



CAILIAO
GONGCHENG
JICHU
YAOLAN

材料工程 基础要览

师昌绪 钟群鹏 李成功 主编

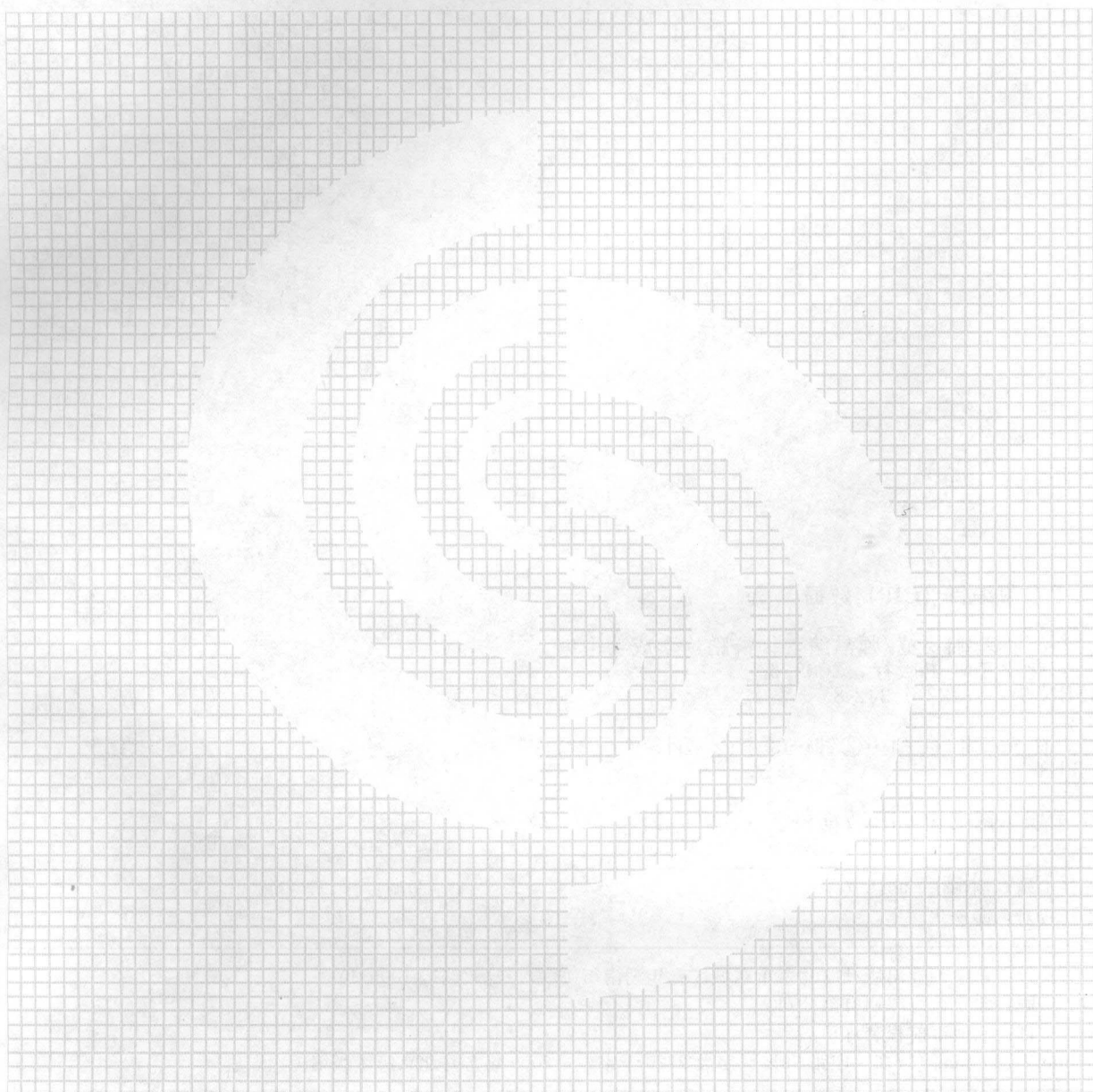


化学工业出版社



材料工程基础要览

师昌绪 钟群鹏 李成功 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

《材料工程基础要览》是材料科学及材料加工技术的共性基础要览，涉及各类材料及其产品设计选材、制造加工成形以及失效分析等方面的基础，涵盖材料科学与工程概论、材料成形的基础理论、数值模拟和优化设计方法、材料的强度设计以及材料的失效分析等方面。全书以材料工程基础方面比较成熟的理论、方法和数据为主，同时参考了国内外材料工程基础方面的新进展，反映了当代材料工程基础的先进水平。

本书主要供具有大专以上文化水平的材料科学和制造业工程技术人员阅读使用，也可供理工科院校的有关师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料工程基础要览/师昌绪，钟群鹏，李成功主编.
北京：化学工业出版社，2009.6
ISBN 978-7-122-05342-8

I. 材… II. ①师…②钟…③李… III. 工程材料
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057714 号

责任编辑：周国庆 段志兵
责任校对：陶燕华

装帧设计：尹琳琳

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京蓝海印刷有限公司

装 订：三河市前程装订厂

880mm×1230mm 1/16 印张 59 1/4 字数 2770 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：180.00 元

版权所有 违者必究

前言

本书主要内容涵盖了材料科学与工程概论、材料成型的基础理论、数值模拟和优化设计方法、材料的强度设计以及材料的失效分析等方面，是各类材料及其产品设计选材、制造加工成形以及失效分析等方面的基础。

参加本书编写工作的有国家自然科学基金委员会、北京航空材料研究院、北京航空航天大学、上海交通大学、中国材料研究学会、南京大学、华中科技大学、山东大学、东北大学、石油管材研究所等单位的 40 余位专家教授，并由我们三人担任本卷的主编。本卷共设 6 篇 42 章，共约 270 万字。各篇主编如下。

第 1 篇	材料科学与工程概论	师昌绪院士	李成功教授	刘治国教授
第 2 篇	材料成型基础理论	董湘怀教授		
第 3 篇	材料成型数值模拟	柳玉起教授		
第 4 篇	材料成型优化设计方法	赵国群教授		
第 5 篇	材料失效分析	钟群鹏院士	李鹤林院士	张峥教授
第 6 篇	材料强度设计	谢里阳教授	王永岩教授	

本书的编写遵循“科学性、先进性和实用性”的原则，以材料工程基础方面比较成熟的理论、方法和数据为主，同时参考了国内外材料工程基础方面的新进展，反映当代材料工程基础的先进水平。本书主要供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员阅读使用，也可供理工科院校的有关师生参考。

