

远红外 加热与干燥 译文集

上海科学技术情报研究所

远红外加热与干燥译文集

*

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 330,000

1977年7月第1版 1977年7月第1次印刷

印数: 1—6,600

代号: 151634·350 定价: 1.65 元

(限国内发行)

前 言

远红外线加热与干燥技术是近年来发展起来的一项新技术。它是利用远红外辐射器发出的远红外线为被加热物体所吸收,直接转变为热能而达到加热干燥的目的。由于这种加热方法具有高效快干、节约能源、烘道占地小、干燥质量好等优点,故能得到广泛的应用。它特别适用于各种有机物、高分子物质以及含有水分的各种物质的加热和干燥。诸如各种树脂、塑料、油漆、粘接剂等涂膜的烘烤,粮食、蔬菜、食品、纤维制品、塑料制品、胶合板、纸张、印刷油墨、粉末制品、金属加工等的加热干燥、硬化与热加工等。

因而,远红外线加热与干燥技术在农业、轻工、纺织、化工、机械、仪表电器、手工、食品、印刷照相、医药、木材加工、金属加工等部门都有着广阔的应用前景。

近一年多来,本市广大工人、干部和技术人员,抓路线、促大干,使远红外加热干燥技术取得了很大的进展,不少行业已推广应用,获得了显著的效果。为了配合各行各业推广、应用远红外加热干燥技术的需要,我们遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导,对近年来国外发展起来的远红外线加热干燥技术方面的资料,进行了普查分析研究,除其中一部分提供有关单位参考外,并选择了一些有代表性的资料,包括原理、远红外辐射器、应用、炉道设计、测试技术等方面的内容翻译整理出版。

限于水平,加之时间仓促,缺点错误在所难免,恳请批评指正。

编 者

毛主席语录

阶级斗争是纲，其余都是目。

洋为中用

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

前言

远红外线加热的原理	(1)
采用远红外线进行涂膜干燥硬化处理的有关问题	(22)
以氧化锆和氧化钛为主要成分的远红外线辐射器	(30)
具有镍铝等金属基底的管状辐射装置	(32)
以火焰熔射形成辐射物质层的远红外辐射装置	(34)
能调节波长的远红外线辐射元件	(36)
阻抗发热体表面熔射陶瓷物质层的长波长红外线辐射元件	(38)
以锆系陶瓷为远红外线辐射层的远红外元件	(41)
发热体表面被覆陶瓷层的红外辐射器	(43)
能在高温下使用的红外线辐射器	(47)
锆系陶瓷和远红外辐射器件	(49)
在发热体表面形成凹凸状陶瓷层的远红外线辐射器件	(53)
红外线陶瓷发热装置	(59)
辐射层含氟化镁 50% 以上的红外线辐射装置	(61)
辐射层含氧化钴 50% 以上的红外线辐射装置	(64)
远红外线辐射器件及其应用	(67)
远红外发光发热体及其涂膜干燥硬化的实验	(90)
用远红外元件进行热处理的效果	(111)
传送中的纱、线状物等的远红外线热加工装置	(117)
应用远红外线加热进行塑料的弯曲加工	(121)
食品干燥装置	(128)
远红外线喷涂干燥装置中的机械结构	(131)
通用 S 型传送带式远红外线干燥炉	(137)
应用远红外线辐射发热体的各种干燥装置	(148)
长波长红外线辐射炉	(157)
箱状辐射体远红外线干燥炉	(159)
远红外线干燥机	(162)
涂料干燥装置	(164)
利用远红外线消除局部应力	(166)
远红外线涂膜干燥硬化促进剂	(170)
发热体辐射波长的测定	(173)
远红外线的测量技术和测定装置	(199)

远红外线加热的原理

一、引言

美国福特汽车公司自 1938 年把红外线用于汽车的涂饰干燥开始,红外线加热技术就逐步发展起来。由于这项技术用于诸如纤维制品一类薄物的干燥,一开始就发挥很大作用,以后又被应用到车辆涂饰及其它各种涂层烘烤,食品、木材、玻璃、橡胶、树脂等的干燥和加工等。

而这个时期的工业用红外线发热体,主要是把钨、镍铬合金等的电阻发热体封入玻璃和石英中,这些发热体所发出的波长最长是在 4~5 微米以下波长带的近红外区,采用这种发热体所以能产生效果,是因为水分等很多的物质在近红外区具有一部分吸收带,故用它来作为诸物质的加热源是有效的,从而获得广泛的利用。但是,含有水分的多数有机物质、高分子材料等,在远红外区具有更多的吸收带,因此如果出现从近红外到远红外宽带区的发光发热体,就能充分发挥物质的吸收加热效果,可以想象,这比仅用近红外发热体更加有效。

近几年来,在日本生产了远红外发光发热体,并陆续出现新产品,其有效发光波长从 50~100 微米,以至 200 微米的超远红外线。由于采用了这种产品,很多有机物、高分子材料的加热时间从过去需要几十分、几百分钟缩短到几分或几十分钟。

二、红外线的基本知识

1. 红外线的性质

(1) 以波长*的分类

红外线和可见光一样都是电磁波,它们的区别仅是波长不同。图 1 所示是各种波以波

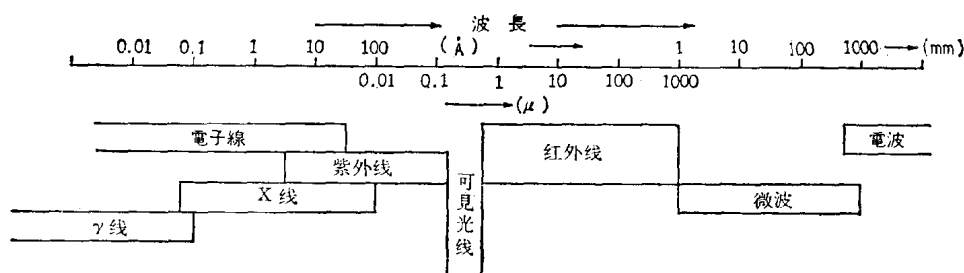


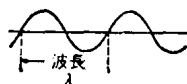
图 1 电磁波波长的分类

* 波长——光作为具有波动性质考虑时,就把波动的一个周期期间的长度称为波长。通常用 λ 表示,又把一秒钟的周波数称为频率或振动数。两者之间的关系为:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

