

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



造纸及其装备科学技术丛书（中文版）

[ 第十五卷 ]

# 纸张物理性能

Paper  
Physics

[芬兰] Kaarlo Niskanen 著

[中国] 刘金刚 苏艳群 杜艳芬 李洪才 杨扬 译

非  
外  
借



中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

中芬合著 :造纸及其装备科学技术丛书(中文版)第十五卷

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 纸张物理性能

Paper Physics

[芬兰]Kaarlo Niskanen 著

[中国]刘金刚 苏艳群 杜艳芬 李洪才 杨扬 译

 中国轻工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

纸张物理性能/(芬)倪卡罗(Kaarlo Niskanen)著;  
刘金刚等译. —北京:中国轻工业出版社,2017.6

(中芬合著;造纸及其装备科学技术丛书;15)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5184-1337-9

I. ①纸… II. ①倪… ②刘 III. ①纸张性能-物  
理性能 IV. ①TS761

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第050643号

责任编辑:林媛

策划编辑:林媛 责任终审:劳国强 封面设计:锋尚设计

版式设计:锋尚设计 责任校对:燕杰 责任监印:张可

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印刷:三河市万龙印装有限公司

经销:各地新华书店

版次:2017年6月第1版第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:16.25

字数:416千字

书号:ISBN 978-7-5184-1337-9 定价:100.00元

邮购电话:010-65241695 传真:65128352

发行电话:010-85119835 85119793 传真:85113293

网址:<http://www.chlip.com.cn>

Email:club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

141234K4X101ZBW

中芬合著:造纸及其装备科学技术丛书(中文版)编辑委员会

名誉主任:杨 波 杨志海 余贻骥

顾问:(特聘中国工程院院士)

陈克复 孙优贤 柳百成 陈蕴博 姚 穆

主任:步正发

副主任:钱桂敬

委员:(按姓氏拼音排序)

步正发	巴云平	才大颖	曹春昱	曹朴芳	曹振雷
陈鄂生	陈洪国	陈嘉川	陈克复	陈小康	陈永林
陈蕴博	程言君	崔棣章	杜荣荣	樊 燕	范 泽
房桂干	顾民达	郭海泉	郭永新	何维忠	侯庆喜
胡 楠	胡宗渊	黄孝全	黄运基	贾克勤	江化民
江曼霞	姜丰伟	邝仕均	李 平	李 耀	李朝旺
李发祥	李国都	李洪法	李洪信	李建国	李建华
李金良	李威灵	李祥凌	李有元	李志健	李忠正
林 媛	林美婵	林昭远	刘焕彬	刘铸红	柳百成
陆文荣	马明刚	马思一	马志明	牛 量	牛庆民
庞景方	彭葵生	戚永宜	钱桂敬	裘 峥	邵爱民
沈 滨	沈根莲	宋鸿林	孙润仓	孙树建	孙优贤
孙有根	谭国民	田立忠	童来明	王淼辉	王维俭
王永平	徐 林	徐正源	许本棋	许超峰	许连捷
杨 旭	杨延良	姚 穆	姚献平	于 宏	于学军
袁晓宇	张 辉	张 磊	张 亮	张 熙	张 茵
张国安	张美云	张新平	张战营	赵 伟	赵传山
赵志顺	詹怀宇	郑 晓	钟侠瑞	周景辉	朱根荣

主 编:胡 楠

副 主 编:姜丰伟 曹振雷 曹朴芳



# 序

芬兰造纸科学技术水平处于世界前列,近期修订出版了《造纸科学技术丛书》。该丛书共20卷,涵盖了产业经济、造纸资源、制浆造纸工艺、环境控制、生物质精炼等科学技术领域,引起了我们业内学者、企业家和科技工作者的关注。

姜丰伟、曹振雷、胡楠三人与芬兰学者马格努斯·丹森合著的该丛书第一卷“制浆造纸经济学”中文版将于2012年出版。该书在翻译原著的基础上加入中方的研究内容:遵循产学研相结合的原则,结合国情从造纸行业的实际问题出发,通过调查研究,以战略眼光去寻求解决问题的路径。

