双金属复合管基础理论研究

Fundamental Mechanics of Mechanically Lined Pipe

袁 林 著

上海科学技术出版社

双金属复合管基础理论研究

Fundamental Mechanics of Mechanically Lined Pipe

袁　林　著

上海科学技术出版社

图书在版编目（CIP）数据

双金属复合管基础理论研究 / 袁林著. -- 上海 : 上海科学技术出版社, 2023.3
ISBN 978-7-5478-6068-7

Ⅰ. ①双… Ⅱ. ①袁… Ⅲ. ①金属复合材料—管材—研究 Ⅳ. ①TG14

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第028115号

双金属复合管基础理论研究

袁 林 著

上海世纪出版(集团)有限公司
上 海 科 学 技 术 出 版 社 出版、发行
(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)
邮政编码 201101 www.sstp.cn
印刷
开本 787×1092 1/16 印张 12.5
字数：300千字
2023年3月第1版 2023年3月第1次印刷
ISBN 978-7-5478-6068-7/TB·15
定价：125.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题，请向工厂联系调换

Synopsis

内容提要

双金属复合管的服役效能不足是长期困扰工程界的技术难题，如何在产品研发、生产和工程应用层面统筹解决其中的技术与理论问题是一项重要研究课题。

本书内容以双金属复合管的关键力学机理与实际工程应用技术的密切联系为重点，从产品设计、制造加工、铺设安装及工程服役效能方面进行全面、系统的介绍，特别针对复合管结构的弹塑性力学响应、内衬薄壳的多级屈曲失稳演化及工程应对措施等重点内容逐一进行深入阐释。本书展示了双金属复合管在国内外的最新研究进展与发展前景，有助于我国在该领域工程技术水平的提升。

本书适合从事油气储运、海洋工程等领域的工程设计人员、施工人员、研究人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

Foreword

序

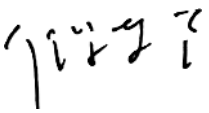
双金属复合管在深海资源开发中具有非常重要的地位。深海环境极其复杂，传统管道难以满足高温、高压和强腐蚀环境下的安全可靠性。双金属复合管具有高强度、高耐腐蚀性等优异特性，能够适应深海环境的极端条件，为深海资源开发提供可靠的技术保障。在全球能源体系变革的大背景下，采用双金属复合管已逐渐成为深海资源开发的重要技术手段，具有很高的应用价值。

由于对产品设计、制造工艺以及安装运维措施等方面把握不足，在一些工程应用中双金属复合管出现了内衬分离、屈曲塌陷破坏等服役效能不足的问题，这已成为影响其安全性的主要瓶颈难题。与国际先进水平相比，我国虽然积累了一些技术和工程经验，但目前存在研发、生产与工程应用严重脱节的局面，一定程度上延滞了双金属复合管在我国的发展和应用。开展双金属复合管的基础理论研究对于明确复杂失效现象背后的机理问题，进一步优化升级高性能复合管产品，帮助提出更合理、更有效的铺设施工工艺以及运维防控措施，都具有重要意义。

袁林教授在双金属复合管方面具有丰富的研究经验。在美国留学期间，他师从世界力学与海洋工程领域的顶级学者、美国工程院院士 Kyriakides 教授，在博士阶段就开始了双金属复合管力学理论的研究，在结构稳定性方面取得了许多重要的理论研究成果。毕业后，他进入了美国工业界工作，通过与行业内外的合作，开展了大量的科研和工程实践工作。回国后，他继续开展了对双金属复合管的系统研究，取得了一系列代表性的研究成果。目前，袁林教授已初步建立了有关双金属复合管的基本理论体系，解决了设计制造与铺设安装中的关键理论瓶颈问题，研究成果受到了国际工程界的广泛关注与采纳，已被编入业内技术标准。此外，他还获得了包括 OMAE 最佳论文奖在内的多项荣誉，并被国际海洋、离岸及极地工程协会（OOAE）副主席 Theodoro 教授评价为“对管道与立管的技术发展具有极其重要的推动作用”。不过目前，该问题仍然是行业内的热点课题，还有很多需要深入研究的问题，需要不断提高其应用性和可靠性。希望袁林教授能继续对该方面开展深入的研究，不断加深对该问题的理解，为行业的发展做出新的贡献。

