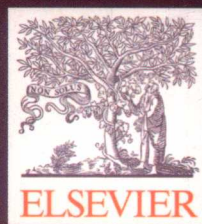




“十三五”国家重点图书出版规划项目  
先进复合材料技术丛书



COMPOSITE JOINTS AND CONNECTIONS:  
PRINCIPLES, MODELLING AND TESTING

# 复合材料连接： 设计准则、建模和实验分析

[澳] 佩德罗·卡曼霍(Pedro Camanho) 编  
全立勇(Liyong Tong)  
顾润潇 礼嵩明 黑艳伟 译

航空工业出版社

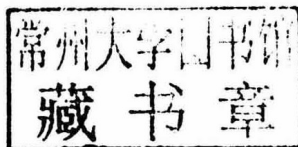


“十三五”国家重点图书出版规划项目  
先进复合材料技术丛书

# 复合材料连接： 设计准则、建模和 实验分析

**Composite Joints and Connections:  
Principles, Modelling and Testing**

[澳] 佩德罗·卡曼霍 (Pedro Camanho) 编  
全立勇 (Liyong Tong)  
顾润潇 礼嵩明 黑艳伟 译



航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

随着航空航天、汽车、船舶等制造业领域结构减重需求逐年上升，树脂基复合材料因其轻质高强、可设计性强的特点已成为目前新产品研发的首选材料之一。近年来，复合材料连接技术是复合材料工程化应用的一个重要研究方向，本书归纳总结了现阶段复合材料连接设计领域的最新进展。全书开篇介绍了局部金属混杂增强、拉挤成形等不同类型复合材料的连接方法及连接设计思路，随后分章节讨论了螺栓孔间隙、多向载荷、动态载荷、疲劳效应及温度对复合材料连接的影响及碳纤维复合材料连接强度预测方法，最后介绍了使用数值模拟和应力分析等分析复合材料连接破坏方式的计算方法，并针对航空航天和船舶工业需求介绍了应变能释放率和内聚力模型分析复合材料连接应变行为的实际算例。

本书可供复合材料结构连接设计人员、复合材料制造工程师等相关领域从业人员参考使用，也可作为航空航天类高等院校师生的参考书。

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

复合材料连接：设计准则、建模和实验分析/ (澳)  
佩德罗·卡曼霍 (Pedro Camanho), (澳) 仝立勇  
(Liyong Tong) 编; 顾润潇, 礼嵩明, 黑艳伟译. --北  
京: 航空工业出版社, 2019. 4

(先进复合材料技术丛书)

书名原文: Composite Joints and Connections:  
Principles, Modelling and Testing

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1790 - 1

I. ①复… II. ①佩… ②仝… ③顾… ④礼… ⑤黑  
… III. ①复合材料—联接 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 082661 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2014 - 7215

复合材料连接：设计准则、建模和实验分析  
Fuhe Cailiao Lianjie; Sheji Zhunze、Jianmo he Shiyan Fenxi

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 59773006 010 - 85672462

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2019 年 4 月第 1 版

2019 年 4 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 25.5 字数: 654 千字

印数: 1—2000

定价: 110.00 元

Composite Joints and Connections: Principles, Modelling and Testing

Pedro Camanho and Liyong Tong

ISBN: 978 - 1 - 84569 - 990 - 1 (print)

©Woodhead Publishing Limited, 2011. All rights reserved.

Authorized Chinese translation published by China Aviation Publishing & Media Co. , Ltd.

《复合材料连接：设计准则、建模和实验分析》(顾润潇 礼嵩明 黑艳伟 译)

ISBN: 978 - 7 - 5165 - 1790 - 1

Copyright ©Elsevier Ltd. and China Aviation Publishing & Media Co. , Ltd. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: [www.elsevier.com/permissions](http://www.elsevier.com/permissions).

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier Ltd. and China Aviation Publishing & Media Co. , Ltd. (other than as may be noted herein).

