
共挤耐磨层增强塑料复合管道及连接技术

Co-extruding Wear-resistant and Reinforced Plastics Composite Pipe and Joint

四川鑫成新材料科技有限公司 陈晓梅

地址：四川省眉山市仁寿县视高经济开发区 邮编：620564

陈晓梅，女，汉族，出生于1966年，四川人，博士，高级工程师，毕业于四川大学高分子材料系材料加工工程专业，现任四川鑫成新材料科技有限公司总经理。长期从事高分子改性材料及特种复合材料的研发和市场推广工作。

江西瑞钛管道有限公司 杨明昆

杨明昆，男，汉族，出生于1979年，福建人，本科，毕业于福建工程学院企业管理专业，现任江西瑞钛管道有限公司总经理。长期从事塑料复合管道技术开发与经营管理工作。

摘要

介绍共挤耐磨层增强塑料复合管的耐磨层原料与性能、管材结构形式及高压力管的连接接头，重点介绍改性聚烯烃耐磨管与几种常见耐磨管的耐磨对比试验，高压力耐磨管的连接技术与应用案例。得出改性聚烯烃耐磨管其耐磨性能明显优于目前公认的UHMWPE耐磨塑料管道的结论，采用钢丝增强共挤聚烯烃耐磨材料的新生产技术与新材料，能制造出优异性能的大直径耐高压防腐蚀的新型耐磨管道。

关键词

改性聚烯烃耐磨料
增强塑料复合管道

Abstract

This paper introduces a new co-extruding wear-resistant and reinforced plastics composite pipe including the polyolefin material of the inner wear-resistant layer, the structure of the composite pipe and the joint method for the high pressure applications. The comparative wear-resistant testing results of this composite pipe and several common wear-resistant pipes are illustrated. The connection technology and application cases of high pressure co-extruding wear-resistant reinforced plastics composite pipe are demonstrated. The results show that the wear resistance of this composite pipe is obviously better than other pipes such as UHMWPE pipe, HDPE pipe and steel lined runner pipe. A new type of wear-resistant pipe with large diameter, high pressure and corrosion resistant can be produced by using the composite production technology and process of co-extrusion inner wear-resistant layer and steel wire reinforcement.

Key words: Polyolefin modified wear-resistant material, Reinforced plastics composite pipe.

1 前言

1.1 固体物料长距离输送管道的发展简介

固体物料的长距离水力输送(以下简称“浆体输送”)是上世纪50年发展起来的一种新的运输方式，在国外的金属矿山及煤矿等行业中得到了广泛的应用¹。我国在上世纪八十年代初开始关注这一新的运输方式，至90年代相继建成了贵州省翁福磷精矿浆体输送管线和山西太钢铁精矿浆体输送管线，为我国应用浆体输送这一先进的运输方式开辟了道路。

由于固体物料的浆体管道输送方式与其他运输方式(如汽车运输、火车运输等)比较，有可连续作业、运输能力大、对沿途没有环境污染、物料损失小、不受气候条件的影响以及基建投资和营运成本低等一系列的优点；尤其是长距离管道浆体输送对地形适应性强，容易翻山越岭、跨越山川及河流，是位

于山区的矿山等外运的一种最实用、经济的运输方式，尤其是面对严格的环保要求，更是一种必然选择。

从上世纪 90 年代至今，我国长距离浆体输送行业取得了实质性的发展，已经建成了尖山铁精矿、大峪口磷精矿浆、昆钢大红山铁精矿、长达 102 公里的山西太钢铁精矿浆体输送管线、全长 1152 公里年输煤 1500 万吨的长江输煤管线、全长 833 公里年输煤 3000 万吨的准格尔露天煤矿选煤厂输送管线等多条运输管线。

另一方面由于我国盐化工，石油，电力（发电），食品等行业的发展，其生产过程中需要各种固体状物料的输送管道和应工艺要求的工业管道；如罗布泊钾盐、青海钾盐等大型化工企业生产所需的半固体状盐卤原料的输送、发电厂燃料煤粉的输送、食品行业中粮食的输送等，其管道输送的市场需求量非常大。

1.2 目前浆体输送管道的材质及结构类型

浆体输送管业的初期，一般情况下是用单一的金属材质如钢、不锈钢等管道，但由于金属材料耐腐蚀性差寿命短，很快行业就对管道的材质提出了更高的要求，如耐久性、耐腐蚀性、安装成本、维修成本等等。因此浆体输送管道从采用单一金属材质向采用不同的材质通过两层或多层复合，从双金属管道、以钢管为基础内衬耐磨橡胶、内衬耐磨陶瓷，再向采用超高分子量聚乙烯塑料管道，直至以特种耐磨高分子材料为引领的聚烯烃复合耐磨管道方向发展。现有主要浆体输送管道材质及断面结构见表 1。

表 1 现有主要浆体输送管道材质及断面结构一览表

序号	结构	材质	实例	特点
1	单一材质	1 钢材	钢管	1 强度高 2 不耐腐蚀 3 普通钢不耐磨 4 耐磨钢成本高 5 比重大安装不便
		2 不锈钢	不锈钢管	1 强度高 2 耐腐蚀 3 不耐磨 4 成本高 5 比重大安装不便
		3 高分子	超高分子量聚乙烯管	1 强度较低 2 耐腐蚀 3 耐磨耗 4 生产效率低、成本高 5 比重小安装方便
2	复合结构	1 双金属	钢衬不锈钢或耐磨管	1 强度高 2 耐腐蚀 3 耐磨耗 4 成本高 5 比重大安装不便
		2 钢/陶瓷	钢内衬耐磨陶瓷管	1 强度较好 2 耐腐蚀 3 耐磨耗 4 易脱层

				5 成本高
		3 钢/橡胶	钢内衬耐磨橡胶（如天然橡胶、TPU 胶）管	1 强度较好 2 耐腐蚀 3 较耐磨 4 易脱层并造成管道堵塞 5 成本高

1.3 共挤耐磨层增强塑料复合管道

本文所介绍的是一种新型的共挤复合增强耐磨管道，其特点是以聚烯烃热塑性弹性体（GXCG-1101）耐磨管道专用料²为内层与高密度聚乙烯（HDPE）共挤出成型芯管，再经钢丝（或玻纤等增强材料）缠绕机组左右缠绕形成增强层，然后通过加热系统、粘接层复合模具和外层聚乙烯复合模具后，经真空定径冷却，牵引并切割成成品管材。其生产工艺流程见图1。

这种管道既保持了 HDPE 管的易加工性和优良的物理机械性能，又具有很好的耐磨性能，特别是通过特殊的接头设计和接头生产技术，解决了在较高工作压力下管道连接的稳定性、可靠性和方便性问题，这无疑为耐磨管道行业提供了一种高性价比的新选择。

