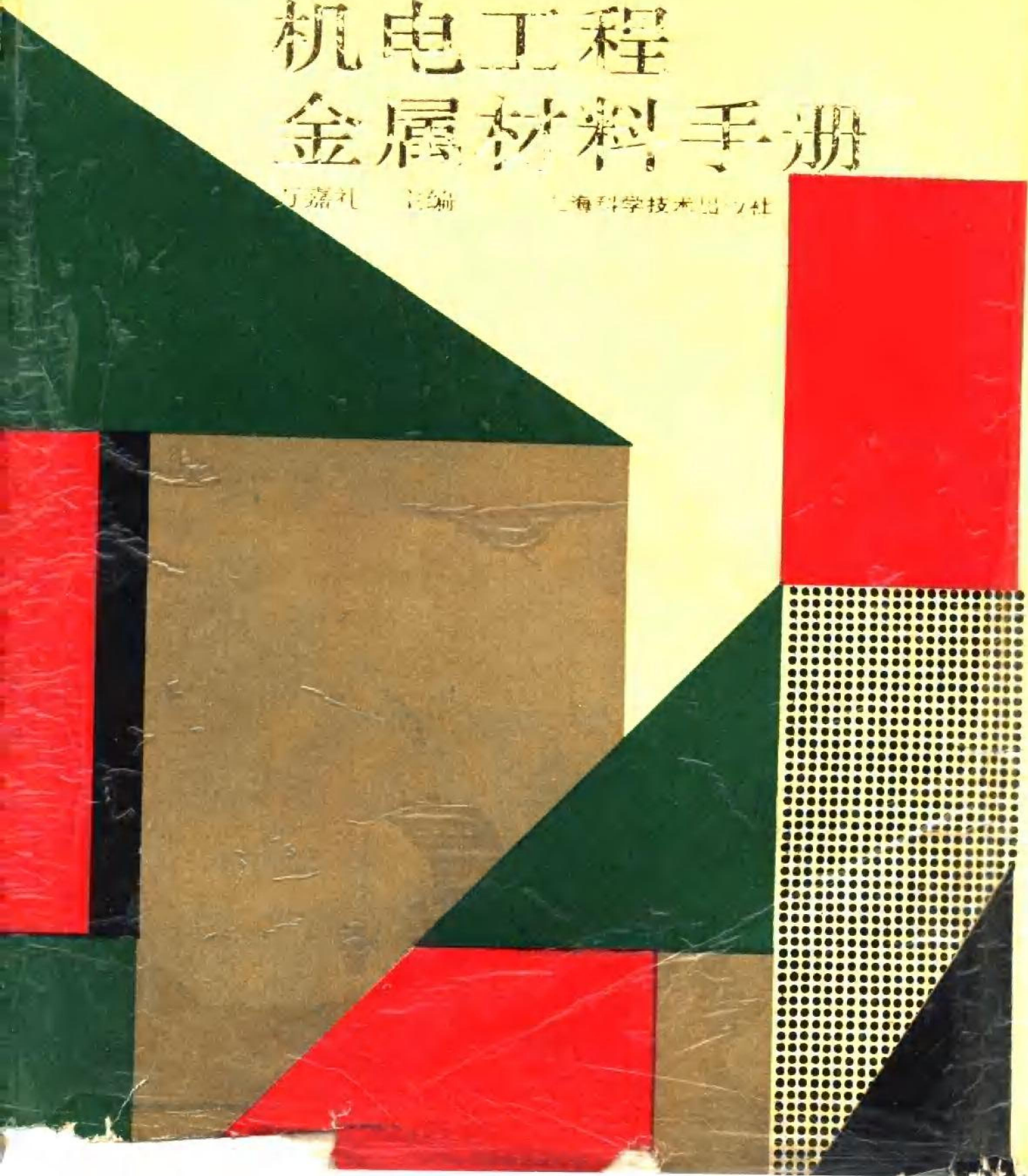


机电工程 金属材料手册

万嘉礼 主编

上海科学技术出版社

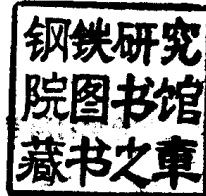


TG 14-62
W 24

C.1

机 电 工 程 金 属 材 料 手 册

万嘉礼 主编



22054c

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书是机电工程金属材料的综合性工具书。书中根据国内多年来科研、设计和生产的经验以及对引进国外先进技术的消化,参考了国外标准和资料编写而成。全书共分十一章。第一章是金属材料的性能及评定。第二章以锅炉、压力容器、汽轮机、电机为例,较详细介绍了各主要零部件的特点和用钢要求。第三章到第十一章按钢种、牌号分类,系统介绍了金属材料的技术条件、有关的国外先进标准、加工工艺和性能。对国外大型发电设备的主要用钢也作了较详细的介绍。

