

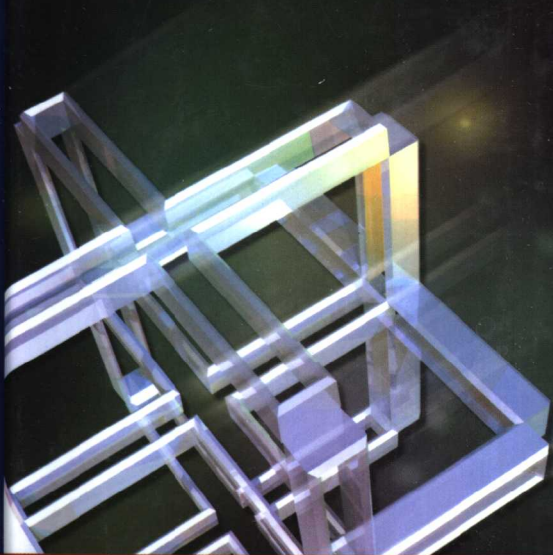
[加拿大] George Wypych 编著

*Handbook of
Material Weathering*
(3rd Edition)



材料自然老化手册
(第三版)

马艳秋 王仁辉 刘树华 等译
黎元生 校



中国石化出版社

Handbook of Material Weathering (3rd Edition)

材料自然老化手册

(第三版)

【加拿大】George Wypych 编著

马艳秋 王仁辉 刘树华 等译
黎元生 校

中国石化出版社

内 容 提 要

本手册涉及各种材料在光、温度、水、大气、污染物、应力等因素作用下,其性能发生变化的规律,如何延长其使用寿命、其失效废料对环境的影响及再回收利用等诸多内容。主要有:光降解模型和光物理学数据;光氧化反应、加成反应等光化学反应及其参数;在室内、户外进行耐候性研究的方法及两种情况的比较;根据研究结果得到的数据预测材料使用寿命及延长寿命的方法;失效废料的再回收等。涉及的材料主要有建筑、电子材料、各种涂料、航空航天材料、包装材料、牙科材料、纸浆等。

本书对于建筑材料、医药、电子、石油化工、航空航天、汽车、造纸等行业从事新材料、新产品开发、研究、生产的技术人员及相关管理人员,具有较高的参考价值。

著作权合同登记 图字:01-2003-3888 号

Handbook of Material Weathering (3rd Edition)

By George Wypych

Copyright© ChemTec Publishing, 38 Earswick Drive, Toronto, Ontario M1E 1C6, Canada

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

中文版权(2003)为中国石化出版社所有。版权所有,不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

材料自然老化手册:第三版/[加拿大]伟丕(Wypych, G.)编著;马艳秋等译.
—北京:中国石化出版社,2004

书名原文:Handbook of Material Weathering(3rd Edition)

ISBN 7-80164-587-1

I. 材… II. ①伟…②马… III. 工程材料-自然老化-技术手册
IV. TB3-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 056579 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

河北天普润印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 34.75 印张 885 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

定价:96.00 元

前 言

此前两个版本的《材料自然老化手册》侧重于材料自然老化研究中特定的某些方面，当时最主要的是想提高对材料降解老化过程的认识。

第一版强调了材料自然老化研究的多学科特征。成功的研究者需要多学科的广博知识。物理学和化学知识不仅是重要的，而且有助于认识环境条件的多变性和复杂性，有助于了解材料的合成与加工技术，有助于了解实验室技术的经验与技能。如果没有这方面的基础知识，制定研究计划、完成研究以及正确地整理考察结果都将不会取得成功。第一版包含了有关这些专题的章节，但有关这些内容的阐述限于当时技术所获得的资料，第一版的篇章结构以一种合理的方式提供了资料，使其易于查找和更正。

第二版是在实验水平达到一个高峰时编写的，但是显然也有很多是无效的。实验室条件在较宽的范围内变化，导致数据不能相互关联，无法找到相关性指标。第二版的重点集中在对降解的影响力进行定量、其与实际自然老化条件的关联及其产生的降解效果等方面。认真总结在那之后的工作，得出的结论的确表明自然老化条件相似时，得到的降解结果相似。之后出版过一本有关塑料的自然老化方面的新书，其目的是满足人们要找出其中因果关系的需要。

