

纺织物的化学整理

[美] H. 马克等 著 水佑人 译 屠仁溥 校



纺织工业出版社

纺织物的化学整理

[美] H. 马克 等著

水佑人 译

屠仁溥 校

纺织工业出版社

内 容 提 要

本书对各种纺织纤维的化学整理的理论和实践作了全面阐述。对纺织物的防缩防皱、防水、阻燃、拒油、抗静电、防霉、防菌等化学整理的机理与工艺都有详细的介绍。同时还概括地介绍了化学整理的近代研究成果。

本书可供高等纺织院校有关专业的师生、专业研究工作者和纺织、染整、化纤工业的工程技术人员阅读参考。

CHEMICAL AFTERTREATMENT OF TEXTILE H. MARK

纺织物的化学整理

〔美〕H. 马克 等著

水佑人 译

屠仁溥 校

*

纺织工业出版社出版

(北京东长安街12号)

新村印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

850×1163毫米 1/32 印张: 19 4/32 字数: 528 千字

1984年5月 第一版第一次印刷

印数: 1—8,000 定价: 2.85 元

统一书号: 15041·1276

译 序

纺织物的化学整理是高分子树脂工业、纺织工业、化纤工业结合的边缘学科。1925年投入工业生产的初期，主要是用于纤维素织物的防缩防皱整理。

随着高分子树脂工业和纤维工业的发展，愈来愈多的树脂化学品用到纺织纤维的化学整理上，应用领域也日趋广泛。除了传统的防缩防皱目的之外，几乎各种纺织纤维的化学变性，如防水、拒油、阻燃、防霉、防菌等，都属于化学整理的范畴。

化学纤维特别是合成纤维的飞速发展，对纤维的化学整理提出了新的要求，如改进染色性能、防污染、抗静电等。所以，近年来纺织纤维的化学整理已受到了世界各国的普遍重视，也是纺织新产品生产的主要技术途径。

纺织物化学整理的发展如此迅速，但尚未有一本理论与实践并茂的著作。大多数资料分散在各国的专利和期刊文献中，分布面又广（如纺织、染整、工业化学、高分子科学等期刊中），这给教学人员、工程技术人员查阅工作带来了很大困难。

本书是由美国著名高分子科学家 H. 马克等著。组织了美、英、联邦德国、日本各国高分子纤维科学家及大工业公司研究部的专家，分别执笔编写各章。这是一本从理论到实践，包括各种纤维的化学整理的全面著作。本书收集和综合整理了 2000~3000 篇文献资料，并作了全面的评述，是七十年代纺织纤维化学整理的代表作品。

本书的第 1~5 章是纺织物化学整理的基本原理；第 6~9 章是化学整理的工艺实践；第 10 章综述了纺织物化学整理的文献资料；第 11 章介绍了化学整理的环境保护。

本书在翻译过程中，曾得到北京大学高分子化学专家冯新德教授、

中国科学院化学研究所钱人元教授的指导和帮助；本书中第9章有关微生物及菌种的译名，也得到北京医学院邹秋水教授的帮助。全书由屠仁溥同志审校，陆雪芬同志参加第1~5章的初校，谨此致谢。

由于本人水平有限，书中错误在所难免，敬请读者批评指正。

译者

一九八二年十月

目 录

第一章 总分类	(1)
H. 马克 (H. MARK) 和 S. M. 阿特拉斯 (S. M. ATLAS)	
第二章 纤维的渗透	(4)
埃默里 I. 瓦尔柯 (EMERY I. VALKO)	
第三章 织物的渗透	(75)
埃默里 I. 瓦尔柯 (EMERY I. VALKO)	
第四章 未处理织物的溶胀和收缩	(105)
K. L. 格雷 (K. L. GRAY)	
第五章 纤维上形成高聚物	(121)
第一节 交链剂及棉布树脂整理的化学原理.....	(121)
H. 彼得森 (H. PETERSEN)	
第二节 加聚法形成高聚物.....	(219)
星野 (K. HOSHINO)	
第六章 树脂	(248)
第一节 缩聚产物.....	(248)
一、脲-甲醛在纺织物上的整理	(248)
S. A. 海帕 (S. A. HEAP)、R. E. 亨特 (R. E. HUNT)、P. A. 雷尼松 (P. A. RENNISON) 和 R. 坦脱塞 (R. TATTERSALL)	
二、三聚氰胺-甲醛	(296)
W. F. 海尔别斯 (W. F. HERBES)、S. J. 渥勃里恩 (S. J. O'BRIEN) 和 R. G. 伟克 (R. G. WEYKER)	
三、羟甲基化合物.....	(307)
R. G. 伟克 (R. G. WEYKER)、S. J. 渥勃里恩 (S. J. O'BRIEN) 和 W. F. 海尔别斯 (W. F. HERBES)	
第二节 加成聚合物	(332)

