

目 录

第一章 绪论	1
1.1 纸浆中的树脂及其危害	1
1.2 制浆造纸工业中树脂沉积的现状 & 趋势	2
1.3 树脂沉积的控制方法	4
1.4 与树脂有关的名词术语	5
第二章 树脂的存在及其物理状态	7
2.1 针叶木中的树脂	7
2.1.1 树脂道	7
2.1.1.1 正常树脂道	7
2.1.1.2 创伤树脂道	10
2.1.2 分泌细胞	11
2.1.3 木射线薄壁细胞和木射线管胞	12
2.1.4 树脂储腔	13
2.1.5 树脂道树脂和薄壁细胞树脂	14
2.1.6 心材和边材的树脂	17
2.2 阔叶木中的树脂	18
2.2.1 木射线薄壁细胞	18
2.2.2 纵向薄壁细胞	19
2.3 纸浆中的树脂	19
2.3.1 纸浆中树脂的物理状态	19
2.3.2 制浆造纸过程中不同物理状态树脂的相互转化	22
2.3.3 不同物理状态的树脂在沉积过程中的行为	24
2.3.4 制浆造纸过程对树脂物理状态的影响	26
第三章 树脂的化学组成	29

3.1 树脂化学组成的分类	29
3.1.1 萜烯及其相关化合物	29
3.1.1.1 单萜烯	30
3.1.1.2 倍半萜烯	35
3.1.1.3 二萜烯	36
3.1.1.4 甾醇	39
3.1.1.5 三萜烯	40
3.1.2 脂肪酸	41
3.1.3 不皂化物	42
3.1.4 碳水化合物	43
3.1.5 多元醇	44
3.1.6 含氮化合物	45
3.1.7 芳香族化合物	45
3.1.7.1 木酯素	45
3.1.7.2 芪	46
3.1.7.3 单宁	47
3.1.7.4 黄酮类化合物	48
3.1.8 无机组分	49
3.2 影响树脂化学组成及其含量的因素	49
3.2.1 不同的树木	50
3.2.1.1 针叶木	50
3.2.1.2 阔叶木	51
3.2.1.3 其他纤维原料	53
3.2.2 树木的不同部位	53
3.2.2.1 心材和边材	53
3.2.2.2 春材和秋材	55
3.2.2.3 树脂道和薄壁细胞	56
3.2.2.4 树皮与木质部	56
3.2.3 树木的生长季节	58
3.3 树脂的化学组成对树脂沉积性能的影响	60

第四章 纸浆中树脂的物理和化学性质	62
4.1 脂肪酸	62
4.1.1 物理性质	62
4.1.1.1 熔点	62
4.1.1.2 溶解度	63
4.1.1.3 沸点与蒸气压	66
4.1.1.4 表面性能	66
4.1.2 化学性质	68
4.1.2.1 羧基的反应	68
4.1.2.2 羧基的 α -H 的反应	69
4.1.2.3 加成反应	69
4.1.2.4 氧化反应	70
4.2 树脂酸	72
4.2.1 物理性质	72
4.2.2 化学性质	73
4.2.2.1 异构化反应	74
4.2.2.2 氧化反应	76
4.2.2.3 氢化反应	77
4.2.2.4 歧化反应	78
4.3 甘油三酸酯	79
4.4 不皂化物	80
第五章 树脂化学成分的分离及分析	81
5.1 树脂的抽提	81
5.1.1 索氏抽提	81
5.1.2 超临界流体抽提	83
5.1.3 Soxhlet 抽提	86
5.1.4 固相抽提	87
5.2 树脂化学成分的分离	89
5.2.1 化学分离法	89
5.2.2 离子交换色谱法	89