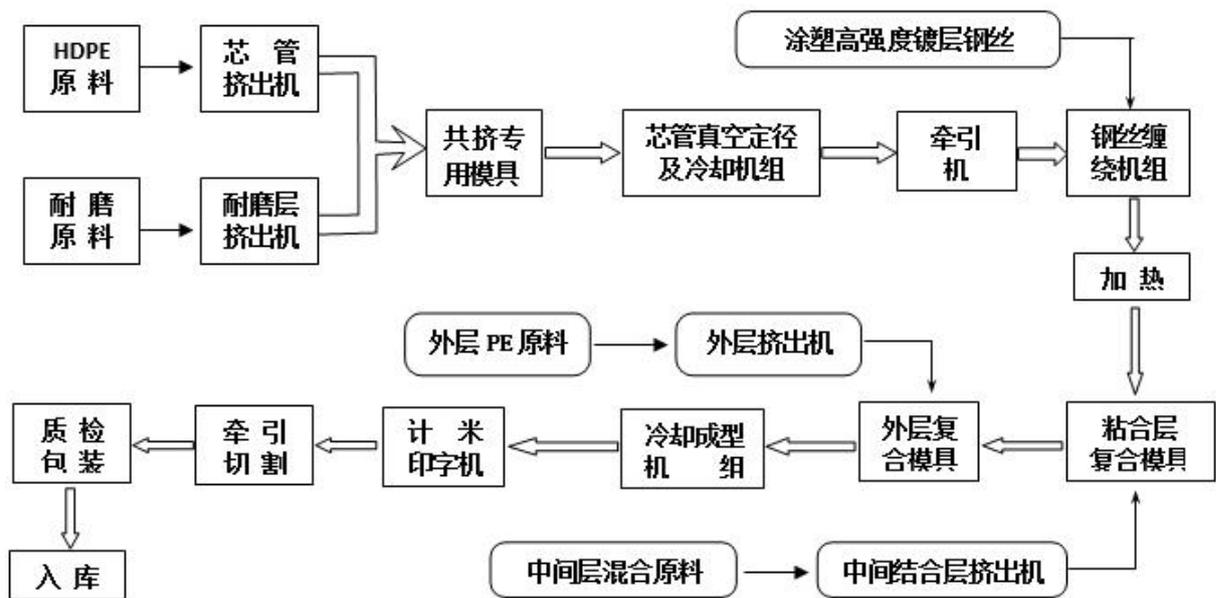


图1 共挤耐磨层增强塑料复合管材生产工艺流程

2 聚烯烃热塑性弹性体耐磨管道专用料（GXCG-1101）

热塑性弹性体，简称 TPE (Thermal Plastic Elastomer) 是指兼具橡胶弹性和塑料可加工性的一大类材料。

2.1 GXCG-1101 的性能特点

GXCG-1101 是具有乙烯、丙烯、硅氧烷三元结构的一种新型 TPE 材料。

表 2 是 GXCG-1101 的物性指标及典型值，执行标准是四川省地方标准：《聚烯烃复合耐磨管道通用技术规范》DB51/T2450—2018。管材产品团体标准《共挤耐磨层增强塑料复合管及接头》正在报评中。

表 2 GXCG-1101 物理性能

项 目	指 标	典型值
密度, g/cm ³	0.9±0.02	0.89
熔体指数 (190℃、2.16kg), g/10min	0.5±0.2	0.6
拉伸强度, MPa	≥20	22
断裂伸长率, %	≥600	1000
低温冲击脆化温度, °C	≤-40	≤-40
200℃氧化诱导期, min	≥30	≥30
砂浆磨损率, %	≤0.3	0.09

GXCG-1101 作为一种新型耐磨材料具有以下优点：

- ◆ 具有优异的抗磨耗性能，特别适用于砂浆、水泥、矿渣等输送管道。
- ◆ 加工性能好，适用于各种挤出、注塑、模压等通用塑料加工工艺。
- ◆ 与聚乙烯、聚丙烯等管道料的相容性好，挤出速度匹配，适用于双层或多层共挤。
- ◆ 具有优良的物理机械性能。
- ◆ 卫生安全，不含任何有毒有害添加剂。

2.2 GXCG-1101 与其他材料的耐磨性能比较

2.2.1 砂浆磨耗试验

砂浆磨耗试验是根据QB/T 2668 - 2004《超高分子量聚乙烯管材》附录B“砂浆磨损率试验方法”，将不同材料制成相同尺寸的样片，置于砂浆中高速旋转磨擦，历时数小时后取出，测量样片的失重比例，得出不同材料在砂浆中的磨耗率。在不同工矿条件下，不同厂家选择的试验条件略有不同，表3—表5是分别由不同厂家提供的在相同试验条件下不同材料样品的测试数据。

表 3 砂浆耐耗试验结果一

磨耗率	高密度聚乙烯 HDPE	交联聚乙烯 PEX	超高分子量聚乙烯 UHMWPE (250 万)	GXCG-1101	试验用砂
%	9.6	5.2	3.7	0.27	建筑用河砂
试验条件：砂水比 52/48(体积比)；转速 1400rpm；时间 11h。					

表 4 砂浆耐耗试验结果二

磨耗率	UHMWPE	聚氨酯 TPU	GXCG-1101	试验用砂
%	7.0	1.8	1.5	矾钛尾矿粗砂（粒径 1~5mm）
试验条件：砂水比 52/48(体积比)；转速 1400rpm；时间 8h。				

表 5 砂浆耐耗试验结果三

磨耗率	钢 (Q235)	HDPE	UHMWPE	耐磨橡胶	GXCG-1101	试验用砂
%	0.49	0.99	0.45	0.33	0.11	细砂（建筑用河砂）
%	—	3.48	1.56	0.94	0.74	粗砂(喷砂用石英砂, 3—5mm 粒径, 硬度高。棱角尖锐)
试验条件：砂水比 3/2(体积比)；转速 680rpm；时间 4h。						

从上述测试结果可以看出，GXCG-1101 抗砂浆磨损性能明显优于高密度聚乙烯 HDPE、交联聚乙烯 PEX、超高分子量聚乙烯 UHMWPE、钢材、耐磨橡胶等材料，与聚氨酯 TPU 的性能比较接近。

2.2.1 砂浆冲击磨耗试验

砂浆冲击磨耗试验的原理是：用砂浆泵将 30%固含量的河砂砂浆以一定速度及一定角度向试样表面喷射，测试经一定时间后试样的重量损失。表 6 是不同材料的砂浆冲击磨耗试验结果对照表。从表 6 中可以看出 GXCG-1101 的抗砂浆冲击磨损性能明显高于超高分子量聚乙烯 UHMWPE。

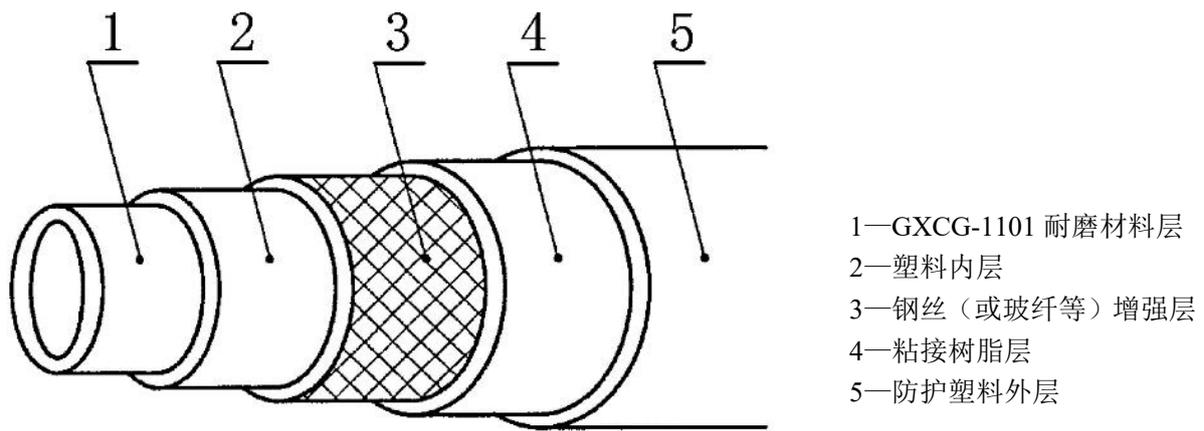
表 6 砂浆冲击磨耗试验结果

	冲击角度 (°)	冲击速度 (m/s)	冲击时间 (h)	实验结果磨损量(g)			
				UHMWPE-1	UHMWPE-2	GXCG-1101	HDPE
实验 1	86.2	21.64	1.98	0.1205	0.0598	0.0022	0.1481
实验 2	86.5	23.70	3.95	0.1364	0.1391	0.0022	0.2862
实验 3	56.2	21.64	3.95	0.1128	0.0736	0.0048	0.1650
实验 4	26.1	20.95	3.95	0.0570	0.0639	0.0044	0.1662