该书囊括了袁林教授与 Kyriakides 院士合作的部分工作以及回国后取得的系列研

究进展，既总结了双金属复合管的产业背景和技术发展现状，又详细介绍了在设计制造及工程应用中复杂失效问题背后的力学机理，对内衬失稳防控理论和技术措施等方面也进行了系统阐述，是国内第一部全面介绍双金属复合管设计制造和屈曲失稳基础理论研究的专著，具有较高的学术水平和应用价值。该书思路清晰、条理清楚、特色鲜明，强调理论与实际工程的紧密结合，这对海底管道力学理论和相关工程技术的发展都具有积极的借鉴作用。



段梦兰

2023 年 2 月

Preface

前　言

双金属复合管是一种高性能异质金属复合管道材料，由外管和内衬管通过塑性成形等方法复合而成。外管一般用于承载外部载荷，而内衬则可以根据特殊功能需求选择不同材料，如抗腐蚀、抗磨损、抗冲击、高热传导性、高导电性及高磁性等材料，从而克服了单一材质综合性能不足的缺陷。凭借优异的产品性能和经济性优势，双金属复合管在石油天然气、化工、海洋、核电、航空航天等领域都有成功应用。在我国双金属复合管产品从无到有的20余年里，复合管的生产制造及工程应用方面成绩斐然。我国已经成为全球双金属复合管产能最大的国家，也是世界上复合管制造企业最多的国家，目前我国在役的复合管占全球在役管道的比例接近50%。但是，由于对其产品设计、制造工艺及安装和运维措施等方面认识有限，实际应用中也出现了内衬分离、屈曲塌陷破坏等效能不足问题，这已成为影响复合管安全性的主要问题，也在一定程度上使双金属复合管在我国的发展和应用产生了滞后。

认识到双金属复合管在多个工业领域的重要性及对支持新兴产业和技术发展的潜在重要作用，作者在复合管的基础理论、试验和工程应用等方面开展了长期研究。本书既总结了作者近年在学术理论方面的一些研究成果，又结合其在国外工业界任职时所积累的国际工程项目经验，其中包括了与美国Kyriakides教授合作的部分研究成果以及回国后开展的研究工作，对机械结合双金属复合管在设计制造及工程应用中所需的复杂力学机理、内衬失稳防控理论和技术措施等进行了详细阐述，以期改变我国目前存在的研发、生产与工程应用严重脱节的局面。

本书首先对双金属复合管的产品发展历程和现有技术标准等方面进行介绍，并总结了深海复合管的铺设安装工艺现状；第2章从复合管的液压成形制造方面着手，介绍了复合成形基础力学理论与关键工艺参数的影响，并对产品设计和工艺优化提出了指导建议；第3章重点研究了弯曲作用下复合管的结构响应、内衬塑性分支失稳特性，以及非轴对称高阶屈曲模态的演变过程等内容；第4章与第5章分别就环焊缝和凹陷缺陷对复合管弯曲屈曲的强扰动影响进行研究；第6章则从试验和理论角度对轴压作用下复合管的褶皱和屈曲问题进行了阐述；第7章与第8章分别介绍了拉力和弯曲组合工况下及卷管过程中复合管的失稳与极限承载特性；第9章总结了与工程应用密切相关的主要研究结

论，并对复合管的研究和技术发展方向进行了展望。本书的最后附有塑性力学基础理论和基于非线性环理论的管道弹塑性屈曲分析程序框架，可以帮助读者更好地理解相关力学理论的推导和计算方法。

在本书完稿之际，首先要感谢我的博士生导师、美国工程院院士、得克萨斯大学奥斯汀分校工程力学系 Stelios Kyriakides 教授，这些研究成果离不开他的指导和帮助。感谢浙江大学金伟良教授、龚顺风教授以及中国石油大学（北京）段梦兰教授，在我回国到天津大学开展学术研究之初，他们给予了许多好的建议，对我的研究工作提供了大力支持，特别要感谢段梦兰教授为本书作序；感谢包括西湖大学崔维成教授、西安向阳航天复合材料有限公司张燕飞总工程师在内的多位业内资深专家对本书的评阅建议与鼓励；感谢天津大学课题组的研究生赵昱、邵文钊、刘浩伟、周家胜、骆邱沙、刘政、张翔宇等，他们对本书专题进行了深入的研究，本书的内容也体现了他们的一部分研究成果。书中也引用了大量的参考文献，在此对所引用参考文献的作者表示谢意。

