

第八章 磁性高分子材料

第一节 概述

一、 磁性材料的进展史

从几千年前，我们的祖先觉察磁石可以吸引铁的现象，并在世界上最先制造用磁石作为指示方向和校正时间的应用，这一制造对航海业的进展起着重要的推动作用。人类留意于磁性材料的性能特点、制造、应用等的争论、开发的进展历史只有百年。随着社会进展和科技进步，磁性材料已经形成了一个浩大的家族。

磁性材料是当前仅次于半导体材料的在高技术与传统技术中都具有广泛应用的一类功能材料。其应用已经从传统的技术领域进展到高技术领域，从社会生产扩大到百姓家庭，从单纯的磁学范围扩展到与磁学相关的穿插学科领域。磁性材料可用于制作变压器、马达、扬声器、磁致伸缩振子、磁记录介质、各类传感器、阻尼器、磁场发生器、电磁吸取体等各种各样的磁件。各种器件广泛应用于制造汽车、微机、音响设备、电视机、录像机、
、洗衣机、吸尘器、电子钟表、电冰箱、空调、电饭锅、电表等产品。

在材料的进展史上，磁性材料领域曾长期为含铁族或稀土金属元素的合金和氧化物等无机磁性材料所独占。年月以前为金属磁体的一统天下；
年月为铁氧体的兴盛时代，除电力工业以外，各应用领域中以铁氧体为主要磁性材料；年月以来，纳米构造的金属磁性材料的崛起，成为铁氧体的有力竞争者。见图。

但是，由于传统的磁性材料必需经过高温冶炼的过程，而且比重大、韧性差、硬度高、加工成型困难、磁损耗大等缘由使传统的无机磁性材料在高技术和尖端科技的一些方面受到了很大限制。如电子工业的微型化，空间动力系统、宇宙航行掌握系统的轻型化，以及一些简单外形的磁件的制备等。而有机磁性材料因其构造种类的多样性，可用化学方法合成，可得到磁性能与机械、光、电等方面结合的综合性能，具有磁损耗小、质轻、柔韧性好、加工性能优越等优点，

在超高频装置、高密度存储材料、吸波材料、微电子工业和宇航等需要轻质磁

性材料的领域有很大的应用前景。

一般的有机化合物，其组成原子之间以电子对形成共价键，因此不显示磁性(即反磁性)。有机高分子和磁性材料虽然有很多重要的关系，例如，磁带、磁盘、橡胶磁石等，但在这些材料中，高分子化合物只是作为磁性金属的分散基材而被利用。

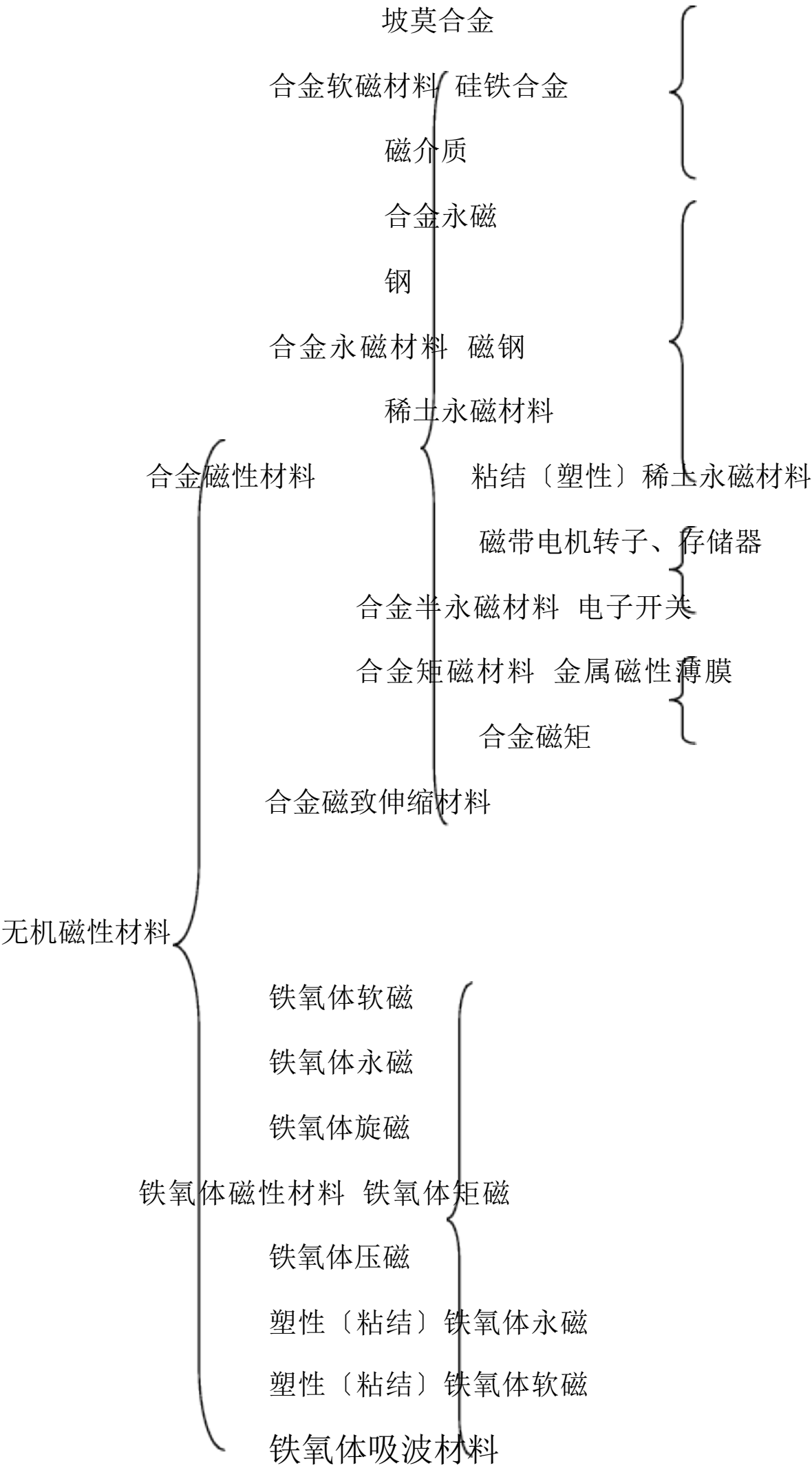


图 无机磁性材料或以无机物质为主的混合磁性材料

与有机化合物不显示磁性的固有概念相反，有机磁性材料作为一种全的磁石诞生，其争论设计的范围很广，既有以过渡金属离子为自旋源的络合物也有金属离子与以有机自由基为配基的复合体，以及纯有机自由基分子。例如， $\text{[Co(dpp)}_2\text{)]}^+$ 、 $\text{[Co(dpp)}_2\text{)]}^+$ 等开发的十甲基二茂铁·四氟乙烯在居里温度 $T_c = 10\text{ K}$ ，以下是强磁性体。还有一些关于低分子有机自由基结晶的报道，但由于其分子间的相互作用是以分子间空间为介导的，一般都很低，在以下。

二、物质的磁性

磁性来源

物质的磁性是指其在外磁场中能够感应出磁矩的性能。物质磁性的强弱可由磁化强度来表示。的定义为单位体积中的磁矩矢量总和。物质内的磁感应强度定义为 $B = \mu_0(H + M)$ ，式中， μ_0 为真空磁导率，其值为 $4\pi \times 10^{-7}\text{ T}\cdot\text{m/A}$ ，磁场强度和磁化强度单位是安每米(A/m)，磁感应强度单位为 T 。另外，磁化率 $\chi = M/H$ ，反映了物质磁化的难易程度。磁导率为 $\mu = \mu_0(1 + \chi)$ 。 μ 。依据 χ 的大小，物质可分为抗磁性、顺磁性、反磁性、铁磁性、亚铁磁性五大类。其中顺磁性物质的磁性很弱，其磁化率 χ 在 10^{-5} 数量级；铁磁性和亚铁磁性的磁化率 χ 在 10^3 数量级，一般统称为强磁性。

物质所呈现的磁性，一般来源于电子自旋磁矩、原子轨道磁矩、原子核自旋磁矩和分子转动磁矩。其中原子核自旋磁矩只有电子自旋磁矩的几千分之一，而固体分子的转动磁矩也格外小，所以起主要作用的是电子自旋磁矩和原子轨道磁矩。顺磁性和铁磁性物质的磁性，主要来源于电子自旋磁矩。但凡过渡族元素，自由基和三线态中的未成对电子均具有顺磁性。未成对电子的交换作用可产生强磁性；假设未成对电子自旋同向排列，可形成磁畴，从而产生铁磁性。通常有用的磁性材料属于强磁性物质。

聚合物的电子磁性

无论分子是否具有永久磁矩，在磁场中都要产生一些与磁场方向相反的诱导磁矩，这是材料表现逆磁性的缘由，为物质的本征性质，其磁化率为负值，且数值较小。而自旋顺磁性则与未成对电子的存在有关。电子自身是一个小磁石，有一个磁偶极，具有玻尔磁子

