



QuakeWrap, Inc.
6840 S. Tucson Blvd.
Tucson, AZ 85756 U.S.A.
Phone: (520) 791-7000
Fax: (520) 791-0600
Toll Free: (866) QuakeWrap [782-5397]
www.QuakeWrap.com

QuakeWrap, Inc 简介

QuakeWrap, Inc 是来自美国的纤维增强聚合物（FRP）产品用于结构修复和加强的工程设计和材料供应商。同时，为桥梁、海桩和管道等结构性修复提供整套解决方案。技术水平处于世界领先水平。

QuakeWrap, Inc 系统既可提供全新的结构设计，也可提供经济的结构性修复增强方案。用于结构性修复严重腐蚀的结构、纠正施工错误、增加现有负载能力和延长结构使用寿命。QuakeWrap, Inc 使用 FRP 材料为基础设施更新提供解决方案。

QuakeWrap, Inc 工程修复系统比传统修复方法更加经济，因为多功能性的 FRP 材料具有更大的强度和至少 50 年的耐用性。FRP 材料可以用于修复混凝土、砖石、钢材、木材等几乎所有的基质。QuakeWrap, Inc 提供完整的设计解决方案，包括工程设计、教授级高工盖章的图纸，以及姐妹公司 FRP Construction 提供的专业安装和施工。

QuakeWrap, Inc 的专利 FRP 产品涵盖的不仅仅是建筑、桥梁和管道等基础设施的结构性修复加强。其广受欢迎的 PileMedic® 产品可修复腐蚀的混凝土海洋桩，木桩，桥梁，桥墩和其他浅水商业基础设施。PipeMedic® 系统也是创新的管道修复产品，可修复管道、隧道、高压燃气管道、涵洞、雨水渠、下水道等。

由 QuakeWrap, Inc 独家开发并独家提供的 SPiRe®（钢板桩修复）系统是另外一种创新的结构修复方法，这种工艺是使用不透水的 FRP 复合板修复无论是水上还是水下的腐蚀的钢板桩制成的海堤和舱壁。

QuakeWrap, Inc 由 Mo Ehsani 博士于 1994 年创立，Mo Ehsani 博士是使用 FRP 进行基础设施维修和加强的国际公认专家和工程师，也是亚利桑那大学土木工程系教授。Ehsani 教授曾在 CNN，历史频道，国家公共广播电台以及包括工程新闻记录（ENR）在内的行业媒体上发表报道，介绍和科普在结构加强方面的专业知识，特别是讲解结构性修复北美和全球基础设施的创新型技术。

有关我们最新产品和过去维修项目的其他技术信息，请访问 www.QuakeWrap.com



QuakeWrap, Inc.
6840 S. Tucson Blvd.
Tucson, AZ 85756 U.S.A.
Phone: (520) 791-7000
Fax: (520) 791-0600
Toll Free: (866) QuakeWrap [782-5397]
www.QuakeWrap.com

公司历史

以下内容简要介绍了 Mo Ehsani 教授的重要经历和活动，这些经历和活动促进了 QuakeWrap, Inc 的成长，QuakeWrap, Inc 成为了世界领先的 FRP 设计公司、材料供应商和施工公司。

2023	• QuakeWrap 成立于 1994 年，30 年来专注于结构和基础设施修复和增强。 • SuperLaminate 获得美国交通部 100 万美元资助，研发全自动机器人进行石油天然气长输管道的结构性点修复工艺 • QuakeWrap 的施工公司 FRP Construction 达到了一个重要的安全里程碑：连续 6000 天没有因事故导致的工时损失。
2019	• InfinitPipe 获得二期价值 100 万美元的联邦研究拨款，以探索其作为农业可持续且耐用资源的潜力。 • 作为 QuakeWrap 创始人和使用纤维增强聚合物（FRP）进行结构修复和增强的先驱，Mo Ehsani 教授被美国国家土木工程师协会（ASCE）授予终身会员资格。
2018	• QuakeWrap 日益强大的管道部门使用 StifPipe FRP 技术修复了新泽西州的一条大型燃气管道，并获得了 Trenchless Technology 杂志评选的北美年度最佳修复项目。 • QuakeWrap Inc. 凭借其优秀出口业绩获得 Joint Planning Advisory Council Sun Corridor 出口认可计划以及全球经济发展(EDGE)的金奖。 • InfinitPipe 获得价值 10 万美元的联邦研究拨款，以探索其作为农业可持续且耐用资源的潜力。 • Mo Ehsani 教授被美国土木工程师协会(ASCE)南亚利桑那分会(SAB)评为 2018 年度工程师。
2017	• QuakeWrap 发布了其第一个完整的电子产品和服务目录，名为 QuakeWrap: The Infrastructure Innovators。通过 Layar 数字体验应用程序，新的多媒体互动直接将读者带到全球范围内的 FRP 基础设施修复现场。 • 将 InfinitPipe 的船板版本作为可持续解决方案，用于将更凉爽的水从深海输送到因温暖海水而受到褪色影响的浅海珊瑚，该提案被《Popular Science》杂志发表，并引起了北美的关注。



QuakeWrap, Inc.
6840 S. Tucson Blvd.
Tucson, AZ 85756 U.S.A.
Phone: (520) 791-7000
Fax: (520) 791-0600
Toll Free: (866) QuakeWrap [782-5397]
www.QuakeWrap.com