感谢有关单位对本书编写工作的指导与支持。由于编写时间紧迫和编者水平所限，对书中的不当之处，恳请读者指正并提出宝贵意见。

师昌绪

钟群鹏

李成功

编辑委员会^①

顾问：师昌绪 严东生 李恒德 何光远 陆燕荪 徐匡迪 李学勇 栾恩杰
王淀佐 朱道本 颜鸣皋 黄培云 周 廉 左铁镛

主任：路甬祥

副主任：李成功（常务） 钟群鹏 干 勇 黄伯云 江东亮 徐滨士 王占国
潘健生 杜善义 胡正寰 柳百成 徐祖耀 陈立泉

总策划：宋天虎 黄远东

总编辑：李骏带

秘书长：黄远东（兼）

委员（按姓氏笔画排列）：

丁 辛	丁传贤	干 勇	于月光	才鸿年	马世宁	马冲先	马济民	马眷荣
马福康	王占国	王务同	王尔德	王永岩	王亚军	王至尧	王克光	王克俭
王高潮	王淀佐	王琦安	王新林	王德志	方禹之	尹志民	邓 炬	左铁钊
左铁镛	石力开	石春山	卢世刚	叶小玲	叶光斗	田志凌	田荣璋	史耀武
冯 涤	冯 稷	冯春祥	宁远涛	邢建东	师昌绪	吕 炎	吕反修	同继锋
曲文生	朱万森	朱如瑾	朱绍华	朱道本	仲维卓	任家烈	华 林	刘 明
刘正才	刘世参	刘占阳	刘邦津	刘作信	刘其贤	刘郁丽	刘治国	刘建章
刘晋春	刘清友	刘献明	齐从谦	闫 洪	江东亮	许祖泽	许祖彦	阳明书
孙 坚	孙加林	杜善义	杨 合	杨 武	杨乃宾	杨才福	杨鸣波	杨忠民
杨晓华	杨海波	杨焕文	杨德仁	李 强	李 晋	李 楠	李长久	李龙土
李成功	李光福	李志刚	李明哲	李明辉	李学勇	李虹霞	李恒德	李贺军
李海军	李骏带	李鹤林	严东生	连克仁	肖亚庆	吴 行	吴 昆	吴 诚
吴永声	吴伟仁	吴性良	吴科如	吴恩熙	吴谊群	吴智华	吴德馨	何光远
何季麟	佟晓辉	邱 勇	邱冠周	邱德仁	余金中	邹广田	汪明朴	沈 真
沈万慈	沈德忠	宋天虎	张 力	张 扬	张 华	张 杰	张 金	张 峥
张子龙	张用宾	张立同	张永俐	张吉龙	张旭初	张佐光	张晋远	张康侯
张道中	张新民	陆燕荪	陈 琦	陈文哲	陈世朴	陈立泉	陈运远	陈志良
陈国钧	陈治明	陈南宁	陈祝年	陈晓慈	陈涌海	陈祥宝	陈超志	林慧国
欧阳世翥	卓尚军	易建宏	罗祥林	罗豪甦	果世驹	周 廉	周伟斌	周国庆
郑有炘	柳玉起	柳百成	胡玉亭	胡正寰	南策文	赵万生	赵有文	赵国群
赵金榜	赵梓森	赵慕岳	钟群鹏	施东成	施剑林	姜不居	姜晚霞	祖荣祥
姚 燕	贺守华	耿 林	聂大钧	贾成厂	顾冬红	夏巨湛	夏志华	俸培宗
徐匡迪	徐廷献	徐建军	徐祖耀	徐家文	徐跃明	徐滨士	殷树言	翁宇庆
郭会光	郭景杰	高瑞萍	栾恩杰	唐仁政	唐汝钧	唐志玉	唐昌世	益小苏
涂善东	黄 勇	黄天佑	黄玉东	黄本立	黄远东	黄伯云	黄校先	黄培云
曹勇家	曹湘洪	龚七一	崔 健	康喜范	梁 齐	梁 军	梁志杰	屠海令
隋同波	韩凤麟	彭艳萍	葛子干	董 瀚	董汉山	董首山	董祖珏	董湘怀
蒋力培	蒋建平	傅绍云	储君浩	谢邦互	谢里阳	谢建新	鄯国强	雷天民
路甬祥	解应龙	解思深	雍歧龙	蔡中义	漆 玄	谭 抚	熊守美	靳常青
樊东黎	黎文献	颜永年	颜鸣皋	潘正安	潘叶金	潘振甦	潘健生	燕 瑛
戴国强								

① 本书是原《中国材料工程大典》其中的一卷。《中国材料工程大典》由中国机械工程学会、中国材料研究学会组织编写，中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会及中国复合材料学会参加组织编写。本编辑委员会即为《中国材料工程大典》编委会。

目 录

第1篇 材料科学与工程概论.....	1	5.2 产业现状	42
第1章 材料科学与工程的提出与内涵.....	3	5.3 发展趋势	43
1 材料是人类社会进步的里程碑	3	6 电子信息材料	44
2 材料科学的形成与内涵	4	6.1 分类概况	44
3 先进材料是社会现代化的先导	5	6.2 产业现状	44
3.1 电子技术的发展	5	6.3 发展趋势	45
3.2 光纤通信的诞生	5	7 航空航天材料	47
3.3 航空航天技术的进步	6	7.1 历程与成就	47
4 传统材料（基础材料）在国民经济中的地位与可 持续发展	6	7.2 航空材料	47
5 材料科学技术发展的重点	7	7.3 航天材料	49
5.1 材料制备工艺与技术的开发	7	7.4 航空航天关键功能材料	51
5.2 材料的应用研究与开发	7	8 先进陶瓷材料	51
5.3 开发先进材料，发展高技术产业	7	8.1 结构陶瓷	51
5.4 材料设计	8	8.2 功能陶瓷	54
5.5 科学仪器与检测装置	9	8.3 生物陶瓷	55
第2章 材料科学基础	10	8.4 先进陶瓷产业及发展趋势	55
1 材料的结构	10	9 先进复合材料	56
1.1 原子的键合	10	9.1 结构复合材料	56
1.2 晶态、非晶态及其他	12	9.2 功能复合材料	59
1.3 晶体缺陷	17	9.3 先进复合材料发展趋势	60
1.4 聚合物的典型结构	22	10 新能源材料	60
2 材料的相变	23	10.1 新型二次电池材料	60
2.1 相变热力学简介	23	10.2 燃料电池材料	62
2.2 凝固与熔化	23	10.3 太阳能电池材料	62
2.3 固体中的扩散	25	10.4 核能材料	64
2.4 固态相变	25	11 超导材料	65
3 材料的力学性质	27	11.1 实用 NbTi 合金超导材料	65
3.1 弹性	27	11.2 实用 Nb ₃ Sn 超导材料	65
3.2 屈服与范性	27	11.3 高温氧化物超导材料	66
3.3 断裂	28	11.4 MgB ₂ 超导材料	66
3.4 高聚物的黏性流变	29	11.5 超导材料的应用	67
4 材料的其他物理性质	29	12 纳米材料	68
4.1 基本概念	29	12.1 纳米材料的基本构成和特性	68
4.2 材料的导电性	31	12.2 纳米材料研究发展的主要方向和内容	69
4.3 材料的磁性	32	12.3 纳米材料的应用和发展	71
4.4 介电性与铁电性	34	13 生物医用材料	73
第3章 基础材料与新材料的现状与发展	36	13.1 生物医用材料的基本特性	73
1 概述	36	13.2 生物医用材料的分类	73
2 钢铁材料	36	13.3 生物医用材料的评价试验和应用发展	74
2.1 分类概况	36	14 生态环境材料	75
2.2 产业现状	36	14.1 生态环境材料的基本概念	75
2.3 发展趋势	37	14.2 生态环境材料研究发展的主要方向和内容	77
3 有色金属材料	39	14.3 生态环境材料的研发趋势及应用	78
3.1 分类概况	39	第4章 材料与机械制造	81
3.2 产业现状	39	1 材料在机械制造中的重要性和地位	81
3.3 发展趋势	40	2 机械设计过程中选材的几点考虑	84
4 化工材料	41	3 在机械设计选材过程中容易出现的几个误区	95
4.1 分类概况	41	4 案例分析	96
4.2 产业现状	42	参考文献	102
4.3 发展趋势	42	第2篇 材料成形基础理论	103
5 建筑材料	42	第1章 材料成形的冶金学原理	105
5.1 分类概况	42	1 材料成形中的流体流动	105