β ，没有构成电子对的分子即为一永久磁偶极，即顺磁性分子，其磁化率 χ 为正值。当未成对子属于定域态或较少离域(不饱和键、自由基等)，则无相互作用用时，则顺磁磁化率听从以下居里定律：

$$\chi = \frac{N\mu^2}{kT} \quad (1)$$

其中 N 是观测自旋数， μ 是平均朗德因子， μ_B 是玻尔磁子， k 是常数， T 是确定刊温度。

当未成对电子在导带中离域时，其磁化率 χ 则听从定律，

$$(2)$$

其中 $\rho(\epsilon)$ 是能级 ϵ 的态密度。

在掺杂半导体中，由于轨道顺磁性大于电子顺磁性，其磁化率便听从朗道

定律：

$$\chi = \frac{e^2 \mu_B^2}{12\pi^2 m} \quad (3)$$

顺磁性分子的磁偶极在磁场中的定向是听从分布的，
如下图；其平均分子数与磁化强度的关系是：

$$(4)$$

而磁化率 χ 和 M 的关系是：

$$M = \chi H \quad (5)$$

$$(6)$$

χ 和 M 的倒数的关系就是定律。

$$\frac{1}{\chi} = \frac{1}{\chi_0} + \frac{1}{\chi_1} \quad (7)$$

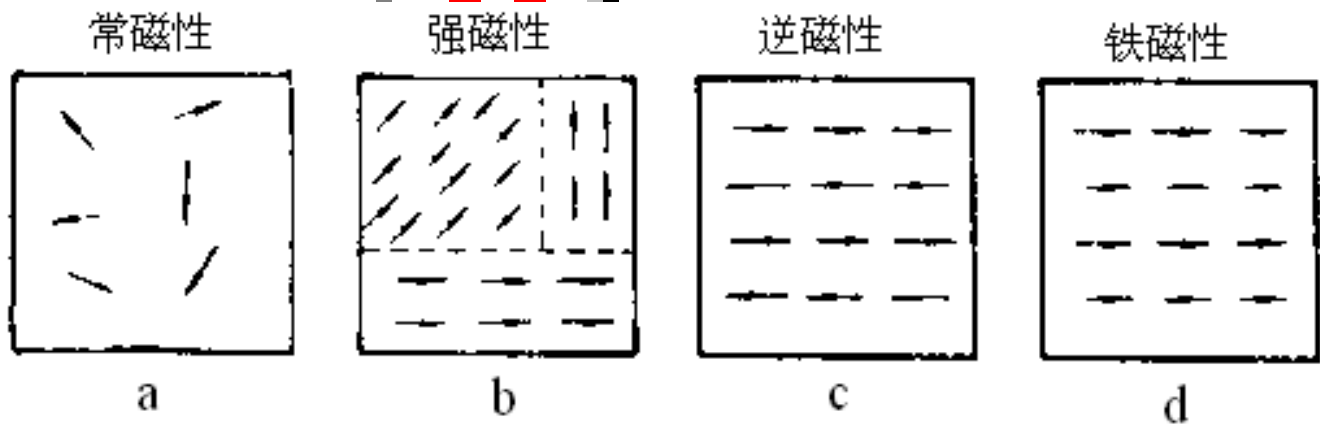
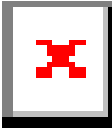


图 物质磁性和自旋状态的关系

设磁偶极、间的相互作用为，当它大于热能时，磁偶极可定向排列形成磁畴。假设为负值，则使磁偶极排列平行全都，形成强磁性，如图所示。其 χ 值与

顺磁性相比，有较大差异，强磁性随温度的变化听从居里-

外斯定则： ()

其中是确定温度，是转变温度，即居里点(°)。

当<时属强磁性，当>时，属顺磁性。

当为正值时，磁偶极为反平行方向排列，则呈现逆磁性，如图 () 所示，当磁偶极具有不同定向小区时，其排列如图所示，此为铁磁性。

三、磁性高分子材料分类

磁性高分子材料通常可分为复合型磁性高分子材料和构造型磁性高分子材料。

构造型磁性高分子

构造型磁性高分子是指不用参加无机磁性物，高分子构造自身具有强磁性的材料。构造型磁性高分子材料按根本组成可分为纯有机磁性高分子和金属有机磁性高分子。由于此类材料比重小、电阻率高，其强磁性与传统无机磁性材料很不一样，具有重要的理论意义和宽阔的应用前景。

复合型磁性高分子材料

复合型磁性高分子材料是指以高分子材料与各种无机磁性物质通过混合粘结、填充复合、外表复合、层积复合等方式加工制得的磁性体，可分为粘接磁铁、磁性高分子微球和磁性离子交换树脂等。

四、磁性高分子材料的性能特点

由于高分子有机磁性材料既属于高分子有机材料，又属于磁性材料，对这类材料的争论属于穿插科学，人们对这类型材料的争论和生疏尚处于起步阶段，因此尽管专家们已对其进展了多方面的测量、试验和分析、争论,但对其特性的生疏仍很不系统、很不准确、很不全面。从现已了解到的一些测试数据和分析状况可以初步看出其主要的性能特点。

该材料是承受与过去全部磁性材料的制备方法完全不同的高分子化工工艺制成的高分子材料，如高分子再加上二茂铁的络合物，分子量高达数千。该

类材料和元件制备的主要工艺流程如图。

有机物的主要构成元素是碳、氢、氮,构造和化学性能格外稳定。将磁粉加工制成磁性元件，不需烧结，只需热压成型。加工便利，元件属塑性软磁产品,不产生因高温烧结而导致的尺寸偏差,且机械特性好，可进展切、车、铣、钻等机械加工,机械的抗振动、抗冲击性好。

从磁性能看，属于软磁。其本征磁特性参数有，比磁化强度为 $\sim 10^5 \text{ A/m}$ ，剩磁为 10^2 T ，矫顽力；应用磁特性参数有，初始磁导率 μ (在 10^4 Hz 时)为 $\sim 10^4$ ，比磁损耗(在 10^4 Hz 时) $\delta\mu$ 为 10^{-2} ；低损耗适用频率范围为 $10^2 \sim 10^5 \text{ Hz}$ 。

介电特性较好。电阻率 $\geq 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ，在 $10^2 \sim 10^5 \text{ Hz}$ 下，复数介电常数的实部 ϵ' 为 $\sim 10^2$ ，虚部 ϵ'' 为 $\sim 10^{-2}$ 。

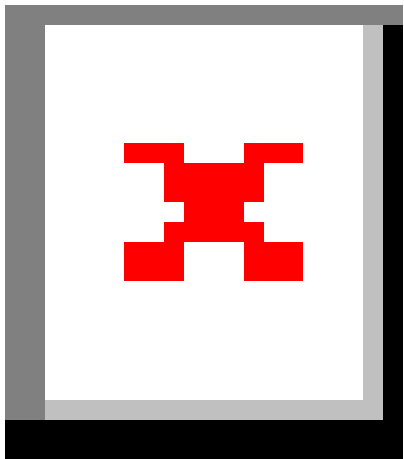


图 复合型磁性高分子的制备工艺

其他物理特性有，密度低，磁粉(为纳米级微粉)密度为 5 g/cm^3 ，磁片或磁环密度为 $\sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ ；适应温度宽，为 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ ；温度变化率低， $\Delta\mu/\mu$ 在 $\sim 10^\circ\text{C}$ 间为 10^{-3} ，在 $\sim 100^\circ\text{C}$ 间为 10^{-2} ；耐热冲击好，在 10°C 、 100°C 及 150°C 间循环升降温及从 150°C 到 10°C 猛烈温度冲击下磁棒无特别；抗辐射；抗老化等。

目前对高分子有机磁性材料的分子构造和产生磁性的机理尚不清楚。随着材料温度的上升，磁性能变化很小，直到 150°C 该种高分子有机材料分解时,磁性

能才消逝，争论者临时将此温度称作此种材料的居里温度。有关专家估量,二茂金属高分子有机磁性材料的磁性，可能是源于磁性金属离子的有序排列，由于高分子有机材料的构造格外稳定，所以磁性能随温度的变化很小，直到高分子有机材料分解破坏时，磁性才马上消逝，几乎无渐变过程。

其次节 构造型磁性高分子的分子设计

一、有机磁性高分子的设计

含有自由基的有机化合物属于非封闭型电子构造，带有不成对电子，这是构建磁性分子的根本动身点。一般状况下，自由基是不稳定的，但假设有立体位阻高的置换基来保护它、或使它处于共振系统，则能延长自由基寿命。典型的自由基分子的例子见图。

磁性高分子的设计原则

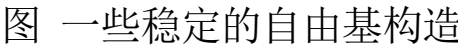
磁性材料的磁性主要来自于电子自选。但有机分子中，电子往往成对消灭，每对电子自选方向相反，因而不显示静磁性，表现为抗磁性效应。这样以碳为主的有机化合物虽然约有万种，但其中呈顺磁性的却很少。要想制备分子的〔而不是原子的〕高分子磁性体，必需遵循以下设计准则。

〔〕含未成对电子的分子间能产生铁磁相互作用，到达自选有序化是获得铁磁性高分子的充分和必要条件。

〔〕分子中应有高自旋态的苯基，含、 $\cdot$ 、 $\cdot$ 、 $\cdot$ 等自由基体系或基态为三线态的 π 电子的环戊二烯基阳离子或苯基双阳离子。

〔〕电子的 $\cdot$ 、 $\cdot$ 、 $\cdot$ 、 $\cdot$ 、 $\cdot$ 、 $\cdot$ 等含双金属有机高分子络合物是顺磁体，假设使两个金属离子间结合一个不含未成对电子的有机基团，则可引起磁性离子间的超交换作用而获得铁磁体。

〔〕按电荷转移模式设计的对称取代二茂金属〔 $\cdot$ 、 $\cdot$ 〕及其稠环高分子化合物，与受体〔四氰基乙烯〕、〔四氰基二亚基苯醌〕、〔二氯二氰基苯醌〕、〔四氟代〕等作用可生成电荷转移盐铁磁体，但受体必需满足以下条件：①受体必需能承受供体的一个电子，并形成交替排列的有序构造。但要到达上述设计准则，等争论了聚双〔二茂金属〕苯的中心金属原子间电子的相互作用，觉察苯环上间位取代比对位取代的二茂金属化合物更有利于自选交换，这一觉察可充分解释其铁磁性。



设计磁性高分子首要的是如何在单一有机分子内导入多个自由基。 π 共轭分子分为交替型和非交替型共轭分子。在 π 共轭碳原子上每隔一个作星号标记时，带星号和不带星号的碳原子正好交替排列时称为交替型碳氢化合物，显示 π 共轭型芳香族分子的特征。与此相反，无法交替标记星号的非交替型碳氢化合物只

显示较弱的 π 共轭性质。另外，虽然是交替性碳氢化合物，带星号的碳原子数（*）和不带星号的碳原子数（*）不同时，称为奇数交替型碳氢化合物，见图。奇数交替型碳氢化合物分子不能描绘古典的 $\dot{e}$ 构造式，被称为非 $\dot{e}$ 分子。非 $\dot{e}$ 分子中吡啶带有不成对电子，也就是说，退缩的非结合性分子轨道〔，分子轨道理论中， π 结合能为的分子轨道〕数与星号和非星号的碳原子数之差（*）相等。非 $\dot{e}$ 型 π 共轭分子是形成磁性高分子的首要条件。