	• "Pipe in a Box"是 InfinitPipe 为了更方便地在欠发达国家运输清洁水而提供的解决方案，被《National Geographic》接受并发布在他们的国际 Chasing Genius 挑战中。 • SPiRe, 防水挡墙修复 FRP 系统，首次亮相于 2017 年的 Underwater Intervention 展会。 • ADOT 宣布改善 I-17 高速公路在 19th Avenue 上方的桥梁，由 Phoenix 的 FRP Construction 进行升级，使其充足性评级提高，ADOT 可以将该桥梁从结构亏损清单中移除。 • PileMedic 由 QuakeWrap 参与了在夏威夷珍珠港举行的联合能力技术示范活动(JCTD)，涉及美国陆军和海军潜水员使用 PileMedic 在几天内修复受损的海洋桩。美国军方拍摄了 PileMedic 安装的首段水下视频。
2016	• StifPipe 荣获 ASCE 2016 创新奖，成为世界上首个“绿色可持续”管道。 • QuakeWrap 总部第二次扩建，迁至图森机场地区的新址。
2012	• 开发并推出了 InfinitPipe，一种革命性的现场制造的不锈钢管道，几乎消除了所有接头，并显著降低了运输成本。这一发明的消息在北美迅速传播开来。
2011	• 开发并推出了 StifPipe，一种蜂窝状 FRP 管道，可以按照任意尺寸、形状进行定制，并能够抵抗内部压力和外部重力负载。 • 荣获 Trenchless Technology 杂志的年度项目奖，以表彰我们使用专利的 PipeMedic 技术修复高压燃气主干线的工程。
2010	• 获得国际混凝土修复学会(ICRI)颁发的优秀奖，以表彰我们在哥斯达黎加一座发电厂修复的 1.1 英里长、直径为 84 英寸的水轮机引水管。
2009	• 开发并推出了用于管道修复的 SuperLaminate (www.PipeMedic.com)，以及用于柱子和水下桩基修复的 SuperLaminate (www.PileMedic.com)。 • 荣获 2009 年 Trenchless Technology 年度项目荣誉提名，以表彰我们在哥斯达黎加完成了全球最大的管道翻新工程。



QuakeWrap, Inc.
6840 S. Tucson Blvd.
Tucson, AZ 85756 U.S.A.
Phone: (520) 791-7000
Fax: (520) 791-0600
Toll Free: (866) QuakeWrap [782-5397]
www.QuakeWrap.com

2008	- 获得国际混凝土修复学会(ICRI)颁发的水结构类卓越奖，以表彰我们对大直径预应力混凝土管道进行的修复工作。 - 在墨西哥开设了我们的第一个国际办事处。 - 购买并迁入一座新建筑，以满足日益增长的办公和仓库需求。
2007	获得国际混凝土修复学会(ICRI)颁发的优秀奖，以表彰我们对亚利桑那州图森市历史悠久的福克斯剧院进行的翻新工作。
2006	- 在亚利桑那州结构工程师协会颁发的结构工程卓越奖中，以福克斯剧院的翻新工作获得卓越奖。 - 在国际混凝土修复学会(ICRI)颁发的结构加固卓越奖中，以安克雷奇阿拉斯加的麦金利塔楼的抗震加固工程获得卓越奖。
2005	QuakeWrap 的创新产品和方法在 2005 年三月播出的 History Channel 纪录片中得到了重点展示。
2004	获得亚利桑那州结构工程师协会颁发的改造卓越奖，以表彰我们对 Coolidge 高中体育馆的改造工作。
2003	将公司更名为 QuakeWrap, Inc.，并在亚利桑那州和加利福尼亚州获得承包商许可证；开始提供完整的“系统性”解决方案，包括设计、材料和安装。
1997	获得美国专利(5640825)，“使用复合带和高强度随机纤维加固砌体和混凝土墙的方法”。
1996	担任了 ACI（美国混凝土协会）的委员会主席，并且是 ACI-440《混凝土结构中纤维增强塑料加固的现状报告》的主要作者。(ACI 440R-96).



QuakeWrap, Inc.
6840 S. Tucson Blvd.
Tucson, AZ 85756 U.S.A.
Phone: (520) 791-7000
Fax: (520) 791-0600
Toll Free: (866) QuakeWrap [782-5397]
www.QuakeWrap.com

1994	成立了结构修复集团（后来在 2003 年更名为 QuakeWrap, Inc.）。QuakeWrap 产品成功用于加固加利福尼亚南部的两栋建筑物。
1992	获得了美国国家科学基金会（NSF）的一项 3.5 万美元的拨款（随后又获得了另外 7.5 万美元的拨款），用于研究“使用纤维复合材料加固无钢筋砌体墙体”，NSF Grant No. BCS-9201110, 1992-1993 年期间（这是 NSF 针对这一新概念的首个授予的奖项）。
1991	获得了美国国家科学基金会（NSF）的 20 万美元拨款（这是 NSF 针对这一新概念的首个授予的奖项），用于研究“使用纤维复合材料加固混凝土柱”，NSF Grant No. MSS-9022667, 1991-1994 年期间。
1989	发明了使用纤维增强塑料（FRP）加固混凝土柱的概念，并向加利福尼亚交通部提出了研究资金申请；《工程新闻报道》（ENR）进行了报道。
1987	在使用纤维增强塑料（FRP）加固混凝土梁方面开展了研发工作，并撰写了第一篇技术论文，该论文于 1990 年由 ACI（美国混凝土协会）发表：“纤维复合板可以加固梁”，刊登于《混凝土国际》（Concrete International），第 12 卷第 3 期，第 65-71 页。



QUAKEWRAP 修复管道 和基础设施

QuakeWrap 修复管道和基础设施

QuakeWrap 专注于利用纤维增强聚合物修复基础设施。

提供用于加固管道和流体储存设施（储罐）的设计、材料、培训和安装。

管道解决方案涵盖小直径管道（小于 30 英寸/76 厘米）的外包裹和内包裹，以及几乎没有上限的大直径管道的内衬。QuakeWrap 的 FRP 管道内衬由业内最高强度的材料制成。因此，设计壁厚最小，因此由于内部粗糙度系数降低，通常可以提高现有管道的水力能力。每个 FRP 管道修复解决方案都需要独特的设计和纤维方向，具体取决于与项目相关的负载和环境因素。

