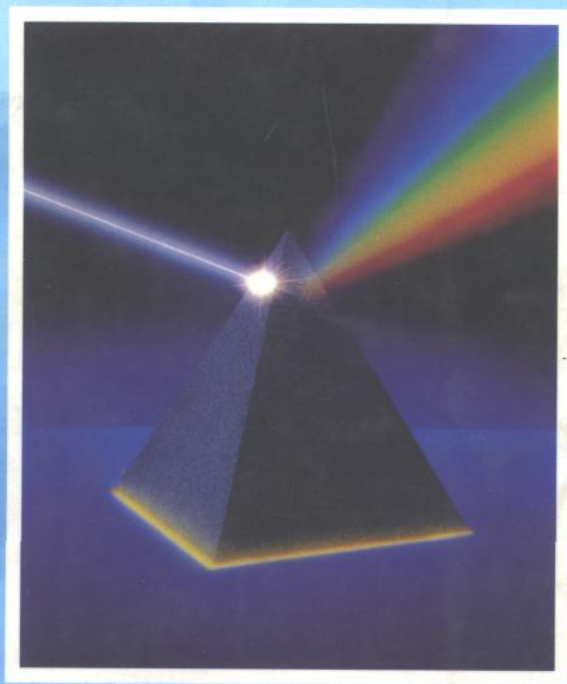


复合材料及其结构的 力学、设计、应用和评价

(第一册)

主 编

王震鸣 杜善义 张 恒 范赋群



北京大学出版社

复合材料及其结构的 力学、设计、应用和评价

(第一册)

主 编

王震鸣 杜善义 张 恒 范赋群

北京大学出版社
北 京

《复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价》

编辑委员会

主任委员: 王震鸣

副主任委员: 杜善义 张 恒 范赋群 张志新

委 员 (按姓氏笔划排列):

王兴业	冯广占	朱梅庄	刘方龙	刘德安	孙国钧
张继栋	张锡祥	杨 桂	李武铨	李思简	李重庵
沈大荣	杜星文	吴代华	范业立	罗海安	赵渠森
赵稼祥	钱在兹	嵇 醒	章怡宁	黄小清	蒋咏秋
韩杰才	童贤鑫	黎观生	薛元德	魏曾魁	

序 言

本书为关于复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价等方面的专著，它与《复合材料力学进展》（主编罗祖道、王震鸣）、《复合材料及其结构的力学进展》（第一册至第四册，主编为周履、王震鸣、范赋群、吴代华）等专著所用的书名虽然不同，但属于同一系列，其编辑方针基本相同。前几册专著以介绍和评述复合材料力学、复合材料结构力学的进展为主，也发表了一些研究论文和应用性较强的专题，后几册的研究论文（包括国家自然科学基金资助的研究项目与博士论文）所占比重就逐渐增大。本书的内容更为广泛，除了复合材料及其结构的力学问题外，还包括工艺力学问题，先进复合材料（树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料和电磁波功能复合材料）和工程复合材料（玻璃钢、纤维增强混凝土、聚合物混凝土和钢/混凝土等）的混杂复合材料和复合结构的设计、应用和评价等问题。其中包括先进复合材料在航空、航天工业上的设计、制造和应用；先进复合材料和工程复合材料在桥梁、建筑等土木工程领域的设计、建造和应用，在高级自行车、轴承等机械工业和民用产品上的设计、制造和应用。与前五册专著相比，本书在学术水平和实用价值方面都有提高。拟在两年后出版第二册。

本书的出版，得到了哈尔滨工业大学和洛阳工学院的资助，在此表示感谢。

同时，对论文作者、编委及提供过支持和帮助的同志们表示感谢；对中国力学学会办公室、华南理工大学、武汉工业大学、哈尔滨工业大学等单位及有关的出版社表示感谢。

王震鸣

1996年10月于北京

目 录

序 言	(i)
第一章 复合材料和复合结构在土木工程上的设计、应用和评价	王震鸣 (1)
§1 概述	(1)
§2 复合材料、复合结构及有关的基本概念与学术问题	(5)
§3 复合材料和复合结构的设计应用	(10)
第二章 先进复合材料在航空航天工业的应用与进展	赵稼祥 (15)
§1 概述	(15)
§2 应用	(15)
§3 发展	(18)
§4 结束语	(21)
第三章 复合材料轴承	张 恒 王震鸣 (22)
§1 引言	(22)
§2 复合材料的摩擦磨损	(22)
§3 复合材料轴承的设计	(26)
§4 复合材料轴承的应用	(31)
参考文献	(33)
第四章 层压板壳分层屈曲破坏的二维模型分析	李思简 (34)
§1 引言	(34)
§2 层板的二维分层屈曲分析	(36)
§3 圆柱形层压壳体的分层屈曲	(41)
§4 层压板分层屈曲后的特性	(47)
§5 层板二维分层屈曲破坏的实验研究	(50)
参考文献	(52)
第五章 半解析法在复合材料力学与结构中的应用	范业立 (54)
§1 引言	(54)
§2 分向半解析法在复合材料力学与结构中的应用	(55)
§3 分部半解析法在复合材料力学与结构中的应用	(57)
§4 分域半解析法在复合材料力学与结构中的应用	(61)
§5 分区半解析法在复合材料力学与结构中的应用	(64)
§6 结束语	(65)
参考文献	(65)

