

血液灌流材料研究进展

张建达,袁 直<sup>\*</sup>

(南开大学高分子化学研究所吸附分离材料国家重点实验室,天津 300071)

摘要:血液灌流技术以其显著的疗效和新颖的治疗方法而发展迅速,目前其应用正日趋广泛,所治疗的疾病已经从药物中毒、肝肾疾病扩展到一系列免疫性疾病。本文综述了血液灌流材料的发展和研究进展,按照种类不同对材料的性质和应用进行了阐述,为血液灌流材料的制备和应用提供参考。

关键词:血液灌流;材料;综述;吸附

血液净化疗法( Blood Purification) 是生物医学工程的组成部分。它是指通过体外循环技术,矫正血液成分质量和数量的异常。对于不可逆的血液病理状态,血液净化疗法是十分有效的治疗方法。通过血液净化治疗,可恢复正常的血液成分,激活患者的自然功能<sup>[1]</sup>。血液净化疗法对一般疗法无效的顽固性、疑难性疾病有着显著疗效<sup>[2]</sup>。近年来,随着高分子材料科学和高分子工业的迅速发展,血液净化疗法的应用也日益广泛。

在生物医学工程上,血液净化的典型应用是血液灌流,血液灌流装置如图 1 所示。血液灌流的主要机制是吸附作用,故也称为血液吸附。目前通常在血液灌流中使用的吸附剂主要是活性炭类、多糖类和合成树脂类(见表 1),它们通称为血液灌流材料。多糖和合成树脂除本身可以用于血液灌流外,还可以通过共价键固载各种修饰基团,包括各种免疫基团来进行选择性吸附,这也是目前血液灌流材料研究的主要方向。血液灌流要求材料在血液相容性、吸附选择性、机械强度、耐灭菌性能(热稳定性)诸方面都有一定的要求。血液灌流材料的研制在血液灌流领域有着非常重要的作用,是决定灌流效果的关键因素。

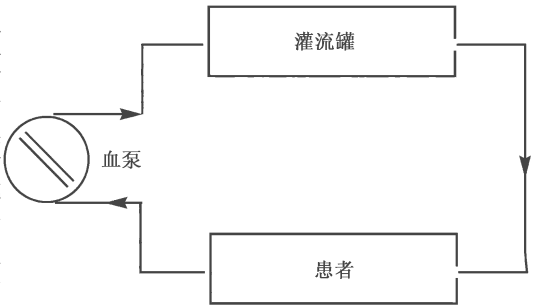


图 1 血液灌流装置

Figure 1 Apparatus of Hemoperfusion

表 1 血液灌流吸附剂  
Table 1 Hemoperfusion adsorbents

| 材料   | 主要代表                    | 优点                                                | 缺点                                                   |
|------|-------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 活性炭  | 包膜活性炭、炭化树脂              | 成本较为低廉,来源广泛,材料制备容易、简单,对小分子的外源性毒物清除比率很高,且比较适用于急性解毒 | 机械强度不高,需要包膜,对包膜技术要求较高。吸附选择性不佳,对水、电解质、尿素和大、中分子物质清除率较低 |
| 多糖   | 琼脂糖、壳聚糖、纤维素             | 血液相容性好,无毒性,化学修饰容易                                 | 强度较低,吸附量较小,结构检测困难                                    |
| 合成树脂 | 离子交换树脂、PMMA、大孔聚苯乙烯、聚乙烯醇 | 化学稳定性好,机械强度高,不易脱落微粒;选材广泛,制备过程中可以人为的控制其化学和物理结构     | 血液相容性需要改进,部分树脂需要包膜                                   |

1 活性炭(Active carbon) 血液灌流材料

活性炭(Active carbon)比表面积可达 1000 m<sup>2</sup>/g,孔径较小,孔隙率高,孔径分布较宽,是一种良好的广

基金项目:“973”(G1999064707);国家自然科学基金(50373021);博士点基金(批准号:20030055038)以及南开大学科技创新基金资助;

作者简介:袁直(1961—),女,教授,博士生导师,从事生物医用高分子材料研究,E-mail: zhiy @nankai. edu. cn.

