

■机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

金属材料

宋余九 主编

设计·选用·预测

机械工业出版社

金属材料的设计·选用·预测

宋余九 主编

宋余九 胡志忠 宋 俐 编著

机械工业出版社

本书是作者根据多年从事金属材料教学和科研工作积累的资料而编写的。以材料的设计、选用、预测为思路,汇集了国内外相关的新成果,较深入地分析了材料成分,组织结构与性能间关系,为按产品的使用性能进行材料的定量设计和选用提供优化方案和预测思路。可供从事金属材料工作的科技人员及有关专业的硕士生,博士生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料的设计、选用、预测/宋余九主编. -北京:
机械工业出版社, 1998.6
ISBN 7-111-06053-9

I. 金… II. 宋… III. 金属材料 IV. TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第28354号

出版人: 马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑: 韩会民 版式设计: 张世琴 责任校对: 唐海燕
封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年10月第1版第1次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·20.5印张·450千字

0 001—3 000册

定价: 34.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

进入 20 世纪 50 年代以来,材料工作者开始考虑按产品使用性能设计与选用金属材料。与机械产品结构设计一样,按使用要求对材料的化学成分和组织结构进行设计、计算,根据材料成分和组织结构进行性能预测,将材料的研制与生产推向更科学化及定量化。

材料设计比产品结构设计复杂得多,涉及基础科学和技术科学的许多领域,依靠多学科共同努力方能实现。材料设计与选用是根据已有的数据、资料进行定性或半定量估算,进行实验验证及生产考验,最后确定最佳方案。

本书是以结构用金属材料的设计、选用及预测为主线,力求反映国内外新成果和新动向,把理论和实际有机结合,以此选择内容,安排章节。改变了教科书式的叙述体系,扩大专业领域。全书共 10 章,介绍了金属材料的成分、组织、性能的设计,选用和预测原则。所选内容较新颖、实用,也是作者多年教学和科研工作积累的资料。对高校师生,科技人员的知识更新和提高有参考价值。书中第 7 章为西安理工大学宋俐副教授执笔,第 8 章为西安交通大学胡志忠副教授执笔,其余为主编执笔。

全书经太原工业大学侯增寿教授审阅,致诚挚的谢意。

作者

1997 年 6 月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 材料设计与选用依据	2
1.1.1 按产品使用性能设计与选用材料	2
1.1.2 正确运用试验结果与数据	3
1.1.3 产品信息反馈 (失效分析, 备件消耗, 市场信息)	4
1.2 材料设计与选用内容	6
1.2.1 化学成分及组织结构设计	6
1.2.2 材料的加工工艺设计	7
1.3 材料经济成本分析	8
1.3.1 材料的成本	9
1.3.2 影响材料成本的因素	9
1.4 材料设计方法	10
1.4.1 多学科合作	10
1.4.2 用计算机进行设计	10
主要参考文献	14
第 2 章 金属的结构与组织	16
2.1 纯金属的结构与微观组织	16
2.2 金属的晶界	18
2.2.1 晶界结构	18
2.2.2 小角晶界	19
2.2.3 大角晶界	22

2.3 合金相结构	25
2.3.1 固溶体	26
2.3.2 有序固溶体	33
2.3.3 金属化合物	37
2.4 合金的组织	48
2.4.1 相的数量	48
2.4.2 相的尺寸	49
2.4.3 相的形态与分布	49
主要参考文献	49
第3章 金属的凝固与铸造材料	52
3.1 金属凝固理论	52
3.1.1 纯金属的凝固	52
3.1.2 合金的凝固	61
3.1.3 铸锭宏观组织及其影响因素	85
3.1.4 铸造缺陷	87
3.2 铸钢材料设计与选用	93
3.2.1 引言	93
3.2.2 铸造碳钢	95
3.2.3 低合金铸钢	102
3.2.4 高合金铸钢	103
3.3 铸铁材料设计与选用	108
3.3.1 普通灰铸铁	108
3.3.2 球墨铸铁	123
3.3.3 可锻铸铁	132
3.4 非铁合金铸造材料设计与选用	137
3.4.1 铸造铝合金	137
3.4.2 铸造铜合金	150
主要参考文献	159
第4章 金属的塑性变形及压力加工材料	161