本书可供机电、动力工程、电站和工业锅炉、汽轮机、电机、化工、压力容器、冶金、电力等行业参考,也可作为高等院校有关专业教学参考书。

机电工程金属材料手册

万嘉礼 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 常熟文化印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张69.75 插页4 字数1,687,000

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数 1—5,000

ISBN 7-5323-1108-2/TM·2

定价: 24.50 元

序

《机电工程金属材料手册》是《汽轮机·锅炉·发电机金属材料手册》的修订增补版。初版在1973年1月发行3.8万册，同年9月重印5千册，不久也售完，读者反映较好。上海科学技术出版社多次提出修订再版，因为种种原因，一直下不了这个决心。

1980年初万嘉礼同志承担了《手册》的修订任务。新版的内容多次征求所内外有关同志的意见，并经讨论，归纳起来可以集中为三条：一、以发电设备为主，也要适应压力容器工业锅炉和其他机电工业，以满足改革开放形势下各工厂的需要。二、内容尽可能新，资料要包括这些年技术引进后，国内消化吸收复核的成果。三、数据要筛选，要给设计人员提供可用的资料。经过编者几度寒暑的艰辛努力，各兄弟单位的鼎力支持，《手册》的内容基本上满足上述要求。书名也改为《机电工程金属材料手册》。全书请上海发电设备成套设计研究所副总工程师吴祖乾同志主审。

建国以来，我国发电设备制造业有了长足的发展，为国家的电力建设作出了重要贡献。到1989年底，全国发电设备装机容量已达1.2亿千瓦。其中，国产机组占80%。我国已能生产以30万、60万千瓦机组为代表的具有80年代国际先进水平的发电设备，并打入国际市场。到2000年，我国发电设备的装机容量要达到2.4至2.6亿千瓦。发电设备制造业所取得的成就与我国电站材料的发展有密切关系，本书中所列的金属材料，从技术上来说，完全可以立足国内。所以《手册》的出版应当看成是建国以来，发电设备材料经验总结的重要部分。

目前发电设备金属材料的品种、规格、质量、产量都不能满足电站发展的需要。我们高兴地获悉，国务院已批复冶金工业部对生产电站用钢企业的改造计划，以便大口径钢管、锅炉厚板、大规格型钢、汽轮机用叶片钢等立足国内。《手册》的出版可能对用钢国产化和系列化有促进。

《手册》从字数上看，为原版的4倍，比过去更丰富更实用。书中所引用的国家标准，也已采用最新的1989年版本。在资料的取舍上也作了反复比较与认真核对，应当说，编者的态度是严肃的。《手册》应市时，我国自行设计制造的秦山30万千瓦核电站已经投运，上海石洞口电厂30万千瓦超临界机组也将发电。《手册》中不少材料可用于核电与超临界机组。

我相信，《手册》的出版和旧版时一样，将会受到读者的欢迎。

中国机械工程学会材料学会理事 孙惠庭 高级工程师(研究员)
中国动力工程学会材料学会主任

1990年1月于上海

编者说明

为适应我国机电工业的发展,进一步推广合金结构钢、热强钢的研究成果,提供常用钢种的综合性能,介绍引进国外大型火电设备用钢,编写了这本《机电工程金属材料手册》。

机电工程设备所使用的金属材料品种繁多,从碳素钢、合金结构钢、热强钢、高温合金、焊接材料到有色金属。以发电设备为例,它的特点是高温、高压、长期和变负荷运行,几乎采用了所有种类的机电工业常用金属材料,具有很大的代表性。随着对外开放、技术引进和外向型经济的发展,除了国产材料外,还采用了不少进口材料和国外牌号,这些都增加了机电工程设备材料种类和制造厂生产工艺的复杂性,也给使用厂运行、维修带来新的课题。

因此,本书内容力求丰富、实用,以满足科研、设计、工艺制造、运行维修等部门的不同需要。列入本书的钢号有目前制造厂常用的成熟钢种,有新研制的并有一定运行经验或经过鉴定的钢种,有国外引进的钢种,也有目前虽不常用,但过去制造已投入运行的钢种。