这种合著方式的实践使参与者和知情者得到启示,产生了把这一工作扩展到整个丛书的想法,并得到了造纸协会和学会的支持,也得到了芬兰造纸工程师协会的响应。经研究决定,从芬方购买丛书余下十九卷的版权,全部译成中文,并加入中方撰写的书稿,既可以按第一卷“同一本书”的合著方式出版,也可以部分卷书为芬方原著的翻译版,当然更可以中方独立撰写若干卷书,但从总体上来说,中文版的丛书是中芬合著。

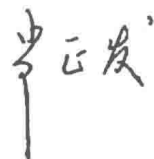
该丛书为“中芬合著:造纸及其装备科学技术丛书(中文版)”,增加“及其装备”四字是因为芬方原著仅从制浆造纸工艺技术角度介绍了一些装备,而对装备的研究开发、制造和使用的系统理论、结构和方法等方面则写得很少,想借此机会“检阅”我们造纸及其装备行业的学习、消化吸收和自主创新能力,同时体现对国家“十二五”高端装备制造业这一战略性新兴产业的重视。因此,上述独立撰写的若干卷书主要是装备。初步估计,该“丛书”约30卷,随着合著工作的进展可能稍许调整和完善。

中芬合著“丛书”中文版的工作量大,也有较大的难度,但对造纸及其装备行业的意义是显而易见的:首先,能为业内众多企业家、科技工作者、教师和学生提供学习和借鉴的平台,体现知识对行业可持续发展的贡献;其次,对我们业内学者的学术成果是一次展示和评价,在学习国外先进科学技术的基础上,不断提升自主创新能力,推动行业的科技进步;第三,对我国造纸及其装备行业教科书的更新也有一定的促进作用。

显然,组织实施这一“丛书”的撰写、编辑和出版工作,是一个较大的系统工程,将在该产业的发展史上留下浓重的一笔,对轻工其他行业也有一定的

借鉴作用。希望造纸及其装备行业的企业家和科技工作者积极参与,以严谨的学风精心组织、翻译、撰写和编辑,以我们的艰辛努力服务于行业的可持续发展,做出应有的贡献。

中国轻工业联合会会长

Handwritten signature in black ink, consisting of the characters '张正发' in a cursive style.

2011年12月

中芬合著:造纸及其装备科学技术丛书(中文版)的出版  
得到了下列公司的支持,特在此一并表示感谢!



**UPM**

芬欧汇川集团



维美德集团



河南江河纸业有限责任公司



河南大指造纸装备集成工程有限公司



# 前 言

在 Kaarlo Niskanen(芬兰)等人的辛勤劳作之下,“造纸科学与技术系列丛书”《纸张物理性能》得以问世。此书论述系统、分析全面、解读深入,既适用于造纸学科的读者,又适用于物理学科的读者。为方便中国读者进一步学习,将原作者的劳动成果引进国内,中国轻工业出版社编译出版该书中文版,刘金刚、李洪才、杜艳芬、苏艳群、杨扬(按翻译内容前后排序)参与了本书的编译工作。本书主要介绍了纸张各方面的物理性能,包括纸张结构,纤维与结合,纸张表面与热、电和摩擦性能,纸张光学性能,面内抗张性能,纸和纸板的结构力学性能,水分和液体传输,流变性能,尺寸稳定性,等等。

编译得以顺利进行,离不开原作者编撰此书时所付出的不懈努力,较之过去版本,一方面增添了三维纸张结构、光学性能、断裂机理、流体渗透等内容,另一方面从逻辑上调整了整书的编排结构;也离不开出版社编辑林媛对此书的校准,在她的细心核对之下,编译过程中出现的一些错误之处得以减少。通过编译此书,译者也受益匪浅。当译者在梳理书中的主旨内容时,也从中找到日后研究工作的灵感。我们的初衷是,希望此书能给中国读者带来帮助。怀着无比荣幸的心情完成此书的编译工作,特别感谢原作者牺牲宝贵的时间编写原稿,为中国读者提供了难得的学习机会。