第六章 热固性复合材料和层合板在固化过程中的工艺力学研究	
..... 陈浩然 杨正林 郭兆璞 (68)	(68)
§1 引言	(68)
§2 工艺力学研究的理论模型	(71)
§3 结束语	(86)
参考文献	(87)
第七章 加捻纤维的预应力效应及预应力纤维复合材料的研究	姚立宁 (91)
§1 引言	(91)
§2 纤维预应力的方法	(91)
§3 加捻纤维及细观结构特征	(93)
§4 加捻纤维的预应力形成和分析	(94)
§5 加捻纤维束的预应力效应及增强机理	(95)
§6 加捻纤维束复合材料界面残余应力	(98)
§7 纤维预应力复合材料的破坏特征	(103)
§8 加捻纤维束的非线性行为	(106)
§9 结束语	(107)
参考文献	(108)
第八章 复合材料加筋圆柱壳的稳定性和振动相关性研究	卓曙君 雷勇军 (109)
§1 引言	(109)
§2 层压复合材料圆柱壳的振动分析	(109)
§3 加筋圆柱壳的振动和屈曲的相关性研究	(114)
§4 复合材料加筋圆柱壳在轴压下的稳定性和振动分析	(116)
§5 结论与展望	(123)
参考文献	(124)
第九章 电磁波功能复合材料的研究进展	甘永学 (126)
§1 引言	(126)
§2 电磁波功能复合材料的研究进展	(126)
§3 结束语	(145)
参考文献	(146)
第十章 碳 / 碳复合材料的研究与发展	郭 正 赵稼祥 (149)
§1 概述	(149)
§2 若干重要问题的介绍和探讨	(149)
§3 结束语	(155)
参考文献	(156)
第十一章 WCF 管材及其自行车车架的研制	杨 桂 (157)

§1 概述	(157)
§2 WCF 管的性能指标	(157)
§3 WCF 管的研制	(160)
§4 小结	(161)
参考文献	(161)
第十二章 复合材料加筋板壳的后屈曲性态及破坏研究	朱菊芬 杨海平 汪海 (162)
§1 引言	(162)
§2 复合材料层合板壳的后屈曲性态	(163)
§3 复合材料加筋板壳的后屈曲性态及破坏	(170)
§4 结语和展望	(182)
参考文献	(182)
第十三章 碳化硅晶须增强铝合金复合材料	耿林 姚忠凯 (185)
§1 引言	(185)
§2 SiC _w /Al 复合材料的制备工艺	(185)
§3 SiC _w /Al 复合材料的性能	(187)
§4 SiC _w /Al 复合材料的微观组织结构	(189)
§5 SiC _w /Al 复合材料的塑性变形成型加工	(192)
§6 SiC _w /Al 复合材料的机械加工	(194)
§7 SiC _w /Al 复合材料的应用	(194)
参考文献	(195)
第十四章 多向编织碳 / 碳复合材料力学性能的测试与表征	杜善义 韩杰才 赫晓东 顾震隆 (197)
§1 引言	(197)
§2 力学模型、强度准则与热应力分析	(197)
§3 材料的强度与断裂	(201)
§4 性能预报与织物设计	(205)
§5 材料超高温性能与微结构	(208)
§6 问题与展望	(211)
参考文献	(211)
第十五章 我国玻璃钢 / 复合材料桥梁的研究与实践	汤国栋 汤羽 冯广占 (213)
§1 引言	(213)
§2 GRP / 复合材料桥梁的设计特点	(214)
§3 GRP / 复合材料组合结构桥梁的行为分析	(219)
§4 试验简述	(222)
§5 技术经济概况	(222)

§6 结束语	(223)
参考文献	(223)
第十六章 新型晶须增强铝复合材料的性能与界面研究	
..... 潘 进 杨德明 宁小光 叶恒强	(224)
§1 引言	(224)
§2 新型晶须的基本性能	(224)
§3 β - Si_3N_4 /Al 复合材料	(227)
§4 $9\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ /Al 复合材料	(232)
§5 $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{TiO}_2$ /Al 复合材料	(235)
§6 氧化物晶须 /Al 复合材料	(237)
§7 比较与评述	(239)
参考文献	(240)
第十七章 带孔复合材料层合板的损伤与破坏研究	
..... 肖加余 王兴业 C.Bathias	(242)
§1 引言	(242)
§2 复合材料层合板的断裂预测与疲劳损伤分析	(242)
§3 实验研究	(251)
§4 结果与讨论	(252)
§5 结论与展望	(262)
参考文献	(262)
第十八章 纤维增强陶瓷基复合材料的制备、界面与性能表征	
..... 王兴业 刘凤荣 肖加余 苏 波 江大志	(264)
§1 概述	(264)
§2 用有机先驱体转化法制备 FRCMC	(269)
§3 FRCMC 的界面	(274)
§4 FRCMC 的界面表征与力学性能测试	(279)
参考文献	(291)

第一章 复合材料和复合结构在土木工程上的设计、应用和评价

王震鸣

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

§1 概 述

本文探讨复合材料和复合结构 (Composite Structure) 在土木工程上的设计、应用和评价及有关的学术问题。这是一个涉及面很广, 非常复杂但有重大实用价值的问题。其中的复合材料包括先进的 (高级的) 复合材料和工程复合材料; 而复合结构包括复合材料的结构和组合结构。组合结构包括由不同材料 (含复合材料) 组合而成的结构和由不同结构形式组合而成的结构以及两者兼有的组合结构。复合材料和复合结构的应用十分广泛, 本文着重讨论它们在土木工程特别是大型、特大型土木工程上的设计和应用。复合材料及其结构是同时设计、同时制造 (建造) 的, 因而设计问题就极为重要; 同样, 复合 (组合) 结构的设计也极为重要。复合材料和复合结构具有一系列的特点和优点, 在实际应用时需要作出正确的评价。复合材料和复合结构在土木工程上应用时, 涉及到材料、工艺、设计、施工、安全和经济等多方面的问题, 需要深入研究和妥善解决。

国际上, 近 10 多年来特别是近几年来, 先进复合材料及其结构已在土木工程上逐步地得到应用, 且以很高的速度在发展。在这里, 先进复合材料是指以碳纤维 (石墨纤维)、芳纶纤维和碳化硅纤维等高级纤维为代表所制成的结构复合材料和功能复合材料 (包括智能复合材料), 但在土木工程 (例如桥梁、道路、军用和民用建筑、水工结构、海洋工程和特种结构等) 上用得较多的还是以高强度混凝土、聚合物混凝土、纤维增强混凝土、钢 / 混凝土和玻璃纤维增强塑料 (俗称玻璃钢) 等的工程复合材料, 混杂复合材料和复合 (组合) 结构。

