

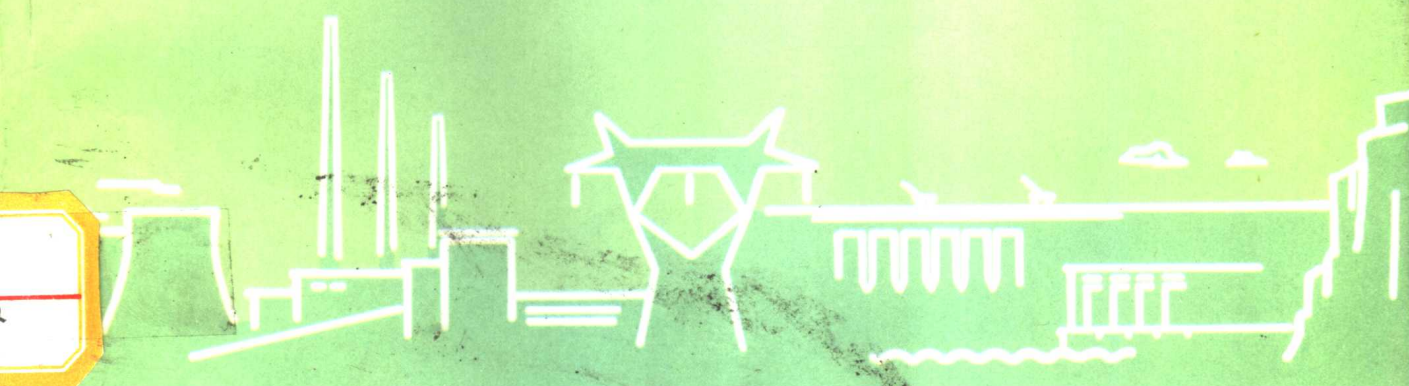


普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

新型建筑材料

大连理工大学 王立久 主编



中国电力出版社

普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

991124

新型建筑材料

大连理工大学 王立久 主编



中国电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍新型建筑材料的性质和实际选用以及新材料的开发研究。

全书共分七章，分别叙述新型建筑材料的强度、隔断功能、耐久性、装饰性，以及新型建筑材料的选用和研制。

本书以建筑材料的特性和功能为主线分章编写，文字叙述详尽易懂，每章后面附有参考文献，以便自学时参考。

本书可作为建筑材料专业研究生和土木建筑类有关专业本科生教材，也可供有关工程技术人员参考。根据不同人员层次可对本书有关章节进行适当选修或选讲。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型建筑材料/王立久主编. —北京:中国电力出版社,
1997

高等学校教材

ISBN 7-80125-267-5

I. 新… II. 王… III. 建筑材料—高等学校—教材 IV. T
U5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 22518 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1997 年 4 月第一版 1997 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.625 印张 262 千字

印数 0001—1070 册 定价 11.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

本书根据中国电力企业联合会教育培训部核定的普通高等学校电力工程、热能动力、水电工程类专业教学指导委员会教材编写计划编写。编写大纲主要依据大连理工大学1987年以来研究生的“新型建筑材料”教学大纲制定，并由该委员会的建筑材料学组最后审定。

新型建筑材料是随着基本建设需求，由传统建筑材料发展而来的，已广泛应用于土木建筑各个领域，在国民经济中占有重要地位。材料性质是对材料的一种表征，学习是为了应用，要应用就必须掌握材料性质。因此本书以材料性质为主线，叙述各种新型建筑材料，并适当介绍新型建筑材料的选用（第七章），同时考虑开发新材料需要，特列一章介绍新型建筑材料设计（第六章）。在编写时注意了与本科生“建筑材料”等课程的衔接，以及与研究生其它课程的相互联系。这里特别强调的是王立久教授编著的《建筑材料学》和日本国大岸佐吉教授编写的适用本科生的《建筑材料工学》，与本书编写形式相似，它们是姊妹篇，但也相对独立，又力求避免简单重复，尽量做到在原有基础上的深入。

参加本书编写的有：大连理工大学王立久（第一、五、七章和第六章第二、四、五、六节）；贾四军、姜洪洋（第二章）；吕重旭（第三章第一、二节）；罗玉萍（第六章第一、三节）；刘廷权（第四章第一、二节）；谢凤琴（第三章第三、四节、第四章第三节）。全书由王立久主编、统稿。黄承逵教授对全书进行了审阅，并提出了宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