内衬重量轻，因此易于安装



大多数项目不需要特殊设备。它们经过 NSF 61 和 372 认证，适用于饮用水应用，并且能够抵抗下水道和工业应用中可能存在的硫酸助剂和其他磨蚀性化学品的腐蚀。

QuakeWrap 的 FRP 衬里是修复用于水和其他类型流体滞留的腐蚀储罐的理想解决方案。除了提供腐蚀保护外，FRP 衬里系统还将提高储罐的结构完整性，从而延长或重置其使用寿命。我们的 FRP 解决方案是长期的，对于大多数现场条件，它们的设计寿命可达 50 多年。

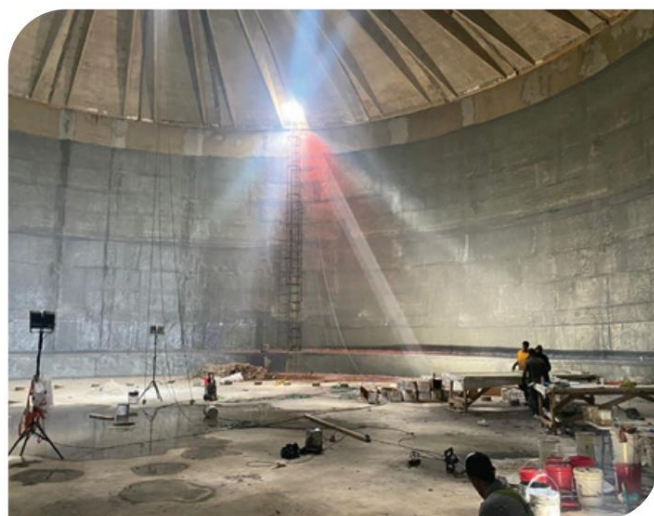


www.quakewrap.com



湿敷法

湿法铺层需要采用树脂（环氧树脂）饱和 FRP 织物作为就地固化方法。FRP 织物可以通过手糊方法应用,也可以使用封隔器用于不允许人员进入的小直径管道。



湿式敷层系统是加固高压管道最有效的方法之一。在该技术的首批应用之一中,QuakeWrap 产品被用于美国最大核电站的 120 英寸 (3 米)直径预应力混凝土圆筒管 (PCCP) 的结构衬里。

在该技术中,通常宽度为 2-4 英尺 (600-1200 毫米)的碳纤维布片浸透了我们工程环氧树脂,并在环向和纵向方向上以片材形式应用。这些片材的端部重叠以提供连续的衬里,从而实现适当的负载转移。使用这种方法,现有管道可以内衬或外包裹



StifPipe®

StifPipe® 是一种屡获殊荣的 FRP 复合管道技术，它使用芯 (3D) 织物以及碳纤维和玻璃纤维增强材料，打造出能够承受重外部负载和内部压力的极其轻质的管道。

StifPipe® 可以预先制造用于滑衬法安装，也可以采用湿敷法逐层敷设，用于衬里压力管道和重力流管道。

StifPipe® 由定制设计的夹层结构组成，无需过多的碳纤维层。它是一种高强度、轻质且耐腐蚀的产品，非常适合水、废水、雨水、石油、天然气和其他承受内部和外部负载的流体输送系统。StifPipe® 的强度与单位重量之比是管道行业中使用的任何材料都无法比拟的。它可用于采用非开挖技术（通过湿敷法或滑衬法）或新管道安装的结构管道修复。

由于 StifPipe® 滑移技术重量轻，通常不需要任何顶升设备。



用途

- ▶ 管道结构衬砌（非开挖）
- ▶ 管道结构点修复（非开挖）
- ▶ 新管道安装（明挖或非开挖）
- ▶ 适用于各类主管材质。

优点

- ▶ 由超高强度 FRP 层制成
- ▶ 耐腐蚀（对硫酸和 ASTM D543 中列出的其他化学品呈惰性）
- ▶ 由于强度高、壁厚薄，尺寸比高（50-100）
- ▶ 由于表面光滑，曼宁 n 值低且厚度薄，大多数应用的液压能力得到提高
- ▶ 使用轻质材料轻松安装（例如，典型的 36 英寸 StifPipe® 重 30-35 磅/英尺）
- ▶ 可制成任何形状以适合主管

生产

StifPipe® 可采用传统的 FRP 安装方式进行安装

方法（湿敷）或可以在心轴上制造并通过滑衬安装。

在大多数情况下,湿法铺层需要表面准备和环境控制。预制 StifPipe® 可以在项目现场或项目现场附近制造。每层玻璃、碳纤维和 3D 芯层都包裹在心轴上,并在室温下固化 12 小时。这两种方法都可以通过加热来加速固化过程。



安装

（说明了基本安装步骤
以下。详情请参阅技术规范。）

湿敷

- ▶ 去除尖锐的突出物和其他不规则之处
- ▶ 根据需要平滑或打磨表面,以获得所需粘合强度的表面轮廓
- ▶ 必要时通过压力冲洗和其他方式清除管道表面的任何杂物、沉积物、灰尘、树根、油和油脂
- ▶ 在表面涂上底漆,然后涂上粘性涂层（环氧树脂）
- ▶ 根据设计应用 StifPipe® 树脂饱和层
- ▶ 涂上最后一层耐磨面漆并固化
- ▶ 12 小时后将修复后的管道恢复使用或加热固化时用量较少。



www.quakewrap.com

安装

(基本安装步骤如下,具体请参见技术说明书。)

滑动衬里 (穿插法)

- ▶ 检查管道内部,平滑任何大于管道内径 3% 的突出物或接头偏移。
- ▶ 它可以用千斤顶安装,用带子拉动,或者手动或使用轮式组件 (可以装入额外空间)的管道运输机推动。 StifPipe® 在安装过程中可以安全地承受超过 10,000 psi (70 MPa) 的轴向 (压缩)应力。
- ▶ 将聚合物 (环氧树脂或聚氨酯)或水泥灌浆泵入环形空间。