This edition of *Composite Joints and Connections: Principles, Modelling and Testing* is published by China Aviation Publishing & Media Co. , Ltd. under arrangement with ELSEVIER LTD.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本版由 ELSEVIER LTD. 授权中航出版传媒有限责任公司在中国大陆地区（不包括香港、澳门以及台湾地区）出版发行。

本版仅限在中国大陆地区（不包括香港、澳门以及台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受民事及刑事法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

### 注意

本书涉及领域的知识和实践标准在不断变化。新的研究和经验拓展我们的理解，因此须对研究方法、专业实践或医疗方法作出调整。从业者和研究人员必须始终依靠自身经验和知识来评估和使用本书中提到的所有信息、方法、化合物或本书中描述的实验。在使用这些信息或方法时，他们应注意自身和他人的安全，包括注意他们负有专业责任的当事人的安全。在法律允许的最大范围内，爱思唯尔、译文的原文作者、原文编辑及原文内容提供者均不对因产品责任、疏忽或其他人身或财产伤害及/或损失承担责任，亦不对由于使用或操作文中提到的方法、产品、说明或思想而导致的人身或财产伤害及/或损失承担责任。

## 丛书前言

先进材料是科学技术发展和国民经济建设的重要支柱。先进复合材料作为一类轻质高效、节能环保的新型材料，在先进材料领域具有极其重要的地位。自 20 世纪 60 年代问世以来，先进复合材料始终是世界各国重点研究开发的关键材料之一，近年来更是备受青睐与重视，在世界各国的军民用领域，尤其是航空领域起到了至关重要的作用。先进复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志，大型飞机波音 787、空客 A350 的先进复合材料用量达到 50% 以上，展示了其令人鼓舞的发展前景。此外，先进复合材料在基础设施、沿海油气田、风力发电、汽车和体育用品等民用工业领域的广泛应用，向人们昭示了其蓬勃发展的未来。

国内先进复合材料的发展应用已有 30 多年的历史，在此过程中获取了大量的性能数据，也积累了大量的设计使用经验。目前先进复合材料继续向高性能化、多功能化和尖端化发展，并向民用领域快速渗透和规模扩张，产业进入应用扩张带动成本持续降低的新阶段。为了适应这一发展需求，我们组织国内先进复合材料领域有实际经验的专家，吸取了国外的先进经验，汇总了国内外最新的研发成果，旨在为国内提供一套全面、系统并具有工程应用

价值的“先进复合材料技术丛书”。考虑到目前先进复合材料的规模和成熟程度，“先进复合材料技术丛书”的内容主要针对先进树脂基复合材料，涵盖先进树脂基复合材料技术基础、制造技术、性能表征、使用维护以及适航审定等最新成果。

对于 21 世纪的企业，其成功不仅仅是利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势，而利用拥有的知识带动和促进产业的跨越更是一种挑战和责任。把拥有的知识用书面文字的形式呈现出来，构建一个公共资料库和交流平台，让更多的人从中受益，为产业的跨越提供支撑——这就是中航复合材料有限责任公司、中国复合材料学会和航空工业出版社出版这套“先进复合材料技术丛书”的初衷。

相信这套丛书的出版，会使更多的复合材料科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力我国复合材料产业的自主创新，对复合材料产业的科技进步产生积极影响。

中国工程院院士  
中国复合材料学会理事长 陈祥宝  
“先进复合材料技术丛书”主编

# 译者的话

先进复合材料具有比强度高、比模量高、耐疲劳、抗腐蚀等优异性能，是目前航空航天四大材料之一。先进复合材料的应用比例已成为衡量新型飞机先进性的一项重要指标。大力发展先进复合材料，使我国在基础材料领域与西方发达国家达到同一高度，是我们这一代材料人应当担负的历史使命。

《复合材料连接：设计准则、建模和实验分析》一书总结了20世纪90年代至今复合材料连接设计领域的工程实践与设计方法。全书从不同类型复合材料的结构连接设计，多向载荷、动态载荷、温度、疲劳效应等因素对复合材料连接强度的影响，数值模拟和应力分析对复合材料连接破坏的预测等方面，多角度、全方位展示了复合材料连接技术研究的最新进展。本书的出版为相关研究人员全面掌握研究领域的历史与现状提供了翔实的文献资料，有利于促进我国先进复合材料连接技术研究的发展。