由于作者水平有限，书中的疏漏在所难免，敬请读者不吝赐教。

作　者

2023 年 2 月

Contents

目　录

第1章 绪论 …… 1

1.1 双金属复合管的产业背景 …… 3
1.1.1 产品发展历程 …… 3
1.1.2 相关技术标准研究 …… 5
1.2 双金属复合管的分类 …… 6
1.2.1 机械结合复合管 …… 6
1.2.2 冶金结合复合管 …… 10
1.3 双金属复合管的焊接工艺 …… 14
1.4 海洋用双金属复合管的铺设 …… 16
1.4.1 海底管道铺设方法 …… 16
1.4.2 双金属复合管铺设工艺 …… 18
参考文献 …… 22

第2章 双金属复合管液压复合成形分析 …… 27

2.1 试验研究 …… 28
2.2 理论研究 …… 31
2.3 数值模拟研究 …… 34
2.4 算例分析 …… 35
2.4.1 小尺度双金属复合管算例 …… 35
2.4.2 典型足尺双金属复合管算例 …… 36
2.5 参数分析 …… 38
2.5.1 基/衬装配间隙 …… 38
2.5.2 外管屈服应力 …… 38
2.5.3 材料塑性各向异性 …… 39
2.5.4 轴端压力 …… 40
参考文献 …… 41

第3章 弯曲作用下复合管的塑性失稳及屈曲塌陷 …… 43
3.1 塑性失稳分支点预测 …… 45
3.1.1 有限元建模 …… 45
3.1.2 弯曲分支失稳计算结果 …… 46
3.1.3 对比分析 …… 48
3.2 塑性屈曲及塌陷分析 …… 49
3.2.1 液压膨胀成形模拟 …… 49
3.2.2 有限元建模 …… 51
3.2.3 内衬褶皱和塌陷 …… 52
3.3 参数分析 …… 54
3.3.1 几何缺陷敏感性分析 …… 55
3.3.2 基/衬装配间隙 …… 57
3.3.3 管道直径 …… 58
3.3.4 内衬壁厚 …… 58
3.3.5 内压 …… 59
参考文献 …… 60

第4章 含环焊缝双金属复合管的弯曲屈曲与塌陷 …… 63
4.1 数值模拟 …… 65
4.1.1 有限元模型 …… 65
4.1.2 含环焊缝管道的褶皱和塌陷 …… 65
4.2 等效几何缺陷分析 …… 68
4.3 参数分析 …… 69
4.3.1 基/衬装配间隙 …… 69
4.3.2 管道直径 …… 70
4.3.3 内压 …… 71
4.3.4 内衬壁厚 …… 72
参考文献 …… 73

第5章 含凹陷复合管的弯曲屈曲与塌陷 …… 75
5.1 试验研究 …… 77
5.1.1 双金属复合管加工 …… 77
5.1.2 下压凹陷试验 …… 79
5.1.3 弯曲试验 …… 80

5.2 数值模拟分析 …… 85
5.2.1 试验过程仿真 …… 85
5.2.2 典型足尺算例分析 …… 90
5.3 参数分析 …… 93
5.3.1 凹陷深度 …… 93
5.3.2 内压 …… 94
参考文献 …… 96

第6章 轴压作用下复合管的塑性失稳及屈曲塌陷 …… 97

6.1 试验研究 …… 99
6.2 理论研究 …… 102
6.3 数值模拟研究 …… 104
6.3.1 复合管加工制造 …… 104
6.3.2 复合管轴压模型 …… 104
6.3.3 内衬褶皱和塌陷 …… 106
6.4 缺陷敏感性分析 …… 108
6.5 参数分析 …… 110
6.5.1 摩擦系数 …… 110
6.5.2 基/衬装配间隙 …… 111
6.5.3 管道直径 …… 112
6.5.4 内衬壁厚 …… 113
6.5.5 内压 …… 114
参考文献 …… 115