5.2.2.1	DEAE-Sephadex 分离	89
5.2.2.2	Amberlite XAD-2 分离	94
5.3	树脂化学成分的仪器分析	95
5.3.1	气相色谱	95
5.3.2	气相色谱-质谱联用	98
5.3.3	高压液相色谱	105
5.3.4	核磁共振	105
5.3.5	凝胶渗透色谱	107
5.3.6	薄层色谱	108
5.3.7	红外光谱	109
第六章	树脂化学组分在制浆造纸过程中的变化	110
6.1	原料的风化	110
6.1.1	原料的贮存形式	110
6.1.2	木材风化过程中树脂化学成分的变化	113
6.1.3	木材的风化对硫酸盐制浆过程的影响	118
6.1.4	木片的风化对纸浆得率的影响	119
6.1.5	木片的风化对纸浆白度的影响	121
6.1.6	木片的风化对纸浆强度的影响	122
6.2	制浆	123
6.2.1	硫酸盐蒸煮	123
6.2.2	亚硫酸盐蒸煮	130
6.2.3	机械制浆	133
6.3	洗涤	134
6.4	筛选	138
6.5	漂白	139
6.5.1	氯化	140
6.5.2	碱抽提	142
6.5.3	次氯酸盐漂白	144
6.5.4	无氯漂白	145

6.5.5 漂白过程中树脂物理状态的变化	148
6.5.5.1 分散树脂	149
6.5.5.2 溶解树脂	150
6.5.5.3 纤维表面的树脂	150
6.6 打浆	152
第7章 树脂沉积的机理及树脂沉积性能的评价方法	153
7.1 制浆造纸厂中树脂沉积的机理	154
7.1.1 粘附在纤维表面上树脂的沉积	155
7.1.2 随纤维、细小纤维和薄壁细胞一起形成的 沉积	156
7.1.3 树脂沉积在压区毛毯中	156
7.1.4 在流体剪切力条件下胶状树脂的沉积	157
7.1.5 蒸发所引起的胶状树脂的沉积	157
7.1.6 乳化和聚结引起的胶状树脂的沉积	158
7.1.7 泡沫的形成和破裂引起的沉积	159
7.1.8 钙皂的沉积	160
7.1.9 树脂在磨浆机内的沉积	161
7.1.10 与外来物质共同形成的沉积	161
7.2 制浆造纸厂常见的树脂问题及其诊断	161
7.3 评价纸浆发生树脂障碍潜力的方法	162
7.3.1 索氏抽提法	163
7.3.2 Gustafsson 法	164
7.3.3 振荡混合法	166
7.3.4 分散树脂计数法	170
7.3.5 树脂染色法	174
7.3.6 液-液抽提法	177
7.3.7 PFI 磨法	178
7.3.8 射电显微镜照相法	179
7.3.9 浮选法	180

7.3.10 碳纤维吸附法	180
第八章 树脂沉积的化学控制	183
8.1 滑石粉	183
8.1.1 滑石粉的化学组成及性质	183
8.1.2 滑石粉控制树脂沉积的机理	184
8.1.3 滑石粉控制硫酸盐浆厂的树脂问题	188
8.1.3.1 滑石粉对树脂的吸附作用	188
8.1.3.2 滑石粉控制树脂沉积的有效性	190
8.1.3.3 滑石粉对消泡剂的吸附作用	190
8.1.3.4 木素对滑石粉吸附能力的影响	192
8.1.3.5 滑石粉在漂白工段对树脂的控制作用	192
8.1.4 滑石粉控制亚硫酸盐浆厂和新闻纸厂的树脂 问题	195
8.1.5 滑石粉的加入地点和加入量	195
8.1.6 滑石粉的分散、计量和填加装置	197
8.1.7 滑石粉控制树脂沉积的优缺点	199
8.2 硫酸铝	199
8.2.1 硫酸铝的水解化学	200
8.2.2 硫酸铝控制树脂沉积的机理	203
8.2.3 硫酸铝控制新闻纸厂树脂沉积的最佳条件	204
8.2.4 硫酸铝加入地点的选择	207
8.2.5 硫酸铝控制树脂沉积应注意的问题	207
8.3 表面活性剂	208
8.3.1 表面活性剂的分类及其性质	208
8.3.2 表面活性剂控制树脂沉积的机理	214
8.3.3 表面活性剂对树脂沉积的控制效果	216
8.3.3.1 非离子表面活性剂	216
8.3.3.2 阴离子表面活性剂	218
8.3.3.3 阳离子表面活性剂	219
8.3.4 表面活性剂的加入地点及应注意的问题	220