本书的第1~第4章由顾润潇翻译，其中第2章和第3章部分内容得到了上海飞机制造有限公司袁益楚和航空工业西安飞机工业（集团）有限责任公司彭萌的大力帮助；第5~第11章由礼嵩明翻译，其中第9~第11章部分内容得到了吴思保的大力帮助；第12~第17章由黑艳伟翻译，其中第15章和第17章部分内容得到了邱杨的大力协助。全书由顾润潇进行统一校正修改。

译者特别感谢航空工业出版社为本书的顺利引进做出的努力，正是他们的努力使得本书得以与国内读者见面。

译者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

译者  
2019年2月

# 前 言

近年来，树脂基复合材料凭借其轻质高强的特点，在现代制造业中的使用量逐年上升。不断上涨的工业需求进一步促进了复合材料结构设计理念的发展。以降低产品重量为设计目标，在复合材料的工程化应用中，一般采用一体成形技术减少产品零件数量，但不同复合材料结构件仍需要通过螺栓连接或胶结连接的方式进行装配。因此，复合材料连接设计准则成为学术界关注的一个重要课题。合理的复合材料连接设计不但可以最大化利用新材料的材料性能，而且还能有效降低装配成本，提高装配效率。本书旨在归纳总结现阶段在复合材料连接设计领域的最新进展，为复合材料设计人员提供设计思路及计算方法。

本书的第一部分分析介绍了在航空航天、民用建筑领域中使用的局部金属混杂增强复合材料和拉挤成形复合材料等不同材料体系的螺栓连接方式和连接强度试验方法。着重介绍了多向载荷作用下复合材料螺栓连接的应力分析和先进复合材料螺栓连接的强度预测方法。该部分也讨论了复合材料螺栓连接的疲劳性能、螺栓孔间隙动态载荷及温度对复合材料连接性能的影响。

本书的第二部分针对航天和舰船工业中复合材料的应用，结合数值模拟和应力分析两种研究手段介绍了复合材料胶结连接的基本知识。在复合材料结构设计中有必要充分理解复合材料胶结连接静态、动态失效行为模式，掌握采用数值模拟分析复合材料胶结性能的分析方法，因此本部分重点介绍了利用应变能释放率和内聚力模型研究复合材料胶结连接断裂力学的模拟计算手段，系统阐述了如何通过数值模拟方法预测复合材料应变行为。

# 目 录

## 第 1 部分 螺 栓 连 接

<b>1 局部金属混杂增强复合材料螺栓连接</b> .....	( 3 )
1.1 简介 .....	( 3 )
1.2 局部混杂概念 .....	( 6 )
1.3 增强材料 .....	( 8 )
1.4 承压强度 .....	( 12 )
1.4.1 承压强度和破坏模式 .....	( 13 )
1.4.2 金属强度和刚度的影响 .....	( 16 )
1.4.3 边缘距离效应 .....	( 21 )
1.5 结论 .....	( 23 )
1.6 参考文献 .....	( 25 )
<b>2 玻璃纤维—铝合金层板和其他混杂纤维—金属层板上的螺栓连接</b> .....	( 27 )
2.1 简介 .....	( 27 )
2.2 玻璃纤维—铝合金层板和纤维—金属层板的概念 .....	( 28 )
2.2.1 FML: 金属材料的损伤容限 .....	( 28 )
2.2.2 FML: 可拼接金属—复合材料物材料混杂结构 .....	( 32 )
2.2.3 FML 材料的今天和未来蓝图 .....	( 32 )
2.3 机械紧固 FML 接头上的载荷 .....	( 33 )
2.3.1 载荷移动 .....	( 33 )
2.3.2 次弯曲 .....	( 34 )
2.3.3 过盈配合紧固件和冷加工孔 .....	( 36 )
2.4 FML 接头的静力特性 .....	( 37 )
2.4.1 钝缺口破坏 .....	( 38 )
2.4.2 销加载 ( 承载 ) 破坏 .....	( 40 )
2.4.3 铆钉拔出破坏 .....	( 42 )
2.4.4 剪切撕裂破坏 .....	( 44 )
2.5 FML 接头的疲劳性能 .....	( 45 )
2.6 FML 接头的残余强度 .....	( 54 )
2.7 更多信息和建议来源 .....	( 55 )
2.8 参考文献 .....	( 55 )

