

玻璃钢管道与容器

李卓球 主编
岳红军



科学出版社

玻璃钢管道与容器

李卓球 岳红军 主编

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了玻璃钢管道与容器的结构分析、计算理论和设计方法。全书共十一章。第一至四章介绍玻璃钢的原材料的选择、基本性能、层合板壳基本计算理论及结构连接计算与设计；第五至八章阐述玻璃钢管道与容器的结构分析与设计方法；第九至十章叙述玻璃钢管道与容器的制造工艺和安装方法；第十一章介绍玻璃钢管道与容器的基本性能的测试方法。

本书可供化工、机械、冶金、石油、建材、食品等部门的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

玻璃钢管道与容器

李卓球 岳红军 主编

责任编辑 董安齐 杨家福 何舒民

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 9 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1990 年 9 月第一次印刷 印张:21 5/8

平:1—2 000 插页:平 2 精 4
印数: 精:1—2 700 字数:574 000

ISBN 7-03-001899-0/TB·61 (平)

ISBN 7-03-001900-8/TB·62 (精)

定价: 压膜平装 16.50 元
纸面精装 18.30 元

前 言

有关统计资料表明,我国每年的工业设备与器材因腐蚀而造成的经济损失达 100 亿元以上。美国、联邦德国、苏联的这类经济损失,亦曾分别达其年国民生产总值的 4.9%,3% 和 2%。在被腐蚀的设备与器材中,金属管道与容器所占的比例是很大的。国内外的实践表明,推广玻璃钢管道与容器,在技术及经济上有一系列优点,因而发展甚快。发达国家玻璃钢管道与容器的年产量占其年玻璃钢总产量的 10—15%。1989 年日本玻璃钢容器的总产量已达 4.9 万吨,占当年玻璃钢总产量的 11.6%。

由于采用先进的纤维缠绕工艺与设备,我国目前已能生产直径 4m 以下的系列玻璃钢管道与直径 12m 以下的系列玻璃钢圆柱形容器。玻璃钢管道与容器的结构分析、设计及成型工艺等问题已日益成为有关科研、设计及生产厂的重要研究课题。鉴于此,武汉工业大学力学研究所与河北冀县中意玻璃钢厂在共同从事玻璃钢管道与容器的设计与研究的基础上,广泛地参阅了近年来国内外的科研资料、设计规范、标准及有关论著,编写了本书。

书中系统地阐述了地上与地下铺设的玻璃钢管道、卧式贮罐、立式贮罐、运输贮罐的结构分析、强度、刚度和稳定计算理论及设计方法;介绍了产品的纤维缠绕法制造工艺和产品的安装方法;叙述了原材料、玻璃钢的基本性能;还介绍了层合板壳基本计算理论及连接等有关基础知识。为实用方便,最后一章选编了有关产品设计、检验的部分试验方法。

本书尤其注重介绍近年来国内外有关玻璃钢管道与容器的先进的设计方法与国内外科研成果,力求阐明基本概念和理论,避免繁复的数学推导,指出有待进一步研究的课题。

参加本书编写的有李卓球、岳红军、晏石林、王继辉、赵连明、方世妹。邓京兰同志对个别章节提出了有益的意见。

本书承沈大荣教授、李驯高级工程师、吴代华教授、刘方龙副教授、陈博高级工程师审阅，并得到南京玻璃纤维研究设计院、天津合成材料厂、天津玻璃纤维总厂及武汉工业大学工程力学系的大力支持与帮助，在此一并致谢。

限于编者水平，本书缺点与不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

目 录

第一章 原材料.....	1
§1.1 概述.....	1
§1.2 玻璃纤维的分类与性能.....	2
§1.3 玻璃纤维的结构和化学组成.....	5
§1.4 玻璃纤维的物理性能和化学性能.....	6
§1.5 玻璃纤维制品与成型工艺.....	13
§1.6 玻璃纤维的表面处理.....	21
§1.7 不饱和聚酯树脂.....	32
§1.8 环氧树脂.....	45
§1.9 酚醛树脂.....	70
§1.10 基体材料的选择.....	73
参考文献.....	76
第二章 玻璃钢基本性能.....	77
§2.1 概述.....	77
§2.2 基本刚度特性.....	80
§2.3 基本强度特性.....	86
§2.4 偏轴弹性特性.....	91
§2.5 在平面应力下的强度.....	98
§2.6 动态力学特性.....	104
§2.7 应力集中特性.....	115
§2.8 耐候性.....	121
参考文献.....	128
第三章 层合板壳基本计算理论.....	130
§3.1 概述.....	130
§3.2 单层板的应力应变关系.....	131
§3.3 层合板的刚度特性.....	134
§3.4 层合板的弯曲、振动与稳定.....	138