4.1 塑性变形理论	161
4.1.1 单晶体塑性变形	161
4.1.2 多晶体塑性变形	161
4.1.3 形变硬化	170
4.1.4 塑性变形后的组织结构与性能	173
4.2 变形金属的回复与再结晶	175
4.2.1 回复	176
4.2.2 再结晶	177
4.2.3 晶粒长大	181
4.2.4 再结晶图	188
4.2.5 动态再结晶	188
4.3 织构	191
4.3.1 可变织构	191
4.3.2 再结晶织构	195
4.3.3 织构的利与弊	196
4.4 压力加工钢的设计与选用	198
4.4.1 普通碳素结构钢	198
4.4.2 低合金钢	205
4.4.3 机械制造用钢	236
4.5 非铁合金形变材料的设计与选用	260
4.5.1 形变铝合金	260
4.5.2 形变铜合金	264
主要参考文献	267
第5章 固态相变与金属热处理	271
5.1 扩散型固态相变	272
5.1.1 过饱和固溶体分解	272
5.1.2 共析转变	283
5.1.3 贝氏体转变	292
5.2 无扩散型固态相变	299

5.2.1 马氏体相变特点	299
5.2.2 马氏体相变动力学	304
5.2.3 马氏体相变晶体学	311
5.2.4 马氏体组织形态与力学性能	318
5.3 产品热处理设计	325
5.3.1 热处理的质量效应	326
5.3.2 热处理产品的材料设计与选用	326
主要参考文献	335
第6章 金属材料强化机理与途径	337
6.1 固溶强化	337
6.1.1 无序固溶体的固溶强化	337
6.1.2 有序固溶体的固溶强化	343
6.2 第二相强化	345
6.2.1 沉淀强化(时效强化)	345
6.2.2 分散强化	352
6.2.3 复相强化	354
6.3 细晶粒强化	355
6.3.1 晶粒尺寸与材料强度的关系	355
6.3.2 细晶粒材料的塑性及韧-脆转化温度	357
6.3.3 晶粒尺寸的控制	358
6.4 位错强化	360
6.4.1 流变应力与位错密度的关系	360
6.4.2 位错强化机制	361
6.5 综合强化	361
6.6 复合材料及其强化理论	363
6.6.1 复合材料特点	364
6.6.2 复合材料的种类	365
6.6.3 复合材料性能及设计	371
主要参考文献	378

第 7 章 材料的强度与断裂判据	381
7.1 弹性变形	381
7.1.1 弹性变形时的应力与应变	381
7.1.2 弹性模量	386
7.1.3 弹性滞后	392
7.2 塑性变形	394
7.2.1 屈服强度	394
7.2.2 材料的塑性	399
7.2.3 静拉伸时的颈缩及抗拉强度	403
7.2.4 断裂强度与静韧度	404
7.3 断裂	406
7.3.1 断裂分类	406
7.3.2 体心立方金属的韧-脆转变	417
7.4 断裂韧度	421
7.4.1 线弹性断裂韧度	422
7.4.2 弹塑性材料的断裂韧度	433
主要参考文献	437
第 8 章 交变载荷下材料的性能与寿命预测	439
8.1 概述	439
8.2 光滑试样的疲劳极限	440
8.2.1 疲劳极限与抗拉强度的关系	441
8.2.2 疲劳极限与屈服强度的关系	442
8.2.3 疲劳极限与强度或硬度及硬化指数的关系	443
8.3 稳态疲劳裂纹扩展门槛	444
8.3.1 应力比对稳态门槛的影响	445
8.3.2 稳态门槛与强度的关系	448
8.3.3 稳态门槛与塑性的关系	449
8.3.4 稳态门槛与强度和塑性的关系	450
8.4 长疲劳裂纹的扩展特性	452