自第二版出版以来，通过更合理地运用适用技术、采用更先进的分析技术以及更全面的数据对比和处理方法，材料的自然老化性研究水平已经显著提高。本次出版的第三版包括了更多有用的信息，以及多达 2000 余篇新的出版物作为参考文献，这比第一版与第二版综合起来的内容还要多。

尽管要弄清材料耐久性的原动力已经存在并会继续加大，但是很显然必须要同时考虑资源的消耗和材料的影响，尤其是废弃材料对于我们生存环境的影响。

产品被废弃要么是因为它们不再发挥作用，要么是因为一种新的、可能有改进的产品更为理想。这两种情况都需要一个有效的再加工体系——一个能够从废弃的产品中生产多功能产品或原料(本文是指具有耐久性的产品)的体系。它们应当与新鲜原料生产出的产品没有差别。

要想达到这一目的，必须了解更多的东西。不仅要懂得如何开发适用的加工或生产技术，而且要知道如何选择、使用有效的添加剂。由于配方变得更加复杂，弄清降解机理所需的工作也将变得更具有挑战性。

一些材料被置于露天场所或简单地丢弃，人们这样做可能是希望随着时间的推移，在气候、生物降解和其他环境因素的作用下，这些材料会被无害地再

吸收并转化成天然材料。但大多数情况下，这不过是幻想或不负责任的行为而已。这些废弃材料可能造成土壤或水质污染并可能对动植物造成不利影响，即使预想的机理存在于再吸收的材料之中，废弃物的数量通常也会超出适用机理承受能力。

今天我们能够认识到问题的日益复杂性，我们正学会如何使材料更耐用、更能抵抗气候的变化，我们也需要学会如何再加工和覆盖这些材料而不污染环境、浪费稀缺的资源，所有这些工作需要更多的数据、更细致的分析以及更深入的认识。

第三版包含了所有获得明确研究结果的信息。信息已被分类，使其易于更正，而且进行了综合整理以说明相互作用的潜在影响及其带给材料的影响。前两版读者所熟知的章节已扩展了新的内容，增加的新章节涉及的都是人们所关心的新东西。

很多人对本书的出版做出了贡献。其中最重要的是贯穿全书的参考文献的作者，他们奉献的研究结果，为重要发现提供了有用的例证，有助于人们对于课题的认识与理解。

John Paterson 阅读了原稿，删除了明显和多余的叙述，提出了正确的解释并对本书和将要出版的书提出有益的建议。

阿特拉斯电气设备公司和阿特拉斯材料测试技术有限责任公司提供了很多有用的材料，为论述自然老化条件的几个章节提供了很好的佐证。

Jamie Chesler、Fred Lee、Mathew McGreer 和 Jaack Martin 提供了很多信息并提出更正之处，同时对本书中的很多专题进行了非常有用、也很有趣的讨论。

George Wypych

参 考 文 献

- 1 Wypych G, Editor, *Weathering of Plastics. Testing to Mirror Real Life Performance*. William Andrew and SPE, Norwich, 1999.

目 录

第1章 光物理学	(1)
1.1 辐射的本质	(1)
1.1.1 辐射能	(1)
1.1.2 辐射强度	(3)
1.1.3 辐射角度	(4)
1.2 材料对辐射的吸收	(5)
1.2.1 一般原理	(5)
1.3 吸收能的归宿与利用	(8)
1.3.1 失活	(10)
1.3.2 分子内部能量转移	(10)
1.3.3 分子间能量转移	(11)
1.3.4 发光	(12)
1.4 二聚物的辐射过程	(15)
1.5 光降解模型与光物理学数据	(17)
参考文献	(19)
第2章 光化学	(20)
2.1 光化学反应的典型路线	(20)
2.1.1 光分解反应	(21)
2.1.2 光氧化反应	(22)
2.1.3 过氧化物与氢过氧化物的转化	(23)
2.1.4 Norrish I 型和 II 型反应	(24)
2.1.5 Fries 光重排反应	(26)
2.1.6 光取代反应	(26)
2.1.7 光加成反应	(27)
2.1.8 光消除反应	(27)
2.1.9 光二聚反应	(28)
2.1.10 光缩合反应	(28)
2.1.11 光异构化反应	(28)
2.2 光化学反应活性与量子额	(29)
2.3 激发态的激发过程	(31)
2.4 光化学反应参数	(31)
2.5 抑制剂和光 sensitizers	(33)
参考文献	(34)