本书译者对原书中出现的一些错误或不妥之处在译文中加了译者注。由于本书内容丰富,涉及纸张机械、热学、电学、光学、流变学等诸多物理性能,为本书的翻译增加了不少难度。尽管译者始终谨慎动笔,仔细求证,但难免还会存在疏漏,恳请广大读者批评指正。

译者  
2016年6月



# 目 录

## CONTENTS

第①章 纸张结构	1
1.1 二维网络	2
1.1.1 覆盖度	2
1.1.2 纤维段	3
1.1.3 纤维网络的连通性	4
1.2 三维网络	6
1.2.1 厚度、紧度和孔隙率	6
1.2.2 纸张中的孔隙	8
1.3 匀度	12
1.3.1 表征	13
1.3.2 纤维絮聚	14
1.3.3 成形机理	15
1.3.4 厚度方向上的质量分布	16
1.4 纤维取向	18
1.4.1 纤维取向的测量和表征	19
1.4.2 网上层流剪切	20
1.4.3 流体动力干扰	22
1.4.4 取向角	24
1.5 z向结构	25
1.5.1 分层和缠结纸页结构	25
1.5.2 纤维取向的两面差	27
1.5.3 纸幅的湿形变	28
参考文献	30

第②章 纤维与结合 .....	34
2.1 纤维特性 .....	34
2.1.1 原料影响 .....	35
2.1.2 制浆的影响 .....	37
2.1.3 纸浆中的细小纤维 .....	40
2.1.4 湿纤维的力学性能 .....	41
2.1.5 干纤维的力学性能 .....	44
2.1.6 纸张内应力 .....	46
2.2 结合 .....	49
2.2.1 基本概念 .....	49
2.2.2 分子结合 .....	50
2.2.3 纤维间结合的结构 .....	51
2.2.4 结合强度 .....	52
参考文献 .....	53
第③章 纸张表面与热、电和摩擦性能 .....	57
3.1 表面粗糙度 .....	57
3.1.1 定义 .....	57
3.1.2 测量方法 .....	58
3.1.3 纸张可压缩性 .....	60
3.1.4 纤维性能的影响 .....	61
3.1.5 造纸的影响 .....	62
3.2 摩擦 .....	64
3.2.1 一般物理和化学效应 .....	64
3.2.2 纸张表面摩擦 .....	66
3.3 热性能 .....	66
3.3.1 简介 .....	66
3.3.2 纸张传热机理 .....	67
3.3.3 比热容和热扩散系数 .....	69
3.3.4 测定方法 .....	69
3.3.5 浆料和纸张结构的影响 .....	70
3.4 电性能 .....	71
3.4.1 理论 .....	72
3.4.2 测量方法 .....	73

3.4.3	纸张电阻率 .....	74
3.4.4	介电性能 .....	76
3.4.5	电气性能与实际应用的联系 .....	77
	参考文献 .....	78
第④章	纸张光学性能 .....	81
4.1	简介 .....	81
4.2	光学理论 .....	81
4.2.1	光、折射率和菲涅耳(Fresnel)方程 .....	81
4.2.2	粗糙表面的镜面反射 .....	83
4.2.3	光泽度的角和空间分辨测量 .....	84
4.2.4	纤维结构的漫反射率 .....	87
4.3	反射率的标准化检测 .....	87
4.3.1	标准照明体 .....	87
4.3.2	用于检测漫反射率和光泽度的 ISO 仪器 .....	88
4.4	颜色理论 .....	90
4.4.1	光谱的选择性光吸收 .....	90
4.4.2	CIEXYZ 色空间和 CIELAB .....	91
4.4.3	色差和同色异谱 .....	93
4.4.4	颜色表现和颜色管理 .....	94
4.5	制浆造纸工业的传统检测 .....	95
4.5.1	亮度 .....	95
4.5.2	Y 值和不透明度 .....	95
4.5.3	白度 .....	96
4.5.4	纸张光学性能指标概述 .....	97
4.6	Kubelka - Munk 理论 .....	98
4.6.1	Kubelka - Munk 理论的来历 .....	98
4.6.2	有用的 Kubelka - Munk 方程 .....	98
4.6.3	测定 $s$ 、 $k$ 的 ISO 方法 .....	99
4.6.4	分层结构的方程 .....	99
4.6.5	Kubelka - Munk 理论的缺陷 .....	100
4.6.6	Saunderson 修正 .....	100
4.7	与制浆造纸和印刷相关的光学性能 .....	101
4.7.1	纤维和纸浆 .....	102