储存和处理

- ▶ StifPipe® 是一种薄壁且高度柔韧的管道。卸载和安装过程中避免岩石或其他尖锐物体的撞击损坏。
- ▶ 用木螺柱和木/塑料垫块保护存放的管道。
- ▶ 理想情况下,应使用带子装载/卸载产品。使用链条等避免应力集中。装卸和安装时不需要或不建议使用挂钩和嵌入式凸耳。
- ▶ 避免在岩石和任何尖锐物体上拖动 StifPipe® 请参阅技术规格了解其他详细信息。





StifPipe® 特性

StifPipe® 设计针对每个项目,具体取决于内部和外部负载。典型的设计由双层 (带有短切毡以提高抗渗性)玻璃纤维、碳纤维和 3D 聚合物织物组成,以提高刚度。

财产*	帝国	SI
尺寸 (内径)	54 英寸。	1,370 毫米
厚度	0.56 英寸	14毫米
重量	50 磅/英尺	74公斤/米
管道刚度 (ASTM D2412)	43	43
弹性模量 (ASTM D2412)	8,124,000 磅/平方英寸	56,000兆帕
弯曲强度 (ASTM D790)	22,287 磅/平方英寸	154兆帕
最大挠度	6%	6%
轴向强度 (压缩)	11,000 磅/平方英寸	76兆帕
磨损指数 (ASTM D4060)	0.016 盎司	457毫克
耐化学性	<1% 体重增加 10%硫酸	<1% 体重增加 10%硫酸

*适用于 54 英寸样品。管道。属性根据尺寸和设计载荷而变化。



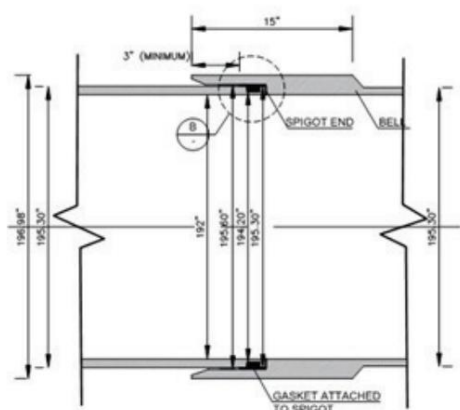
标称 直径 (英寸/毫米)*	外部压力 (psi/kPa)					
	10/69	30/207	50/345	70/483	90/621	110/758
最小壁厚 (英寸/毫米)						
18/460	0.33/8	0.33/8	0.33/8	0.33/8	0.33/8	0.33/8
24/610	0.3/8	0.33/8	0.33/8	0.33/8	0.36/9	0.39/10
30/760	0.5/13	0.5/13	0.52/13	0.52/13	0.6/15	0.9/23
36/910	0.50/13	0.5/13	0.52/13	0.6/15	0.65/17	0.9/23
48/1220	0.5/13	0.5/13	0.9/23	0.9/23	0.9/23	0.9/23
54/1370	0.54/14	0.6/15	0.9/23	0.9/23	0.9/23	1.0/25
60/1520	0.6/15	0.65/17	0.9/23	0.9/23	0.9/23	1.0/25
66/1680	0.7/18	0.9/23	0.9/23	0.9/23	1.0/25	1.3/33
72/1830	0.7/18	0.9/23	0.9/23	1.0/25	1.1/28	1.3/33
78/1980	0.9/23	0.9/23	0.9/23	1.0/25	1.3/33	1.3/33
84/2130	0.9/23	0.9/23	1.0/25	1.1/28	1.3/33	1.3/33
96/2440	1.0/25	1.0/25	1.1/28	1.3/33	1.3/33	1.3/33
120/3050	1.2/31	1.2/31	1.3/33	1.3/33	1.4/36	1.5/38
144/3660	1.3/33	1.3/33	1.3/33	1.4/36	1.5/38	1.6/41
168/4270	1.30/33	1.30/33	1.34/34	1.57/40	1.73/44	1.89/48
192/4880	1.34/34	1.34/34	1.57/40	1.81/46	2.12/54	2.20/56

环刚度

凭借其碳/玻璃纤维复合系统和专有的 3D 织物, StifPipe® 旨在以最小的厚度和重量承受高外部负载。 StifPipe® 机械性能因每个项目 and 设计而异。管道刚度 (根据 ASTM D2412 的 PS 值) 通常在 50 至 100 范围内。



连接头

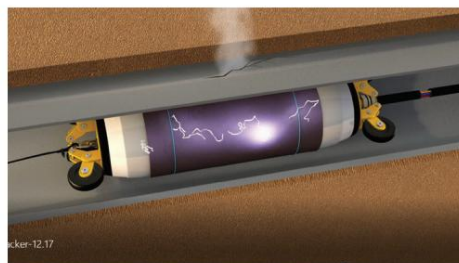


StifPipe® 管段有两种连接方式：

- ▶ 对接管段与就地固化的 FRP 条或
- ▶ 管段由承口和承口制成端部和带有定制设计的插口垫圈被推入钟罩内。

超级层压™

SuperLaminate™ 是一种复合材料管道点修复系统,适用于较小压力和重力的管道。它可用于输送任何类型流体的管道,并且可内部和外部应用。它是一种高强度、轻质且耐腐蚀的产品,非常适合水、热水 (工艺)水、石油、天然气和其他承受内部和外部负载的流体输送系统。由于其独特的纤维取向、高强度和轻重量,它是一种易于安装的系统,复合层数最少。



用途

- ▶ 非开挖管道修复系统。
- ▶ 通常应用于压力管道。
- ▶ 适用于各类管道材料。
- ▶ 预固化层压板选项可用于跨越现有管道上的任何间隙。



www.quakewrap.com

优点

- ▶ 由超高强度玻璃和碳纤维增强聚合物 (CFRP/GFRP) 层制成。
- ▶ 可设计成任何压力。
- ▶ 耐腐蚀。
- ▶ 根据 ASME PCC2/第 4 部分进行 A 型 (无泄漏) 和 B 型 (泄漏) 管道维修。
- ▶ 可以在不中断服务的情况下应用。
- ▶ 可以使用充气封隔器在不开挖 (非挖掘) 的情况下安装到埋地管道中。
- ▶ 基本上可以容纳任何形状的主管。
- ▶ 一般安装不到 4 小时即可完成。



