第一章　快速自动成型技术概论

1.1　高级制造系统

1.1.1　引言

人们为追求完美的、全自动化的制造系统奋斗了几个世纪，现在已普遍认识到要达到这样的目的是十分困难的，至少就目前的技术发展看，在下一个世纪内也是难以达到的。因此目前高级制造系统发展的趋势是在人的参与下，尽量提高制造系统的自动化、集成化和智能化程度，以实现高效率、柔性化、高质量和低成本的要求。也就是说，尽量让制造系统能适应环境的动态变化，而不是实现一个“完全无人”的自动化工厂或车间。即使这样，也还需要经过一段长时间且艰苦的努力。

1.1.2　制造系统的特征

目前，制造系统的特征可归纳为如下几点：

(1) 系统的复杂性

一般制造系统涉及到大量的硬件和软件，如机床设备、机器人装置、自动上下料机构、传输机构、自动化小车、各种计算机、控制器、传感和检测装置等。这样，随着产品的不断复杂和易变，制造系统也就趋于越来越复杂。

(2) 对制造系统的要求也越来越高

由于市场的要求，对于产品不仅有多样性要求，而且对产品的质量也要求越来越高，这样就要求制造系统必须能满足高精度、高质量、无误差的要求。

需要全本请访问 www.ertongbook.c

(3) 制造系统的智能化要求

人们越来越认识到，制造系统的发展不仅仅取决于新技术的发展，而且依赖于人们的经验和知识的积累。这就需要使制造系统能及时适应环境的变化，积累和利用已有的经验和知识。也就是说，制造系统必须具有智能化的特征。

(4) 产品更新换代加快

一种“刚性”的自动生产线已经远远不能适应于目前市场的需要，因此制造系统必须要能灵活地改变其结构和功能，以便于生产出多种多样的、功能不同的产品来。

那么怎样才能产生一种能适合于社会需要的制造系统呢？首先让我们回顾一下制造系统的历史。

1.1.3 制造工业中的四次革命

制造工业大致可以分成如下四个革命阶段，即新石器时期、工业革命时期、信息革命时期、知识革命时期（见表1.1）。

现分述如下：

(1) 新石器革命时期——手工操作时期

制造工业的历史可以追朔到1万～2万年以前，即起源于新石器时代。在我们的祖先开始刀耕火种时，就产生了制造工业。人们磨砺石块，烧结陶土，以及纺纱织布，开始利用工具来制造产品。并且开始了物品的交换，即贸易。这个时期一般被称为新石器革命时期。其最大的特征是在这一时期中，产生了有技术的工匠，负责整个生产制造过程，即从产品的构思、设计、原料的选择、工具制作等一直到产品的完成。所有这一切均是由工匠本人一手所完成的。所以在英文中“manufacturing”是由二个拉丁字母所组成的，即是“手工”和“加工”二个字拼合而成的。随着生产技术的发

展，逐步引进了越来越高级的生产手段和工具，并把动物、水和风力资源引进到生产过程中去。然而这一时期基本上还是保持手工生产模式。

（2） 工业革命时期——机械化

手工生产时期一直延续到 18 世纪英国和其它国家产生了第一次工业革命。从 16 世纪到 18 世纪之间，生产技术的

表 1.1 制造工业中的四次革命

序　号	名　称	自动化方式	制造工程技术
1	新石器时代	无	手工
2	工业革命	机器	机械化
3	信息革命	计算机	CAD，CAM，FMS，CIMS
4	知识革命	决策	智能制造系统

发展为第一次工业革命奠定了基础。以农业，手工业为基础的经济发展到了以工业和制造业为基础的经济结构。工业生产开始了机械化。工人开始用机器来代替手工操作，从而产生了工厂。在工厂里，工人获得了各种新的技能，由手工工具发展到了使用机器进行产品生产，其工作的职业起了很大的变化。到了 20 世纪初期，对生产过程开始了系统的分析和研究，并且对其进行科学的管理。由于生产过程越来越复杂，一个完整的生产过程被分割成一系列简单的生产环节，工人不再需要掌握全部的生产过程。而是只需要掌握很狭窄的知识技能和懂得如何更有效地来操作这些专用的工具和机器。如汽车生产线就是一个典型的例子，制造系统基本上属于大生产机械过程。一直到现在“机械化”还是在制造工业中的一个关键词。这种系统一般具有下列特征： ① 具有稳定和单一的产品市场；② 具有较长的产品和生产周期；③ 具有不变的工艺设计；④ 工厂生产的结构基本上是将一个