一、环亚胺的化学.....	(332)
洛夫 R. 费开西尔 (ROLF R. FIKENTSCHER)	
二、环亚胺在纺织整理中的应用.....	(358)
汉茨 E. 皮勒 (HEINZ E. BILLE) 和洛夫 R. 费开西尔 (ROLF R. FIKENTSCHER)	
三、二异氰酸酯和二乙烯砜处理.....	(385)
H. 马克 (H. MARK) 和 S. M. 阿特拉斯 (S. M. ATLAS)	
第七章 洗可穿织物.....	(390)
约翰 J. 里昂 (JOHN J. RYAN)	
第八章 抗污和防沾污.....	(434)
A. C. 奴斯勒 (A. C. NUESSELE)	
第九章 抗细菌和抗霉菌整理.....	(476)
R. S. 玛霍姆特 (R. S. MAHOMED)	
第十章 纺织整理的过去发展的综述.....	(521)
A. R. 斯密司 (A. R. SMITH)	
第十一章 现代纺织整理的环境公害.....	(601)
H. 马克 (H. MARK) 和 S. M. 阿特拉斯 (S. M. ATLAS)	

第一章 总 分 类

H. 马克 (H. MARK) 和 S.M. 阿特拉斯 (S.M. ATLAS)

一、引言

本书是专门介绍一个迅速发展的领域，横跨两大工业部门：纺织工业和合成树脂工业。这两个工业部门，近年来在提供众多新材料、新工艺、新产品上取得了重要和迅速的进展。本章对纺织工业目前常用的合成聚合物作简要的分类及介绍。众所周知，聚合物可分成热塑性和热固性两类。第一类，树脂在普通条件下是固体，但当升温之后可变软，并具有可塑性，而当降至室温时，又可硬化。这种软化和再固化过程纯粹是物理性质的改变，而没有任何化学变化。这是一种可逆过程，如一种热塑性树脂，当再升温至这一范围，会重复软化，再冷至同样低温，又可硬化。第二类即是热固性高聚物。它在常温下也是固体，当升温之后也立刻软化，但在软化过程中，同时发生化学变化——材料的组成和结构发生改变。如在软化状态下维持一个短时间（几秒或几分钟）之后，再冷至室温，又回复到原来的固体状态。现在若再重新升温，还可再度软化，但不是原来的温度，而是比原来的温度显著地提高了。这说明热固性材料或有热固能力的材料，在加热—冷却循环过程中引入了不可逆的因素，在树脂的分子间发生了化学反应。如果加热时间过长，则材料变成热固型，在任何温度下都是硬的，直至最后。若剧烈加热，则发生化学分解。

在自然科学范围内，有典型的热塑性树脂（如聚苯乙烯和醋酯纤维）和典型的热固性树脂（如苯酚-甲醛和苯乙烯化的不饱和聚酯）体系。另外还有一些热塑性的树脂，在软化状态下，会发生缓慢分解或硬化成热固性成分，由于其固化很慢，在某些条件下，可以保持在热

塑型到热固型的中间状态，直到最后，控制一定条件才变成热固型。这些混合组成，应用在某些工业上有特殊意义。

二、热塑性组分

(一) 乙烯类聚合物及其衍生物 这类树脂的典型代表是聚醋酸乙烯酯、聚丙烯酸乙酯、聚丁酸乙酯及其共聚物的乳化液、悬浮液以及溶液。聚乙烯高级脂肪酸酯的衍生物，如聚乙烯月桂酸酯、聚乙烯棕榈酸酯、聚乙烯硬脂酸酯，具有特殊的手感和光泽。加入氯乙烯、偏氯乙烯会增加抗溶胀和抗溶解性，并赋予一定阻燃作用，但在高温下会泛黄。

聚乙烯醇的缩醛物如聚乙烯醇缩甲醛、聚乙烯醇缩乙醛、聚乙烯醇缩丁醛对水解作用都不敏感，只要有一些游离羟基存在，就可适当交链。

(二) 丙烯酸聚合物和乙烯-丙烯酸类混合组成 含丙烯酸酯、乙烯酸酯的丙烯酸共聚物的乳化液或悬浮液，具有极好的室外稳定性，并有良好的手感、光泽和外观。纯丙烯酸酯组成的质量最好，但价贵；加入高级醇类如肉豆蔻醇、鲸蜡醇等可使具有特殊的柔软性和手感。多数丙烯酸酯体系中加入少量羟甲基丙烯酰胺、环氧丙烯基甲基丙烯酸酯、乙二醇二甲基丙烯酸酯会表现出一定程度的热固性能。