ν : 振动波数

c : 光在真空中的速度 $\approx 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒



长来进行分类的大致情况。由图可见，红外线波长范围是在 0.72~1000 微米的广阔区域，

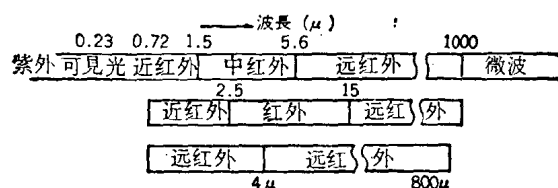


图2 红外线的分类

它是介于可见光和微波之间。在这样宽带区域电磁波谱中，人们眼睛所看到的可见光仅仅是波长为 0.22~0.72 微米的极狭范围。

红外线又可进一步划分为二或三个部分(图2)，但是这种区分近红外、远红外等的界限并没有统一的规定。就是说，从红

外线本身的物理作用来说，并没有特别明显的差异。大体上以 4 微米为界限，把 4 微米以下称为近红外线，4 微米以上称为远红外线。

一般用波数 k 代替 ν ，波数 k 的单位是(厘米⁻¹)。

此外，考虑到光具有波动性的同时还兼有粒子性，其光能以：

$$\varepsilon = h\nu$$

h ：普朗克常数， $h = 6.623 \times 10^{-27}$ 尔格·厘米³

以一个光量子的能量作为单位。由此得到：

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

若已知波长 λ ，就能算出能量。由此可知红外线的波长愈大，其能量愈小。图3即表示这些关系。

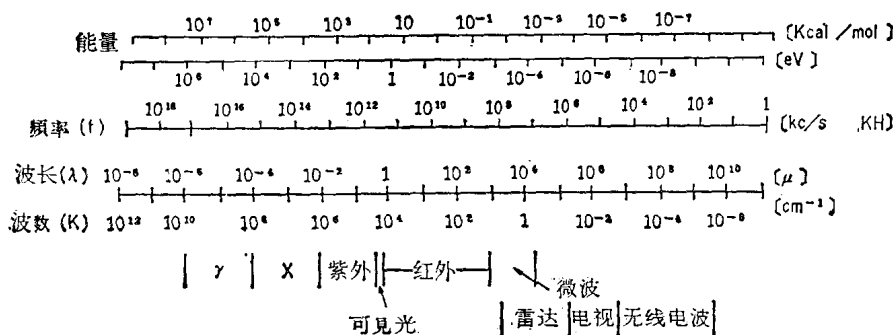


图3 电磁波的能量与波长、频率数和波数的关系

(2) 反射、吸收、透射

红外线的波长位于可见光和微波之间，因此可以想象它所具有的性质也是两者所共有的。它具有和可见光一样的直线传播性，它被射到物体表面时，一部分在物体的表面被反射，其余部分就射入物质内部，而射入物质中的红外线，一部分透过物质，其余部分为物质所吸收。它们的作用可以和可见光同样处理。设入射的红外线量为 P ，反射、透射、吸收量分别为 P_R 、 P_T 、 P_A (图4)，则：

$$P = P_R + P_T + P_A$$

若假设 $\alpha = \frac{P_A}{P}$, $\gamma = \frac{P_T}{P}$, $\rho = \frac{P_R}{P}$

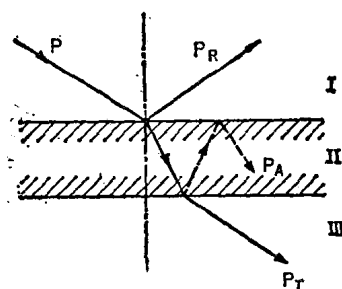


图4 光的反射、吸收、透射

则:

$$\alpha + \gamma + \rho = 1$$

这里, α 、 γ 、 ρ 分别为吸收率、透射率、反射率。

利用这种光学性质, 通过使红外线聚光或分散指向, 就能在各种用途中利用红外线。图 5 表示反射镜的一个例子, 预先知道反射镜随物质的种类和表面状况的不同而具有的 α 、 γ 、 ρ 各值, 是很重要的。图 6 表示作为红外线反射材料的各种金属表面的反射特性。从耐热、耐腐蚀性或金属表面状况不变性的观点来看, 仍以金或镀金表面为好。便宜的材料则一般采用铝, 多数用铝的研磨面和蒸镀面。

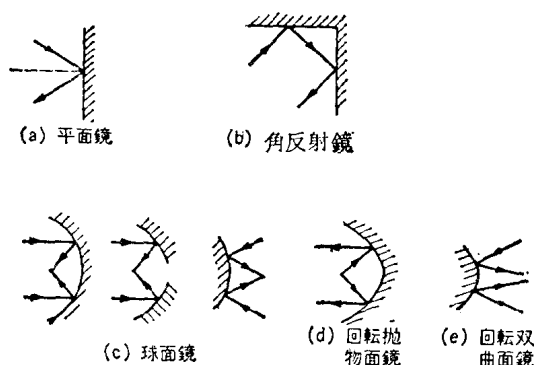


图 5 反射镜的形式

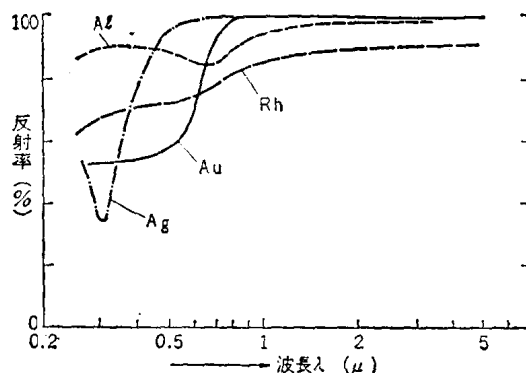


图 6 各金属光洁面的反射特性

最近, 使红外线配聚起来, 作为点光源、线状光源、面光源等, 以制造强大的近红外线热源, 用来进行局部加热, 例如厚膜集成电路等的基板或金属基板上的焊料等的迅速热加工装置。