8.4 整合剂	223
8.4.1 整合剂的种类	223
8.4.2 整合剂控制树脂沉积的机理	224
8.4.3 整合剂的树脂控制效果及应注意的问题	224
8.5 助留剂	226
8.5.1 助留剂的分类	226
8.5.2 助留剂控制树脂沉积的机理	227
8.5.3 助留剂对树脂沉积的控制效果	228
8.6 树脂沉积的非化学控制	230
8.6.1 根据制浆方法选用适宜的制浆原料	230
8.6.2 对原料进行风化处理	230
8.6.3 充分的洗涤	231
8.6.4 避免泡沫的产生和积聚	231
8.6.5 对设备进行计划的清洗	231
8.6.6 避免温度和 pH 值的波动	231
8.6.7 避免过量使用消泡剂	231
8.6.8 良好的剥皮	231
第九章 树脂沉积的机械控制	232
9.1 制浆厂树脂沉积的机械控制	232
9.1.1 Attis 树脂分离器	233
9.1.2 斜网式树脂分离器	234
9.1.3 喷射式树脂分离器	235
9.2 造纸厂树脂沉积的机械控制	236
9.2.1 打浆过程中去除树脂的装置	237
9.2.2 造纸机上去除树脂的一些装置	237
9.2.2.1 铜网树脂扫除辊	238
9.2.2.2 铜网树脂连续清洗装置	238
第十章 树脂沉积的生物控制	240
10.1 利用脂肪酶水解纸浆中的甘油三酸酯	240

10.1.1	脂肪酶的特性及控制树脂沉积的机理	240
10.1.2	影响脂肪酶生物控制效果的因素	242
10.1.2.1	脂肪酶用量	243
10.1.2.2	pH 值	244
10.1.2.3	温度	244
10.1.2.4	时间	246
10.1.2.5	搅拌方式	247
10.1.3	利用脂肪酶控制树脂沉积的生产实践及其效果	247
10.2	利用 <i>Ophiostoma piliferum</i> 降解木片中的树脂	251
10.2.1	蓝变菌及 <i>Ophiostoma piliferum</i>	251
10.2.2	<i>Ophiostoma piliferum</i> 降解木片中树脂的途径	252
10.2.3	<i>Ophiostoma piliferum</i> 及 CARTAPIP™ 降解木片中树脂的效果	254
第十一章	树脂成分的工业应用	256
11.1	松节油	256
11.2	塔罗油	257
11.3	松香	257
11.4	脂肪酸	258
11.5	单宁	258
11.6	聚阿拉伯糖半乳糖	259
11.7	渗出物	259
11.7.1	胶乳	259
11.7.2	松脂	259
11.7.3	树胶	259
11.7.4	漆	260
参考文献		261

第一章 绪 论

1.1 纸浆中的树脂及其危害

纸浆中除了纤维素、半纤维素和木素以外，还含有少量不溶于水而溶于中性有机溶剂（如丙酮、乙醚和苯醇等）的物质，这些化合物称为有机溶剂抽出物，它代表了植物中的树脂。

针叶木的树脂主要由游离的树脂酸、游离的脂肪酸、甘油三酸酯和不皂化物等物质构成^[1]。这部分物质虽在纸浆中含量较少，但对制浆造纸及产品质量却有很大影响。在制浆造纸过程中，纸浆中的树脂会以多种方式沉积在设备的表面上，从而产生一系列树脂问题^[2]。