编 者

1996年4月

7-00184-102

目 录

前 言

第一章 绪 论	1
第一节 新型建筑材料学的意义	1
第二节 新型建筑材料分类与性能要求	2
参考文献	6
第二章 建筑材料的强度	7
第一节 材料的强度理论	7
第二节 建筑材料的强度	15
第三节 建筑复合材料强度	17
参考文献	24
第三章 材料的隔断功能	25
第一节 材料的绝热保温功能	25
第二节 材料的防水防潮功能	34
第三节 材料的隔声吸声功能	39
第四节 材料的防火耐火功能	44
参考文献	48
第四章 建筑材料装饰性	49
第一节 装饰材料的分类与功能作用	49
第二节 建筑材料的装饰性	50
第三节 常用装饰材料	58
参考文献	70
第五章 建筑材料的耐久性	71
第一节 耐久性定义与分类	71
第二节 普通混凝土的碳化	75
第三节 建筑材料腐蚀	79
第四节 建筑材料的抗冻性	91
参考文献	94
第六章 新型建筑材料设计	95
第一节 材料的化学组成与结构	95
第二节 建筑材料相图	117
第三节 建筑材料中的化学反应	127
第四节 正交试验设计	133
第五节 材料合成工艺方法	137
第六节 材料微观结构测试技术	146

参考文献	156
第七章 新型建筑材料选用	157
第一节 新型建筑材料选用的一般原则	157
第二节 建筑结构与选材	158
第三节 建筑功能与选材	166
第四节 建筑经济与选材	179
参考文献	180

第一章 绪 论

第一节 新型建筑材料学的意义

一、新型建筑材料定义

所谓建筑材料是指用于土木建筑结构物所有材料的总称。传统建筑材料主要包括烧土制品（砖、瓦、玻璃类）、砂石、灰（石灰、石膏、苦土、水泥）、混凝土、钢材、木材和沥青七大类。新型建筑材料（New Building Materials）是指最近发展或正在发展中的有特殊功能和效用的一类建筑材料，它具有传统建筑材料从来没有或无法比拟的功能，具有比已使用的传统建筑材料更优异的性能。

简言之，凡具有轻质高强和多功能的建筑材料，均属新型建筑材料。即使是传统建筑材料，为满足某种建筑功能需要而再复合或组合所制成的材料，也属新型建筑材料。

建筑材料在基本建设总费用中占有相当大比例，而且建筑与结构形式和施工方法常常受建筑材料品种、质量所控制。建筑材料直接影响土木和建筑工程的安全可靠性、耐久性、适用性（经济适用、美观、节能等）。因此，新型建筑材料的开发、生产和使用，对于促进社会进步、发展国民经济具有重要意义。

新型建筑材料学是现代土木和建筑工程科学的一门重要分支。

二、研究新型建筑材料学的目的

新型建筑材料学的目的有以下几点：① 掌握新型建筑材料所涉及的物理学、化学及生物学等学科诸多性能。② 明确按照使用目的与使用条件安全、合理地选用新型材料。③ 熟悉材料的成分、组织、构造及物质的形成机理，选择正确工艺条件和研究方法，改进材料性能和开发新型材料。

新型建筑材料的研究对象主要是人造材料，如新型玻璃、特种陶瓷、新型水泥等。研究内容涉及各种不同形态的材料，包括新型混凝土、装饰微晶玻璃、铝合金之类的固体材料；未凝固的新型水泥浆、涂料之类的浆状或液态材料。

新型建筑材料学所研究的内容包括：

- (1) 从多种角度，按不同条件将新型建筑材料进行分类；
- (2) 从材料学科出发，熟悉各种材料的组织与结构；
- (3) 按使用条件，研究材料的功能和性质；
- (4) 从人文工程学方面，研究新型建筑材料的装饰性；
- (5) 从外界环境条件与材料性质的关系出发，提高材料的耐久性和确定合适的使用条件。