谱吸附剂。目前常用的活性炭常由椰子壳、木材、聚乙烯醇、石油等材料在有控制氧化条件下高温制得。

1966 年, Chang<sup>[3]</sup> 将活性炭包膜用于血液灌流。这是将人工细胞原理应用于活性炭微胶囊技术(见图 2)。包膜活性炭解决了在血液灌流中由于血液相容性差和微小炭粒脱落造成血栓塞和白血球、血小板下降问题, 使活性炭血液灌流进入临床应用阶段。

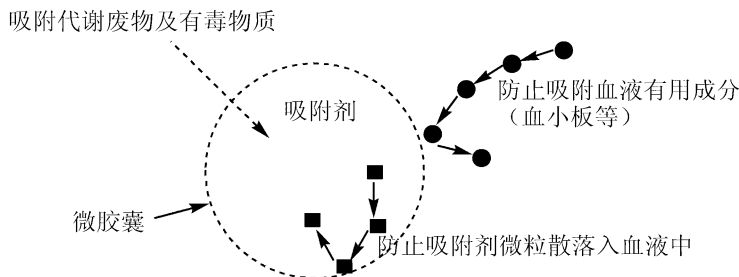


图 2 微胶囊吸附剂

Figure 2 Microcapsule adsorbent

汤先觉等<sup>[4]</sup> 研制了交联琼脂包膜活性炭, 经临床试用于抢救外源性药物中毒及慢性肝性脑病、流行型出血热等均获得较满意的疗效, 他们还进一步研究了琼脂包膜凹凸棒的新型吸附剂。2004 年南京大学彭艾等<sup>[5]</sup> 把纤维素包膜活性炭用于血液灌流治疗敌敌畏中毒。经临床治疗血液灌流组的患者与对照组相比, 各种临床指标均有明显改善, 死亡率从 34.1% 降至 7.5%。

此外, 20 世纪 80 年代研制开发的碳化树脂实际上是一种人工合成活性炭<sup>[6]</sup>, 是从各种高分子树脂经高温碳化制得。碳化树脂在提高吸附性能的基础上又具有好的机械强度, 克服了一般活性炭的微粒脱落、血液相容性差需要包埋或包裹的缺点, 而且又具有大孔结构及可调节孔径大小分布的特点, 有望选择吸附血液中特定的有毒物质。最近 Malik 等<sup>[7]</sup> 报道了磺酸盐聚苯乙烯树脂制得的中空碳化树脂吸附细胞活素, 在取得良好吸附效果的同时吸附剂的机械强度也满足血液灌流的要求。

## 2 多糖血液灌流吸附材料

多糖类材料是近年发展较快的一种医用高分子吸附分离材料。琼脂糖、壳聚糖和纤维素等均属于多糖类材料, 多糖是所有生命有机体的重要组分, 在控制细胞分裂和分化、调节细胞生长衰老以及维持生命有机体的正常代谢等方面有重要作用。南开大学袁直等<sup>[8,9]</sup> 用戊二醛交联壳聚糖吸附模拟中分子毒物, 并进一步研究了二乙烯氨基修饰壳聚糖的吸附性能<sup>[10]</sup>。结果显示, 经氢化还原的壳聚糖树脂对中分子物质有着较强的选择性吸附, 对分子量 1100 左右的肽类物质吸附达到最高。

一般来说多糖类材料用于血液灌流时, 需要进行一定的修饰以提高其对目标物质的吸附选择性。在目前发展迅速的免疫吸附领域, 多糖类材料作为一类载体应用非常广泛(详见免疫吸附材料部分)。

琼脂的主要成分是琼脂糖, 它的结构单元是 *D*-半乳糖和 3, 6-脱水-*L*-半乳糖。在琼脂糖分子里含有三重螺旋轴的左手双螺旋结构, 螺距为 1.90nm, 水分子就含在螺旋的空穴内。琼脂糖骨架是由许多琼脂糖链互相盘绕形成的绳状琼脂糖束。琼脂糖束间的相互结合不是共价键, 许多人认为它们之间的结合主要是通过氢键。

壳聚糖又名甲壳胺或脱乙酰甲壳素, 国外商品名为 Flonac N, 是一种碱性氨基多糖物质, 为稳定态的固体。壳聚糖分子上的活性基团为氨基而不是乙酰胺基, 分子间强烈的氢键作用消失, 因此壳聚糖可溶于稀酸之中, 但仍不能溶于水及大多数有机溶剂中。