第3章 暴露在自然(气候)条件下的各种影响参数	(35)
3.1 辐射	(36)
3.1.1 辐射源	(36)
3.1.2 太阳的辐射性放射	(38)
3.1.3 轨道变化对能量供应的影响	(39)
3.1.4 太空和近地空间	(39)
3.1.5 平流层	(40)
3.1.6 对流层	(42)
3.2 温度	(44)
3.3 水	(46)
3.4 空气组成	(46)
3.5 污染物	(48)
3.5.1 含氮化合物	(48)
3.5.2 氧物质	(50)
3.5.3 氢物质	(50)
3.5.4 碳氧化物	(51)
3.5.5 含硫物	(52)
3.5.6 含氯组分	(53)
3.5.7 微粒物质	(54)
3.6 应力	(54)
3.7 不同参数的协同作用	(56)
参考文献	(60)
第4章 自然老化条件评估中的测量方法	(62)
4.1 辐射	(62)
4.1.1 测试设备及规范方法	(62)
4.1.2 标准	(66)
4.2 日照持续时间	(67)
4.3 温度	(68)
4.4 相对湿度	(68)
4.5 潮湿时间	(69)
4.6 雨量	(69)
4.7 污染物	(70)
4.7.1 二氧化碳	(70)
4.7.2 微粒物质	(70)
4.7.3 二氧化硫	(70)
4.7.4 氮氧化物	(70)
4.7.5 一氧化碳	(71)

4.7.6 臭氧	(71)
参考文献	(71)
第5章 气候条件	(72)
5.1 引言	(72)
5.2 辐射	(73)
5.3 日照持续时间	(80)
5.4 温度	(80)
5.5 降水量	(82)
5.6 相对湿度	(82)
5.7 潮湿时间	(82)
5.8 污染物	(82)
参考文献	(83)
第6章 户外露天放置(曝光)的方法	(85)
6.1 引言	(85)
6.2 气候条件与降解速度	(86)
6.3 气象条件的变化及其对户外曝光方法的影响	(87)
6.4 试样吸收能量的性质及与应力因素的共同影响	(88)
6.5 户外曝光的典型方法及其对于复合应力因素的影响和不同类型 样品的典型应用	(90)
6.5.1 曝光地点	(91)
6.5.2 样品曝光支架	(94)
6.5.2.1 标准支架	(94)
6.5.2.2 置于玻璃之下的曝光	(98)
6.5.2.3 黑箱曝光	(98)
6.5.2.4 带有喷淋的曝光	(99)
6.5.2.5 干燥曝光	(99)
6.5.2.6 太阳追踪仪	(99)
6.5.2.7 聚光装置	(99)
6.5.3 工业产品及其部件的曝光	(100)
6.6 其他曝光参数	(101)
6.7 相关标准	(103)
参考文献	(103)
第7章 实验室降解研究	(105)
7.1 引言	(105)
7.2 光源	(106)
7.3 滤波器	(113)

· 4 · 材料自然老化手册	
7.4 辐射的传递、监测与控制	(115)
7.5 温度控制	(116)
7.6 湿度控制	(117)
7.7 试验样品的喷淋	(118)
7.8 试验样品的支架和夹具	(118)
7.9 气候老化设备	(119)
7.10 不同仪器之间的关联	(122)
7.11 污染物	(124)
7.12 研究的精确度	(125)
参考文献	(125)
第8章 气候老化循环试验	(127)
参考文献	(133)
第9章 样品制备	(135)
参考文献	(144)
第10章 气候老化数据整理——使用寿命预测	(146)
参考文献	(152)
第11章 人工气候老化与自然曝光	(153)
参考文献	(162)
第12章 气候老化对材料性质的影响	(163)
12.1 质量损失	(163)
12.2 降解深度	(163)
12.3 力学性质	(166)
12.4 颜色和光学性质的变化	(167)
12.5 表面变化	(168)
12.6 相对分子质量	(170)
12.7 表面和总体化学组成	(171)
12.8 表面层的形态与结构	(173)
参考文献	(180)
第13章 老化试样的测试方法	(182)
13.1 目测评价	(182)
13.2 显微镜	(183)