<b>3 应用于玻璃纤维增强聚合物 (GFRP) 拉挤复合材料的螺栓连接</b>	( 59 )
3.1 简介	( 59 )
3.2 螺栓连接刚度和强度的试验	( 62 )
3.2.1 用于螺栓连接的转动瞬间试验装置	( 62 )
3.2.2 螺栓连接的载荷延伸试验装置	( 65 )
3.3 张力接头试验	( 66 )
3.3.1 双搭接单螺栓试验	( 66 )
3.3.2 双搭接多螺栓试验	( 70 )
3.3.3 单螺栓和多螺栓单搭接试验	( 71 )
3.4 张力接头中应力、变形及螺栓载荷分布的分析	( 72 )
3.5 张力接头设计指南	( 76 )
3.6 研究必要性与未来展望	( 79 )
3.7 参考文献	( 81 )
<b>4 复合材料连接中螺栓孔的间隙效应</b>	( 85 )
4.1 简介	( 85 )
4.2 单螺栓连接	( 85 )
4.2.1 试验测试	( 86 )
4.2.2 数值模拟	( 94 )
4.3 多螺栓连接	( 105 )
4.3.1 单搭接连接	( 105 )
4.3.2 双搭接连接	( 115 )
4.4 结论	( 135 )
4.5 参考文献	( 135 )
<b>5 多向载荷作用下复合材料螺栓连接的应力分析</b>	( 138 )
5.1 简介	( 138 )
5.2 螺栓载荷分布	( 139 )
5.2.1 问题阐述	( 139 )
5.2.2 能量方程	( 142 )
5.2.3 螺栓连接中可能存在的能量	( 143 )
5.2.4 约束条件	( 146 )
5.2.5 螺栓载荷分配的迭代解决方案	( 148 )
5.3 数值结果	( 149 )
5.4 总结	( 154 )
5.5 参考文献	( 154 )
<b>6 碳纤维增强聚合物基复合材料螺栓连接的强度预测</b>	( 155 )
6.1 简介	( 155 )
6.2 观察到的失效机理	( 155 )

6.2.1	接头的失效模式 .....	(156)
6.2.2	材料规模失效机理 .....	(157)
6.3	基于物理原理的失效模型 .....	(158)
6.3.1	材料失效方法 .....	(158)
6.3.2	数值问题处理 .....	(161)
6.4	试件的强度分析 .....	(162)
6.4.1	一些可靠试验结果的介绍 .....	(162)
6.4.2	试验结果和预判强度的比较 .....	(164)
6.4.3	讨论 .....	(167)
6.5	典型零件分析 .....	(169)
6.5.1	测试案例演示 .....	(169)
6.5.2	整体/局部多级工业方法 .....	(170)
6.5.3	虚拟测试法对复杂连接点的强度预测 .....	(173)
6.6	结论与发展趋势 .....	(175)
6.7	致谢 .....	(176)
6.8	参考文献 .....	(177)
<b>7</b>	<b>复合材料螺栓连接的疲劳特性 .....</b>	<b>(183)</b>
7.1	简介 .....	(183)
7.2	摩擦因数 .....	(183)
7.3	夹持力 .....	(185)
7.4	孔磨损 .....	(185)
7.5	紧固失效 .....	(187)
7.6	剪切 .....	(188)
7.7	净截面失效 .....	(188)
7.8	接头设计 .....	(188)
7.9	参考文献 .....	(189)
<b>8</b>	<b>动态载荷对固定复合材料连接接头的影响 .....</b>	<b>(192)</b>
8.1	简介和背景 .....	(192)
8.2	试验方法 .....	(194)
8.2.1	轴向承载(剪切)测试 .....	(194)
8.2.2	拉出(张力)测试 .....	(195)
8.3	单紧固件试验 .....	(195)
8.3.1	动态拉穿测试 .....	(196)
8.3.2	动态轴向承力测试 .....	(198)
8.3.3	讨论 .....	(202)
8.4	多紧固件试验 .....	(203)
8.4.1	试样设计和试验方法 .....	(203)

