



工程材料的选择与应用



F.A.A. 克兰
(英) J.A. 查尔斯 著

科学出版社

内 容 简 介

本书较为全面、系统地介绍了各类工程材料的使用现状及潜在的应用前景。书中列举大量实例,分析材料成本、质量要求与材料各种性能之间的关系,提出优化选材的论据和方法。全书共十九章。第一至五章介绍选材的若干基本问题;第六至十二章分析材料怎样满足特定的工程特性和表面耐久性要求;第十三、十四章阐明材料选择与材料加工之间的关系及具体的选材方法;第十五至十九章介绍选材实例。本书内容丰富,具有较强的实用性。

本书可供从事材料科学、冶金、化工、机械、电子、航空、航天等研究的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

F. A. A. Crane J. A. Charles

SELECTION AND USE OF ENGINEERING MATERIALS

Butterworths, 1984

工程材料的选择与应用

〔英〕F. A. A. 克兰 J. A. 查尔斯 著

王庆绥 强 俊 董照钦 译

责任编辑 董安齐

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年8月第一版 开本: 787×1092 1/32

1990年8月第一次印刷 印张: 13 7/8

印数: 0001—2 300 字数: 314 000

ISBN 7-03-001558-4/TB·42

定价: 12.10元

译者的话

市场竞争实质上就是产品质量的竞争.从这种意义上说,产品质量确实是市场得以繁荣的关键.产品质量的好坏,首先要看选用的材料是否适合该产品的使用要求.

对设计人员来说,选材往往是个很棘手的问题.小至剃须刀片,大至飞机、轮船,所涉及到的工程材料五花八门,既有天然木材、岩石,又有各类金属与聚合材料.设计人员对工程材料的了解如若仅限于化学成分、性能指标及其他技术规范,显然是很不够的,更重要的是,应当掌握它们是否满足实际要求,是否经济,这样才能顺利地完成任务.本书作者正是基于这一指导思想,利用大量的具体实例,就一般工程选材时怎样在技术与经济两方面做出合理权衡进行了论述,使读者能对各种工程材料的应用现状及潜在用途有所了解,这也正是以往各种有关材料的专著中很少论述的课题.无疑,对于在冶金、化工、机械等部门从事设计工作的工程技术人员以及材料科学工作者来说,本书是很有参考价值的.

国内目前论述该课题的专著尚不多见,为了满足生产、教学与科研的需要,我们翻译了这本书.其中,第一、二、三、四、十五、十六和十七章由强俊翻译;第六、七、八、九和十章由董照钦翻译;前言及第五、十一、十二、十三、十四、十八和十九章由王庆绥翻译.

在翻译本书过程中,得到北京理化测试学会联合会的大力支持;郭鸿运同志提出许多宝贵意见,在此一并表示感谢!

前 言

随着各领域中因工业衰退而引起的国际竞争的加剧,作为设计过程组成部分的材料选择工作,其重要性也在不断增长。为了对选材提供技术上最先进而又经济的适宜方法,有必要清楚了解零件或结构的使用要求。这种了解所带来的好处可以从设计工程师和材料工程师之间、材料工程师和科学工作者之间更好地沟通信息中显示出来。只要将选材工作当作工程项目中的一项任务,就能最有效地达到上述目的。

在我们还是学生的时候,有关选材方面的授课内容只是讲解技术条件、材料成分和材料性能,对于材料使用范围的说明极为有限。很可惜,那是一门有点令人扫兴的课程。后来,我们二人分别在帝国学院和剑桥大学同时讲授的正是这门课程。自然地,我们试图在选材方面提供更加合理而且也更生动的内容。那时我们两人各自都采用列举事例进行教学的方法,讨论特定的工程制造实例中怎样解决选材这一问题,尽管当时我们并未意识到这一点。

当我们发现根本没有以我们感兴趣的方法来处理这方面内容的教科书时,我们便单独而又缓慢地开始进行各自的写作。我们的朋友,帝国学院的 D. R. F. West 博士建议我们应当联合起来共同编写。我们非常感谢他的大力帮助,因为不管怎样,我们二人终于各自发现:这项任务只靠一个人是很难完成的。我们的一些同事和朋友,特别是 T. J. Baker, J. P. Chilton, C. Edeleanu, H. M. Flower, D. Harger, I. M. Hutchings, W. T. Norris, G. A. Webster, 以及 D. LL.