§3.5	层合薄壳的基本关系·····	145
§3.6	轴对称载荷下层合旋转壳的无矩理论·····	154
§3.7	层合圆柱壳的有矩理论·····	167
§3.8	旋转壳体的边缘弯曲解·····	176
§3.9	层合薄壳的屈曲计算·····	190
§3.10	纤维缠绕结构的网络分析·····	197
§3.11	纤维缠绕压力容器封头段的网络分析·····	206
	参考文献·····	217
第四章	玻璃钢结构连接计算与设计·····	218
§4.1	概述·····	218
§4.2	胶接连接计算分析·····	220
§4.3	胶接接头设计·····	247
§4.4	机械连接计算分析·····	267
§4.5	机械连接接头设计·····	281
	参考文献·····	286
第五章	玻璃钢管道结构分析·····	287
§5.1	概述·····	287
§5.2	地下管载荷与土压分析·····	290
§5.3	地下玻璃钢管的弹性稳定性·····	300
§5.4	地下玻璃钢管的内力分析·····	319
§5.5	地下玻璃钢管的刚度分析·····	339
§5.6	地上玻璃钢管道的壁厚与跨度计算·····	347
§5.7	地上玻璃钢管的热应力分析·····	355
§5.8	补偿器的设计计算·····	366
	参考文献·····	375
第六章	玻璃钢卧式贮罐设计·····	377
§6.1	概述·····	377
§6.2	筒体与封头·····	382
§6.3	结构应力分析——无矩理论·····	395
§6.4	筒体受力分析——梁理论·····	401
§6.5	鞍式支座设计·····	435
§6.6	玻璃钢地下卧式贮罐设计·····	445
	参考文献·····	454

第七章 玻璃钢立式贮罐设计.....	456
§7.1 内力分析.....	456
§7.2 罐壁设计.....	462
§7.3 罐底设计.....	483
§7.4 罐顶设计.....	487
§7.5 支座设计.....	494
§7.6 玻璃钢贮罐联接和开孔补强.....	497
§7.7 玻璃钢贮罐的构造处理.....	503
参考文献.....	510
第八章 玻璃钢运输贮罐设计.....	511
§8.1 概述.....	511
§8.2 作用在罐体上的载荷.....	516
§8.3 罐体应力计算.....	522
§8.4 罐体设计.....	543
参考文献.....	566
第九章 玻璃钢纤维缠绕工艺.....	567
§9.1 概述.....	567
§9.2 纤维缠绕玻璃钢管、罐结构及原材料的选择.....	569
§9.3 缠绕规律.....	574
§9.4 缠绕工艺流程.....	591
参考文献.....	599
第十章 玻璃钢管道和容器的安装.....	600
§10.1 玻璃钢管道的安装概述.....	600
§10.2 地上管道的架设.....	600
§10.3 管道的埋设.....	604
§10.4 玻璃钢管道的连接.....	607
§10.5 管道系统的压力试验.....	614
§10.6 贮罐的安装.....	615
参考文献.....	619
第十一章 试验方法.....	620
§11.1 试验方法总则.....	620
§11.2 拉伸试验.....	622

§11.3	压缩试验	630
§11.4	弯曲试验	633
§11.5	玻璃钢层间的剪切强度	638
§11.6	冲压式剪切强度试验	640
§11.7	简支梁式冲击韧性试验	644
§11.8	弯曲蠕变试验	647
§11.9	玻璃钢比重试验	650
§11.10	玻璃钢树脂含量试验	651
§11.11	巴氏硬度试验	654
§11.12	耐化学药品性能试验	656
§11.13	纤维缠绕玻璃钢环形试样拉伸试验	661
§11.14	玻璃钢管轴向拉伸试验	663
§11.15	纤维缠绕玻璃钢环形试样剪切试验	667
§11.16	玻璃钢管轴向压缩性能试验	669
§11.17	玻璃钢管短时水压失效压力试验	672
§11.18	玻璃钢管平行板外载性能试验	675
	参考文献	679

附 录

一、玻璃钢管道与容器常用标准	680
二、玻璃钢管道与容器照片图	

第一章 原 材 料

§ 1.1 概 述

玻璃钢的原材料分为增强材料和基体材料两类。

玻璃钢的增强材料由玻璃纤维及其织物组成，是玻璃钢主要的承载组分材料，对玻璃钢强度和刚度有着直接的影响。

玻璃钢的基体材料是指经过物理和化学变化而将增强材料包覆并牢固粘结的组分材料。玻璃钢基体材料由合成树脂和辅助材料组成，其中合成树脂是主要组分。基体材料在玻璃钢中的作用是在纤维间传递载荷，并使载荷均衡。基体材料的性能，如耐腐蚀性、耐热性等，直接影响玻璃钢的性能。玻璃钢工艺性则决定其所选择的成型工艺。