3 共挤耐磨层增强塑料复合管道及连接方式

3.1 共挤耐磨层增强塑料复合管材的结构

共挤耐磨层增强复合管材的结构示意图见图 2。

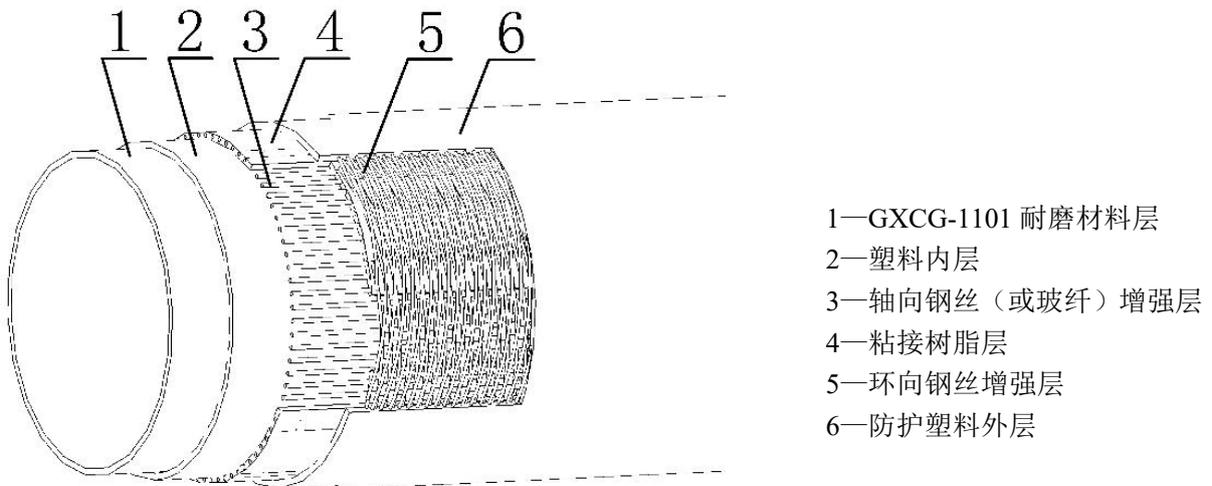


- 1—GXCG-1101 耐磨材料层
- 2—塑料内层
- 3—钢丝（或玻纤等）增强层
- 4—粘接树脂层
- 5—防护塑料外层

图2 共挤耐磨层钢丝缠绕增强塑料复合管结构示意图

共挤耐磨层钢丝缠绕增强塑料复合管是一种具有多层结构的柔性管³，由耐磨层、塑料内层、粘接树脂层、钢丝增强层、防护层构成。塑料内层为聚乙烯或聚丙烯树脂；粘接树脂层采用改性热塑性粘接树脂；增强层正反缠绕采用双层或多层高强度钢丝；防护层采用聚乙烯或聚丙烯树脂。

共挤耐磨层双向增强多层塑料复合管材的结构示意图见图 3。



- 1—GXCG-1101 耐磨材料层
- 2—塑料内层
- 3—轴向钢丝（或玻纤）增强层
- 4—粘接树脂层
- 5—环向钢丝增强层
- 6—防护塑料外层

图 3 共挤耐磨层双向增强多层塑料复合管结构示意图

共挤耐磨层双向增强多层塑料复合管是一种具有多层结构的柔性管，由耐磨层、塑料内层、轴向增强层、粘接树脂层、环向增强层、防护层构成。塑料内层为聚乙烯或聚丙烯树脂；轴向增强层采用预浸渍玻璃纤维带；粘接树脂层采用改性热塑性粘接树脂；环向增强层采用双层或多层高强度钢丝或预浸渍玻璃纤维绳；防护层采用聚乙烯或聚丙烯树脂。

3.2 共挤耐磨层增强塑料复合管材的接头和连接方式

共挤耐磨层增强塑料复合管材的接头按连接方式可分为：扣压式翻边法兰接头和扣压式翻边螺纹接头。复合管与接头连接处的内壁耐磨层连续不间断且平滑过渡，且管道内径尺寸一致，大幅提高了接头的使用可靠性。

1、扣压式翻边法兰接头

在复合管端部扣压金属件并翻边成型，采用法兰连接，接头内径与复合管内径一致，接头内壁耐磨层连续不间断且平滑过渡，其结构示意图见图 4。扣压式翻边法兰接头的端面密封方式可分为平面密封和锥面密封，平面密封扣压式翻边法兰连接的结构示意图见图 4a，锥面密封扣压式翻边法兰连接的结构示意图见图 4b。

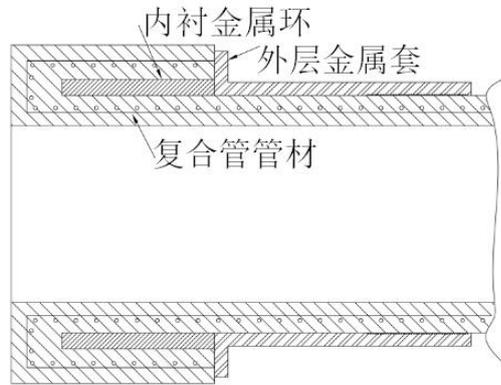


图 4 扣压式翻边法兰接头结构示意图

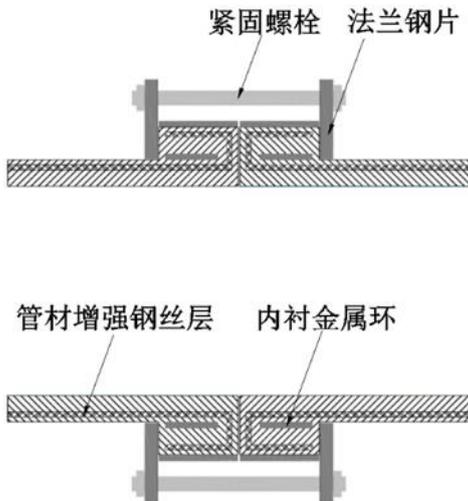


图4a平面密封扣压式翻边法兰连接

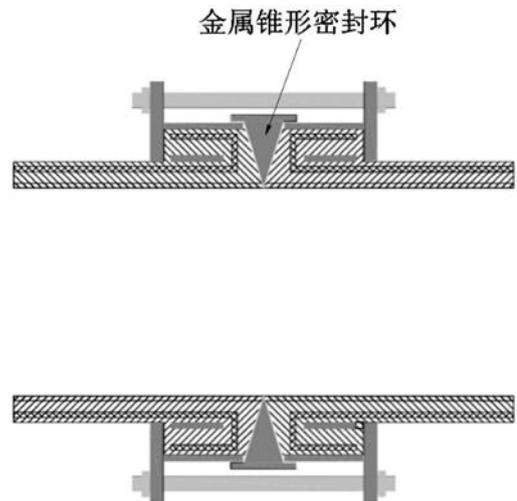


图4b 锥面密封扣压式翻边法兰连接

2、扣压式翻边螺纹接头

在复合管端部扣压金属件并翻边成型，采用螺纹连接，接头内径与复合管内径一致，接头内壁耐磨层连续不间断且平滑过渡，螺纹应满足 API SPEC 5B 15-2008（中）《套管、油管和管线管 螺纹加工、测量和检验规范》的要求。其结构示意图见图 5。