8.4.1	疲劳裂纹扩展速率与强度的关系	454
8.4.2	疲劳裂纹扩展速率与强度和韧度的关系	454
8.4.3	疲劳裂纹扩展速率与强度、塑性和韧度的关系	454
8.5	短裂纹的疲劳特性	456
8.5.1	长、短裂纹疲劳门槛之间的关系	458
8.5.2	短裂纹疲劳门槛和固有门槛的关系	459
8.5.3	Frost 常数和稳态门槛的关系	460
8.6	显微裂纹疲劳门槛与力学性能的关系	463
8.6.1	显微损伤裂纹的疲劳极限与硬度的关系	464
8.6.2	最大非损伤裂纹尺寸与硬度的关系	465
8.6.3	高强度钢的疲劳强度数据分析	466
8.6.4	显微裂纹的萌生尺寸与力学性能的关系	470
8.7	疲劳应力集中系数	472
8.7.1	钝缺口失效疲劳极限与强度的关系	474
8.7.2	钝缺口失效疲劳极限与硬化指数的关系	475
8.7.3	尖缺口裂纹扩展疲劳极限与稳态门槛的关系	481
8.7.4	小缺口裂纹扩展疲劳极限与 frost 常数的关系	482
8.7.5	从钝缺口到尖缺口转变的临界点	482
8.7.6	裂纹萌生的疲劳极限	484
8.7.7	材料的固有门槛和裂纹萌生门槛	490
8.7.8	非扩展裂纹	490
8.8	疲劳寿命预测	495
8.8.1	无限寿命与力学性能的关系	495
8.8.2	有限寿命与力学性能的关系	496
8.8.3	疲劳裂纹扩展寿命与力学性能的关系	500
8.8.4	疲劳裂纹萌生寿命与力学性能的关系	501
8.9	张应力下的疲劳断裂机制与力学性能的关系	507
8.9.1	疲劳断裂机制图的研制	510
8.9.2	疲劳裂纹扩展机制图	512

8.9.3 近门槛区的疲劳断裂机制图	514
8.9.4 低周疲劳断裂机制图	515
8.10 剪切应力下的疲劳断裂机制与 力学性能的关系	517
8.10.1 II型剪切疲劳裂纹扩展模型	517
8.10.2 III型剪切疲劳裂纹扩展模型	519
8.10.3 I、II和III型疲劳断裂机制的比较	523
8.10.4 扭转疲劳断裂机制图	523
主要参考文献	526
第9章 材料在腐蚀介质中的强度	531
9.1 应力腐蚀断裂	531
9.1.1 产生应力腐蚀的条件	531
9.1.2 应力腐蚀断裂特点	532
9.1.3 应力腐蚀试验及评定指标	532
9.1.4 环境介质作用	535
9.1.5 材料化学成分、组织、性能与应力腐蚀 断裂的关系	542
9.1.6 应力腐蚀断裂机理	546
9.2 氢致损伤	550
9.2.1 金属中氢的来源及氢损伤类型	551
9.2.2 氢腐蚀	552
9.2.3 氢致断裂(氢脆)	557
9.3 腐蚀疲劳	566
9.3.1 概述	566
9.3.2 腐蚀疲劳电化学行为	568
9.3.3 腐蚀疲劳断裂机理	572
9.3.4 影响腐蚀疲劳的因素	579
9.4 提高应力腐蚀、氢脆及腐蚀疲劳强度 的途径与寿命预测	589

9.4.1 提高环境介质下材料强度的途径	589
9.4.2 应力腐蚀与腐蚀疲劳寿命评价与预测	591
主要参考文献	595
第 10 章 材料的高温及低温强度	600
10.1 高温强度	600
10.1.1 高温短时拉伸强度	601
10.1.2 蠕变及蠕变断裂	604
10.1.3 高温疲劳	619
10.2 低温强度	629
10.2.1 低温下材料的形变抗力	630
10.2.2 低温下的断裂	631
10.2.3 低温脆化及脆断机理	638
主要参考文献	639

第1章 绪 论

金属是人类生产与生活中使用的主要材料之一。在过去漫长的岁月中，研制与使用材料主要凭经验。一种新材料的诞生需要进行反复的试验，从中选出最佳方案，才能进行生产应用。例如一个新钢种从研制到正式生产，一般需要5~10年。这种方法不能适应社会经济迅速发展的需要。

进入20世纪50年代以来，由于量子物理、量子化学、化学键、固体物理、材料科学、材料工程等基础科学和技术的长足进步，对于材料的组织结构与性能关系有了深入了解；材料在生产、加工过程中的组织结构变化也有了全面认识；这些都为材料从经验设计时期进入科学的设计与选用时期奠定了基础。人类在研制与使用材料过程中积累了大量经验与结果，特别是采用计算机等先进手段以来，对大量分散的数据进行归纳、整理，为材料的设计、选用与预测提供了资料和方法。材料的生产、加工手段不断更新，新技术、新工艺不断涌现，为新材料诞生创造了有利条件。