为达到上述目的，新型建筑材料学要借助许多相关的相邻学科理论，诸如建筑材料学、矿物材料学、硅酸盐物理化学、高分子化学、无机化学、固体材料结构基础、弹性力学、热

学等。要正确使用新型建筑材料，除充分考虑使用条件和材料的性质和功能，还应考虑与国家和有关部门的法律、政策、规范、标准以及施工工艺相吻合，进行综合考虑。

第二节 新型建筑材料分类与性能要求

一、分类

新型建筑材料的分类，根据不同的出发点，有多种分类方法。详见表 1-1。

表 1-1 新型建筑材料分类

围 护 材 料	外 墙 材 料	轻 板	加气混凝土条板，铝合金板，彩色钢板，石棉水泥板（平板及波纹板），矿渣石膏板，水泥刨花板，混凝土陶粒大板，钢丝网水泥板，低碱水泥板（TK板），玻璃纤维增强水泥板（GRC）
		砌 块	加气混凝土砌块，粉煤灰硅酸盐砌块，混凝土空心砌块，煤矸石空心砌块，泡沫塑料夹心砌块，粉煤灰空心砌块
		复合板	岩棉—混凝土复合墙板，铝板（钢板）—泡沫塑料复合板，泰伯板，钢丝网—岩棉板（GY板），蜂窝夹心复合板，GRC—岩棉复合板
	内 墙 材 料	轻 板	纸面石膏板，纤维石膏板，石膏空心条板，稻草板，棉杆板，蔗渣板，麻屑板，硅钙板，矿渣石膏板，珍珠岩板，塑料板，稻壳板，胶合板
		砌 块	石膏砌块，加气混凝土砌块，粉煤灰砌块
	辅 助 材 料	轻骨料	粘土陶粒，粉煤灰陶粒，页岩陶粒，泡沫聚苯乙烯，天然轻骨料（浮石，火山灰），炉渣轻骨料
		外加剂	减水剂，早强剂，缓凝剂，促凝剂，引气剂，消泡剂，防冻剂，膨胀剂，憎水剂
		增强材料	轻钢龙骨，玻璃纤维，钢纤维，碳纤维，聚丙烯纤维，聚乙烯纤维，浸渍用聚合物
	层 面 材 料	烧结制品	粘土瓦，琉璃瓦
		胶凝制品	水泥瓦，石棉水泥瓦，镁水泥瓦，钢丝网水泥板，玻璃纤维水泥板
		金属制品	涂塑钢板彩瓦，铝合金瓦，搪瓷钢板瓦
		有机复合制品	玻璃钢瓦，红泥塑料瓦，玻璃纤维沥青瓦，聚四氟乙烯涂覆玻璃布

续表

结构材料	混 凝 土		空心管柱, 异型柱, 空心楼板, 轻骨料混凝土构件, 钢—混凝土复合构件, 挤出石棉水泥型材, 高强混凝土, 钢纤维混凝土
	金 属		焊接钢板型材, 空间网架结构, 悬索构件
	其 它		组合木构件, 非粘土砖 (粉煤灰砖, 炉渣砖, 煤矸石砖)
功 能 材 料	防水材料	卷 材	石油沥青油毡 (各种胎材: 纸, 玻璃纤维毡, 玻璃布, 聚酯无纺布, 麻布; 各种面料: 彩砂, 云母, 滑石粉; 多层组合: 聚氯乙烯防水卷材, 氯化聚乙烯卷材, 硫化型橡胶卷材, 三元乙丙橡胶卷材, 氯化聚乙烯—橡胶共混卷材), 煤焦油沥青油毡
		涂 料	再生胶—沥青防水涂料, 水性石棉沥青涂料, 乳化沥青涂料, 氯丁胶乳沥青涂料, 氯丁—1 涂料, 焦油—聚氨酯涂膜防水材料 (851), COPROX 高效无机防水涂料
		密封嵌缝材料	桐油渣沥青防水膏, 橡胶沥青嵌缝膏, 改性苯乙烯嵌缝膏, 聚氯乙烯胶泥, 呋喃树脂胶泥, 丙烯酸密封膏, 聚氨酯密封膏, 聚硫密封膏, 硅酮密封膏, 聚碳酸酯密封膏, 泡沫密封带
		粉、带	防水粉, 塑料止水带, 橡胶止水带
能 材 料	保温隔热材料	有机材料	聚氨酯泡沫, 发泡聚苯乙烯, 泡沫酚醛, 发泡聚氯乙烯, 泡沫脲醛, 泡沫聚乙烯, 海绵 (泡沫橡胶)
		无机材料	纤维型 岩石棉, 矿渣棉, 玻璃棉, 超细玻璃棉, 硅酸铝棉, 陶瓷棉
			发泡型 膨胀珍珠岩, 膨胀蛭石, 微孔硅酸钙, 加气混凝土, 泡沫玻璃, 泡沫石棉, 膨胀流纹岩, 海泡石棉
		反射型	镀铝聚酯薄膜, 铝箔—纸—玻璃纤维复合反射隔热片材
	吸声材料	板 型	矿棉吸音板, 玻璃吸音板, 珍珠岩吸音板, 蛭石装饰吸音板
		体 型	构造吸声体
料	采光材料	玻 璃	中空玻璃, 钢化玻璃, 夹层玻璃 (不碎玻璃、防弹玻璃), 钢丝网夹心玻璃, 压花玻璃, 乳白玻璃, 彩绘玻璃, 热反射玻璃, 吸热玻璃, 玻璃空心砖, 导电膜玻璃, 光敏玻璃, 玻璃型材, 微晶玻璃
		有机材料	透明聚氯乙烯, 有机玻璃, 聚碳酸酯玻璃, 透明丙烯酸酯板, 玻璃纤维增强聚酯透明板
	防火涂料	浸渍织物用	SCP—1 棉永久性阻燃剂, FR—SF 高聚物阻燃添加剂, BR—SB 复合阻燃剂
		喷涂结构用	钢结构防火涂料: TN—LG, TN—LB, JG—276, ST1; 木结构防火涂料: A60—501, B60—186, SJC4; 电缆防火涂料: E60—1, PC60—1