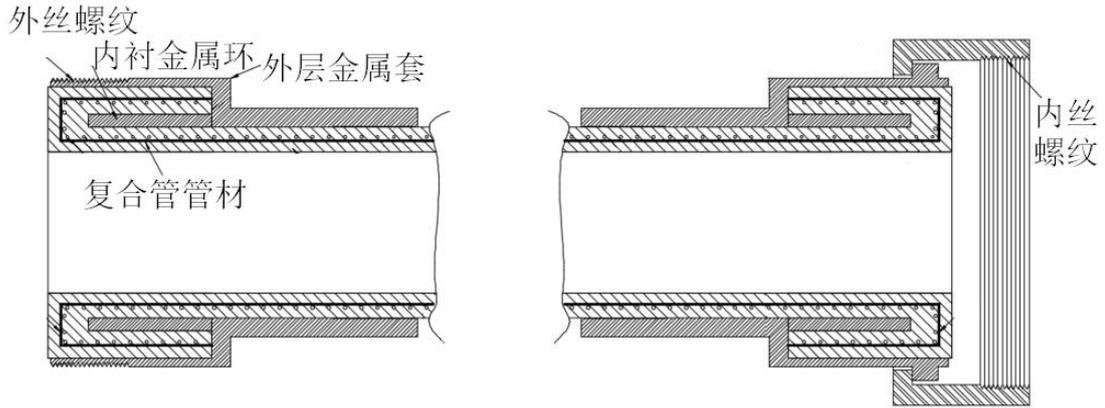


图5 扣压式翻边螺纹接头结构示意图(活接连接)

3.3 共挤耐磨层增强塑料复合管材的规格尺寸及可选用的连接方式

不同压力等级管材的规格尺寸及连接方式选用见表7。

表7 不同压力等级管材的规格尺寸及连接方式选用

公称 外径 dn mm	平均外径 De		公称 压力 PN MPa	任一点总壁厚 e		耐磨层壁厚 en		连接方式选用			
	min mm	max mm		取值范围/mm		取值范围/mm		扣压式翻边法兰		扣压式 翻边螺纹	电熔 接头
				≥	≤	≥	≤	平面密封	锥面密封		
110	110	111.5	1.6	9	10.5	2	3	√	-	√	√
			2						-		
			2.5	11	12.5		3.5		-		
			3.5						-		
			5						-		
			7	14	15.5		4		-		
			9						-		
125	125	126.6	1.6	9	10.5	2	3	√	-	√	√
			2						-		
			2.5	11	12.5		3.5		-		
			3.5						-		
			5						-		
			7	14	15.5		4		-		
			9						-		
140	140	141.7	1.6	10	11.5	2	3	√	-	√	√
			2						-		
			2.5	12	13.5		3.5		-		
			3.5						-		
			5						-		
			7	15	16.5		4		-		
			9						-		

160	160	162	1.6	11	12.5	2.5	3		-		√	
			2	13	14.5		4		-			
			2.5						-			
			3.5	16	17.5		5		-			-
			5						-			
			7						-			
			9	-	-							
200	200	202.3	1.6	12	13.5	2.5	3		-		√	
			2	14	15.5		3.5		-			
			2.5						-			
			3.5	17	18.5		4		-			-
			5						-			
			7						-			
			8						√			-

续表 7

公称 外径 dn mm	平均外径 De		公称 压力 PN MPa	任一点总壁厚 e		耐磨层壁厚 en		连接方式选用				
	min mm	max mm		取值范围/mm		取值范围/mm		扣压式翻边法兰		扣压式 翻边螺纹	电熔 接头	
	≧	≦		≧	≦	平面密封	锥面密封					
225	225	227.5	1.6	12	13.5	2.5	3	√	-	√	√	
			2	14	15.5		4		-			
			2.5						-			
			3.5	17	18.5		5		-			-
			5						√			-
			7						-			-
250	250	252.5	1	13	15	2.5	3	√	-	√	√	
			1.6	16	18		4		-			
			2						-			
			2.5	18	20		5		-			-
			3.5						√			-
			5						-			-
6	-	-										
315	315	317.7	1	15	17	3	4	√	-	√	√	
			1.6	18	20		5		-			
			2						-			
			2.5	22	24		6		-			-
			3.5						√			-
5	-	-										
355	355	357.8	1	15	17.2	3	4	√	-	√	√	

			1.6	18	20.2		5		-		-
			2						-		-
			3	22	24.2		6		√		-
			4						-		-
400	400	403	1	17	19.2	3	4	√	-		√
			1.6	20	22.2				5		-
			2	22	24.2		6		√		-
			3						-		-
			3.5						-		-
450	450	453.2	1	18	20.5	3.5	4	√	-		√
			1.6	21	23.5				5		-
			2	23	25.5		6		√		-
			2.5						-		-
			3						-		-

续表 7

公称 外径 dn mm	平均外径 De		公称 压力 PN MPa	任一点总壁厚 e		耐磨层壁厚 en		连接方式选用			
	min mm	max mm		取值范围/mm		取值范围/mm		扣压式翻边法兰		扣压式 翻边螺纹	电熔 接头
				≥	≤	≥	≤	平面密封	锥面密封		
500	500	503.2	1	19	21.8	3.5	4	√	-	√	√
			1.6	22	24.8				5		-
			2	26	28.8		6		√		√
			2.5						-		-
			3						-		-
560	560	563.2	1	24	27	3.5	5	√	-	√	√
			1.6	27	30				6		√
			2				-				-
			2.5				-				-
630	630	633.2	1	26	29	3.5	5	√	-	√	√
			1.6	29	32				6		√
			2				-				-
			2.5				-				-

根据复合管的不同工作环境宜选用的连接方式如下：

——当复合管长期工作温度不高于45℃时，可选用扣压式翻边法兰或扣压式翻边螺纹连接；

——当复合管长期工作压力不高于2.0MPa，且直径小于dn250mm，或长期工作压力不高于1.6MPa，且直径小于dn560mm，可选用电熔接头连接。但此时，应采取相应技术措施，满足复合管与管件连接处通径一致且耐磨层连续不间断要求。

——当复合管长期工作温度高于45℃时，宜选用扣压式翻边螺纹连接。

3.4 共挤耐磨层增强塑料复合管与其他耐磨管道的比较优势

本文所介绍的共挤耐磨层增强塑料复合管道与现有其他耐磨管道，如钢衬橡胶管、超高分子量聚乙烯管、无耐磨层钢丝增强聚乙烯复合管等相比，具有非常高的性价比优势，具体表现在以下几个方面：

(1) 耐磨性好：

共挤耐磨改性聚烯烃弹性体作为耐磨层，其耐磨材料性能远优于目前公认的超高 UHMW PE 耐磨塑料管道，其耐砂浆磨损率比超高聚乙烯低十多倍。

(2) 复合连接强：

采用与聚乙烯内层聚乙烯塑料层共挤工艺，不脱层，解决复合结构耐磨管常见的脱层难题。

(4) 抗腐蚀性好

双面防腐，能耐酸、耐碱、耐化学腐蚀，还可抗电化学腐蚀。

(5) 耐候性好：

埋地用时，耐候性与聚乙烯管相当，在一 40℃ 的低温下，不会有物性变化，不会发生冻裂。一年四季都可使用，夏季使用不结露，冬季使用外壁不需保温(导热系数为钢的 1 / 200)。

(6) 可塑性好：

耐磨材料保持 HDPE 同样的可塑性，这样有利于端头连接密封。

(7) 可热熔对接：

耐磨材料保持 HDPE 可热熔对接的特性，因此带耐磨层的复合管道仍可采用热熔对接的方式在现场进行常规的热熔对接。

(8) 柔性好

作为长距离越野管道可以利用管道自身的柔性而不需要另外制作弯头。

(9) 水力特性好

管内壁当量粗糙度为 0.0015—0.015ram 之间，而钢管的当量粗糙度一般情况下为 0.19nHn(一般三年后，钢管由于腐蚀，结垢，其水力特性变差，内壁当量粗糙度按 0.6mm 计算)故管内壁光滑不易结垢，输送阻力小，节能效果好，输送能力可比钢管等传统管道提高 20—30%。