先进复合材料及其结构由于性能优越、制造工艺复杂和价格昂贵, 近 20 多年来, 通常用于航空、航天和核工业等高新技术领域, 以及汽车、运动器械和医疗设备等民用工业上, 还不能在土木工程上得到广泛的应用, 但在关键性构件或在结构的重要部位上适当地使用一点, 这样做, 在目前不但是必要的和有明显效果的, 也是有可能的。自 70 年代以来, 一般碳纤维的价格, 在国外已大幅度下降, 约降到原有价格的 10% 左右。在苏联解体以后, 国际上在冷战时期用于军事目的的先进复合材料与有关技术, 已以较大的规模和速度转向民用结构和产品。所以, 预计先进复合材料在土木工程上的应用在 10 年内将出现重大进展。这些情况值得重视。

在土木工程上已经应用的复合材料, 有碳纤维 (或芳纶纤维) 增强混凝土和用碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维复合材料制作的拉挤筋条 (取代处于严重腐蚀环境下的钢筋)、拉挤型材、拉索 (用于斜拉桥和悬索桥中) 与叠层板等。但目前用得较多的还是纤维增强塑料、纤维增强混凝土和各种钢 / 混凝土等工程复合材料、混杂复合材料和复合 (组合) 结构。在此采用“工程复合材料”的名称只是为了与先进 (高级) 复合材料相区别, 性能较低, 并不意味着先进复合材料不能用于工程上, 也不意味着采用工程复合材料不能建造先进的结构。先进复合材料与工程复合材料的界限是相对的而不是绝对的。一般说来, 先进复合材料的有些性能很高、

价格较贵和用量很少；而工程复合材料的一般性能较低、价格较廉和用量较大。两者结合起来而合理使用，最为合适和有效。

在工程复合材料和复合结构中，包括钢管混凝土、钢板混凝土、钢纤维混凝土、钢丝网混凝土、劲性钢筋混凝土、预应力混凝土、高强度（或超高强度）混凝土、高性能（高功能）混凝土、膨胀混凝土、聚合物混凝土、树脂浸渍混凝土、辗压混凝土、早强混凝土、耐火混凝土、水下混凝土、玻璃钢和结构泡沫塑料等复合材料的混杂复合材料（例如，纤维和颗粒混杂增强的混杂复合材料，长纤维和短纤维混杂增强的混杂复合材料，以及不同性能纤维增强的兼有结构材料和功能材料特性的混杂复合材料）和复合结构。在此除了强调采用先进复合材料和工程复合材料之外，还特别强调混杂复合材料和各种复合结构的应用，以及兼有结构材料、功能材料的复合材料和复合结构的应用，同时兼顾运输、安装和施工等方面的方便和要求，以取得更大的效益。

在碳纤维增强混凝土中的碳纤维属于高级纤维，由于应用时纤维的体积百分比 V_f 很小 ($V_f = 0.005 \sim 0.03$)，所以碳纤维增强混凝土也归属于工程复合材料，主要用于土木工程之中。

即使在下一世纪，钢材和混凝土在土木工程中仍将是重要和用得最多的工程材料，不可能被其他材料完全取代，这是一方面；另一方面，钢材和混凝土的性能将有多方面的大幅度的提高，不会停留在目前水平上。例如，钢材的强度将显著提高，同时韧性和耐腐蚀性有明显的改进；混凝土的抗压、抗拉和抗剪强度有大幅度的提高，耐久性和抗裂性大为改善。在不少场合下，各种钢材和多种混凝土将以组分材料的身份出现在各种性能大有改进的复合材料和复合结构之中，这是科技发展的必然趋势。

在本文中谈到的多数工程复合材料，是在工程材料的基础上，采用复合和混杂复合的方法，用复合材料的概念、原理和机理加以研究，使得复合材料的许多性能比之组分材料的性能可有大幅度的提高。材料在复合或者混杂复合以后，可以产生正的复合效应或正的混杂效应，当然也可能产生负的复合效应或负的混杂效应。把性能得以提高的效应称为正的复合效应或正的混杂效应，这是一种协同效应，反之则称为负的复合效应或负的混杂效应。我们需要的是具有正的复合效应（或混杂效应）的复合材料（或混杂复合材料），而不是具有负的复合效应（或混杂效应）的复合材料（或混杂复合材料）。材料性能是多方面的，所以在复合材料或混杂复合材料中，可同时出现正、负复合效应或混杂效应，它们是对不同性能而言的。只要在设计所需的性能方面能获得正的复合效应或混杂效应，而仅在与我们关系不大的性能方面出现负的复合效应或混杂效应，那么，这种新材料就是我们所需的性能优良的工程复合材料。因为设计要求不同，可通过复合或混杂复合的方法研制出大量的工程复合材料和复合结构，以满足工程的需要。

目前，国内外关于复合材料的原理、机理、测试、设计、计算和工艺等，已形成相当成熟和高度发展的多门类的学科体系，已具备推广应用的条件。在国际上，复合材料（包括先进复合材料和工程复合材料）在土木工程上的应用已日益广泛，且以很高的速度在发展。我国也应在这方面给予足够的重视并采取有力的措施加以发展，否则就落后了。

在承载结构的设计使用中，有结构刚度在起控制作用的，例如结构的变形（挠度）、稳定性和固有振动频率等；也有材料强度在起控制作用的，例如静强度、疲劳强度和冲击强度等。有时刚度问题和强度问题紧密地联系在一起，很难说清是刚度问题还是强度问题在起决定作用，常常会出现复杂的情况。例如，从整体来说，某种结构是由刚度控制的，但有可能在结构

