

曾宪桃 著

煤矿立井 玻璃钢复合材料罐道

44

冶金工业出版社

煤 矿 立 井 玻璃钢复合材料罐道

曾宪桃 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2002

内 容 提 要

本书反映了作者近十年研究用纤维增强塑料尤其是用玻璃钢部分取代传统钢材为煤矿立井罐道防腐的技术成果。书中主要介绍了玻璃钢复合材料罐道的耐磨性能、主要力学性能、成型工艺、设计计算理论及其在不同使用工况下合理的截面参数;同时,还简要介绍了纤维增强复合材料的力学性质,并对玻璃钢在煤矿中的应用情况和前景进行了阐述。

本书可供冶金矿山、化工矿山及煤矿矿山从事矿山井筒装备防腐蚀技术的工程技术人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿立井玻璃钢复合材料罐道/曾宪桃著. —北京:冶金工业出版社,2002.8

ISBN 7-5024-3066-0

I. 煤… II. 曾… III. 玻璃钢—非金属复合材料—应用—煤矿—罐道 IV. TD535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 053566 号



出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100090)
责任编辑 王秋芬 美术编辑 王耀忠 责任校对 丁一迅 责任印制 李玉山
北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002年8月第1版,2002年8月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5.625印张; 150千字; 173页; 1-2000册

16.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

矿井的生产能力,主要取决于井筒提升的通过能力。井筒装备又是保证矿井提升系统能高速、安全运行的主要部分。近十几年来,矿井开采深度以及提升容器、提升运行速度不断加大,装备工作条件进一步恶化,井筒装备处在高温、高湿、高风速和酸、碱腐蚀严重的环境里,腐蚀严重。立井玻璃钢复合材料罐道即是针对井筒装备的腐蚀而研究开发的一种新型罐道,它采用一种经改性后的防腐、耐磨、高强复合材料玻璃钢,来部分地取代传统的钢材作罐道的防腐材料。其截面形式采用工程上常用的全封闭型钢组合截面,用型钢作钢芯,根据罐道所受水平力大小,按承载要求对钢芯尺寸进行选型;钢芯不预留防腐“牺牲层”,而直接在构件外表面严密除锈后,用模压一次成型的方式敷上适当厚度的玻璃钢。这样,在玻璃钢没有被完全磨损或腐蚀掉之前,可以保证罐道的强度,满足矿井使用要求。玻璃钢复合材料罐道于1994年获国家实用新型专利,1995年2月在邯郸矿务局郭二庄矿马项副井投入工业性使用,并进行了为期6个月的工业性试验,目前已在郭二庄矿、徐州

张小楼矿等 12 个井筒中安装,总长达万米以上,达到了耐腐、耐磨的目的,并具有质量轻、抗静电、阻燃、外观平整光滑等优点,为井筒装备防腐技术开辟了一条新途径,属国内外首创,具有广阔的工程应用前景和明显的经济效益。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中不妥之处恳请读者不吝赐教。

作 者

2002 年 3 月



第 1 章 绪论



第 2 章 立井玻璃钢复合材料罐道

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 国内外研究动态	2
第三节 连续纤维复合材料的力学性质	4
 第二章 立井玻璃钢复合材料罐道	
主要性能	56
第一节 概述	56
第二节 玻璃钢复合材料罐道	
耐磨损性能	58
第三节 玻璃钢复合材料罐道力学性能 ..	74
 第三章 玻璃钢复合材料罐道受力	
应变测试	91
第一节 玻璃钢复合材料罐道试制工艺 ..	91
第二节 应变测试	93
第三节 分析与计算	101
 第四章 玻璃钢复合材料罐道合理	
截面参数	104
第一节 立井罐道合理截面形式分析	104
第二节 合理截面参数数学	
模型的建立	105
第三节 理论分析及合理截面参数	122

第五章 玻璃钢复合材料罐道应用实例	127
第一节 概况.....	127
第二节 水平力测试的原理与方法.....	130
第三节 水平力的实测工作.....	133
第四节 水平力实测结果及分析.....	135
第五节 马项副井井筒装备结构计算.....	140
第六节 结论及建议.....	145
第六章 玻璃钢在煤矿中的应用及其前景	147
第一节 概述.....	147
第二节 玻璃钢在煤矿中的应用及其前景.....	150
附录 1 玻璃钢复合材料罐道产品质量标准(试行)	157
附录 2 玻璃钢复合材料罐道使用说明书	162
附录 3 邹城市玻璃钢厂企业标准	165
参考文献	171
后记	173