纤维素的化学结构是由许多  $\beta$ -*D*-葡萄糖基通过 1-4 糖苷键连接起来的线形高分子化合物。纤维素链中每个葡萄糖基环上有三个活泼的羟基: 一个伯羟基和两个仲羟基。因此, 纤维素可以发生一系列与羟基有关的化学反应, 如酯化、醚化、亲核取代等, 也可以发生接枝共聚和交联。纤维素树脂在表面有较多的孔(即具有较大表面积)的同时还具有相当好的强度, 是应用于血液灌流比较理想的材料。

### 3 离子交换树脂血液灌流材料

除活性炭类吸附材料外,还有一类应用较广的血液灌流材料是合成树脂。它分为吸附树脂和离子交换树脂两大类。离子交换树脂是一类化学吸附剂,它用于解毒研究是比较早的。离子交换树脂应用在血液灌流中,虽然离子交换树脂作为血液灌流的吸附剂,具有交换容量大,交换速度快的优点,但它对血液离子平衡和 pH 有严重影响,需谨慎使用。

1968 年 Sawchak 报道了以 Dowex 1×2 强碱树脂去除胆红素。Sideman<sup>[11]</sup>对清除胆红素作了许多研究,提出以 MR 阴离子交换树脂清除胆红素可以获得很好的效果,并且讨论了各种离子型式的 MR 树脂清除胆红素的能力及对血液 pH 的影响。1987 年,藤田良之等<sup>[12]</sup>研究了具有磺酸基的磺化 P-乙炔基苯酚-二乙炔基苯共聚物对尿素的吸附性能,并指出其对尿素的吸附是靠磺酸基中的氢原子与尿素中的氮原子之间的氢键。1988 年, Tazaki<sup>[13]</sup>研制出了一种含疏水层和亲水层的球状离子交换树脂吸附剂,这种酸性离子树脂由内至外依次包裹了硅树脂清漆、羟丙基纤维素及硅树脂清漆。这种吸附剂对尿素有很强的吸附能力,但并不影响血液的 pH 值,这一点优于传统的离子交换树脂。

### 4 吸附树脂血液灌流材料

吸附树脂分为极性吸附树脂和非极性吸附树脂两大类。在一般情况下,极性吸附树脂容易吸附极性的水溶性物质,非极性吸附树脂对一些脂溶性物质具有更好的吸附性能。早期一般认为吸附树脂不必包膜,但近年来通过动物实验和临床观察,发现吸附树脂也有微粒脱落和破坏血液有形成分的副作用,故也主张包膜后再用于血液灌流治疗,其包膜材料与活性炭类似。

吸附树脂用于血液灌流是由 Rosenbaum 的研究工作开始的。1970 年, Rosenbaum 用不包膜的 Amberlite XAD-2 吸附树脂进行了血液灌流,开创了将吸附树脂用于血液灌流的先例<sup>[14,15]</sup>。动物实验和临床结果证明 Amberlite XAD-2 吸附树脂对药物中毒具有良好疗效。1976 年, Rosenbaum 又用 Amberlite XAD-4 吸附树脂对急性药物中毒患者进行了血液灌流,疗效更好。此种树脂对某些脂溶性有毒物质的吸附功能超过了活性炭<sup>[6]</sup>,但仍导致白细胞和血小板的下降<sup>[17]</sup>。Balhuir 在 1978 年提出了以 XAD 树脂清除体内代谢产物胆酸的报告,同时 Wolfgang 详细研究了 Amberlite XAD 系列树脂对各种胆汁酸的吸附效果,并且讨论了树脂的极性与被吸附物之间的作用关系。Wendler 等<sup>[18]</sup>用不同生物相容性物质覆盖的聚二乙炔苯微球进行血液灌流去除  $\beta_2$  微球蛋白,发现各项指标良好,有较好的血液相容性。