的局部由于应力过大而出现强度问题；某一结构是由强度控制的，但有可能产生局部失稳，结构的承载能力问题可能和强度问题（屈服、破坏）有关，也可能和刚度问题（屈曲、变形、共振）有关。屈曲问题与结构刚度有关，而屈曲的后果产生破坏，就属于强度问题。所以，情况是复杂的，在处理问题时不能过于简单化，否则就会引起差错或事故。对于结构刚度起主要作用的情况，保证结构的刚度需要采用模量较高的材料和合适的几何构形，此时采用高强度或超高强度的材料是没有必要的，是一种浪费。为了保证或提高刚度，还要考察是拉伸刚度还是弯曲刚度在起控制作用。以各向同性材料为例，拉伸刚度主要与 EA 有关，弯曲刚度主要与 Eh^3 有关。其中， E 为材料的弹性模量， A 为截面积， h 为具有单位宽度的矩形梁的高度或平板的厚度。在拉伸刚度值 EA 不变的条件下，采用模量高的材料就可减小截面积，采用模量低材料就要增大截面积。在弯曲刚度 Eh^3 不变的条件下，采用模量高的材料就可减小 h ，采用模量低材料就要增大 h 。至于构件的自重除和 A （或 h ）有关外，还和构件材料的比重和长度有关。采用模量高的材料和刚度大的结构形式，在减轻结构自重和提高结构性能方面就十分有效。

在金属结构材料中，以钢材的弹性模量为最高，达到 200 GPa；在增强纤维中，以高模量碳纤维的纵向模量为最高，可达到 710 GPa，但制成单向复合材料后，纵向模量约为 430 GPa，是钢的一倍。钛材和铝合金的模量都比钢材低，但它们三者的比模量（模量 / 比重）却大致相等。T300 碳纤维 / 环氧单向复合材料的纵向模量约为 110 GPa，约为钢材的一半，但它的比重约为钢材的 1/5。高模量碳纤维有许多品种，上面提到的 $E_L = 710$ GPa，是目前见到的最高值。芳纶纤维的纵向模量约为 T300 碳纤维的一半，玻璃纤维的纵向模量约为 T300 碳纤维的 30%。

如果在土木工程结构所受的总载荷中，结构自重所占的比例不大，则以采用钢材和铝合金比较合适，因为价格较低。在钢材或铝合金选定后，再选择合理的截面形式和面积，就可满足拉伸刚度和弯曲刚度的要求。采用夹层结构、加筋结构、夹层加筋结构或加筋夹层结构等形式，就可得到弯曲刚度高而且重量轻的结构。如果结构自重结构所受的总载荷中处于主要或相当重要的地位时，则宜选用比模量高的材料。视情况的不同而有所不同，有时需要采用高模量碳纤维复合材料，有时可以采用 T300 碳纤维复合材料或芳纶纤维复合材料等。玻璃钢的弹性模量太低是它的重大弱点，但价格便宜。采用复合结构也是提高结构刚度的一个重要途径。例如将模量高的材料设计安排在可显著提高结构的整体刚度或局部刚度之处，或（和）采用比较合理的组合结构形式。需要注意，有时从结构的整体或者全局来看，已经满足刚度要求，还要考察结构的局部是否也已满足刚度要求，否则有可能产生局部变形过大或（和）局部失稳的问题。只有结构的局部满足了刚度要求，设计的结构整体刚度才是可靠的和能够发挥作用的，否则就是不可靠的和不能发挥作用的，其中的关系是相当复杂的。认识这一点非常重要，可以避免产生一些错误和事故。

在结构强度起控制作用的情况下，选用高强度材料就很有必要。如果结构自重结构所受的总载荷中处于次要地位时，以采用中强度钢材、高强度钢丝索、抗压强度为 60 或 80 MPa 以上的高强度混凝土以及 E 玻璃钢为宜，因为它们的价格相对说来比较便宜，而超高强度合金钢板的抗断裂性能很差，对应力集中很敏感，抗冲击和疲劳的性能也较差，不宜采用。当结构自重结构所受的总载荷中处于主要地位时，如对于大跨度（或特大跨度）桥梁、高层（或超高层）建筑和特大型高坝（非重力坝）等巨大工程，降低结构自重就成为主要矛盾。这时必须采

用一部分高强度碳纤维 / 环氧复合材料、芳纶纤维 / 环氧复合材料、碳纤维和芳纶纤维混杂的复合材料、碳纤维和 S 玻璃纤维混杂的复合材料、中高强度 (600~800 MPa) 的合金钢、抗压强度为 100 MPa 以上的高强混凝土和纤维增强混凝土等材料。采用混杂复合材料和复合、组合结构的形式把高强度材料设计安排在应力最大、最容易发生破坏和能最有效地发挥作用的部位, 而在应力较小的部位, 可采用比重较轻、强度较低和价格较廉的材料, 这样, 既可满足结构的强度要求, 减轻结构自重, 又可降低造价, 这是一种十分有效地应用复合材料的方法。

在结构的力学问题中, 存在着强度问题和刚度问题耦合在一起的情况; 存在着复合材料的结构力学问题和材料力学问题密切有关的情况; 存在着复合材料的宏观力学和微 (细) 观力学问题紧密相连的情况; 存在着线性的力学问题和非线性的力学问题联系在一起的情况; 存在着设计、施工、工艺和力学问题联系在一起的情况。情况是相当复杂的, 需要对具体情况作具体分析, 考虑到需要与可能, 然后采用比较合适的工程材料、复合材料和复合结构, 不是用简单的几句话就能论述得很清楚的。

从上面的讨论中可以看到, 一个结构并不是在任何场合和情况都需采用高强度或高模量的材料或高性能的复合材料。在不必要采用高强度、超高强度材料时采用这些材料, 因为价格上升而造成浪费, 还可带来不良后果, 例如断裂应变减小。在不必要采用高模量和超高模量先进复合材料时采用这些材料, 也是一种浪费, 同样会带来断裂应变减小的不良后果。所以, 材料和结构的设计优化非常重要。