安装 (内部)

- ▶ 通过注入化学灌浆来阻止任何泄漏。
- ▶ 用高强度环氧树脂浸透 SuperLaminate™ 织物层。
- ▶ 用浸透的玻璃钢布包裹充气打包机。系上细绳以将 FRP 织物固定到位。
- ▶ 使用 SuperLaminate™ 部署包装机。
- ▶ 在维修位置将封隔器充气至 15-20 psi 内部压力。
- ▶ 让系统在充气位置固化八小时或更短时间 (如果热固化)。
- ▶ 将封隔器放气并将其从管道中拉出。
- ▶ 将修复后的管道重新投入使用。

安装 (外部)

- ▶ 使用疏水性密封剂阻止任何泄漏 (B 型维修)。
- ▶ 去除任何尖锐的突出物和其他不规则之处。
- ▶ 清除管道表面的任何碎屑、沉积物、灰尘、树根、油和油脂。
- ▶ 根据需要平滑或打磨表面,以获得所需粘合强度的表面轮廓。
- ▶ 在表面涂上底漆,然后涂上粘性涂层 (环氧树脂)。
- ▶ 根据设计应用树脂饱和的 SuperLaminate™ 层。
- ▶ 最后涂上一层抗紫外线面漆 (如有必要)。



联系人 严博士
QuakeWrap Asia Technologies 总裁
+86 189 5132 9410

请访问我们的 YouTube 频道观看视频
关于我们的产品和案例研究:
<https://www.youtube.com/@QuakeWrapInc>

www.quakewrap.com

文章编号: 2023-A-00X

使用新型复合材料设计修复大口径管道

严轩辰, PhD¹, 姜记冰² V. Firat Sever, PhD, PE¹, Mo Ehsani, PhD, PE, SE¹

(1. QuakeWrap, Inc. 6840 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85756; 2. 南通建工集团股份有限公司, 江苏 南通 226001)

摘要: 针对传统的管道材料在制造大口径管道以及安装过程中, 面临着重量和尺寸的限制, 以及传统修复工艺修复大口径管道的承载能力有限、安装难度大、以及需要临时支路并需要进行管道内表面干燥等问题, 本文介绍的创新型复合材料系统在大口径新管道制备和现有管道修复中的应用已经成功地解决了上述问题。该系统采用了玻璃纤维、碳纤维和专利保护的 3D 纤维层组成, 以实现强度和轻量化的平衡。本文探讨了这种新型复合材料管道的设计原理、制造工艺和安装方法, 并重点介绍了 NDT 管道质量控制和结构健康监测方面的创新技术。通过合理的设计和工艺控制, 以及严格的质量检查和监测, 这种新型复合材料管材已经自 2010 年以来成功应用于多项大型管网的修复工程。今年 5 月, 再次成功应用于修复直径为 5.3 米的大型雨水节流管, 设计生产的 4.9 米内径的 FRP 内衬管是迄今为止最大的整体制作的 FRP 管道。

关键词: 大口径管道制造; 大口径管道修复; FRP 管道; 复合材料系统; 管道质量控制

中图分类号: TU-53 文献标志码: A

Large diameter pipelines rehabilitation design with innovative composites

YAN Xuanchen "Owen", PhD¹, JIANG Jibing², SEVER V. Firat, PhD, PE¹, EHSANI Mo, PhD, PE, SE¹

(1. QuakeWrap, Inc. 6840 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85756; 2. Nantong Construction Group Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226001)

Abstract: Regarding conventional pipeline materials, there are limitations in manufacturing large-diameter pipelines and the installation process, such as weight and size restrictions. Additionally, conventional rehabilitation methods for large-diameter pipelines have limited load-bearing capacity, installation difficulties, and require temporary bypass and internal surface drying. This paper introduces an innovative composite system that effectively addresses these issues in the preparation of large-diameter new pipelines and the rehabilitation of existing pipelines. The composite system is composed of glass fiber, carbon fiber, and a patented 3D fabric, striking a balance between strength and lightweight construction. The paper discusses the design principles, manufacturing processes, and installation methods of these novel composite pipelines, with a particular focus on innovative techniques for NDT pipeline quality control and structural health monitoring. Through proper design, process control, rigorous quality inspections, and monitoring, this new composite material pipe has been successfully applied in the repair projects of various large-scale pipeline networks since 2010. In May 2023, it was once again successfully used to rehabilitate a large rainwater throttling pipe with a diameter of 5.3 meters, and the designed and produced FRP liner with a 4.9-meter inner diameter is the largest monolithically produced FRP pipe to date.

Key words: Manufacturing of large-diameter pipelines; Rehabilitation of large-diameter pipelines; FRP (Fiber Reinforced Polymer) pipes; Composite material system; Pipeline quality control

1 引言

使用传统材料和工艺制备大口径管道(如使用

钢筋混凝土和钢铁)存在成本昂贵、运输限制多、以及安装过程复杂并且需要重型设备等问题。特别是对于直径超过 3 米的超大口径管道而言, 由于超

收稿日期: 2023-06-10

作者简介: 严轩辰(1988-), 男, 博士, 主要从事 FRP 加固技术研究。E-mail: xyan@quakewrap.com

通信作者简介: 姜记冰 (

出标准制造设备的尺寸范围，生产成本会大幅上升。此外，传统材料制造的大口径管道重量和体积庞大，超过道路荷载限制、桥梁通行空间限制以及卡车载重尺寸的限制。因此，大型管道装载和运输难度极大。综上所述，超大口径的管道（直径超过 3 米）制备工艺和材料的选择有很大的局限性。

对于大型管道修复工程而言，常见的修复工艺是采用灌注/原位修复系统或面板组合形成 360 度管道内衬。然而，这些方法的承载能力有限、安装难度大、以及需要临时支路并将管道干燥以进行修复材料原位固化。