(三) 其它热塑性组分的乳化液、悬浮液及溶液 如聚烯烃、聚酯、聚酰胺等，可以有选择性地用于纺织物整理中，但是至今只是用于一些特殊的情况。

三、热固性组分

(1) 酚-醛、脲-醛和三聚氰胺-甲醛是众所周知的、传统的组分，近来增加了大量的化合物。在某些条件下，引进反应性树脂形成物，在纤维表面(或中间)形成热固性“氨基树脂”或“酚-醛树脂”的三维空间网络，其结合的数量很大，并且仍在增加。

(2) 环氧类和/或乙烯亚胺类已有几个公司在研究。热固化过程基本上是加成反应，在工艺过程中没有水分析出，很容易催化，甚至在较低温度下能很快发生反应。

在环氧树脂的整理中，可以加入增塑剂和柔软剂，以及与乙烯类树脂或丙烯酸酯类拼用。由热塑性与热固性组成的聚合物的混合物，可使纯组分的性能间很好兼顾，如粘附力、硬度、耐久性和外观等。

(3) 各种聚氨酯是一种新的引人注目的热固型树脂。在其中掺入聚乙烯类和聚丙烯酸类热塑性组分可以增进和改善性能。聚氨酯树脂的特别有价值的性能之一，就是他们具有合宜的低温焙烘和对纺织品优良的粘附性。

此外，天然或合成橡胶浆液或乳液，长期来已用于纺织品涂层和整理工艺上，正在不断地被新型的弹性体和新的工艺配料所替代。

参 考 文 献

1. H. F. Mark, N. G. Gaylord and N. M. Bikales, Eds, *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, Vol. 6, Interscience, New York, 1967, p. 818.
2. J. E. Lynn and J. J. Press, *Advances in Textile Processing*, Wiley, New York, 1965.
3. J. T. March, *Introduction to Textile Finishing*, 2nd ed. Chapman and Holt, London, 1966.

第二章 纤维的渗透

埃默里 I. 瓦尔柯 (EMERY I. VALKO)

一、引言

许多整理剂为了达到其效果,必须进入纤维内部。其中保形整理就是纤维内整理。通过成纤聚合物分子间的交链,提高了纤维的弹性(或降低了可塑性),例如“洗可穿”整理和“耐久压烫”整理等。这些整理发展初期,虽然分子机理尚未获得公认,但是从显微镜的研究已经证明整理剂是在纤维内部^[1],除了常规染色的显微镜研究外,这是首次直接证明整理剂可以安置在纤维内部。

虽然至今还没有直接证据可说明整理剂必须处在纤维内部以达到某些特殊功能,但是容易看到的是处在纤维内部的位置,有助于提高耐磨性、耐洗性和日光牢度。整理剂与纤维内成纤高聚物分子发生化学反应,赋予了洗涤牢度(或干洗牢度)。纤维表面分子反应功能团较少,而整理剂通常使用量很大,超过了微观纤维表面能发生化学结合的功能团,所以,要与纤维发生化学反应的整理剂,必须渗入纤维内部(如同活性染料染色一样),活性基团与纤维中高聚物分子形成了新的共价键,在反应条件下,保持了纤维物理性状的完整。

为了使大部分高聚物分子能参与反应,就要求高聚物分子对活性整理剂有良好的可及度。关于纤维中高聚物分子的可及度,通常是用纤维的反应性来测定。纤维的反应性是取决于活性剂的性能、反应时间、温度和预溶胀度。

大量的整理剂沉积在纤维之间,会对织物的柔软性和手感带来副作用,如果需要以高浓度获得高水平性能而同时又能保持手感的整理,可取的就是使用纤维内部整理,例如反应性整理或纤维内部接枝

等。应用纤维间的沉积方法，进行阻燃整理，在工业用和军用织物上是有效的，在允许范围内增加了手感的厚实性。而服用织物只能用纤维内阻燃整理剂。事实上，目前工业实践中大量的整理还是应用纤维内整理剂。值得注意的例外是，有些要求改变纤维表面性能的，如防水、防斑渍剂（石蜡和高聚物）、防污剂、高聚物润滑剂、硬挺剂（淀粉和聚乙烯醇）以及多数的抗静电剂。