在土木工程中采用工程材料、复合材料和复合结构时, 应该考虑高性能材料和一般性能材料相结合, 预制构件和现场浇筑制造相结合, 预应力构件和非预应力构件相结合等, 并采用一切可以明显提高工程质量、加快建设速度和降低工程造价的施工方法。总之, 应采用一切经过实践反复检验 (包括国内和国外, 直接和间接) 行之有效并有理论依据的设计方法和施工经验, 既要先进又要安全, 既要好又要省, 把材料、结构、施工和美学等方面的优点结合和复合起来, 取得综合的多方面的效益。

我们在国内外已有的理论和实践的基础上, 加以总结和发展, 比较全面和系统地提出了多种材料 (包括性能已得到改善的工程材料、工程复合材料和先进复合材料) 的混杂复合材料和复合结构相统一的设计思想, 在有了大型高速的电子计算机和各种求解方法以后, 就可充分发挥材料、结构、工艺和施工等多方面的优点, 使单位重量的性能 (例如比强度和比刚度) 与单位价格的性能 (例如单位价格的强度、刚度和使用效能) 得到大幅度的提高, 结构自重明显减轻, 运输安装工作量显著减少, 施工周期得以缩短, 资金周转可以加速, 使用寿命得以延长、维修费用可大为减少等。总的说来, 这种设计思想在本文中得到明确的全面的概括和论述, 值得在大型、特大型土木工程中推广应用, 也可在中小型工程中加以应用。

应当指出, 我国的土木工程界 (其中包括桥梁界、建筑界和水利电力工程界等) 通过长期的大规模的工程实践, 取得了丰富和宝贵的实际知识和经验, 具有雄厚的实力, 建成了一大批宏伟壮观的工程项目, 在施工管理和施工方法上有许多创造, 在材料开发和结构性能方面, 与我国过去的情况相比, 有了很大的提高, 成绩巨大。另一方面, 在国际上, 新材料 (包括复合材料) 和高技术发展很快, 在尖端产品方面使用一段时间取得成功经验并且解密以后, 已逐步地且比较迅速地推向民用工业和土木工程的范畴, 取得了很大的进展。不容否认, 我国在这方面的进步较慢, 与国际先进水平相比还有不小的差距, 少则 10 年, 多则 20 年, 要接近和赶上国际先进水平, 任务相当艰巨, 需自上而下的共同努力来改变局面。

在本文中,要涉及工程材料,那是为了把它作为工程复合材料的组分材料而加以介绍的;还要提到已有的工程复合材料,那是为了改进这些工程复合材料的性能并作为性能更好的混杂复合材料和复合结构中的组分材料而加以介绍的.既不满足于文献上已达到的水平,需要改革和创新,但是也不能脱离我国的实际情况,应由低到高、由小到大循序前进.

近 30 多年来,复合材料得到了很大发展和广泛应用,其中包括航空、航天、核工业、汽车工业、运动器械、医疗设备、机电产品、通讯装置、音响设备、大型计算机、石油化工、管道容器、能源装备、交通运输和各种船舶等,也逐步地在桥梁、道路、隧道工程与各种建筑工程等土木工程方面得到应用.其中包括结构复合材料、功能复合材料和两者兼有的复合材料.后一种复合材料属于多功能复合材料,它是复合材料发展的一个重要方向,它可大幅度减轻产品和结构的自重,降低成本,提高性能.

在航空和航天等高新技术领域中所用的复合材料,主要是以碳纤维复合材料为代表的先进复合材料,也采用玻璃钢这一类工程复合材料.在机电产品、运动器械、汽车工业和医疗设备等所采用的复合材料,以玻璃纤维增强塑料为主,或多或少也采用先进复合材料.在化工设备、管道容器和船舶上所用的复合材料,以玻璃钢为主,较少采用先进复合材料.在桥梁、道路与各种建筑上所用的复合材料,以工程复合材料(例如钢/混凝土复合材料、纤维增强混凝土和聚合物混凝土等)为主,并已少量采用先进复合材料的拉杆、拉索、筋条、型材、叠层板和纤维增强混凝土等.应用先进复合材料的方式很多,可作为主要结构材料用于关键部件的整体或局部;可作为选择性增强材料用于最能发挥作用的需要加强或加固的部位;可用很小的体积百分比(0.5%~3.0%)用于增强各种混凝土,成为工程复合材料的组分材料.与先进复合材料在航空、航天和核工业等方面的应用相比,在应用方式和方法上有较大的差别,其原因之一是,先进复合材料的价格太贵,在土木工程上若用量很大就使用不起,即使采用,也是价格较低或性能较差的先进复合材料.先进复合材料的种类很多,在性能和价格上有很大的差别.复合材料(在此主要是指工程复合材料,也不排除先进复合材料)在土木工程上的应用,有用作主要受力构件的,有用于次要受力构件中的关键部位的,有用于应力复杂、应力水平很高、容易发生破坏的区域的,有用于增强结构的整体或局部刚度的,有用作结构材料兼功能材料(防腐蚀、防渗漏、隔热、绝缘、导电或透光等)的,有用于新建工程的,有用于加固现有工程的,视不同的情况使用不同的复合材料、混杂复合材料和复合结构.

总的说来,复合材料和复合结构在土木工程上的应用,是一个量大面广、前景广阔、经济效益和社会效益都很高的领域,应非常重视并大力加以发展.

§2 复合材料、复合结构及有关的基本概念与学术问题

材料是人类进步的里程碑,是现代文明的重要支柱.石器时代,铜器时代,铁器时代,……,复合材料的时代,都是按材料的进步与发展来划分的.