产品分解成许多单个零件；⑤ 工人进行重复而简单的操作。对于这种制造系统可以称之为“刚性”自动化。

(3) 信息革命时期——信息自动化

20世纪中期，计算机的出现和应用，又开创了一个新的技术革命。对于制造工业而言，从此进入了制造系统信息自动化的革命时期。在第一次和第二次革命时期，主要涉及到硬件的自动化，如制造和改进手工工具，发明和使用新机器，发现和利用新的动力源。而在信息革命时期，则着重于开发和应用计算机和信息技术，而不仅仅只着重于机械。工具和机械，可以增加和改进人的体力上的功能，而计算机和信息技术在很大程度上是提高或代替人脑在制造工业中所起的功能。如在制造过程中，用计算机来实现操作的自动化及控制。使用功能强，价格便宜的数据处理系统实现制造的组织管理等。这种高级制造技术引起了人们的很大重视。例如。

①可编程的设备（硬件）如数控机床（NC)、计算机控制加工中心（CNC)、机器人及其它自动化装置等。

②计算机集成制造系统（软件）如计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程（CAE)、计算机辅助工艺过程(CAPP)、计算机辅助制造（CAM)、计算机辅助生产管理(CAPM)、柔性制造系统（FMS)、计算机集成制造系统(CIM) 等。

硬件系统主要考虑生产材料在车间中的运输、处理过程，而软件则考虑制造和管理过程中的信息处理，以及制造系统的计划和控制。这些技术如果能适当地应用，则有可能大大提高和改进制造系统的效率和柔性。

(4) 知识革命时期——智能自动化阶段

经过多年的工作，计算机集成制造系统的概念作为一种技术已被人们所接受，并已被应用于各种制造工业中。从技术的观点来看，CIM 是可以被成功地进行应用的。但是在实际的应用中，还存在着不少问题。它至今没有取得十分成功的实例的原因是这种系统缺乏应有的智能化。

随着人工智能（AI）和知识工程（KE）的快速发展，制造工业技术将会日益受惠于智能技术的发展。人们越来越看到，制造系统的成功已不仅仅决定于技术的先进，而且越来越依赖于不同制造领域中专家们的经验、知识和智慧。在从设计、加工一直到管理的整个制造过程中，各个部门环节均需要知识。可以说制造系统已经进入了知识密集的阶段。将来的制造系统可以称为“智能制造系统”（IMS）。

目前，许多发达国家均投入大量的研究资金和人员，积极进行智能制造系统的开发。CIM 概念在信息革命期间已基本建立了。制造工程的研究人员正在找寻新的方法去建立以知识为基础的制造系统。智能制造系统的课题十分广泛。下面仅例举几个正在进行的试验项目：

①清洁制造系统（Clean Manufacturing）——它主要研究在制造过程中，减少污染，保持生态平衡的可能性。

②并行工程（Concurrent Engineering）——在全球的工业企业中，实行设计、制造、管理方面的并行考虑。

③巨人 21（Globeman 21）——为 21 世纪的工矿企业设计新型的后勤计划和控制系统。

④灵巧制造系统（Agile and Lean manufacturing）——设计对环境变化能迅速反应、有效对付的灵巧工厂。

⑤快速成型技术（Rapid protyping manufacturing）——研究一种能很快生产产品初样的技术。

需要全本请访问 www.ertongbook.c

⑥ 知识系统化（Knowledge Systemization）——在产品和过程设计过程中，进行系统化地处理各种经验和知识。

……

这些项目的总的目的就要在制造系统的各个方面，例如设计、加工、管理、计划、控制、决策、预测和诊断方面均能实现柔性化及可适应性。这种新型的知识密集的系统，着重于集成各种不同领域的知识，而不是盲目的追求无人参与的理想自动化。