1.1 基本概念	105	2.2 固-液界面结构	148
1.2 基本方程	106	2.3 凝固晶粒的长大方式	150
1.3 流动阻力	108	3 液态金属凝固过程中的传热	151
1.4 特殊流体流动	109	3.1 液态金属凝固过程中的传热特点	151
2 材料成形中的热量传输原理	110	3.2 非金属型铸造时(如砂型)的凝固传热	151
2.1 基本概念	110	3.3 以界面热阻为主(如金属型铸造)的凝固传热	152
2.2 导热	111	4 液态金属凝固过程中的溶质分配	152
2.3 对流换热	112	4.1 单相合金的平衡凝固	152
2.4 辐射换热	113	4.2 溶质在固相中不扩散,在液相中充分扩散的凝固	152
3 材料成形中的质量传输原理	114	4.3 溶质在固相不扩散,在液相中有限扩散而无对流的凝固	153
3.1 基本概念和传质微分方程	114	4.4 固相中无扩散,液相中有限扩散但有对流的凝固	154
3.2 分子传质	115	5 金属凝固过程中的“成分过冷”现象及胞晶形态	154
3.3 对流传质	115	5.1 “成分过冷”现象及界面生长稳定性判据	154
4 气体-液体-固体之间的界面热力学	116	5.2 “成分过冷”对组织形成的影响	155
4.1 界面能	116	5.3 细胞晶间的溶质分配	157
4.2 界面的吸附现象	116	5.4 枝晶臂间距	158
4.3 液体对固体的润湿性	117	6 共晶凝固及包晶凝固	159
4.4 材料工程与润湿	119	6.1 共晶组织分类	159
5 燃烧反应的热力学及动力学	121	6.2 非平衡状态的共晶凝固	160
5.1 燃料的着火	121	6.3 金属-金属共晶凝固	161
5.2 气体燃料的燃烧	121	6.4 金属-非金属共晶凝固	163
5.3 液体燃料的燃烧	122	6.5 包晶凝固	165
5.4 固体燃料的燃烧	122	7 定向凝固和快速凝固	166
5.5 燃烧计算	123	7.1 定向凝固	166
6 熔液、熔渣与熔剂的性质	123	7.2 快速凝固	168
6.1 溶液的活度	123	第4章 液态材料流动问题的分析方法	173
6.2 熔渣的性质	124	1 流体的连续介质假设	173
6.3 熔剂的性质	126	2 影响流动特性的基本因素	173
7 氧化还原反应原理	126	2.1 材料的物理属性	173
7.1 氧化反应的氧位图	126	2.2 流动空间的几何特征	174
7.2 氧化还原热力学条件	127	2.3 流体运动的动力学条件	174
7.3 几种典型的氧化还原反应	128	3 研究流动问题的基本途径	174
第2章 材料成形分析的力学基础	131	3.1 总体衡算法	174
1 连续介质力学的基本概念	131	3.2 微元体衡算法	175
2 张量分析基础	131	3.3 实验观测法	176
2.1 张量的基本概念	131	4 边界层理论	176
2.2 张量的定义与约定求和法	131	4.1 边界层概念	176
2.3 张量代数	132	4.2 边界层计算	177
2.4 张量的梯度、散度和奥高公式	132	5 相似理论与量纲分析	178
2.5 各向同性张量	132	5.1 流体力学的相似条件	179
2.6 二阶张量	132	5.2 黏性流体流动的力学相似准数	179
3 运动与变形	133	5.3 决定性相似准数	180
3.1 变形几何学	133	5.4 量纲分析方法	180
3.2 运动学	136	第5章 固体材料的本构关系	183
4 应力	137	1 概述	183
4.1 体力和面力	137	1.1 固体材料本构关系的一般原理	183
4.2 柯西应力张量	137	1.2 塑性成形分析中材料的变形和本构关系的选取	183
4.3 其他应力张量	137	2 弹性本构方程	183
4.4 应力速率	138	2.1 线弹性本构方程	183
5 基本方程和原理	138	2.2 超弹性本构方程	184
5.1 基本方程	138	3 弹塑性本构方程	185
5.2 边值问题与初值问题	140	3.1 概述	185
5.3 虚功原理与虚功率原理	140		
第3章 液态金属的凝固原理	142		
1 液态金属的结构及特性	142		
1.1 液态金属的结构	142		
1.2 液态金属的主要特性	143		
2 金属材料凝固生核与长大	147		
2.1 材料凝固过程中的均质形核和非均质形核	147		

3.2 屈服准则	185	1.1 差分原理	207
3.3 流动法则	185	1.2 逼近误差	207
3.4 强化规律	186	2 差分方程、截断误差和相容性	209
3.5 常用的塑性本构关系	186	3 收敛性与稳定性	210
3.6 弹塑性问题	187	3.1 收敛性	210
3.7 热弹塑性问题	188	3.2 稳定性	211
4 黏塑性本构方程	188	4 Lax 等价定理	213
4.1 一维黏塑性模型	189	第2章 弹性问题有限元基本方法	214
4.2 一般应力状态下的黏塑性本构方程	189	1 弹性问题有限元方法的一般过程	214
4.3 常用的黏塑性模型	189	1.1 离散化过程	214
4.4 蠕变问题	189	1.2 单元平衡方程组装过程	214
5 塑性细观力学本构关系	190	1.3 约束处理过程	215
5.1 塑性细观力学的基本概念	190	1.4 方程组求解过程	217
5.2 晶体塑性本构方程	190	1.5 应变、应力回代过程	220
5.3 细观损伤理论	191	2 常用单元模型	220
5.4 应变梯度塑性理论	192	2.1 单元模型分类	220
第6章 金属塑性成形中的摩擦	194	2.2 单元模型构造	221
1 金属塑性成形中的摩擦概论	194	2.3 等参单元	228
1.1 摩擦对金属塑性加工的影响	194	3 线弹性问题几何方程	228
1.2 金属塑性加工时摩擦的特点	194	3.1 三维问题	228
1.3 目前计算摩擦应力的二个常用公式	194	3.2 二维问题	228
2 塑性成形中摩擦的分类及机理	194	4 线弹性问题本构方程	228
2.1 塑性成形中摩擦的分类	194	4.1 三维问题	228
2.2 摩擦机理	195	4.2 二维问题	229
3 影响摩擦因数的主要因素	195	5 单元平衡方程列式	229
3.1 金属的种类和化学成分	195	5.1 三角形单元	229
3.2 模具的表面状态	195	5.2 四边形单元	230
3.3 接触面上的单位压力	195	5.3 空间单元	231
3.4 变形温度	195	6 数值积分	232
3.5 变形速度	196	6.1 Hammer 积分	232
4 塑性成形中的润滑	196	6.2 Gauss 积分	232
4.1 塑性成形中对润滑剂的要求	196	6.3 数值积分的阶次选择	233
4.2 塑性成形中常用的润滑剂	196	第3章 板料成形数值模拟方法	235
4.3 润滑剂中的添加剂	197	1 板壳单元	235
4.4 塑性成形时的润滑方法	197	1.1 薄膜单元	235
5 不同塑性成形条件下的摩擦因数	197	1.2 薄壳单元	235
第7章 金属塑性成形分析的近似解析法	199	1.3 中厚壳单元	237
1 主应力法及其应用	199	1.4 等效弯曲单元	239
1.1 主应力法的基本思想	199	2 本构方程	240
1.2 主应力法的应用举例	199	2.1 J_2 流动理论	241
2 塑性成形问题的滑移线解法	200	2.2 J_2 随动强化理论	241
2.1 平面应变的特性	200	2.3 各向异性理论	241
2.2 滑移线的定义	200	3 各向异性屈服函数	242
2.3 滑移线场的基本方程	200	3.1 Hill 正交各向异性函数	242
2.4 滑移线场的特征	200	3.2 Barlat - Lian 屈服函数	243
2.5 常见滑移线的类型	200	3.3 Barlat 六参量正交各向异性屈服函数	243
2.6 应用实例	201	4 工艺条件约束处理	244
3 求解塑性成形问题的上限法	201	4.1 罚函数法	244
3.1 虚功率原理的新形式	201	4.2 防御节点法	244
3.2 间断概念、动可容速度场	202	4.3 摩擦力的计算	246
3.3 应力间断	202	4.4 板料冲压成形界面滑动约束处理	247
3.4 速度间断	202	5 接触搜索判断	247
3.5 上限法基本方程	202	5.1 工具形状的定义	247
3.6 应用实例	203	5.2 接触判断	247
参考文献	204	6 板料成形有限元方法	248
第3篇 材料成形数值模拟	205	6.1 非线性方程组迭代解法	248
第1章 有限差分法	207	6.2 板料成形全量拉格朗日 (TL) 有限元方法	249
1 差分原理及逼近误差	207	6.3 板料成形修正拉格朗日 (UL) 有限元方法	251
		6.4 板料成形虚功率增量型有限元方法	252