复合材料是由单一材料经人工复合而成的材料,它是一种多相材料和多层次材料.复合材料具有增强材料(增强相)、基体材料(基体相)、界面层(界面相)这样三个重要方面.增强材料可以是一种也可以多于一种.因此,复合材料是一种多相材料.复合材料可以分为微观、细观和宏观三种层次,而微观的层次又可分为若干层次,因此,复合材料是一种多层次材料.复合材料的复合可分为微观的复合、细观的复合和宏观的复合.复合结构可视为结构的复合.

所以, 复合材料在微观上是一种不均匀材料, 有的复合材料在宏观上也是一种不均匀材料, 如叠层板壳的呈层性就是不均匀性的一种表现. 复合结构是一种不均匀的结构. 复合材料和复合结构还具有多种多样的各向异性. 复合材料的不均匀性、各向异性、本构关系复杂、破坏机理复杂和强度准则复杂等, 是复合材料及其结构的主要力学特点. 复合材料具有良好的阻尼性能, 有利于减振. 复合材料有较好的抗疲劳性能, 还具有可设计性等优点. 复合材料的非线性(几何非线性和物理非线性)和叠层板沿厚度方向剪切变形的影响不可忽略, 也因其不均匀性、各向异性、本构关系和破坏机理复杂等而复杂化了, 从而增加了复合材料及其结构的分析、计算、测试和设计的复杂性和难度.

复合材料按用途可分为结构材料、功能材料和两者兼有的材料. 按增强材料的形状, 可分为纤维增强、层片增强和颗粒增强三种. 在纤维增强复合材料中, 由纤维长短的不同, 可分为连续纤维、长纤维(纤维长度在 15mm 以上)和短切纤维(纤维长度为 5~10mm)三种复合材料. 在纤维体积百分比 V_f 较大的复合材料中, 纤维是承载的主体, 基体以传递剪应力为主. 所以上述三种纤维增强复合材料的力学性能, 以连续纤维增强复合材料为好, 长纤维复合材料次之, 短纤维复合材料为较差. 纤维增强复合材料的性能高于颗粒增强复合材料. 层片增强的复合材料与层状复合材料在概念上是不同的. 层片增强复合材料很少用作结构材料, 而连续纤维增强复合材料的绝大多数是以叠层复合材料的形式使用的. 复合材料按基体来分可分为树脂基体、金属基体和陶瓷基体等几类, 简称为树脂基、金属基和陶瓷基复合材料. 以水泥为基体的称为水泥基复合材料. 不论什么复合材料, 其中的增强材料、基体和界面层都在不同的条件下发挥着重要的作用. 这三者之中若出现薄弱环节, 则复合材料的有关性能也要出现薄弱的方面. 对于以增强材料控制复合材料性能的情况, 例如以单向复合材料的纵向拉伸强度、拉伸刚度和断裂应变来说, 增强材料的性能是起决定性作用的因素, 而对基体的强度和模量没有很高的要求, 但要求有较大的(约 3%~5%)的断裂应变, 界面(界面层)强度不必过高, 但也不能过低. 对于以基体和界面性能控制复合材料有关性能的情况, 例如单向纤维复合材料的横向拉伸强度、各种剪切强度、横向拉伸模量和各种剪切模量以及叠层复合材料的层间拉伸强度和剪切强度等, 基体和界面的性能就是起重要作用的因素. 为了提高上述各种强度, 例如横向拉伸强度和各种剪切强度等, 则要求基体和界面具有较高的强度; 为了提高上述各种模量, 例如横向拉伸模量和各种剪切模量等, 则要求基体具有较高的模量. 单向复合材料在纵向受拉时的断裂功, 界面的强度和状况就是起决定性作用的因素. 界面层很薄, 对模量的影响很小. 抗压强度问题比较复杂, 将在下面讨论.

目前在国际上, 在大力研究提高纤维性能(强度、模量和延伸率等)的同时, 对改善基体的性能(例如基体的增韧问题)以及界面问题(例如对纤维表面进行各种处理, 以提高界面的强度和韧性)正在作深入的研究, 并已取得重大的进展.

从提高强度(主要是拉伸强度和剪切强度)的角度而言, 界面的强度越高越好, 但从提高复合材料的断裂韧性而言, 界面强度过高是不好的. 在大多数情况下, 采用增韧基体的方法可取得良好的效果, 特别是对于碳纤维复合材料和碳化硅复合材料, 由于它们是脆性纤维, 因此要求基体有较大的断裂应变和韧性. 但是, 在基体增韧以后, 将明显降低单向复合材料在温度升高后的压缩强度. 芳纶纤维是有机纤维, 单向芳纶复合材料的纵向抗压强度很低, 当基体增韧以后并在温度升高时, 它的抗压强度就更低了. 所以对不同情况需要分别对待, 给予适当的解决.

采用复合材料的目的在于组分材料经复合后,能更好地发挥组分材料的优点和潜力,尽量克服组分材料的缺点和弱点.在复合过程中,往往出现复合效应,它是与混合效应相对比而言的,如果出现比混合效应所预期的要好(或差)的性能,则这种效应被称之为正的(或负的)复合效应.复合材料的性能是多方面的,因此复合效应也是多方面的,只要在主要方面(或若干方面)出现较大的正复合效应,仅在次要方面出现可以允许的负复合效应,那么,这种复合材料在符合设计要求的前提下,就是良好的复合材料,反之就不是良好的复合材料.但也可能出现这样的情况,在这种使用条件下不是良好的复合材料,有可能在另一种使用条件下成为良好的复合材料.所以,看问题不能绝对化,一切随时间、地点、条件的变化而变化.

