

〔苏〕B.B.沃洛别依 O.C.西洛特金 著

复合材料结构连接技术

张国梁 译 朱英发 校

国防工业出版社

71.228
262

复合材料结构连接技术

〔苏〕 B.B.沃洛别依 著
O.C.西洛特金

张国梁 译
朱英发 校

国防工业出版社

前 言

复合材料具有很多优异性能，包括减轻结构重量、提高结构可靠性和延长使用寿命。因此，在现代结构中得到了广泛的应用。

近年来，用玻璃纤维、碳纤维、有机纤维和硼纤维制造的高强度和高模量的新型复合材料已经取得了很大的进展。然而，要构成有效的结构，仅有高性能的复合材料是不够的，还必须在制成结构后发挥这些优异性能，这就需要将各种复合材料零件连接成为一个完整的结构。

在构成复合材料结构时，最重要的任务之一是保证连接接头的强度和可靠性，以便传递结构所承受的全部载荷。连接技术可以作为一项独立的课题加以研究。

复合材料结构连接的主要困难是连接接头的传力机理与复合材料零件中各层片的作用机理不相适应所造成的。在复合材料连接接头中，许用剪应力、许用挤压应力和许用拉应力的选取不像在金属结构连接中那样便于处理。因此，必须为复合材料结构寻求新的连接形式，同时完善其连接工艺。

目前，广泛采用的两种连接形式是胶接和机械连接。胶接具有很多优点，但在很多情况下，它不能成功地用于对接接头，也不能传递大的集中载荷。此外，还必须指出，复合材料层间强度和胶粘剂强度的差别会增大。由于这些原因，采用机械连接（铆接、铆接、螺纹连接、柱销-螺栓连接）和混合连接是比较有效的，今后在高应力水平复合材料结构中更会受到重视。

由于复合材料的强度各向异性较高、相对延伸率较小（1~3%）、组织的不均匀，在复合材料结构的连接中，必须对传统的设计方法及制造工艺重新审查。按破坏载荷设计金属连接结构

42038

时，只要对破坏的基本形式有了理解，就可进行计算；但设计各种铺叠方式的复合材料连接结构时，在外载荷作用下，接头可能产生多种破坏形式。因此，通过试验方法来测定复合材料所有铺叠方式的强度常数，常常是不可能的。这是复合材料结构连接设计的一个特点。另一个特点是复合材料实际上没有塑性变形，由于这个缘故，采用传统的连接方法有一定困难。例如在铆接时，可能产生超出复合材料容许的变形。此外，复合材料的力学性能与温度-时间因素也有关系，这就需要研究连接接头的蠕变和应力松弛现象。

尽管复合材料结构的多数破坏发生在连接处（60~85%），并且接头重量占了结构重量的20~30%。但是，对复合材料结构连接的强度、设计和工艺的综合问题仍未受到足够重视。目前还没有关于连接接头在静载荷和交变载荷长期作用下强度和气密性变化的著作。对复合材料连接接头的蠕变和耐久性能的研究也很不够，几乎还没有在使用条件下复合材料结构连接性能变化的可靠数据。出现这些现象的基本原因是各工业部门缺少复合材料结构的应用经验。

本书是首次综合研究复合材料连接结构的设计、计算和工艺的相互关系。书中总结了多年来具体连接结构的设计、研究和制造经验。作者希望本书对设计和制造新的复合材料结构有所裨益。

作者向B. B. 瓦西里耶夫通信院士、A. И. 雅路柯夫茨教授，A. A. 杜金诺娃和A. П. 高里柯夫工程师以及И. М. 札伊切夫高级研究员表示感谢，感谢他们对本书的编写所给的帮助。

