了人类历史上第一架动力飞机。它是由木框架、织物和金属丝支撑制成的。木结构占飞机总重量的47%。也就是说，第一架飞机的主要材料是木材和织物。

为了使飞机更坚固、更可靠，机体结构中使用了金属。1915年，容克J-1成功飞行。它被认为是世界上第一架全金属飞机。制造飞机的主要材料是铁和钢。

由于钢的密度高，不宜在飞机上广泛使用。为了达到减轻重量的目的，铝合金被研制了出来。铝合金重量轻、耐腐蚀，是当时最适合航空的材料。它的主要缺点是熔化温度低。轻型铝单体结构在20世纪30年代初开始作为承重结构使用。1956年至1969年期间，为了解决铝的高温不耐性和钢的重量的问题，专家开发了钛合金。由于钛合金比铝更坚固、更硬，因此被广泛应用于许多高温构件结构，如起落架、接头等。到20世纪50年代，向全金属飞机的过渡已经完成。

从1970年至今，复合材料已成为航空结构材料家族中的新成员。波音747拥有超过10000 sq.ft.的玻璃纤维复合材料结构。波音777使用碳纤维复合材料作为尾翼和地板梁以及襟翼的主要结构。飞机结构采用先进的复合材料，具有高强度重量比特性。通过使用复合材料，飞机部件的重量减少了25%。飞机上的复合材料由石墨、玻璃纤维或芳纶凯夫拉纤维组成，编织成织物形式，并预先浸渍部分固化的树脂。当其与Nomex蜂窝芯结合时材料完全固化，具有高强度、高刚度、低重量的结构效果。机翼前缘和后缘面板、控制面和机翼到机身的整流罩都是以这种方式构造的。面板边缘带和控制面梁和肋弦由无芯的层压板材料构造。

随着技术的发展，许多智能材料不断涌现，如：纳米材料、自修复材料、微晶格等。我们相信越来越多的新材料将用于航空工业。

Unit 2 Properties of Aviation Materials

航空材料性能

当选择材料时，我们需要考虑某些外部条件对组件的影响，例如负载、温度或通过材料的电流强度。材料的机械性能决定了其使用范围和预期使用寿命。大多数结构材料都是各向异性的，这意味着它们的材料特性随方向而变化。此外，材料的机械性能并不是恒定的，经常会随着温度、载荷和其他条件而变化。例如，低于室温的温度通常会导致金属合金的强度特性增加，延展性、断裂韧性和伸长率降低。

航空航天产品受其使用条件和环境的限制，对材料有严格要求，而对结构材料来说，最关键的要求是高强度、轻重量、耐高温和耐腐蚀。

强度

拉伸特性表明材料将如何对张力下施加的力作出反应。拉伸试验用于确定弹性模量、弹性极限、伸长率、比例极限、面积折减、拉伸强度、屈服点、屈服强度和其他拉伸性能。应力是指使物体变形的作用力或力系。应变是系统对施加应力的响应，定义为施加力方向上的变形量除以材料的初始长度。材料强度的增加使飞机能够实现更大的装载能力。

重量

在保证材料足够强度和保持原有飞行性能的情况下，减轻材料的重量可以大大提高飞机的有效载荷能力。航空产品可以说是追求轻量化和减重的“关键”产品，对于航天飞机来说，每减重 1 公斤将带来超过 1 万美元的经济效益。

温度

高温材料是制约航空航天产品性能的另一个关键材料。为了适应航空航天产品日益增长的温度要求，出现了许多新材料，如金属基化合物、陶瓷、碳 / 碳和各种复合材料。飞机蒙皮的最高温度可以达到 1000℃ 以上，而发动机的工作温度高达 2000℃。对于航空航天产品而言，还需要考虑该材料的超高温和超低温能力，以及它在太空环境中的耐用性。例如，为了提高燃料燃烧效率并确保在重返大气层期间得到保护，有必要使用高温耐热材料；为了保存液氢和液氧等低温推进剂，需要耐低温和超低温材料以及绝缘材料。

电磁特性

各种吸波材料的研制，直接提高了飞机的隐身性能。非金属导电材料使飞机的蒙皮成为机载电子设备天线的一部分，从而消除了笨重复杂的机载天线。

Module 2 Common Types of Aviation Materials

Unit 3 Metal Materials

3.1 Ultra-high Strength Steels & Stainless Steels

超高强度钢

对于航空工业来说,降低飞行器或构件自身的重量至关重要,因此要求材料的比强度(强度/密度)高。超高强度钢是指屈服强度大于 1300 N/mm^2 , 抗拉强度大于 1400 N/mm^2 的钢,通常不在调质状态下使用。根据合金元素含量多少,它们可分为低合金、中合金和高合金超高强度钢。常用的这类钢是低合金超高强度钢。航空常用的超高强度钢有 $30\text{CrMnSiNi}2\text{A}$ 、 40CrMnSiMoVA 、 $32\text{Si}2\text{Mn}2\text{MoV}$ 等。

尽管在飞机制造中钢的比重不断下降,但由于钢的高强度、高韧性、高耐应力腐蚀开裂性以及良好的抗冲击性能,它仍被广泛应用于一些关键的承重结构部件,如起落架、梁、高应力接头和高应力紧固件。超高强度钢的一大缺点就是疲劳性能对应力集中非常敏感,因此构件的疲劳性能会大幅度下降,甚至不到材料原本性能的一半。

超高强度钢现已大量应用于火箭发动机外壳,飞机起落架、机身骨架、高压器和常规武器的某些零部件上。除了起落架以外,飞机上还有很多关键部位的连接构件必须用超高强度钢,如主翼和机身的连接件,这些构件的一个共同特点是体积虽小但作用巨大,某个部位的连接构件一旦断裂,可能直接导致飞机解体。因此,设计师在选择这些构件的材料时重点考虑的是强度等综合性能,比重在这里已不是最关键的指标了。航空超高强度钢在航空器中还有一个很重要的应用,就是传动部件,比如航空发动机中的轴承和传动齿轮。

不锈钢

飞机向长寿命、高可靠性方向的发展,对材料耐腐蚀性能的要求越来越高。因此,采用高强度不锈钢制作某些重要零部件已成为主要发展趋势。

不锈钢按正火状态的组织可分为马氏体不锈钢、铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢。除此之外,还有一类新型的不锈钢叫作沉淀硬化型不锈钢,它通过适当合金化以后,利用热处理时奥氏体转变为马氏体及其时效析出金属间化合物而使钢强化,所以又称马氏体时效不锈钢(或称奥氏体—马氏体时效不锈钢)。这类钢强度高(σ_b 可达 $1000\sim 1500\text{MPa}$),高温性能好,易于成形和焊接,主要用于航空工业及火箭、导弹生产方面。