由两种不同的纤维(增强材料),或两种不同的基体,或两种不同形状的增强材料(例如纤维状、片状或颗粒状材料,或者长纤维与短纤维)混杂复合而成的复合材料,称为混杂复合材料.混杂复合材料是与单一复合材料(单一的增强材料和单一的基体)相对比而言的.混杂复合材料可看作是两种以上单一复合材料混杂复合而成的复合材料.还有一种超混杂复合材料,它属于混杂复合材料,但混杂复合的形式更为复杂.这些都没有非常明确的定义和界限.混杂复合的目的是提高设计的自由度,使强度、刚度、价格或其他性能方面能更好地满足设计要求.例如,在碳纤维复合材料中,混杂复合了一部分玻璃纤维,材料的强度和刚度虽有下降,而成本却可下降得更多.在芳纶纤维复合材料中,混杂复合了一部分碳纤维,可以明显提高材料的压缩强度,因为芳纶纤维的压缩强度过低是它的致命弱点,影响它的广泛应用.相对来说,碳纤维属于脆性纤维,而芳纶纤维属于韧性纤维,芳纶纤维和碳纤维混杂的复合材料与芳纶复合材料相比,纵向断裂应变将减小,折合模量将增大.在颗粒增强复合材料(例如在微珠增强塑料和混凝土)中,混杂复合了一部分短切纤维(碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维或其他纤维),则可明显提高复合材料的抗拉强度、抗剪强度和断裂韧性.视所加纤维的性能和体积百分比的大小,可以有所提高或者明显提高材料的弹性模量和剪切模量.混杂复合材料是一种可以满足不同设计要求(例如强度、刚度、断裂韧性、减振、寿命、防腐蚀、保温和价格等)的多功能复合材料,值得大力发展和推广应用.

当组分材料的尺度大到一定程度与结构(或部件)的尺度属于同一个量级并作为结构使用时,以称为复合结构为宜.其中的材料也可称之为复合材料或者混杂复合材料,不必在名词上作精确的定义,主要在于掌握其本质.

对于结构材料,要求强度与刚度的统一.一种材料,即使它的强度很高,但它的模量不高,那么在材料承受较大应力时的应变一定很大,材料在接近破坏时的变形一定更大.对于刚度起控制作用(对变形限制很严)的结构,如果材料的模量不高,即使强度很高,那么,强度高的优点是不能发挥或难以发挥作用的.另一方面,如果材料的模量很高,而它的断裂应变太小,那么这种材料就很容易发生脆性破坏,产生疲劳强度和冲击强度不足等问题.由于脆性材料没有塑性变形和加工硬化阶段,对应力集中特别敏感,很容易发生突然的断裂破坏,因此需要采用较大的安全系数.与脆性材料相对比,延性材料的断裂应变较大,对应力集中不那么敏感,强度数据的分散性也较小,因此可采用较小的安全系数.在设计使用复合材料时,对模量、强度和破坏应变等方面必须兼顾,才是全面的和合理的.

在本文中所谈到的复合材料,既包括先进复合材料,例如碳纤维复合材料、芳纶纤维复合材料和超高模量高强度聚乙烯纤维复合材料等;又包括工程复合材料,例如E或S玻璃纤维增强塑料,玻璃纤维增强水泥混凝土或聚合物混凝土,碳纤维增强混凝土,玻璃钢棒材、芳纶

棒材或碳纤维棒材增强混凝土,短切玻璃纤维增强树脂,高强度和超高强度混凝土,高性能混凝土,聚合物混凝土,膨胀混凝土、钢丝网格或玻璃钢网格增强混凝土,预应力钢筋混凝土,劲性钢筋混凝土,自应力混凝土和 underwater 混凝土等。主要涉及的基体(起胶结作用)有两类:一类是树脂基体(例如环氧树脂、聚酯树脂等);另一类是水泥基体(它是脆性基体)。涉及的纤维有玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、钢纤维、尼龙纤维和其他纤维。属于增强材料的还有钢筋、型钢、钢管、钢板、碳纤维/环氧杆、芳纶纤维/环氧杆和玻璃钢棒等。

玻璃钢和高强度(超高强度)混凝土,就属于强度高而模量不高(不够高)的材料;陶瓷和高模量碳纤维就属于模量高而强度不高(由于断裂应变太小)的材料。高强度合金钢就属于模量和强度都很高但对断裂破坏特别敏感的材料。各种材料都有它的特点和优、缺点,因此,要合理地加以应用,取其所长而避其所短。一般说来,采用复合或混杂复合的途径,做成复合材料、混杂复合材料和复合结构,就可充分发挥组成材料的优点和克服(或限制)其缺点,最为合理、合适和有效。

纤维状材料与块状材料相比,具有更小和更少的缺陷,根据断裂力学的原理,前者比后者具有更高的拉伸强度。除有机纤维(它由大量微纤维组成,而微纤维又由不少微微纤维组成)为韧性纤维外,碳纤维、硼纤维、玻璃纤维和碳化硅纤维都属于脆性纤维,而树脂基体却属于韧性(延性)材料,纤维和树脂基体复合以后,两者具有互补作用,可产生复合效应,使纤维的某些潜在的良好性能得以发挥,就出现了正的复合效应,但也不可避免地要出现薄弱环节,这就是负的复合效应。

先进复合材料的最大优点是沿纤维方向的比模量高、比强度大和抗疲劳性能好等,碳纤维在纤维方向具有接近于零的热膨胀系数,芳纶纤维在纤维方向具有较为明显的负的热膨胀系数,这些都是非常突出的良好性能。

复合材料的最大特点之一是它的可设计性。要根据设计要求、承载情况、环境条件、使用寿命、结构的重要性、材料性能、工艺水平和经济因素等来进行设计,充分发挥复合材料及其结构的优越性,并减少施工、运输和安装的工作量,以加快建设进程,取得最大的经济效益和社会效益。与此同时,设计、制造、分析、计算的复杂性和难度也大大提高了。

先进复合材料在土木工程上的用量现在还相当小,由于先进复合材料的性能和有关力学问题已在大量书刊中作过介绍,所以在本文中主要讨论工程复合材料、混杂复合材料和复合结构等量大面广的材料和结构及有关力学问题。