6.5 板料成形数值模拟算例	254	3.4 保压模拟数值计算过程	299
7 板料成形显式有限元方法	254	4 冷却过程模拟	299
7.1 动力分析的虚功(率)方程	254	4.1 一维冷却分析	299
7.2 动力显式积分算法有限元方程	254	4.2 二维冷却分析	300
7.3 显式时间积分的中心差分算法	255	4.3 三维冷却分析	301
7.4 临界时间步长的确定	255	5 应力分析	302
8 板料成形有限元逆算法	256	5.1 基本假设	302
8.1 有限元逆算法基本理论	256	5.2 保压过程中的内应力模型	302
8.2 初始场猜测	257	5.3 冷却过程中的内应力模型	303
8.3 逆算法算例	257	6 翘曲变形计算	304
第4章 体积成形数值模拟方法	259	6.1 翘曲变形计算的基本原理	304
1 刚塑性有限元法	259	6.2 线性翘曲变形有限元分析的数学模型	304
1.1 概述	259	6.3 几何非线性翘曲变形有限元分析的数学模型	307
1.2 刚塑性变分原理	261	7 注射成形模拟技术新进展	308
1.3 刚塑性有限元列式	262	7.1 传统 CAE 软件的局限性	308
1.4 刚黏塑性有限元法	263	7.2 理论与实现	308
1.5 体积成形过程关键技术	264	7.3 软件介绍	310
1.6 计算实例	268	第7章 常用材料成形软件简介	311
2 弹塑性有限元法	269	1 冲压成形模拟软件	311
2.1 小变形弹塑性有限元法	269	1.1 FASTAMP 软件	311
2.2 有限应变弹塑性有限元分析	271	1.2 DYNIFORM 软件	313
2.3 有限元反向模拟	274	1.3 AUTOFORM 软件	314
3 无网格法	275	2 体积成形模拟软件	316
3.1 概述	275	2.1 概述	316
3.2 无网格法基本原理	275	2.2 DEFORM 软件	316
3.3 有限元与无网格耦合	278	2.3 Marc/AutoForge 软件	317
3.4 计算实例	278	3 铸造成形模拟软件	320
第5章 铸造成形数值模拟方法	280	3.1 使用范围	320
1 铸造凝固过程温度场数值模拟	280	3.2 分析内容	320
1.1 概述	280	3.3 缺陷预测	320
1.2 数学模型	281	3.4 软件特点	320
1.3 基于有限差分方法的离散	281	3.5 软件功能	320
1.4 初始条件与边界条件	282	3.6 华铸 CAE 应用实例	321
1.5 潜热处理	283	4 塑料注射成形模拟软件	322
1.6 温度场数值模拟流程图	286	4.1 常用软件简介	322
2 铸造充型过程数值模拟	286	4.2 注射成形 CAE 分析结果的指导意义	323
2.1 概述	286	4.3 应用实例	324
2.2 数学模型	287	参考文献	327
2.3 数学模型的离散	288	第4篇 材料成形优化设计方法	329
2.4 SOLA-VOF 方法	289	第1章 概论	331
2.5 初始条件与边界条件	290	1 材料成形优化设计方法在现代制造业中的地位和作用	331
2.6 数值稳定性条件	291	2 材料成形优化设计方法概述	331
2.7 流动与传热耦合计算	292	2.1 金属体积塑性成形优化设计方法	331
2.8 流动场数值模拟流程图	292	2.2 金属板料冲压成形优化设计方法	333
第6章 塑料注射成形数值模拟方法	294	2.3 注塑成形优化设计方法	333
1 注射成形 CAE 概述	294	2.4 铸造成形优化设计方法	333
1.1 注射成形 CAE 的概念	294	2.5 焊接成形优化设计方法	334
1.2 注射成形 CAE 的发展概况	294	3 21 世纪材料成形优化设计方法发展展望	334
1.3 注射成形 CAE 的发展趋势	294	第2章 工程优化设计方法	336
2 充模过程模拟	295	1 工程优化设计的数学模型	336
2.1 充模过程的数学描述	295	2 工程优化问题的迭代算法	337
2.2 压力场的计算	296	3 无约束优化方法	338
2.3 熔体流动前沿位置的确定	297	3.1 一维搜索方法	338
2.4 温度场数值求解	297	3.2 梯度法	339
2.5 数值计算过程	298	3.3 牛顿法	340
3 保压过程模拟	298	3.4 变尺度法	340
3.1 保压模拟的重要性	298		
3.2 保压过程的数学模型	298		
3.3 塑料熔体的特性模型	298		

4 约束优化方法	340	3 微观组织模拟与优化实例	376
4.1 Lagrange 乘子法	340	3.1 H 形锻件成形过程组织模拟与优化	376
4.2 外部惩罚函数法 (外点法)	342	3.2 热挤压成形过程的微观组织模拟与优化	377
4.3 内部惩罚函数法 (内点法)	343	3.3 基于灵敏度分析方法的微观组织模拟与 优化	378
5 多目标优化问题的解法	343	3.4 基于遗传算法的微观组织模拟与优化	380
第 3 章 基于有限元模拟技术的反向模拟式设计	344	第 6 章 稳态金属成形过程优化设计	383
1 有限元反向模拟技术的原理	344	1 稳态成形过程优化设计问题	383
2 反向模拟关键应用技术	345	2 设计灵敏度分析	384
2.1 反向模拟与预成形设计的步骤	345	3 二维挤压模具形状优化设计	384
2.2 加工硬化现象的处理	346	4 三维挤压模具形状优化设计	386
2.3 预锻模腔形状设计	346	4.1 设计模型	386
2.4 预锻件形状的选择及工序数目的确定	346	4.2 优化实例	387
2.5 反向模拟过程中动态边界条件的确定	346	第 7 章 板料冲压工艺优化设计	391
2.6 有限元反向模拟系统的构造	347	1 板料冲压工艺及其质量要求	391
3 缩口过程的反向模拟及预成形设计	347	2 板料冲压工艺优化的意义	391
3.1 室温缩口过程的预成形设计	347	3 板料成形常用数学优化方法	391
3.2 热缩口成形过程的预成形设计	348	3.1 正交实验法	392
4 反向模具接触跟踪方法	350	3.2 人工神经网络	392
4.1 边界条件的确定	350	3.3 响应面法	393
4.2 工序数目的确定	350	4 冲裁工艺中的毛坯排样优化技术应用	393
4.3 通用透平圆盘锻造过程的预成形设计	350	4.1 冲裁工艺中的排样技术及排样方法	393
5 基于锻件形状复杂程度的控制准则	354	4.2 提高材料利用率的途径	394
5.1 工件形状复杂系数及边界条件控制准则	354	4.3 毛坯排样的优化技术应用	394
5.2 预成形设计应用举例	354	5 弯曲工艺中回弹和下料尺寸控制的优化技术	395
第 4 章 刚 (黏) 塑性有限元灵敏度分析与模具 优化设计	358	5.1 弯曲工艺中下料尺寸控制的优化技术	395
1 刚 (黏) 塑性有限元基本方程	358	5.2 弯曲工艺中回弹控制的优化方法	396
2 目标函数与设计变量	358	6 板料拉深成形中的缺陷控制与工艺优化技术	397
3 灵敏度分析	359	6.1 基于增量有限元数值模拟的毛坯 下料形状的优化	397
3.1 节点速度灵敏度	359	6.2 板料拉深成形中的拉深肋设计优化	398
3.2 $\frac{\partial K_{ij}}{\partial x_n}, \frac{\partial F_i}{\partial x_n}, \frac{\partial F_i}{\partial r_j}$ 的确定	360	6.3 板料拉深成形压边力优化	398
4 速度灵敏度边界条件	360	6.4 基于正交试验和增量有限元数值模 拟的工艺方案优化	399
5 温度场灵敏度分析	361	7 激光板料成形过程模拟与优化设计	400
6 模具优化设计方法的应用技术	362	7.1 激光板料成形过程的数值模拟	400
6.1 模具优化设计步骤	362	7.2 基于遗传算法的激光板料成形优化	403
6.2 体积损失的调整	363	8 多点成形技术工艺优化	405
6.3 有限元网格再划分	365	8.1 多点成形技术	405
6.4 提高程序运算速度的方法	365	8.2 分段成形过渡区最优化问题描述	406
7 少无鼓形圆柱体锻造过程的优化设计	365	8.3 算法描述	406
8 模具有型腔的锻造过程优化设计	366	8.4 应用实例	406
8.1 H 型截面轴对称锻件锻造过程 (型腔高径比 $h/b = 1$)	366	第 8 章 塑料注射成形过程的优化设计	408
8.2 H 型截面锻件锻造过程 (型腔高径比 $h/b = 2$)	367	1 成形方案的优化设计	408
8.3 齿轮坯锻造过程的优化设计	368	1.1 浇注系统优化设计	408
9 锻件毛坯形状优化设计方法	369	1.2 冷却系统优化设计	409
9.1 目标函数	369	2 注射成形工艺参数的优化	410
9.2 优化设计实例	370	3 充填模式优化	413
10 锻件变形均匀性优化控制	372	4 注射成形模拟软件及其智能化	414
10.1 目标函数	372	4.1 注射成形模拟软件	414
10.2 灵敏度分析	372	4.2 模拟软件的智能化	415
10.3 应用实例	373	第 9 章 铸造工艺优化设计	417
第 5 章 金属塑性成形过程的微观组织优化	374	1 浇注位置	417
1 微观组织演变模型	374	2 分型面	417
2 金属塑性成形过程微观组织模拟与优化的 基本算法	374	3 浇注系统	418
2.1 遗传算法	375	3.1 浇注系统的设计原则	418
2.2 灵敏度分析方法	376	3.2 浇注系统的形式及适用情况	418
		4 冒口	419
		4.1 冒口设计优化原则	419