Unit 3 Metal Materials

3.2 Super Alloys & Aluminium Alloys

超合金和铝合金简介

超合金

超合金，又称高温合金或者耐热合金。超合金是可在 600 ~ 1100 °C 温度下承受一定应力、抗氧化和抗腐蚀，以镍、铁或钴为基体的金属材料。超合金是制造航空和航天发动机关键部件不可或缺的材料，也是兵器、电力、石油、化工等工业领域所需的重要材料。在先进的航空和航天发动机中（如图 3-1 所示，见正文），超合金是制造航空航天发动机热端部件的关键材料，其用量占发动机总重量的 80%。

铝合金

在工业生产中，钢铁材料被称为黑色金属，而其他的金属材料被称为有色金属。与钢铁等黑色金属材料相比，有色金属具有许多优良的特性，是现代工业中不可缺少的材料，在国民经济中占有十分重要的地位。例如，铝、镁、钛等相对密度小、比强度高的材料，被广泛应用于航空、航天、汽车、船舶等行业；银、铜、铝等导电性和导热性优良的材料，是电器仪表和通信领域不可缺少的材料；镍、钨、钼、钽等合金熔点高、耐热性好的材料，是制造高温零件和电真空元器件的优良材料。更具体地说，铝及铝合金具有以下特点：

- ★ 高比强度。纯铝的密度为 2.7 g/cm^3 ，仅为铁的 1/3。铝合金的密度与纯铝相近，强化后铝合金与低合金高强钢的强度相近，铝合金的比强度要比一般高强钢高许多。
- ★ 优良的理化性能。铝的导电性好，仅次于银、铜和金，其在室温下的导电率约为铜的 64%。铝及铝合金有相当好的抗大气腐蚀能力，铝及铝合金磁化率极低，接近于非铁磁性材料。
- ★ 良好的可加工性能。铝及退火状态下的铝合金塑性很好，可以冷成形，切削性能很好，铸铝合金的铸造性能也极好。此外，它们还可通过热处理获得很高的强度。

铝合金是亚音速飞机的主要用材，飞机上的蒙皮、梁、肋、桁条、隔框和起落架都可以用铝合金制造。应用最广的“飞行”金属——铝合金，在 21 世纪将继续占有重要位置。进一步的发展途径在于合金、工艺上的创新，例如新出现的 C80A 合金，不仅改进了 A380 的后机翼大梁的强度，而且还降低了其重量。

Unit 3 Metal Materials

3.3 Magnesium Alloys & Titanium Alloys

镁和钛合金的性能

镁合金

镁及镁合金的主要优点是密度小，比强度、比模量高，抗震能力强，可承受较大的冲击载荷，并且其切削加工和抛光性能优良，但镁的化学性质很活泼（抗腐蚀性能差），熔炼技术复杂，冷变形困难，缺口敏感性大，因而阻碍了其发展。

镁合金是结构材料中最轻的一种金属，因此镁合金在飞机、导弹、仪表、无线电等制造业中应用广泛。镁合金的特点及应用如图 3-2 所示（见正文）。

钛合金

长期以来，人们认为飞机速度达到音速的 2 ~ 3 倍时存在难以逾越的“热障”，因此需要更加优异的新材料，钛合金就是这些新型材料中的佼佼者。美国的 SR-71 高空高速侦察机（绰号黑鸟）是实用型飞机，可在 24000m 高空以 3.2 马赫以上的速度飞行。它使用 93% 的钛合金作飞机的结构材料，等于给飞机穿了一身防高温的钛铠甲，号称全钛飞机。钛合金的性能特点主要表现为：

- ★ 比强度高。钛合金密度小 (4.4 kg/dm^3)、重量轻，但其比强度却大于超高度钢。C-5 银河号是大型军用运输机，其 70% 的紧固件都是由钛合金制成的，这使其重量直接减少 1 吨。钛合金、铝合金和钢的强度对比如图 3-3 所示（见正文）。
- ★ 热强性高。钛合金的热稳定性好，在 300 ~ 500 °C 条件下，其强度约比铝合金高 10 倍。
- ★ 化学活性大。钛可与空气中的氧、氮、一氧化碳、水蒸气等物质产生强烈的化学反应，在表面形成 TiC 及 TiN 硬化层。
- ★ 导热性差。钛合金导热性差。例如，钛合金 TC4 在 200 °C 下的热导率 $I=16.8 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ ，导热系数是 $0.041 \text{ cat/(cm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C)}$ 。
- ★ 尽管钛具有其优点，但其特殊性质需要严格的条件和复杂的冶炼、加工和热处理工艺，导致生产成本过高。

Unit 4 Non-metallic Materials

4.1 Structural Ceramics

陶瓷简介

陶瓷是一种无机非金属固体，由粉末材料通过加热制成。它们作为结构构件，经常承受机械载荷，所以被称作结构陶瓷。

一般来说，对于结构应用而言，陶瓷往往是其他材料如金属聚合物和复合材料的昂贵替代品。然而，在一些具有侵蚀性、腐蚀性或高温环境中，它们就是不可替代的。这是因为陶瓷中的化学键很强。比如，某些先进的陶瓷具有优异的耐磨性，这使其成为矿物加工设备磨损应用的理想选择。另外，陶瓷是有化学惰性的，因此在人体的高腐蚀性环境中被用作骨替代物。

最常用于结构应用的陶瓷是氧化铝 (Al_2O_3)、氧化锆 (ZrO_2)、碳化矽 (SiC) 和氮化矽 (Si_3N_4)。氧化铝是最常用的高级陶瓷，主要是因为它的成本较低(相对于其他陶瓷)，具有优良的耐环境性能，以及优异的室温性能。低导电性导致其在电子产品中的应用。它被用于火花塞、装甲板和髋关节植入物。由于 Al_2O_3 的强度在高温下会下降，因此对于燃气轮机应用来说，它不如氧化硅或碳化硅有吸引力。

制作陶瓷有四个步骤。陶瓷加工的第一步是制备陶瓷粉。第二步是成型(湿黏土成型)。成型陶瓷的方法有很多种，主要取决于产品的最终形状。第三步是烧结(干燥)，这是加热引起的物料固结过程。烧结温度在陶瓷材料中主要成分熔点的 $2/3 \sim 4/5$ 。烧结的明显迹象是材料的收缩。最后一步是用火烧至黏土。

陶瓷基复合材料除了具有重量轻，硬度高的优点以外，还具有优异的耐高温和高温抗腐蚀性能，是高性能涡轮增压发动机高温区理想的材料。陶瓷基复合材料比高温合金的密度小，仅仅是它的 $1/3 \sim 1/4$ ，热膨胀系数小，抗腐蚀性好，理论最高温度可达 $1650\text{ }^\circ\text{C}$ 。陶瓷基复合材料在航空工业领域是一种十分有发展前途的新型结构材料，尤其是在航空发动机制造应用中。比如美国验证机的 F120 型发动机，它的高压涡轮密封装置，燃烧室的部分高温零件，均采用了陶瓷材料。再比如法国的 M88-2 型发动机的燃烧室和喷管等也都采用了陶瓷基复合材料。