合成树脂是一类由人工合成的分子量比较大的聚合物，通常称之为高分子化合物，也称之为聚合物。合成树脂以其受热后所表现的性能不同，可分为热固性树脂和热塑性树脂两大类。

热固性树脂是指在热或固化剂(包括引发体系)的作用下，能发生交联而变成不溶、不熔状态的固体的一类树脂，如环氧树脂、酚醛树脂、不饱和聚酯树脂、呋喃树脂等。这类树脂的固化物受热后不能软化，温度过高则分解破坏。

热塑性树脂是指具有线型或支链型结构的一类树脂，如聚酰胺树脂、聚氯乙烯树脂、聚苯乙烯树脂、聚碳酸酯等。这类树脂可被反复加热软化(或熔化)和冷却凝固。

尽管近几年来，以热塑性树脂为基体的热塑性玻璃钢发展很快，但目前玻璃钢仍是以热固性树脂基体为主，其中最常用的热固性树脂是聚酯、环氧树脂和酚醛树脂等。

本章主要介绍玻璃纤维的分类、性能、表面处理，以及常用的热固性树脂及辅助剂。

§ 1.2 玻璃纤维的分类与性能

玻璃纤维是以玻璃为原料，在高温熔融状态下拉丝而成的，其直径一般为 $0.5\text{—}30\mu\text{m}$ 。玻璃纤维具有许多优良性能，是一种优质的增强材料。

玻璃纤维自从 30 年代工业化生产以来，其产量、品种规格不断增加，应用范围及生产工艺不断发展。我国的玻璃纤维工业诞生于 1950 年，当时的玻璃纤维生产厂家只能生产做绝缘材料用的初级纤维。1958 年以后，我国玻璃纤维工业得到迅速发展，到 1987 年已有大小玻璃纤维生产厂家 200 多个，玻璃纤维产量达 5 万吨，其中无碱玻璃纤维占 20%，中碱玻璃纤维占 80%。它们的直径多数为 $6\text{—}8\mu\text{m}$ 。

玻璃纤维的分类方法很多，一般可以从玻璃原料成分、单丝直径、纤维性能、外观特性等方面分类。

1. 按玻璃原料成分分类

按玻璃原料成分分类的方法，主要用于连续玻璃纤维。它是根据玻璃纤维中含碱量的不同来加以区分，所谓含碱量是指玻璃纤维中碱金属氧化物的百分含量。

(1) 无碱玻璃纤维。

含碱量 $<1\%$ (或 $<0.5\%$)。无碱玻璃纤维一般称为 E 玻璃。国际上 E 玻璃的产量占整个玻璃纤维产量的 90%，而国内无碱玻璃纤维用量较小，仅占 20%。无碱玻璃纤维具有优异的电绝缘性、耐热性、耐候性和机械强度。

(2) 中碱玻璃纤维。

含碱量为 2—6%。目前我国主要使用中碱玻璃纤维，其用量占玻璃纤维总使用量的 80%。国外有种 C 玻璃，是耐化学腐蚀的

玻璃纤维，它与国内常用的中碱 5# 玻璃纤维的主要差别是引入了 5% 的 B_2O_3 ，而 Na_2O 含量相应降低。它的化学稳定性比中碱 5# 玻璃纤维好，但由于引入了 B_2O_3 ，目前我国难于推广采用。一般来说，中碱玻璃纤维的化学稳定性较好。

(3) 高碱玻璃纤维。

含碱量为 11.5—12.5% (或更高)。高碱玻璃纤维，不耐水，但耐酸。

2. 按玻璃纤维性能分类

(1) 高强玻璃纤维。

主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO 。高强玻璃纤维的强度比普通玻璃纤维的高，如我国高强 2# 玻璃纤维的单丝强度为 410kgf/mm^2 ¹⁾，比无碱的高 30% 以上；弹性模量为 $8.5 \times 10^3\text{kgf/mm}^2$ ，比无碱的高 16% (比重为 2.54)。