目 录

第一章 复合材料结构的连接形式	1
1.1 连接的类型和连接接头承载能力的影响因素	1
1.2 连续连接	3
1.3 机械连接	5
1.4 混合连接	16
第二章 复合材料结构连接的设计基础	19
2.1 连接设计任务的概述	19
2.2 胶接结构设计的可靠性	28
2.3 箔片增强铆接接头的设计和计算	32
2.4 螺栓-柱销连接接头的设计和计算.....	37
第三章 复合材料结构的连接工艺	42
3.1 复合材料结构铆接过程的理论基础	42
3.2 铆接和螺接接头中的残余应力	68
3.3 螺栓-柱销和螺柱-柱销连接的初始应力	87
3.4 复合材料结构的孔、埋头窝和螺纹的加工工艺	95
3.5 连接工艺对接头强度和耐久性的影响.....	111
3.6 胶-机械混合连接中的残余应力	133
3.7 胶-机械混合连接的工艺及接头强度和耐久性的 评价.....	142
第四章 复合材料连接的蠕变和持久强度	151
4.1 玻璃纤维复合材料蠕变模型.....	151
4.2 蠕变条件下的孔周应力集中.....	153
4.3 螺接中夹紧松弛应力.....	158
4.4 使用条件和工艺参数对机械连接蠕变的影响.....	160
4.5 机械连接的持久强度.....	173
4.6 考虑蠕变的连接设计.....	176
参考文献	180

第一章 复合材料结构的连接形式

1.1 连接的类型和连接接头承载能力的影响因素

连接接头的结构形式和载荷特性取决于产品的功用和使用条件,根据连接接头上的载荷传递特性可将接头分为对接接头和支撑接头。一种应用很广的金属-塑料混合结构的机械连接就属于对接接头形式。在这种结构中,施加在接头上的全部载荷都由金属件承受,然后通过复合材料件传递到产品壳体上。还有一类接头形式,其主要特点是接头上的载荷由胶层直接传递。支撑接头的例子有蒙皮和长桁、蒙皮和蜂窝芯层的连接。

目前,在复合材料结构连接方法中,螺纹连结、胶接、铆接和螺栓连接(螺接)得到了广泛应用。虽然胶接和螺纹连接有很多优点,但在传递集中载荷的接头中不适用。在这种情况下,普遍应用铆接和螺接。在复合材料结构中螺接接头的强度和耐久性主要取决于孔周应力集中的水平。因为在安装螺栓、螺柱和柱销时具有干涉(过盈)量或拧紧力,使连接接头产生初始应力,在孔周形成三维应力状态。当受外载荷作用时,它将大大改变机械连接接头的强度性能。在连接接头处,用金属箔或其他高强度膜增强会提高复合材料的力学性能,并降低结构重量。

所有连接形式可分成三类:1. 连续连接——胶接、焊接、成形连接;2. 机械连接——螺纹连接、铆接、螺接(螺栓连接)、缝合、针钉连接、自楔紧连接;3. 混合连接——胶-铆、胶-螺(栓)、胶-缝、胶-针钉、胶-螺纹等形式的机械连接和胶接的混合。

为了获得合理的连接设计(从最小重量观点考虑),首先要分析影响接头承载能力的各种因素。下面分析其中几个主要因素。

结构因素 结构因素有连接形式、几何参数、紧固件的选材、紧固件类型和接头处的增强方式等。连接形式（连续连接、机械连接、混合连接）对产品的强度和耐久性影响最大，并常常决定它们的制造技术。应当指出，在分析现有的连接形式时，目前还没有一种统一的方法能为各种结构选择一种可靠的合理连接形式。这个问题需要研究专门的解决方法。这里仅说明一下在连接设计中应确定的主要参数。

连续连接中最重要的结构因素是：胶缝长度 l_{rn} 、胶接件厚度 t 和 δ 或其变化规律 $t(x)$ 和 $\delta(x)$ 、胶层的刚度参数 G_{rn} 、胶接件的刚度参数 E_t 和 E_b 。机械连接结构因素有：紧固件的数量 m 、直径 d_{rn} 、间距 t 、边距 c 、紧固件和连接零件材料的力学性能 σ_B 、 τ 、 E 等。连接接头形式（如受力点的排列方式，是单排还是双排、多排或交叉排列，连接件是单层还是多层）对强度也有很大影响。

在螺纹连接中，螺纹的型面和节距以及增强件的应用与否都有很大影响。在设计混合连接接头时，保证胶层和机械紧固件的变形一致是一项重要任务。也就是说，决定连接强度的主要结构因素是胶接和机械连接的剪切模量比 G_{rn}/G_{mc} 。这时，机械连接的刚度取决于受力点和受力零件的材料强度和刚度，胶接的刚度取决于胶层的种类和 l_{rn} 、 t 、 δ 、 G_{rn} 、 E_t 、 E_b 等参数的对比关系。