Unit 4 Non-metallic Materials

4.2 Engineering Polymers

橡胶：性能和应用

工程聚合物包括天然材料(如橡胶)和合成材料(如塑料)。聚合物是非常有用的材料，因为它们的结构可以改变和定制，以生产具有以下性能的材料：

- ★ 具有一系列的力学性能。
- ★ 颜色繁多。

与金属相比，塑料的机械强度不是特别高，但由于其强度与重量比，低密度使其强度与金属相当。如果一种材料的强度与重量之比很高，它就具有较高的比强度。

橡胶作为一种常见的高分子材料，不仅在民用领域发挥着重要作用，还扮演着军工和航天航空领域的关键角色。据统计，一架飞机使用橡胶制品达 8000 ~ 13000 项（其重量约 300 ~ 500kg），密封胶超过 1t，所以橡胶是航空装备不可缺少、不可替代的重要配套材料。

航空橡胶材料能够在广泛的温度范围内保持其弹性和机械性能，从极低温度到高温环境都能适应。航空橡胶材料具有良好的耐油、耐溶剂和耐化学介质的性能，可以在各种化学环境中工作，如油、汽油、润滑剂等。航空橡胶材料能够有效吸收和分散机械振动和冲击能量，减少振动的传递，具有良好的减振和隔振效果。航空橡胶材料具有较高的耐磨性能，能够在恶劣条件下保持长久的使用寿命。航空橡胶材料在户外环境下能够长时间使用而不受损，具有较好的抗氧化和耐臭氧性能。

航空轮胎作为维系飞行安全的 A 类零部件，天然橡胶是其制造过程中所使用的要求最高、用量最大的原材料（如图 4-1 所示，见正文）。随着武器装备的发展，原来的天然橡胶，在数量和性能上已远不能满足需求，因而各国都开始使用合成橡胶，这些橡胶在耐热、耐老化、耐油介质等方面比天然橡胶好得多，因而合成橡胶迅速被应用到了飞机的氧气、油介质系统的密封、减振降噪、电气绝缘等方面，促进了航空装备的发展。

Unit 4 Non-metallic Materials

4.3 Aircraft Coatings & Aircraft Fuel

介绍飞机涂层和燃料

航空涂料

涂料的作用主要有保护,装饰,掩饰产品的缺陷和其他特殊作用(绝缘、防水、防霉、耐热),从而提升产品的价值。涂料由黏结剂、颜料、溶剂和其他辅助材料组成。黏结剂用于牢固膜和被涂物;颜料除了上色还可以提高膜的强度、耐磨性、耐腐蚀性;溶剂用于稀释涂料,便于涂抹;辅助材料包括催干剂、增塑剂、固化剂、稳定剂等。

航空涂料是指用于飞机上的涂料。按使用部位可分为飞机蒙皮涂料,飞机舱室涂料,飞机发动机涂料,飞机零部件涂料,特殊专用涂料(包括隔热涂料、防火涂料和示温涂料)等。航空涂料除了传统的保护、装饰功能外,其重要性更大程度是体现在特殊功能性上,如耐高温、耐烧蚀、隔热、耐腐蚀、隐身、防腐蚀等,所以航空涂料的技术水平在某种意义上代表着一个国家航空工业的发展水平。

航空燃料

航空燃料是现代飞机动力的主要能量来源,如果说发动机是飞机的“心脏”,那么各类型的航空燃料则是飞机流淌的“血液”。目前,世界各航空公司所使用的航空燃料主要有两大类:航空汽油和喷气燃料,分别适用不同类型的飞机发动机。航空汽油是用在活塞式航空发动机的燃料,随着航空工业和民航事业的发展,民航的大型客机的动力装置逐步被涡轮喷气发动机代替。航空煤油是喷气式发动机使用的燃料,由于喷气式发动机是通过燃烧将燃料转变为高温高压的燃气,从而产生推力,所以航空煤油往往被称为喷气燃料。

目前各国都有对航空汽油的分类标准,而且不同国家的评定指标有一定的差异。我国在20世纪60—70年代,将航空汽油分为RH-75、RH-95/130、RH-100/130三种(俗称75号汽油、95号汽油和100号汽油)。牌号中R表示石油燃料类;H表示航空汽油组。数字表示抗爆性,数字越大,其抗爆性越强。RH-75航空汽油适用于轻负荷低速飞机;RH-95/130航空汽油适用于中负荷高速飞机;RH-100/130航空汽油适用于重负荷高速飞机。

航空煤油分为三个等级,其牌号分别以RP-1和RP-2、RP-3表示。牌号中的R表示石油燃料类;P表示喷气燃料组;数字表示序号。3号航煤被广泛使用,该油英文名称Jet fuel No.3。

航空煤油是经直接炼制和二次加工从原油中提炼出来的,一般产量不高,只占原油的10%左右。由于混淆航空燃油的种类会非常危险,所以航空汽油会被染成红色、绿色或蓝色。航空煤油是无色的。

Unit 5 Composite Materials

5.1 Reinforcements

5.1.1 Common Fibre Reinforcements

玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维的性能

玻璃纤维

玻璃纤维通常用来增强塑料。它主要由氧化硅和其他元素混合而成。这些材料熔化在一起，通过模具拉出，冷却后制成纤维。纤维直径通常为 0.00015 ~ 0.000 in。虽然不同的牌号具有不同的材料性能，但玻璃纤维具有许多优点，例如：

- ★ 耐高温。
- ★ 不易燃的。
- ★ 防腐。
- ★ 热 / 声 / 电绝缘。
- ★ 高抗拉强度。

玻璃纤维是应用最广泛的纤维。玻璃纤维是一种坚韧的材料。玻璃纤维有两类：E 型玻璃和 S 型玻璃。E 代表电气玻璃，S 代表结构玻璃。E 型玻璃几乎和 S 型玻璃一样坚固，而且成本更低，所以波音飞机主要使用 E 型玻璃，如飞机整流罩、雷达天线罩、眩光层压板、直升机旋翼等。

碳纤维

碳和石墨纤维由前驱体纤维制成，如聚丙烯腈 (PAN)、人造丝、纤维素或石油沥青。前驱体纤维必须能承受恶劣的加工环境，并能去除纤维中的大部分非碳原子。

碳纤维是非常坚硬和坚固的纤维。它的硬度是玻璃纤维的 3 ~ 10 倍。碳纤维的密度大约是铝的 2/3，钢的 1/4，它们可以制造非常轻的结构。除此之外，碳纤维在纤维方向上也非常坚固。抗拉强度可达 800KSI (千磅 / 平方英寸)。

现在市面上有很多不同的碳纤维。它们被用来制造制造飞机部件的高强度复合材料。BMS9-17 和 BMS9-8 是波音公司 787 飞机上使用的碳纤维的两个主要规格。BMS9-8 为中等模数、中等强度纤维，BMS9-17 为中等模数、高强度纤维，用于制造波音 777 和 787 复合结构的楼板梁和尾翼结构箱。