第一章 绪 论

第一章 绪 论

第一节 概 述

矿井的生产能力,主要取决于井筒的提升通过能力。井筒装备又是保证矿井提升系统能高速、安全运行的重要组成部分。近十几年来,由于矿井开采深度不断加大,井筒提升容器和提升速度亦随之增加,井筒内淋水加大,构件设备工作条件进一步恶化,金属构件处于高温、高湿、高风速、酸碱侵蚀的环境里,锈蚀严重,根据煤炭系统管理部门对全国煤矿矿井腐蚀状况调查的统计,井下金属构件的腐蚀速度一般为 $0.3 \sim 1.2\text{mm/a}$,为大气环境和海洋环境中腐蚀速度的 $2 \sim 3$ 倍。

过去,煤矿井筒装备由于防护措施不力,造成装备寿命短、维修更换频繁。装备的使用寿命一般在 $10 \sim 15\text{a}$,短的仅为 $7 \sim 8\text{a}$,更换一次井筒装备一般需要停产 $50 \sim 60\text{d}$,并需耗费大量的钢材和资金,少出大量煤炭。据统计,煤炭系统每年由于腐蚀而造成的直接经济损失约每吨煤 1 元钱。如果再加上停产维修引起的间接损失,以及全国冶金、化工等矿山的腐蚀损失在内,经济损失更加惊人。同时,由于井筒装备腐蚀还存在着维修困难和难以预料的安全隐患,因此,井筒装备防腐技术的开发是全国煤炭、冶金、化工等矿山亟待解决的重要课题。由玻璃钢与钢材组成的复合材料罐道即是针对矿山井筒装备的防腐蚀而研制开发的。该罐道一改过去的涂料等防腐手段,用经过改性的玻璃钢作钢罐道外表面防腐、耐磨层。试验研究表明,这一技术是可行的,技术成果投入生产应用后,取得了预期的社会效益和经济效益。

第二节 国内外研究动态

20 世纪 80 年代初,原煤炭部对全国 140 个生产矿井井筒装备的腐蚀情况的调查表明:每年被腐蚀的钢材占井筒总装备钢材量的 7.8% 左右,按当时全国平均井筒深度计算,全国煤炭系统每年仅腐蚀耗损的钢材就达 3.5 万 t,随着井筒深度的增加,钢材的腐蚀损失就会更大,因此,对煤矿井筒装备的防腐技术研究就显得更加重要。目前,国内外井筒装备的防腐仍以涂料防腐为主。国外于 20 世纪 70 年代开始注重矿井专用防腐涂料的研究,如有机富锌底漆和环氧过氯乙烯涂料、氯化橡胶等防护面漆,应用效果较好。此外,对井筒腐蚀特别强的区段,采用“双重”防腐系统,即在热浸镀锌结构上敷以环氧树脂涂料,都收到了比较好的效果。

国内井筒装备防腐普遍采用防腐涂料,1988 年 2 月由煤炭部组织制定的《煤矿井筒装备防腐设计、施工及验收规范》中推荐氯化丁橡胶和环氧沥青系列防腐涂料为煤矿专用涂料,近十年来,在井筒金属防腐方面取得了一定的成绩,但由于受施工工艺和环境条件的限制,井筒装备的防腐问题仍未很好地解决。国内外普遍采用的涂料防腐技术尚存在防腐质量较难保证、使用年限短、喷涂防腐工艺复杂、成本高等缺点。因此,积极开展防腐耐磨的高强复合材料来部分地取代传统钢材作为井筒装备的防腐材料,是较好地解决井筒装备防腐问题的有效途径。

玻璃钢是玻璃纤维增强塑料的别称,是一种以合成树脂为黏结剂,玻璃纤维为增强材料制成的新型复合材料。玻璃钢用做煤矿井筒的防腐结构材料其主要优点是:

(1) 轻质高强。玻璃钢的相对质量密度只有 1.5~2.0,仅为普通钢材的五分之一到四分之一,比金属铝还要轻约三分之一,而机械强度却能达到或超过钢材的水平。如某些环氧和不饱和聚酯玻璃钢,其拉伸和弯曲强度均能达到 400 MPa 以上,按比强度计算,已达到或超过某些特殊合金的水平,故玻璃钢作为有效的防腐