第7章 拉弯作用下复合管的结构行为及屈曲塌陷 …… 117

7.1 有限元模型 …… 119
7.2 数值模拟分析 …… 120
7.2.1 椭圆化分析- Quasi - 2D 模型 …… 122
7.2.2 椭圆化分析- 3D 模型 …… 125
7.2.3 含缺陷复合管的屈曲分析 …… 127
7.3 参数化分析 …… 129
7.3.1 曲率 …… 130
7.3.2 拉力 …… 130
7.3.3 内压 …… 132
参考文献 …… 133

第8章 卷管铺设复合管的结构行为及屈曲塌陷 …… 135
8.1 复合管卷管过程分析框架 …… 137
8.1.1 有限元模型 …… 137
8.1.2 几何缺陷 …… 138
8.1.3 复合管的制造 …… 139
8.2 模拟结果 …… 139
8.2.1 完善几何复合管的卷曲 …… 139
8.2.2 含缺陷复合管的卷曲 …… 142
8.2.3 几何缺陷敏感性分析 …… 144
8.3 参数分析 …… 146
8.3.1 拉力 …… 146
8.3.2 基/衬装配间隙 …… 146
8.3.3 管道直径 …… 148
8.3.4 内衬壁厚 …… 149
8.3.5 内压 …… 149
参考文献 …… 151

第9章 复合管基础理论总结与发展趋势展望 …… 153
9.1 复合管基础理论总结 …… 154
9.1.1 复合管的液压成形制造 …… 154
9.1.2 复合管的屈曲和塌陷 …… 154
9.2 复合管未来发展趋势展望 …… 156

附录A 塑性力学基础理论介绍 …… 159
A.1 预备知识 …… 159
A.1.1 单轴试验力学行为 …… 159
A.1.2 应力二阶张量 …… 162
A.1.3 屈服准则 …… 163
A.2 增量塑性理论 …… 165
A.2.1 流动法则 …… 165
A.2.2 等向强化 J_2 流动理论 …… 166
A.3 塑性形变理论 …… 167
A.3.1 全量形式的塑性形变理论 …… 167
A.3.2 增量形式的塑性形变理论 …… 168

A.4 随动强化模型 …… 168
A.4.1 Prager 模型 …… 169
A.4.2 Chaboche 模型 …… 169
A.4.3 Drucker-Palgen 模型 …… 170
参考文献 …… 171

附录 B 双金属复合管内衬紧密度试验方法 …… 172

B.1 推托法 …… 172
试验方法 …… 172
B.2 应变法 …… 173
试验方法 …… 173

附录 C 管道受力分析基础理论及程序框架 …… 174

C.1 输入参数 …… 174
C.2 计算步骤 …… 175
C.3 计算结果 …… 182
参考文献 …… 182

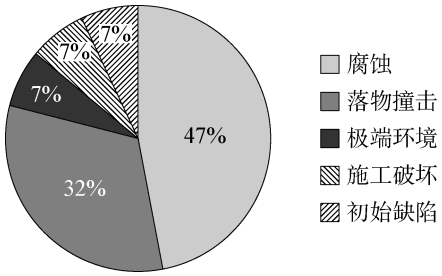
附录 D 索引 …… 183

第 1 章

绪　　论

1

管道的腐蚀问题普遍存在于不同工业领域，对管道结构的长期安全性构成了严重威胁。以石油和天然气领域为例，随着世界油气资源的勘探开发正在不断向环境条件更为苛刻的“深海、深层和非常规”演进[1]，作为油气开发系统的重要组成部分，油气输运管道正面临越来越突出的腐蚀性问题（图 1－1）。根据统计，腐蚀是造成我国海底管道失效破坏的主要原因，占比高达事故总量的 47%[2]。对于深水管道而言，由于受限于水下生产系统的处理工艺，运输油气中一般存在较高含量的 H_2S、CO_2[4-5] 等腐蚀性物质，加上深海环境恶劣，导致管道运营过程中需要应对的失效问题更为棘手。