我国在吸附树脂血液灌流材料方面的研究也取得了丰硕的成果,挽救了很多严重中毒患者的生命。1982 年,何炳林等研制成功了一种带有氰基的大孔吸附树脂 NKA-9,主要用于吸附腹水中胆红素。1987 年,何炳林等合成了 NK-110 树脂,可以去除大分子有毒物质,如游离胆红素、胆汁酸等,并对其吸附性能进行了表征。1999 年,南开大学郭贤权等<sup>[19,20]</sup>以大孔交联聚乙烯醇共聚物为基体,制备了质子化氨基吸附剂,发现其对水溶性及血清中的游离和结合胆红素具有较好的吸附性能,且血液相容性良好。同年,他们合成了苯乙烯型大孔吸附树脂——吸附芳香氨基酸以缓解严重肝病或肝昏迷的临床症状,具有重要的临床价值。1999 年袁直等<sup>[21]</sup>用三乙烯四胺和 1,6-己二胺等修饰的大孔聚丙烯酸甲酯(PMMA)载体进行胆红素吸附,对胆红素吸附率超过 80%。对 PMMA 进行二甲胺修饰制得的吸附剂,在徐建宽等<sup>[22]</sup>报道了通过环氧化的交联聚乙烯醇球首先与乙二胺或多乙烯多胺进行胺化反应,由此获得不同长度悬臂,而后固载磺酸基团,并将这种吸附剂用于去除低密度脂蛋白。下面简单介绍几种常见吸附树脂。

丙烯酸酯类树脂是一种研究较多的非离子型水溶胶。其交联后制得的树脂具有交换容量高,抗有机物污染性能好等优点<sup>[23]</sup>。聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)是一种常用的丙烯酸酯类树脂。它具有机械强度高,不易破碎,易合成,后期处理方便,价格便宜等优点。其树脂骨架为交联的烷基结构,是疏水性骨架,树脂表面具有大量酯基结构,为亲水性表面,具有良好的血液相容性。

聚苯乙烯机械强度好,物理化学性质稳定,应用于血液灌流较早。Davankov 等<sup>[24]</sup>对此课题做了深入研究,新近报道了含高比例中孔(在 2~20nm 范围)的高交联聚苯乙烯,合成原理为二乙炔基苯(或苯乙

烯和二乙烯基苯的共聚) 在聚苯乙烯的 $\Theta$ 溶剂(介于良溶剂和沉淀剂之间)存在下悬浮聚合。这种聚苯乙烯具有良好的机械强度, 且其直径在 0.3~0.8mm 的范围内, 适合进行全血或血浆灌流。而且它对于小分子毒物有很高的吸附容量。该树脂对 $\beta_2$ -球蛋白( $\beta$  2M)有很好的吸附性能。

聚乙烯醇(PVA)是人们最熟悉的水溶性聚合物之一, 一般利用聚醋酸乙烯酯水解得到, 工业品是白色粉末。聚乙烯醇分子具有 1,3-二醇及 1,2-二醇两种结构, 其中主要结构是 1,3-二醇结构, 即头-尾结构。聚乙烯醇的这种结构使其具有良好的亲水性, 较低的毒性及容易修饰等优点, 因此被以膜和水凝胶的形式广泛用于酶固定化及血液净化等生物医学领域。

## 5 免疫吸附血液灌流材料

免疫吸附材料的研究开始于 20 世纪 50 年代, 它是将特定的高度专一性的抗原或抗体物质固定在吸附载体材料表明制成的吸附材料。常用的载体有琼脂糖凝胶、聚丙烯酰胺凝胶、聚羟乙基异丁烯酸酯凝胶等。通过抗原抗体的免疫反应或物理化学作用, 免疫吸附材料可以从血液中特异性的吸附并除去与免疫有关的致病因子。