纤维内整理剂分直接性的和非直接性的两类，决定于纤维浸入处理浴中，是否发生选择性吸附。染料就是最重要的直接性化合物，整理剂中也有程度不同的直接性，许多文献^[2~4]已经详细讨论了直接染料的渗透问题。

在讨论渗透的机理时，我们为了简化起见，就将纤维浸入均匀相中，使渗透剂的浓度在全过程中保持恒定，所以就选用很大浴比（“无限浴”）。

具有直接性的整理剂在有限浴内，在渗透过程中，周围液体的整理剂浓度就会下降。在干燥过程中，周围液体中渗透剂的浓度就不断增加。所以通常在渗透过程中纤维和周围边界层会建立一个浓度梯度。

薄层的厚度对渗透速率影响很大，可以用强力搅拌而减小，这一点在工业实践中也很重要。本章对此仅作一般性介绍，以供参考。

二、纤维渗透机理

纤维内部的可及度即渗透性，是取决于纤维的物理与化学结构、渗透物质的化学性质、温度、压力及其它参数。

纤维的渗透机理概括起来有以下三种：

1. 空隙渗透 渗透发生在纤维中预形成的空穴或孔隙中。
2. 溶胀渗透 渗透发生在成纤高聚物与其聚集体之间被溶胀扩大的空间中。
3. 预溶胀渗透 渗透发生在由溶胀剂所产生的和所占据的空间。

不要被这三种机理的名称模糊混淆。在它们之间也有可能相互转

換，所以值得弄清楚其基本概念。

关于孔隙说明显微网络、交联沟道的存在，一般平均宽度约小到 $10\sim 20\text{ \AA}$ （微孔度），它显然大于均相液体或单晶体的分子间距离。孔隙可由它本身的微观表面，或由孔隙壁的光散射，或密度降低表现出来。

一般纤维中并没有大量空隙存在，所以空隙体系在纤维的渗透中可以忽略。但与之相反，在第三章织物的渗透中，空隙体系特征很明显。通常纤维表面是有凹形空穴，纤维中有微孔和空穴，但它们是不连续的，内部也不连通。除非溶胀剂先渗透进去，渗透过程伴随着纤维表面体积的扩大。溶胀后的纤维体积，或溶胀后的高聚物体积，并不等于高聚物体积加渗透剂的体积。因为溶液分子间的相互作用，可以使体积膨大，也可能使体积收缩。如果分子间有强大吸引力，则呈现收缩（电缩作用），这样体积就比加和法计算出来的小，如干纤维素的吸附水分。也可能是纤维内微孔被渗透剂所充满，其表现密度大于用加成法计算出来的密度，但渗透并不通过原先的孔隙。

高聚物扩散中必须将孔隙机理和“自由体积”区别开来。在“自由体积”理论中，孔隙大小不是固定的，而是有波动并能消失的。如果当渗透分子占领一些孔隙，同时又会形成一些孔隙。所以高聚物体积也随着渗透而增加。

当研究纤维渗透时，我们不必考虑孔隙机理，而只是溶胀和预溶胀两个主要理论，其中预溶胀理论在染料和整理剂渗透机理中常会遇到。对于亲水性纤维，水是常用的溶胀剂，也是水溶性和分散性整理剂的载体。这原理很简单，首先是水分子进入纤维，将高聚物分子或它们的聚集体（胶束或晶胞）推开，引起纤维溶胀；然后溶于水中的整理剂（或染料）分子渗入已溶胀的高聚物中。但有说服力的机理尚未建立，本章将作讨论。

纤维预溶胀渗透机理是基于这样的假设：溶胀了的纤维中有连通的孔隙或沟道充满着溶胀剂分子；但是未溶胀的纤维中，这些孔隙并不存在。虽然纤维中可能有一些不连续，但在溶胀过程中就沿着它形

成孔隙。

溶胀建立的孔隙，可以用某些技术加以保留（如溶剂交换），除去第一种溶胀剂后，用气体或真空替代第二种交换液体。溶剂交换过程在纤维加工中并不重要，但是讨论它的用途可当作一种研究工具。