4.7.2	打浆和湿压榨 .....	103
4.7.3	填料 .....	104
4.7.4	荧光增白剂和染料 .....	105
4.7.5	涂布和压光 .....	106
4.7.6	印刷品的光学性能 .....	107
4.8	纸张光学理论展望 .....	111
4.8.1	离散纵坐标辐射理论(DORT) .....	111
4.8.2	Monte Carlo - Grace 模型 .....	114
	参考文献 .....	114
<b>第⑤章</b>	<b>面内抗张性能 .....</b>	<b>119</b>
5.1	弹性 .....	119
5.1.1	弹性常数及其测量 .....	120
5.1.2	理论 .....	122
5.1.3	抄纸过程通过改变纸页紧度所产生的影响 .....	124
5.1.4	干燥应力 .....	125
5.1.5	弹性的各向异性和横向分布 .....	126
5.2	负载 - 伸长行为 .....	128
5.2.1	宏观观察 .....	128
5.2.2	微观屈服现象 .....	130
5.2.3	纤维组成和抄纸过程的影响 .....	133
5.2.4	三轴形变 .....	135
5.3	抗张强度、断裂韧度和断裂能 .....	137
5.3.1	纸幅断头和断裂韧度 .....	137
5.3.2	匀度对抗张强度的影响 .....	140
5.3.3	微观强度机理 .....	142
5.3.4	断裂能的测定 .....	144
5.3.5	浆料和抄纸过程对抗张强度的影响 .....	146
5.3.6	混合浆料的影响 .....	149
	参考文献 .....	151
<b>第⑥章</b>	<b>纸和纸板的结构力学性能 .....</b>	<b>156</b>
6.1	弯曲挺度 .....	156
6.1.1	基本关系 .....	156
6.1.2	多层结构纸张 .....	158

6.1.3	有关弯曲挺度的实际问题 .....	160
6.1.4	浆料与抄纸过程的影响 .....	161
6.2	压缩强度 .....	163
6.2.1	压缩强度的定义和测试方法 .....	163
6.2.2	压缩强度的重要性 .....	165
6.2.3	压缩过程中的应力 - 应变曲线 .....	167
6.2.4	压缩过程中纤维网状结构变化 .....	167
6.2.5	浆料和抄纸的影响 .....	169
6.3	面外强度 .....	172
6.3.1	面外应力 - 应变曲线和弹性模量 .....	172
6.3.2	测量方法 .....	174
6.3.3	结构影响 .....	175
6.3.4	层间结合强度 .....	177
	参考文献 .....	178
第⑦章	水分和液体传输 .....	181
7.1	纸页中的水分 .....	181
7.1.1	相对湿度和水分含量 .....	181
7.1.2	滞后和动态现象 .....	183
7.1.3	水和纤维的相互作用 .....	184
7.2	流体输送现象 .....	186
7.2.1	孔隙中的流体输送 .....	187
7.2.2	惰性气体输送 .....	189
7.2.3	水蒸气的扩散 .....	190
7.2.4	卢卡斯 - 沃什伯恩公式(Lucas - Washburn equation) .....	191
7.2.5	X - 射线显微层析 .....	193
7.2.6	液体渗透时的润湿和润胀 .....	194
7.2.7	超疏水 .....	196
7.2.8	润胀 .....	196
7.2.9	涂布和印刷中的应用 .....	197
	参考文献 .....	198
第⑧章	流变性能 .....	202
8.1	黏弹性基本原理 .....	202
8.1.1	动态机械测试 .....	202