工艺因素 工艺因素决定复合材料的结构参数和物理-力学性能以及连接工艺过程所产生的残余应力。工艺因素中需特别强调的是：铆钉和螺栓的干涉量、螺栓或螺柱的夹紧力、连接零件的精度和互换性、复合材料中的内应力、孔和螺纹的加工质量。

使用因素 使用因素有外载荷谱、工作温度和时间、要求的产品寿命、环境条件（如胶层承受的潮湿作用）。

对连接强度影响因素进行的一般分析表明，在设计阶段有部分因素的影响已知，而其余因素的影响则在结构设计之后的加工和实施过程方能确定（见图1.1）。

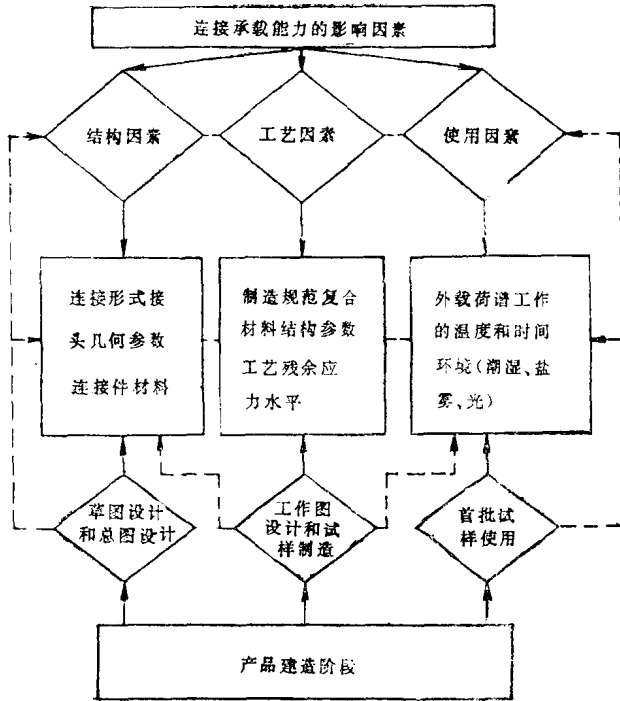


图1.1 连接接头的承载能力影响因素

1.2 连续连接

胶接

胶接是复合材料结构中采用最广泛的一种连接方法。胶接是依靠胶层把零件连接起来。而且胶接为不可拆卸的结合，胶缝处的材料性质不发生变化。与焊接不同，胶接时在被连接材料和胶粘剂之间保持着清晰的界面。胶接强度取决于胶接面与异类胶层（一般是聚合物）间相互作用的粘附力、胶层的内聚强度和胶接件材料的强度。胶接方法的优点是：可连接同类和异类材料、保持表面平滑、密封、抗振和抗裂纹扩展。但为了获得高强度的胶缝，生产周期较长和工艺过程较复杂，因而在一定程度上降低了胶接应用的效果。胶接质量取决于很多因素，其中不少因素是相互矛

盾的，或者会同时降低胶接的某些性能。这些因素有：胶接件材料的性质（宏观分子结构、浸润性和可溶性、表面状态等）、胶粘剂的性质（宏观分子结构、分子极性、浸润能力、流变特性等）、胶接件的形状和接触面积、涂胶方法和胶接规范^[37,38,45]。胶接接头有搭接、双垫板的对接、连接边倒角的对接等各种形式。胶接件的材料厚度一般不大于2~5mm。采用胶接方法的主要障碍是胶接件材料的高刚度，当其他条件相同时，胶接连接效率随着胶接件的厚度和刚度增加而下降。如果胶接件材料在刚度上有明显差别（如碳纤维复合材料和铝），在胶接时，采用由小刚度材料制造的变截面垫板来加强，可以不增加连接接头的应力集中。

成形连接

根据连接机理和所采用的辅助材料，成形连接和胶接相似。

成形连接方法的实质是：在结合处铺上浸有树脂的玻璃布或其他材料的垫片，然后将它固化，而使零件与垫片连接起来。这种工艺方法和接触成形方法（手糊成形）相似，所不同的只是和已固化的零件相连接。成形连接广泛用在大型玻璃纤维复合材料或其他复合材料的产品中。它也用来固定各种金属附件、装置和机构等。在型面的连接件上铺贴时，采用喷射和缠绕方法可以提高机械化水平。通常，连接件的材料厚度等于或超过50mm时宜用这种连接方法。这时，采用台阶状接头形式比较合理。台阶状接头的优点是：剥离应力可减小很多，复合材料层间剪切应力最小。为提高台阶状连接接头的强度，在接头的边缘宜采用弹性较高的胶粘剂。当连接高模量材料（如碳纤维复合材料）时，可采用低模量的玻璃纤维复合材料做垫片^[42]。