本书第一章“材料性能及评定”介绍了金属材料的性能检测及评定方法,重点介绍了高温长期性能(蠕变、持久强度、松弛)、断裂力学、高周和低周疲劳、应力腐蚀、多次冲击和系列冲击试验、高温抗氧化性和氧化参数法等。第二章以锅炉、压力容器、汽轮机、电机为例,较详细地介绍了各主要零部件如管、板、汽轮机叶片、紧固件、大型锻件、铸件等十四种部件的特点、用钢要求、材料工艺及检验,给出了各零部件用钢的标准及国外先进技术条件。从第三章到第十一章,按钢种、牌号分类进行介绍。各钢号技术要求根据国家标准、部标准或有关工厂标准,并尽可能给出相应的国外先进标准。钢种性能资料引自国内外研究报告及各种出版物。应该指出的是,除有关标准必须遵守外,书中给出的性能资料都是材料在某一特定状态下的性能数据,仅供科研、设计、制造、工艺、运行和检修部门参考。有关标准应按最新颁布的版本执行。本书在付印前已尽可能更换列入了一些最新标准。

关于计量单位,本书采用国际单位制,按照国家标准GB3100-86《国际单位制及其应用》执行。过去,我国计量单位不统一,米制、市制、英制和国际单位制同时并用,如应力采用 kgf/mm^2 、冲击值采用 $\text{kgf}\cdot\text{m}$ 、热量采用 cal 等。过去颁布的国家标准、部标准和企业标准没有采用国际单位制,这些标准目前有的尚未进行修订。过去的大量试验数据也是以米制计量单位表示。因此本书对这些非法定计量单位进行了转换。

本书是以《汽轮机·锅炉·发电机金属材料手册》为基础,重新进行调整、改写、补充而成。在编写过程中,得到有关工厂和研究单位的大力协助,在此一并致谢。

对于书中的错误和不足之处,希望得到批评指正。

本书由机械电子工业部上海发电设备成套设计研究所副总工程师、高级工程师(研究员)吴祖乾主审。

机械电子工业部上海发电设备成套设计研究所 万嘉礼

1989年12月

符号名称表

符 号	名 称	单 位
A	奥氏体	
A _{c1}	加热下临界温度	℃
A _{c3}	亚共析钢加热上临界温度	℃
A _{cm}	过共析钢加热上临界温度	℃
A _{r1}	冷却下临界温度	℃
A _{r3}	亚共析钢冷却上临界温度	℃
AKV	V型缺口夏比冲击试样冲击吸收功	J
a _{KV}	V型缺口夏比冲击试样冲击韧性值	J/cm ^{3/2}
a _K 或a _{KU}	梅氏试样冲击韧性值	J/cm ^{3/2}
B	贝氏体	
B	磁感应强度	T
C	碳化物	
C _p	定压比热容	J/(kg·K)
d	对水相对密度	
d _B	布氏硬度压痕直径	mm
E	弹性模量	MPa
F	铁素体	
FAIT	断口形貌转变温度	℃
G	切变弹性模量	MPa
H	磁场强度	A/m
HB	布氏硬度	
HS	肖氏硬度	
HV	维氏硬度	
HRA	洛氏A标度硬度	
HRB	洛氏B标度硬度	
HRC	洛氏C标度硬度	
HK	克努普氏(Knoop)显微硬度	
J _{1c}	I型加载下的临界J积分	N/mm
K _I , K _{II} , K _{III}	裂纹在I型(拉伸)、II型(面内剪切)和III型(面外剪切)下的应力强度因子	N/mm ^{3/2}
K _{1c}	I型加载下的临界应力强度因子	N/mm ^{3/2}
K _{Iscc}	应力腐蚀临界应力强度因子	N/mm ^{3/2}
K _Q	条件断裂韧性	N/mm ^{3/2}
ΔK _{th}	疲劳裂纹不扩展的界限应力强度因子幅度	N/mm ^{3/2}
M	马氏体	
M _s	马氏体转变开始温度	℃
N	交变应力循环周次	次
NDT	无塑性转变温度	℃
P	珠光体	
R	半径	
1/2R(或1/4R)	离表面1/2R(或1/4R)处	
S	板或空心零件壁厚	mm
1/2S	1/2壁厚处	

(续)