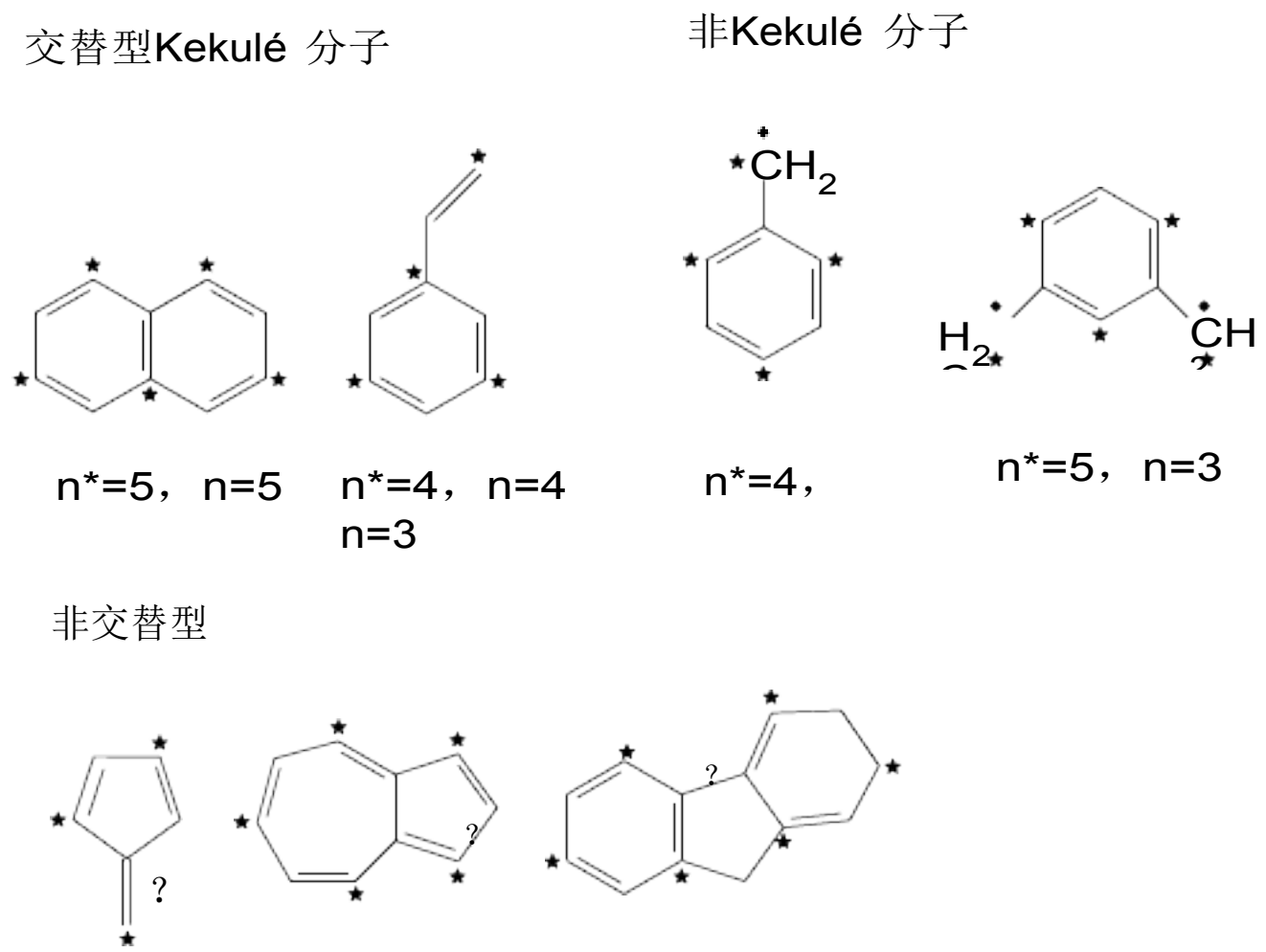


图 π 共轭交替型碳氢化合物

下面以图—所示的二苯乙烯双自由基为例，对非 $\dot{e}$ 型分子构造加以具体说明。，'二取代物（或，'二取代物、，'二取代物）显示 $\dot{e}$ 型的醌式构造，不成对电子在表现上被消灭。与此相反，对于，'、，'以及，'二取代物无论怎样移动双键，怎样描绘共振式，必定有两个不成对电子(各式中的点标记)剩余，为非 $\dot{e}$ 型的构造异构体。

构建磁性高分子的其次个前提是，分子内的不成对电子的自旋方向问题。对于非 $\dot{e}$ 型分子内的不成对电子数〔数〕及其不成对电子的自旋方向，人们提出了以原子价键法和分子轨道理论为根底的计算设想。应用古典的模型，提出带星号的碳原子数*与不带星号的碳原子数之差(*>)为非 $\dot{e}$ 型分子的自旋量子数。

{ }

用 π 电子间的交换积分为负时的自旋极化原则也能说明上述设想。 π 共轭分

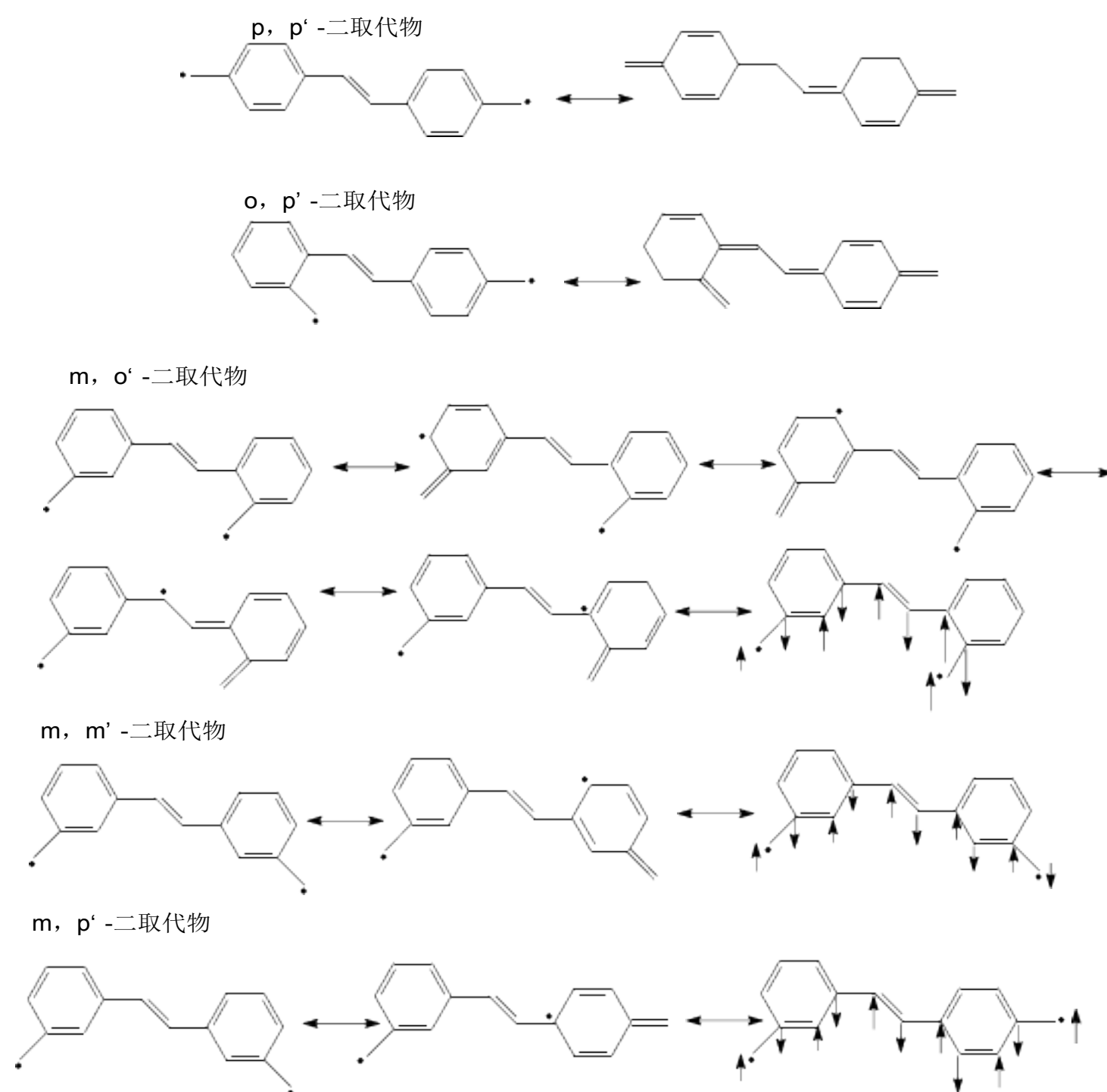


图 二苯乙烯双自由基共振式

子内的自由基，或多或少地非定域化，在 π 共轭系统内产生自旋密度分布。也就是说，依据自旋极化原则，自由基的不成对电子的自旋〔如

α —自旋，用朝上箭头表示），在与其共轭的相邻的碳原子电子上诱导出较弱的反向自旋密度(

自旋，用朝下小箭头表示)。而在更相邻的碳原子上诱导出更弱的 α —

自旋。如此类推，自旋密度在 π 共轭系统中上下传递。以二苯乙烯双自由基为例

〔图〕，，'—二取代物左侧不成对电子的旋〔大箭头〕在与其共轭的相邻碳原子电子上诱起反向的自旋密度。自旋信息经过在 π 共轭系统中上下传递后，右下方的自由基不成对电子的自旋方向也朝上。比较图—

中下面三个二苯乙烯双自由基异构体，虽然三者都带有两个不成对电子，，'、，'二取代物，自旋向上〔平行〕，显示强磁性(=)。，'二取代物的自旋反向〔反平行〕。属于的基态。