(10) 耐压强度高：

采用钢丝或玻璃纤维增强，增强材料相比塑料强度高约 80 倍，可生产高压力耐磨管。单纯的 HDPE 管和 UHMWPE 管适用于低压力等级的应用范围，通常在 1.5MPa 以下，钢衬塑管则可达到较高的压力等级要求，而矿浆输送管道通常压力等级都要求在 2.0MPa 以上，用单纯的塑料管很难满足使用压力要求。但钢衬塑管的连接和施工在山区成为一个大问题，因为矿山地势起伏，稍有角度就需要专门订制管件甚至建支撑墩来保证连接的可靠性。

(11) 安装方便：

因为质量轻、接头少，铺设安装方便、快捷，对地下运动和端载荷有足够的抵抗能力，安装时不必进行费用昂贵的锚定；对管沟底部要求低，土方工程量少，节省安装费用。钢管及钢衬塑管道通常被称为“刚性管道”，塑料管及钢丝网增强复合管则被称为“柔性管道”，刚性管适合于架空和跨越沟壑，柔性管则适合于依地势起伏弯曲的长距离输送。用共挤耐磨层钢丝增强塑料复合管不仅解决了柔性管道承压能力不足的问题，同时又避免了钢衬塑管道连接不便的问题，大大减少了对管件的需求，提高了施工安装效率，降低了管道工程成本，因此受到国内外广大客户的一致推崇。图 6 是某矿山共挤耐磨层钢丝增强塑料复合管和钢衬胶耐磨管铺设的管路现场对比图片。

(12) 高压力耐磨弯头：耐磨弯头可根据工况需要，生产任意角度弯头，采用 5 至 15 度小角度转角弯头，其耐磨性能大幅提高。耐磨弯头的内壁耐磨层连续不间断且平滑过渡，且弯头内径尺寸与直管内径一致，提高了弯头的使用寿命。图 7 所示为某铜钴矿使用的耐磨弯头，公称直径是 315mm，压力等级为 5MPa 和某铅锌矿使用的充填管弯头，公称直径是 140mm，压力等级为 7.0MPa。



图 6 某矿山共挤耐磨层钢丝增强塑料复合管和钢衬胶耐磨管铺设的管路现场照片



图 7 某铜钴矿耐磨弯头，dn315mm 5MPa，某铅锌矿充填管弯头，dn140mm 7.0MPa。

4 管道抗磨损性能的评价方法和抗磨损机理分析

4.1 塑料管材耐磨损性试验方法

随着各种复合管道的研发和应用，如何科学和有效地评价成品管道的抗磨损性能，成为行业必然面临的问题。砂浆磨耗试验，见 QB/T 2668 - 2004《超高分子量聚乙烯管材》附录 B，可以评价材料的抗磨损性能，但对成品管材，特别是复合结构的管材却无能为力。

2017 年发布的轻工行业标准 QB/T5101-2017《塑料管材耐磨损性试验方法》提供了一个评价成品管材耐磨损性能的简便方法。其原理是：将不同粒径的砂石按一定比例混配，装入 1 米长的试验管段中，加入一定量的水后将管端密封，夹持在摇摆机上，摇摆机按一定角度和速度往复摆动，使试验管段内的砂石来回磨损管壁。每经过 10 万次左右的磨损时更换一次砂石，称量管段的重量损失即为管子的磨损量。摇摆机的工作原理见图 5。

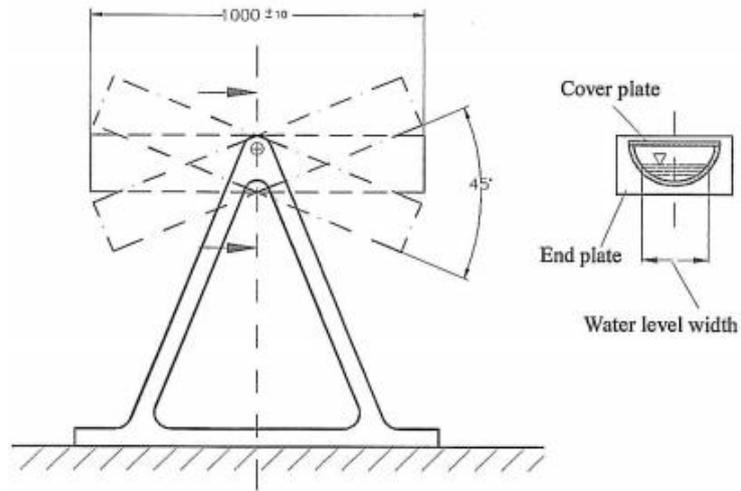


图8 摇摆机的工作原理图

这种评价方法可以模拟沉降流动情况下，砂浆对管道内壁下半部分的磨损情况，但还无法模拟在实际工矿条件下，特别是在不同压力、不同流速情况下管道的磨损情况。

4.2 浆体环管磨蚀试验

浆体环管磨蚀试验法的试验条件基本上模拟了矿浆管道输送的实际情况，试验系统是一个完整的环形管路，包括矿浆槽、矿浆泵、变频调速器、试验管段、流量计、调节阀门、浓度与速度标定装置、管道冷却系统等，图6是环管法管壁磨蚀试验系统示意图，图7是试验现场照片。

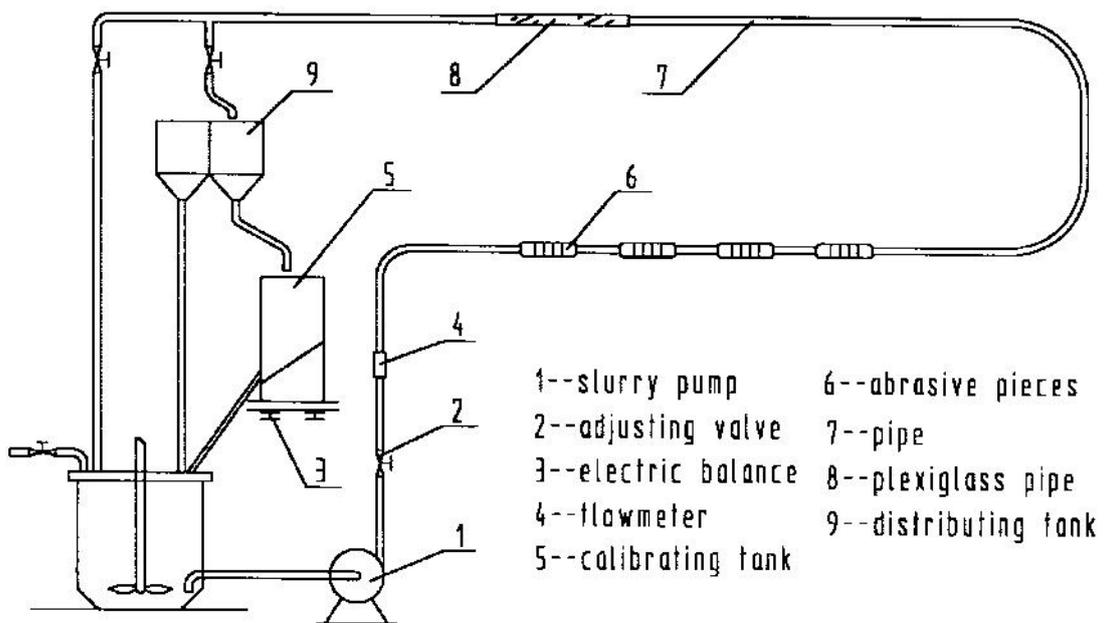


图9 浆体环管磨蚀试验系统示意图



图 10 浆体环管磨蚀试验现场照片

近三年来，在行业相关单位的通力配合下，用此方法对不同材质的管道，在不同的输送介质和输送条件下的磨蚀情况，进行了多次试验，获得了一些宝贵的试验数据结果，为耐磨管道抗磨损机理的研究，及相关管道系统抗磨损评价方法标准的制订，奠定了基础。