符 号	名 称	单 位
α	α 相 线膨胀系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
β	β 相	
γ	γ 相(奥氏体)	
γ'	γ' 相	
δ	δ 相	
δ	延伸率	%
δ	对数振动衰减率	
δ_c	临界裂纹尖端张开位移	mm
ε	应变	%
λ	导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
μ	磁导率 (真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$)	H/m
	泊松比	
ρ	电阻率	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
σ	应力	MPa
σ_b	抗拉强度	MPa
σ_s	屈服点	MPa
$\sigma_{0.2}$	残余应变为0.2%时的应力, 称为屈服强度	MPa
σ_{bb}	抗弯强度	MPa
σ_e	弹性极限	MPa
σ_p	比例极限	MPa
σ_{bc}	抗压强度	MPa
$\sigma_{10^5}, \sigma_{10^4}, \sigma_{10^3}, \sigma_{10^2}$	依次为100000, 10000, 1000, 100小时的持久强度	MPa
$\sigma_{1 \cdot 10^{-5}}, \sigma_{1 \cdot 10^{-4}}, \sigma_{1 \cdot 10^{-3}}, \sigma_{0.2 \cdot 10^{-4}}$	蠕变强度, $\sigma_{1 \cdot 10^{-5}}$ 指蠕变第二阶段引起 $1 \cdot 10^{-5}\%$ /小时变形速度的应力, $\sigma_{0.2 \cdot 10^{-4}}$ 指蠕变第二阶段引起 $0.2 \cdot 10^{-4}\%$ /小时变形速度的应力, 余类似。	MPa
$\sigma_{1/100000}, \sigma_{1/10000}, \sigma_{1/1000}, \sigma_{0.2/100000}$	蠕变强度, $\sigma_{1/100000}$ 指在100000小时内引起总变形量为1%的应力, $\sigma_{0.2/100000}$ 指100000小时内引起总变形量为0.2%的应力, 余类似	MPa
σ_{-1}	光滑试样对称循环弯曲疲劳极限	MPa
σ_{-1K}	缺口试样对称循环弯曲疲劳极限	MPa
τ	剪切应力	MPa
τ_b	抗剪强度	MPa
τ_{-1}	光滑试样对称循环扭转疲劳极限	MPa
τ_{-1K}	缺口试样对称循环扭转疲劳极限	MPa
ϕ	直径	mm
ψ	断面收缩率	%

目 录

序

编者说明

符号名称表

第一章 材料性能及评定 (1)

- 一、断裂韧性 (1)
- 二、应力腐蚀及临界应力强度因子 K_{ISCC} (4)
- 三、多次冲击试验 (5)
- 四、系列冲击试验和断口形貌转变温度 FATT (5)
- 五、落锤试验和无塑性转变温度NDT (6)
- 六、应变时效敏感性 (10)
- 七、疲劳(高周疲劳) (10)
- 八、低周疲劳 (12)
- 九、腐蚀疲劳 (13)
- 十、热疲劳 (13)
- 十一、蠕变曲线 (14)
- 十二、蠕变强度 (15)
- 十三、持久强度 (15)
- 十四、持久塑性 (17)
- 十五、抗松弛性 (17)
- 十六、减振性 (18)
- 十七、抗氧化性 (19)
- 十八、金属高温氧化参数方程和氧化参数图 (21)

第二章 锅炉、压力容器、汽轮机、电机

按零部件对用钢的要求 (23)

- 一、钢管 (23)
 - (一) 一般要求 (23)
 - (二) 锅炉钢管常用材料 (24)
 - (三) 许用应力 (28)
 - (四) 中国钢管 (52)
 - (五) 美国钢管 (61)
 - (六) 日本钢管 (67)
 - (七) 联邦德国钢管 (76)
 - (八) 苏联钢管 (84)

- (九) 锅炉钢管的检验 (86)

二、锅炉和压力容器钢板 (88)

- (一) 一般要求 (88)
- (二) 汽包钢板常用材料 (89)
- (三) 锅炉和压力容器钢板的许用应力和低周疲劳特性 (92)
- (四) 中国钢板 (97)
- (五) 联邦德国钢板 (105)
- (六) 美国钢板 (113)
- (七) 日本钢板 (116)
- (八) 苏联钢板 (117)
- (九) 锅炉钢板的检验 (119)

三、汽轮机叶片 (120)

- (一) 一般要求 (120)
- (二) 常用叶片材料 (122)
- (三) 中国叶片材料 (127)
- (四) 苏联叶片材料 (141)
- (五) 叶片毛坯制造 (142)
- (六) 叶片表面强化 (143)
- (七) 叶片材料及成品质量检查 (145)