焊接

焊接是一种不可拆卸的连接。它基于聚合材料大分子间的热运动或化学作用而实现，因而，在连接面之间没有清晰的界面。焊接强度取决于与聚合物内聚强度有关的因素（大分子的尺寸、形状和取向）。当连接同一种材料的零件，并且不允许采用异类材料的紧固件或胶粘剂时，最好采用焊接方法^[45,46]。

根据焊接工艺过程的机理,焊接可分为扩散焊接和化学焊接。扩散焊接用于热塑性塑料和弹性塑料的连接,它通过加热或借助溶剂进行连接。不同种类的材料,如果聚合相的溶解参数是可比的,也可进行高质量的焊接。扩散焊时,材料必须在焊缝处形成粘流状态。加热方法依据零件的尺寸和形状、材料的性质(热传导、抗电离、介电性质、摩擦系数等)以及生产特点进行选择。加热焊接方法的主要缺点是焊缝处的组织有明显的变化。

化学焊接适用于连接热固性塑料、分子间有横键的热塑性塑料以及有结晶组织或取向组织的热塑性塑料。化学焊可在表面直接结合或借助附加剂结合。在后一种情况下,如附加剂同所连接的表面发生化学反应,而不形成独立的连续相,则可认为这种连接是化学焊接。固化的热固性塑料是否可化学焊取决于其官能团的性质和材料的残余塑性。

1.3 机械连接

螺纹连接





螺纹连接广泛用于各种结构中,具有使用简单、轴向尺寸小和结构重量轻等特点。

螺纹连接接头的强度同其他结构一样,取决于材料的物理力学性能、螺纹的加工工艺、相结合的零件尺寸、接头所承受的相互作用力。复合材料和金属材料的力学性能有很大差别,主要是剪切强度极限的不同。因此,必须采用型面不对称的螺纹。不对称的程度取决于复合材料层间许用剪切应力和金属许用剪切应力的比值。

在复合材料同金属的螺纹连接中,主要采用矩形、三角形、圆弧形和止推形等不对称型面的螺纹(见表1-1)。

在承受内压的复合材料薄壁套管的螺纹连接中,三角形和圆弧形螺纹型面,由于会在内压作用下产生轴向拉力而限制使用。轴向拉力引起径向压缩,其值可能超过容许范围,从而使套管螺纹因剪力和径向力而破坏。

表1.1 复合材料同金属螺纹连接时采用的不对称螺纹型面

螺纹型面	优点	缺点
三角形 	制造和检验简单, 剪切面积大	加载时有径向力, 尖角处有应力集中
圆弧形 	应力集中小, 剪切面积大	加载时有径向分力, 制造和检验困难
长方形 	加载时没有径向力, 检验简单	由于有条状槽, 剪切面积减小和强度降低, 制造困难
止锥形 	加载时没有径向力, 剪切面积大	有应力集中, 制造困难

复合材料同金属的螺纹连接强度主要因树脂基体的许用剪切应力较低而受到限制。提高基体的剪切强度和弹性、采用特殊的工艺措施以及使接头处的剪力方向垂直于增强纤维（因为这种情况的剪切强度比层间剪切强度大6~7倍）可使螺纹连接强度提高。

在结构上想办法（图1.2）也可以大大提高剪切强度，即根据使用载荷的形式设计结构，可以提高螺纹连接的强度^[12]。由于玻璃纤维和有机纤维复合材料的弹性模量比钢小一个数量级，因此若受内载荷，螺纹连接的金属套环1应放在复合材料套管2的外面（图1.2(a)）。当套环受外力作用时，被结合零件（金属套环1和复合材料套管2）则应相反放置（图1.2(b)）。在结构上想办法能保证连接接头达到强度要求并保证密封。这是因为在内压或外压作用下，复合材料套管管壁像塑性材料那样变形，从而紧贴在金属套环上。为避免金属套环因温度下降而从复合材料管上脱落，应用胶层连接，胶层能防止不同材料的连接件脱开。当金属环放置在套管外面时，为更可靠地保证连接强度，复合材料套管的端头应嵌入金属环的凸边内（见图1.2(a)）。依靠增厚螺纹处的套管