石墨纤维是碳含量较高、石墨晶体排列性较好的碳纤维。标准碳纤维的碳含量为 91% ~ 94%，而石墨纤维的碳含量超过 99%。

芳纶纤维

芳纶纤维重量轻、强度大、韧性好。芳纶是芳香族和聚酰胺的首字母缩写。凯夫拉纤维是芳纶纤维的一种。芳纶纤维有两种类型：高刚度 (凯夫拉 49) 和低刚度 (凯夫拉 29)。凯夫拉纤维 49 用于飞机结构。凯夫拉纤维非常坚固和坚韧，抗拉强度高达近 500KSI，凯夫拉纤维非常轻。密度几乎是玻璃纤维的一半，碳纤维的 3/4，钢的 1/5。

芳纶纤维具有吸湿性，能吸收自身重量 8% 的水分。它们的热膨胀系数也很高。由

于这些特性，芳纶复合材料免受环境影响。芳纶纤维的另一个缺点是它们的压缩强度比拉伸强度低得多（如图 5-1 所示，见正文）。由于这个原因，我们通常不会将芳纶纤维用于压缩关键部件。

Unit 5 Composite Materials

5.1 Reinforcements

5.1.2 Other Fibre Reinforcements

其他纤维增强材料介绍

在航空航天工业中，还有一些其他的纤维在特殊应用中，使用的频率较低。

- ★ 硼纤维非常坚硬，具有很高的拉伸和抗压强度。纤维的直径比较大，不容易弯曲；因此，它们只能作为预浸胶带产品出售。通常使用环氧树脂基体与硼纤维结合。硼纤维用于修复破损的铝制飞机外壳，因为硼的热膨胀系数接近铝，而且没有电化学腐蚀的潜在危险。硼纤维非常昂贵，对人员有危害。硼纤维主要用于军事航空应用。硼是第一种实用的高模量纤维。第一架 F-15 和 F-14 安定面使用硼纤维增强环氧树脂。硼纤维是用化学气相沉积法在薄基板（通常是钨丝）上制备的。
- ★ 光谱纤维含有聚乙烯（一种常见的塑料），经过加工，使聚合物链与纤维方向一致，就像芳纶纤维一样。光谱用于防弹背心和其他类型的防护装甲。
- ★ 陶瓷纤维用于高温应用，如燃气涡轮发动机的涡轮叶片。陶瓷纤维可用于高达 2200 °F 的温度。
- ★ 金属纤维是非常细的金属线。它们由钨、钛、铝、钢和其他高强度金属制成。金属纤维用于带钢轮胎和增强耐火合金的高温部分。
- ★ 石英和高硅纤维是由纯氧化硅制成的。这与玻璃纤维不同，玻璃纤维中含有与其他材料混合的氧化硅。石英纤维由石英晶体制成，具有晶体结构。高硅纤维具有像玻璃纤维一样的无定形（非晶体）结构。两种光纤对雷达都是透明的。由于玻璃纤维具有较高的强度和较低的透射率常数，有些天线罩采用石英或石英纤维代替玻璃纤维。石英纤维更坚固，但比高硅纤维更昂贵。787 型雷达罩采用了石英纤维。

复合材料商用飞机结构中典型的增强材料是连续纤维。非连续增强也用于特殊应用。非连续增强的例子有短切纤维、颗粒和晶须。

- ★ 短切纤维用于增厚和增强。短切纤维由玻璃、碳和凯夫拉制成。这些纤维被切成短长度（大约 1/64 ~ 1/4 in）。
- ★ 颗粒用于增稠和增强树脂。灌封化合物就是一种应用。颗粒还用于控制黏合剂的黏合线厚度。一些颗粒包括：
 - 微气球。这些是非常小的酚醛或玻璃空心球体。
 - 金属粉末。
 - 陶瓷粉末。
 - 塑料粉末。

颗粒用于 BMS 8-276。787 的大部分主要结构都使用了这种材料，777 的尾翼和地板横梁也是由这种材料制成的。预浸料在环氧树脂层和碳纤维层之间含有增韧剂，这使得

层压板比其他碳纤维复合材料更坚韧。

- ★ 晶须用于增强金属基和陶瓷基复合材料。晶须非常小，长径比大。晶须几乎是完美的陶瓷晶体，如碳化硅。由于它们的结晶形式，其具有非常高的强度和刚度。

Unit 5 Composite Materials

5.1 Reinforcements

5.1.3 Fabric Types and Constructions

胶带和织物

单个纤维称为长丝。成束的长丝被称为束、纱或粗纱。粗纱通常包含比丝束或纱线更多的长丝。粗纱是指单根长丝或纤维，如 20 端或 60 端玻璃粗纱。所有的长丝都在同一个方向上，它们没有被扭曲。碳粗纱通常分为 3K、6K 或 12K 粗纱，K 表示 1000 根细丝。

胶带材料只有一个方向的纤维，没有填充纤维（双向材料和单向材料特性如图 5-3 所示，见正文）。单向预浸料带已经成为业界多年来的行业标准材料，并且其纤维通常采用热固性树脂来浸渍。最常见的制造方法是将（干燥）原丝引入浸渍机中，在那里通过加热和压力将熔融的树脂与原丝结合在一起。

胶带产品在纤维方向上具有高强度，而在纤维之间几乎没有强度。纤维被树脂固定住。胶带的强度比机织物高。波音公司使用的大部分胶带是碳纤维，尽管玻璃纤维胶带也用于一些地方，比如地板。碳纤维胶带是以每平方米克数来标识的，称为等级。波音公司使用的等级是 95、145 和 190。等级也说明了胶带的厚度。例如，190 级胶带的厚度是 95 级胶带的两倍。胶带等级如图 5-4 所示（见正文）。

织物是由丝束、纱线或粗纱织成的。波音公司只在飞机部件上使用丝束和纱线织物。粗纱布用于各种应用，包括制造工具以及建造船只和其他与运动相关的领域。纤维与织物的区别如图 5-5 所示（见正文）。

织物从卷筒上脱落的方向称为经纱或卷出方向，横于经纱方向的方向称为填充方向。有些织物的一个方向比另一个方向更强，因为一个方向的纱线或纤维比另一个方向多。经纱和填充方向纤维的组合方式称为编织。无纺布包含以随机模式组合的纤维。无纺布也被认为是垫子和毡（如图 5-6 所示，见正文）。除了装饰或表面处理外，波音公司不使用这种类型的织物。

Unit 5 Composite Materials

5.2 Resin Types

5.2.1 Introduction of Resin Matrix

热固性和热塑性树脂

用于复合材料的任何树脂体系都需要具有以下性能：良好的机械性能；良好的黏合性能；良好的韧性和良好的抗环境降解性能。用于纤维增强复合材料的树脂有时被称为“聚合物”。根据热对其性能的影响，聚合物可分为“热塑性”和“热固性”两类。