图 7、图 8 分别表示玻璃、透明石英等材料的透射特性, 从图中得知其透射性与材料的厚度有关 (A、B、C 表示不同厚度的曲线)。它们的透射率大体在波长为 2~5 微米以上时就急剧恶化。因此, 若把发热体用这样的材料封装, 透过它所发出的光谱, 就是波长为 2~5 微米以下的近红外线。

另外, 可作为分光器等的透射窗的各种材料的有效波长示于表 1 中。

其次, 红外线若被吸收到物质内部, 被吸收的能量就转变成热。因此红外线加热是否有

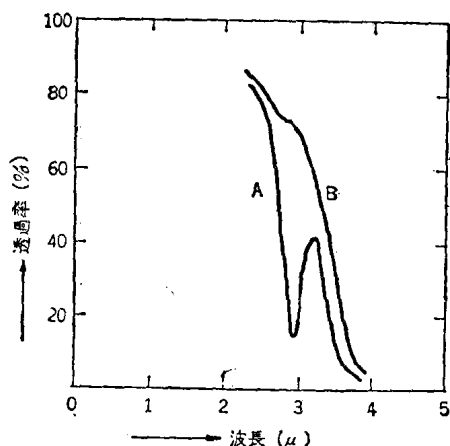


图 7 硼硅酸玻璃的分光透射率

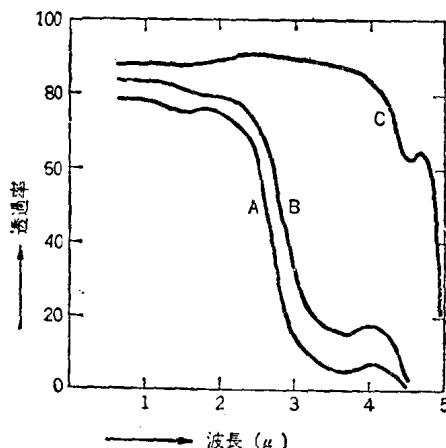


图 8 石英的分光透射率

效,取决于受红外线照射的物质的吸收率,这个吸收率也随物质的种类、表面状况以及波长等的不同而有所不同。而它的机理也不是简单的。关于这一点将在后面详述。

表 1 红外线透射窗材料

种 类	有效透射范围(微米)	种 类	有效透射范围(微米)
玻 璃	可见光~2.5	岩 盐	紫外~16
水 晶	紫外~3.5, 45~∞	钾 盐	紫外~21
氟化锂	紫外~6	氯化银	紫外~28
云 母	0.3~8	溴化钾	紫外~30
萤 石	紫外~9	碘化钾	紫外~35

(3) 大气中红外线的衰减

从太阳辐射出来的能量最后到达地面上的,是全部能量的 70% 左右,其余 30% 因途中的尘埃、臭氧和水蒸汽的吸收而损失。图 9 表示在海平面高度上大气主要成分的红外线吸收带,最下面的一个图是它的综合图。水蒸汽在 3 微米以内和 5~7 微米,以及 14~16 微米附近也具有大量的吸收带,因此它起着红外线透射的衰减作用。所以如果使发出的红外线照射到物质上来加热该物质时,在到达被照物质前的介质中若存在水蒸汽和二氧化碳等,则它们吸收红外线,将降低照射效率。相反,若加热干燥包含水分的物质时,用具有很宽吸收带波长的红外线照射,效果就好。

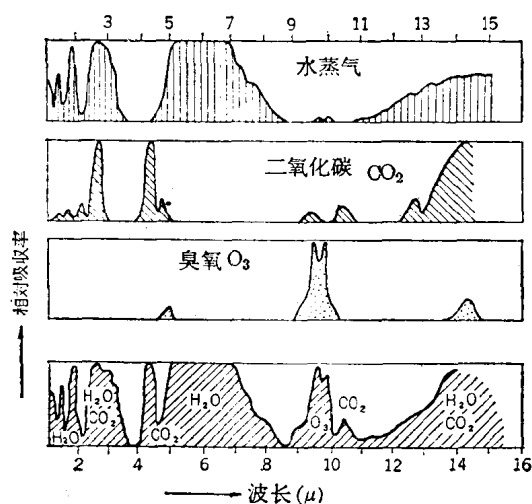


图 9 大气中主要成分的红外线吸收

照射物体所吸收时就转变成热。如果能使变成热的红外线的量增多,而不变成热的可见光的量相应减少或者等于零,也就是能辐射出高密度的红外线时,这就必然成为加热效率非常高的热源。按这样的想法生产的制品可称做红外线发光发热体。而且,这种红外线是一种电磁波,以光速在空间传播;另外,若介质为空气或为真空时,中途就不会有损失,亦即具有良好的透过性。因此,它作为物质的加热方法是很方便和有效的。

下面更详细地阐述这种红外线是通过怎样的过程发射又是怎样在物质中被吸收的。

2. 红外线的发光

众所周知,一般物质是由分子聚集而成,分子则又由原子组成,原子又是由原子核和环绕其周围旋转着的若干电子组成。而它们恰如太阳周围的行星一样在几个轨道上配置,在这些轨道外不存在电子,而这些轨道随着近核的内侧向外侧分布,它们所具有的能量也逐渐