1979 年, Termann<sup>[25]</sup> 将研制出固定 DNA 吸附材料, 用于体外循环免疫吸附诊治系统性红斑狼疮及肾炎取得成功, 免疫吸附疗法日益受到临床医学的重视。1982 年, Yamazaki 等采用聚乙烯醇凝胶树脂连接氨基酸作为免疫吸附材料, 通过血液灌流来治疗类风湿关节炎, 经灌流后病人关节疼痛减轻, 其皮肤溃疡及血管炎症好转<sup>[26]</sup>。1990 年, Broun 等用交联聚丙烯酸甲酯与二、三和四胺反应合成了含胺胆红素吸附剂, 这种在结构中既存在亲水性的氨基又有疏水性的亚甲基, 可利用他们的协同作用来提高其对胆红素的吸附效果。近几年, 国外较多应采用固定多粘菌素 B、聚丙烯酰胺、二乙烯三胺基纤维载体吸附内源性毒物, 并部分用于临床实验<sup>[27,28]</sup>。2003 年, 土耳其的 Rad 等<sup>[29]</sup> 报道了在磁性甲基丙烯酸羟乙酯(*m*PHEMA)微球上固载人血清白蛋白(HSA)制得的吸附材料进行血液灌流去除血浆中胆红素。其中 *m*PHEMA 是经特别的悬浮聚合制得的磁性微球状聚合物, 磁性微球相对于传统的非磁性微球有很多优点, 如低压降, 高传质率和较好的液固接触, 此外还可以消除内扩散限制。经 HAS 固载, 吸附剂对胆红素的吸附能力从 0.47mg/g 提高到 64.7mg/g。Sato, Shoji 等<sup>[30]</sup> 将多粘菌素 B 涂附在血滤器中空纤维的内壁上制得的吸附罐, 称为 PMX-F, 可以较好的清除血浆中的内毒素, 目前这种吸附材料已经应用于临床治疗内毒素血症和革兰氏阴性菌感染, 并可用于系统性炎症反应综合征(SIRS), 取得了不错的效果。Nakamura 等<sup>[31~36]</sup> 报道了用 PMX-F 对脓毒血症患者进行血液灌流, 发现对改善患者体内氨基酸失衡、控制内毒素和细胞活素的浓度有较好的效果。Suzuki 等<sup>[37]</sup> 于 2003 年将 Lixelle 柱(以纤维素为载体的免疫灌流柱)用于血液灌流去除 $\beta_2$ 微球蛋白治疗 DRA。

在免疫吸附材料领域, 南开大学分子生物所的俞耀庭等做了很多工作。1988 年, 他们用小牛胸腺 DNA 与火棉胶混合并吸附在大孔炭化树脂上, 对数十例红斑狼疮患者进行血液灌流, 并取得良好结果。2000 年, 他们<sup>[38]</sup> 报道了把热聚 IgG 键合到琼脂糖球上, 用于吸附类风湿关节炎致病因子。经对重症类风湿患者血清和动物全血的灌流实验, 该吸附材料对 RF 吸附率很高, 且其活性稳定, 对白蛋白破坏小, 血液相容性和机械强度均不错。该课题组<sup>[39]</sup> 探讨了用以琼脂糖为载体, IgG 为配基, 通过碳酰二咪唑(CDI)活化的方法制备的免疫吸附剂, 通过清除患者体内高含量的 IgA, 来治疗 IgA 肾病。该课题组的颜伟荣等<sup>[40]</sup> 根据疏水基团和乙酰胆碱受体抗体的相互作用, 研制了特异性吸附乙酰胆碱受体抗体的免疫吸附材料, 发现质量分数为 6% 的纤维素球形载体用环氧氯丙烷法活化并用戊二醛处理后固载 L-色氨酸制得的吸附剂对抗体的吸附能力较好。2003 年该课题组程焱等<sup>[41]</sup> 报道了以纤维素为载体引入胆固醇和磺酸基团, 根据离子间吸引力和疏水基团间亲和原理设计的双亲型吸附剂。经模拟吸附实验和动物灌流实验, 发现该双亲型吸附剂对于低密度脂蛋白均有明显的吸附效果。2004 年他们<sup>[42]</sup> 报道了用纤维素固载赖氨酸用于血液灌流去除细菌内毒素。经血液灌流实验, 新西兰白鼠体内的内毒素含量明显下降(从 5.56 EU/mL 降至 0.41 EU/mL), 同时其肝肾功能均比对照组有明显改善。同时该吸附剂机械强度、血液相容性和细胞毒性方面均表现良好。1999 年, 南开大学高分子所郭贤权等<sup>[43]</sup> 以醋酸乙烯酯为单体, 二乙烯苯为