4.2 冒口优化的数学模型	419	6 失效分析的预测预防的常用分析思路	459
5 铸件结构的优化	420	6.1 残骸分析法	459
5.1 铸件壁厚及其结构形式的优化	420	6.2 统计图表分析法	460
5.2 不同铸造合金铸件结构的优化原则	421	6.3 文字表格法	461
6 铸造工艺的 CAD-CAE 在铸造工艺优化中的 作用	422	6.4 失效树分析法	464
7 熔炼过程配料的成本优化计算	423	6.5 失效模拟和加速失效模式模拟试验方法	468
7.1 线性规划方法	423	6.6 失效的事后处理及失效预防	468
7.2 配料计算中线性规划问题的建模	423	7 失效分析预测预防的发展趋势	474
7.3 配料计算中线性规划问题的标准化	424	7.1 失效诊断的理论、技术和方法的进展	475
7.4 使用单纯形法解决配料问题的具体步骤	424	7.2 失效预测的理论、技术和方法的进展	477
第 10 章 焊接工艺优化设计	426	7.3 失效预防的理论、技术和方法的进展	479
1 焊接材料优化设计	426	8 结束语	480
1.1 焊条配方的优化设计	426	第 2 章 失效诊断技术和方法	481
1.2 药芯焊丝的计算机辅助优化设计	427	1 断口诊断技术和方法	481
1.3 焊剂优化设计	427	1.1 断口准备	481
1.4 埋弧焊焊丝和焊剂优化选配	429	1.2 断口诊断仪器设备和技術	482
2 焊接结构的优化设计	431	1.3 断口形貌诊断技术和方法	484
2.1 焊接变形与焊接应力	431	1.4 断口定量诊断技术和方法	491
2.2 减小焊接变形与应力的方法	432	2 裂纹诊断技术和方法	496
2.3 焊接结构设计	433	2.1 裂纹的无损检测	497
2.4 焊缝金属与母材强度匹配的优化选择	433	2.2 裂纹产生先后顺序诊断技术和方法	497
2.5 焊接结构优化设计实例	433	2.3 裂纹的形貌诊断	497
3 焊接电源的优化设计	434	2.4 裂纹综合诊断	500
3.1 弧焊电源优化设计过程	434	3 痕迹诊断技术和方法	502
3.2 晶间管弧焊电源优化设计实例	434	3.1 痕迹及痕迹分析概述	502
4 焊接方法及焊接规范优化设计	435	3.2 痕迹的发现和显现技术和方法	503
4.1 焊接方法的分类	435	3.3 痕迹的提取、固定、清洗、记录和 保存技术和方法	503
4.2 焊接方法的优化选择	435	3.4 痕迹的鉴定	503
4.3 CO ₂ 气体保护焊焊接规范的优化设计	437	3.5 痕迹的模拟再现	512
5 焊接工程成本分析优化设计	437	3.6 痕迹的综合分析	512
5.1 焊接工程多阶段决策问题优化设计	437	4 失效(腐蚀、磨损)产物的诊断技术和方法	512
5.2 焊接成本优化分析	439	4.1 失效产物的形貌诊断	513
第 11 章 产品数字化设计与成形工艺仿真优化技术	440	4.2 失效产物的成分诊断	513
1 产品数字化设计方法与平台	440	4.3 失效产物的结构诊断	513
2 产品结构分析与优化技术	441	5 综合诊断技术和方法	513
3 产品结构的快速成形与快速模具制造技术	442	5.1 失效诊断的思路和程序	513
3.1 快速原型制造技术及其分类	442	5.2 失效模式(性质)诊断技术和方法	514
3.2 快速模具制造技术及其分类	442	5.3 失效原因诊断技术和方法	526
4 产品构件成形工艺与模具虚拟仿真优化设计 技术	443	5.4 失效机理诊断技术和方法	533
5 产品设计与制造的集成技术应用实例	445	6 智能诊断技术和方法	536
参考文献	448	6.1 状态监测和故障诊断技术	536
第 5 篇 材料失效分析	451	6.2 专家系统在诊断中的应用	537
第 1 章 概论	453	6.3 失效案例库及其应用	538
1 失效分析预测预防的地位与作用	453	第 3 章 失效预测技术和方法	540
2 与安全失效有关的术语定义	453	1 以失效模式为基础的失效预测技术和方法	540
2.1 安全的定义、内涵和外延	453	1.1 金属材料失效抗力预测	540
2.2 与失效有关的术语定义	453	1.2 断裂失效预测	546
3 失效的分类	454	1.3 疲劳断裂失效预测	553
4 失效分析预测预防的特点和属性	456	1.4 磨损失效预测	558
4.1 失效、失效分析的特点和属性	456	1.5 非金属构件的失效预测	564
4.2 失效分析预测预防与相关学科、技术 之间的关系	456	2 以工程力学为基础的失效预测技术和方法	568
4.3 失效分析预测预防应注意的事项和对 人员素质的要求	456	2.1 以经典力学为基础的失效预测预防技术和 方法	568
4.4 失效分析预测预防的技术工作	457	2.2 以断裂力学为基础的失效预测技术和方法	573
5 失效分析预测预防的步骤和程序	458	2.3 以疲劳力学为基础的失效预测技术和 方法	576
		2.4 以损伤力学为基础的失效预测技术和 方法	581