（a）海底管道失效破坏的主要原因分析[2]



（b）2021 年墨西哥湾海底管道腐蚀泄漏诱发火灾[3]

图 1－1　油气管道的腐蚀失效问题

输运腐蚀性介质管道的服役效能一直是业内高度关注的问题。在铺设安装及服役过程中，涉及多种载荷与应力、接触耦合、温度变化、腐蚀环境等复杂作用，管道的承载能力和安全可靠性将发生不同程度的退化。传统的管道材料难以同时满足经济性与安全性要求，这催生了一种新型管道材料，即耐腐蚀型双金属复合管，并凭借其优异的产品性能和经济优势，在近年来得到快速发展和应用。这种双金属复合管由普通碳钢管及内部耐腐蚀衬管（2～3 mm）组

成，相较于其他同等类型管道，具有工艺简单、成本低廉等巨大优势。目前，其应用已遍及欧洲、美洲和亚洲等地区的关键陆地和深远海油气田[4-6]，在实现卷管法铺设后大幅降本增效，近年来出现了持续增长的趋势（特别是海洋发达国家）。据有关统计，双金属复合管在我国陆地和海上的铺设累计总长度已接近 2 500 km[6-7]，在南海番禺、流花和东海平黄等多个重要海洋油气区块得到应用，其中最大应用水深已达 1 500 m。

本书将围绕双金属复合管的制造及工程应用中遇到的关键力学问题而展开。除了在石油天然气领域，双金属复合管也广泛应用于化工、电力、热交换器及海水淡化等工业领域，是解决包括高腐蚀性、高磨损性介质输运在内的一种经济有效的方法。然而，在复合管的服役效能方面，当所受载荷较大时，由于内衬层相对薄弱，复合管容易出现内衬分离和过早屈曲塌陷的失效情况，而在该产品的早期应用过程中曾因对该问题把握不足而导致诸多问题，使得较长一段时间内我国的海洋工程等多个领域对双金属复合管的推广应用存在疑虑。另外，材料研究者往往对管道材料的组织成分、合成加工和基本物性要素比较熟悉，而忽视了工程应用中的服役效能问题，特别是在复合管材料研发阶段重视不够，也给这种新型材料的产业化带来了一些困惑与障碍。这其实也一定程度上造成了我国相关技术和装备与国际先进水平存在差距的不利现状。本书结合笔者对该问题的一些研究成果及在国外工业界任职时所参与的国际工程项目经验，抓住主导服役效能的关键因素——双金属复合管在安装和服役过程中的力学行为及其所涉及的基础理论，对其内在的复杂力学机理性问题进行详细阐述，以期抛砖引玉，进而推动双金属复合管在我国多个工业领域的进一步推广和应用。

1.1 双金属复合管的产业背景

1.1.1 产品发展历程

双金属复合管从本质上讲，属于高性能异质金属复合材料。早在工业和信息化部发布的《新材料产业“十二五”发展规划》和《新材料产业“十二五”重点产品目录》中就将此类高性能复合材料作为研发的重点之一。它能够克服单一材质材料综合性能不足和耗费自然资源等缺陷，是推动材料工业升级换代以及支持新兴产业、技术发展的重要基础[8]。作为应用于不同工业领域的新型材料，内衬可以根据特殊功能需求进行选择，如抗腐蚀、抗磨损、抗冲击、高强度、高热传导性、高导电性、高磁性等，并将其开发为油井管、锅炉管、热交换器用管、耐热耐腐蚀管及耐磨管等。因此，在石油化工、电器、军工、航空航天、核电、船舶、机械等行业，双金属复合管都具有广阔的应用前景[9]。

据报道，苏联在 20 世纪 60 年代就可以批量生产各种高性能双金属复合管，并将其应用于动力、机械和造船等工业领域。日本住友金属在 20 世纪 70 年代也开始研究双金属复合管材料的制造工艺，并利用常规制管设备生产了不同规格的不锈钢复合管[10]。我国在同时期也开始了复合管的相关研究和研发工作，比较有代表性的是鞍钢铸管厂在 1973 年成功生产了总长超过 3 000 m 的球铁-白口铁复合管，其在煤矿生产中得到了良好的应用效果[11]。世界上第一个双金属复合管产品是德国的 Butting 公司在 1994 年推出的，而在国内，西安向阳航天复合材料有限公司也于 2000 年在国内推出了该种类型产品，并于当年在制药领域取得应用。此