设备的主要结构材料,具有运输、安装和维修方面的优点。

(2) 优良的耐化学腐蚀性。玻璃钢与普通金属的电化学腐蚀机理不同,它不导电,在电解质溶液里不会有离子溶解出来,因而是一种优良的电绝缘材料,用玻璃钢制造的设备不存在电化学腐蚀和杂散电流腐蚀,具有良好的耐酸、碱、盐等化学介质浸蚀的能力和抗腐蚀性能,可在空气湿度大、溶液酸碱度高以及化学腐蚀和电化学腐蚀严重的环境中应用。

(3) 良好的耐热性能。玻璃钢是一种优良的绝缘材料,其导热系数一般为 $1.254 \sim 1.672 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,只有金属的千分之一到百分之一,可用做良好的隔热材料和瞬态耐高温材料。

(4) 可设计性好。玻璃钢成型工艺简单,固化后残余应力小,具有各种各样的黏合剂材料和配方;在玻璃钢中加入一定量的添加剂,可以使其达到良好的阻燃性能和抗静电性能。

(5) 抗疲劳性能好。一般金属的疲劳强度为拉伸强度的 $40\% \sim 50\%$,而某些玻璃钢复合材料可高达 $70\% \sim 80\%$ 。玻璃钢复合材料的疲劳断裂是从基体开始,逐步扩展到纤维和基体的界面上,没有突发性变化,构件不会在短时间内丧失承载能力。

玻璃钢的主要缺点是:

(1) 弹性模量低。即抗变形能力小,其弹性模量只比木材大 2 倍左右,比一般钢材小 $10 \sim 15$ 倍,其层间剪切强度只有拉伸强度的十分之一。

(2) 存在老化现象。其老化方式有大气暴晒、水浸泡、库存和化学介质浸蚀等几种方式。对煤矿井筒这样潮湿的环境来说,水浸泡是影响玻璃钢老化性能的主要因素。吸水后,玻璃钢的力学性能指标都有所下降,某些玻璃钢三年后尚能保持干态强度的 $50\% \sim 80\%$,三年后其力学性能基本趋于稳定。

从上述玻璃钢的优缺点看,其优点是主要的,缺点是可以克服的,且玻璃钢极易与金属复合成复合材料。因此,采用玻璃钢作为井筒装备的防腐材料,技术上是可行的。普通玻璃钢的主要技术指标与钢材比较如表 1-1 所示。

表 1-1 钢、玻璃钢主要力学技术指示

指 标	材 料	Q235 钢	玻 璃 钢
	数 量		
抗 拉 强 度		$>370\text{N/mm}^2$	205N/mm^2
抗 压 强 度			359N/mm^2
抗 弯 强 度			254N/mm^2
弹 性 模 量		$2.1 \times 10^5\text{N/mm}^2$	$1.4 \times 10^4\text{N/mm}^2$
氧 指 数			≥ 33

复合材料玻璃钢井筒装备的研究,首先始于井筒梯子间安全栅栏网,尔后相继成功地研制出立井梯子间平台板、梯子大小梁、支座和挂钩,实现了立井梯子间装备构件的玻璃钢系列化,并于1988年在山东腾南矿区田陈矿中央风井进行了工业性试验。

到目前为止,复合材料梯子间在全国各矿区已装备了30多个井筒,使用情况良好,深受设计、施工部门的欢迎。它具有质量轻、劳动强度低、施工工期短、耐腐蚀、使用寿命长、成型制作简便、节约钢材等优点。根据初步调查,井筒使用梯子间复合材料系列化产品,获得了良好的经济效益和社会效益。随着科学技术的发展,对玻璃钢复合材料性能的不断研究和完善,玻璃钢在煤矿井筒装备乃至井下工作面的其他构件上,将会得到更加广泛的应用。

第三节 连续纤维复合材料的力学性质

现代科学技术的迅猛发展,对材料的要求日益广泛而严格。复合材料的出现,使人们在认识和使用材料方面有了更大的自由。人们不仅可以选择材料,而且可以为特定的工程目的设计和成型某些材料。