3 以数理统计为基础的失效预测技术和方法	585	3 抗失效的机械设计技术和方法	697
3.1 失效分析概率统计基础	585	3.1 抗脆断设计技术和方法	697
3.2 失效分析随机过程基础	594	3.2 抗韧断设计技术和方法	700
3.3 失效分析中随机变量和随机过程的模拟方法	598	3.3 抗疲劳设计技术和方法	700
3.4 断裂失效概率预测	600	3.4 抗环境失效设计技术和方法	706
3.5 疲劳失效概率预测	602	4 可靠性设计技术和方法	707
3.6 安全系数的统计分析	606	4.1 可靠性设计基本概念	707
4 以可靠性工程为基础的失效预测技术和方法	608	4.2 可靠性设计方法	711
4.1 可靠性的基本概念和数学基础	608	4.3 可靠性设计的步骤	713
4.2 静强度可靠性的失效预测技术和方法	609	参考文献	715
4.3 疲劳寿命可靠性的失效预测技术和方法	616		
第4章 安全评定技术和方法	623	第6篇 材料强度设计	717
1 概述	623	第1章 概论	719
1.1 安全评定的一般原则	624	1 强度设计的目的与作用	719
1.2 失效模式的判别	624	2 材料强度设计方法	720
2 断裂和塑性失效确定性安全评定技术和方法	624	2.1 常规强度理论	720
2.1 检测及评定程序	624	2.2 现代机械强度理论	720
2.2 确定性安全评定方法的分类	625	第2章 材料静强度设计	721
2.3 安全系数的选取和确定	626	1 材料的静载拉伸特性	721
2.4 平面缺陷的确定性安全评定	626	1.1 材料的力学特性和软性系数	721
2.5 体积缺陷的确定性安全评定	645	1.2 静载拉伸试验	721
3 疲劳失效确定性评定技术和方法	649	1.3 拉伸曲线	721
3.1 材料疲劳性能参数的获取	649	1.4 几种典型的应力-应变曲线	722
3.2 应力变动和累积损伤	651	2 材料的力学性能指标及其影响因素	722
3.3 确定性疲劳评定	652	2.1 强度指标	722
4 其他失效模式的确定性安全评定技术和方法	656	2.2 塑性指标	723
4.1 剩余截面超载屈服	656	2.3 材料强度、塑性与韧性的合理配合	724
4.2 破裂前的泄漏分析 (LBB)	656	3 材料的弯曲特性	724
4.3 环境的影响	657	3.1 静弯曲试验的特点	724
4.4 失稳 (或变形过大, 压曲)	660	3.2 材料弯曲的力学性能指标	725
4.5 蠕变	660	3.3 弯曲试验的应用	725
5 概率安全评定方法	661	4 材料的扭转特性	725
5.1 安全评定分析中不确定性影响因素	661	4.1 静扭转试验的特点	725
5.2 含裂纹结构缺陷的统计方法	662	4.2 材料扭转的力学性能指标	726
5.3 静载下 (含平面缺陷) 概率安全评定方法	664	5 材料的压缩特性	727
5.4 疲劳载荷下概率安全评定方法	665	6 缺口对静加载下力学性能的影响	728
6 工业风险评估及其主要方法和应用	667	6.1 缺口效应	728
6.1 概述	667	6.2 应变集中和缺口截面应力分布的变化	728
6.2 风险评估的主要任务	668	6.3 缺口静拉伸及斜拉伸试验	729
6.3 风险评估的主要方法	670	7 材料静强度设计的一般方法	730
6.4 风险评估的主要应用	672	7.1 强度判据	730
6.5 风险评估近年来的主要进展	674	7.2 静应力下的安全系数	730
7 安全评定技术的其他发展趋势	675	7.3 复杂应力状态下的强度理论	731
7.1 安全评定技术的发展趋势	675	第3章 材料的断裂韧性设计	733
7.2 模糊安全评定技术	675	1 材料断裂韧性设计概要	733
7.3 智能安全评定技术	676	2 断裂力学原理与方法	733
第5章 失效预防技术和方法	677	2.1 裂纹的基本类型	733
1 失效的工程预防技术和方法	677	2.2 应力强度因子与断裂判据	734
1.1 抗断裂失效设计技术	677	2.3 确定应力强度因子的方法	737
1.2 制造工艺及质量控制技术	678	2.4 材料断裂韧性	746
1.3 表面防护与强化工艺技术	680	2.5 弹塑性断裂力学的基本理论与判据	746
1.4 故障监测与检测技术	682	3 裂纹扩展计算	747
1.5 故障排除与修理技术	683	3.1 疲劳裂纹扩展速率的基本公式	747
2 抗失效的材料选择和材料设计技术与方法	685	3.2 超载延迟效应对疲劳裂纹扩展的影响	748
2.1 抗变形失效材料的选择和设计方法	685	3.3 恒幅疲劳载荷下的裂纹扩展寿命计算	748
2.2 抗断裂失效材料的选择和设计方法	687	3.4 变幅疲劳载荷下的裂纹扩展寿命计算	748
2.3 抗腐蚀失效材料的选择和设计方法	690	3.5 应力腐蚀裂纹扩展寿命计算	748
2.4 抗磨损失效材料的选择和设计方法	692	3.6 腐蚀疲劳裂纹扩展寿命	749
		3.7 剩余寿命计算示例	749

4 断裂韧度设计结构类型及设计要求	750	1.6 已知应力和强度分布时的可靠度计算	829
4.1 断裂韧度设计结构类型的选择原则	750	2 概率设计常用的随机变量及其分布	830
4.2 危险部位的选择	750	2.1 分布特征	830
4.3 实际缺陷与当量裂纹	751	2.2 正态分布	831
4.4 断裂判据	751	2.3 对数正态分布	832
4.5 剩余强度分析	755	2.4 威布尔 (Weibull) 分布	833
4.6 工程实际问题的简化处理方法	755	2.5 I 型极值分布 (Gumbel 分布)	833
5 破损安全结构断裂控制	756	2.6 χ^2 分布、 F 分布和 t 分布	834
5.1 结构布局	756	3 参数估计	835
5.2 材料选择	756	3.1 截尾数据	835
5.3 细节设计	756	3.2 极大似然估计	836
5.4 裂纹检测	757	3.3 风险图	836
第 4 章 材料冲击强度设计	758	3.4 概率图	836
1 冲击载荷作用下材料的力学响应	758	3.5 矩估计	836
2 冲击载荷下材料的损伤和破坏	758	3.6 指数分布参数估计	836
3 材料的应变率响应	760	3.7 正态分布	838
3.1 复合材料的高应变率响应	760	3.8 对数正态分布	841
3.2 金属材料的应变率响应	761	3.9 威布尔分布	841
4 材料在冲击载荷作用下的性能指标	763	3.10 选择恰当的分布函数的意义	843
4.1 动态断裂韧性	763	4 随机变量分布类型的假设检验	844
4.2 冲击试验和冲击性能指标	763	4.1 分布类型的假设检验	844
第 5 章 材料疲劳强度设计	765	4.2 正态及对数正态分布的分析法	847
1 概述	765	4.3 威布尔分布的分析法	856
1.1 疲劳的分类	765	5 静强度概率设计方法	867
1.2 疲劳强度设计方法	765	5.1 静强度概率设计的特点、内容与方法	867
2 疲劳强度设计中的参量及处理	766	5.2 应力-强度干涉模型与失效概率计算	867
2.1 疲劳载荷	766	5.3 蒙特卡罗方法	868
2.2 材料疲劳性能数据	767	5.4 有多种失效模式的失效概率	870
3 影响材料疲劳强度的因素	783	5.5 可靠度的置信度和置信区间	870
3.1 应力集中影响	783	第 7 章 材料的环境强度设计	887
3.2 尺寸的影响	799	1 材料的高温强度	887
3.3 表面状况影响	800	1.1 高温短时拉伸强度	887
3.4 载荷状况	803	1.2 高温硬度	888
4 常规疲劳强度设计	805	1.3 蠕变及持久强度	888
4.1 安全系数	806	1.4 高温疲劳	889
4.2 疲劳损伤累积	809	2 材料的低温强度	897
4.3 无限寿命设计	810	2.1 低温脆断	897
4.4 有限寿命设计	811	2.2 低温疲劳	899
5 现代疲劳强度设计	813	3 材料热疲劳强度	901
5.1 $\epsilon - N$ 曲线	813	3.1 热应力与热疲劳	901
5.2 循环 $\sigma - \epsilon$ 曲线	815	3.2 热疲劳强度计算	901
5.3 应变-寿命曲线的获得与低周疲劳寿命估算	818	4 材料在腐蚀介质中的强度	903
5.4 局部应力应变分析	820	4.1 应力腐蚀开裂	903
5.5 裂纹形成寿命的估算	822	4.2 腐蚀疲劳	904
6 接触疲劳强度设计	824	第 8 章 特殊材料的强度问题	913
6.1 接触疲劳失效机理	824	1 复合材料	913
6.2 接触应力	824	2 聚合物	913
6.3 接触疲劳强度计算	825	2.1 聚合物的结构特点与力学状态	913
第 6 章 材料强度概率设计	827	2.2 聚合物的时间效应和时-温等效原理	915
1 强度概率设计原理	827	2.3 聚合物的力学性能	916
1.1 概率设计的特点与步骤	827	3 陶瓷材料	919
1.2 应力-强度分布干涉理论与可靠度的 一般表达式	827	3.1 陶瓷材料的弹性性能	919
1.3 应力分布的确定	827	3.2 陶瓷材料的强度及其影响因素	921
1.4 随机变量函数的均值和标准差的近似 计算	828	3.3 陶瓷材料的断裂韧度	922
1.5 强度分布的确定	829	3.4 陶瓷材料的抗热震性	923
		3.5 陶瓷材料的疲劳	924
		3.6 陶瓷材料的短裂纹行为	924
		参考文献	925