金属材料种类繁多，其中做机械零件及工程结构用的数量最大，品种最多，属量大面广材料。结构用金属材料应具有足够的力学性能和良好的工艺性能以及低廉的价格。本书主要讨论结构用金属材料的化学成分，组织结构，力学性能的设计、选用与预测。为材料进入设计时期添砖加瓦。

1.1 材料设计与选用依据

材料设计主要依据产品使用性能，已有的试验研究结果和产品运行中所积累的经验。

1.1.1 按产品使用性能设计与选用材料

结构材料的使用性能主要是力学性能。零部件在使用过程中承受各种形式的外力作用，要求材料在规定期限内，不超过允许的变形度或不破断。材料的力学性能与其它物理、化学性能不同，是与内部组织结构有密切关系。所以材料设计时应考虑材料力学性能及力学性能的原子及分子效应^[1]，例如晶体结构和缺陷，微观组织等。

强度是材料的基本力学性能。传统上零部件是按强度设计的，不考虑或很少考虑材料的塑性、韧度，以致引起一些灾难性事故后，方引起人们在设计时以强度为主前提下，注意材料的塑性、韧度等综合力学性能。

以强度为产品设计依据时，应按零部件实际要求选用材料，例如轧钢机架在具有足够强度的条件下，还要满足特定尺寸、形状和足够的重量等要求，以保持设备稳定性。所以这类产品可采用中低强度材料。航天、航空结构和交通运输工具应当尽量缩小零件尺寸，降低重量，应采用高强度材料。

承受拉伸载荷的零部件，表层及心部应力分布均匀，材料应具有均一组织和性能，所选用的钢应有良好的淬透性。承受弯曲及扭转载荷的零部件，表层及心部应力相差较大，为提高表层强度，可选用淬透性较低的钢，进行表面热处理或化学热处理。

承受交变载荷的零部件，除要求材料具有高的疲劳极限

外，缺口敏感性十分重要。高温下工作的零部件，应注意材料的组织稳定性。低温下工作的零部件，必须考虑材料的韧脆转化温度。在腐蚀性介质中工作的零部件，材料的抗蚀能力，氢脆敏感性，应力腐蚀开裂倾向，腐蚀疲劳强度等都是材料设计的重要内容。

1.1.2 正确运用试验结果与数据

目前世界上许多国家都颁布了大量试验研究结果与数据，为材料设计与选用创造了方便条件。

值得注意的是技术资料和数据是在规定的试验条件下得到的，与实际产品服役条件相差很大。利用同一种材料做成的零件，其尺寸与试样相差越大，性能相差也越大。

图 1-1 是抗拉强度 (σ_b) 及断面收缩率 (ψ) 与试样直径 (d) 的关系曲线^[2]。试样尺寸增大，性能显著降低。

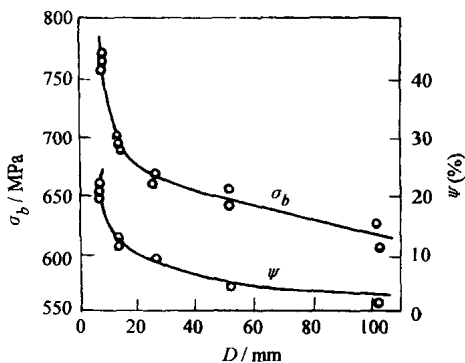


图 1-1 缺口圆柱试样，试样直径与 σ_b 及 ψ 的关系

金属材料在冶炼、压力加工、热处理等生产过程中，不可避免地会出现化学成分波动，温度波动等，这些因素对同一材料带来不同结果。图 1-2 是 1035 钢的化学成分波动与 σ_b ， σ_s 及 δ 的关系^[3]。