四、紧固件 (145)

- (一) 一般要求 (145)
- (二) 常用紧固件材料 (147)

五、汽轮机转子和主轴 (160)

- (一) 一般要求 (160)
- (二) 生产工艺 (161)
- (三) 常用转子和主轴材料 (164)
- (四) 中国汽轮机转子和主轴用真空处理的碳钢和合金钢锻件标准JB1265-85 (165)
- (五) 美国汽轮机转子和主轴用真空处理的碳钢和合金钢锻件标准ASTM A470 (170)
- (六) 转子和主轴锻件检验 (171)

六、汽轮机转子轮盘及叶轮 (172)

- (一) 一般要求 (172)
- (二) 加工工艺 (173)
- (三) 中国汽轮机转子轮盘及叶轮用真空处理合金钢锻件技术条件JB1266-85 (174)

(四) 美国汽轮机转子轮盘及叶轮用真空处 理合金钢锻件标准ASTM A471.....	(176)
(五) 叶轮锻件检验.....	(178)
七、汽轮发电机转子.....	(179)
(一) 一般要求.....	(179)
(二) 生产工艺.....	(179)
(三) 中国发电机转子用真空处理钢锻件标 准JB1267-85.....	(180)
(四) 美国发电机转子用真空处理钢锻件标 准ASTM A469.....	(183)
(五) 汽轮发电机转子锻件检验.....	(184)
八、汽轮发电机无磁性护环.....	(185)
(一) 一般要求.....	(185)
(二) 加工工艺.....	(186)
(三) 无磁性护环检验.....	(187)
(四) 中国发电机无磁性护环合金钢锻件标 准JB1268-85.....	(187)
(五) 美国发电机无磁性护环合金钢锻件标 准ASTM A289.....	(189)
(六) 国外其他无磁性护环用钢.....	(190)
九、汽轮发电机环形锻件.....	(191)
(一) 一般要求.....	(191)
(二) 中国汽轮发电机用磁性环碳钢及合金 钢锻件标准JB1269-85.....	(191)
(三) 美国汽轮发电机用磁性环碳钢及合金 钢锻件标准ASTM A288.....	(194)
十、水轮机、水轮发电机大轴锻件.....	(195)
十一、交直流电机轴锻件.....	(196)
十二、锅炉和压力容器锻件.....	(198)
十三、锅炉、汽轮机铸件.....	(205)
(一) 一般要求.....	(205)
(二) 铸件常用材料.....	(205)
(三) 锅炉管道附件承压铸钢件技术条件.....	(206)
(四) 汽轮机铸件技术条件.....	(207)
(五) 铸钢件的缺陷.....	(215)
(六) 铸钢件检验.....	(216)
十四、电工用硅钢片.....	(216)
(一) 一般要求.....	(216)
(二) 电工用热轧硅钢薄板GB5212-85.....	(217)
(三) 电工用冷轧硅钢薄板YB73-63.....	(221)
(四) 加工工艺.....	(224)
第三章 碳素钢.....	(229)
概述.....	(229)
Q235 A级(A3).....	(234)

10.....	(238)
15.....	(241)
20.....	(246)
25.....	(260)
30.....	(265)
35.....	(269)
40.....	(274)
45.....	(279)
50Mn.....	(284)
55.....	(287)
60.....	(290)
65 (见第六章)	
65Mn (见第六章)	
85 (见第六章)	
第四章 低合金结构钢.....	(293)
概述.....	(293)
10MoWVNb.....	(296)
12Mn.....	(302)
12MnMoV.....	(308)
12MoAlV.....	(310)
14CrMnMoVB.....	(314)
14MnMoV.....	(319)
14MnMoVBXt.....	(326)
15MnPNbXt.....	(332)
15MnTi.....	(335)
15MnV.....	(340)
16Mn.....	(348)
18MnMoNb (20MnMoNb).....	(358)
19Mn6 19Mn5.....	(367)
A299.....	(369)
第五章 合金结构钢和热强钢.....	(375)
概述.....	(375)
12CrMo.....	(384)
12CrMoV.....	(389)
12Cr1MoV.....	(392)
12Cr2Mo (2¼Cr-1Mo).....	(403)
12MoVWBSiXt (无铬8号).....	(415)
12Cr2MoWVTiB (102钢).....	(420)
12Cr3MoVSiTiB (Π11).....	(428)
13MnNiMoNb (BHW35).....	(434)
14MoV63.....	(446)
15CrMo.....	(448)