第 1 篇

材料科学与工程概论

■ 主 编 师昌绪 李成功 刘治国
■ 编 写 师昌绪 李成功 刘治国

第1章 材料科学与工程提出的提出与内涵

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的那些物质。材料是物质，但不是所有物质都可以称为材料，如燃料和化学原料、工业化学品、食物和药物，一般都不算是材料。但是这个定义并不那么严格，如炸药、固体火箭推进剂，一般称之为“含能材料”，因为它属于火炮或火箭的组成部分。

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。20世纪70年代人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。80年代以高技术群为代表的新技术革命，又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是材料与国民经济建设、国防建设和人民生活密切相关。

材料除了具有重要性和普遍性以外，还具有多样性。由于其多种多样，分类方法也就没有一个统一标准。从物理化学属性来分，可分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和不同类型材料组成的复合材料。从用途来分，又分为电子材料、航天航空材料、核材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。更常见的两种分类方法则是结构材料与功能材料，传统材料（基础材料）与新型材料。结构材料是以力学性能为基础，以制造受力构件所用材料，当然，结构材料对物理或化学性能也有一定要求，如光泽、热导率、抗辐照、抗腐蚀、抗氧化等。功能材料则主要是利用物质的独特物理、化学性质或生物功能等而形成的一类材料。一种材料往往既是结构材料又是功能材料，如铁、铜、铝等。传统材料是指那些已经成熟且在工业中已批量生产并大量应用的材料，如钢铁、水泥、塑料等。这类材料由于其量大、产值高、涉及面广，又是很多支柱产业的基础，所以又称为基础材料。新型材料（先进材料）是指那些正在发展，且具有优异性能和应用前景的一类材料。新型材料与传统材料之间并没有明显的界限，传统材料通过采用新技术，提高技术含量，提高性能，大幅度增加附加值而成为新型材料；新型材料在经过长期生产与应用之后也成为传统材料。传统材料是发展新型材料和高技术的基础，而新型材料又往往能推动传统材料的进一步发展。

为了规范新型材料的涵义，2004年曾召开小型座谈会，认为具备以下条件之一的材料可称之为新型材料：

1) 新出现或正在发展中的具有传统材料所不具备的优异性能的材料；

2) 高技术发展需要，具有特殊性能的材料，例如电视机的阴极罩，材料是低碳钢，由于对材料质量和性能有特殊要求，必须经过特殊加工过程才能达到，从而普通碳钢成为新型材料；

3) 由于采用新技术（工艺、装备）明显提高了性能，或出现新的功能的材料，如超级钢属于前一种类型；纳米氧化锌则属于后者。

1 材料是人类社会进步的里程碑

人类发展的历史证明，材料是社会进步的物质基础，是人类进步程度的主要标志，所以人类社会的进步以材料作为里程碑。纵观人类发现材料和利用材料的历史，每一种重要材料的发现和广泛利用，都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新水平，给社会生产力和人类生活水平带来巨大的变化，把人类的物质文明和精神文明向前推进一步。

早在一百万年以前，人类开始用石头做工具，使人类进入旧石器时代。大约一万年以前，人类知道对石头进行加

工，使之成为精致的器皿或工具，从而使人类进入新石器时代。在新石器时代，人类开始用皮毛遮身。8000年前中国就开始用蚕丝做衣服，4500年前印度人开始种植棉花，这些都标志着人类使用材料促进文明进步。在新石器时代。人类已知道使用自然铜和天然金，但毕竟数量太少，分散细小，没有对人类社会产生重要影响。

大约在8000~9000年前，人类还处于新石器时代，已发明了用黏土成型，再火烧固化而成为陶器。陶器的出现，不但用于器皿，而且成为装饰品，是对精神文明的一大促进，历史上虽无陶器时代的名称，但其对人类文明的贡献是不可估量的。在烧制陶器过程中，偶然发现金属铜和锡，当然那时还不明白这是铜、锡的氧化物在高温下被碳还原的产物，进而又生产出色泽鲜艳、又能浇铸成型的青铜，从而使人类进入青铜时代。这是人类较大量利用金属的开始，也是人类文明发展的重要里程碑。世界各地开始青铜时代的时间各不相同，希腊在公元前3000年前，埃及在公元前2500年前，巴比伦在公元前19世纪中叶，印度大约在公元前3000年已广泛使用青铜器。中国的青铜器在公元前2700年已经使用了，至今约5000年的历史，到商周（公元前17世纪到公元前3世纪）进入了鼎盛时期，如河南安阳出土的重达875 kg的鼎、湖北随县的编钟、西安青铜车马都充分反映了当时中国冶金技术水平和制造工艺的高超。

公元前13~14世纪前，人类已开始用铁，3000年前铁工具比青铜工具更为普遍，人类开始进入了铁器时代。中国最早出土的人工冶铁制品约在公元前9世纪。到春秋（公元前700~476年）末期，生铁技术有较大突破，遥遥领先于世界其他地区，如用生铁退火而制成韧性铸铁及生铁炼钢技术的发明，促进了中国生产力的大发展，对战国和秦汉农业、水利和军事的发展起到很大作用。早在公元2世纪中国的钢和丝绸已驰名罗马帝国。生铁技术在公元前5世纪即春秋末叶已经在黄河长江流域传播。这些技术于公元6~7世纪传入朝鲜半岛、日本和北欧，推动了整个世界文明的进步。