交联剂,制得大孔共聚物,经皂化、活化后,偶联 IgG 制得免疫吸附材料,其对人血清中的乙型肝炎表面抗原(HBsAg)具有良好的吸附性能,且稳定性好。广州第一军医大学曾庆兵等<sup>[44]</sup>报道了用甲基丙烯酸缩水甘油酯和异氰尿酸三烯丙酯共聚得到的大孔吸附剂(固载氨基酸)进行血液灌流,去除免疫复合物。张国亮等<sup>[45]</sup>报道了用 Cibacron Blue F3GA 修饰尼龙制得的膜进行血液灌流,对胆红素的吸附率可达 58.8%。

## 6 血液灌流高分子材料展望

经过半个世纪的发展,随着高分子材料和免疫学的快速发展,血液灌流材料的发展前景更为广阔。当前研究的热点一方面是要研制在血液相容性、机械强度、物理化学稳定性等方面更为适用于血液灌流的高分子材料,扩大血液灌流技术的应用范围,改善血液灌流技术的临床效果。另一方面是在现有血液灌流载体材料的基础上,结合医学的最新成果,研制具有特异性吸附功能的免疫吸附材料。在理论方面,目前血液灌流材料的研究已经深入到界面理论(吸附剂与血液界面越低,吸附剂的血液相容性越好)和微相分离结构理论(当吸附剂表面同时含有亲水区并保持适当的分配比时,吸附剂具有良好的血液相容性)。

血液灌流疗法可直接从患者血液中清除病原物或毒素,调节机体内微环境的稳定性,从而达到缓解和治疗疾病的目的,效果显著,甚至可能出现“起死回生”的效果<sup>[46]</sup>。作为一种新兴的医疗技术,血液灌流技术将逐步得到更为广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 马建标. 功能高分子材料. 北京: 化学工业出版社, 2000. 91~92.
- [2] Adham M. Asiaio J, 2003, 49(6): 621~632.
- [3] Chang T M S. Can J Physiol Pharm, 1969, 47: 1043~1050.
- [4] 陈跃明, 汤先觉, 徐昌喜, 等. 生物医学工程学杂志, 1990, 7(3): 173.
- [5] Peng A, Meng F Q, Sun L F, et al. Acta Pharmacol Sin, 2004, 25(1): 15~21.
- [6] 何炳林, 黄文强. 离子交换与吸附树脂. 上海: 上海科技教育出版社, 1995. 356~366.
- [7] Malik D J, Warwick G L, Venturi M, et al. Biomaterials, 2004, 25(15): 2933~2940.
- [8] 王虹, 袁直, 等. 高等学校化学学报, 2002, 23(1): 75~77.
- [9] 王虹, 袁直, 等. 中国科学(B), 2001, 31(4): 297~304.
- [10] Yuan Z, Yu M, Li J H, et al. Biomaterials, 2005, 26: 2741~2747.
- [11] Sideman S, et al. Trans Amer Soc Artif Intern Organs, 1981, 27: 434.
- [12] 藤田良之, 冈崎进. 日本化学会志, 1987, 8: 1530~1537.
- [13] Seisuke T. Jpn Kokai tokkyo koho 6120561. 1988~01~29.
- [14] Rosenbaum J L, Wisten S, Kramer M S, et al. Trans Am Soc Artif Intern Organs, 1970, 16: 134~140.
- [15] Rosenbaum J L, Kramer M S, Moros J, et al. New Eng J med, 1971, 284: 874~879.
- [16] Rosenbaum J L, Kramer M S, Moros J, et al. Arch Int Med, 1976, 136: 263~270.
- [17] Sideman S, et al. Trans Amer Soc Artif Intern Organs, 1981, 27: 434.
- [18] Wendler T, Duhr C. Int J Artif Organs, 2003, 26(6): 467~476.
- [19] 郭贤权, 吴向东, 徐家毅, 等. 离子交换与吸附, 1999, 15(1): 1~7.
- [20] 郭贤权, 吴向东, 徐家毅, 等. 离子交换与吸附, 1999, 15(2): 151~155.
- [21] 袁直, 魏斌, 等. 高等学校化学学报, 1999, 20(6): 903~905.
- [22] 徐建宽, 何炳林. 高等学校化学学报, 2002, 23(7): 1421~1424.
- [23] 何炳林, 黄文强. 离子交换与吸附树脂. 上海: 上海科技教育出版社, 1995, 338~350.
- [24] Davankov X, Pavlova L, Tsyunupa M, et al. J Chromatogr B, 2000, 739: 73~80.
- [25] Teman D S, Sairanan M R. J Chromatogr, 1979, 203: 143~150.
- [26] Grootendorst A F. Blood Purif, 1993, 11: 209~221.
- [27] Mitzer S, Schneidewind J, Faldenhagen D. J Artificial Organs, 1993, 57(9): 775~781.
- [28] Aoki H, Kodama M, Tani T. Am J Surg, 1994, 167: 412~417.
- [29] Rad A Y, Yavuz H. Macromol Biosci, 2003, 3(9): 471~476.
- [30] Sato T, Shoji T. Ther Apher Dial, 2003, 7(2): 252~258.