Thomas,对本书的各个部分也提出过宝贵意见。

我们还应当感谢我们各自的夫人,感谢她们的鼓励与理解,也感谢她们使我们能够在一家旅馆经常举行的工作会议中一直保持着合作,这家旅馆正好位于我们两家的中间,颇为方便。联合著述也给打字员带来一些困难,而 P. Summerfield 夫人愉快地接受了这项工作,我们对她表示由衷的感谢。感谢 Angela Walker 夫人在临近脱稿时所给予的帮助,还应感谢 B. Barber 先生帮助拍摄了大量的照片。

本书大体以多年前的讲义为基础,但是对有关材料或看法的最初来源未必都能轻易地回想起来。虽然我们自始至终都在设法收集他人的工作,但我们的精力和资料有限,疏漏之处尚希见谅。

F. A. A. 克兰

J. A. 查尔斯

1984年1月

目 录

第一篇 选材背景

第一章 绪论	1
第二章 选材动机	11
2.1 新产品试制	11
2.2 产品开发	19
2.3 有问题的情况	20
2.4 选材的制约因素	20
第三章 选材的成本依据	23
3.1 成本效益和价值分析	25
3.2 成本分析	26
第四章 确定使用要求和失效分析	41
4.1 根据使用要求选材和设计	41
4.2 使用中失效的原因	42
4.3 失效机制	44
4.4 腐蚀	48
第五章 标准规范和质量控制	50
5.1 标准规范的作用	50
5.2 检验与质量控制	53

第二篇 根据力学性能选材

第六章 静强度	56
6.1 金属强度	57
6.2 热塑性塑料的强度	72
6.3 纤维增强复合材料的强度	77
6.4 水泥与混凝土	82

6.5	木材的强度	89
6.6	根据静强度选材的准则	92
第七章	韧性	96
7.1	韧性的意义	97
7.2	韧性评定	100
7.3	断裂力学	103
7.4	整体屈服断裂力学	108
7.5	根据韧性选材	110
第八章	刚度	117
8.1	刚度的重要性	117
8.2	材料的刚度	121
8.3	截面刚度	124
8.4	根据刚度选材的准则	131
8.5	选材准则比较	132
第九章	疲劳	135
9.1	金属疲劳的微观机制	136
9.2	疲劳抗力评定	140
9.3	影响金属疲劳的因素	151
9.4	非金属材料的疲劳	155
9.5	根据疲劳抗力选材	162
第十章	蠕变抗力与耐热性	165
10.1	蠕变的评价	166
10.2	蠕变的本质	174
10.3	抗蠕变合金的发展	179
10.4	工程材料的使用温度	185
10.5	根据蠕变抗力选材	196
10.6	变形机制图	196

第三篇 根据表面耐用性选材

第十一章	根据耐腐蚀性选材	199
11.1	腐蚀过程的本质	199

11.2	根据耐大气腐蚀性选材	215
11.3	根据耐高温氧化性能选材	217
11.4	根据耐土壤腐蚀性选材	219
11.5	根据在水中的耐腐蚀能力选材	224
11.6	化工厂用材的选择	230
11.7	聚合材料的降解	240
第十二章	根据耐磨性选材	243
12.1	磨损机制	243
12.2	环境对磨损的影响	246
12.3	减轻磨损的表面处理	247
12.4	冲刷腐蚀	250
12.5	根据耐冲刷腐蚀性选材	251
第十三章	选材与材料加工的关系	253
13.1	材料加工的目的	254
13.2	工艺选择的背景	259
13.3	金属与合金的铸造	266
13.4	锻造制品	269
13.5	塑料的制造	272
13.6	粉末制品	274
13.7	紧固与连接	279
第十四章	选材程序的规范化	291

第四篇 选材举例

第十五章	飞机结构用材	297
15.1	飞机结构的基本特性	301
15.2	飞机结构的性能要求	303
15.3	高速飞行的要求	314
15.4	飞机结构的待选材料	315
第十六章	船体结构材料	337
16.1	船体骨架	338
16.2	影响船身材料选择的因素”	341

16.3 结构材料	348
第十七章 发动机和发电厂用材	354
17.1 内燃装置	357
17.2 外燃装置	372
第十八章 轴承材料	382
18.1 滚动轴承	382
18.2 滑动轴承	383
第十九章 事例分析	389
19.1 电动链锯	389
19.2 Sturmev Archer 牌自行车加快轴	396
19.3 大功率栅极管	405
参考文献	414
汉英名词索引	424

第一篇 选材背景

第一章 绪 论

在工程制造中,材料的选择应该遵循以下两条重要原则:

(1) 选材应该是设计过程中的一个主要部分。

(2) 选材应做定量计算。

因此,首先要考察设计过程的特点和进行设计的方式。这项工作比较简单。

随后,需要仔细考虑的就是怎样才能完成选材的定量计算。我们先要规定出材料必须具备的全部重要性能并加以评述,然后根据这些性能把可用的材料加以分类。

起初,这些工作只能很粗略地去做,但在考虑一些特殊的应用时,材料工程师必须充分了解材料得以显示其基本性能的特有方式,而且还要极为熟悉材料投入使用前的加工过程对这些性能的影响。

材料性能

可供设计人员进行选择的材料范围很广,相应的性能范围也很广。重要的问题是要认识到,虽然一种材料之所以被选用主要是因为在全部性能要求中,它能更突出地满足对某种性能的要求,但是这种材料总还要具备另外一些辅助的性能,亦即每种实用材料必须具有一定的综合性能。所要求的性能并不一定很多,但要求严格的综合性能则要取决于给定

的用途。这些可以简单地分类于表 1.1.

材料的某些类型可以按照它们所特有的综合性能粗略地加以概括(见表 1.2).

对于表 1.2 这样的概括,总是有些例外的情况,例如,塑料在通常情况下确实很耐用,但有些塑料却容易产生应力腐蚀.一般说来,金属都具有韧性,但工程上之所以广泛使用金属材料,主要还是因为它们大都具有强度与韧性的良好配合.尽管如此,强度和韧性之间通常有着此长彼消的关系,而且有

表 1.1

分 类	典型性能	主 要 用 途
力学性能	强 度 韧 性 刚 性	机械装置; 承载结构
化学性能	抗氧化性 抗腐蚀性	化工设备; 动力装置; 船用结构; 户外结构
物理性能	密 度	航空和航天; 外层空间; 往复式和转动式机械
	导 热 性	动力传输
	导 电 性 磁 性	仪器制造; 电动机械; 电子器件

表 1.2

塑 料	金 属	陶 瓷
强 度 低 可 塑 耐 用 温度敏感 电 绝 缘	强 度 高 刚 性 好 质 韧 导 电 导热性好	强 度 高 质 脆 耐 用 难 熔 电绝缘 导热性差

些钢还很容易产生灾难性的脆性断裂。

表 1.3 概括了材料的一些性能，从中可以看出这些性能适用的大致范围。

在设计过程的初期，可能会出现这样的情况，如果有几种不同的材料都能胜任某一特定的功用，那么就要在它们之间

表 1.3

高强度材料 许用应力(MPa)	铁、钛及过渡金属合金 200—1500	混凝土(受压) 70
低强度材料 许用应力(MPa)	塑料 ~100	Pb 10 铝合金 200 混凝土(受拉) 1.5
刚性材料 弹性模量(GPa)	SiC 450	高强度碳纤维 400 Fe 200 Cu 124
轻质材料 比重	塑料 0.9—2.2	Mg 1.74 Be 1.85 Al 2.7 Ti 4.5 混凝土 2.3
致密材料 比重	Fe 7.8	Ni 8.9 Cu 8.9 Pb 11.3 Ta 18.6 W 19.3
高熔点材料 熔点(°C)	Fe 1537	Ti 1660 Cr 1850 Mo 2625 Ta 3000 W 3380
易熔材料 熔点(°C)	利波维兹合金* 60	Pb 327 Sn 232 Zn 420 Al 660 塑料、玻璃
抗腐蚀材料	Au	Ta Ti Al
导电材料 电阻率[μΩ·cm(20°C)]	Ag 1.4	Cu 1.7 Al 2.8 Ni 7.2 Fe 9.8
廉价材料 价格/t(Fe=1) 价格/m³(Fe=1)	Fe 1 1	混凝土 0.1 0.03 塑料 2—10 0.2—1.3 Pb 3 4 Zn 4.5 4.0 Al 8 3
贵重材料 价格/t(Fe=1)	Cu 12	Ni 40 Sn 44 Ti 94

* 低温易熔合金，如保险丝等。——译者注

加以选择。这就要求果断而又合理地对其重要的性能加以权衡。

如果对某种性能已从基本理论上了解得很清楚了，就比较容易进行这样的权衡，不过并非所有的材料性能都是这样的。例如，衡量金属的可焊性是很重要的，但是却没有一个简单的参数能够做到这一点，因为可焊性只是材料对某种特定工艺的综合效能的度量，而焊接可有多种工艺。即使这样，人们还是做了一些尝试，以使性能的任何差异定量化，因为这是使选材过程合理化的唯一途径。