三、溶胀渗透和等温吸附

整理工艺经常是在预溶胀纤维上进行的，因为溶胀剂和整理剂通常是同时接触未溶胀纤维。当接触整理剂溶液时，溶胀剂较快扩散进入高聚物，整理剂是向预溶胀的纤维渗透。

热溶染色法是一个例外。非水溶性的染料成悬浮状分散在水中，再分布在拒水性纤维的表面，干燥后，在高温下使染料进入纤维。气相整理尚处于萌芽状态，此方法是基于整理剂气态渗透（甲醛、缩甲醛、环氧化合物）。即使气相整理，预溶胀也常是必须的^[5~7]。气相接枝这项工艺虽尚未用于商业，但也要求纤维预溶胀^[8]。还没有实验说明失败的原因是归之于纤维的预溶胀。

为了解溶胀现象，等温吸附可以提供很多重要的线索。等温吸附是用图线表示，即物质在给定的相对蒸汽压力的空气中平衡，观察其吸收的水分。许多有效数据都是以水作为吸附剂。图 2-1 是由不同聚合物组成的八种纤维的等温吸附曲线。

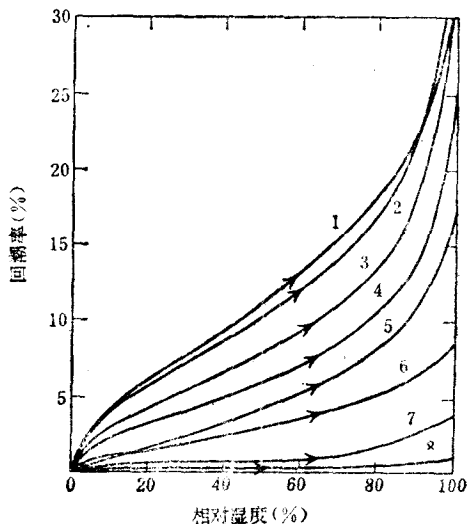


图 2-1 各种纤维在不同相对湿度下的回潮率^[10]
1—羊毛 2—粘胶 3—蚕丝 4—棉 5—醋酯纤维 6—尼龙 7—奥纶 8—涤纶

除了聚合物的化学结构外，超分子结构也会影响吸附，所以这个

图线只能作为一种典型。图线的右端是 100% 相对湿度，能代表纤维与水接触时溶胀情况。饱和蒸汽的热力学活度是与液体水相似（虽然热函和熵是不同的）。亲水性纤维的曲线在右端的斜率几乎垂直，所以吸附数值不太可靠。如果测定吸附性不用单纤维，而用纱线或织物，则在相对湿度未达到 100% 时，就会发生毛细管凝聚，使重量增加的观察值偏大。

溶胀可以看作溶解过程——溶剂（溶胀剂）和溶质（聚合物）的自发混合过程。与一般溶质不同的是，高聚物的溶胀是有一定限度的。因为高聚物对溶胀有一定的限制力，宏观拉伸模量是限制力的衡量尺度。弗洛里(Flory)和雷纳(Rehner)^[10,11]根据大分子的基本性能计算了限制力。在他们的理论中认为溶胀相当于高聚物分子网络各向同性的拉伸过程。

纤维是不存在化学交链的，溶胀度比较低，显然这种结构特点是不同于化学交链，能可靠地来限制纤维的溶胀。

实际上有两种结构可表达上述特性：(1) 结晶度或通常的侧序；(2) 高聚物链的缠结。未硫化的橡胶就是后一种例子，既具弹性，溶胀度也有限，没有化学交链或结晶度。这可以解释为：大分子长链相互缠结，将分子连结在一起，其作用相当于交链，这种机理可用于有弹性和溶胀度有限的非晶态高聚物上。

对于一些有部分侧序或晶体结构的高聚物，现代的理论是认为大分子通过几个不同序列的区域，由于分子间吸引提高了分子内聚力，随着侧序的增加而增加。

溶胀的推力在低序区遇到的阻力最小。渗透剂分子首先进入低序区，推开高聚物分子。在这些区域之间，高聚物分子还相互吸引紧靠在一起阻止渗透。所以高聚物的有序区起到了交链的作用，将大分子束缚住。如果有序区之间的距离小，则大分子与溶胀剂相互作用的区域也就短了。所以在这类高聚物中缠结将不是主要的因素。

根据弗洛里的理论^[11]，高聚物网络的拉伸，使高聚物的构象改变，趋向于减少紊乱，这样就使系统的熵值下降。熵的作用是限制溶

胀的因素，这些是根据橡胶弹性理论计算出来的。假如未溶胀的凝胶和溶胀的体积比（即高聚物在凝胶中的部分体积）用 v_2 表示，如各向同性的高聚物体，在三个线性方向的每一向，尺寸增加 $\frac{1}{\sqrt{v_2}}$ ，则熵的变化为：

$$\Delta S = \frac{3 \rho RT}{M_c} \left[\left(\frac{1}{v_2} \right)^{2/3} - 1 \right]$$