8.4.2	测试结果	(204)
8.4.3	讨论	(205)
8.5	模拟方法	(207)
8.5.1	具体模型	(207)
8.5.2	紧固件模型的计算效率	(212)
8.6	发展趋势	(216)
8.7	结论	(216)
8.8	致谢	(217)
8.9	参考文献	(217)
9	温度对复合材料螺栓连接的影响	(221)
9.1	简介	(221)
9.2	温度对强度的影响	(222)
9.2.1	试验过程	(223)
9.2.2	载荷位移响应	(223)
9.2.3	连接的承载强度	(226)
9.3	损伤演变	(230)
9.3.1	维持载荷峰值处损伤的技术	(230)
9.3.2	销连接的损伤演变	(230)
9.3.3	螺栓连接的损伤演变	(234)
9.4	分析工作	(237)
9.5	总结	(238)
9.6	致谢	(238)
9.7	参考文献	(238)

## 第2部分 胶结连接

10	规定裂纹下复合材料胶结连接的应变能释放率的计算	(245)
10.1	简介	(245)
10.2	应变能释放率	(247)
10.3	利用有限元法计算应变能释放率	(248)
10.3.1	三步法步骤	(248)
10.3.2	两步法步骤	(249)
10.3.3	一步法步骤 (VCCT)	(250)
10.4	利用解析方法计算应变能释放率	(251)
10.4.1	应力模型的来源	(251)
10.4.2	计算应变能释放率	(253)
10.4.3	实例计算	(256)

10.5	参考文献 .....	(258)
<b>11</b>	<b>内聚区模型模拟复合材料胶结连接的断裂 .....</b>	<b>(260)</b>
11.1	简介 .....	(260)
11.2	有限元分析标准框架下电势黏性模型的实施 .....	(262)
11.2.1	帕克 - 保利诺 - 罗斯勒统一的电势模型 .....	(262)
11.2.2	准静态载荷下的动力学和本构模型 .....	(263)
11.2.3	有限元实施 .....	(265)
11.3	AA6082T6/环氧 T - 剥离接头的剥离分析 .....	(267)
11.3.1	材料和方法 .....	(267)
11.3.2	试验结果 .....	(268)
11.3.3	胶结韧性的测定 .....	(271)
11.4	结论和未来趋势 .....	(274)
11.5	参考文献 .....	(274)
<b>12</b>	<b>基于改良内聚力模型的复合材料胶结接头疲劳损伤的数值模拟方法 .....</b>	<b>(277)</b>
12.1	胶结界面疲劳损伤简介 .....	(277)
12.2	基于内聚力模型的复合材料胶结界面裂纹扩展数值模拟：基本原理与实践工作 .....	(280)
12.2.1	内聚力模型 .....	(280)
12.2.2	内聚力模型与疲劳：最新进展 .....	(281)
12.3	应用二维内聚力模型预测 I 型载荷下胶结界面裂纹扩展 .....	(282)
12.3.1	疲劳破坏的内聚力规律 .....	(282)
12.3.2	应变能释放速率的计算 .....	(284)
12.3.3	有限元应用 .....	(286)
12.3.4	I 型模型验证 .....	(287)
12.4	应用二维内聚力模型预测混合载荷下胶结界面裂纹扩展 .....	(289)
12.4.1	理论框架 .....	(289)
12.4.2	验证 I 型 II 型混合模式模型 .....	(291)
12.5	数值模拟静态过载下疲劳裂纹扩展 .....	(297)
12.6	结论 .....	(300)
12.7	参考文献 .....	(300)
<b>13</b>	<b>复合材料搭接胶结接头强度在海洋工业中的应用 .....</b>	<b>(305)</b>
13.1	简介 .....	(305)
13.2	设计建议 .....	(306)
13.2.1	胶黏剂和胶结工艺的选择 .....	(306)
13.2.2	整体接头设计 .....	(306)
13.2.3	设计细节 .....	(306)
13.2.4	搭接长度 .....	(307)