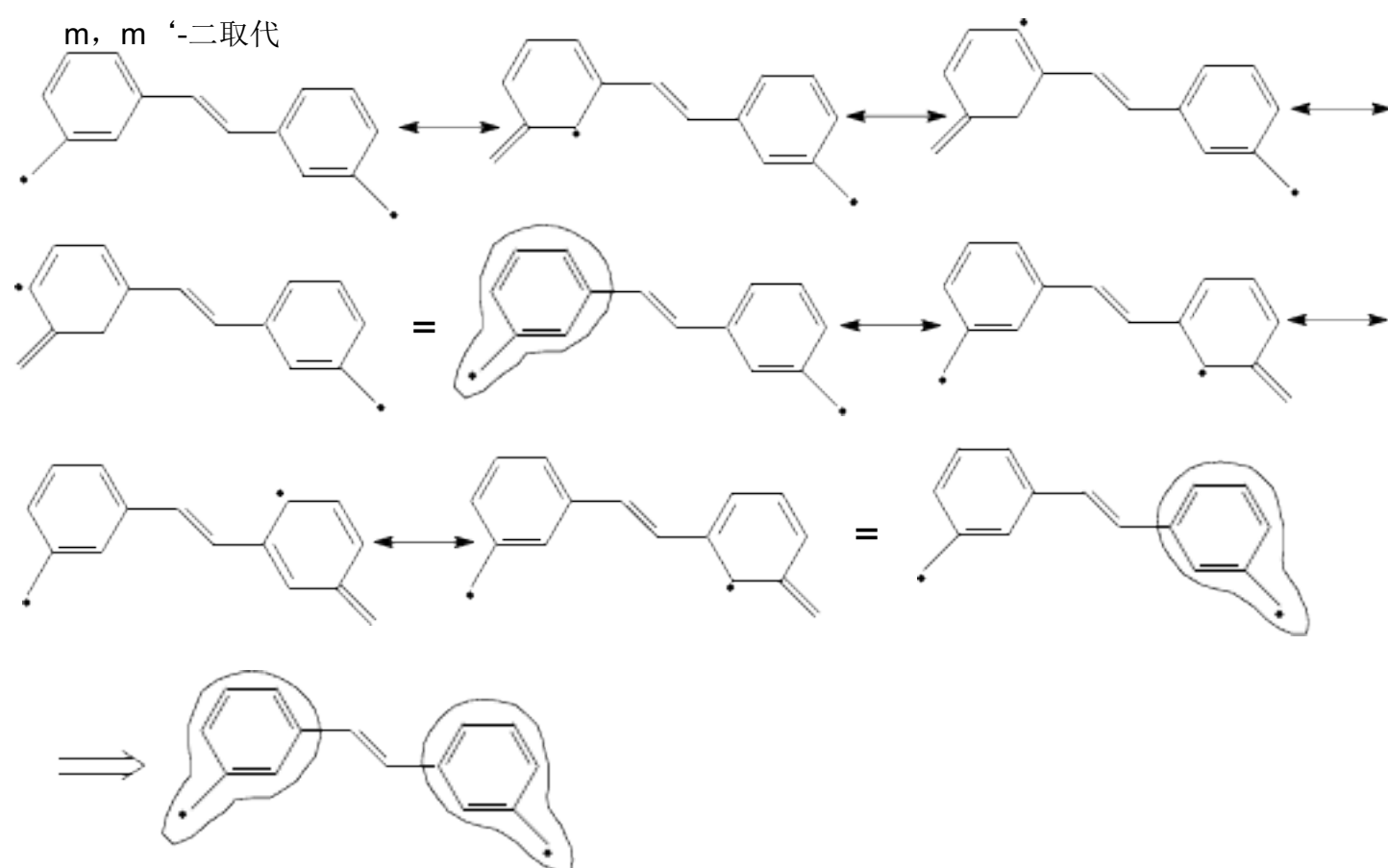


图 (, '体)的连接方式

用分子轨道理论也可定性地推测自旋是否同向排列。从带有个不成对电子的分子轨道的结合方式，用法则能有效地推测基态(在此为自旋定向排列的高自旋状态)和其上面的激发态之间的能量差(Δ)。在此，让我们用法则对二苯乙烯加以讲解(图—

和图)，在图和图中，用各个自由基的共振势能描绘的移动范围，简洁地显示了的扩展。非 $\dot{e}$ 型苯乙烯双自由基，

取代物中，两个在分子内各自处于孤立状态(称为)，由于不成对电子间不存在相互作用，三线态和单线态根本上退缩($\Delta \sim$)。

而，'和，'二取代物属于 $\dot{e}$ 型异构体，在这两个异构体中，相互重叠(称为)，两个不成对电子之间产生有效的交换相互作用，产生库仑斥力。因此，不成对电子依据法则进入不同的轨道，自旋定向排列的三线态呈稳定状态($\Delta >$)。

如上所述，合成非 $\dot{e}$ 型同时自由基取代位置满足要求的 π 共轭型聚自由基，可实现与高分子内的自由基数〔聚合度 $\times$ 自由基产生率〕相等的自旋定向排列数

，也就是说能实现大的。非 $\dot{e}$ 型同时满足的三线态(=)分子以及从今派生的高自旋高分子的骨架构造示于图。

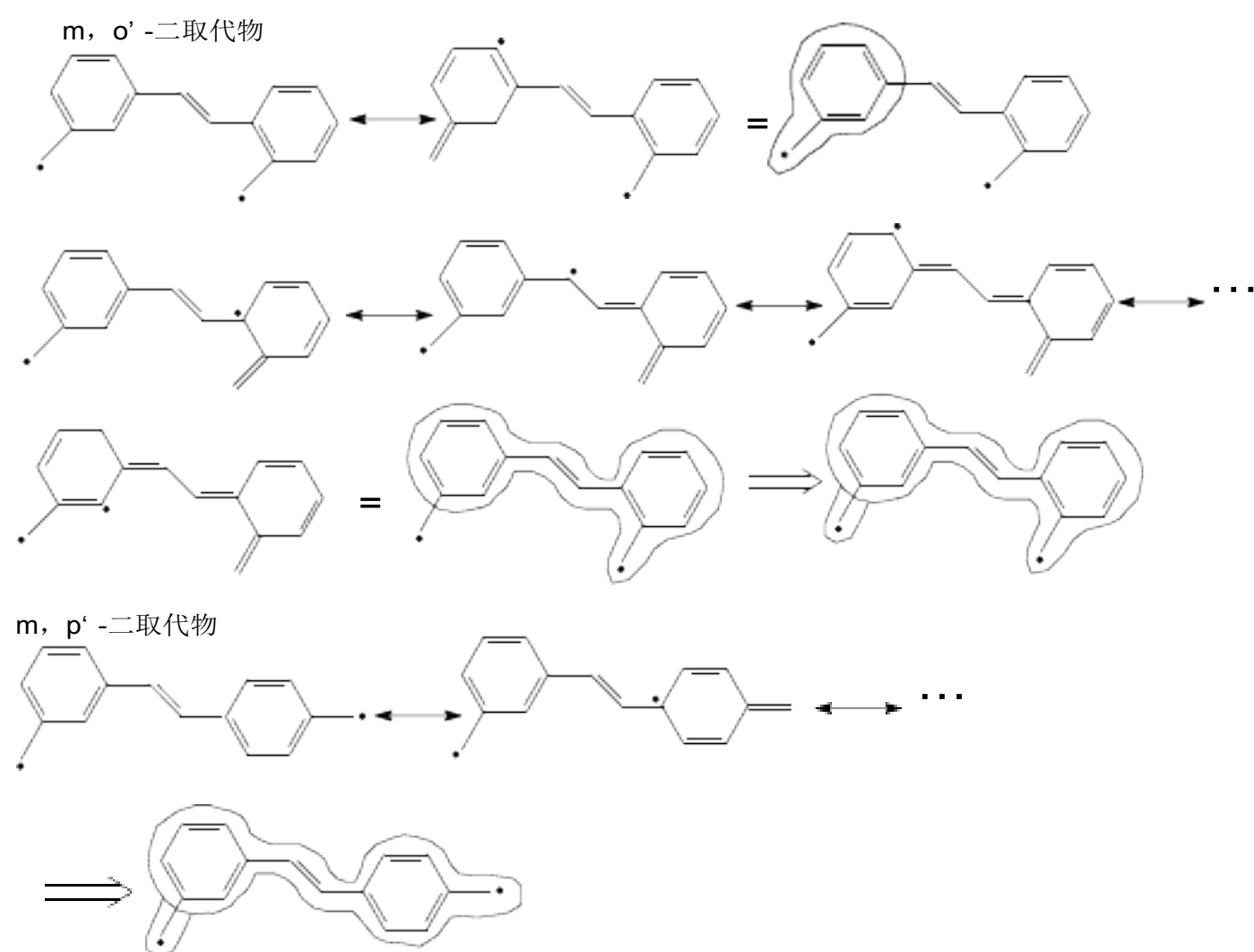
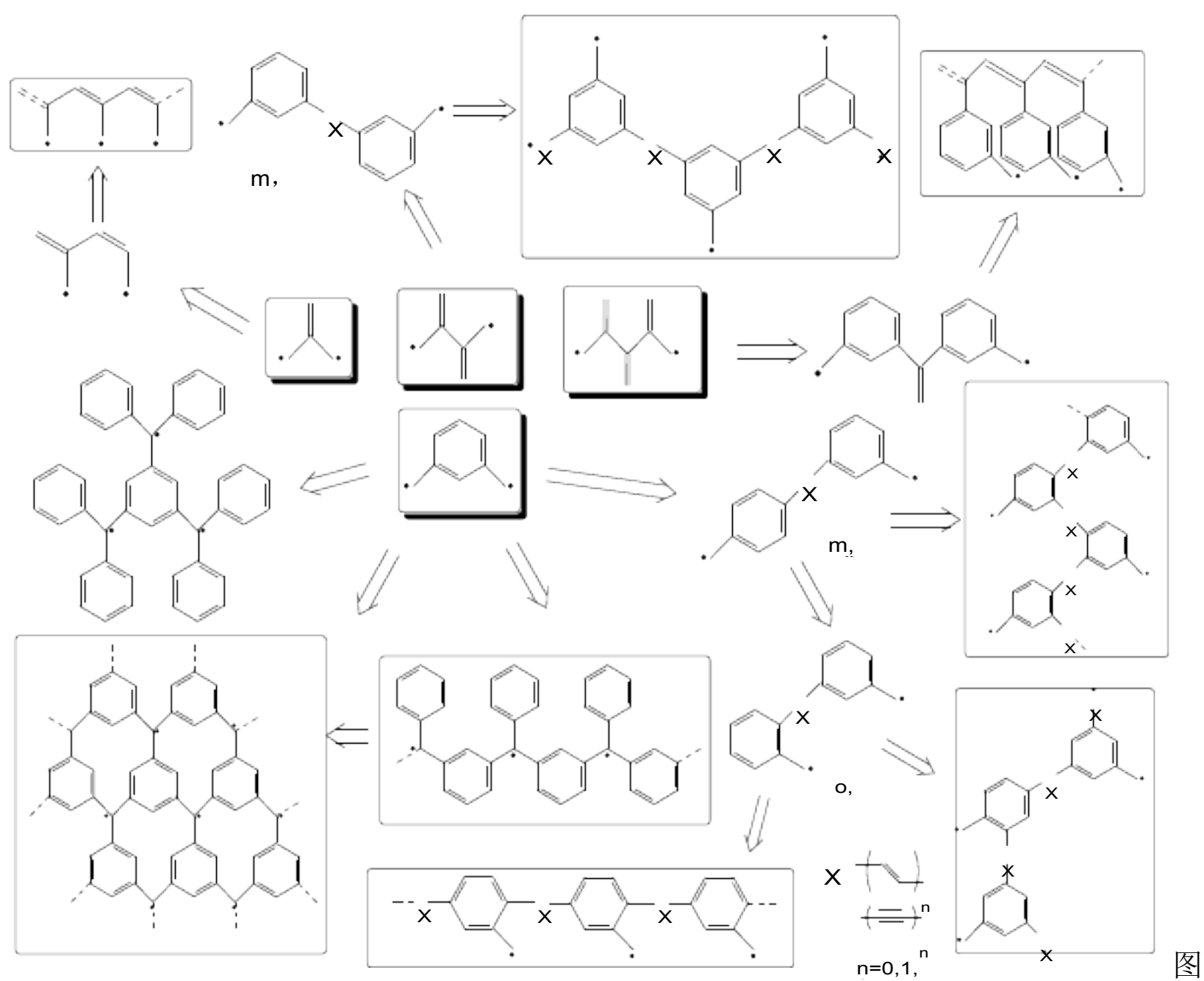