16Mo.....	(457)
17CrMo1V.....	(464)
18CrMnMoB.....	(466)
18Cr2Ni4W.....	(473)
20CrMnMo.....	(479)
20CrMo.....	(482)
20Cr1Mo1VNbTiB (1号螺栓钢).....	(486)
20Cr1Mo1VTiB (2号螺栓钢).....	(492)
20Cr3MoWV.....	(498)
20MnMo.....	(502)
24CrMoV.....	(504)
25Cr2MoV (ЭИ10).....	(506)
25Cr2Mo1V (ЭИ723).....	(513)
25Cr2NiMoV.....	(520)
25Mn2V.....	(527)
27Cr2MoV (P2).....	(529)
30CrMnSi.....	(534)
30Cr1Mo1V.....	(537)
30Cr2MoV.....	(545)
30Cr2Ni4MoV.....	(547)
30Mn2.....	(552)
30Mn2MoB.....	(556)
33Cr3MoWV.....	(557)
34CrMo、34CrMo1.....	(562)
34CrNi1Mo、34CrNi2Mo、 34CrNi3Mo.....	(567)
35CrMo.....	(575)
35CrMoV.....	(580)
35SiMn.....	(584)
38CrMoAl.....	(588)
40Cr.....	(595)
40Cr2MoV.....	(601)
第六章 弹簧钢	(603)
概述.....	(603)
0Cr17Ni7Al (17-7PH) (见第九章)	
1Cr15Ni36W3Ti (ЭИ612) (见第九章)	
2Cr17Mn13Mo2N、2Cr19Ni9Mo2 (见第九章)	
3Cr13 (见第八章)	
4Cr13 (见第八章)	
30W4Cr2VA.....	(606)

45Cr1MoV.....	(609)
50CrVA.....	(612)
60Si2CrA.....	(617)
60Si2Mn.....	(618)
65.....	(623)
65Mn.....	(626)
85.....	(628)
Inconel X-750 (见第九章)	
Refractaloy 26 (见第九章)	
碳素弹簧钢丝.....	(630)
第七章 铸铁、铸钢	(633)
概述.....	(633)
灰铸铁.....	(633)
球墨铸铁.....	(640)
耐热铸铁.....	(647)
无磁性铸铁WTMn-9.5.....	(650)
碳素铸钢.....	(652)
ZG15Cr1Mo (1¼Cr-½Mo铸钢).....	(657)
ZG15Cr1Mo1V.....	(660)
ZG15Cr2Mo1 (2¼Cr-1Mo铸钢).....	(662)
ZG20CrMo、ZG22CrMo (½Cr-½Mo铸钢).....	(665)
ZG20CrMoV.....	(669)
ZG22Mn.....	(672)
ZG25Mn18Cr4、ZG40Mn18Cr3.....	(672)
ZG1Cr14Ni14Mo2WNB.....	(674)
Co60Cr30W5.....	(675)
第八章 马氏体和铁素体耐热钢、不锈钢	(677)
概述.....	(677)
0Cr17Ni4Cu4Nb (17-4PH).....	(677)
1Cr5Mo.....	(688)
1Cr6Si2Mo.....	(694)
1Cr9Mo1.....	(698)
1Cr11MoV.....	(702)
1Cr12WMoV (ЭИ802).....	(705)
1Cr13、1Cr12Mo.....	(709)
1Cr17Ni2.....	(721)
1Cr21Ti.....	(725)
1Cr25Ti.....	(726)
2Cr12NiMoWV (C-422).....	(729)
2Cr12Ni2WMoV.....	(744)