很明显，快速自动成型技术的出现和逐步成熟，给智能制造系统赋予了很强的生命力。即可以实现其中的一个重要环节，即从产品的构思、设计，一直到产品的生产的过程可以实现在人的干预下的自动化和智能化。这对于传统的制造系统来说，无疑是一次新的革命。我们将在下一节中详细的讨论什么是快速自动成型技术。

1.2 快速自动成型技术的定义

1.2.1 引言

快速自动成型技术作为智能制造的一部分是在最近 10 多年中（从 1988 年开始）得到了迅速的发展。在这一节中，我们主要讨论这种技术的定义、产生的背景、发展历史及对将来制造技术的影响。

1.2.2 定义

目前有好几种新技术涉及到采用无切削加工技术直接生产出零件。这些技术能直接从零件的计算机造型，不采用传统加工技术中的切削工具和机床。这种过程实际是一个分层粘结的过程。即首先把一个零件连续地分割成一簿片一簿片的截面。在制造零件的过程中，先制造出这一系

列的截面，然后再把这一片片的截面粘合起，就形成了所需的零件。当然零件的精度就取决于截面的数量。当截面的厚度无穷小时，则得到的零件也就是与所设计的零件的最好的近拟。用一个简单的例子来说明该技术的过程。如要造出一个面包状的零件，则可以先制出一片片的面包片，然后再将其粘合在一起，就可以得到一个完整的面包状零件。由于其成型的特征，这种技术可以被称为分层制造技术（Layer manufacturing），快速自动成型技术（Rapid prototyping），以及复杂形状实体加工技术（Solid freeform Fabrication）等。在本书中，我们采用一种普遍应用的名称，即快速自动成型技术。

1.2.3 为什么需要快速自动成型技术

首先让我们回顾一下传统的机械制造工艺。一般我们可以采用三种方法来加工一个形状复杂的零件。

①切除法：在原材料上去除多余的部分而获得所需零件的一种制造加工方法。如采用机床的车、铣、钻、磨等切削加工方法。

② 成型法：让材料在模具中成型的一种加工方法。如冲、锻、压、浇铸、注塑等加工。

③粘合法：把各个子部分粘接起来形成零件的一种加工方法。如焊接、粘接工艺等。

这三种方法比较常用于制造工业中，各具有优缺点，但其共同的一点是生产一个产品都要经过构思、设计、工艺设计和加工等各个步骤。这样，由于制造成本、生产产品的时间、数量及质量多方面的限制，使生产一个初样的成本十分昂贵。因此在加工工艺的选择中，尽量以成型法来代替切除法，即优先采用无切削加工。但在无切削加工中，又受到工

件数量、模具的制造等因素的限制，而优先采用粘合方法，即先制造出形状简单的零件，然后再将其粘合成所需的复杂的零件。这就是快速成型技术产生的基础。当然粘合法也有其局限性。如复杂的零件必须首先分解成简单的部件，再进而制造出简单的部件。在粘结过程中还需要专门的工夹具，使工件能稳固地夹住和定位，而且生产出来的零件在精度和强度上都比较弱。因此，在制造工业中，如果是零件复杂和数量又很大时，一般采用切除法和成型法为好。而粘合法则适用于加工形状复杂而数量较少的产品。这些选择准则同样适用于如何正确选择快速成型技术。

1.2.4 产品形成过程

快速成型技术是在传统的粘合工艺基础上发展起来的。那么它是怎样来实现零件的生产的呢？我们可以从设计到制造的自动化进展过程来认识这种加工方法的本质。

一个产品的形成过程一般需要经过下列几个过程。① 首先设计者要根据用途，产生零件的构思，即概念设计；② 进行具体的设计，即把构思用工程图纸的形式来进行表达和描述；③ 由工艺人员对零件图纸进行工艺分析和设计；④ 送交机床进行加工；⑤ 生产出所需要的零件。其过程可用图 1.1 来表示。