(2) 高模量玻璃纤维。

主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO ，并加入了能显著提高模量的氧化物。

玻璃纤维抗拉强度很高，但是它的杨氏模量却比较低，例如 E 玻璃纤维的弹性模量为 $7.3 \times 10^3\text{kgf/mm}^2$ ，只是钢的 1/3。高模量玻璃纤维的弹性模量比普通玻璃纤维高，如我国的 M_2 纤维的弹性模量为 $9.5 \times 10^3\text{kgf/mm}^2$ ，比无碱玻璃纤维高约 30%。 M_2 纤维的强度也较高，同时比重也较大，为 2.77。

(3) 普通玻璃纤维。

这包括有碱和无碱玻璃纤维两类。

(4) 耐碱玻璃纤维。

它由在玻璃中添加耐碱的组分 (如 ZrO_2) 而制成。普通玻璃纤维一般都不耐碱。用耐碱玻璃纤维制得的玻璃纤维增强水泥制品 (GRC) 具有成本低、可靠而适用的抗拉强度，重量几乎比钢筋混

1) $1\text{kgf} = 9.868\text{N}$ 。

凝土轻一个数量级,以及不燃和耐生物腐蚀等优点,因此它的应用愈来愈广泛。

(5) 其它性能的玻璃纤维。

除上述几种特性的玻璃纤维外,还有耐辐射玻璃纤维,在高温强辐照条件下可用于制作电绝缘材料,半导体玻璃纤维,可用于制作高电压大型电机中的一种防电晕材料,等等。

3. 按单丝直径分类

按单丝直径,玻璃纤维可分为:

(1) 粗纤维。

纤维直径为 $30\mu\text{m}$ 。

(2) 初级纤维。

纤维直径为 $20\mu\text{m}$ 。

(3) 中级纤维。

纤维直径为 $10-20\mu\text{m}$ 。

(4) 高级纤维。

纤维直径为 $2-10\mu\text{m}$ 。

(5) 超细纤维。

纤维直径为 $<4\mu\text{m}$ 。

4. 按纤维外观分类

按纤维外观,玻璃纤维可分为:

(1) 连续纤维。

(2) 短切纤维。

(3) 空心玻璃纤维。

(4) 玻璃粉及磨细纤维等。

§ 1.3 玻璃纤维的结构和化学组成

任何物质的物理和化学性能都与其化学组成及结构有密切关系。成分相同的玻璃纤维与块状玻璃在外观上迥然不同，二者的拉伸强度相差 20—50 倍。这是什么原因呢？很多学者力图从玻璃纤维的结构找出答案，但是由于缺乏研究无定形物质结构的直接方法，加之尚未找到有效的描述三维空间立体结构的平面方法，因此有关玻璃纤维的结构问题目前尚无定论。

1. 玻璃纤维的结构

关于玻璃纤维的结构，目前存在着以下两种不同的观点。

一种观点认为，玻璃纤维的结构与块状玻璃的结构大同小异，没有原则性区别。但由于玻璃纤维是在高速冷却条件下形成的，因而其微观结构更接近于高温熔体的结构，呈现出更疏松、易变形的特征。

另一种观点认为玻璃纤维的结构与块状玻璃结构相比，存在着重大差别。当玻璃拉制成纤维后，玻璃发生了深刻的结构变化。

2. 玻璃的结构

上述有关玻璃纤维结构的观点，均与玻璃的结构有关。关于玻璃的结构，有若干种理论和假说，虽然每一种理论和假说都有实验基础，但目前尚缺乏一种能解释玻璃各种性质及各种行为的统一的学说。

目前关于玻璃结构的理论主要有结晶化学理论及化合价理论。关于玻璃结构的假说，目前主要有网络结构假说及微晶结构假说等。

网络结构假说认为，玻璃是由二氧化硅的四面体、铝氧三面体或硼氧三面体相互连成的不规则三维网络，网络间的空隙中填有

Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等阳离子。二氧化硅四面体的三维网状结构是决定玻璃性能的基础, 填充的 Na^+ , Ca^{2+} 等阳离子称为网络改性物。

微晶结构假说认为, 玻璃由硅酸或二氧化硅的微晶子组成, 在微晶子之间被过冷的硅酸溶液所填充。

3. 玻璃纤维的化学组成

玻璃纤维的化学组成主要是 SiO_2 , B_2O_3 , CaO 和 Al_2O_3 等, 它们对玻璃纤维的性能和生产工艺性起决定性作用。国内外常用的玻璃纤维成分见表 1.3.1。