冷拔高强度钢丝可以达到 $1900\sim 2000\text{ MPa}$ 的很高的拉伸强度,以它除以钢材的比重(在这里,比重是指单位体积的重量,又称为重度)后,可得比强度,由于钢的密度为 7.8 g/cm^3 ,与碳纤维 T300/环氧的密度 1.45 g/cm^3 、芳纶纤维/环氧的密度 1.40 g/cm^3 和玻璃钢的密度 2.0 g/cm^3 相比钢的密度要大很多,所以高强度钢丝的比强度比上述三种单向复合材料的比强度要低得多。高强度钢丝的比强度为 $0.25\times 10^6\text{ cm}$,碳纤维 T300/环氧为 $1.03\times 10^6\text{ cm}$;上述四者的比模量(模量/比重)分别为 $0.27\times 10^9\text{ cm}$, $0.965\times 10^9\text{ cm}$, $0.57\times 10^9\text{ cm}$ 和 $0.21\times 10^9\text{ cm}$,而高模量碳纤维/环氧的比模量可达 $(1.5\sim 2.5)\times 10^9\text{ cm}$,视纤维的种类而异,它们之间的差别很大。

复合材料和复合材料结构(构件)是同时设计和同时制造的,不像钢材、铝材、木材等先有了一定规格的材料,然后再设计制造产品的。在这一点上和混凝土很相似。因为混凝土在实质上也是一种复合材料,高强(或超高强)混凝土和高性能混凝土,也是一种复合材料,仅仅

没有采用复合材料的名称而已。由于复合材料和复合材料的结构以及复合结构是同时设计和同时制造的，没有大量的切削加工量，因而可大量节省能源的消耗，这也是很大的优点。

混凝土是由粗细骨料(增强材料)、胶结材料水泥石(基体)和界面层三个方面组成，所以在实质上是一种颗粒增强复合材料。混凝土已有一个多世纪的历史，而复合材料形成学科体系还是 60 年代后期的事情，玻璃纤维增强塑料也只有将近 50 年的历史，所以长期以来没有把混凝土当作复合材料来对待，这是有其历史原因的。此外，复合材料的价格通常都比较高，材料性能都比较好，一般的混凝土也不满足这两点要求，因此没有算作复合材料。当人们对复合材料的机理研究得很深入以后，再来考察混凝土时，发现由于它也具有增强材料、基体和界面这三个方面，它的性能已得到大幅度提高，就又认为混凝土确实是复合材料。纤维增强混凝土、钢筋混凝土和钢丝网混凝土等，实质上是一种由纤维状材料和颗粒状材料共同增强的混杂复合材料。钢管混凝土、钢板混凝土、钢筋混凝土、劲性钢筋混凝土和预应力混凝土，也可看作是混杂复合材料，有的看作复合结构(组合结构)就更为合适。在高强度(超高强度)混凝土、高性能混凝土、膨胀混凝土和水中混凝土中的添加剂，例如高效减水剂、硅粉、增强界面的胶粘剂、膨胀剂和胶凝剂等，不论它们所占的体积百分比如何，都可改善混凝土这种复合材料的基体和界面的性能，从而提高混凝土的抗拉、抗压和抗剪强度。增加致密性和耐久性，明显提高抗裂性。用复合材料的原理和机理来研究混凝土，就更有成效。混凝土的模量，主要是由骨料(增强材料)的模量决定的，和水泥石(基体)的模量也有某种程度的关系，如果在混凝土中增加较多的高模量纤维，例如碳纤维和钢纤维，那么也可使混凝土的模量有所提高，但不可能有大幅度的提高。要使钢筋混凝土、钢骨混凝土在某个方向大幅度提高刚度，最有效的办法还是在这个方向安排钢筋和型钢。在混凝土中的增强材料、基体和界面三者之中，若界面为最薄弱的环节，那么改善和提高界面状况与强度，就是最重要的，是提高混凝土强度的有效措施。当混凝土拌制时的水灰比较大时，就会产生泌水现象，严重影响界面的强度，从而影响混凝土的抗压、抗拉和抗剪强度。在适当添加减水剂后，可以减小甚至排除泌水现象。合理添加硅粉(其直径约比水泥直径小一个数量级)可增加化学胶结反应的活性并增加致密性。混凝土中的添加剂还可显著改善混凝土的流动性，便于施工。混凝土是一种脆性材料，它对变形的抗力，不论受压、受弯、受拉和受剪的情况基本上均是如此，这是混凝土的一大弱点。混凝土的脆性与骨料、水泥石和界面容易开裂这三者有关。只有在混凝土拌制过程中，添加钢纤维、碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维或其他纤维，才能明显改善基体的脆性，提高基体的抗拉和抗剪强度，若纤维足够长，那么基体性能改善的程度还可以提高。基体的强度如果属于混凝土的薄弱环节，那么，基体的强度提高了，当然有利于提高混凝土的强度，特别是在界面强度和骨料强度已经得到提高的情况下，更是如此。在混凝土中添加水溶性的乳液，或者将水泥基体改为聚合物基体，就可显著改善界面和基体的性能与强度，从而提高混凝土的性能和强度。因为在一般情况下，骨料的强度总是比较高的和有富余的。要大大提高混凝土的断裂韧性，只有采用纤维增强混凝土(添加 $V_f = 2\% \sim 3\%$ 的短纤维)这种途径才能达到。在纤维和基体之间的界面具有十分巨大的表面积，在界面脱开(开裂)过程中，需要大量的断裂功(断裂能)，即使在界面脱开以后，仅仅考虑克服摩擦力所需之功，在数值上也是相当大的。要大幅度地提高混凝土的抗压强度和压缩模量，当骨料成为薄弱环节时，就要采用高强度和高模量的天然骨料或人造骨料。混凝土必须按复合材料和混杂复合材料来研究，才能大幅度提高它的性能。这是根据复合材料的共性所作出的论断。