图 (, ', '体)的连接方式



图

从高自旋自由基派生出来的高自旋高分子

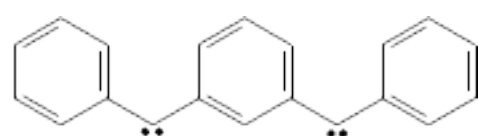
自由基主链型聚自由基

岩村、伊藤等以亚苯基为介导，首先连接卡宾合成了非 $\dot{\text{e}}$ 、型、主链上带自旋的强磁性聚自由基。卡宾带有两个不成对电子退缩的垂直轨道，其自身就已经处于三线态($=$)。将处于基底五线态状态($=$)的亚苯基双卡宾扩张为直线状的寡聚卡宾后，经磁化测试得知， $=$ 〔实际测试值与图的磁化曲线 $=$ 全都〕。在个卡宾单位之间实现了个自旋强磁性排列。而对于向个方向延长的九卡宾，确认到有个自旋定向排列〔基底线态、〕。人们首次制备出了过渡金属离子或镧的自旋多线态，例如具有的 $=$ 、的以上的自旋多线态的强磁性有机分子，但 $=$ 以上的自旋多线态的强磁性有机分子，但是卡宾的稳定性格外差，必需在极低温才能使固相样品的一局部产生磁性，因此人们放弃了以上的争论。

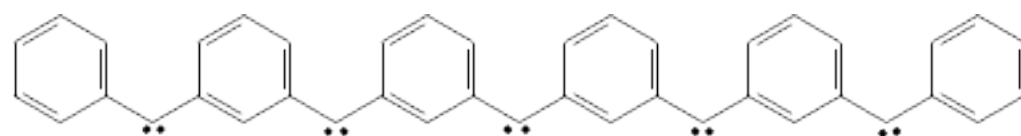
等以三芳甲基自由基为目标，进展了自由基主链型聚自由基的合成。三芳甲基自由基和卡宾的自旋源一样，属于碳自由基。虽然化学稳定性比卡宾差，但在溶液中也能产生自由基。他们合成了三芳甲基自由基经位连接的星型十二自由基，其 $=$ 。

以刚性而且短的亚苯基为非 $\dot{\text{e}}$ 、型偶联剂，使两个不成对电子(卡宾除外，是不成对电子)连接，可使分子内产生强磁性作用，交换相互作用系数常强。但是，由于高分子内的共轭系统为交替共轭型，是定域在两个不成对电子间的两个短共轭的和，因此，随着聚合度的增加而减小(表-的和)

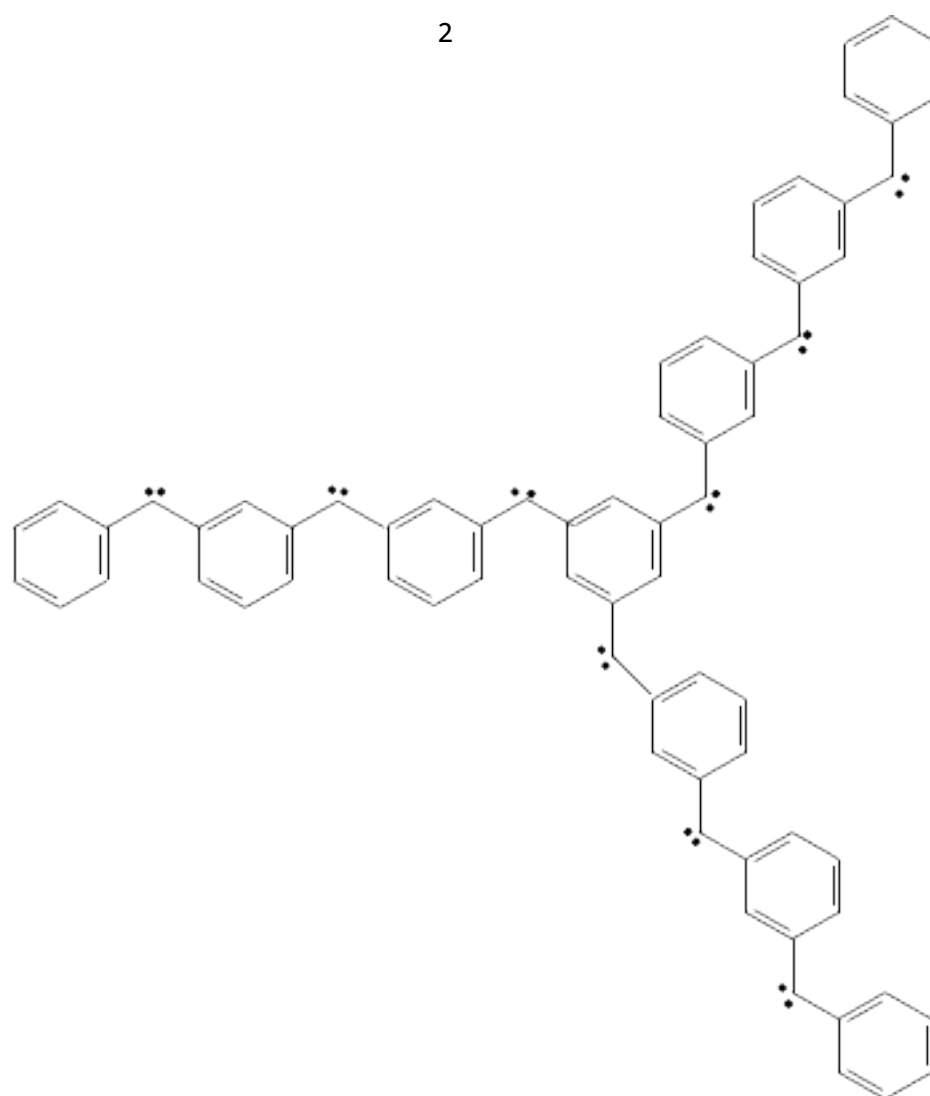
使自由基部位位于主链的最大难题是，自旋的产生有缺陷时，共轭系统会发生断裂，自旋的定向排列数发生大幅度地减小。树枝状聚自由基、是显示自旋缺陷的最好例子。等经由芳基锂与溴化物的附加反响，用会聚法合成了自由基 产生部为个和个三芳基甲基醚的树枝体。通过锂处理使其成为碳阴离子后，用碘在低温进一步使其氧化，然后马上在低温状态下进展磁化测试。但是，自旋浓度(每所发生的自由基部位数)约为%，自旋多线态高的成分被隐蔽在 $= \sim$. 的断片成分内，样品全体的值停留在 $\sim$. 。树枝状体中心的自由基缺损成为致命的难题。