13.3	成像技术	(184)
13.4	光泽度	(187)
13.5	颜色变化	(187)
13.6	可见光分光光度测定法	(189)
13.7	UV 分光光度测定法	(189)
13.8	红外分光光度测定法	(190)
13.9	拉曼光谱测定法	(196)
13.10	核磁共振	(196)
13.11	电子自旋共振	(197)
13.12	质谱(MS)法	(200)
13.13	化学发光法、荧光和磷光法	(200)
13.14	原子吸收光谱	(202)
13.15	广角 X 射线散射法和小角 X 射线散射法	(202)
13.16	X 射线光电电子光谱(XPS)	(203)
13.17	质量变化	(205)
13.18	密度	(206)
13.19	接触角	(206)
13.20	聚合物中气体扩散和水分迁移	(207)
13.21	电性质	(208)
13.22	超声波测量	(208)
13.23	热分析方法	(208)
13.24	材料的流变学性质	(209)
13.25	其他物理参数	(210)
13.26	拉伸强度	(210)
13.27	伸长度	(211)
13.28	抗弯强度	(212)
13.29	蠕变和恒应变试验	(213)
13.30	残余应力	(213)
13.31	抗划抗擦伤性	(214)
13.32	其他力学性质	(214)
13.33	相对分子质量	(215)
13.34	气相和液相色谱分析	(217)
13.35	滴定法	(218)
13.36	脱氯化氢速度	(219)
13.37	凝胶生成量	(219)
13.38	吸氧量	(220)

13.39	微生物生长试验	(220)
13.40	抗环境应力开裂	(220)
参考文献		(222)

第14章 一些特定聚合物的数据 (231)

14.1	丙烯腈 - 苯乙烯 - 丙烯酸酯共聚物 (ASA)	(231)
14.2	丙烯腈 - 丁二烯 - 苯乙烯共聚物 (ABS)	(232)
14.3	醇酸树脂	(235)
14.4	丙烯酸树脂	(236)
14.5	纤维素	(240)
14.6	壳聚糖	(242)
14.7	环氧树脂	(242)
14.8	乙烯 - 丙烯共聚物	(247)
14.9	乙烯 - 醋酸乙烯共聚物 (EVA)	(249)
14.10	乙烯 - 丙烯 - 二烯单聚物 (EPDM)	(250)
14.11	含氟聚合物	(250)
14.12	三聚氰胺树脂	(251)
14.13	苯氧基树脂	(252)
14.14	聚丙烯腈	(254)
14.15	聚酰胺	(254)
14.16	聚碳酸酯	(259)
14.17	聚酯	(263)
14.18	聚乙烯	(268)
14.19	聚酰亚胺	(276)
14.20	聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)	(279)
14.21	聚氧乙烯	(281)
14.22	聚甲醛	(282)
14.23	聚苯醚	(284)
14.24	聚苯硫醚	(287)
14.25	聚(对 - 亚苯基对苯二胺)	(288)
14.26	聚丙烯	(289)
14.27	聚苯乙烯	(296)
14.28	聚砒	(304)
14.29	聚四氟乙烯	(307)
14.30	聚氨酯	(308)
14.31	聚乙烯醇	(315)

14.32	聚氯乙烯	(318)
14.33	聚偏氟乙烯(PVDF)	(324)
14.34	聚乙烯基甲基醚(PVME)	(325)
14.35	苯乙烯-丙烯腈共聚物(SAN)	(326)
14.36	硅氧烷	(327)
14.37	共混聚合物	(329)
14.38	橡胶	(334)
14.38.1	聚丁二烯	(334)
14.38.2	聚氯丁烯	(336)
14.38.3	聚异戊二烯	(337)
14.38.4	聚异丁烯	(337)
14.38.5	苯乙烯-丁二烯-苯乙烯橡胶(SBS)	(338)
14.38.6	特征变化和性质	(338)
参考文献		(340)
第 15 章	添加剂对气候老化的影响	(357)
15.1	填料和增强纤维	(357)
15.2	颜料	(358)
15.3	增塑剂	(364)
15.4	溶剂和稀释剂	(365)
15.5	阻燃物	(367)
15.6	抗冲击改性剂	(368)
15.7	抗氧剂	(368)
15.8	药剂、交联剂和引发剂	(369)
15.9	催化剂	(371)
15.10	杂质	(371)
15.11	小结	(372)
参考文献		(372)
第 16 章	合成产品的气候老化	(376)
16.1	粘合剂	(376)
16.1.1	要求	(376)
16.1.2	期望寿命	(377)
16.1.3	相关的老化机理	(377)
16.1.4	重要性的变化	(379)
16.2	航空航天材料	(380)
16.2.1	要求	(380)
16.2.2	期望寿命	(381)