复合材料是两种或两种以上的材料组成的多相材料,它具有优于各组分材料的综合性能。正因为复合材料是多相材料,各组

分材料虽然彼此作用成为一个整体,但是在交界面处可以将各组分材料物理地区分出来。所以,复合材料不仅是材料,而且更确切地说是结构。

复合材料通常以增强材料的几何特征来分类。譬如分为:纤维复合材料、粒子复合材料、薄片复合材料等。现阶段最常见的是纤维复合材料。

玻璃钢就是纤维复合材料的一种。它是以玻璃纤维为增强材料,以合成树脂为基体,复合而成的一种新型工程材料。迄今,虽然玻璃钢才只有五十多年的历史,但是由于它具有许多优异的性能,因而获得了广泛应用。

目前,对玻璃钢力学性能及其结构计算理论的研究尚不成熟,有待于进一步探讨。玻璃钢与惯用的金属材料相比较有明显的优点,同时也有明显的缺点。在进行玻璃钢结构设计时,应当遵循“用其所长,避其所短”的原则。

玻璃钢的主要力学性能大致可以归纳如下。

1. 强度和弹性性能的可设计性

玻璃钢是由玻璃纤维或其织物和合成树脂组成的。玻璃纤维的强度和弹性模量比树脂的强度和弹性模量大几十倍。人们可以通过改变玻璃纤维的含量和分布方向,在一定范围内获得不同强度和弹性性能的玻璃钢,用以承受不同的荷载。譬如,对于荷载情况清楚的单向受力结构,可以考虑单向铺层方式;一般为安全计而采用4:1或7:1的铺层方式。这种单向铺层的方式可以在纤维方向获得特别高的强度,用以承受单向应力,而在垂直于纤维的方向没有过分多余的强度储备。又如,对于双向受力的结构,可以考虑双向铺层和多向铺层的方式;选用适当的纤维用量或改变各单层的铺层方向,以满足强度要求。再如,对于面内均匀受力或受力情况不很清楚的结构,可以考虑多向铺层方式,选择相应的铺层方向使材料成为面内各向同性。

就结构设计而言,上述特性所表现出来的优越性是最重要的。正确地运用强度和弹性性能的可设计性,必然导致理想的结构设

计,而理想的结构体现了安全和经济的统一。

2. 各向异性性能

所谓各向异性,是指材料在不同方向上具有不同的力学性能。玻璃钢即属于各向异性材料。它可增加独立的弹性系数。

如上所述,为了获得所希望的、有一定方向性的玻璃钢,通常是将若干个单层(称为单层板)层合起来,构成一个多层(称为层合板)结构。每一个单层在其面内具有两个弹性主方向,即纤维方向 L (纵向)和垂直于纤维方向 T (横向)。在面内,独立的弹性系数有四个:纵向弹性模量 E_L 、横向弹性模量 E_T 、纵向泊松比 ν_{LT} (或横向泊松比 ν_{TL})、纵横向剪切弹性模量 G_{LT} 。显然,这种物理方面的复杂性增加了结构计算的复杂性。这种复杂性尤其表现在非弹性主方向上,当坐标不与弹性主方向重合时,正应力会引起剪应变,剪应力会引起线应变,这种现象称为交叉弹性。这是各向同性材料所没有的。

玻璃钢的各向异性性能,要求在校核强度时做得更仔细。就每一单层而言,通常有五个基本强度:纵向抗拉强度 F_{Lt} 、纵向抗压强度 F_{Lc} 、横向抗拉强度 F_{Tt} 、横向抗压强度 F_{Tc} 、纵横向抗剪强度 F_{LT} 。无论按何种强度理论进行强度校核,都必须尽量弄清荷载情况和受力状态。对于单向玻璃钢,横向抗拉强度往往不及纵向抗拉强度的 5%。因此,很可能在主要荷载作用下不发生破坏,却在次要荷载作用下发生破坏。

3. 非均质性

玻璃钢是非均质材料。若着眼于比纤维直径大不多的范围(即亚微观范围),玻璃钢显然是非均质体;若着眼于比纤维直径大得多的范围(即宏观范围),又可以将每个单层视为均质体。对于层合结构,各层之间即使在宏观范围内也是非均质的。这种不同层之间的宏观非均质性,给玻璃钢结构的分析带来了很大的复杂性。层合结构的弹性特性和强度特性必须以每个单层的弹性特性和强度特性为基础,这是与均质体的根本不同之处。