对于一个日产几百吨的纸厂（例如新闻纸厂）来说，每天通过制浆造纸设备的树脂总量约有几吨。若这些树脂中有几百克沉积在比较关键的造纸设备的表面上，就会产生非常严重的树脂问题^[3,4]。一个日产800t的针叶木硫酸盐漂白浆厂，每年由于树脂问题而引起的损失高达几百万美元。因此，对于制浆造纸工作者来说加深对纸浆中的树脂及其沉积与控制的理解和认识是十分必要的。

纸浆中树脂的沉积对制浆造纸的影响主要有两个方面，一是树脂的沉积能够导致产品质量的下降；二是树脂的沉积能够影响制浆造纸过程，使产品的产量下降。具体来说，造纸工业中树脂及其沉积物有以下危害：

(1) 在纸浆的洗选漂工段, 纸浆中的树脂沉积在筛浆机筛板、浓缩机下唇板、管道内壁和浆池表面、碎浆机螺旋及纸浆浓度调节器等^[5,6]。最为严重的是, 这些沉积物可能从所沉积的表面上脱落下来, 堵塞筛板和锥形除渣器, 从而大大降低筛选和净化效率^[5~7]。此外, 这些脱落下来的树脂沉积物, 在浆板中形成斑点和尘埃, 从而降低浆板的质量^[5]。

(2) 在纸张抄造工段, 树脂常易沉积在毛毯和吸水箱中^[8]。也可沉积在浆池、筛板、网前箱、造纸网、伏辊、压榨辊、烘缸和压光辊组上^[8,9]。这些沉积物或将降低脱水效率及纸页的匀度和强度, 或可形成树脂斑点和孔洞, 从而使成品的质量下降^[10~13]。此外, 树脂的沉积可引起纸幅的断头, 增加设备的清洗和维修时间, 导致产量下降^[12,13]。

(3) 存在于废水中的树脂, 尤其是树脂酸是非漂白废水毒性的主要来源^[14,15]。纸浆中树脂的存在能够降低纤维间的结合力, 从而降低纸浆的强度^[16], 影响纸浆(特别是绒毛浆)的吸水性^[14]。

1.2 制浆造纸工业中树脂沉积的现状与趋势

在国外, 制浆造纸工业中树脂问题一直是一个非常重要的课题, 每年都有很多该方面的论文发表。尤其是近 20 年来, 研究的范围不再局限于亚硫酸盐浆和机械浆, 对于硫酸盐制浆过程中的树脂问题也给予了较多的研究。另一方面, 鉴于我国造纸工业中纸机状况、制浆方法、制浆原料和废水排放等因素的特殊性, 树脂问题还未引起人们的足够重视。国内关于树脂沉积及其控制方面的研究及相应的出版物还很少。但是, 可以断言, 树脂问题在以后将成为造纸工业中日益突出的问题, 这主要是由下列几个因素决定的:

(1) 环境方面的限制使封闭循环用水系统日趋完善。在制浆

造纸过程中，化学平衡受一系列因素的影响。其中某些因素在一定范围可以控制，如温度、pH 值和钙离子浓度等。然而系统内积聚的化学物质越多，就越难使系统维持化学平衡状态，而系统的平衡是决定树脂是以胶体状态还是以沉积状态存在的重要因素。在封闭系统中，由于纸浆中的树脂不断转化成分散在水中的胶状树脂，从而使胶状树脂的浓度增大，因而使系统中的化学平衡变得相当严峻。一旦平衡被打破，胶状树脂就会发生沉积。这种沉积可在制浆造纸的任何工段，任何时间内发生^[17]。此外，在封闭循环系统内金属离子（如 Ca、Al、Ba 等）浓度的升高也是树脂沉积的一个重要原因^[17]。由此可见，系统用水的封闭循环是树脂沉积恶化的一个重要因素^[5,13,17~20]。