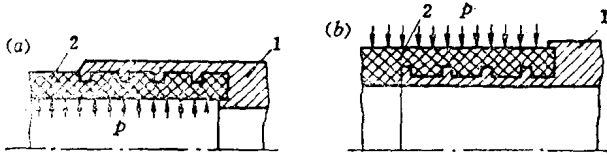


图1.2 复合材料与金属的螺纹连接接头按使用载荷不同而放置的方法

壁，使高温对该处复合材料的强度影响小于管体的其余部分。当金属环放在套管内部时，为防止复合材料套管脱落（如因水和其他介质作用而膨胀），建议补加胶粘剂辅助螺纹连接。在这种情况下，螺纹连接的接头强度可提高20~30%。

为了消除制造过程中因螺纹表面出现微裂纹而产生的有害影响，在螺纹表面应涂以厚度为 $5\sim 16\mu\text{m}$ 的聚合物膜保护。为使复合材料能均匀地承受载荷，同时又将套管壁锁紧，有时采用双面螺纹。在这种情况下，第二个螺纹（内螺纹）的拧入长度应等于外螺纹拧入长度的40~60%。

铆接

由于铆接方法能保证结构的所需强度、可靠性和使用寿命，因此在组合件、壁板和部件的制造中，铆接是目前应用最广泛的一种不可拆卸的连接形式。

根据铆接件的结合形式以及结构件上力传递方法的特征，可将铆接分为下列几种形式：搭接、单垫板对接、双垫板对接和长桁连接（图1.3）。

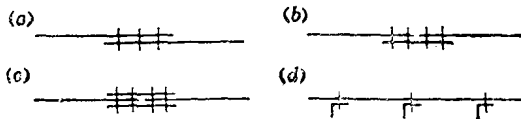


图1.3 铆接缝的形式

(a) 搭接；(b) 单垫板的对接；(c) 双垫板的对接；(d) 长桁连接。

用铆钉连接的工艺过程包括下列工序：

钻制或冲制铆钉孔；

如埋头铆接时，镗制或压制埋头窝；

在孔中安放铆钉；

压紧铆接件并使铆钉形成墩头，完成铆接；

检验铆接质量。

在生产中应用最广泛的是冷铆。采用这种方法，铆钉杆能很好填满钉孔，既能大大地简化铆接工作，又不降低材料的力学性能。

铆钉由轻合金或钢制造，有凸头的或埋头的钉头。现用的铆钉均已标准化，并用代码表示钉头形状、材料牌号、钉杆的直径和长度。

铆接过程包括将钉杆墩粗和将外露于连接件的钉杆段形成墩头。埋头的铆钉墩头应用得最广。连接厚度为 S 的铆接件，所需铆钉杆全长由关系式 $L = S + 1.3d$ 确定，式中 $1.3d$ ——形成墩头所需的钉杆裕度； d ——铆钉直径。

当形成墩头时，铆钉杆填充孔的变形并不均匀，在铆钉头方向的钉杆最终直径小于墩头方向的最终直径^[8,10]。铆钉墩头的形成方法有几种，其中应用最广的是锤铆、压铆和辗铆。

通常锤铆用手锤或风动铆枪进行，铆锤在钉杆端头打击，并用顶铁顶在铆钉头上。压铆是在压铆机上进行。压铆过程是：将铆钉放入铆钉孔中；开动压铆机；压铆机的上冲头下移，压紧铆接件；再由下冲头形成墩头。辗铆则在专用辗铆机上或利用普通钻床实现。辗压铆接过程是：压紧铆接件并用特殊辗压头辗压出铆钉的墩头。

许多铆接结构还有一个重要要求，就是在使用过程保证一定程度的密封（如保持剩余气压；防止燃油泄漏；保护结构件不让腐蚀性液体和气体渗入）。铆缝处渗漏气体或液体，主要是通过铆接件的接触间隙以及铆钉杆和铆钉头与孔壁的间隙渗入的。为了减少或彻底排除泄漏，需要将铆缝密封。密封方法有很多种，其中包括在铆钉表面涂密封材料；安装弹性垫片和橡胶圈；采用