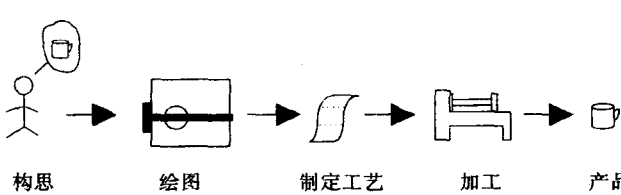


图 1.1 传统的机械加工过程

随着计算机和信息技术的发展，传统的机械加工被进一

步自动化。在这种计算机控制的自动化加工过程中，还是要经过相同的步骤，只是用计算机代替了人的操作。① 概念设计；② 用 CAD 系统代替了人工的制图过程；③ 由 CAPP 系统代替了过去的工艺分析和设计；④ 由 CAM 和 NC 代替了手工操作机床；⑤得到所需的产品，其过程可用图 1.2 来表示。

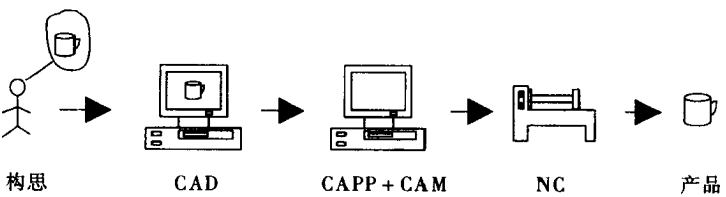


图 1.2　计算机集成制造系统

是否能实现从概念设计到产品的生成一步化呢？这样不就能进一步提高产品生产的集成化、智能化和自动化程度了吗？快速自动成型技术就是为了实现这个理想而发展起来的。实际上在快速成型制造过程环节中、消除了计算机集成制造技术中所需的 CAPP 过程，而将 CAPP、CAM 和 NC 过程集成为快速成型制造一个环节。这样产品生成过程就被减缩为：① 概念设计；②CAD 建模；③ 快速成型制造；④ 产品制成。图 1.3 示出了这个产品加工过程。

由此可以看出快速成型技术可以具有如下优越性：

①可适用于完整的 CAD/CAM 集成的需要；

②实现设计到制造过程完整的自动化；

③可以直接从材料制造出零件，不需要任何切削加工；

④由于不需要进行工艺处理，不需要特征为基础的设计，大大方便设计工作；

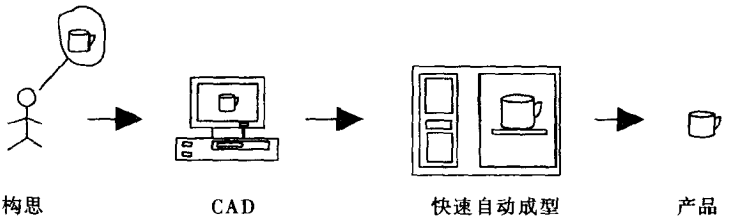


图 1.3 快速自动成型中产品生产过程

⑤不需要从设计到制造的信息转换；

⑥ 不需要工装夹具；

⑦ 不需要刀具；

⑧ 不需要模具。

快速成型技术的发展将导致传统机械加工的革命。

1.2.5 基本原理

许多快速成型技术及方法都是根据分层制造的原理。在这种分层制造方式中（图 1.4），首先必须将零件几何形状输入到一个计算机图形系统（CAD)。其次，这个计算机表示的几何模型被分割成 $2-\frac{1}{2}$ 维的信息层。每一分割层表示了一个具有非常小的厚度的平面截面体。然后，在加工过程中，这些平面截面体被一层层沉积或粘接在一起，这种连续的粘接过程就形成了所需的实体。物体的几何形状被分成内部和外部二部分。内部区域表示了零件的实体部分。而外部区域则在快速成型技术中起着支撑结构的作用。其作用有二方面的含义，一方面可用来作为零件的夹持部分；另一方面可以用来支撑一些在生产过程中不联结的区域。这在第二章中会作详细介绍。