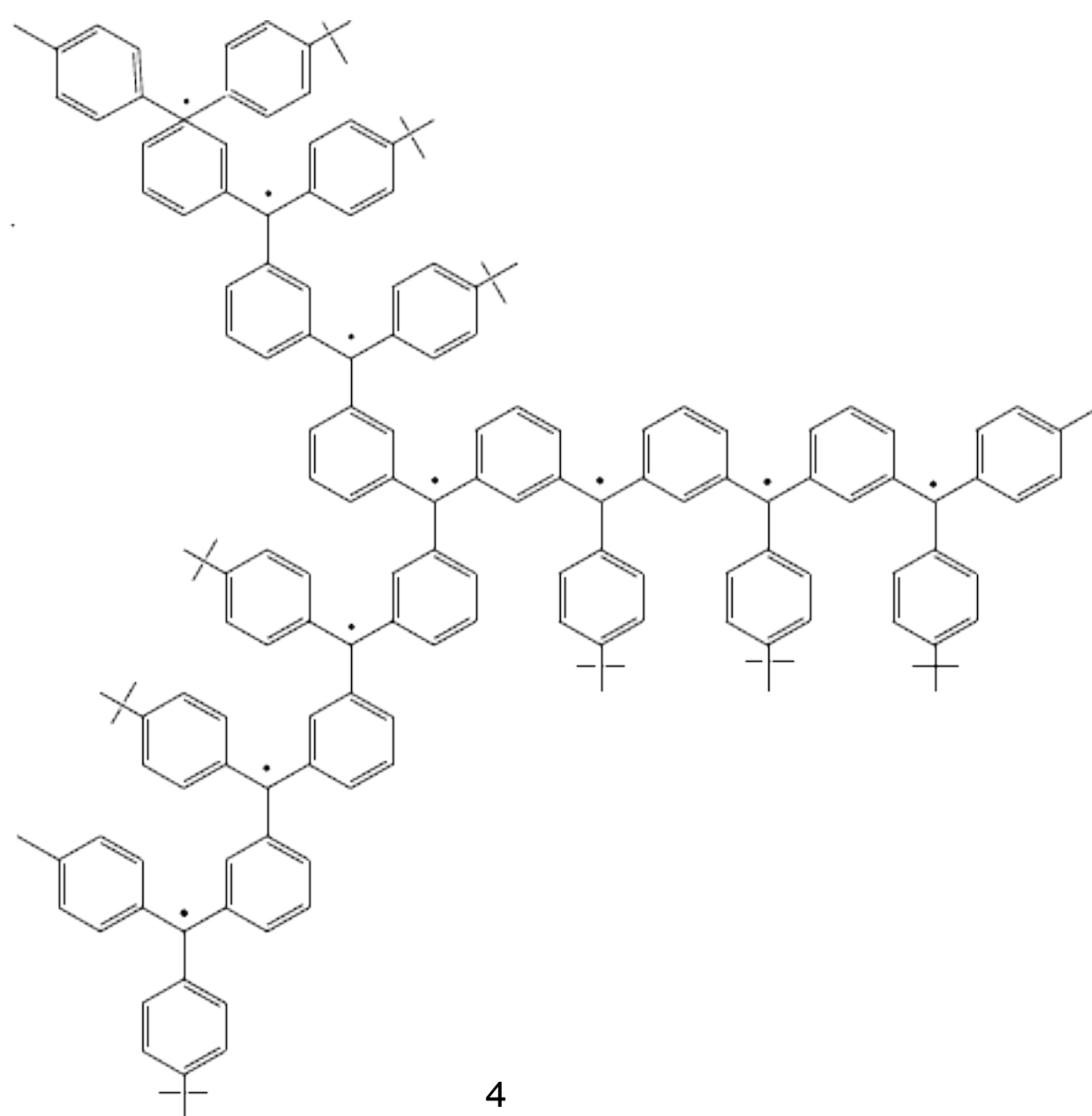
1



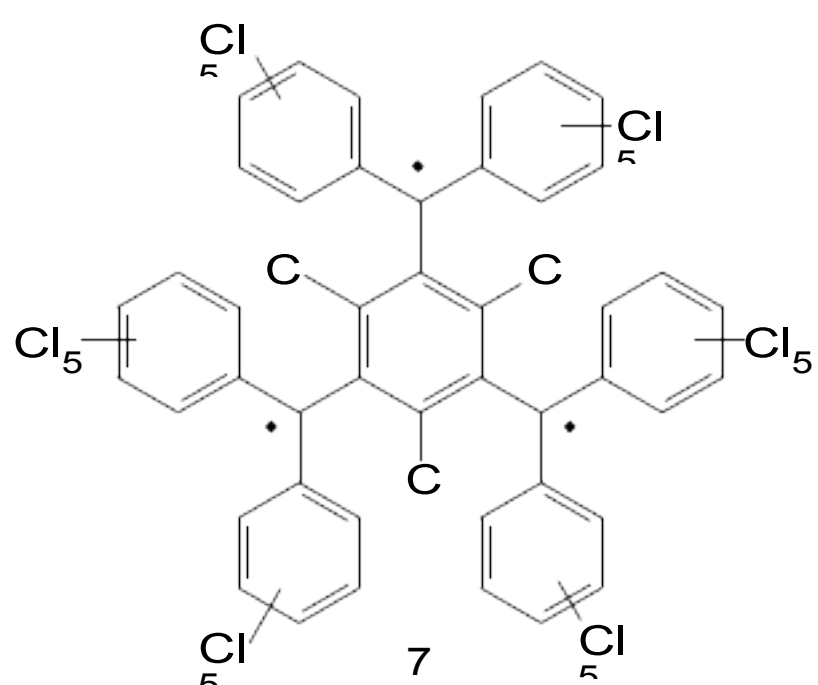
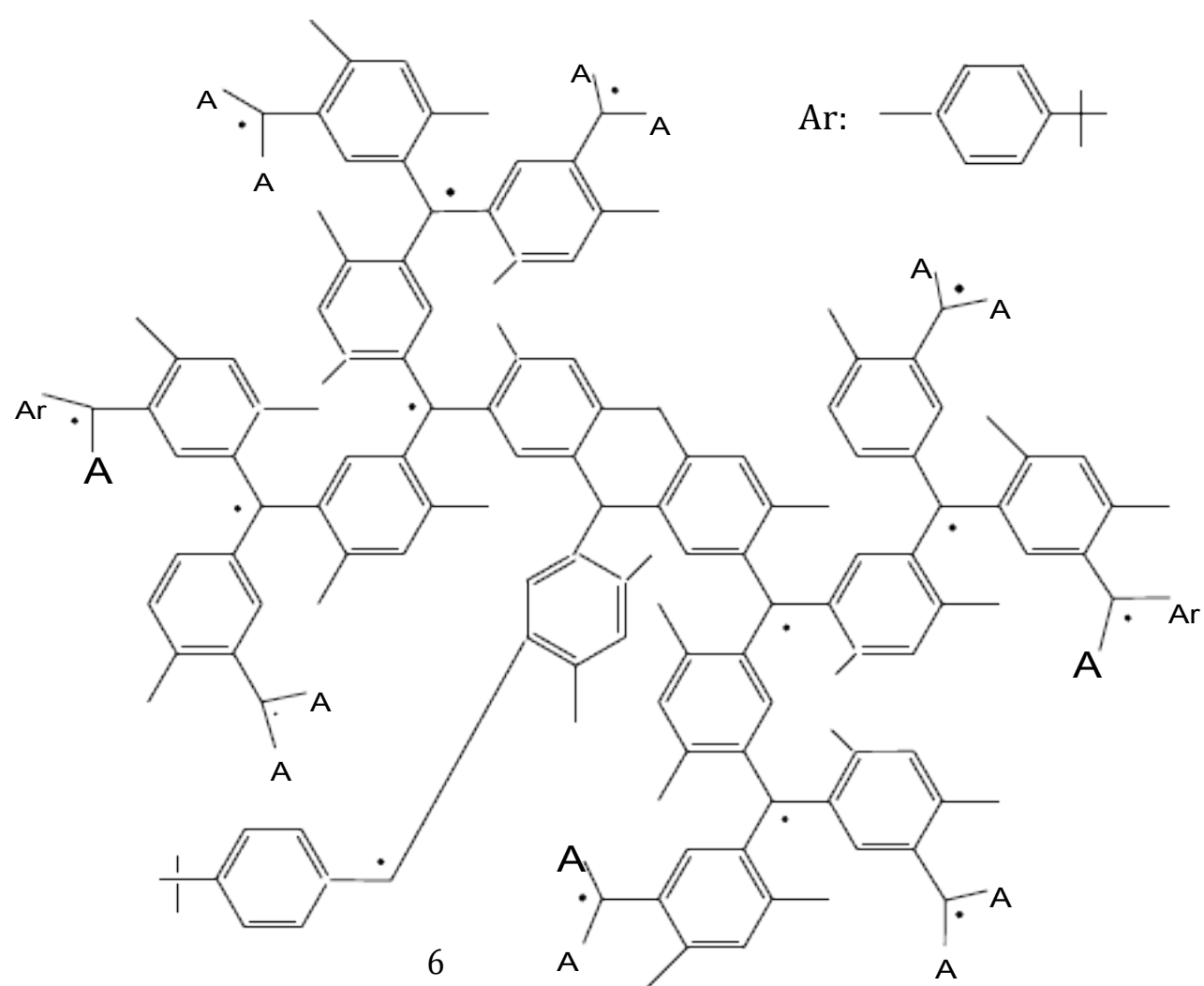
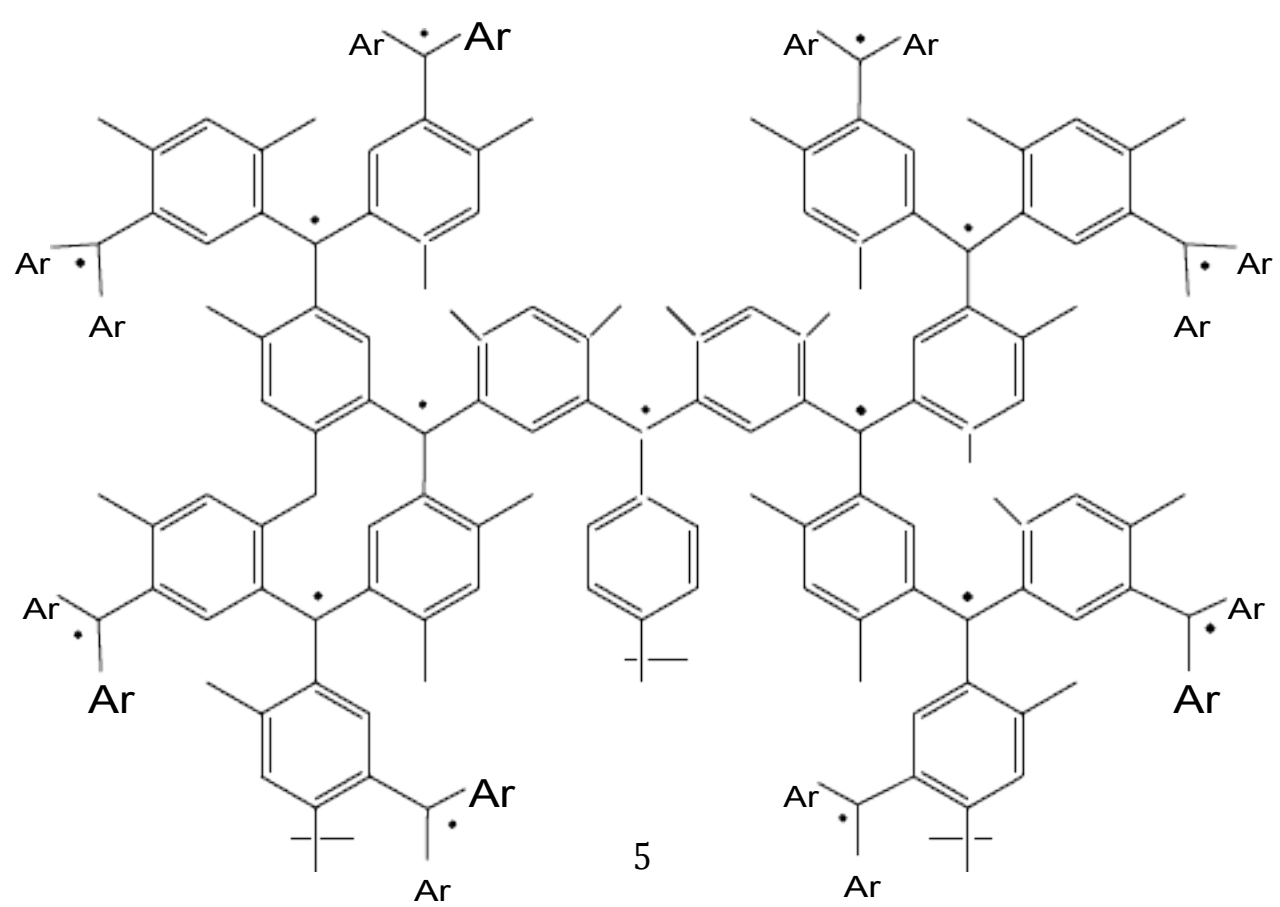
2