热塑性树脂与金属一样，加热后会软化并最终熔化，而冷却后会再次硬化。热塑性树脂在零件生产过程中不会发生化学反应。树脂熔化后会在纤维周围和模具中流动，这种材料仅在低于其熔点时才变硬。热塑性树脂是在高温下熔化的材料，这与热固性树脂相反，热固性树脂会软化并燃烧，但不会熔化。热固性树脂和热塑性树脂的区别，如图 5-9 所示（见正文）。

热固性树脂是指在固化过程中发生化学反应的树脂。以下是商业飞机上使用的此类树脂的列表。

- ★ 环氧树脂。
- ★ 聚酯树脂。
- ★ 酚醛树脂。
- ★ 聚酰亚胺。
- ★ 双马来酰亚胺。

聚酯树脂是一种用途广泛的低成本树脂体系。其材料性质不如环氧树脂，用于制造船艇、体育用品和其他非航空产品。波音公司仅将聚酯树脂用于玻璃纤维增强的内部部件，如通风管。代表性的聚酯预浸料必须遵循波音材料规范 BMS 8-80。这种预浸料制成的部件是防火的，但并非所有的聚酯树脂都是防火的。

酚醛树脂通过缩合反应固化，在固化过程中释放水分并吸收热量。酚醛树脂具有防火性，并且在燃烧时比环氧树脂释放的烟雾和毒素更少。这就是为什么波音公司使用酚醛树脂制造飞机内部部件的原因。酚醛复合材料可用环氧树脂修复，但由于烟雾和毒性方面的要求，修复尺寸受到限制。详情请参阅飞行器维护手册。

环氧树脂的最大使用温度约为 150 °F。各类树脂可使用的温度范围如图 5-10 所示（见正文）。对于更高的温度，需使用其他基材，如聚酰亚胺和双马来酰亚胺（BMI）。

聚酰亚胺在高温环境中有着良好的性能，其耐热性、抗氧化稳定性、低热膨胀系数和耐溶剂性等性能对设计工作十分有利。它们主要用于电路板或高温发动机和机身结构。

双马来酰亚胺比环氧树脂具有更高的耐温度能力和韧性，并且在室温和高温下都具有优异的性能。双马来酰亚胺的加工与环氧树脂相似，用于航空发动机和高温部件，适用于标准高压釜加工、注塑成型、树脂传递模塑和片状模塑料（SMC）等。

热塑性树脂允许零件重新熔化，从而重新固化或重塑。与热固性树脂相比，热塑性

树脂通常更耐冲击损伤。目前，大多数热塑性树脂用于内部部件。787 起落架后撑杆和几个机身肋间件采用了热塑性树脂系统。

我们常用的热塑性树脂如下：

- ★ PPS（聚苯硫醚）。
- ★ PEI（聚醚酰亚胺）。
- ★ PEEK（聚醚醚酮）。
- ★ PEKK（聚醚酮酮）。

聚苯硫醚增强型热塑性层压板（RTL）被用于 787 机身的肋间件，如图 5-11 所示（见正文）。与传统的复合材料制造方法相比，使用 RTL 的优势在于能够对 RTL 进行加热并压制所需形状。这种成型能力有助于节约成本，因此欧洲飞机制造商应用了许多 RTL 部件。聚醚酮酮被用于一些防火隔热组件，而聚醚醚酮则作为注塑树脂用于系统支撑结构。

Unit 5 Composite Materials

5.2 Resin Types

5.2.2 Epoxies

环氧树脂性能

环氧树脂是现有最佳的黏合剂之一。它可以以非常高的强度黏合到许多材料上。不同类型的环氧树脂固化温度不同，分别适用于特定的材料属性。因为所含挥发物很少，环氧树脂在固化过程中不会收缩太多。波音公司使用的环氧树脂比其他任何树脂（基质）都多。

化学原理

环氧树脂指任何含有环氧基的分子。常见的环氧树脂基础是芳族环氧树脂。可在树脂中加入环氧树脂稀释剂以降低其黏度，并加入长链环氧增韧剂以提高树脂固化后的韧性。这样，将这些不同的环氧树脂混合在一起，就可获得特定的材料性能。

固化

当固化剂与环氧树脂混合时，环氧分子之间会形成交联。环氧树脂的强度与分子间交联的量直接相关，因此固化剂与环氧树脂的比例非常重要。高温和低温固化使用不同的固化剂，而且固化剂的类型会改变固化树脂的材料性能。高温固化剂比低温固化剂更能提高固化树脂强度。

玻璃转化

环氧树脂是热固性塑料。热固性塑料在高温下不会熔化，但会发生玻璃转化并变软。玻璃转化温度是环氧树脂的一个重要属性。

环氧树脂的允许使用温度取决于玻璃转化温度。在玻璃转化温度以上，环氧树脂的强度不是很高，如图 5-12 所示（见正文）。玻璃转化温度取决于树脂和固化剂的混合比例。如果树脂没有完全固化或混合比例不当，玻璃转化温度会降低。

环氧树脂会吸收环境中的水分。吸收的水分也会降低玻璃转化温度。因此，去除水分就能使玻璃转化温度恢复到原值，这通常是通过真空加热使零件干燥来实现的。

固化阶段

当环氧树脂和固化剂刚混合时，我们称其处于“A 阶段”。在 A 阶段，环氧分子之间不存在交联。部分固化的树脂处于“B 阶段”。在 B 阶段，存在一些交联。B 阶段树脂可用于预浸料产品、薄膜和发泡黏合剂。B 阶段树脂比 A 阶段树脂更易于加工。完全固化的树脂，则称之为“C 阶段”。

放热固化

环氧树脂是放热性的。这意味着它们在固化过程中会释放热量。低温固化体系放热性最强。大量低温固化环氧树脂中会发生热量积聚，导致其过热或燃烧。为解决这个问题，可以采用小批量快速使用的方法。

Unit 5 Composite Materials

5.3 Core Materials

核心材料介绍

芯材是夹芯结构的两大主要结构要素之一。另一个元素是面板。芯支撑面板抗屈曲，并抵抗平面外剪切载荷。芯材必须具有较高的抗剪强度和抗压刚度。波音公司在夹层结构中使用蜂窝芯。

蜂窝芯可以是金属材料或复合材料。金属蜂窝通常由铝制成。由钛和钢制成的蜂窝也可用。每种蜂窝状材料都具有特定的性能和特定的优点。用于飞机蜂窝结构的最常见的芯材是芳纶纸 (Nomex, 凯夫拉 N636)。玻璃纤维用于更高强度的应用。碳纤维增强芯是可用的，但很少使用。