2Cr12WMoVNbB (ЭИ 993).....	(748)
2Cr13.....	(750)
3Cr13.....	(758)
4Cr9Si2.....	(763)
4Cr13.....	(766)
F12 (X20CrMoV121).....	(771)
第九章 奥氏体钢及高温合金	(777)
概述.....	(777)
0Cr14Ni40W4Mo2Ti3Al2BZr (302合金).....	(777)
0Cr15Ni35W3Ti3AlB (ЭИ787) ...	(781)
0Cr17Ni12Mo2 (TP316H).....	(784)
0Cr17Ni7Al (17-7PH).....	(790)
0Cr18Ni11Nb (TP347H).....	(794)
0Cr18Ni11Ti (TP321H).....	(802)
0Cr19Ni9 (TP304H).....	(812)
1Cr14Ni18W2NbBCe (ЭИ726).....	(818)
1Cr15Ni35W3Ti (ЭИ612).....	(820)
1Cr17Ni13W3Ti.....	(823)
1Cr18Ni9.....	(825)
1Cr18Ni9Ti.....	(829)
1Mn17Cr7MoVNbBZr (17-7MoV).....	(835)
1Mn18Cr10MoVB (K9).....	(839)
2Cr17Mn13Mo2N、2Cr19Ni9Mo2.....	(841)
2Cr20Mn9Ni2Si2N (101 钢).....	(842)
2Mn18Al5SiMoTi.....	(846)
3Cr18Mn12Si2N (D1).....	(850)
4Cr14Ni14W2Mo (ЭИ69).....	(853)
40Mn18Cr3.....	(855)
50Mn18Cr4.....	(856)
50Mn18Cr4N.....	(858)
50Mn18Cr4WN.....	(860)
50Mn18Cr5Mo3VN.....	(863)
Inconel X-750.....	(865)
Refractaloy 26.....	(877)
第十章 有色金属	(881)
一、铜及铜合金.....	(882)

(一) 变形铜合金.....	(884)
(二) 铸造铜合金.....	(910)
二、铝及铝合金.....	(921)
(一) 变形铝合金.....	(922)
(二) 铸造铝合金.....	(946)
三、钛及钛合金.....	(956)
四、锡基轴承合金.....	(974)
第十一章 焊接材料	(977)
一、碳钢焊条.....	(977)
二、低合金钢焊条.....	(981)
三、不锈钢焊条.....	(987)
四、堆焊焊条.....	(996)
五、铸铁焊条.....	(1003)
六、镍及镍合金焊条.....	(1004)
七、铜及铜合金焊条.....	(1004)
八、铝及铝合金焊条.....	(1005)
九、埋弧自动焊及电渣焊用焊剂、焊丝.....	(1006)
(一) 焊剂.....	(1006)
(二) 碳素钢埋弧焊用焊剂.....	(1011)
(三) 焊丝.....	(1013)
十、常用钢种选用焊条参考表.....	(1017)
十一、焊条新旧牌号对照表.....	(1022)
十二、国内外焊条对照表.....	(1025)
附录	(1029)
一、国外某些耐热钢与合金的化学成分及性能.....	(1029)
二、国内外钢号对照表.....	(1054)
三、铂铑-铂热电偶分度表.....	(1066)
四、镍铬-镍硅(铝)热电偶分度表.....	(1071)
五、主要元素符号对照表.....	(1076)
六、单位换算表.....	(1076)
应力换算表.....	(1076)
冲击功换算表.....	(1077)
米制压力与应力单位的换算系数表.....	(1078)
功、能与热量单位换算系数表.....	(1078)
摄氏与华氏温度换算表.....	(1079)
七、GB150-89钢制压力容器.....	(1083)
参考资料	(1102)

第一章 材料性能及评定

本书主要介绍金属材料的性能,包括力学性能又称机械性能、物理性能和化学性能。机械零件在负荷下工作,并处于一定温度和环境介质之中,因此材料性能及评定就成为设计、选材、工艺、运行和失效分析的重要依据。下面将本书中经常遇到的金属材料有关性能及评定方法,作比较系统的介绍。

一、断裂韧性 传统的机械强度设计是以下面的基本假设为基础的,即假设材料是连续、均匀、各向同性的,并以常规的力学性能指标 σ_s 、 σ_b 等作为设计参数。但是,近几十年来在发电设备、造船、航空、石油化工等行业发生的一系列低应力破坏事故,就无法用传统的材料力学进行解释。

研究证明,这种低应力破坏往往是和材料内部存在宏观缺陷有关。事实上,材料内部总是存在缺陷的,如冶炼、铸造、锻压、热处理、焊接过程中产生的夹杂、气孔、白点、折叠、裂纹、未焊透以及材料在运行过程中产生的疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹等。断裂力学就是在这种背景下产生的一门新的力学分支。

断裂力学是研究带有裂纹的材料强度和裂纹扩展规律的科学。在裂纹尖端不发生或很少发生塑性变形、塑变区尺寸与裂纹尺寸相比足够小的情况下,对裂纹尖端所作的力学分析符合线弹性条件,属于“线弹性断裂力学”范围,这时最常用的力学参数是应力强度因子 K ,相应的断裂韧性指标是 K_{Ic} 。在裂纹尖端塑变区尺寸接近或超过裂纹尺寸的情况下线弹性条件已不适用,此时对裂纹尖端所作的力学分析则属于“弹塑性断裂力学”或“非线性弹性断裂力学”范围,这时常用的力学参数是裂纹尖端张开位移量COD和裂纹尖端能量线积分 J ,相应的断裂韧性指标是 δ_c 和 J_{Ic} 。