随着工程项目规模的增大以及业主对管道性能要求的提高，传统材料的局限性变得越来越明显。因此，开发一种新型的管道材料 and 设计方法，以应对大口径管道的需求，成为了一个重要的研究领域。

与小口径管道相比，设计、制造和安装超大口径管道（直径超过 3 米）是不一样的概念。其设计和生产在很大程度上几乎完全不同的方法。因为使用常规材料和装配线生产的管道直径通常不会超过 3 米（表 1）。

表 1 常见材料的标准最大管径

管道材料	应用领域	标准最大直径 (mm)	标准/制造商
钢	重力和压力。通常有内衬和涂层以防止腐蚀和保持水质。	3960	Northwest Pipe
混凝土（非钢筋）	重力	914	Concrete Pipe Assoc./Illinois
混凝土（钢筋）	重力和压力	3660	Thompson
预应力混凝土圆筒管（内衬）	压力（主要用于水）	1530	AWWA C304/C301
预应力混凝土圆筒管 PCCP（埋置）	压力（主要用于水）	3660*	Thompson
玻璃纤维管道	重力和压力	3200/3960	HOBAS/Thompson
聚氯乙烯（PVC）	重力和压力	1520**	AWWA C900
高密度聚乙烯（HDPE）	重力和压力	1650**	AWWA C906

注：*虽然 PCCP 的直径最大可达 6500mm，但据作者所知，北美没有大于 3660mm 的 PCCP 的标准生产，大多数制造商已停产较大口径的嵌入式 PCCP。

**虽然可以制造大口径非钢筋塑料管道，但大多数制造商的生产标准是不超过 1220mm。

因此，当项目所需的管道尺寸大于 3000mm 时，从设计到安装的每一步都必须进行定制。重型设

备、昂贵的机械/自动化以及最重要的是必须对标准管道制造过程进行修改，这可能使得使用传统生产方式的项目成本变得极其昂贵。



图 1. 4.9 米内径复合管道的运输（进行此类运输需要特定路线并获得交通部门许可）

管道设计标准（如 AWWA^[1-3] 和 ASTM）通常会规定设计方法的直径范围，这意味着现有标准将不适用设计和测试超出该直径范围的管道。另一个重要问题是运输，在许多地区，大口径管道很难通过桥梁，因此很难获得许可证将超大口径的管道运送越过州界（图 1）。最后，超大口径管道的安装也是另一个挑战，包括从卸货、暂放到进入工作竖井等。如果是新管道铺设，往往需要将大口径管道放入一个深而宽的沟槽。为了完全符合设计标准，需要确保土壤的稳定性和合适的土层、拱形填筑和回填。如果是内衬管修复项目，那么需要将大口径内衬管降至工作竖井中，然后利用顶管推入现有管道中，然后灌浆填充环空间隙，这需要详实的计划和强有力的执行能力。

针对以上问题，本文的主要重点是通过介绍直径为 4.9 米内径的 FRP 管道的设计过程，通过制造一个轻量、耐腐蚀和坚固的管道，来解决上述的挑战。这种新型 FRP 增强聚合物管道由多层碳纤维、玻璃纤维以及受专利保护的 3D 纤维织物组成。

2 设计

这种受专利保护的复合 FRP 管道于 10 多年前由 QuakeWrap 公司研发。最初，是在 FRP 夹层结构中采用了一种“迷你工型梁”的 3D 织物，以提高 FRP 复合材料的整体环向刚度^[4]。该 FRP 复合

系统被命名为 StifPipe®, QuakeWrap 公司的 Mo Ehsani 教授申请获得了专利。随着研发和应用的成熟,通过将原始的迷你工型梁替换为一种专有的聚合物织物,这种 3D 织物通过吸收大约比平均 1mm 厚的碳纤维织物多约 3.5 倍的环氧树脂,从而可以将环向刚度因子可以达到 90 以上,最终可以形成是一种富含树脂、轻质、高强度的 FRP 管道。

StifPipe®经济实用,因为其充分利用了碳纤维的拉伸强度和核心 3D 织物提供的环向刚度^[5]。此外,StifPipe®还包含有了双向的采用编织和碎切玻璃纤维增强聚合物(GFRP)层,以增强强度、抗腐蚀/抗磨损性和防水性能。

StifPipe®是通过将各层材料包覆在可折叠的芯轴上制作而成的,然后在固化过程完成后从芯轴上取下管段(在室温下固化过程需时 20 小时)。其首次应用可以追溯到 2012 年,用于加利福尼亚州阿瓦隆的一座泵站排水管道修复。在工程应用中,每个管段的直径和长度都是定制的。因此,针对阿瓦隆的 1220mm 内径排水管道的全结构修复,QuakeWrap 设计使用了 1194mm 外径的 StifPipe®,以最小化环状间隙,从而保证管道流量要求。(通常情况下,尽管内衬管道截面减小,但由于内衬相对于旧管道表面更光滑,实际的管道流量是得到改善的)。在 StifPipe®的首次应用之后,在北美和世界各地成功修复大量类似情况的管道。其中,最具代表性的大口径管道修复项目是在明尼苏达州的明尼阿波利斯(3.7 米内径的 StifPipe®),以及在密歇根州的底特律(4.9 米的 StifPipe®);后者很可能是迄今为止制造的最大 FRP 管道。

2.1 StifPipe®挠度设计、计算和测试

StifPipe®设计方和计算方法是基于 AWWA C305 - [预应力混凝土圆筒管(PCCP)的维修和加固]标准、AWWA C950 - 纤维压力管道的设计标准,以及 ASTM D2412^[6] - 塑料管道外部加载特性测定的标准试验方法,还使用了有限元方法(FEM)进行的计算建模。