上述非均质性造成层合结构的一个特有的现象:耦合效应。

所谓耦合效应,是在小变形情况下,面内内力也会引起弯曲变形,弯曲内力也会引起面内变形。譬如,一块受简单拉伸的玻璃钢层合薄板,可能出现翘曲现象。为了避免或者利用耦合现象,构成了层合结构分析的一个重要课题。

4. 低弹性模量

玻璃钢的密度较小(为 $1.5 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$),是普通钢材的 $1/4$ 左右,其强度却较高,一般可达到 400 MPa 以上。玻璃钢的比强度(强度与密度之比)可达 $2 \times 10^6 \text{ cm}$ 以上,比普通钢材的比强度高很多,是一种轻质高强的材料。但是,玻璃钢的弹性模量是比较低的。譬如,纤维含量高达 80% 的单向玻璃钢,其纵向弹性模量约为 $5 \times 10^4 \text{ MPa}$,仅是普通钢材的 25% ,为铝材的 70% 。而双向玻璃钢和多向玻璃钢的弹性模量就更低。

玻璃钢的比弹性(弹性模量与密度之比)与钢材和木材的比弹性相接近,为 $(2 \sim 2.7) \times 10^8 \text{ cm}$ 。若结构受刚度控制,则必须采取相应措施,以提高玻璃钢结构的刚度,如加肋或采用夹层结构等。换言之,以改变截面的尺寸和形状来弥补低弹性模量这一弱点。

玻璃钢的剪切弹性模量更低。金属的剪切弹性模量为抗压弹性模量的 40% 左右;而单向玻璃钢的剪切弹性模量只有纵向弹性模量的 10% 左右,双向玻璃钢为 20% 。这样低的剪切弹性模量,对于主要承受剪切的结构来说是很大的弱点。

5. 低剪切强度和低层间抗拉强度

玻璃钢的剪切强度是比较低的:双向玻璃钢的抗剪强度为其抗拉强度的 10% 左右;单向玻璃钢就更低,甚至到 5% 以下。层合玻璃钢的层间没有玻璃纤维增强,因此层间剪切强度和层间抗拉强度低于树脂浇注体的剪切强度和抗拉强度。上述弱点给玻璃钢的连接造成了困难,往往由于连接问题处理不当造成连接部位的局部破坏,而导致整个结构的破坏。在结构设计时,应当尽量避免使用玻璃钢的低剪切强度和低层间抗拉强度,必要时可以采取构造措施。

6. 脆性

玻璃钢的伸长率一般小于 5% ,属于脆性材料。对于塑性材

料(如钢材),结构中某些高应力区的材料进入塑性变形,引起应力重分配而使应力得到缓和。但是,对于玻璃钢,由于没有塑性变形阶段,结构中高应力区的部分纤维会先行断裂,它们承担的荷载卸给未断裂的纤维,于是可能发生纤维的连锁断裂现象而导致破坏。对于玻璃钢结构的高应力区,应预先考虑加强措施。等强度结构设计是玻璃钢结构设计的重要课题之一。

以上概略地叙述了玻璃钢的主要力学性能。应当说明,玻璃钢尚有其他一些性能,如疲劳、蠕变、冲击等,也与惯用的金属材料有很多不同之处,而且影响玻璃钢性能的因素也十分繁多,这里不一一详述。

玻璃钢结构设计的主要特点是材料设计和结构设计必须同时进行。这是因为,材料(这里所说的材料不是指原材料,而是作为结构材料的玻璃钢)和结构物都是在同一个工艺过程中形成,这与惯用的金属材料的结构设计有很大的不同。在设计金属结构时,设计人员只是按设计要求合理地选择定型化的标准材料;在设计玻璃钢结构时,设计人员不仅要注意到结构方面的问题,同时还必须注意到如何发挥材料的最佳性能的问题。

工程中通常把玻璃钢视为弹性体。所以,用弹性力学来分析玻璃钢的力学性质,建立玻璃钢结构的计算理论是适宜的。

无论在理论方面还是在实验方面,弹性力学分析方法都已经相当完善,而且已为工程实践所证实。但是,对于很多重要的、有实际意义的问题,即使是对各向同性体,企图寻求弹性力学的精确解也会遇到数学上的巨大困难。迄今,只对个别的简单问题可以获得精确解。因此,人们不得不借助于近似理论。近似理论是针对具体问题作一些补充假设,使问题得到简化,但是其结果必须由实践所证实。材料力学属于弹性力学近似理论的范畴。玻璃钢是一种复杂的、非均质的各向异性材料,这种物理上固有的复杂性必然导致更加巨大的数学上的困难。因此,对于玻璃钢结构,简化的方法就格外受到设计人员的欢迎。只要这种简化理论能够反映问题的主要方面,并且为实践所证实,无论其简化模型简单到什么程