8.1.2	负载 - 伸长行为中的应变速率影响 .....	204
8.1.3	水分对应力 - 应变行为的影响 .....	206
8.2	<b>蠕变和应力松弛</b> .....	207
8.2.1	蠕变的主曲线 .....	209
8.2.2	加速蠕变 .....	210
8.2.3	应力松弛 .....	211
8.2.4	内应力和干燥应力 .....	213
8.2.5	延迟恢复 .....	214
8.2.6	微观机理 .....	216
	<b>参考文献</b> .....	217
<b>第⑨章</b>	<b>尺寸稳定性</b> .....	220
9.1	<b>湿膨胀性</b> .....	220
9.1.1	普遍现象 .....	220
9.1.2	纤维网络的湿膨胀性 .....	222
9.1.3	干燥应力 .....	223
9.1.4	浆料及抄纸的影响 .....	224
9.2	<b>卷曲</b> .....	227
9.2.1	表征及测试方法 .....	227
9.2.2	卷曲的机理 .....	228
9.2.3	屈曲性卷曲 .....	231
9.2.4	斜向卷曲 .....	232
9.3	<b>起皱和起楞</b> .....	233
9.3.1	起皱的特性 .....	234
9.3.2	起皱和起楞的机理 .....	235
9.3.3	影响起皱的因素 .....	236
9.4	<b>动态的尺寸变化</b> .....	237
9.4.1	润湿和干燥时的卷曲 .....	238
	<b>参考文献</b> .....	240



# 第①章 纸张结构

结构一词可以解释为“架构或排列”和“组成或构成”。纸张结构由纤维、纤维碎片和细小纤维、填料颗粒、聚合物以及组成纸张的其他化合物构成。纸张结构会影响纸张的大部分物理性能,因此非常重要。例如,纸张强度取决于纤维彼此交织的程度、纤维本身强度以及交织结合的强度。表面粗糙度和松厚度则依赖于纸页的孔隙率以及纤维和其他颗粒的大小。光学性能取决于纸页中自由表面的数量。第2章至第9章将讨论结构和物理性能之间的这些关系以及其他类似的相关性。当代学者的观点详见参考文献<sup>[1]</sup>。

本章论述纸张几何结构,该结构主要为纤维所控制,如图1-1所示。纸页中纤维的空间分布是随机的且时常是不均匀的。其他颗粒和化合物再以某种随机方式附着于纤维上。对于由纤维构成的均匀纸张结构这一特例,统计学法则决定了不同几何性能间的精确关系。本章前两节阐述这些关联性。

由于纤维长度(通常1~3mm)远远大于纸页厚度,故纤维形成的网络是平面的,基本为二维。二维结构决定纸张的大部分性能,但三维多孔性结构也很重要。厚度方向上的开放空间,在近似二维结构中被忽略,它可以赋予纸张不透明、松厚和挺硬性的结构,并决定了流体渗透纸页的方式。

本章前两节重点论述了纸张纤维网络的统计几何结构,没有过多地涉及数学细节,直接说明了平面随机纤维网络的主要几何结构特征。在最简单的二维网络中,纤维为恒定长度的直线段。就几何结构而言,其他纤维性能及其分布并不重要。与此相反,三维多孔结构极大地受制于厚度和纤维的一致性。

纸张制造工艺导致了纸页结构的不规则或不均匀,也影响到非纤维颗粒和化合物的分布。第1.3和1.4节所论述的匀度和纤维取向是其中最重要的两个方面。第1.3节说明了匀度如何造成实际纸张与随机纤维网络的不同。匀度是反映纸张定量空间分布的术语,并不考虑结构是否关联还是随机。

在造纸工艺中,纤维构成具有某种特征尺寸的絮聚团。纸幅成形工艺的流体动力学性能和纤维絮聚趋势导致了纸张局部定量上的相关性。如果给定纸张定量,无论高低,短距离上的



图1-1 纸张表面微观图  
(约1mm<sup>2</sup>)

定量值很可能是相似的。因此,定量并不是完全随机分布的。

即使不是完全随机,就纸张的多数用途而言,纸张结构还是不均匀的、无序的和不规则的。二维随机纤维网络较好地表征了小长度尺度下(小于纤维长度)的纸张结构。匀度则代表了大长度尺度上的结构不均匀性。