续表

功 能 材 料	装 饰 材 料	外 墙		劈离砖, 陶瓷墙砖, 玻璃马赛克, 陶瓷马赛克, 丙烯酸系涂料, 氟偏共聚涂料, 彩砂涂料, 花岗石板, 塑料夹心铝板 (Reynobond)
		内 墙		釉面砖, 马赛克, 玻璃纤维贴墙布, 压延复合聚氯乙烯壁纸, 装饰墙布, 高发泡聚氯乙烯壁纸, 涂塑压花壁纸, 麻草壁纸, 织物壁纸, 各种内墙涂料, 大理石板, 印花无纺墙布, 镀金属膜壁纸, 粉刷石膏, 保丽板
		地 面		块状塑料地板, 塑料卷材地板, 抗静电活动地板, 马赛克, 陶瓷地砖, 满铺裁绒地毯, 块状地毯, 水磨石、合成石、花岗石, 大理石, 混凝土地砖, 各种地面涂料、自流平材料
		顶 棚		铝合金吊顶, 钢板吊顶, 珍珠岩板, 石膏装饰板, 深浮雕石膏板, 钙塑板
		卫 生 间	金属制品	铸铁搪瓷浴缸, 带裙边浴缸, 按摩浴缸, 冲压钢板搪瓷浴缸
			陶瓷制品	陶瓷洗面盆, 陶瓷便器(蹲式、座式; 上水箱, 连体水箱; 冲洗式, 热风式)
			有机-无机复合制品	玻璃钢浴盆, 玻璃钢盒子式卫生间, 人造大理石成套卫生洁具, 人造玛瑙卫生洁具
		门 窗	有机制品	钙塑门窗, 玻璃钢门窗, 改性聚氯乙烯门窗, 无冷桥塑料窗, 金属-塑料复合窗
			铝合金	铝合金门窗, 自动门, 铝花格内门, 百页窗
			钢 材	型材钢门窗, 空腹彩板钢窗, 防火门, 卷帘门, 安全门
	水 管	供 水	聚丁烯管, 聚氯乙烯管, 聚乙烯管, 预应力混凝土管	
		排 水	硬聚氯乙烯管, 软聚氯乙烯管, 聚乙烯管, 聚丙烯管, 酚醛石棉管, 玻璃钢管, 玻璃管	
		建 筑 五 金	卫生间用	各种新型水龙头, 淋浴器
			其 它	各种新型门锁, 门合页, 闭门器, 地弹簧, 门窗启闭系统, 电器件面板, 保安器
	配 套 材 料	建筑粘结剂		4115 多用粘结剂, 双组份聚氨脂粘结剂, 双组份环氧树脂粘结剂, 聚醋酸乙烯粘结剂 (乳胶), 107 胶 (聚乙烯醇缩甲醛), 氯丁橡胶粘结剂, 石膏胶泥, 聚氯乙烯管粘结剂, 壁纸胶, 地板胶, 瓷砖粘结剂
		紧 固 件		自攻螺钉, 射钉, 膨胀螺栓
		工 器 具		粉刷石膏用工器具, 壁纸施工用工器具, 地板、地毯施工用工器具, 密封膏注射器