度,都不失为一个有效的设计方法。纤维缠绕内压力容器设计的“网格分析法”就是一个明显的例子,但是应当说明,不是所有的问题都可以简化到十分简单的程度,这是由复合材料结构的内在复杂性所决定的。

对复合材料及其结构的研究是一门新兴学科。目前,将复合材料用于结构主要还是靠试验结果;在玻璃钢结构设计方法上,基本上是等代设计:即在结构物形状、荷载、使用条件都不变的条件下,用玻璃钢代替其他材料,沿用惯用材料的设计方法,稍考虑一些玻璃钢的特点;有时只作等强度或等刚度的替换。完全从复合材料的各向异性和非均质性概念来研究复合材料特性和建立结构计算理论的工作已经十分活跃,正在形成变形固体力学的一个分支——复合材料力学。可以期望,随着理论的进一步完善、资料和经验的积累、电子计算技术的广泛采用,复合材料结构的计算理论和设计方法将不断得到发展。

纤维复合材料主要由纤维和基体两部分材料组成。它们在复合材料中起着不同的作用。纤维(如玻璃纤维、碳纤维和有机纤维等)与基体(如塑料、橡胶、陶瓷、金属等)相比较,具有高得多的强度和弹性模量,它起着增强作用,承受主要荷载;基体主要起着传递纤维间的剪力和防止纤维屈曲的作用。显然,纤维复合材料的基本力学性质主要取决于纤维和基体的力学性质、含量比、增强方式以及它们之间的界面特性等。纤维复合材料的基本力学性质是可设计的。

本节主要阐述纤维和基体的基本力学性质、纤维复合材料弹性系数的复合关系式、纤维复合材料的强度特性和纤维复合材料的其他力学性质等。

一、纤维与基体的力学性质

(一) 纤维的基本力学性质

纤维的力学性质主要是通过拉伸试验得到的。观察纤维从受力直到破坏的全过程,可从中了解强度及变形的变化规律,并测定

出标志纤维力学性质的一些常数。目前纤维复合材料中,应用最多的是玻璃纤维,其次是碳纤维、有机纤维(如 Kavlar 49)及金属纤维等。这里主要介绍玻璃纤维的基本力学性质。

将玻璃纤维的单丝(或称单纤维)、原纱和股纱分别进行拉伸试验,得到以纤维绝对伸长 ΔL 为横坐标,以拉力 P 为纵坐标的拉伸图(图 1-1)。如把 ΔL 除以纤维试件的长度 L , P 除以纤维横截面面积 A ,并以横坐标代表应变 ϵ (等于 $\Delta L/L$),纵坐标代表应力 σ (等于 P/A),可得图 1-2 所示的应力与应变关系曲线。

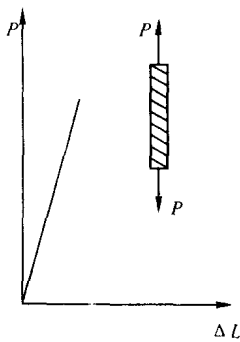


图 1-1 玻璃纤维拉伸力与伸长关系



图 1-2 玻璃纤维拉伸应力应变关系

从图上观察试验结果,可以发现玻璃纤维具有下述力学性质:在拉力作用下,纤维只产生弹性变形,可视为完全弹性体,其延伸率一般在 3% 左右(通常不大于 5%),应力应变曲线基本是条直线,即应力与应变成正比,服从虎克定律,其比例极限接近于抗拉强度。

表 1-2 给出了 E 玻璃纤维、S 玻璃纤维、碳纤维、有机纤维和钢纤维的基本力学性质。

表 1-2 常用纤维的基本力学性质

材料 性质	E 玻璃纤维	S 玻璃纤维	碳纤维 (高强)	有机纤维 Kavlar 49	钢纤维
密度 $\gamma / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.55	2.49	1.75	2.0	7.8