外，奥地利的 Voestalpine 及英国的 Proclad 等都在双金属复合管的生产制造方面颇具盛名。截至目前，Butting 公司生产的 BUBI® 机械复合管已有 1 500 km 的累积业绩。2019 年，该公司推出了新型胶结型机械复合管 GLUEBI®，并获得了挪威船级社（Det Norske Veritas，DNV）认证（详见 DNVGL－RP－A203）。据称，这种新型复合管能够解决卷管铺设过程中的内衬失效问题，在 2022 年挪威的 Akerbp Hod 项目中得到世界首次应用。

值得一提的是，从我国第一个双金属复合管产品问世，20 余年过去了，目前在这个领域国内已经取得了多个第一。其中包括，中国是全球双金属复合管产能最大的国家，也是世界上双金属复合管制造企业最多的国家。根据调研，全球通过 API 5LD 认证的 13 家企业中，中国就占到了一半以上。另外，中国是目前世界上生产双金属复合管口径最大的国家，最大可以生产 1.2 m 直径的双金属复合管。在复合管的实际工程用量方面，中国是复合管使用量最大的国家，目前中国在役的双金属复合管占全球在役管道的比例接近 50%。此外，中国也是双金属复合管使用领域最广的国家，除了应用在石油天然气领域外，还涉及炼化、发电、制药、海水淡化、纯净水输送等行业。近几年，国际知名的石油公司和石油工程公司都将未来的双金属复合管采购重点放在了中国，如沙特阿拉伯国家石油公司、法国能源企业 Technip、英国 Subsea 7 公司等都和中国的双金属复合管企业做过深入的交流和考察。

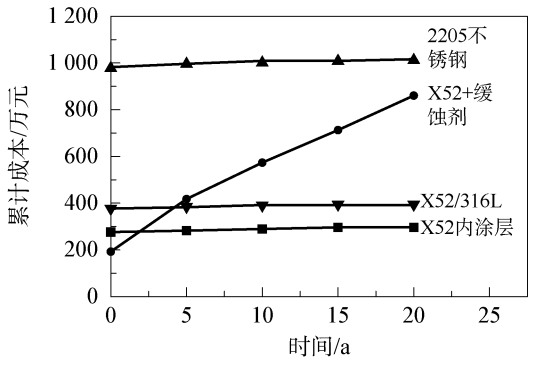


图 1－2　双金属复合管与其他防腐措施的经济性对比曲线[5]

在双金属复合管的经济性指标方面，文献[5]中详细计算了 4 种主要的海洋油气输送管道的腐蚀控制措施。经过对比发现（图 1－2）：采用“碳钢＋缓蚀剂”防腐方案在不到 5 年的时间里使用成本即超过双金属复合管；双相不锈钢前期成本最高，尽管后期维护成本较少，但总成本还是较高；双金属复合管尽管前期比“碳钢＋缓蚀剂”和内涂层管材成本要高，但后期维护费用较少，而且具有较高的安全可靠性，相对于其他 3 种防腐方案最终投入费用更少。正因如此，其应用可见于全球重要陆地和海上油气田项目，表 1－1 中罗列了国内外一些代表性项目案例。

表 1－1　代表性双金属复合管海洋工程应用项目[5]

序号	年份	项目名称	规格/mm	工程用量	材质
1	1990	Indian Oil	168×(5＋2)	61 t	X52/316L
2	1993	Shell/Malaysia	998×(36＋3)	60 t	X52/MONE1400
3	1994	BP/Brown & Root	273×(9＋3)	550 t	X65/316L
4	1994	Mobile Oil/USA	114×(9＋2.5)	219 t	X65/Alloy 825
5	1995	Rockwater	273×(14＋3)	1 365 t	X65/Alloy 825
		Brown & Root	168×(9＋3)	570 t	