泡沫芯不具有蜂窝芯的比强度和刚度，其通常比蜂窝芯重，但强度不如蜂窝芯。泡沫芯用于家用建筑和轻型飞机，为翼尖、飞行控制、机身部分、机翼和翼肋提供强度和形状。泡沫芯在商用飞机上不常用。多种泡沫可作为芯材，包括聚氯乙烯 (PVC)，聚甲基丙烯酸酰胺 (PMI) 泡沫，聚苯乙烯泡沫 (聚苯乙烯泡沫塑料)。一些天线罩使用泡沫芯。

用于航空航天应用的蜂窝芯通常是六边形的。蜂窝小孔是通过在特定位置黏合堆叠的薄片制成的。堆叠的薄片被扩展成六边形。与薄片平行的方向称为纵向。

等分六边形芯有另一层材料穿过每个六边形。对分六角形蜂窝比六角形芯更坚固。过度膨胀的芯是通过将板材扩展到超过制作六边形所需的程度来制造的。过膨胀芯的胞室呈矩形。过度膨胀的芯是灵活的，垂直于长度方向且用于具有简单曲线的面板。钟形蜂窝，或称柔性蜂窝，具有弯曲的蜂窝壁，使其在各个方向上都具有灵活性。曲线复杂的面板采用钟形芯蜂窝。

蜂窝芯可提供不同尺寸的蜂窝。小尺寸可以更好地支撑夹心结构的面板。蜂窝也有不同的密度。高密度芯比低密度岩芯更坚固、更坚硬。

蜂窝状芯材以大块供应，有时按目录供应。该区块通常是 8 英尺长，4 英尺宽，几英尺高。如果需要，芯必须切割成一定的尺寸，并加工芯坡道。然后将清洗后的芯放入零件中。

芯材厚度的初始切割通常用带锯完成。然后用各种带锯、铣刀和阀杆铣刀加工外围和坡道。我们用来修复损坏芯材的工具如下：

- ★ 刻刀。
- ★ 带锯。
- ★ 砂盘。

加工复合材料的一般准则是高刀具速度和低刀具进给率。

Module 3 Selection of Aviation Materials

Unit 6 Airframe Materials

6.1 Aircraft Structure

飞机主要结构

虽然每种型号的飞机都有自己的设计特点，但这些通用部件在每架飞机上都有相同的名称。飞机的整个结构称为机身。机身由以下部件组成：机身、机翼、起落架、尾翼（如图 6-1 所示，见正文）。

有两种一般类型的机身结构：焊接钢桁架和单体设计。焊接钢桁架在小型海军飞机和一些直升机上使用。单壳式设计可分为三种：单壳式、半单壳式和增强壳式。

机身是飞机的主体结构，包括座舱、客舱和货舱。它为货物、控制装置、附件、乘客和其他设备提供空间。出于性能的考虑，车身被设计得尽可能小，但又足够宽敞舒适。

波音 787 的上半径和下半径分别为 113 in 和 110 in。机身由碳纤维增强塑料（CFRP）外皮和共固化纵向桁以及 CFRP 框架、舱壁和地板梁制成。在门、窗、机头和主起落架轮舱的开口周围以及用于开口和局部装载的各种其他位置提供局部加固。

机翼是飞机的另一个主要部分。机翼提供飞机的主要升力。机翼的基本结构包括左、中、右三个翼段。这些是由前梁、后梁、翼肋、上下蒙皮和翼弦组成的（如图 6-2 所示，见正文）。各种控制面位于机翼上，包括襟翼、缝翼、扰流板和副翼。在大多数飞机上，前缘襟翼和缝翼位于机翼的前部。后缘也有内侧和外侧襟翼。

起落架也被称为起落装置，它要么是固定的，要么是可伸缩的。当飞机停在地面或水中以及起飞和降落时，起落架支撑着飞机。它由前起落架（NLG）和主起落架（MLG）组成。固定起落架更便宜，更容易维护，而将轮子和支柱放在机翼或机身内部的可伸缩起落架更可取，因为它对空气流动的干扰更小。大多数飞机的轮子都安装在减震支柱上，减震支柱使用油或气垫来缓冲着陆时的冲击。

飞机的尾翼又称尾段，由尾锥、固定面和活动面组成。垂直尾翼和水平尾翼为固定面。可移动的表面通常是方向舵和升降舵。方向舵用于方向和偏航控制，而升降舵连接在水平尾翼的后缘，提供额外的俯仰控制（如图 6-3 所示，见正文）。

Unit 6 Airframe Materials

6.2 Aircraft Materials

飞机主要材料

用于飞机结构的传统金属材料是铝、钛和合金钢。近三十年来，先进复合材料广泛应用于飞机结构部件。在波音 787 中，复合材料占其结构重量的 50% 以上。飞机材料的选择取决于许多因素，一般可以分为成本和结构性能。成本包括初始材料成本、制造成本和维护成本。

几十年来，铝合金在飞机结构中起着主导作用。它们具有良好的机械性能和较低的重量。在铝合金中，2024 和 7075 合金可能是使用最多的。2024 合金具有优异的断裂韧性和缓慢的裂纹扩展速率，具有良好的疲劳寿命。7075 合金的强度高于 2024 合金，但断裂韧性较低。2024-T3 用于由于应用循环拉伸应力而容易疲劳的机身和下翼胫。对于承受压应力的上翼蒙皮，疲劳问题较小，使用 7075-T6。

钛合金最早用作飞机的发动机合金，后来在飞机结构中得到越来越广泛的应用。它有两个主要特点：高强度重量比和在适度升高的温度下可保持其性能。钛，如 Ti-6Al-4V，密度为 4.5 g/cm^3 ，比钢轻，但比铝重。其极限应力和屈服应力几乎是铝 7075-T6 的两倍。它的耐腐蚀性一般优于钢和铝合金。虽然铝通常不适用于 $350 \text{ }^\circ\text{F}$ 以上的应用，但钛可以连续使用到 $1000 \text{ }^\circ\text{F}$ 。钛很难加工，因此加工钛零件的成本很高。尽管钛的成本很高，但它在军用飞机上的应用越来越广泛。例如，F-15 含有 26%（结构重量）的钛。

钢合金具有高密度，仅用于需要高强度和屈服应力的地方，例如起落架部件和高负载的配件。除了很重之外，钢合金的耐腐蚀性一般也很差。由这些合金制成的部件必须镀上防腐涂层。

纤维复合材料硬度高、强度大、重量轻，最适合用于飞机结构。复合层压板具有优良的疲劳寿命、损伤容限和耐腐蚀性。目前用于形成复合材料的基体材料包括三大类：聚合物、金属和陶瓷。复合材料的使用温度范围通常由其基体材料决定。聚合物基复合材料通常用于较低温度（低于 $300 \text{ }^\circ\text{F}$ ）的应用，而陶瓷基复合材料则用于高温（高于 $1500 \text{ }^\circ\text{F}$ ）的环境，如喷气发动机。飞机部件和主要材料如图 6-5 所示（见正文）。