1、浆体环管磨蚀试验的试验条件

现已完成的浆体环管磨蚀试验的试验条件见表 8

表 8 浆体环管磨蚀试验的试验条件

	第一轮	第二轮	第三轮	备注
矿样品种	铁精矿	粗粒级铁精矿	铅锌矿	
浆体质量浓度，%	60	65	61	每单次测试时间到后，重新更换浆体，并测试复合管的磨蚀量
浆体输送流速，米/秒	1.8~2.0	2.0~2.5	2.0~2.5	
浆体温度控制，℃	≤60	≤50	≤50	
管道内径，mm	50	50	50	
单次测试时间，小时	60	75	60	
总测试时间，小时	600	450	360	
试验共用时间，天	66	39	48	

2、不同材质管材样品的浆体环管磨蚀试验结果

不同材质管材样品分别在三轮环管磨蚀试验条件下的测试结果见图 8.1~图 8.3。

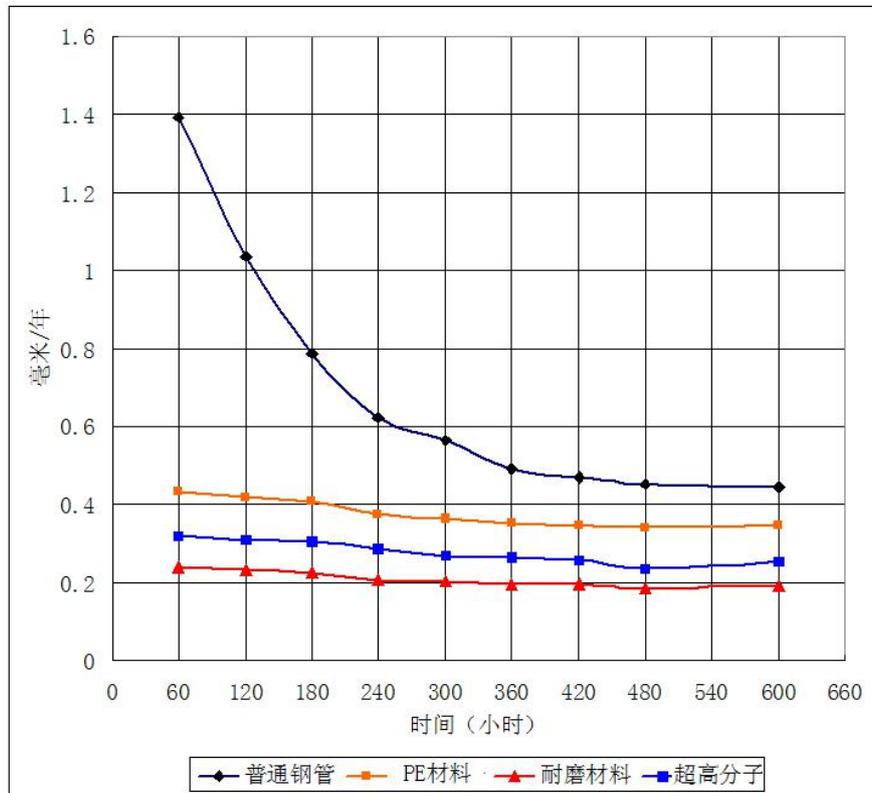


图 8.1 四种不同管材环管磨蚀试验结果

(其中“耐磨材料”为内层共挤 GXCG-1101 的复合管)

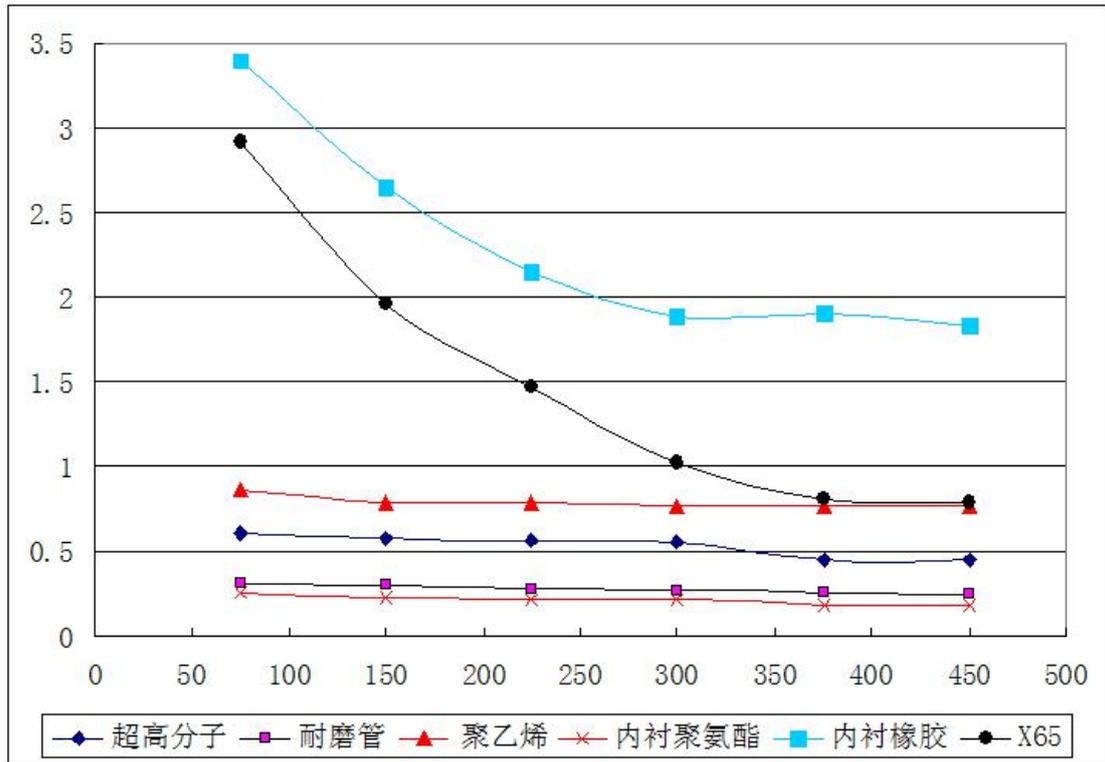


图 8.2 六种不同管材环管磨蚀试验结果

(其中“耐磨管”为内层共挤 GXCG-1101 的复合管)