在快速自动成型技术的应用过程中，我们可以利用它把

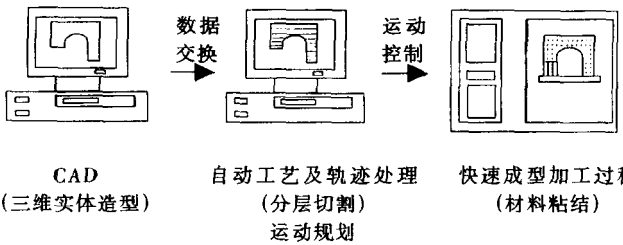


图 1.4　快速自动成型技术的基本原理

现代高级的 CAD 技术和组合技术与传统的机械加工技术进行了有机的结合，如图 1.5 所示。这种有机的组合可以在这

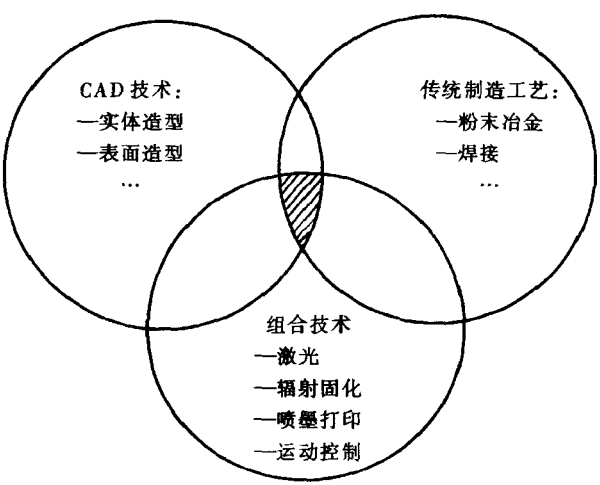


图 1.5　与快速自动成型技术相关的技术领域

些机器的运行中进行，让人的干涉减少到最小而且不需要专门的知识。这是由于：

①把三维的复杂的几何形状简化为 $2\frac{1}{2}$ 维的简单表示；

需要全本请访问 www.ertongbook.com

②不需要专用工夹具；

③商品化的快速成型机构提供成套的技术和软件，使之非常容易操作。

1.2.6 发展历史

快速成型技术是根据生产发展的需要而产生的。这种技术在这 10 多年的时间里，随着信息和智能技术的发展而得以迅速发展，并已成功地应用于工业中去。但是它的起源，却可以追溯到地形图学。

早在 1890 年，Blanther 就提出了用分层方式来构造地形的模型。其方法十分简单，即把测绘得到的地形轮廓线印在一系列蜡板上，沿轮廓线把蜡板切割下来。然后把这些蜡板叠接起来，并把交接的区域磨光打滑，这样就可以得到一对具有凸和凹的三维的地形模具。只要将一张印好的地图，压在凸模和凹模之间就可以得到一张地貌图，该过程被说明在图 1.6 中。