(2) 二次纤维用量的增加。经济和环境方面的原因，使近年来二次纤维的用量有了较大增加。在二次纤维中含有多种添加剂和胶粘物，这部分物质像树脂一样可沉积在设备的表面上，形成“树脂”问题。并在成纸中形成孔洞，从而降低产品质量^[18,21,22]。

(3) 纸机车速的提高。纸机车速的提高是造纸工业发展的必然结果。在较低车速的情况下，树脂在纸机表面的沉积可能不会表现出明显的树脂问题，但随着纸机车速的提高，树脂的沉积就会大大影响纸机的抄造性能和产品的质量。

(4) 制浆用材种类的扩展。由于森林资源的限制，使人们对制浆用木材的选择余地越来越小，制浆用材的种类呈多样化趋势。然而，制浆造纸过程中树脂的沉积与制浆用材的种类关系很大。有的木材在制浆造纸过程中呈现较多的树脂沉积，而有的相对较少。研究表明^[6]，在硫酸盐浆生产中，利用杨木代替针叶木会出现较多的树脂问题。

(5) 碱性抄纸技术的应用。在碱性条件下，树脂的沉积与酸性条件下有很大的不同^[23~25]。系统中的金属离子在碱性条件下会形成无机沉淀物，树脂有可能伴随着这些物质一起沉积下

来^[23]。另一方面,在碱性抄纸过程中常加入较多的填料,如 CaCO_3 、 TiO_2 和白土等。若这些填料不能很好地留着在纤维上,就会积聚在白水封闭系统中,从而导致一系列的树脂问题,例如堵塞毛毯和造纸网,增加树脂沉积量^[23]。

此外,机械浆产量的提高、造纸用助剂的多样化、用户对纸张质量更为严格的要求及某些纸种的低定量化等一系列因素都使得人们对制浆造纸过程中的树脂问题给以更多的重视。

1.3 树脂沉积的控制方法

树脂沉积的控制方法主要有以下几种:化学控制法、机械控制法、生物控制法和工艺控制法。

化学控制法是目前制浆造纸工业最为常用和比较有效的树脂控制方法。它是利用一些树脂控制剂,例如滑石粉、硫酸铝、分散剂或表面活性剂、螯合剂等,使树脂或附着在纤维的表面,或稳定地分散在浆水系统中,从而避免树脂沉积在设备表面上。

生物控制法是利用菌种或酶分别处理木片或纸浆,使其和系统中的树脂发生作用,从而防止树脂沉积的一种方法。生物控制法是90年代才发展起来的一种新的树脂控制法,近几年发展很快并已实现了工业化。该法有两种处理方法:一是利用脂肪酶处理纸浆,分解树脂中的甘油三酸酯,从而达到减少树脂沉积的目的^[26~28];二是利用某种真菌处理木片,它可以显著降低木片表面、树脂道中和薄壁细胞中的树脂,而又不降低木片的白度^[29,30]。

机械控制法是利用机械设备将树脂或某些细小组分从纸浆中分离出去,从而达到降低纸浆中树脂含量的目的。然而这种树脂控制法在近十年的文献资料中已少有报道。

工艺控制法(又称为非化学控制法)是利用一些工艺措施来控制树脂的沉积,这种方法也常为造纸厂所用,并具有良好的效

果。这些工艺措施主要包括：对木材进行风化处理，对纸浆进行充分的洗涤，不同种类的木材采用不同的制浆方法，避免泡沫的产生和积聚，定期清洗设备，尽量避免温度和 pH 值的波动，避免过量使用消泡剂及良好的剥皮等。

制浆造纸厂树脂的沉积机理是十分复杂和多样的，因此不可能仅利用一种控制方法就能全面解决制浆造纸厂的树脂问题，而必须采用多种方法对树脂进行全面系统的控制^[2]。

对于以上几种树脂控制方法将在以后的章节详细介绍。

1.4. 与树脂有关的名词术语

“树脂”一词的使用比较广泛，在造纸工业中“树脂”也有几种含义。它主要指植物纤维原料中或纸浆中的有机溶剂抽合物，也指制浆造纸过程中的一些树脂沉积物，还可以表示某些树脂类的化学品。因此，有必要对“树脂”及其相关的名词术语进行定义。