Na_2O 和 K_2O 等碱性氧化物为助熔氧化物, 它可以降低玻璃的熔化温度和粘度, 排除玻璃熔液中的气泡, 它们可以通过破坏玻璃骨架, 使玻璃结构疏松, 从而达到助熔的目的。因此 Na_2O 和 K_2O 的含量越高, 玻璃纤维的强度、电绝缘性能和化学稳定性等越低。在玻璃组分中加入 CaO , Al_2O_3 等, 在一定条件下可构成玻璃网络的一部分, 并改善玻璃的某些性质和工艺性能, 例如以 CaO 取代 SiO_2 , 可降低拉丝温度, 加入 Al_2O_3 可提高耐水性。因此, 正确选择玻璃的成分, 不仅可以制备物理化学性能合乎要求的玻璃及玻璃纤维, 同时还可以适当简化生产工艺过程, 降低生产成本。

§ 1.4 玻璃纤维的物理性能和化学性能

1.4.1 玻璃纤维的物理性能

国外常用的玻璃纤维成分, 如表 1.3.1 所示。

1. 外观和比重

一般天然或人造的纤维, 其表面都有较深的皱纹。而玻璃纤维是表面光滑的圆柱体, 其横断面几乎都是完整的圆形。宏观看来, 玻璃纤维表面光滑, 纤维之间的抱合力非常小, 不利于和树脂

表 1.3.1 国内外常用的玻璃纤维成分

玻璃纤维 种 类	玻 璃 纤 维 成 分						(%)		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ZrO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
无碱 1#	54.1±0.7	15.0±0.5	16.5±0.5	4.5±0.5		9.0±0.5	<0.5		
无碱 2#	54.5±0.7	13.8±0.5	16.2±0.5	4.0±0.5		9.0±0.5	<2.0		
中碱 5#	67.5±0.7	6.6±0.5	9.5±0.5	4.2±0.5			11.5±0.5	<0.5	
中碱 B17	66.8	4.7	8.5	4.2		3	12		
E ¹⁾	53.5	16.3	17.3	4.4		8	0—3		
C ²⁾	65.0	4	14	3		6		8	
S ³⁾	64.3	25.0	10.3					0.3	
G-20 ⁴⁾	71.0	1.0			16.0			2.49	
A ⁵⁾	72.0	0.6	10	2.5				14.2	

- 1) E——无碱玻璃纤维;
2) C——耐酸玻璃纤维;
3) S——高强玻璃纤维;
4) G-20——抗碱玻璃纤维;
5) A——普通有碱玻璃纤维.

粘结。但由于玻璃纤维是圆柱状,因此彼此相靠近时,能堆砌得较为密实,这对于提高玻璃钢制品中的玻璃含量是有利的。

玻璃钢使用的玻璃纤维直径,一般为 $5-20\mu\text{m}$ 。其比重较有机纤维大得多,但比一般的金属比重要低,约与铝的比重相当,所以在航空工业上用玻璃钢代替铝或钛合金已成为可能。此外,无碱玻璃纤维的比重一般比有碱玻璃纤维的要大。

2. 玻璃纤维的拉伸强度

作为玻璃钢用的玻璃纤维:其拉伸强度是一个很重要的物理指标。块状玻璃的强度不高;很容易断裂,而其拉成玻璃纤维之后,不仅变得具有柔曲性,而且强度也大大提高。

玻璃纤维的拉伸强度比成分相同的块状玻璃的高几十倍。例如无碱玻璃的拉伸强度只有 $4-10\text{kgf}/\text{mm}^2$,而用它拉出的玻璃纤维强度可达 $200\text{kgf}/\text{mm}^2$,强度提高 $20-25$ 倍。玻璃纤维的拉伸强度甚至高于高合金钢。

(1) 玻璃纤维强度高的原因。

许多学者就玻璃纤维强度高的原因提出了各种不同的假说,如微裂纹假说,分子取向假说及冻结高温结构假说等。

1) 微裂纹假说。微裂纹假说认为,玻璃的理论强度取决于分子或原子间的引力,其理论强度很高,可达 $200-1200\text{kgf}/\text{mm}^2$ 。但其实测强度很低,这是因为在玻璃或玻璃纤维中存在着数量不等、尺寸不同的微裂纹,因而大大降低了强度。微裂纹分布在玻璃或玻璃纤维的整个体积内,但以表面的微裂纹危害最大。由于微裂纹的存在,玻璃在外力作用下受力不均,在危害最大的微裂纹处,产生应力集中,从而使强度下降。

玻璃纤维比块状玻璃的强度高很多,这是因为玻璃纤维在高温成型时减少了玻璃溶液的不均一性,使微裂纹产生的机会减少。此外,玻璃纤维的断面较小,并随着表面积的减少,微裂纹存在的机率也减少,从而使纤维强度增高。有人更明确地提出,直径小的玻璃纤维强度比直径粗的玻璃纤维强度高的原因,是由于表面微