1. 按使用功能分类

(1) 结构材料 是建筑物的骨架,是指构成建筑物受力构件和结构(梁、板、柱、基础、框架等)所用的材料,如高强混凝土、预应力混凝土、碾压混凝土、多孔承重砖、承重加气混凝土、FC板、钢材等。

(2) 围护材料 指建筑物的外围护所用的材料,有承重和非承重之分,如隔墙板、空心砖、加气混凝土、石膏隔墙板、复合墙板等。

(3) 功能材料 指承担建筑物功能的非承重材料。具体可分为:

装饰材料(纯以装饰为目的的材料),如瓷砖、新型玻璃、微晶玻璃、镭射玻璃、金属板、石膏板、涂料、墙布、墙纸、彩色水泥等。

隔断材料(以防水、防潮、隔音、避光、保温、隔热、防腐等为目的的材料),如沥青材料、防水粉、隔墙板、着色玻璃、膨胀珍珠岩、岩棉、聚氨酯材料等。

耐火材料(以防止火灾、提高耐火性能为目的的材料),如耐火涂料、石棉水泥板、防火门、硅钙板、硅酸铝纤维等。

2. 按化学组成分类

无机材料 非金属 新型水泥,新型玻璃、陶瓷等

金 属 抛光金属,铝合金等

有机材料 沥青材料,纤维板,涂料,塑料制品,粘接剂等

复合材料 纤维混凝土,玻璃钢材料等

3. 按建筑物部位分类

如结构躯体、屋顶、地面、外墙、内墙、天棚等。

4. 按工程类别分类

如房屋建筑材料、道路材料、筑坝材料等。

二、新型建筑材料性能要求

材料性能指标实质是对材料的一种表征,也就是要指出并在实验中测定描述材料特性的特征参数,而且要阐明这些参数的物理和物理化学内涵及其材料结构的关系,为预测材料在使用过程中的行为及根据具体的使用环境条件和要求进行选材提供依据。

新型建筑材料要求的性能,因使用条件不同而有所不同。实际上,它与传统建筑材料在性能要求方面差异就在于,要有新的功能和新的效用。传统建筑材料要求的性能含于新型建筑材料所要求的性能之中。以后要分章叙述:

(1) 材料强度(强度理论、断裂因素、疲劳强度等)。

(2) 材料隔断功能(绝热保温、防水防潮、隔声吸声等)。

(3) 化学性能(材料合成、遇酸碱盐化学反应性能等)。

(4) 耐久性能(碳化、冻融、腐蚀、溶蚀、碱骨料反应、 Cl^- 离子侵蚀等)。

(5) 装饰性能(色彩、质感、光泽度等)。

参 考 文 献

- [1] [日]大岸佐吉,笠井芳夫,岸谷孝一. 建筑材料工学. 东京:株式会社才一△社,1981(昭和 56 年)
- [2] 姚自君,徐淑常,王玉生. 建筑新技术、新构造、新材料. 北京:中国建筑工业出版社,1991
- [3] 高琼英. 建筑材料. 武汉:武汉工业大学出版社,1988

第二章 建筑材料的强度

无论传统建筑材料,还是新型建筑材料都有强度要求,因为它是合理选材的重要性能指标。但新型建筑材料研究强度却要着眼于断裂力学、损伤力学或微观力学。

第一节 材料的强度理论

一、Griffith 微裂纹理论

材料的破坏可分为脆性破坏和延性破坏,Griffith 微裂纹理论能够说明脆性断裂的本质。

1. 材料的理论结合强度

材料的理论强度应由原子间结合力决定。原子间作用力与位移的关系如图 2-1 所示。曲线上的最高点 σ_m 即为理论断裂强度。近似地,该曲线可用正弦曲线表示

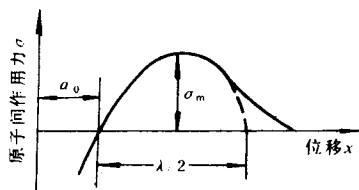


图 2-1 原子间作用力与位移的关系

$$\sigma = \sigma_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2-1)$$

其中 σ 、 x 和 λ 分别表示原子间作用力、原子间距离增量和正弦波长。如果位移很小,则

$\sin \frac{2\pi x}{\lambda} \approx \frac{2\pi x}{\lambda}$, 于是

$$\sigma = \sigma_m \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2-2)$$

又在弹性状态下,根据虎克定律有

$$\sigma = E\epsilon = \frac{Ex}{a_0} \quad (2-3)$$

式中 a_0 为原子间的平衡距离。合并式(2-2)及(2-3)可得

$$\sigma_m = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{E}{a_0} \quad (2-4)$$