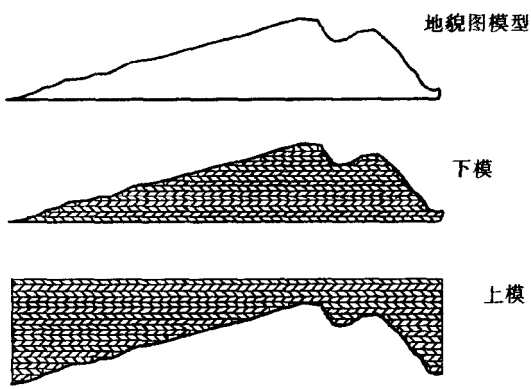


图 1.6　制造地貌图的分层模具

在 1972 年，Matsubara 提出了一种应用光固化材料的类似于制造地形图的过程。在这种过程中，光烧结树脂涂在耐火的颗料（如石墨粉或砂子）上，这些被涂过的颗料被喷成一个簿层。并加热使其成为一个粘结状的簿片。然后用光照射到需要固化的区域，而使其硬化。而没有受到光照射的部分则用溶剂除去。重复这一过程，使一层层簿片堆积成一个浇注模具。1974 年，Di Matteo 认识到这种方法可以用来产生一个用传统机械工艺难以加工的零件表面，这些零件的例子是推进器、叶片和三维的凸轮等。要产生一个分层制造成的模具。首先在一个个金属簿片上铣削出一个个所需要的轮廓。然后把这一层层簿片用定位销和粘结剂联结成一个模具，再把轮廓进行光整加工。用该模具即可生产出具有非常复杂的表面形状的工件来。到 1979 年，Nakagawa 开始采用分层制造的技术来生产冲截模、压力成型模和注塑成型模具等。

在快速自动成型技术发展过程中，许多的专利可以包括许多目前存在的商用产品。表 1.2 列出了其中的一部分。

表 1.2　一些主要的快速成型技术专利情况

姓　名	标　题	时　间	国　家
Housholder	造型过程	1979 年 12 月	美国
Murutani	光学造型法	1984 年 5 月	日本
Masters	计算机自动制造过程和系统	1984 年 7 月	美国
Andre 等	制造工业零件模型的装置	1984 年 7 月	法国
Hull	采用烧结法制造三维物体的装置	1984 年 8 月	美国
Pomerantz 等	三维交换和造型装置	1986 年 6 月	以色列
Feygin	分层制造复合零件的装置和方法	1986 年 6 月	美国
Deckard	利用选择沉积法制造零件的方法	1986 年 10 月	美国
Fudim	光辐射三维物体的生产方法	1987 年 2 月	美国
Arcella 等	浇注成型	1987 年 3 月	美国

续表

姓　名	标　题	时　间	国　家
Crump	产生三维物体的方法	1989 年 10 月	美国
Helinski	用颗料沉积来产生三维物品的方法	1989 年 12 月	美国
Marcus	气相选择性光束沉积法	1989 年 12 月	美国
Levent 等	热喷沉积法	1990 年 12 月	美国
Penn	制造三维物体的系统、方法及过程	1992 年 6 月	美国

1988 年，在美国的 Autofact 展览会上，3D 系统公司展出了其第一个工业用的技术设备“立体液相成型装置”(Sterolitograph Apparatus，缩写为 SLA)。从此以后，大规模的工业应用和研究工作开始了。

参 考 文 献

[1] Beaman J, et al. Solid Freeform Fabrication: A New Direction in manufacturing. Dordrecht: Kluwer Academic publishers, 1997

[2] Wang K. Integrated Intelligent System (IIS) for Manufacturing, Lecture notes of Application of AI to Production Engineering. Tallinne, Estonia: Nordic - Baltic Summer School, 1996

第二章　快速自动成型技术基础

2.1　辐射聚合物基础

2.1.1　辐射聚合物的定义

在光或热的辐射下会固化的物质，被称为辐射聚合物。由于在许多工业涂料和油漆中，均含有大量易挥发的对人类身体健康有害的有机物质，工业界迫切要求生产一种能替代这种有害于人体的涂料物质。在这种情况下，辐射固化聚合物就得到了迅速的发展。 70 年代初期，这种辐射固化聚合物就被应用到许多印刷品的涂料之中。到了 80 年代中期，一种在超紫外光线照射下能固化的油漆面被广泛地应用到家具生产的喷塗工艺中了，这种油漆既光亮美观，而且清洁、无污染。

在 80 年代后期，分层制造技术得到了重视和发展，首先考虑到的辐射固化材料是光敏树脂。这种树脂能在激光或超紫外光线的照射下迅速凝固成型，而且所生成的固体强度也较好，因此目前已被广泛用于分层制造的生产实践中。