3



4



极化子型聚自由基

极化子型自由基是一种即使在室温也稳定的自由基。在共轭聚合物中进展掺杂，而使其产生导电性是已经确立的方法。具体设计方法是以共轭寡聚物链为极化子产生部位，与以亚苯基为代表的非、型偶联剂相连接的方法。

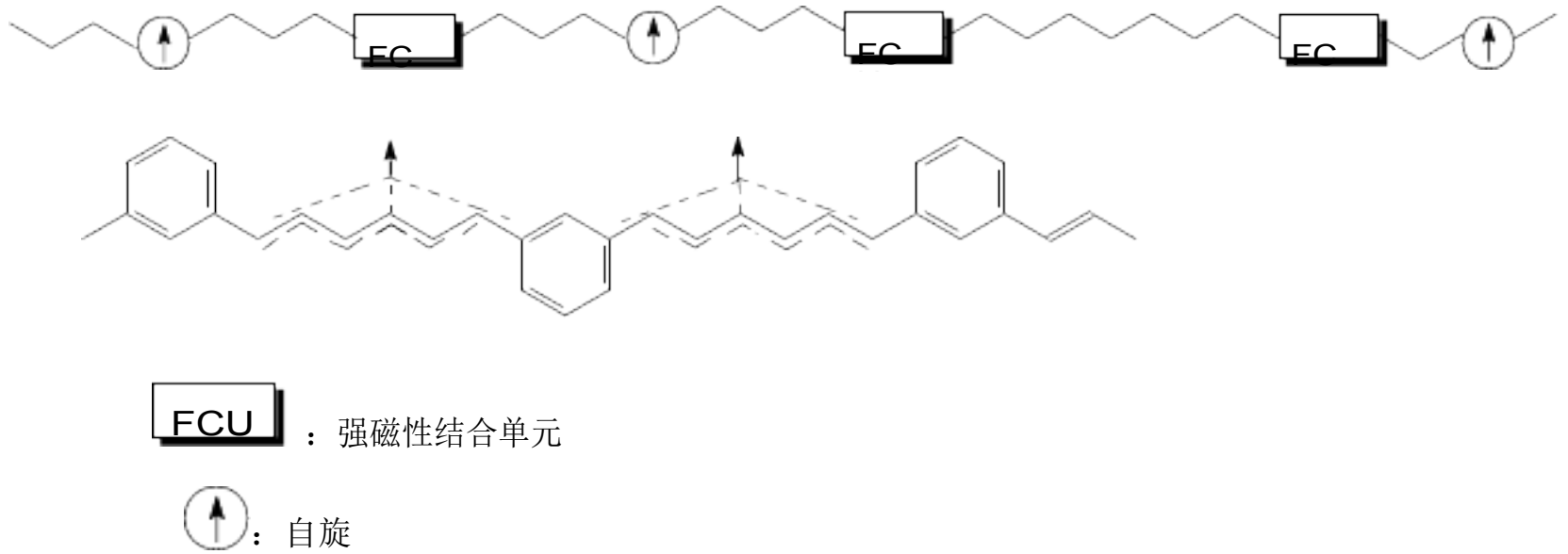
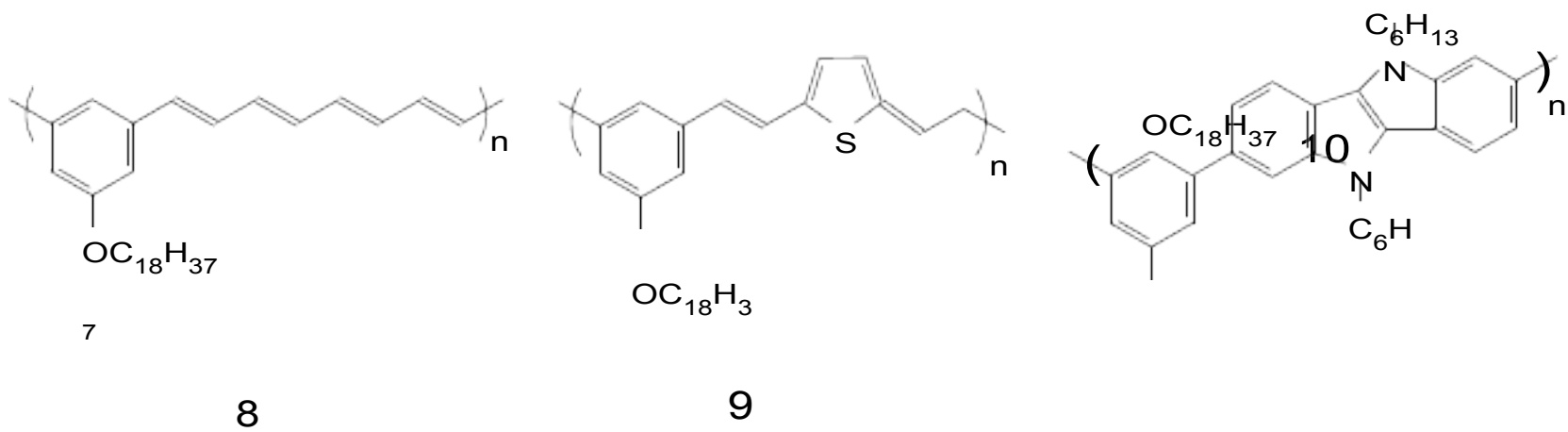


图 极化型聚自由基的设计思想

与自由基主链型聚自由基不同，即使不发生极化(不成对电子)，该部位事先就具有共轭构造，保障了自旋的传输途径。缺点是，过剩的掺杂会导致非磁性活性的双极化(二阳离子)的生成。