16.2.3 重要性的变化	(381)
16.3 器具材料	(384)
16.4 汽车部件	(384)
16.4.1 要求	(384)
16.4.2 期望寿命	(385)
16.4.3 相关老化机理	(386)
16.4.4 重要性的变化	(386)
16.5 汽车涂料	(387)
16.5.1 要求	(387)
16.5.2 期望寿命	(388)
16.5.3 相关老化机理	(389)
16.5.4 重要性的变化	(389)
16.6 防水油布	(391)
16.6.1 要求	(391)
16.6.2 期望寿命	(392)
16.6.3 相关老化机理	(392)
16.6.4 重要性的变化	(393)
16.7 线圈漆包材料	(394)
16.8 复合材料	(394)
16.8.1 要求	(394)
16.8.2 期望寿命	(395)
16.8.3 相关老化机理	(395)
16.8.4 重要性的变化	(397)
16.9 混凝土	(398)
16.10 保存	(399)
16.10.1 要求	(399)
16.10.2 期望寿命	(399)
16.10.3 重要性的变化	(400)
16.11 建筑材料	(401)
16.12 牙科用材料	(405)
16.13 电子及电工材料	(405)
16.14 泡沫塑料	(406)
16.15 土工合成材料	(406)
16.16 玻璃窗用材料	(408)
16.17 温室薄膜	(408)
16.18 薄片制品	(410)
16.19 医疗设备及用品	(410)
16.20 包装材料	(411)

16.20.1 瓶子类	(411)
16.20.2 容器类	(412)
16.20.3 条板箱和盘子类	(412)
16.20.4 薄膜类	(412)
16.21 油漆和涂料	(413)
16.21.1 要求	(413)
16.21.2 期望寿命	(415)
16.21.3 相关老化机理	(415)
16.21.4 重要性的变化	(417)
16.22 管子和管形材料	(422)
16.23 纸浆和纸	(424)
16.24 屋面用材料	(425)
16.25 密封剂	(427)
16.25.1 要求	(427)
16.25.2 预期寿命	(428)
16.25.3 重要性的变化	(428)
16.26 壁板	(430)
16.27 太阳能电池和集热器	(431)
16.28 纺织品	(432)
16.29 窗户	(441)
16.30 电线和电缆	(442)
16.31 木材	(443)
参考文献	(446)
第 17 章 稳定作用和稳定剂	(458)
17.1 限制入射光辐射	(458)
17.2 激态和自由基的钝化	(465)
17.3 单态氧的消除、过氧化物的分解以及氧化作用的限制	(468)
17.4 缺陷的清除	(471)
17.5 紫外线稳定剂的稳定性	(472)
17.6 紫外线吸收剂的分布状态	(477)
17.7 稳定剂的捕集和相互作用	(480)
17.8 保护性涂层	(481)
17.9 稳定作用研究工作的新进展	(482)
参考文献	(485)
第 18 章 生物降解	(489)
18.1 生物降解环境	(489)

· 10 · 材料自然老化手册	
18.2 酶的反应	(490)
18.3 材料的生物降解	(492)
18.4 杀菌剂	(495)
18.5 测试方法	(499)
18.6 可控生物降解	(501)
参考文献	(502)
第 19 章 循环再利用	(505)
19.1 降解对循环再利用的影响	(505)
19.2 回收材料的再稳定	(507)
19.3 多层材料	(508)
19.4 可去除的油漆	(509)
19.5 化学再生	(510)
参考文献	(510)
第 20 章 环境应力开裂	(512)
20.1 定义	(512)
20.2 控制 ESC 的参数	(512)
20.2.1 材料组成	(512)
20.2.2 形态学和外形尺寸	(513)
20.2.3 加工和使用条件	(514)
20.2.4 溶剂与聚合物的溶解度参数	(514)
20.2.5 扩散	(516)
20.2.6 载荷与内应力	(517)
20.2.7 时间	(519)
20.2.8 温度	(520)
20.3 环境应力开裂机理	(521)
20.4 环境应力开裂动力学	(522)
20.5 环境应力开裂对材料耐久性的影响	(523)
20.6 测试方法	(524)
参考文献	(527)
第 21 章 腐蚀与气候老化之间的相互关系	(529)
参考文献	(532)
第 22 章 石料的气候老化	(533)
参考文献	(538)
译后记	