随着世界文明的进步，18世纪发明了蒸汽机，19世纪发明了电动机，对金属材料提出了更高要求，同时对钢铁冶金技术产生了更大的推动作用。1854年和1864年先后发明了转炉和平炉炼钢，使世界钢产量有一个飞速发展。如1850年世界钢产量为6万吨，1890年达2800万吨，大大促进了机械制造、铁道交通及纺织工业的发展。随之电炉冶炼开始，不同类型的特殊钢相继问世，如1887年高锰钢、1900年18-4-1 (W18Cr4V) 高速钢、1903年硅钢及1910年奥氏体镍铬 (Cr18Ni8) 不锈钢，把人类带进了现代物质文明。在此前后，铜、铝也得到大量应用，而后镁、钛和很多稀有金属都相继出现，从而金属材料在整个20世纪占据了结构材料的主导地位。

随着有机化学的发展，19世纪末叶西方科学家仿制中国丝绸发明了人造丝，这是人类改造自然材料的又一里程碑。20世纪初，人工合成有机高分子材料相继问世，如1909年的酚醛树脂（电木），1920年的聚苯乙烯，1931年的聚氯乙烯及1941年的尼龙等，以其性能优异、资源丰富、建设投资少、收效快而得到迅速发展。目前世界三大有机合成材料（树脂、纤维和橡胶）年产量愈亿吨。而且有机材料的性能不断提高，附加值大幅度增加，特别是特种聚合物正向功能材料各个领域进军，显示其巨大的潜力。

陶瓷本来用作建筑材料、容器或装饰品等。由于其资源

丰富、密度小、高模量、高硬度、耐腐蚀、膨胀系数小、耐高温、耐磨等特点,到了20世纪中叶,通过合成及其他制备方法,做出各种类型的先进陶瓷(如 Si_3N_4 、 SiC 、 ZrO_2 等),成为近几十年来材料中非常活跃的研究领域,有人甚至认为“新陶瓷时代”即将到来。但由于其脆性问题难以解决,且价格过高,作为结构材料没有得到如钢铁或高分子材料一样的广泛应用。

复合材料是20世纪后期发展的另一类材料。众所周知,天然材料很多是复合材料,如木材、皮革、竹子等。事实上,人类很早就制造复合材料,如泥巴中混入碎麻或麦秆用以建造房屋,钢筋水泥是脆性材料和韧性材料的复合。近几十年来,利用树脂的易成型和金属韧性好,无机非金属材料

的高模量、高强度、耐高温,做成了树脂基复合材料或金属基复合材料,前者已得到广泛应用。后者以其制作困难、价格高而受到一定限制。为了改善陶瓷的性能,也制成陶瓷基复合材料。碳是使用温度最高的材料(可达 2500°C),为了克服热震性能差,并提高其力学性能而制出的碳-碳复合材料已广泛用于军工,并扩展到民用。

图1.1-1以结构材料为主线,概述了材料的发展历史。可以看出,自19世纪中叶现代炼钢技术出现以后,金属材料的重要性急剧增加,一直到20世纪中叶,人工合成有机材料、陶瓷材料及先进复合材料迅速发展,金属材料的重要性逐渐下降,但一直到21世纪上半叶,金属材料仍将占重要位置。

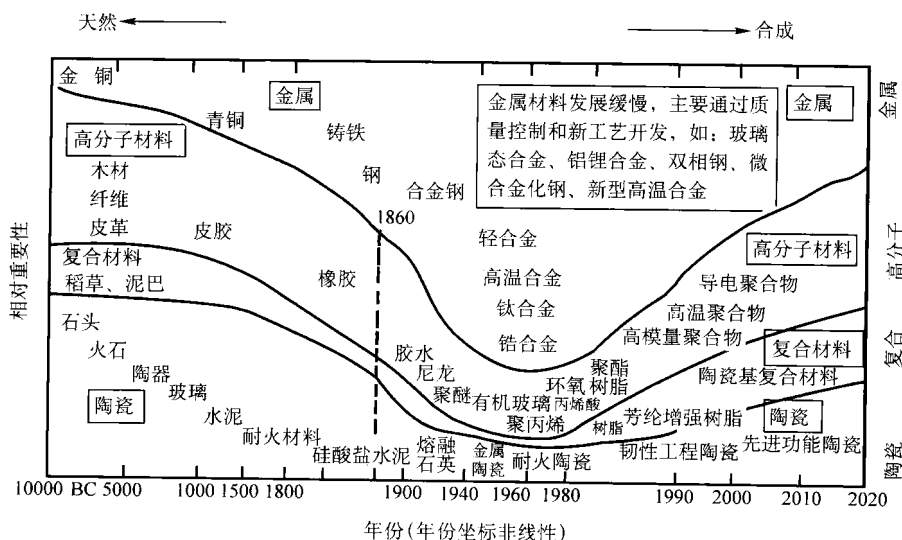


图 1.1-1 各类结构材料相对重要性随年代变化

功能材料自古就受到重视,早在战国(公元前3世纪)已利用天然磁铁矿来制造司南,到宋代用钢针磁化制出了罗盘,为航海的发展提供了关键技术。功能材料是信息技术及自动化的基础,特别是半导体材料出现以后,加速了现代文明的发展。1947年发明了第一只具有放大作用的晶体管,10余年后又研制成功集成电路,使以硅材料为主体的计算机的功能不断提高,体积不断缩小,价格不断下降,加之高性能的磁性材料不断涌现,激光材料与光导纤维的问世,使人类社会进入了信息时代。因为硅是微电子技术的关键材料,所以有人称之为硅器件为代表的“硅材料时代”,再一次说明材料对人类文明起了关键的作用。

2 材料科学的形成与内涵

“材料”是早已存在的名词,但“材料科学”的提出只是20世纪60年代初的事。1957年前苏联人造卫星首先上天,美国朝野上下为之震惊,认为自己落后的主要原因之一是先进材料落后,于是在一些大学相继成立了十余个材料科学研究中心。采用先进的科学理论与实验方法对材料进行深入研究,取得重要成果。从此,“材料科学”这个名词便开始流行。

“材料科学”的形成实际是科学技术发展的结果。

首先,固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展,对物质结构和物性的深入研究,推动了对材料本质的了解;同时,冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展也使对材料本身的研究大大加强,从而对材料的制备、结构与性能,以及它们之间的相互关系的研究也愈来愈深入,为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

其次,在材料科学这个名词出现以前,金属材料、高分

子材料与陶瓷材料都已自成体系,目前复合材料也获得广泛应用,其研究也逐步深入。但它们之间存在着颇多相似之处,对不同类型材料的研究可以相互借鉴,从而促进学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的,而且广泛地被用来作为钢热处理的理论基础,但在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象,并用来作为陶瓷增韧的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶-凝胶法,是利用金属有机化合物的分解而得到纳米级高纯氧化物粒子,成为改进陶瓷性能的有效途径。虽然不同类型的材料各有其专用测试设备与生产装置,但各类材料的研究检测设备与生产手段有颇多共同之处,例如显微镜、电子显微镜、表面测试及物性与力学性能测试设备等。在材料生产中,许多加工装置的原理也有颇多相通之处,可以相互借鉴,从而加速材料的发展。

最后,许多不同类型的材料可以相互替代和补充,能更充分发挥各种材料的优越性,达到物尽其用的目的。但长期以来,金属、高分子及无机非金属材料自成体系,缺乏沟通。由于互不了解,不利于发展创新,对复合材料的发展也极不利。

尽管从材料发展需要和共性来看,有必要形成一门材料科学,但是由于各类材料的学科基础不同,还存在不小的分歧,特别是无机材料与有机材料之间分歧较大,但由于软物质科学的崛起,还可以软硬兼顾,互相借鉴。

材料科学所包括的内容往往被理解为研究材料的组织、结构与性质的关系,探索自然规律,这属于基础研究。实际上,材料是面向实际、为经济建设服务的,是一门应用科学,研究与发展材料的目的在于应用,而材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实用价值的材料来,通过批量生产才能成为工程材料。所以,在“材料科学”这个名词出