变大。一般地说,原子在通常状况时,在其轨道上的各个电子是处在总能量最小的位置,这样的电子排列状态称为处在正常状态或称基态,而不在这种状况时,此原子就称为激发态。还有原子在基态时,各电子并不是全部都处在最内侧轨道上,而要受到能存在于各轨道上电子容纳数目的限制,就是说存在于特定的位置,而在其它位置不能存在。

现在,如果把电子轨道从接近核的最内侧向外作为 K 、 L 、 M ……壳层,第一轨道的 K 用 $n=1$, L 用 $n=2$, M 用 $n=3$ ……等表示,这个 n 值称为量子数,存在于原子中具有量子数 n 的电子最大容纳数是 $2n^2$ 个,再多的电子就不能存在,这称为包利不相容原则。如 $n=1$ 是 2 个, $n=2$ 是 8 个……,这是在各轨道上指定位置的电子数目。例如:碳原子 C 有六个电子,在 K 壳层有 2 个,在 L 壳层占有 4 个,同样铝原子 Al 有 13 个电子, K 层有 2 个, L 层有 8 个, M 层有 3 个,即从最内层的空位顺次向外层填充。这是根据在基态原子的电子作为整体的能量含量应尽可能小这一原则而顺次从内侧向外侧填充的结果。

然而,如果在这样的原子中用某种方法(加热或放电)从外部加入能量,增加外壳层电子的能量含量而产生激发态。这时,外壳的若干个电子就从基态位置跃迁到能量多的其它电子壳层中去。但是这种状态是不稳定的,所以它不能永久存在(通常是 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ 秒),电子再复归或跃迁回到原来的正常状态。而在这一跃迁时,等于两位置差的能量就是以光的形式发射出来。这是原子光谱的生成原因。图 10 是氢原子的能级图以及电子的跃迁图。

K 壳层上的电子被激发,激发到 L 、 M 、 N 、 O 壳层上,跃迁时,不一定限于到 K 层,也可能到 L 、 M 、 N 壳层。

现在,量子位置用 n_1 、 n_2 表示,其间的能量差,也就是跃迁差用 ΔE 表示,那么 ΔE 应该满足:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \propto \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

h : 普朗克常数 c : 光速

因此,如已知量子位置 n_1 、 n_2 , 就能计算此时放出的光的振动数或波长。相反,如测得振动数和波长,就能推定物质的电子结构。

这样用高温加热等方法激励物质,引起物质原子最外侧的价电子移动或者跃迁,从而产生发光现象,相应于这种跃迁宽度,辐射出紫外线、可见光和红外线等。而如果从外部给予原子的能量显著增加,使电子壳层内侧部分的电子也移动,这时就产生 X 射线。

以上是以氢原子为例来叙述的,其它具有多电子原子的电子结构,除了上述的量子数 n (决定从核到电子的平均距离的量子数)以外,也取决于决定电子角运动量大小的量子数 L (称为付量子数),所以它的能量量子位置(能级)不象氢原子那样简单。但是原子中的电子激发到高量子位置再跃迁到低量子位置时的发光原理,仍和氢原子的情形相同。

此外,象 CO , HCl 这类两个原子的分子和 H_2O , CO_2 等多原子分子,除了上述的电子

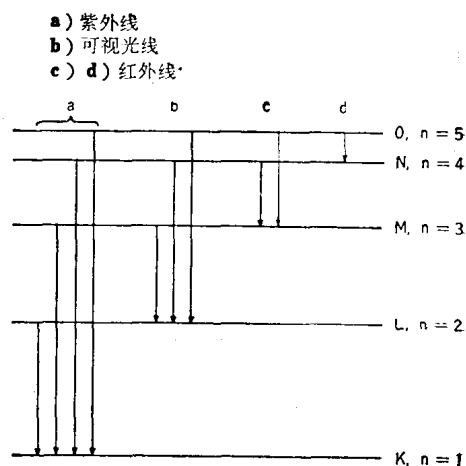


图 10 氢原子能级图

移动外, 分子整体也进行周期性的转动, 而且分子内各个原子也相应振动。而它们的转动能、振动能等进行量子化并形成单独的能级。因此分子所具有的内能 E , 不仅关系到电子状态的能量 E_{el} , 还关系到分子的转动能 E_{rot} , 和各原子间的振动能 E_{vib} 。

$$\therefore E = E_{el} + E_{rot} + E_{vib}$$

因此, 如果谈到实际的分子发光或吸收光谱, 就必须对它们分别加以说明。这在下面吸收问题中同时加以叙述。

3. 红外线的吸收

现在考虑由几个原子所组成的分子的情况, 这不仅是原子集团, 从力学上看, 是由原子这样一种具有质量的圆球和相当于将这些圆球相互间结合起来的、有相当结合力的“弹簧”所构成。而这种“弹簧”的动作有两种类型的基本振动, 一类是向结合成原子圆球的方向作伸缩运动, 一类是从结合轴的方向脱离, 改变其角度的变角振动。图 11(b) 是三个原子分子的振动。