另一方面,材料在断裂时形成两个新的表面,其表面能应等于释放出的弹性应变能。弹性应变能可由下式算出

$$V_0 = \int_0^{\lambda/2} \sigma_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \frac{\lambda \sigma_m}{\pi} \quad (2-5)$$

表面能为 γ , 则

$$\frac{\lambda \sigma_m}{\pi} = 2\gamma \quad (2-6)$$

式(2-6)与式(2-4)联立,消去 λ 可得

$$\sigma_m = \left(\frac{E\gamma}{a_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-7)$$

将实际材料 E 、 a_0 、 γ 值代入式(2-7),可得 σ_m 约为弹性模量 E 的十分之一。这是个很高的强度值,实际材料的强度要低得多,仅为 $\frac{E}{100} \sim \frac{E}{1000}$ 。

2. Griffith 理论

Griffith 理论可以解释实际材料强度与理论断裂强度间巨大差异的原因。Griffith 认为实际材料中总是存在微裂纹,在外力作用下,微裂纹处产生应力集中现象。当应力达到一定程度时,裂纹开始扩展而导致断裂。所以,断裂并不是整个界面拉断,而是裂纹扩展的结果。

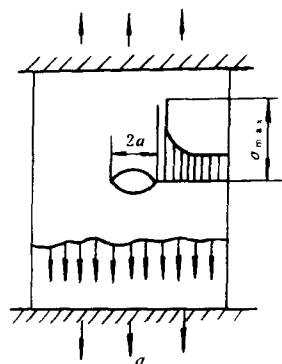


图 2-2 有裂纹无限宽薄板力学状态

如图 2-2 所示一单位厚度的无限宽薄板受拉应力 σ ,板单位体积的弹性能为 $\frac{\sigma^2}{2E}$ 。如在板中心割开长为 $2a$ 的裂纹,则必然释放出弹性能,按弹性理论可得出其值为

$$U_e = -\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \quad (2-8)$$

形成新表面而增加的表面能为

$$W = 4a\gamma \quad (2-9)$$

整个系统的能量变化为

$$U_e + W = -\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma \quad (2-10)$$

从能量的观点看,裂纹继续扩展的临界条件应为

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e + W) = -\frac{2\pi\sigma^2 a}{E} + 4\gamma = 0 \quad (2-11)$$

裂纹在越过式(2-11)所确定的长度后,总能量将随裂纹增长而下降,即裂纹的扩展成为自发的,如图 2-3 所示。由式(2-11)可得裂纹失稳扩展的临界应力(平面应力情况)为

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-12a)$$

临界的裂纹半长度为

$$a_c = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2} \quad (2-12b)$$

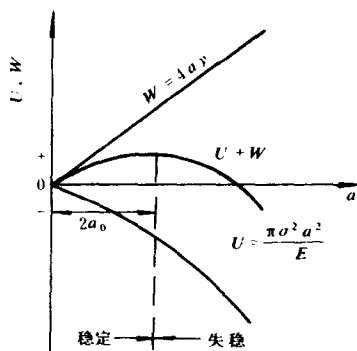


图 2-3 裂纹扩展与能量关系

式(2-12)即为著名的 Griffith 公式。式中 σ_c 为实

实际断裂强度，它与裂纹长度 a 值有关。对于确定的 a 值，外加应力达到 σ_c 时，裂纹即失稳扩展，导致材料破坏。Griffith 公式和式 (2-7) 的理论式在形式上是相同的，因为其基本概念都基于能量的变化。

Griffith 同时认为，裂纹尖端局部区域的材料强度可达到理论强度值。如果由于应力集中的作用而使裂纹尖端的应力超过材料的理论强度值，则裂纹扩展引起材料的断裂。设图 2-1 中裂纹尖端的曲率半径为 ρ ，根据弹性应力集中系数的计算，裂纹尖端的最大应力为

$$\sigma_{\max} = \sigma \left[1 + 2 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \approx 2\sigma \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-13)$$

根据前面所讲，临界状态应为 $\sigma_{\max} = \sigma_m$ ，即

$$2\sigma_c \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{E\gamma}{a_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-14)$$

所以实际断裂强度为

$$\sigma_c = \left(\frac{E\gamma\rho}{4aa_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-15)$$