- [31] Nakamura T, Kawagoe Y. Blood Purif, 2003, 21(4-5): 282 ~ 286.
- [32] Nakamura T, Matsuda. Dial Transplant, 2003, 32(10): 602 ~ 611.
- [33] Shoji H. Ther Apher Dial, 2003, 7(1): 108 ~ 114.
- [34] Shimizu T, Hanasawa K. Blood Purif, 2003, 21(3): 237 ~ 243.
- [35] Imaiizumi, Hitoshi. Anesthesiology Abstracts of Scientific Papers Annual Meeting, 2002. Abstract No. A-368.
- [36] Kohro, Shinji. Anesthesiology Abstracts of Scientific Papers Annual Meeting, 2002. Abstract No. A-357.
- [37] Suzuki K, Shimazaki M. Ther Apher Dial, 2003, 7(1): 104 ~ 107.
- [38] Fu C X, Yu Y T, Chen C Z. Artif Cells Blood Substit Immobil Biotechnol, 2000, 28( 5): 409 ~ 414.
- [39] 褚佳强, 俞耀庭, 等. 离子交换与吸附, 2002, 18( 4): 369 ~ 373.
- [40] 颜伟荣, 俞耀庭, 等. 高等学校化学学报, 2002, 23( 10): 1887 ~ 1890.
- [41] Cheng Y, Wang S Q, Yu Y T. Biomaterials, 2003, 24( 13): 2189 ~ 2194.
- [42] Fang H, Wei H, Yu Y T, Biomaterials, 2004, 25( 23): 5433 ~ 5440.
- [43] 郭贤权, 陈政, 等. 离子交换与吸附, 1997, 13( 2): 203 ~ 206.
- [44] Zeng Q B, Wu L D. J Chromatogr B, 2003, 789( 2): 265 ~ 272.
- [45] Xia B L, Zhang G L. J Membr Sci, 2003, 226: 9 ~ 20.
- [46] 何炳林. 中国化学会第二届离子交换与吸附科学讨论会论文预印集. 1983. 1 ~ 6.

## Progress in Hemoperfusion Material

ZHANG Jian-da, YUAN Zhi

(The State Key Laboratory of Functional Polymer Materials for Adsorption and Separation,  
Institute of Polymer Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** With remarkable curative effect and novel treatment method, hemoperfusion develop rapidly, and its application is extensive day by day at present. Now hemoperfusion is already used from drug poisoning, liver and kidney disease to many autoimmune diseases. This review survey development and study progress of hemoperfusion sorbents, and discusses the character and application of different sorbents.

**Key words:** Hemoperfusion; Material; Adsorbent

(上接第 10 页)

## Propagation Rate Constants for the Cationic Polymerization of Vinyl Monomer

QIU Ying-xin, WU Yi-xian<sup>\*</sup>, XU Xu, RAN Fen, WU Guan-ying

(Beijing University of Chemical Technology, Key Laboratory of Science and Technology of Controllable  
Chemical Reactions, Ministry of Education, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The methods including conductivity, adiabatic calorimetry, amine retardation, stopped-flow spectroscopy and diffusion clock method were used to determine the propagation rate constants in cationic polymerization of vinyl monomers. The propagation rate constants ( $k_p^+$  and  $k_p^\pm$ ) for carbocations including free ion and ion pairs with different chemical structure in the cationic polymerization of alkyl vinyl ether, isobutylene, styrene and its derivatives are introduced.

**Key words:** Cationic polymerization; Rate constant for propagation; Alkyl vinyl ether; Styrene; Isobutylene