纤维取向是纸张的另一项特征。手抄片不存在纤维取向,是各向同性的。机制纸在结构上总是各向异性的,纤维更多地沿纵向取向,而不是横向取向。平面内纸张性能如强度、尺寸稳定性和流变性反映了纸张这种几何各向异性。

纸张几何网络结构形成于纸机湿部。丛书第九卷,《造纸 I 浆料制备与湿部》,详细阐述了纤维浆料的流动性能以及不同纸机的流体动力学过程。本文所讨论的纸幅成形过程仅用于说明可能产生的结构特征。

## 1.1 二维网络

纸页结构最简单的近似是二维、完全随机的网络,如图 1-2 所示。它由具有固定长度、零宽度的直线段构成。Kallmes 等人<sup>[2]</sup>指出常规手抄片具有相同的平面内力学性能,如同通过层叠许多薄纸页制成同样定量的纸页一样。因此二维网络结构可以说明纸张面内力学性能。这种简化处理有助于理解纤维网络结构的统计几何基本原理。

这种网络的随机性非常显著。在随机网络中纤维之间没有相互影响,每一根纤维的位置不依存于其他纤维。正因为如此,二维随机网络经得起大量数学分析的检验。相关资料可以在大量文献中找到<sup>[3-5]</sup>,在这里特别推荐 Deng 和 Dodson<sup>[4]</sup>所著的书。

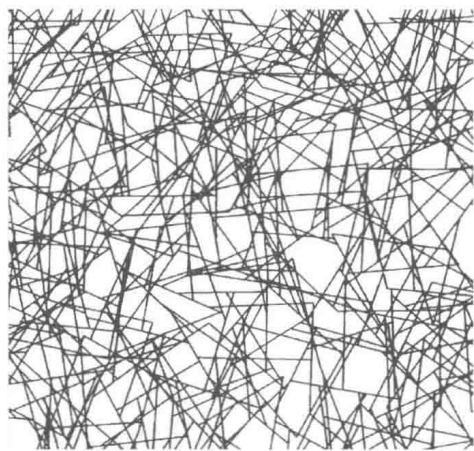


图 1-2 不含自由纤维末端的二维随机纤维网络结构近似

### 1.1.1 覆盖度

定量——单位面积纸张质量,是所有纸张最基本的特性。特别是低定量时,定量影响纸张的物理性能,即使这些性能按单位定量给出。例如,单位定量抗张强度随着定量的降低而接近于零。另一方面,在高定量时,定量不再影响单位定量物理性能。

尽管定量在生产实践中非常重要,但并不是纤维网络结构最好的表征参数。这是因为各种纤维的厚度以及定量是非常不同的。覆盖度<sup>①</sup>是表征二维纤维网络更适合的指标。在一个大的面积  $A$  上,对于给定的纤维数量  $N$ ,覆盖度代表平面内任一点上的平均纤维数量,如下式所示:

① 覆盖度的定义的确是全部纤维的总面积与所在平面面积之比,但如果把纸张想象为多层一样的薄纸的重叠结构,其面积比就相当于有多少层薄纸,亦即多少层(单根)纤维层重叠覆盖到表面上,而缩小到一点上,就相当于多少根纤维重叠在一起。另外,对于二维纤维网络,可以将一根纤维简化为矩形(忽略厚度的影响), $\beta_1$  含义可以理解为单位矩形面积纤维的质量,即与纸张定量类似,将其称为纤维定量。读者可以通过将覆盖度公式左边表达式转化为右边表达式就可以准确理解其含义。——译者注

$$c = Nl_r w_r / A = b / \beta_r \quad (1-1)$$

式中  $l_r$ 、 $w_r$  和  $\beta_r$  分别代表纤维长度、宽度和定量,  $b$  为纸张定量。

覆盖度数值完全确定了纤维性能恒定时的二维随机网络。通过统计纸页横切面上, 与贯穿纸页的参考线相交的纤维数量就可以测定覆盖度。因此, 对于纸页中有效纤维层数量, 覆盖度可以给出精确数值。对于造纸纤维,  $\beta_r = 5 \sim 10 \text{g/m}^2$ , 所以常规的印刷书写纸具有  $c = 5 \sim 20$  “层”纤维。