Unit 7 Aircraft Engine Materials

航空发动机材料导论

飞机发动机部件在机械负荷、高温、腐蚀和侵蚀中工作。发动机各部件的结构要求各不相同。压气机的叶片必须能够承受气动载荷，旋转的叶片也必须能够抵抗蠕变。承载旋转叶片的圆盘必须具有很高的承载能力，以便使叶片免受离心力的影响。涡轮叶片还必须能够承受腐蚀性气体和远高于压缩机的温度。整个发动机的部件必须具有非常稳定的微结构，以便在长时间的使用中保持其性能。

涡轮发动机使用的材料见表（见正文）。材料的差异主要与不同的操作温度有关。风扇和压缩机是所谓的冷段，即温度低到中等的地方，经常使用钛零件。在发动机的热段，包括燃烧室区域和涡轮，使用镍基高温合金和一些陶瓷。外壳温度较低，因此复合材料是合适的材料。

提高燃气涡轮机性能的发展趋势主要与提高发动机的容量、效率、寿命、可靠性以及降低燃油消耗有关。这些可以通过施加高温进口气体、增加压力、使用更耐用的材料和改进零件制造方法来实现。

新材料

陶瓷基复合材料（CMCs）具有优异的热性能和较好的力学性能，克服了单片陶瓷的局限性（韧性），并显示出其他优点。CMCs 在航空领域中的应用一般在航空发动机的热段，包括涡轮盘、燃烧室、涡轮、过渡管道等。CMCs 的使用将允许涡轮进口温度从目前的 1200℃ 提高到 1500℃，这将导致燃油效率提高 6% ~ 8%。

金属基复合材料（MMCs）由铝或钛基与氧化物、氮化物或碳化物增强组成，与单一材料相比其具有许多优点。但它们并不坚硬，而且更昂贵，更难以加工。MMCs 应用于高载荷表面，如直升机旋翼叶片、涡轮风扇叶片和地板支撑。

热障涂层（TBCs）由导热的薄陶瓷层组成，应用于只有金属耐腐蚀涂层的机翼表面。TBCs 的应用可以通过提高燃气温度或减少冷却气流来提高发动机的性能 / 推力。

Module 4 Manufacturing Processes of Aviation Materials

Unit 8 Forming and Deforming Processes

成形加工过程

成形加工是通过加热或加压的方式，使材料在液态或固态下发生流动或连接，从而得到要求的形状、尺寸及性能的产品的方法。其不仅可以改变材料的形状尺寸，而且还常有改变材料性能的作用。成形过程中产生的废料较少，甚至不产生废料，故又称为无屑成形。由成形材料成形时的状态及工艺特点又分为液态材料的流动成形（即铸造）、固态材料的塑性成形（即压力加工）、材料的连接成形（即焊接和黏接）、粉末压制成形及一些橡胶、塑料的特殊成形等。

铸造

铸造是将材料从液态直接成形的一种通用方法，即将熔融金属浇注到型腔内，凝固后得到一定形状的铸件。铸造的特点是金属一次成形，可用于各种成分、形状和重量的构件，成本低廉，能经济地制造出内腔形状复杂的零件。对韧性很差的材料如铸铁，只能采用铸造法生产，对高温合金成形复杂形状，铸造也是最经济的方法。铸件的缺点是机械性能一般不如变形组织。

铸造法是一种广泛应用的重要的加工工艺，如汽车发动机约 95% 重量都是铸铁件。得益于现代铸造工艺，波音 767-400ER 驾驶舱仪表板上的零件数量从 296 个减少到 53 个，生产时间从 180 小时减少到 20 小时。

压力加工

对固态金属施加外力，通过塑性变形得到一定形状尺寸和性能的制品的过程就是压力加工。除了在成形上的独特优势之外（如薄板、细丝），压力加工的一个重要特点是可改善金属材料的机械性能。根据加工方式的不同，压力加工可分为锻造、轧制、挤压、拉拔、冲压等过程（如图 8-1 所示，见正文）。在国防工业部门，飞机上的锻造件重量超过 75%，坦克上的锻造件重量超过 70%，大炮、枪枝上大部分零件都是锻制而成的。

焊接

焊接是利用原子结合力将两个分离的固体工件连接在一起的一种快速有效的方法。该工艺广泛应用于桥梁、船舶、车辆、压力容器、建筑物等大型工程结构的制造。根据焊接过程中是否施加压力，可分为压力焊接和熔焊。

举世瞩目的三峡工程中的 28 台 700000 kW 水轮发电机组，采用的是全焊结构。例如制造一辆小轿车要焊 5000 ~ 12000 个焊点，30Mt 油轮要焊 1000km 长的焊缝，一架飞机的焊点多达数十万甚至百万个。

Unit 9 Manufacturing Processes of Composites

复合材料热压罐固化过程的六个阶段

制造工艺对于复合材料的最终性能非常重要。在制造复合材料层合板时，最关键的工艺之一是固化。复合材料固化的一些常见形式包括室温固化、烘箱固化和热压罐固化。室温固化和烘箱固化可以满足一般需求，而热压罐固化可以提供更优越的性能。

复合材料热压罐固化过程有哪些阶段呢（如图 9-1 所示，见正文）？下面介绍了复合材料热压罐固化工艺的六个阶段及各阶段的技术要点。

- ★ **加热阶段。**第一步是选择合适的加热速率。对于大型复杂零件，应缓慢升温，使整个零件受热均匀，常用的加热速度为 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。这一阶段主要使用真空压力，具体取决于固化要求。
- ★ **黏接阶段。**实际上，这是一个中间绝缘阶段，不同的树脂基体具有不同的温度和时间。这一阶段的主要目的是使树脂熔化，充分浸润纤维，并除去挥发物，逐渐固化成凝胶状态。此阶段的成型压力为总压力的 $1/3 \sim 1/2$ ，有效排出部分树脂，以保证零件的最终树脂含量符合设计要求。
- ★ **连续加热阶段。**经过黏接阶段后，树脂基体已半固化，溶剂和低分子量挥发物被充分排出，升温到固化温度后进入保温阶段。热固性树脂的固化反应是放热反应，固化过程中会释放热量，如果热压罐升温过快，固化反应速度将迅速加快，大量热量释放出来，会导致材料局部燃烧，这种现象称为爆震，必须避免。
- ★ **保温和加压阶段。**在这一阶段，树脂固化温度是预先设定的，树脂基体需要进一步固化，这一阶段要加满压力，目的是使树脂在继续固化的过程中层与层之间能够充分压实。从施加总压力到整个热压结束称为热压阶段。从达到热压罐规定的固化工艺、固化温度到热压结束的时间称为保温时间。热压阶段的温度、压力和保温时间是成型过程中重要的工艺参数，必须按照所用树脂基体的固化要求严格控制。
- ★ **冷却阶段。**在一定保压条件下，应进行自然冷却或强制冷却至一定温度或室温，然后释放压力，再取出产品。冷却时间过短，容易使产品出现翘曲、开裂等现象；冷却时间过长，会使生产周期变长，不利于生产效率的提高。
- ★ **最后阶段也称为加工阶段。**高温固化零件后，温度应缓慢冷却，并在一定温度下保持一段时间，这样可以消除零件由高温引起的内应力，并且可以更好地防止零件脱模后变形。