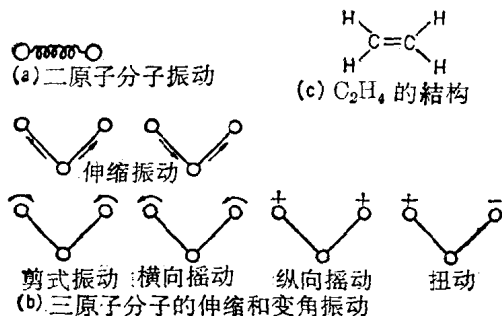


图 11 二原子分子、三原子分子的标准振动

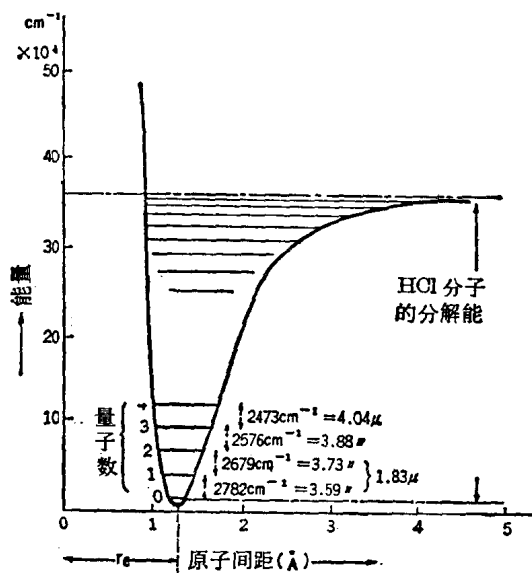


图 12 HCl 分子的能量曲线和能级

为了便于理解起见, 首先研究有两个原子的分子 HCl 气体。图 12 在氢原子和氯原子的距离约为 1.2 埃时, 分子具有的能量最小, 在此原子间距离不管是减小还是增大, 斥力和引力的作用, 结果总使能量变高。在量子数到标有 0、1、2、3 等的高度上才有振动能级, 而不存在中间的振动状态。热运动的能量在室温下为 KT (K 是玻尔兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/度, T 是绝对温度), 把该值改为波数, 约在 200 厘米⁻¹ 时, 相应的波长为 50 微米。图中的 0 和 1 之间的能级差为 2.782 厘米⁻¹ (3.6 微米), 与热运动的能量相比, 是十分大的, 因此在室温下, 所有的分子几乎都处在量子数 $\nu=0$ 的振动状态。

现在在这个状态照射红外线, 如红外线的波数恰好是 2.782 厘米⁻¹ (3.6 微米), 这相当于振动量子数 0 和 1 间的能量差, 所以 HCl 分子就吸收红外线的光量子。照射在这个分子上的红外线波数无论是比 2.782 厘米⁻¹ 大还是比它小, 光量子都不被吸收。若吸收 $2.782 + 2.679 = 5.46$ 厘米⁻¹ (1.83 微米) 的光量子就能从 $\nu=0$ 跃迁到 $\nu=2$ 的能级上, 但是这样一下子跳动的概率非常小。实际上, 各振动能级, 分子由于有能形成多个转动能级, 因此能具有更精细的转动能级。

图 13 表示分子内能级, 亦即电子振动、各转动能级间移动的精细结构。这里, E 、 E' 是电子能级, $\nu=0, \nu=1, 2, \dots$, $\nu'=0, \nu'=1, 2, \dots$ 是电子的振动能级, $J=0, 1, 2, \dots$, $J'=0, 1, 2, \dots$ 是转动能级。现在看图中 A 的情况, 它吸收相当于从 $J=1$ 到 $J=4$ 的能量而被激励。图中 B 的情况是伴随着 $\nu=0$ 到 $\nu=1$ 的振动能级的变化和 $J=1$ 到 $J=4$ 的转动能级的变化的能量吸收。图中 C 的情况 E 到 E' 是伴随着 $\nu=0$ 到 $\nu=1$, $J=1$ 到 J_3 的电子能量变化、振动能级和转动能级变化的同时能量吸收。

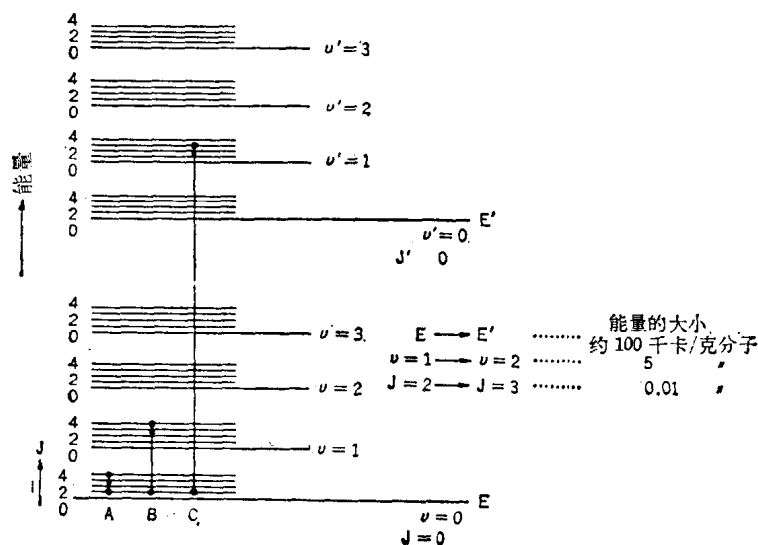


图 13 分子的内能能级和吸收

吸收红外线以改变分子的振动能级还需要另一个必要条件。就是由于振动改变着分子的对称性而使偶极矩发生变化的条件。例如: H_2 , N_2 , O_2 等有两个原子的分子中只产生如图 11(a) 所示的伸缩振动, 而这样同一种原子之间的伸缩振动是对称性的, 不显示出所谓极性。也就是这样分子的偶极矩经常是零。它不吸收红外线。也就是说这种完全非极性分子即使进行转动和振动, 由于它对周围的电磁场不产生任何的干扰或影响, 结果它的运动就不伴随光的发射或吸收。通常把不吸收红外线的物质称对红外线不敏感性的物质。同样道理, 即使在双原子分子中, 如 HCl 和 CO 等, 由于两个原子的大小不同, 可以想象是非对称的, 从直观地说, 可认为极性大, 因而对红外线是敏感的。对于三原子分子 CO_2 , H_2O 等, 在观察这些组成原子间的伸缩和变角振动等时, 发现它们对红外线是敏感的, 此外如图 11(C) 所示的多原子分子 C_2H_4 , 从直观上也能断定是对红外线不敏感的物质。

分子吸收红外线的程度与这种原子振动产生的偶极矩变化的平方成正比。如前述, 地上的空气对红外线具有透过性, 这是因为 N_2 , O_2 分子对红外线不敏感的缘故。