带封严圈的铆钉。

金属、橡胶、石棉和塑料制的弹性垫片同连接件表面之间没有粘着能力，仅在铆钉的压力作用下，才有密封性能。当压在垫片上的铆钉压力不够大时，气密效果就会下降。因此弹性封严垫片应用较少。

铆缝用密封材料密封，比用弹性垫片有很多优点。密封材料同连接件有粘合性能，而且有薄膜、膏、液体等不同形式可供使用；此外，当连接件有相对位移时，也不会破坏密封性。

生产中除采用普通实心铆钉外，也使用特种铆钉。当只能从一面接近铆接部位时，要使用单面铆钉，如抽心铆钉、螺纹空心铆钉、高抗剪铆钉。在承受高剪切应力的结构中，采用螺栓-铆钉或可以两面接近的高抗剪铆钉。

为减小铆接接头在铆接时产生的工艺残余应力，采用了一种钉杆经补充加工的变刚度铆钉。这种铆钉的铆接力可以大大减小，因而也减小了工艺残余应力。为提高复合材料接头处的局部强度，采用了在铆钉铆头下面放置垫圈的方法。这种方法也可大大减小铆接接头处的工艺残余应力，从而改善了接头的性能。由于垫圈紧箍着铆钉杆，并且垫圈的弹性模量比铆钉大，因此减小了铆钉和孔壁间的接触压力，这种铆接方法也能在轻质芯层的夹层结构中应用。

最近几年，对电磁铆接、超声铆接、电加热铆接等方法进行了大量研究。这些新工艺的应用将大大改善复合材料结构的铆接接头性能^[30]。

螺栓-柱销连接

为了连接承受高载荷的复合材料构件，常常使用各种螺栓和柱销（起螺帽作用）。螺栓-柱销连接接头的特点有：在复合材料构件上有加厚的端部，而在加厚端部沿圆周分布着孔和槽，并在其中安装柱销和螺栓（图1.4）^[64]。

这类连接引起的问题很多，例如加厚端部的参数选取、紧固件的结构参数选取以及从受力的加厚端部到基体的过渡段的保证

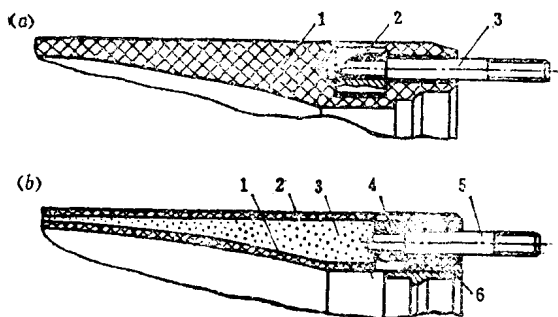


图1.4 可拆卸法兰盘式对接接头

(a) 螺栓-柱销接头：1—加厚

的法兰盘；2—柱销；3—螺栓；

(b) 具有轻质芯层的对接接头结构：

1—内受力筒；2—外受力筒；3—芯层；

4—柱销；5—螺栓；6—对接法兰盘。

措施等问题。根据螺栓-柱销连接接头的结构特点和技术要求，端部既可做成外加厚法兰盘，也可做成内加厚法兰盘。加厚法兰盘根据产品的功用和使用载荷特性也可用不同成形方法制造。值得推荐的方法有：特殊局部缠绕成形、补加成形、应用特种加强件。在加厚端头中嵌入高强度薄片（金属箔、硼膜片），可以大大提高复合材料接头的强度和弹性性能。例如，在玻璃纤维复合材料筒体的连接部位加入硼铝复合材料的增强带，可使结构强度提高20~30%，接头重量降低10~15%。在承受高载荷的法兰盘中，其上的柱销孔常常并不局限于单排分布，而采用多排的孔交错排列方式。采用多排的连接形式时，柱销孔应作成椭圆形状，并采用长短不等的螺栓。这样，可大大降低应力集中的水平，并保证各排的紧固件承受载荷均匀。

自楔紧连接

充分利用载荷能量是一种局部提高复合材料极限剪切性能的有效方法。这种方法的原理就是，在被连接的型面中插入几块特殊的楔紧元件，它们通常具有各种形状的双面楔紧面；工作载荷

借助这些楔紧面实现方向转变，使在连接接头处形成相当大的径向力，从而复合材料零件整个厚度上的层片都局部受到径向压缩；压缩应力的存在也就导致复合材料层间结合力增加，因而大量提高复合材料的极限层间强度和刚度。具有重要的意义是：径向压缩力、复合材料的极限剪切性能与工作载荷成正比关系。