辐射烧结聚合物的许多物理及化学特性，如成分、分子结构，液体的流动性、粘度、收缩率、变形度等均与所形成零件的几何形状、加工精度、表面光洁度和强度有密切的关系。为了充分理解分层制造技术并保证产品的质量，有必要让读者对辐射烧结聚合物有进一步的了解，因此在本节中，对于辐射聚合过程，激光照射量的影响及对树脂性质的评价和测定方法均作一比较详细的介绍。在讨论过程中，尽量避

免使用过分专业化的化学术语和名词。读者可以通过参考文献［6］、［8］、［10］获得更深刻的了解。

2.1.2 辐射聚合过程

所谓辐射聚合过程，就是许多离散的小分子（单体），在光和热的辐射之下，被连接成大分子（聚合体）的一种化学反应过程。这个过程很容易用图 2.1 所示的乙烯类单体聚合例子来说明。

乙烯类单体可以定义为分子中含碳—碳双键的单体。乙烯基团（双键）碳原子可以连接一个结构基团，在图 2.1 中以“R”来表示。这个“R”基团或许有一个或多个其它乙烯基团（双键）。在这种情况下，这种单体被称为多官能团的单体（双官能、叁官能团等等）。多官能团单体聚合的结果，就形成了交联聚合物，如图 2.2 所示。

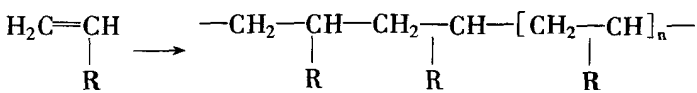


图 2.1 乙烯类单体的聚合过程

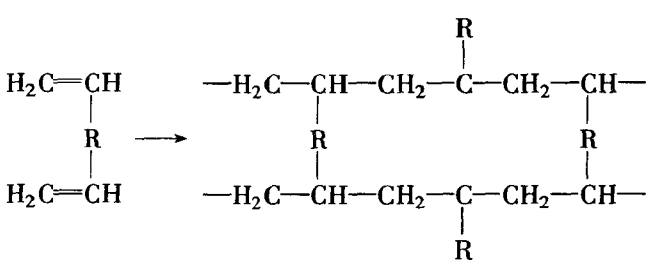


图 2.2 交联聚合过程

乙烯类单体分子中双键上的碳原子通过化学反应可以形成新的键，特别是和另一个分子的碳原子形成新的键。在这

个过程中，分子间失去范德华力，而与邻近的分子形成网状的共价键，从而使单体的性质发生改变，即剪切强度增加，并由液态变成固态。基团之间的平均距离缩短，密度增大（即收缩）。

丙烯酸酯类单体是乙烯类单体中的一族，由于它的羧基直接连在双键碳原子上，因此它具有较高的反应活性和多功能性。只要通过改变酯基的基团，就很容易产生大量的丙烯酸类单体。丙烯酸类单体在聚合时是一种放热反应，其反应热约为 85kJ/mol。一般在无外界能量的作用下，在室温下，丙烯酸能够稳定地存在而不发生反应。如果要使其以较快的速度进行聚合反应，则必须要加入催化剂（引发剂）。

对于丙烯酸类树脂，催化剂的作用是引发产生自由基。当然，自由基亦可以通过热或光化学方法来产生。光化学产生自由基的物质是一种光引发剂，它通过光子引发反应（如图 2.3 所示）而产生的自由基（以大黑点表示）。在催化聚合反应过程中，光子是将液态单体转变成固态聚合物的催化剂。

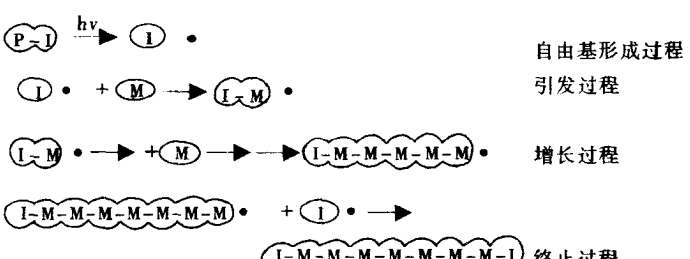


图 2.3　光子引发反应过程

需要全本请访问 www.ertongbook.com