由于在纸张中并没有明确的纤维层数, 所以覆盖度给出的是有效纤维层数量。即使是纸张厚度与纤维厚度之比也不能给出唯一的纤维层数值。例如, 纸张经过湿压榨和压光, 厚度降低, 但纤维层数量并没有减少, 而且在多数情况下, 纤维平均厚度也不会降低, 例如经过良好打浆的化学浆纤维就属于这种情况。

局部覆盖度  $c'$  分布服从泊松分布, 它规定了小于纤维宽度的点或有限参考面的覆盖度。该泊松分布定义如下<sup>[6]</sup>:

$$c' \geq 0 \text{ 时, } P(c') = c' \frac{e^{-c'}}{c'^!}; \quad \text{其他条件, } P = 0 \quad (1-2)$$

如果平均覆盖度为  $c$ , 则  $P(c')$  给出了找到覆盖某一定点的  $c'$  个纤维层的概率。或者, 将局部覆盖度确定为覆盖小参考面的纤维数。小参考面消除了纤维仅覆盖部分参考面的问题。覆盖度分布  $P(c')$  乘以  $\beta_r$  也可以得到局部定量的分布。高平均覆盖度下, 泊松分布与高斯分布相似, 但不包含后者的负值部分 ( $c' < 0$ ), 因为这种情况下泊松分布不存在。

另一种定义纤维空间分布的方法是确认在给定单位面积内, 有多少纤维中心, 纤维中心数量也服从泊松分布, 如图 1-3 所示。

需要注意的是, 在通常的用语中, 覆盖度一词也指被纤维覆盖的面积份额。例如多层纸板中, 面浆覆盖棕色的芯浆。被至少一根纤维的面浆层所覆盖的面积份额不等于面浆层的覆盖度  $c$ , 而等于  $1 - \exp(-c)$ 。

定量或覆盖度的点状分布忽略了所有空间关联性。因此这种分布不受纤维形状和尺度的影响。点状分布对于圆盘和长而窄的纤维都是一样的。如果参考面尺寸不是远小于纤维宽度, 纤维形状将产生影响, 纸张定量分布或匀度测量就属于这种情况。

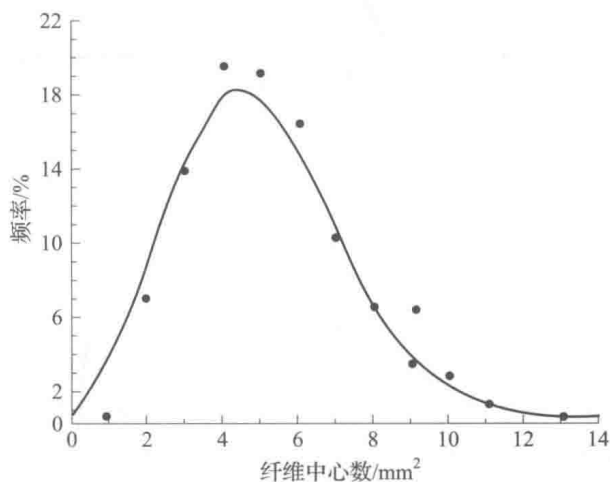


图 1-3 由  $2.5 \text{g/m}^2$  手抄片所测定的单位面积纤维中心数及其所得到的定量泊松分布 (分别用圆点和实线表示)

### 1.1.2 纤维段

Corte 和 Kallmes 按数学方法分析了二维随机纤维的统计几何特征, 发现薄纸页的显微测定结果符合这一特征<sup>[3]</sup>。Corte - Kallmes 理论描述了平面上随机或各向同性分布的恒定尺度纤维所呈现出的特征。真实的纤维并不具有恒定的长度、宽度或厚度, 而且也不是笔直的。但是通过平均尺度来确定几何特征应该足以满足所有实际条件。

为了说明 Corte - Kallmes 理论, 引入纤维段长度分布概念。纤维段是指两个纤维交叉点