如果裂纹很尖，即 ρ 很小近似与 a_0 相等，则上式写为

$$\sigma_c \approx \left(\frac{E\gamma}{4a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-16)$$

此式与 Griffith 公式相似，只是系数不同。

这两个公式都表明，裂纹长度越小，材料的 E 、 γ 值越大，则材料的实际强度越高，这就指出了制备高强材料的方向。从 Griffith 的微裂纹理论还可以得出以下结论：材料试件的尺寸越大，含有危险裂纹的机会越多，其强度越低；反之，较小的试件具备较高的强度，这就是材料强度的“尺寸效应”。

Griffith 公式适用于陶瓷、玻璃这类极脆的材料。对于金属及非晶体聚合物材料，在裂纹扩展时，裂纹尖端处发生塑性变形，需要塑性变形功 W_p 。 W_p 的数值往往比表面能 γ 大几个数量级，是裂纹扩展的主要阻力。因而式 (2-12) 需要修正为

$$\sigma_c = \left[\frac{E(2\gamma + W_p)}{\pi a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-17)$$

式 (2-17) 就是 Griffith-Orowan-Irwin 公式。

二、断裂的位错理论

1. 位错的概念

位错是能延伸直到穿过晶体或形成封闭环形的线缺陷。位错概念是为了解释金属的塑性变形而提出的。

具有晶体结构的材料在受到外力作用时，将发生原子平面的滑移。但如果是整个晶面上的原子在另一原子平面上一起发生位移，将需要很大的剪切力，这与实际测得的数值不

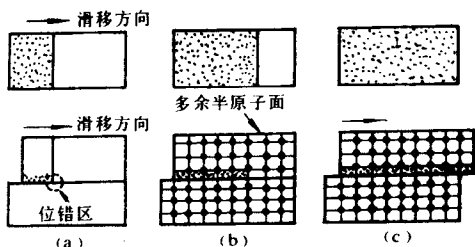


图 2-4 位错的形成

- (a) 滑移初期;
(b) 出现位错线;
(c) 滑移完成, 位错消失

符。所以,滑移是在一部分原子没有移动之前就发生了,即晶体中可分为已滑移部分和未滑移部分。如图 2-4 所示,图中阴影区为已滑移部分。滑移区域内的原子在剪切应力的作用下,已经向右滑移了相当于一个原子间距的距离,并处在正常的晶格位置上,而未滑移区域内的原子还没有动。这样,在已滑移和没有滑移的区域之间存在着一个错位原子线,即位错。位错原子没有位于晶体的正常格点位置上,因此位错是一种缺陷。

位错具有伯格斯矢量 $\vec{b}$, 它的方向表示滑移的方向,其大小一般是一个原子间距。伯格斯矢量 $\vec{b}$ 与位错线垂直的位错称为刃型位错,图 2-4 所示即为刃型位错,用符号 $\perp$ 表示。螺型位错是另外一种基本类型的位错,其特点是位错线和滑移的方向(伯格斯矢量 $\vec{b}$) 平行。用符号 $\odot$ 表示。同时具有刃型位错和螺型位错特征的位错称为混合位错,其特点是伯格斯矢量既不平行于位错线也不与它垂直。

2. 脆性断裂的位错理论

Griffith 理论的前提是材料中已存在裂纹,但不涉及裂纹的来源。位错理论是用位错的运动、塞积和相互作用来解释裂纹的产生和扩展机理,即为微观力学。有几种位错理论都在断裂研究方面取得了一定的成果,但迄今还不能解释全部有关断裂的现象。下面介绍两个著名的理论。

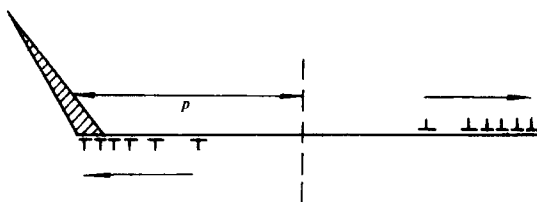


图 2-5 位错塞积形成裂纹

(1) 位错塞积理论。在剪应力作用下,滑移面上的刃型位错运动遇到障碍时(晶界或第二相粒子)即产生塞积。如果塞积处的应力集中不能被塑性变形松弛,则塞积端点处的最大拉应力可以达到理论强度而形成裂纹,如图 2-5 所示。计算表明,与滑移方向呈 $\theta=70.5^\circ$ 处拉应力最大,将在此处形成裂纹。形成裂纹的有效切应力 τ_e 即外加切应力 τ 与晶格摩擦力 τ_0 之差

$$\tau_e \geq \left[\frac{12\gamma G}{\pi(1-\gamma)d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-18)$$