Module 5 Maintenance of Aviation Materials

Unit 10 Damage Classification

损伤条款

在本结构维修手册中，术语“损伤”被定义为结构构件的横截面积变化或永久变形。使用以下术语：

- ★ “可允许损伤”是指在没有其他飞行限制的情况下允许的损坏。
- ★ “可修理损伤”是指可以返工或修复的损坏。
- ★ “损坏零件的更换”是指必须更换零件的损坏。

你必须确定结构构件或结构材料发生的损坏类型。以下段落将介绍飞机面板外部蒙皮可能发生的不同类型损伤的定义：

(1) 磨损：由于擦伤、摩擦、刮擦或其他表面侵蚀造成的损伤区域。这种损伤通常粗糙且形状不规则。

(2) 腐蚀：由复杂的电化学反应引起的损伤，并导致横截面积变化。这种损伤的深度必须通过清理或清除操作来确定。这种类型的损伤发生在结构元件的表面、孔或边缘。

(3) 裂纹：材料的部分断裂或完全断裂，导致横截面积发生显著变化。这种损伤通常有一条不规则的线，通常是材料疲劳的结果。

(4) 折痕：凹陷或折回的损伤区域，其边界尖锐或有明确的线条或脊线。折痕也可视为裂缝。

(5) 分层：发生在相邻材料层之间的一种剥离。如果允许的损伤部分或修复部分没有给出剥离的限制，则使用指定分层的限制。

(6) 凹坑：从轮廓推入的损伤区域，材料的横截面积没有变化。凹痕的受损区域边缘是光滑的。这种损伤通常是由轮廓平滑的物体撞击造成的。

(7) 剥离：当两层或多层黏合材料分离时，就会发生剥离。当黏合的表皮和芯体之间分离时，也会发生剥离。剥离不必在整个表面上发生脱胶。

(8) 凿槽：由尖锐物体造成的损伤区域，导致材料中有一个连续的、尖锐或平滑的凹槽，造成横截面变化。

(9) 孔洞：完全被未损坏材料包围的穿孔或切口。如果这个孔洞保持在允许的损伤限制内，或者可以使用经过批准的程序进行修复，那么可以通过制造一个尺寸过大的孔或形状不规则的孔来移除其他类型的损伤。

(10) 刻痕：有锋利边缘的局部凿痕。你可以认为一个线条图案中的一系列刻痕等于一个凿痕。

(11) 穿孔：穿孔是指完全穿过零件厚度且没有规则形状的损伤。

(12) 划痕：材料上的一条损伤线，其结果是横截面积发生变化。这种损坏通常是由接触非常锋利的物体引起的。

Unit 11 Types of Inspections

常用检测方法

用于检测结构损坏的检查类型如下：

(1) 一般目视检查 (GVI)：对内部或外部区域、装置或组件进行目视检查，以检测明显的损坏、故障或不规则性。除非另有规定，否则该级别的检查应在接触距离内进行。可能需要使用镜子以增强对检查区域内所有暴露表面的视觉访问。这种检查应在正常的照明条件下进行，如日光、机库照明、手电筒或吊灯，可能需要拆除或打开接近盖板或接近舱门。为了接近检查区域，可使用工具架、梯子或平台。

(2) 详细目视检查 (DET)：对指定结构、装置或附件进行细致地目视检查，以发现损伤、失效或异常情况。此类工作根据检查者的需要，可在一定强度的直接光源下进行。工作中可能需要反光镜，放大镜等检查工具以及表面清洁和复杂的接近步骤。

(3) 特殊详细 (无损检测) 检查 (SDI)：对指定项目，装置或附件进行细致地检查，以发现损伤、失效或异常情况。此类检查可能广泛使用专门的检查技术 / 设备，并可能需要复杂的清洁和大量的接近或分解过程。

无损检测 (NDT) 检查用于检查所有次表面损伤和大多数小裂纹。无损检测也用于目视检查不足以确定损伤尺寸的区域。建议在结构修理手册 (SRM) 中使用的无损检测程序如下：

1) 涡流检测法：一种使用涡流在具有良好导电性的金属中发现损伤的无损检测程序。涡流检测是用于发现金属部件上大多数损伤的首选无损检测程序。

2) 超声波检测法：一种使用声波在金属和复合材料上发现表面和次表面损伤的无损检测程序；例如，裂纹、孔隙、分层或剥离，这些材料具有良好的渗透性。

3) 共振频率：一种敲击测试无损检测程序，可用于发现具有薄表皮的复合材料、蜂窝或黏合结构中的分层和层间剥离。

4) X 射线检测法：一种使用射线照相术来发现裂纹和损伤的无损检测程序，例如金属和复合材料结构中的剥离，无法进行目视检查。X 射线可以识别蜂窝部件内部是否有液体，并可用于确定损伤的尺寸。

5) 磁粉检测法：一种在铁磁性部件上施加磁场的无损检测程序，该部件表面有细小的磁性颗粒。磁场使磁性颗粒在表面或接近表面的裂纹区域聚集。

6) 渗透检测法：渗透检测法利用液体进入部件表面开口缺陷的特性。将液体涂抹在表面并允许其渗透。使用显影剂将液体从缺陷中拉出，以便可以看到缺陷。可见渗透剂在白光下检查。荧光渗透剂在紫外线下检查。

Unit 12 Common Repair Procedures

消除铝合金损伤的程序

下面是去除铝合金上的划痕、划痕和凿痕的步骤。

注意：不要在铝金属表面使用碳钢刷或钢丝球。如果你这样做，不同的微小金属颗粒将嵌入金属表面。这可能会导致零件腐蚀和产生更多损坏。

(1) 打磨或使用化学品清除受损区域的所有油漆。

注意：为了建立适当的修复措施并避免疲劳裂纹的发展，完全去除损伤是必要的。未完全消除的损伤会降低零件的疲劳强度，从而导致开裂。在极端情况下，未被发现的疲劳裂纹可能会损害结构的完整性。

(2) 使用磨料来打磨受损区域。

(3) 完成表面返工后，必须使用适用的无损检测程序来确保该区域没有裂纹。

警告：不要让溶剂进入口腔、眼睛或皮肤。不要吸入溶剂产生的烟雾。溶剂是危险的物质。溶剂可能是易燃的或对环境有损害。请参阅化学品安全技术说明书（MSDS）和当地安全预防措施。

(4) 用沾有清洁溶剂的软布擦拭破损部位。适用的清洗溶剂和一般清洗程序参见 SOPM 20-30-03。

(5) 按照 51-20-01, GENERAL 的规定，对母材表面进行保护处理并涂底漆。

(6) 如有必要，对该区域进行装饰处理。参考 AMM 51-20-00。