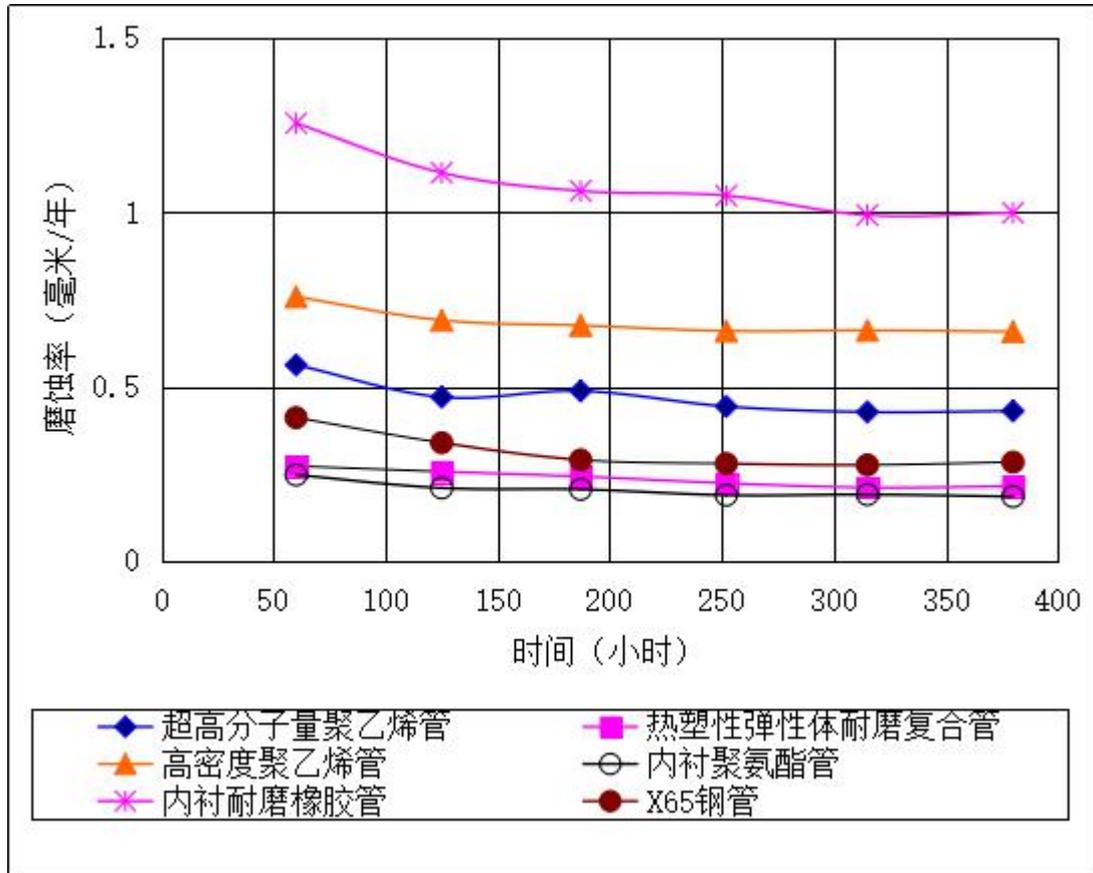


图 8.3 六种不同管材环管磨蚀试验的结果

从上述试验结果可以看出，内层共挤 GXCG-1101 的复合耐磨管的磨蚀率与钢衬聚氨酯管接近，远低于其他材质（包括超高分子量聚乙烯、高密度聚乙烯、钢管及内衬耐磨橡胶）的管道。

4.3 管道抗磨蚀机理分析

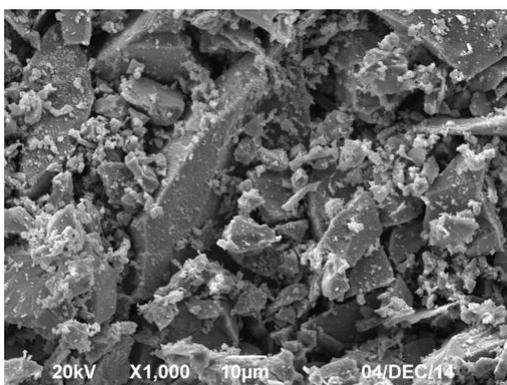
在长距离高浓度浆体管道输送中，管道内表面的磨蚀（或磨损）是由于运动着的固体颗粒对管壁的动力作用而引起的。根据管道内浆体流动情况，磨蚀可以分为下列两种主要类型：变形磨蚀和切削磨蚀。

变形磨蚀是固体颗粒的法向碰击引起的，浆体流中的颗粒都具有一定的动能，不停地碰击管壁，使管道内壁承受交变碰撞力，虽然交变碰撞力产生的交变应力低于屈服应力，长期在该应力的作用下将导致管壁表面的变形与破坏。切削磨蚀是固体颗粒斜向碰撞的结果，浆体流中某些颗粒具有的动能将以切削方式磨蚀管壁的表面。由此可见，影响管壁磨蚀的主要因素如下：

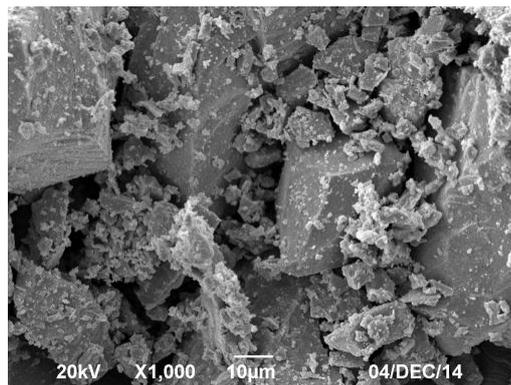
- （1）固体物料特征：粒径和粒级组成、颗粒形状、硬度、密度；
- （2）流动情况、流态、浓度、流速；
- （3）管道材料类型。

4.3.1 固体物料特征及浆体流动状况对磨蚀率的影响

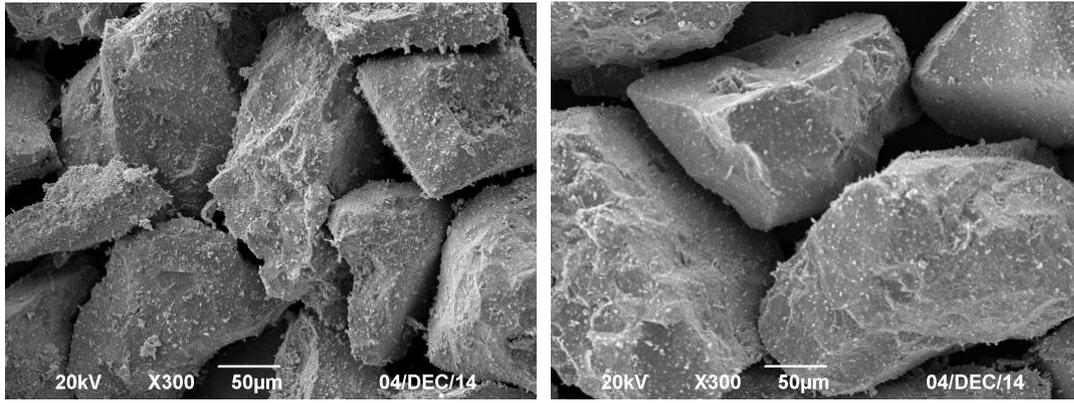
浆体中固体颗粒的粒度越粗、材质越硬、密度越大、形状越不规则，特别是带有尖角的固体颗粒对管道的磨蚀率就越大，图 11 是本试验所用铁精矿的扫描电镜图。



(-200 目)



(150~200 目)



(100~150 目)

(60~100 目)

图 12 铁精矿固体颗粒扫描电镜图

浆体管道的设计流速须大于浆体的沉降流速，以保持固体颗粒呈悬浮状于浆体中，从而减少对管壁的磨蚀。若管道中浆体流速低于其沉降流速，则必导致固体物沉淀，不仅会降低管道的浆体输送效率（甚至导致堵塞），而且会导致管道下沿的磨蚀率急剧上升。浆体的沉降流速又与固体颗粒的物料特征、管道系统尺寸、浆体浓度、输送压力、坡度等密切相关。另一方面，在浆体相同的情况下，管道的磨蚀率随管道压力和流速的增加而上升，若管道系统的设计压力过高，对系统部件，如泵、阀、管材和连接件等的要求大幅提升，势必增加管道系统的制造成本和运行成本。因此浆体管道系统的设计必须建立在严谨的试验研究基础上，而上述试验结果无疑为管道系统设计提供了基础的数据依据。

4.3.2 不同材质管道的耐磨性能比较

1、钢管因耐腐蚀性能差而导致管道磨蚀率高，而且还容易发生管壁结垢现象。API 6L X65 是目前国内外所用的优质耐磨钢管材料，与 A3 钢、45#钢和 16Mn 钢相比，API 6L X65 钢管的磨蚀率已大大减小，但仍明显大于 GXCG-1101 复合耐磨管和钢衬聚氨酯管。

2、普通聚乙烯（HDPE）管与钢管相比其磨蚀率并无优势，但由于 HDPE 对水及酸碱盐的抗腐蚀性能远优于钢材，所以 HDPE 管表现出比钢管更好的耐磨性能。而且三轮试验证明除钢管外，其他几种材质的管道对输送铁精矿和铅锌矿都未发现结垢现象。