对于 4.9 米直径的 StifPipe®,根据上述技术规范中的设计荷载和准则,一共设计了包括 4 层环向单向碳纤维层、2 层 3D 织物和 10 层环向双向玻璃纤维层。为了增强防水性能,在原始双轴玻璃纤维织物的背面缝制了一层玻璃纤维切碎层。按照 ASTM D2412 标准测试,专有的 3D 织物显著增加了 StifPipe®系统的刚度和稳定性。QuakeWrap 的碳

纤维 U27C 和玻璃纤维 B2408G 已在数百个结构修复项目中成功使用。整个 StifPipe®系统使用高强度的工程环氧树脂浸渍。

对于 FRP 复合材料,目前北美没有标准公式来计算垂直挠度。ASTM D2412 提供了一系列经验方程,但仅适用于测试的加载配置。由于进行 4.9 米内径 StifPipe®的全尺寸测试成本过高,因此在 4.9 米 StifPipe®的实际设计中,根据弯曲强度测试(ASTM D790)获得的 EI 值反推出 StifPipe®整体的最大挠度。

QuakeWrap 对于一个长 1.5 米、宽 0.6 米的弧形 StifPipe®板进行了平行加载改进的 ASTM D2412 试验,模拟了实际应用和设计的情况。结果表明 StifPipe®的长期(50 年以上)挠度约为 2.54cm(0.5% 的直径形变)。在这个设置中测量到的挠度(图 2)约为 8.4mm,然后使用 Castigliano 定理将该值转换为半圆管(180 度弧)的挠度值。该定理允许将边界条件从 $0-\pi$ 更改为 0.4π 到 0.6π ,正是为该测试制作的弧形板的跨度。Castigliano 的方法利用在两个边界条件之间积分来计算应变能量(对于这种情况,它是管道两个 Spring line 之间的 180 度弧)。应注意,这种设计是保守的。因为实际管道的挠度将低于根据 ASTM D2412 计算的挠度,因为该测试方法未考虑周围土壤的支撑作用。另一个因素是在主管和 StifPipe®(内衬)之间的注浆,注浆将大大降低荷载对 StifPipe®的压力,但是注浆强度没有纳入设计计算中。



图 2. 用于模拟该项目设计的实际管道的拱形板挠曲测试设置。

2.2 3D 有限元 FEA 模拟

此外，QuakeWrap 还进行了 3D 有限元分析模拟，以验证设计计算。该模型采用了与实际工程相同的设计荷载和荷载系数。在假设的 15 米水压下，有限元分析结果显示最大垂直挠度为 2.2%，与使用 ASTM D2412 方程进行手算计算的结果一致。有限元分析模型还给出了最大应变为 0.10%和最大应力为 27MPa，远低于为该项目设计的管道的极限状态。下图（图 3、4 和 5）显示了有限元分析模型结果图。

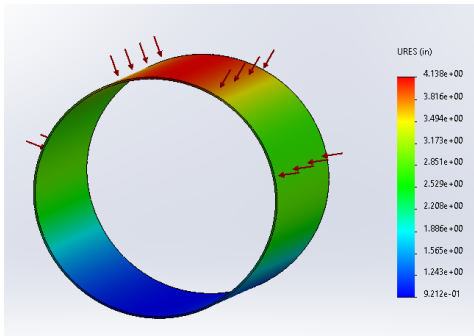


图 3. 使用有限元分析（FEA）模型计算得出的位移。

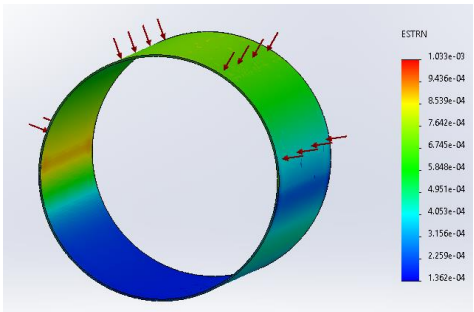


图 4. 使用有限元分析（FEA）模型计算得出的应变。

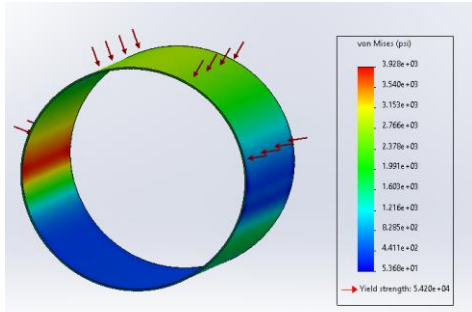


图 5.使用有限元分析(FEA)模型计算得出的应力(von Mises)。

3 StifPipe®的制造

上述的 StifPipe®系统是在可折叠芯轴上制造的，按照设计要求将每层包裹在芯轴上。当层压板达到足够的固化程度（通常是第二天）时，芯轴被折叠，StifPipe®被拉出。StifPipe®有扣肩连接，利用木材手持切割机以圆周运动的方式切割凹槽，然后在凹槽中插入一个 EPDM 密封垫圈，通过根据设计要求在其中一个扣肩端上额外包裹 FRP 沾布来制造扣肩端。

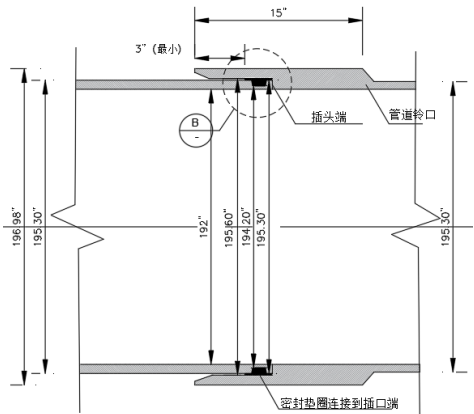


图 6. 展示了 4.9 米内径的 StifPipe®的扣肩连接细节。

对于直径大于 2.4 米的管道,由于手动包裹 FRP 层的困难，需要使用旋转芯轴（通过电机驱动）进行 StifPipe®的制造。此外，恒定旋转的芯轴可以消除树脂因重力塌陷的风险，直到达到足够的固化程度。