这样看来就有两类性能参数：

(1) 基本参数。基本参数是衡量材料基本性能的，比如电阻或刚度。它们的优点是一般都能够直接用于设计计算。

(2) 列秩参数。列秩参数一般不能度量简单的基本性能，只能在把材料按先后次序排队时使用。该类参数不能直接用于设计计算，但可用来确定选择的顺序。

使用失效

由于保证产品不在使用过程中失效是工厂的宗旨之一，因此有必要澄清可能的失效机制。概括地说，工程构件的失效不是由于力学方面的原因就是由于某种形式的腐蚀所致。

因力学原因而失效的构件，可能有以下三种主要方式：

(1) 延性破坏。因材料的屈服强度不足以抵抗外加应力而造成的破坏。这里，材料的断裂性能并不是主要的，设计不当或选用数据不当（特别是在高温下工作时）才是失效的常见原因。

(2) 疲劳失效。构件因受交变加载而使疲劳裂纹起始并扩展所造成的失效。

(3) 灾难性的脆性失效。裂纹以不稳定的快速扩展方式造成的失效。如果系统的总能量因裂纹扩展而下降,也就是说,如果因形成两个新表面所增加的能量连同吸收的塑性功小于裂纹扩展而减少的弹性贮能,则已有的裂缝、裂纹或缺陷都要扩展。延性屈服在裂纹钝化和减少弹性应力集中方面的重要性是显而易见的。因此,在选用屈服强度和最大应力无多大差别的材料时,尤应谨慎。

最大抗拉强度的值并不能说明物体将以什么形式失效。很明显,我们希望失效最好是以变形,而不是以灾难性解体的方式发生,这就引出了断裂韧性试验的全部概念:必须知道高强度材料在出现失稳并发生脆性断裂前,可以允许有多大尺寸的内部缺陷,用断裂韧性试验能予确定的这一特征,可以用无损检测的方法加以验证。

因为各种腐蚀机制太多,不能在这里都列举出来,准备在后面详加讨论。一般说来,表面腐蚀问题不大,而象化工厂中的点蚀、锻件中的应力腐蚀以及燃气轮机中的燃灰腐蚀等特殊的腐蚀损伤机制,才会造成较大的灾难。

有关失效的档案资料表明,大部分力学方面的失效是由疲劳机制引起的。总之,疲劳和腐蚀,特别是两者的综合作用,才是引起失效的最主要原因。

成本

就所选材料而言,能得到满意的性能只是材料工程师的任务之一,而以可接受的成本完成选材也是必要的。由于这种原因,为了便于比较成本,有时也将成本并到性能参数中去,例如,表达式 $P_m \rho / \sigma_{YS}$ 反映了承受拉伸载荷的零件的情况,其中 P_m 为单位重量的成本, σ_{YS} 为屈服强度, ρ 为密度。该式给出了单位长度棒材的成本,其截面足以承受单位载荷。这就是

最低成本的准则. 表 1.4 给出了相应于不同加载系统的一些准则的实例, 其中有些材料的选择准则将在后面几章讨论. 上述表达式也可以写成 P_v/σ_{YS} , 其中 P_v 为单位体积的价格. 木材和混凝土便是传统上仅有的按体积出售的材料, 而其他材料均以重量为单位出售. 即便如此, 上式中的 P_v 仍然是

表 1.4

构 件	应力限定准则	变形限定准则
拉杆	$P_m\rho/\sigma_{YS}$	$P_m\rho/E$
受压短柱	$P_m\rho/\sigma_{YS}$	$P_m\rho/E$
内压薄壁管与压力容器	$P_m\rho/\sigma_{YS}$	—
给定速度下贮存最大动能的飞轮	$P_m\rho/\sigma_{YS}$	—
定长定载螺旋弹簧	$P_m\rho/\tau_m$	—
受扭薄壁轴	$P_m\rho/\tau_m$	$P_m\rho/G$
受剪杆与受剪销钉	$P_m\rho/\tau_m$	—
定截面受弯梁	$P_m\rho/\sigma^{2/3}_{YS}$	$P_m\rho/E^{1/2}$
受扭或受弯实心轴	$P_m\rho/\tau^{2/3}_m, P_m\rho/\sigma^{2/3}_{YS}$	$P_m\rho/G^{1/2}, P_m\rho/E^{1/2}$
因弯曲而受有限压缩之长杆	—	$P_m\rho/G^{1/2}, P_m\rho/E^{1/2}$
定宽矩形受弯梁	$P_m\rho/\sigma^{1/3}_{YS}$	$P_m\rho/E^{1/3}$
受压平板	$P_m\rho/\sigma^{1/3}_{YS}$	$P_m\rho/E^{1/3}$
仅受自重加载的平板 (如天花板覆层)	$P_m\rho^2/\sigma_{YS}$	$P_m\rho^{2/3}/E^{1/2}$
测量装置用敏感弹簧件	$P_m\rho G/\tau_m^2, P_m\rho E/\sigma_{SY}^2$	—
定载荷定刚度弹簧	$P_m\rho G/\tau^2$	—
受拉重型长杆	$P_m\rho/(\sigma_{YS}-L_g\rho)$	—
有轴向平衡的内压厚壁管 (如液压缸)	$P_m\rho/(\sigma_{YS}-2p)$	—
无轴向平衡的内压厚壁管	$P_m\rho/(\sigma_{YS}-4p)$	—
同样材料平板间的滚柱	$P_m\rho E^2/\sigma_c^4$	—
同样材料平板间的滚珠	$P_m\rho E^3/\sigma_c^{9/4}$	—