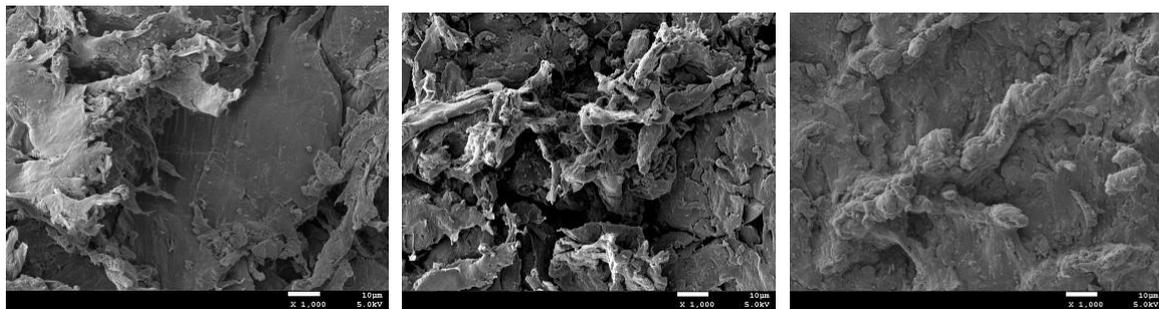
3、超高分子量聚乙烯（UHMWPE）是一种具有自润滑性能的耐磨塑料，但由于其抗冲击性能不及橡胶和弹性体材料，所以在对抗冲击磨损要求较高的砂浆管道输送相关试验中，虽然超高分子量聚乙烯管的耐磨性能优于 HDPE 管和钢管，但不及内衬聚氨酯（TPU）管和 GXCG-1101 复合耐磨管道。UHMWPE 更适用于在以滑动磨擦为主要受力方式的应用场所。

4、与塑料（HDPE、UHMWPE）相比，弹性体材料（TPU 和 GXCG-1101）的耐冲击磨损的能力更强，所以表现出更好的耐磨性能。考虑到在干燥方式相同的情况下，TPU 吸水率较高造成的其测量结果偏小的

原因，因此可以认为 GXCG-1101 耐磨复合管和钢衬 TPU 管的磨蚀率基本相同。

5、本试验两轮的试验结果都显示钢衬耐磨橡胶管的磨蚀率大于钢管，这与材料的砂浆磨损率试验结果不符（见表 5）。浆体环管输送试验结果显示钢衬耐磨橡胶管的磨蚀率最大，可能是与内衬橡胶层脱层有关。

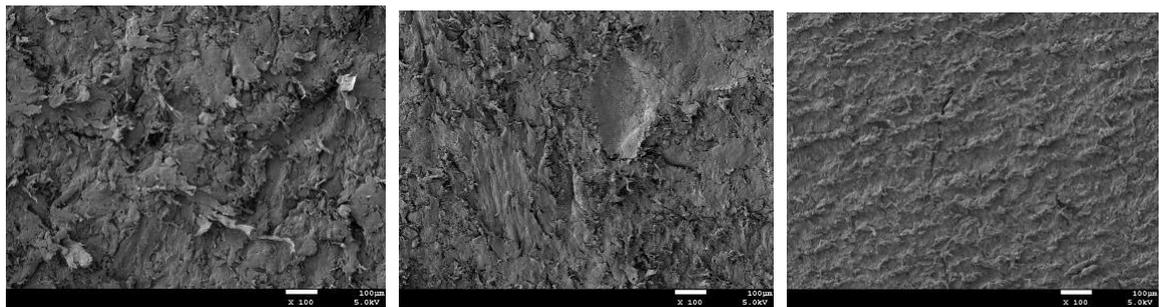
6、经过 380 小时的磨蚀试验后，两种塑料管：HDPE 管和 UHMWPE 管试件均发生了一定程度的变形、内壁出现鼓包和刮痕；而两种弹性体管：钢内衬 TPU 管和 GXCG-1101 耐磨管道内表面均光滑细腻，无刮痕和变形情况，表现出很好的表面光洁度。这是因为 TPU 和 GXCG-1101 这两种弹性体材料均同时兼具有高强度和高韧性的特点，在浆体输送过程中，一方面通过弹性形变化解固体颗粒的冲击能量，另一方面，当尖锐颗粒划伤材料表面后，弹性体能有效地阻止裂纹的延伸。图 10 显示的是经磨蚀后，HDPE、UHMWPE 和 GXCG-1101 样片的表面（磨蚀面）的微观形态。从图 10 可以看出，UHMWPE 与 HDPE 样片经磨蚀后的表面形态无本质区别，都是呈块状脱落，这是因为他们的抗冲击性能和抗裂纹延伸性能不及弹性体所致。GXCG-1101 样片的磨蚀表面的刮痕都较浅，而且即使有划伤的裂纹，也因其高抗裂纹延伸性能而阻止了材料被撕裂脱落，同时由于其弹性回复性能而使磨蚀面看上去越磨越光。



(HDPE 1000 倍)

(UHMWPE 1000 倍)

(GXCG-1101 1000 倍)



(HDPE 100 倍)

(UHMWPE 100 倍)

(GXCG-1101 100 倍)

图 13 三种不同材料样片磨蚀面的扫描电镜图

7、TPU 是一种耐磨性能优良的弹性体材料，但因分子极性较强，吸水率较高，抗水解性能不太好，所以在实际应用中对工艺要求较高，产品质量控制难度较大，成本较高，而且随着使用时间的增加，其材料的吸湿特性会使 TPU 与钢管的粘接强度逐渐下降，最终导致脱层。所以无论国际国内绝大部分的钢衬 TPU 管线都不是因磨蚀损坏的，而是因脱层导致管道堵塞而失效。与 TPU 相比，GXCG-1101 是聚烯烃类弹性体材料，是非极性材料，与 HDPE、PP 化学性质相近，更适合应用于水介质的输送管道，而且 GXCG-1101 可方便地使用普通挤出机与 HDPE、PP 等管道料实现熔融状态下的共挤复合，不仅解决了脱层问题，而且生产工艺简单，质量保证可靠。所以与 TPU 相比，GXCG-1101 具有更高的性价比和使用寿命优势。

5 结论

1、聚烯烃热塑性弹性体耐磨管道专用料（GXCG-1101）是一种兼具优良耐磨性能和加工性能的新型管道材料。

2、以 GXCG-1101 为内层与高密度聚乙烯（HDPE）共挤出成型芯管，再经钢丝（或玻纤等增强材料）缠绕增强复合，制成的共挤耐磨层增强塑料复合管道既保持了 HDPE 管的易加工性和优良的物理机械性能，又具有很好的耐磨性能，同时因其生产效率高、安装施工方便快捷等特点而具有较高的性价比。

3、扣压式翻边接头及法兰、螺纹连接方式，可保证复合耐磨管道在较高工作压力下的连接稳定性和可靠性这种，大大提升了复合耐磨管道在长距离矿浆输送领域的市场空间。

4、浆体环管磨蚀试验方法的试验条件基本上可以模拟矿浆管道输送的实际情况，对耐磨管道系统的磨蚀机理研究和管道系统抗磨损性能的评价具有现实意义。

6 致谢

感谢以下单位及科研人员友情提供了他们的试验方法及结果：

湖南大学浆体管道输送试验研究室

长沙矿冶研究院

四川金石东方新材料设备股份有限公司

成都贝根管道有限责任公司

华创天元实业发展有限责任公司

7 参考文献

- 1、新型聚烯烃耐磨材料及增强复合管介绍 陈绍江,陈晓梅 第 17 届全国塑料管道生产和应用技术推广交流会论文集, 2015
- 2、高耐磨改性聚烯烃管道材料及其制备方法 CN103013022B 四川鑫成新材料科技有限公司
- 3、钢丝增强耐磨塑料管道 姬玉川,蒯一希,陈绍江,吴精华 第 14 届全国塑料管道生产和应用技术推广交流会论文集, 2012