ρ 为密度， M_c 为交链点之间的高聚物链的分子量。

根据这个理论，溶胀的推动力来自混合自由能，其中包括混合热和混合熵所作的贡献。

上述理论认为宏观弹性模量是溶胀的限制力。弗洛里^[11]定量地导出了限制力，经过几次简化假设，得出下列方程式：

$$\ln x = \ln(1 - v_2) + v_2 + \mu v_2^2 + \frac{1}{z} v_2^{1/3}$$

在上述方程式中， x 为溶剂相对蒸汽压力， μ 为半经验性的高聚物-溶剂相互作用包括热和熵二项的无因次参数， z 为高聚物在交链和溶剂之间的摩尔体积的比率。

虽然这个方程式对溶胀过程提供了重要的见解，对纤维溶胀的适应性受到限制，如溶胀后凝胶的体积，比高聚物原体积大许多倍，这个方程式特别适用。纤维加工中溶胀度一般都比较少，即使仅算高聚物的非晶部分也很难达到 2 倍。成纤高聚物通常没有化学交链，高聚物在有序不溶胀区链的敛集代替了交链。这样将弗洛里-雷纳方程式发展成在交链中链的四官能团结合。

纤维的溶胀热和熵一般不是常数，而是与相对蒸汽压力、溶胀度有关。多数纤维在溶胀前是处于玻璃态，而不是橡胶态。即在非晶区，高聚物分子的取向度也很高，纤维中高聚物分子的构象很接近于最大伸长而不是绕圈状，由于弹性模量很高，在高度拉伸时，可能会出现热熵的变化。从弗洛里-雷纳理论获得的 M_c 值或 z 值，用在纤维的溶胀中是有问题的。

另一个高聚物溶胀结构理论是基于由布朗瑞 (Brunaur)-埃米特 (Emmett)-泰勒 (Teller)^[12]所发展的吸附理论。这个理论中假定高聚物上有一定数量能与吸附剂(溶胀剂)强烈结合的位置,而其他吸附剂分子是处于液体状态。原来这些理论是用在微表面和孔隙壁的吸附。华特 (White) 和伊林 (Eyring)^[13]指出, 这些位置在高聚物上如果可及度均等, 分布可能很均匀, 将布朗瑞等的理论应用于纤维的等温吸附, 可以认为是溶胀的二相理论的进一步发展。将吸附的水分分为两大部分, 即直接吸附和间接吸附^[14,15], 吸附分子数用A表示, 强烈结合位置数目为B, 吸附剂相对蒸汽压力X, 与液体吸附剂分子强烈结合的数目的比率为C。则布朗瑞-埃米特-泰勒公式可写成下式:

$$\frac{A}{B} = \frac{CX}{(1-X)(1-X+CX)}$$

华特和伊林将此方程式与弗洛里-雷纳理论结合起来, 实验结果能和许多高聚物溶胀体系的理论相符, 并取得很好的一致。但这些数值用于交链或结晶区间高聚物的链长是很难说明的。上面讨论了两种

溶胀理论: 一种是构象熵的作用和溶胀剂的蒸汽分压力的依赖关系; 另一种理论的重点是溶胀剂分子和高聚物分子的相互作用。以下将对不同溶剂的溶胀作用作一比较。这里要讨论亲水性纤维对水的等温吸附过程从热力学导出的概念。

通常溶胀正如溶液一样, 可能是绝热、放热、吸热过程。亲水性纤维吸附水分是强烈放热过程, 疏水性纤维吸附水分是有少量热函变化。

虽然溶胀热可以直接测定, 但是大多数还是从吸附的温度依赖性求得。吸附试验是用水蒸气进行的, 但

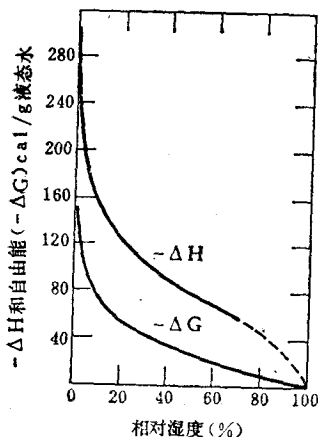


图 2-2 棉纤维在各种相对湿度^[16]下吸附液态水的微分热, $-\Delta H$ 和自由能 $-\Delta G$