注: g : 重力加速度; L : 长度; p : 内压; ρ : 密度; P_m : 单位重量成本; E : 弹性模量; G : 剪切模量; σ_c : 最大允许赫兹接触应力; σ_{YS} : 抗拉屈服强度; τ_m : 最大允许剪切应力[该表引自《Fulmer Materials Optimizer》, I. 1—6, 承蒙 Fulmer 研究所同意].

个很有意义的参数。

空心件的充填

值得注意的是，以单位体积成本作为选材的唯一准则是常会遇到的。使用要求规定了物体应有的尺寸，而用什么材料则根据该尺寸下成本最低这一原则来挑选，至于材料的力学性能则与此无关。从按钮到水坝，这样的例子很多。但是，有时为了减轻重量和降低成本而将构件做成空心形，这就提出了空心件的充填要求。然后，我们再回过头来考虑力学性能参数，因为空心壳体的厚度必须根据强度和刚度或两者之一来确定。

制造方法

在有竞争的情况下，特别是用很便宜的材料（例如按单位体积计算成本）时，制造成本就可能在决定该项任务的总投资中起重大作用。在决定一个构件用什么材料制造以及如何制造时，可能起关键作用的因素是形状和允许的尺寸公差。所要求的公差水平必须同用适合该材料的制作方法能容易达到的公差相一致，否则就会增加成本，例如要铸造一个粗笨的球墨铸铁风嘴帽供生产铅和锌的鼓风炉采用，此时必须使喷嘴周围的浇道尺寸高度一致，才能得到相宜的浇注流量，但因很难以要求的精度将型芯定位，同时也难于保证型芯在浇铸过程中毫无移动，这就必然导致铸件废品率的增高。

表面耐久性

表面耐久性（亦即抗腐蚀能力、抗表面磨蚀能力或耐磨性）的要求，有时对决定最终选材非常重要，特别是对于同化学浸蚀有关的情况更是如此，通常，这样的考虑都是有条件

的,它只决定着初步的选择范围。进一步考虑,选材的范围可能包括复合结构的情况,即基体材料用抗腐蚀或耐磨损的表面材料涂覆,或者以改变表面稳定性的方式进行化学处理。

这里有个例子,就是制作棘轮和棘爪一类的零件时,在工具钢与表面硬化或表面热处理钢之间如何进行挑选。这里,对固有强度较低但容易成型且价格低廉的材料,可借助局部渗碳和热处理的方法造成硬表面。这个问题将在后面 19.2 节再做深入探讨。该节中的零件广泛利用了表面处理的钢。在化工和食品工业中也有很多有趣的实例,这些部门经常采用耐蚀衬里的设备。

物理性能

当然,选材还有许多情况主要是依据所需的物理性能。虽然本书引用了一些实例,如导电体的情况(6.1 节)和大功率栅极管零件(19.3 节)等,但本书的重点仍是侧重于考虑结构工程和机械工程方面的问题。在物理性能方面,电子器件和敏感元件系统等(其中很多可以称为显微复合材料)所用材料体系的开发是一个前途广阔并正在迅速发展的领域。

未来趋势

材料的使用形式正在不断发生变化,而且变化的速度也在不断加快。就石器时代,青铜器时代和铁器时代持续的时间而论都是以上千年计算,而现代材料发展的动向却是几十年就要一变;决定某种材料能否大规模使用的准则也可能要变化。过去,这类准则只包括基本原材料的可利用性和化学家、冶金学家与工程师将这些材料以可接受的成本制成有用物件时所具备的工艺技巧,因此就导致了现在最重要的材料仍然要以钢、混凝土和木材为主的局面,不过,正在持续增长着