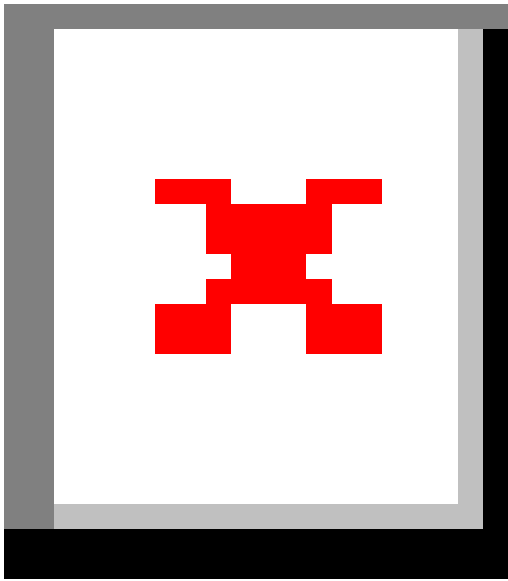
等利用反响、反响合成了相对分子质量为万、溶于溶剂的共轭聚合物 ～ 。选择 ～

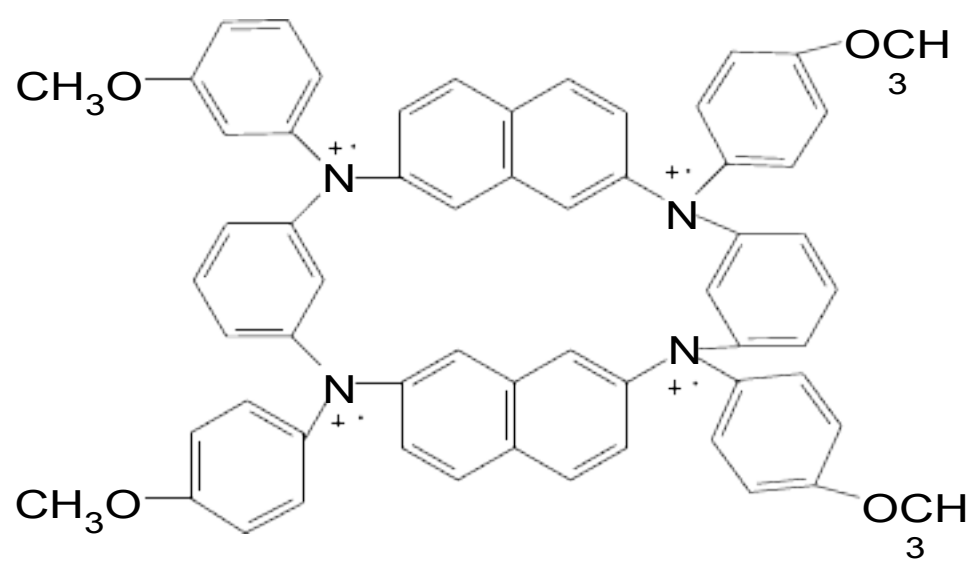
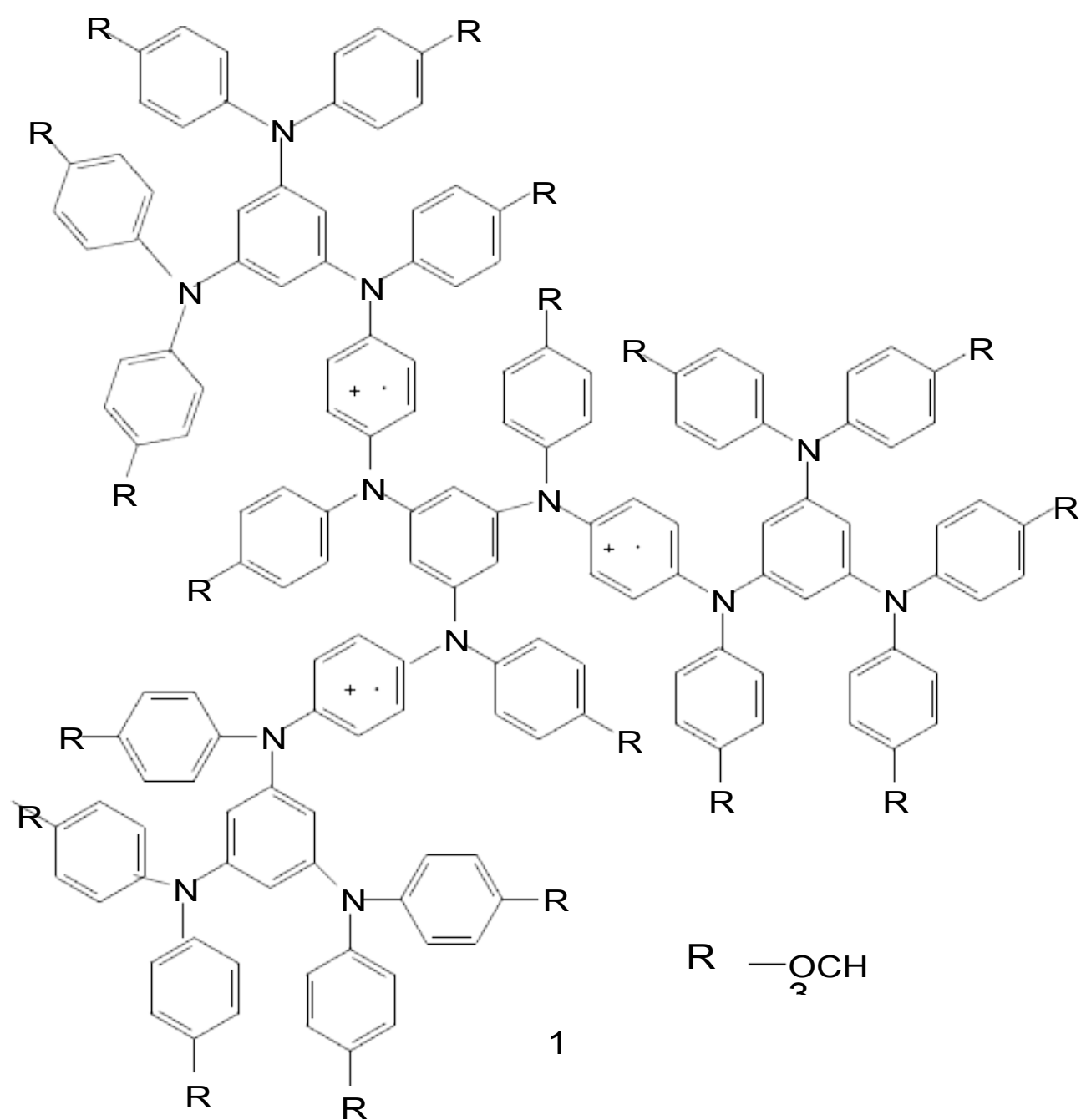
作为极化发生部位的理由是，这些共轭聚合物是能进展掺杂的最短共轭构造。共轭系统过长的话，会导致双极化，从而造成自由基消逝，或者自旋密度变薄，强磁性交换相互作用变弱。虽然是用碘或

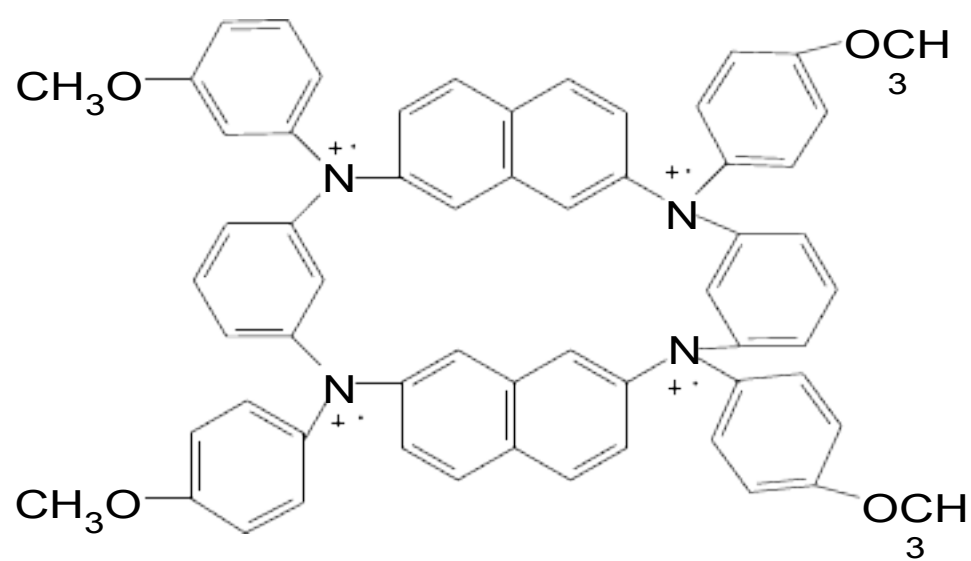
进展的掺杂，由于处理后的聚合物变为不溶，值因而变得较为简单。自旋浓度为%的，=为最高值，而自旋浓度为%的，的最高值为。从分子量也可以看出，假设自旋浓度格外低，而却能获得较高的值的话，则说明产生了不均一的极化子。掺杂过剩时，虽然自旋浓度增加了，但值却

降低，接近。除了双极化子的生成以外，聚合物链间的相互作用、交联以及掺杂试剂的常磁性＝都是造成样品整体的下降的缘由。

苯胺、噻嗪等因共轭杂原子的存在而使自由基阳离子稳定的现象受到重视，带单元的到达多的高自旋浓度。但是，却不与其相对应，仅约为。该结果说明选择了能产生稳定自由基的单元时，自旋密度定域在自由基部位，相互作用最多只能到达相邻单位。





用化学稳定的离子自由基合成自由基主链型的磁性分子的争论也得到了重视。等以，二丁基品红酮阴离子自由基为自旋源，承受反响合成了用亚苯基连接的聚(亚苯基品红酮)，然后用电化学复原法使其产生阴离子自由基，得到了的聚合物。

三苯基铝阳离子自由基也是稳定的自旋源。等对自由基为铝自由基(其电子构造与甲基自由基一样)，用亚苯基连接的一维链的强磁性进展了理论计算，并用偶

联技术进展了缩聚反响合成了聚阴离子。将其用氧化后，得到=的聚合物；所制得的阳离子自由基为级胺，由于苯环上的对位无取代基，化学稳定性较差，值也很低。等利用催化剂可生成键的缩聚反响，合成了聚(芳基苯胺)的阳离子自由基，并开头报告了该聚合物的多线态。

自旋定域在亚苯基二胺单元内而稳定的苯胺绿〔也受到了重视。等合成了分枝型、环状型寡聚自由基，从常磁性位移法测试结果提出了在各寡聚阳离子中多线态为基态的结论。〕等承受反响缩聚了聚〔苯胺〕衍生物，从该聚合物的强度随温度而变化的结果，也提出了各寡聚阳离子中多线态为基态的结论。上述两项争论的目的均是为了在室温实现磁性。

自由基侧链型聚自由基

设计磁性高分子的第三个途径是，以兴旺的 π 共扼系统为主链骨架，在侧链的非、位置上共扼连接化学稳定的自由基的方法。这种设计方法的好处是、以共扼主链为介导的自旋间的相互作用能涉及到长距离，自旋缺陷并不是致命的。另外，在侧链部能选择寿命较长的自由基种类，在室温状态下也能操作使用。如选择适当的溶剂，可进展单罐聚合，有利于得到分子量高的磁性高分子并保证样品的数量。

另一方面，从自旋极化原则可知，聚合物重复单元内的自由基取代位置，即合成物头尾结合构造掌握在%的聚合物是确定必要的前提。以图、图中的二苯乙烯双自由基为例，的，
二取代物聚自由基是聚〔自由基代，亚苯基亚乙烯〕，而将，
二取代物进展高分子化，则可得到聚(自
由基代，、亚苯基亚乙烯)。合成时必需使间隔碳原子数为奇数，并且严格掌握头尾连接。如头尾结合有缺陷，好不简洁实现的自旋定向排列会被抵消。

依据的提议〔式〕和他们所提出的强磁性高分子的类推，人们最初的争论对象是以聚乙炔为主链的聚自由基。作者人们合成了构造明确、溶于溶剂、易纯化的聚苯基乙炔的衍生物(—