第 1 章 光物理学

光物理学或者光的物理现象，涵盖了对自然老化过程来说很重要的所有电磁辐射范围，包括紫外辐射、可见光和红外光辐射等。光物理学的研究范围包括：

- 辐射的本质；
- 材料对辐射的吸收；
- 辐射波长与激发能量；
- 吸收能的归宿和利用；
- 能量转化过程；
- 电磁辐射的发射。

如果知道了材料的所有光物理学性质，材料耐候性的研究将会是依据光物理学规律和光化学规律预测结果这样一件简单的事情。

遗憾的是，很多原理只知道其基本形式，而不能直接应用于实际研究工作中。同时，这些基础理论知识对于耐候性试验的成功又是必不可少的。大多数耐候性研究失败的原因就是违背了光物理学的基本原理。

1.1 辐射的本质

1.1.1 辐射能

可见光、红外辐射、紫外辐射和 γ 射线都是电磁辐射的各种不同形式，每一种都在电磁场中以光波的形式传播。光波以下列恒定速度在空间直线传播，可以被反射或折射：

$$c = \nu \times \lambda = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad [1.1]$$

式中 c ——辐射速度；

ν ——辐射频率；

λ ——辐射波长。

麦克斯韦提出的电磁辐射基础理论，今天被用来解释诸如不同波长光的颜色及其衍射、偏振、干涉等辐射性质，但有些性质却无法用麦克斯韦理论解释。下面讨论的黑体辐射就是其中之一。对于各种辐射性质的数学解释，采用普朗克依据量子理论提出的电磁辐射微粒学说似乎更合适。按照量子理论，电磁波携带不连续的能量，能量大小取决于其频率。按照普朗克定律有如下的表达式：

$$E = h \times \nu \quad [1.2]$$

式中 E ——辐射能；

ν ——辐射频率；

h ——普朗克常数。

式[1.2]是一种可以用来计算已知波长光的辐射能的公式。每摩尔激发能可以由分子激发能与阿伏加德罗常数相乘求得。基于能量与频率之间的线性关系，得到如下式子：

$$E = Nh\nu = Nhc/\lambda = 119627/\lambda \text{ (kJ/mol)}$$

[1.3]

式中 E ——一种给定波长 λ 的辐射能；

N ——阿伏加德罗常数 $= 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ；

h ——普朗克常数 $= 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ；

ν ——辐射频率；

c ——光速 $= 2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ；

λ ——辐射波长，nm。

利用这一公式，可以计算任何给定波长的光辐射所具有的能量。表 1.1 列出了常用于光化学研究及其他用途的一些光源的辐射能数据。从中可以看出， γ 射线照射、激光蚀刻、水银灯紫外光降解、太阳光紫外降解之间能量水平的差别。

表 1.1 指出了在耐候性研究中的一些结果：

- 波长越短，辐射能越大；
- 无过滤器的水银灯能够发射比可获得的太阳光辐射能更高的辐射；
- 可见光和红外辐射都具有在光化学过程中可资利用的能量；
- X 射线和 γ 射线具有比太阳光更高的能量，所以它们的辐照结果不可比。

现在让我们来看看辐射能与化学键能，以便研究化学反应的可能性。表 1.2 选列了化学键的能量强度。

表 1.1 各类辐射的能量

类 型	波长/nm	能量/(kJ/mol)
远紫外	100	1196
真空紫外	200	598
水银灯	254	471
太阳光中分出的紫外	295	406
中间范围的紫外	350	341
末端的紫外	390	306
蓝/绿光	500	239
红 光	700	171
近红外	1000	120
红 外	5000	24
硬 X 射线, 软 γ 射线	0.05	2.4×10^6
硬 γ 射线	0.005	2.4×10^7
激 光	与 λ 匹配	按式[1.3]计算

表 1.2 多原子分子的键强度

键	强度/(kJ/mol)	太阳光是否具有断键能量?
C—H	420 ~ 560	否
C—C	300 ~ 720	取决于其他取代基
C—Cl	320 ~ 460	取决于其他取代基
C—N	120 ~ 300	是
C—O	~ 1000	否
C=O	500 ~ 700	否
H—O	370 ~ 500	大部分情况下不能
O—O	150 ~ 210	是
S—O	> 550	否
Si—Si	330 ~ 370	是