式中: d 为障碍物间距。如为晶界, $2d$ 就是晶粒尺寸; 如为第二相粒子, $2d$ 是粒子间距。式 (2-18) 与 Griffith 公式 (2-12) 相似,只是系数不同而且以障碍物距离 d 代替了裂纹半长度 a 。位错塞积理论得到一些实验的支持,但是按照这种理论,断裂的控制过程是裂纹的萌生,一旦形成裂纹就会失稳扩展,而且裂纹的萌生也是与切应力有关,与正应力无关,这

与实际情况不太符合。

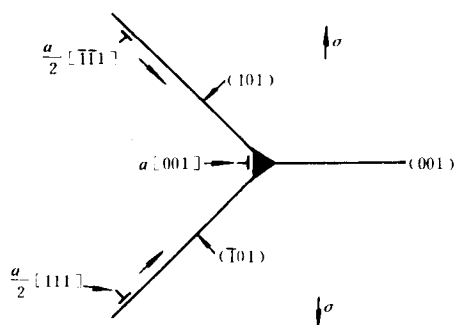


图 2-6 位错反应形成裂纹

(2) 位错反应理论。该理论认为断裂的控制过程是裂纹的扩展而不是裂纹的萌生，并提出一种更容易形成裂纹的模型。如图 2-6 所示，在体心立方晶体中 $[101]$ 和 $[\bar{1}01]$ 面上的两个半位错在这两个滑移面的相交面 $[001]$ 上相遇，会合成一个全位错，该过程可表示为

$$\frac{a}{2}[\bar{1}\bar{1}1] + \frac{a}{2}[111] \rightarrow a[001] \quad (2-19)$$

新形成的位错好象在 $[001]$ 解理面插入一个多余的半原子面，而且随反应的进行，将有几个位错都楔入 $[001]$ 面而形成一个大位错，从而萌生一个微裂纹。至于裂纹是否扩展，取决于

$$\sigma_i \geq \frac{2\gamma G}{K_y} d^{-\frac{1}{2}} \quad (2-20)$$

式中： K_y 为 Hall-Detch 屈服常数。

该理论的成功之处在于把解理断裂的裂纹成核与扩展区分开来，并认为后者是控制因素，因而拉应力起着重要作用，这比较符合实际情况。裂纹扩展临界应力及其它参数也在 Si-Fe 单晶中获得了实验证明，但是这一模型却很难在其它晶格类型的晶体上应用。

以上理论解释了脆性裂纹的成核与长大问题。但是脆性裂纹并非一旦形成就立即扩展。裂纹形成后，尖端的应力集中可以因为塑性变形而松弛，使裂纹的扩展速率减慢或停止。如果外加应力很大，或裂纹尖端区域可动位错数目少，或位错运动速度慢，不足以松弛应力集中（特别是低温、高应变速率时），断裂将以接近音速的速度快速传播，直到裂纹体完全断开。

三、材料的断裂韧性

1. 裂纹的扩展方式

任何实际的材料构件中都不可避免地存在着宏观裂纹，断裂力学的主要内容即是研究裂纹尖端的应力和应变，并建立新的断裂判据。裂纹的扩展方式有三种：张开型（I 型）、错开型（II 型）、撕开型（III 型），见图 2-7。其中 I 型裂纹最常见，裂纹扩展的抗力最低。

2. 应力强度因子及几何形状因子

经过一系列试验，可以得到断裂应力与裂纹长度的关系式

$$\sigma_c = KC^{-\frac{1}{2}} \quad (2-21)$$

式中系数 K 与材料、试件尺寸、形状、受力状

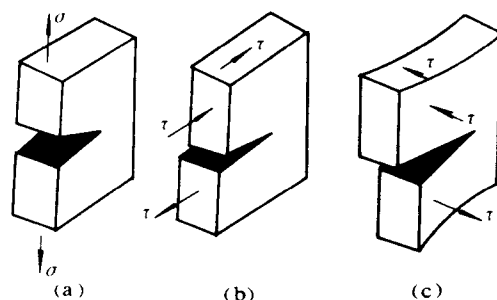


图 2-7 裂纹扩展的三种方式

(a) 张开型；(b) 错开型；(c) 撕开型