经压力加工材料存在各向异性，图 1-3 是 1050 钢锻造毛坯（车轮）的各向异性。材料 843℃ 淬火，538℃ 回火。

切向、径向及轴向试样性能相差很大^[3]。

1.1.3 产品信息反馈（失效分析，备件消耗，市场信息）

各种机械结构的寿命主要受两大因素的影响，一是设计制造因素，二是运行维修因素。生产实际中不少零部件尽管设计是正确的，但是在制造加工过程中仍然可能发生影响产品质量的情况。诸如铸造时产生偏析、疏松、夹渣；压力加工时产生夹层、开裂；焊接时产生未焊透；热处理时产生变形、开裂、氧化、脱碳；以及磨削过程中产生磨裂等缺陷，都直接影响产品质量与寿命。

例如某厂生产的轧钢机大功率减速轴，传动功率近 3000kW，规定寿命 15 年，用 40Cr 钢调质处理。运行二年时发生断轴事故。失效分析发现，轴

的断口为疲劳断裂，约 50mm 宽的外圈为裂纹扩展区， $\phi 300\text{mm}$ 以内区域为瞬断区。经校核设计时疲劳强度远高于实际运行强度。40Cr 钢化学分析后，成分均在规定的范围之内。从断轴的不同截面取样，进行拉伸试验及进行金相检验，结果表明，脆性夹杂物为 3.5 级及 4 级，超过规定标准。金相

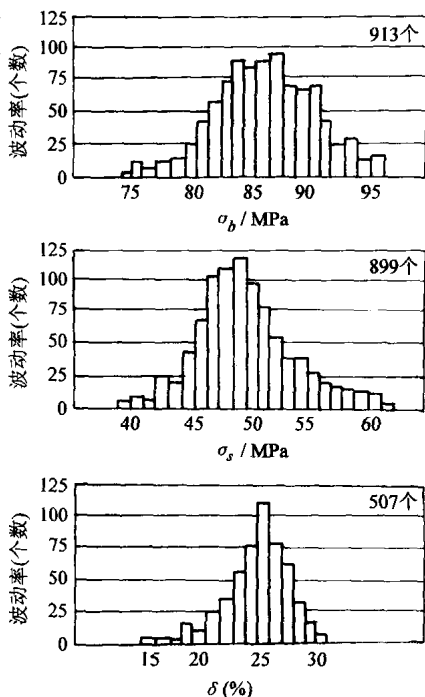


图 1-2 1035 钢化学成分波动与 σ_b , σ_s 及 δ 的关系

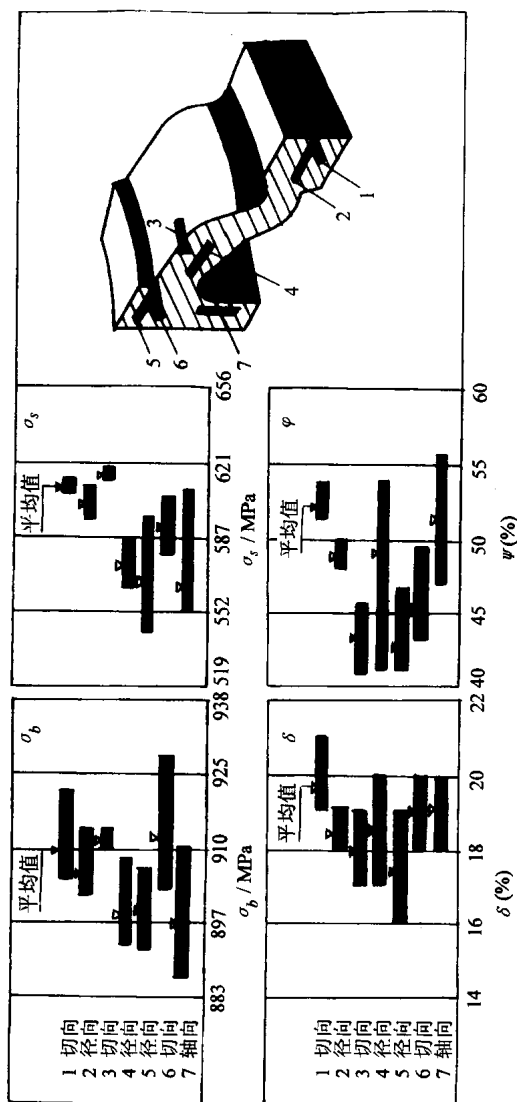


图 1-3 1050 钢锻造毛坯(车轮)的各向异性