如上所述, 吸收相当于各固有振动能量的红外能量的分子中原子, 如图 12 所示通过增大振动量子数, 因而扩大了以平衡位置 r_0 为中心的振幅。也就是说振动变大, 从而温度就上升。而进一步增大量子数, 于是振动振幅成为无限大, 也就是引起两个分子的离解。图中表示的就是离解两分子所需要的离解能。

以上叙述了红外线被吸收而产生热的原理。并已知道, 通过吸收红外线而加热, 并不是对任何物质都适用, 只是对红外线敏感的物质有效。这就有必要预先知道什么样的物质对

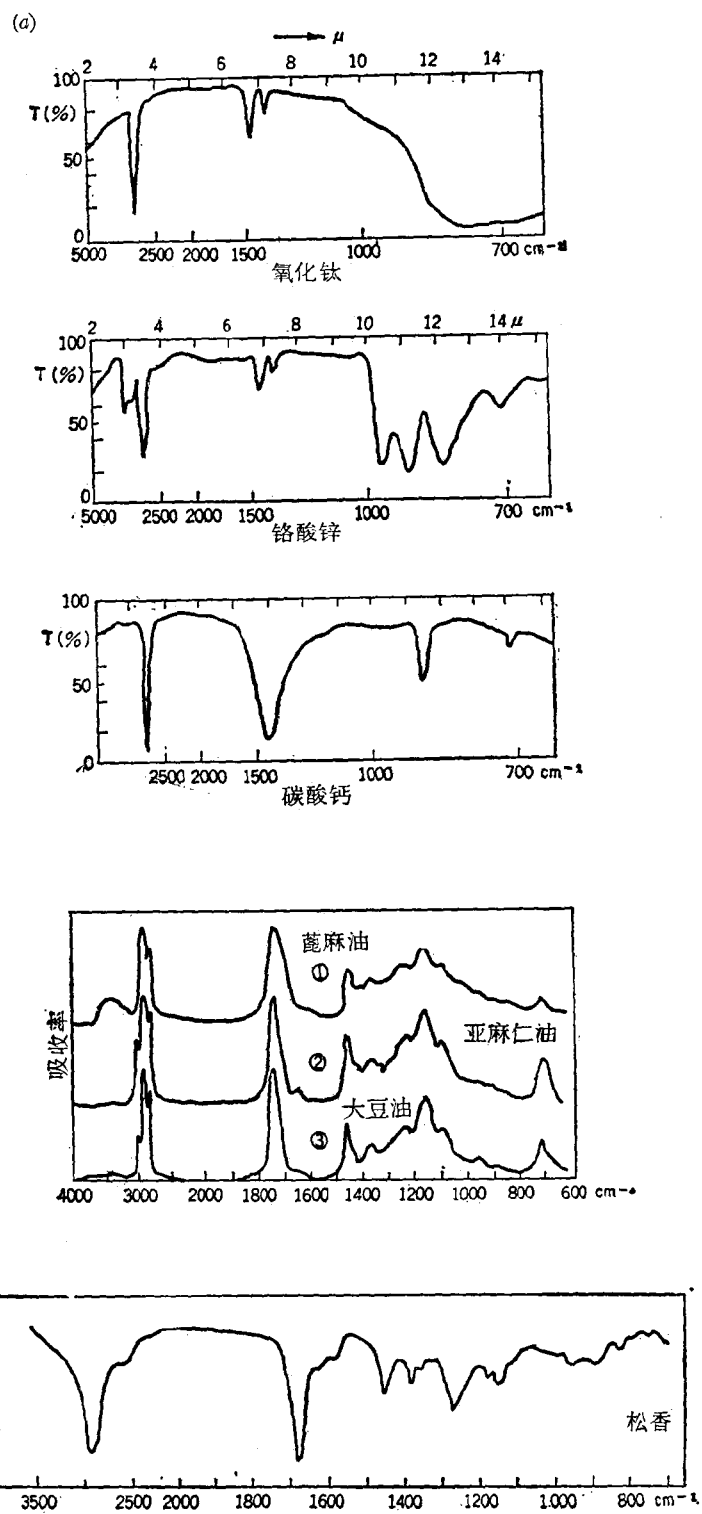


图 14

(b) 涂料用树脂

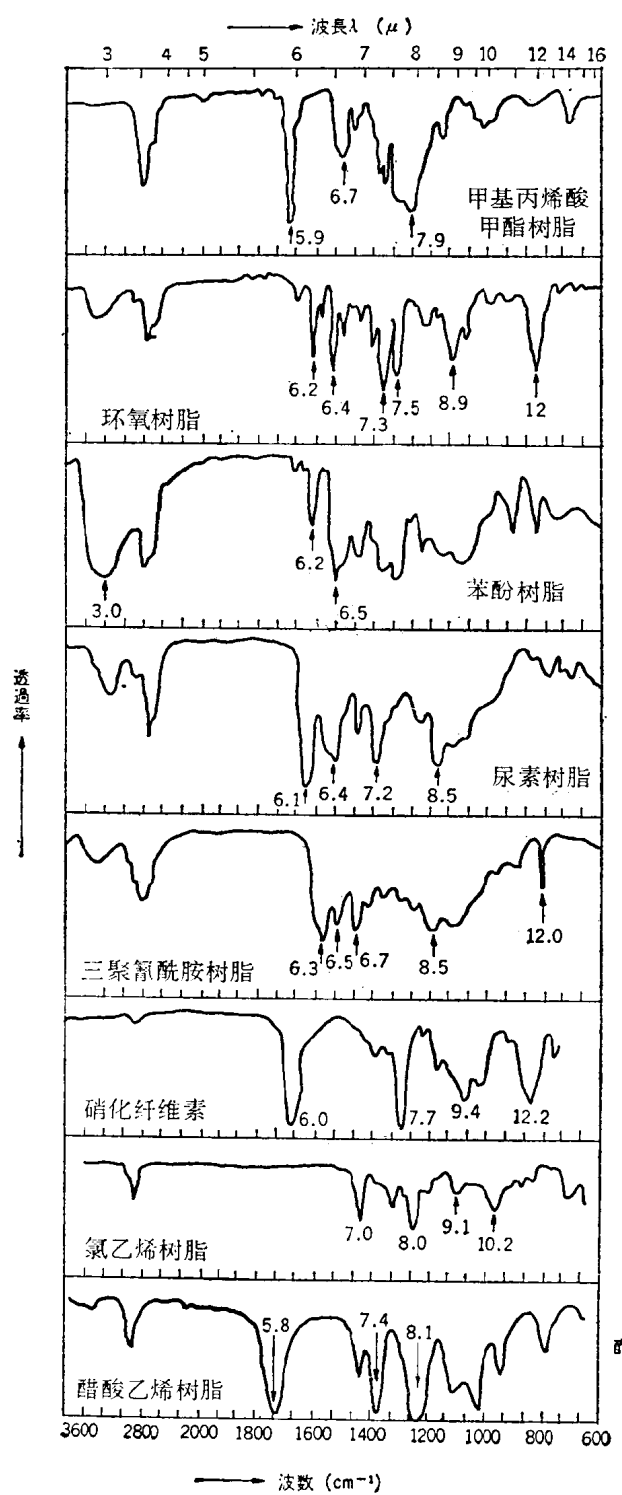


图 14

(c)

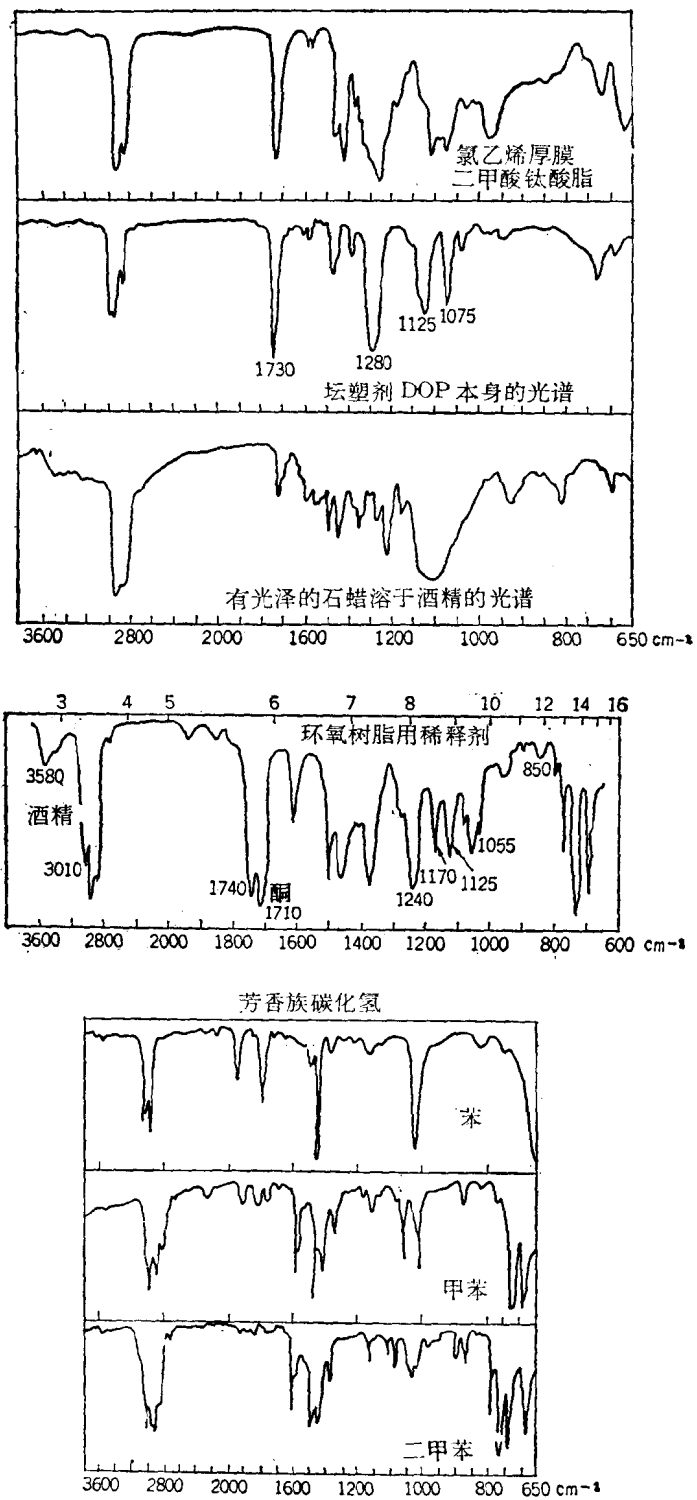


图 14

(c)