13.2.5	胶结接头的保护 .....	(307)
13.3	胶结接头强度的试验研究 .....	(308)
13.4	胶结结构设计与复合材料力学性能的相互关系 .....	(309)
13.5	材料强度方法 .....	(311)
13.5.1	材料弹性强度模型 .....	(311)
13.5.2	弹塑性材料强度模型 .....	(313)
13.6	断裂力学研究方法 .....	(314)
13.6.1	弹塑性断裂力学方法——解析分析 .....	(315)
13.6.2	弹塑性失效力学方法结合有限元分析 .....	(316)
13.7	结果讨论及发展方向 .....	(319)
13.7.1	讨论与结论 .....	(319)
13.7.2	未来发展趋势 .....	(319)
13.8	致谢 .....	(320)
13.9	参考文献 .....	(320)
<b>14</b>	<b>航空领域复合材料胶结接头的先进建模方法 .....</b>	<b>(323)</b>
14.1	简介 .....	(323)
14.2	胶结连接 .....	(325)
14.3	基于胶结连接分析的胶结区模型 (CZM) .....	(327)
14.4	设计准则 .....	(330)
14.5	参考文献 .....	(331)
<b>15</b>	<b>复合材料胶结接头的混合模式能量释放率 .....</b>	<b>(334)</b>
15.1	简介 .....	(334)
15.2	混合模式能量释放率基本方程 .....	(336)
15.2.1	控制等式及边界条件 .....	(336)
15.2.2	共固化或分层复合材料梁界面破坏的能量释放率 .....	(337)
15.3	参数化案例研究 .....	(338)
15.3.1	非对称双悬臂梁 .....	(341)
15.3.2	非对称复合型断裂屈曲 .....	(342)
15.4	基于 FEA 结果的比较研究 .....	(343)
15.4.1	改变分层长度及载荷角的影响 .....	(343)
15.4.2	改变厚度比的影响 .....	(346)
15.5	试验验证 .....	(348)
15.5.1	局部试验数值化技术 .....	(348)
15.5.2	试样制备和试验过程 .....	(348)
15.5.3	图像分析 .....	(349)
15.5.4	局部有限元模型 .....	(351)
15.5.5	整体有限元模型 .....	(351)

15.5.6	分析比较	(351)
15.5.7	结果与讨论	(352)
15.6	结论	(353)
15.7	致谢	(353)
15.8	参考文献	(353)
<b>16</b>	<b>复合材料结构中胶结补片和嵌接修复的应力分析</b>	<b>(355)</b>
16.1	简介	(355)
16.2	复合材料结构修补	(357)
16.3	原理	(358)
16.3.1	面板单元	(360)
16.3.2	胶结原理	(364)
16.4	数值模拟结果	(365)
16.5	结论	(369)
16.6	参考文献	(369)
<b>17</b>	<b>高应变速率下复合材料胶结接头行为</b>	<b>(371)</b>
17.1	引言	(371)
17.2	典型橡胶改性环氧胶黏剂性能	(372)
17.2.1	微观结构的影响	(372)
17.2.2	力学性能	(373)
17.2.3	断裂韧性	(373)
17.3	动态接头失效	(374)
17.3.1	胶结接头黏合破坏	(374)
17.3.2	黏合破坏接头的表征	(375)
17.4	混合型及Ⅱ型样品的测试与分析	(376)
17.4.1	测试方法	(376)
17.4.2	建模与分析方法	(376)
17.4.3	结果和讨论	(378)
17.5	斜面嵌接接头失效的测试与分析	(379)
17.5.1	测试方法	(379)
17.5.2	建模方法	(380)
17.5.3	结果和讨论	(382)
17.6	结论	(385)
17.7	致谢	(385)
17.8	参考文献	(385)

第 1 部分  
螺 栓 连 接