图 7. 设计人员、业主与 4.9 米内径的 StifPipe®。

相对较简单的制造工艺使得可以在项目现场或附近建立临时制造设施进行 StifPipe®的生产制造。这种本地化的生产方法大大节省了运输成本。这将从根本上解决,由于桥梁通行和许可问题,很多地区无法运输大口径的管道的问题。此外,本地化制造使项目团队和业主能够准确了解整个 StifPipe®的制备过程,并在现场解决一些问题,而不会导致由于质量问题而退回 StifPipe®,由于运输困难而引起的重大工期延误。

制造过程中的挑战主要出现在 FRP 层和芯层的数量超过五层时。特别是对于 4.9 米直径的管道,需要小心地将 FRP 材料包裹在旋转芯轴上,并添加额外的薄纱层,以确保树脂的适当和均匀吸收。

4 StifPipe®质量控制

根据 QuakeWrap 的生产制造规范,任何明显的缺陷(例如 FRP 织物中的皱折、层间剥离等)都会被记录下来,超出技术规范中规定的容许偏差的缺陷通常会得到处理,一般是通过在有缺陷的区域剪切和移除 FRP 层,然后按设计要求用 FRP 补丁进行替换。

为了检测 FRP 层之间的任何不明显缺陷,太平洋波浪无损检测公司的工程师和研究人员开发了一种新颖的扫描技术,用无损检测(NDT)的方式测试 StifPipe®存在的潜在 FRP 缺陷。这种 QC 是通过使用线性和非线性超声技术进行的(图 8)。这种 NDT 测试方法是一种实时测试技术,使用复杂的信号处理工具来检测复合结构中的异常情况。该过程使用改进和稳定的移动测试仪器进行,提供更可靠和一致的结果,并可以监测各种损 FRP 缺陷,包括剥离和空洞。无损检测测试采用二元设置,即阳性或阴性。阳性信号将指示是否超出技术规范中确定的容许偏差限值。如果在整个管道段中检测到超过五个缺陷(或在 1 平方米的区域内检测到超过三个),则该 StifPipe®将进一步进行机械测试,并可能被 QuakeWrap 内部销毁。所有为该项目制造的管道均通过了无损检测测试,其中一些管道中有一些缺陷(空洞)。但是,这些空洞通过树脂注入进行填充和修复。



图 8. 使用定制波形算法对 4.9 米直径管道进行超声波检测。

5 StifPipe®安装

StifPipe®安装可以通过湿法手敷(原位固化)或滑管内衬管法进行。本文重点介绍后者-预制 StifPipe®滑管法。由于使用了碳纤维等超高强度材料,该管的重量仅相当于其他具有相同强度的材料的 20%。例如,直径为 4.9 米的管道仅重约每米 610Kg,壁厚为 5cm。直径为 1 米的 StifPipe®重量约为每米 68kg,一个短段可以由一个人扛起。由于碳纤维复合管的重量很轻,安装时甚至无需顶升设备,甚至可以通过人工在沟槽中放置和移动。目前,人工移动的最大直径的 StifPipe®可达 2.4 米。

对于在底特律安装的直径为 4.9 米的 StifPipe®,首先将每个管段降至直径为 9 米的工作竖井中。然后,由于 5.3 米内径主管道和 4.9 米内径的 StifPipe®之间由充足的环状间隙,可以利用承载器沿着管道轻松移动 4 米长的 StifPipe®。在每个 StifPipe®管段到位后,与主管道之间的环状间隙用低强度的水泥砂浆填充。并且计算得出了每次注浆的高度,并向承包商提供了一个砂浆施工计划,这样可以避免在安装 StifPipe®过程中出现浮力。安装 StifPipe®时使用了间隔器,使 StifPipe®周围的环形间隙保持均匀为 230mm。

6 结论

使用超高强度材料制造大尺寸的单体管道的是一种切实可行的新方法和新机会。需要有严谨的

设计、可靠的制造工艺以及经验丰富的专业人员。
如使用本文描述的 StifPipe[®], 可以在项目现场或附近进行制造。从项目开始到结束, 按照技术规范进行全面细致的 QA/QC 管理, 对于防范生产和安装过程中的质量问题和意外失误至关重要。

参考文献

- [1]AWWA C304-14(R19) Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe.
- [2]AWWA C900-07 Polyvinyl Chloride (PVC) Pressure Pipe and Fabricated Fittings, 4 In. Through 12 In. (100 mm Through 300 mm), for Water Transmission and Distribution (PDF).
- [3]AWWA C906-15 Polyethylene (PE) Pressure Pipe and Fittings, 4 In. Through 65 In. (100 mm Through 1,650 mm), for Waterworks (PDF).
- [4]Ehsani, M. 2017. ASCE Innovation Award Winner: Sandwich Construction Carbon FRP Pipe. Proceedings – ASCE Pipelines, Phoenix, Arizona.
- [5]Sever, V.F and Ehsani, M. 2019. Designing an Economical FRP System for Pipeline Rehabilitation. Proceedings – ASCE Pipelines, Nashville, TN.
- [6]ASTM D-2412 - Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading.



项目概述 碳纤维修复加固90年历史的铆钉钢管

项目概述 碳纤维修复加固90年历史的铆钉钢管

名称：摩门大坝水利发电站的铆钉钢管

类型：工业设施

地点：亚利桑那州中部 2017年6月-

工程师们使用了一种最强的纤维增强材料，对为数百万客户提供服务的中央亚利桑那州水力发电大坝进行了维修。碳纤维复合材料被用于恢复和加固摩门水电坝中铆钉钢管的大型结构。这是一根直径为10英尺，内部压力为90 psi，水流速度高的钢管。除了加固和密封隧道和钢管，防止进一步的腐蚀损伤外，碳纤维复合材料还具有将标准老旧管道转化为高压管道的非凡能力。通过在内部涂覆碳纤维复合材料，它可以延长管道的预期使用寿命，并增加压力等级，使它们可以通过增加流经管道的水量来产生更多的电力