树脂 (resin) 植物纤维原料或纸浆中能被中性有机溶剂抽提出来的憎水性的有机化合物。例如：针叶木中的树脂成分主要由游离的脂肪酸、游离的树脂酸、甘油三酸酯和不皂化物等物质组成。在制浆造纸过程中，植物纤维原料中的树脂可以由于机械或化学作用而释放出来^[31]。

树脂沉积物 (Pitch deposits) 在制浆造纸过程中沉积在设备或产品表面的粘性有机或无机化合物称为树脂沉积物。有机化合物除木材的树脂成分外，还可能包括消泡剂、松香胶、涂料和碱性施胶剂中的某些成分及纤维等。无机物主要是一些不溶性的金属盐，如 CaCO_3 等^[18]。树脂沉积物的产生在严重时也引起树脂障碍，从而产生一系列树脂问题。

树脂障碍 (Pitch trouble) 由于树脂的沉积，而造成制浆造纸过程受到影响，产品的质量和产量下降的状态称为树脂障

碍。

树脂控制 (Pitch control) 树脂控制是指在制浆造纸过程中, 采取措施从而防止树脂的沉积和沉积物的形成。树脂控制的方法可分为化学控制、机械控制、生物控制和工艺控制等。

有害树脂 (harmful pitch) 有害树脂是指在生产过程中易发生沉积而引起树脂障碍的那部分树脂。树脂的有害性受其化学成分和物理状态影响。

白树脂 (White pitch) 白树脂是指在涂布损纸的回收过程中所发现的白色沉积物。它主要来源于涂料粘合剂, 如 PVAC 或 SBR 等^[18,20]。

粘状物 (stickies) 粘状物通常是指二次纤维回收过程中的油墨残余物、焦油、乳胶、压敏胶和其他有机物所引起的沉积物^[18,20]。

第二章 树脂的存在及其物理状态

植物纤维原料中的树脂在制浆造纸过程中，由于机械力和化学药品的作用可具有不同的物理状态。

本章主要从木材解剖学、木材生理学的观点出发，介绍针叶木和阔叶木中树脂的形成、分泌和存在等。同时，介绍纸浆中树脂的物理状态及与树脂沉积的关系。

2.1 针叶木中的树脂

针叶木中的树脂主要分布在树脂道和薄壁细胞中。

2.1.1 树脂道

在针叶木的横切面和弦切面上，可分别看到垂直树脂道 (Vertical resin canals) 和水平树脂道 (horizontal resin canals)。针叶木的树脂道是由分泌细胞、死细胞和伴生薄壁细胞围成的含有树脂的腔道。

针叶木的树脂道有两类：一类是正常的树脂道，另一类可能是由于受伤而产生的创伤树脂道 (traumatic resin canals)。

2.1.1.1 正常树脂道

正常树脂道是松 (*Pinus*)、云杉 (*Picea*)、落叶松 (*Larix*) 和黄杉 (*Pseudotsuga*) 的固定特征。在针叶木中正常树脂道根据其分布特征分为两种：垂直树脂道是与木材纤维同一方向排列的树脂道；水平树脂道则呈辐射状排列，并分布于木射线之中。

垂直树脂道相互间很少直接沟通，却往往与水平树脂道接触而相互沟通。水平与垂直树脂道的沟通，使得分布于各年轮中的树脂道形成一个树脂道系统。据统计， 1cm^3 的木材中，水平和垂直树脂道的结合数量达数百个之多^[32]。

垂直树脂道的周围由薄壁细胞构成，可分成三层：分泌细胞（又称为上皮细胞，epithelial cells）构成树脂道的腔壁；另外两层分别是死细胞层和伴生薄壁细胞层（见图 2-1）。