利用楔紧原理的连接方法可保证随着连接件承受的载荷增大，连接接头的强度也增加。特别是对于压力套管，作用在套管中的内压愈大，连接接头所能承受的载荷也愈大。自楔紧连接就是因此而得名。

充分利用工作载荷能量的方法来提高连接接头强度是有一定条件的，仅在工作载荷产生径向压缩力的条件下才行。因此，和一般螺纹连接不同，采用楔紧元件的连接，在加载状态下不会有应力松弛，这就使较长时工作过程中的强度损失最小。

为了使作用的轴向力沿复合材料厚度更均匀地分布，楔紧型面不是分布在圆柱面上，而是分布在接合的圆锥面上(图1.5)^[41]。因此，参加传递轴向力的复合材料层片数量可达到最大限度，从而保证了等强度。

采用特殊楔紧元件可使沿接头长度的载荷分布更均匀。特殊型面的设计规则应与接头的剪应力图相吻合。

图1.5(a)和(b)示出两种套环自楔紧连接方案，它们保证作用载荷既沿零件厚度也沿接头长度均匀分布。应当指出，载荷沿接头长度分布不均匀是不利的，因为这时不能充分利用提高强度的所有条件。当载荷沿结合的型面分布不均匀，就会受到极限挤压应力和极限剪切应力限制。

如楔紧件的型面沿接头长度保持不变(图1.5(a))，那么，极限剪切性能沿接头长度的提高规律和剪应力分布特性相似。因此，剪切载荷沿接头长度分布不均匀的不利影响会减少。如在普通的螺纹连接中那样，这里每个型面所承受的剪力大小并不相等，但其剪切强度安全系数的差别却比普通螺纹连接大大减小。

自楔紧连接接头的结构要根据连接件的用途和载荷特性的不

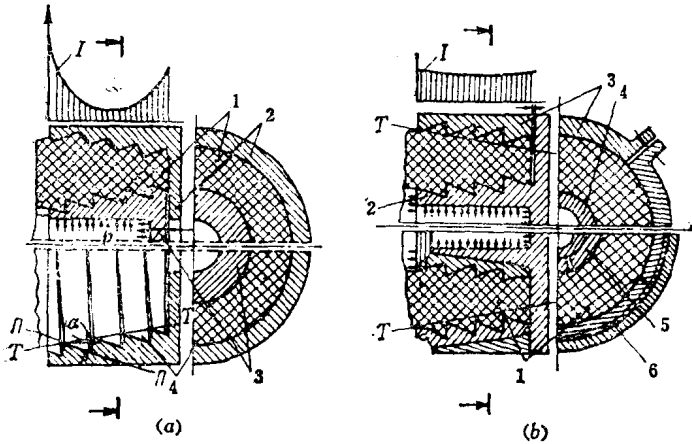


图1.5 自楔紧连接接头

(a) 斜向对称形式; (b) 对称形式。

1—层压复合材料; 2、3—金属套环; 4、5—过渡衬套; 6—弹簧圈;

I——剪应力分布图。

同进行设计, 因为每种连接接头的型面几何尺寸、楔形件和支持件的关系都不同。

现以复合材料管同金属套环的自楔紧连接〔图1.5(a)、(b)〕作为可拆卸接头的示例加以讨论。管件承受内压 p 。分布在圆锥面 $T-T$ 上的楔紧型面 $II-II$ 组成了自楔紧面。楔紧面在圆锥面上可呈螺旋线形状〔见图1.5(a)〕, 也可由几个单独的同心圆环构成〔见图1.5(b)〕。楔紧面相对接头中心线的倾角也可以是变化的。图1.5(a)中各楔紧型面的倾角 α 均保持不变, 而在图1.5(b)中, 整个接头长度上的各楔紧面倾角则按一定规律变化。内楔紧型面和外楔紧型面可以对称配置, 也可按斜向对称方式配置。

两个互成圆锥形的 $T-T$ 面上的几个楔紧元件同金属套环2和3的结合就构成自楔紧连接接头。外套环同端盘构成一个整体式的端帽。端帽同金属内套环之间用紧固螺栓连接在一起。这种方法可使端帽和内套环连接成一个受力构件, 作用在管中的工作载