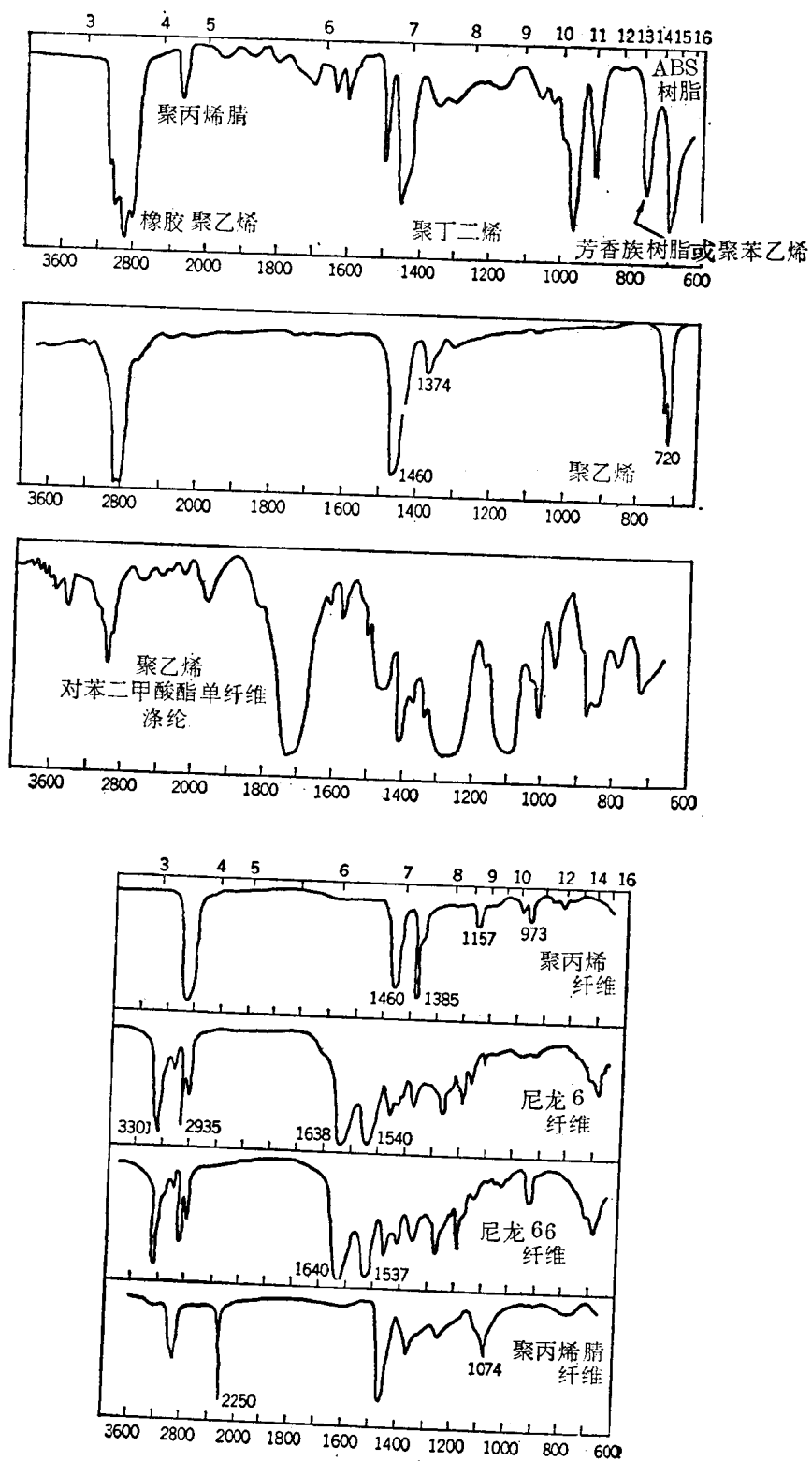


图 14

红外线是敏感的,以及强烈吸收的波长在哪些区域。

一般吸收特性在标准光谱表上公布的是 $600 \sim 3600$ 厘米⁻¹ (15~2.5 微米)。但是 15 微米以上的远红外区域的光谱,由于在分光测定技术上还有很多难点而无记载。因此就有必要查找可靠的测定方法的文献与本身的情况进行对比,以充分进行测定方法的研究。图 14 是工业用的主要有机物或高分子材料的吸收光谱。这里纵坐标表示透射率,因此透射率为 100% 时,吸收率为 0%;透射率为 0% 时,则相当于吸收率 100%。横坐标表示波数 K (厘米⁻¹) 或波长 λ (微米)。例如环氧树脂,在 $\lambda=7.3$ 时,就在 12 微米附近,三聚氰酰胺树脂在 $\lambda=6.3$ 时,就在 8.5 微米附近有强烈的吸收带。另外,红外线加热,如后述,特别是对涂料的加热硬化干燥为有效,所以作为涂料原料的颜料、油脂、增塑剂和树脂等的吸收光谱也一并表示出来。从这些图形可知,几乎所有的有机材料和高分子材料大体在 3~4 微米和 6 微米以上都有强烈的吸收带。

三、红外线的热传递

1. 热辐射

(1) 黑体辐射

现在研究的是把物体加热到高温时,从物体表面所辐射的能量大小及其规律性。

如前所述,最初对这个问题给予正确解释的是普朗克辐射公式。但此时的辐射物体是假定为所谓黑体*的理想物体,与实验结果基本一致。

为了简单地加以说明,先讨论黑体,再讨论实际物体。

1) 普朗克辐射公式

式(1)表示的是由理论上导出的公式,它表示在单位时间内从黑体表面的单位面积在半球面内所辐射的能量对波长的分布关系。波长为 λ 时的辐射能

$$E_{\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \times 10^{-15} [\text{千卡/米}^2 \cdot \text{小时}] \quad (1)$$

$$c_1 = 0.32167 [\text{千卡/米}^2 \cdot \text{小时}]$$

$$c_2 = 0.014387 [\text{米} \cdot ^\circ\text{K}]$$

T : 绝对温度

E_{λ} : 称为单色辐射强度

图 15 是任意地取(1)式的 λ 和 T 值,代入式(1)所得的 E_{λ} 值的图形,这就是辐射能量曲线。图中的 E_{λ} 在某一波长时,出现最大值,又在黑体表面温度降低的同时,该最大值也降低,而且向长波长方向移动。这里 6000°K 的曲线,大体是从太阳表面产生的辐射分布,约在 0.5 微米波长处出现最大值。人的肉眼感受最强烈的波长大体是 0.55 微米。

2) 全辐射能量公式(斯忒芬——玻尔兹曼定律)

在以黑体表面为中心的半空间,从黑体表面的单位面积所发射的全辐射能量,如果计算单位时间,把式(1)从 $\lambda=0$ 到 $\lambda=\infty$ 进行积分就能求得:

* 黑体: 黑体是完全吸收入射的辐射线或者在给定温度下,从黑体辐射的能量,比其它任何物体都大的物体。因此,对一切温度、一切波长来说,黑体是理想的物体或者说是完全的吸收体、辐射体。