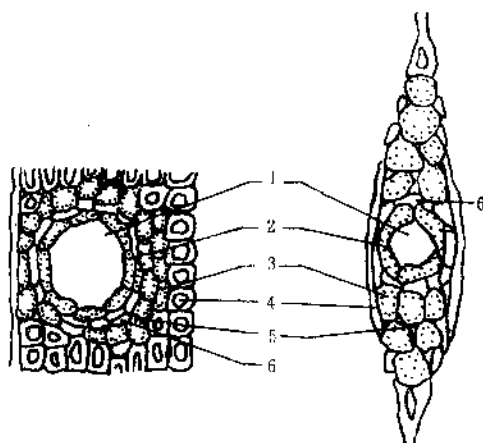


图 2-1 垂直树脂道和水平树脂道的结构

1—树脂道腔 2—分泌细胞 3—伴生薄壁细胞
4—管胞 5—细胞间隙 6—死细胞

分泌细胞的特征使松与云杉、落叶松和黄杉有所不同。松属的分泌细胞的细胞壁极薄，没有纹孔，没有木质化。而云杉、落叶松和黄杉等属的分泌细胞大多壁厚、一般具有纹孔，并可能已木质化。

水平树脂道的构造与垂直树脂道相似。水平树脂道的数量较垂直树脂道多，但分泌的树脂量较垂直树脂道少^[32]。

正常树脂道的大小不仅取决于它们是垂直树脂道还是水平树脂道，而且还随树木的属乃至树种的不同而不同。此外，树脂道的大小也与树木年龄和生长率有关。

松属正常的垂直和水平树脂道最大。在某些树种中，例如糖松的垂直树脂道平均直径为 $175 \sim 225 \mu\text{m}$ ，最大可达 $300 \mu\text{m}$ 以上；但是北美短叶松 (*Pinus banksiana*) 的树脂道较小，垂直树脂道很少超过 $100 \mu\text{m}$ ，云杉、黄杉和落叶松属的树脂道明显小于松属。在这些木材中，垂直树脂道最大直径偶尔达 $150 \mu\text{m}$ ，平均仅为 $50 \sim 90 \mu\text{m}$ 。云杉属的北美西岸云杉 (*Pinus sitchensis*) 比较突出，其树脂道尺寸稍大些^[33]。

就同一树种而言，垂直树脂道总是比水平树脂道大一些。例如，北美巨叶松垂直树脂道的弦向直径，包括分泌组织，最大达 $200 \mu\text{m}$ ，平均 $135 \sim 350 \mu\text{m}$ ，然而水平树脂道的径向直径通常小于 $80 \mu\text{m}$ 。

垂直树脂道的直径随树木年龄的不同而有所变化^[32]。在 85 年生的松树外层，树脂道的直径为 $90 \sim 100 \mu\text{m}$ ，而 130 年生的松木为 $110 \sim 130 \mu\text{m}$ 。

树脂道几乎全部分布在晚材中，它们约占木质部体积的 $0.1\% \sim 0.7\%$ ，最大可占 1% ^[32]。

Mergen 等人对相隔 5 年的 10 株沼泽松 (*Pinus caribaea*) 进行了研究，取得了以下结果^[32]：

(1) 单位面积内水平树脂道的数量在幼龄时为最高，随后迅速递减，直到 20 年后，数量变化不大。

(2) 树脂道的数量和大小随年龄宽度的增加而增加，但由于年龄的增加，年轮宽度逐渐减小，而使这些数值趋于稳定。

(3) 树脂道尺寸大小的平均值，随年轮年限的递减而减小。

图 2-2 是年轮宽度和树脂道数目的关系。横坐标表示年轮的宽度 (cm)，纵坐标表示树脂道的数目。曲线 I 表明了树干中 1cm 长的年轮内树脂道数目和年轮宽度关系的变化情况；曲线 II