1. 平面应变断裂韧性 K_{Ic}

按照裂纹受力模型,裂纹尖端变形可分为三种类型,Ⅰ型为张开型,Ⅱ型为滑移型或称面内剪切型,Ⅲ型为撕裂型或称面外剪切型。由于Ⅰ型(张开型)受力对裂纹扩展危害性最大,故通常断裂韧性试验都采用Ⅰ型变形方法

根据弹性力学对Ⅰ型受力情况的应力场的理论分析,裂纹尖端附近任一点(r , θ)处的应力分量可表达为

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

见图1-1。式中 K_I 称为“Ⅰ型受力模型的应力强度因子”,其单位为 $\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 。 K_I 反映了裂纹尖端附近区域的弹性应力应变场的强弱程度,是应力场的主要参数。

一般说来,应力强度因子可统一写成下面的形式:

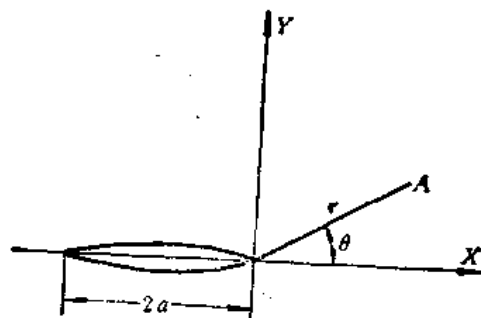


图 1-1 裂纹尖端应力场

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

式中: σ ——外加名义应力;

a ——裂纹的特征尺寸;

Y ——与裂纹型式和零件几何结构有关的参数。

断裂力学中的应力强度因子 K_I 相当于传统强度计算中的工作应力。

从应力强度因子的一般表达式可以看出, 应力强度因子 K_I 与裂纹尺寸的平方根及垂直于裂纹的应力成正比。当裂纹尺寸或应力增加时, K_I 随之增加。当 K_I 达到某一临界值 K_{Ic} 时, 裂纹处于临界状态, 若 K_I 再增加, 裂纹将会失稳扩展。因此, 裂纹失稳扩展的临界条件为

$$K_I = K_{Ic}$$

式中 K_{Ic} 表示材料对裂纹扩展的抵抗能力, 称为 I 型受力时的临界应力强度因子, 又称为平面应变断裂韧性。

在传统的强度计算中, 强度指标 σ_s 和 σ_b 与塑性指标 δ 和 ψ 之间是相互分割的, 且塑性指标在强度计算中并不定量反映。而 K_{Ic} 既反映了材料的强度性能, 又反映了材料的塑性性能。

断裂韧性 K_{Ic} 的测试方法可参照 ASTM E399 金属材料平面应变断裂韧性标准试验方法。

对于中低强度高韧性钢来说, 为满足平面应变条件所要求的试样尺寸非常大, 实际上无法作到。但是, 在研究高强度低韧性材料的断裂问题时, 线弹性断裂力学得到了广泛的应用。

2. 裂纹尖端张开位移临界值 δ_c

当裂纹尖端超过小范围屈服而进入大范围屈服时, 以应力场的强弱来描述受力的大小已没有实际意义, 因此裂纹失稳扩展临界条件 $K_I = K_{Ic}$ 也失效了。

在弹塑性断裂力学中, 以裂纹张开位移法即 COD 法应用最广。研究证明, 不同厚度试样在破坏时的临界张开位移基本相同。因此可用裂纹张开位移作为断裂判据参量。断裂判据为

$$\delta \leq \delta_c$$

式中 δ 为外力所产生的裂纹张开位移。 δ_c 为裂纹张开位移临界值, 与线弹性断裂力学中的断裂韧性 K_{Ic} 相似, 它反映材料对裂纹开裂的抗力。研究表明, 只要试样厚度 $\geq 5\text{mm}$, 同一材料的 δ_c 值是一个稳定的韧性参量。

材料的 δ_c 和 K_{Ic} 之间存在下列近似的关系:

$$\delta_c = \frac{K_{Ic}^2}{E\sigma_s}$$

3. J 积分和临界值 J_{Ic}

在弹塑性断裂力学中, J 积分判据受到了普遍的重视。J 积分是一个围绕裂纹尖端的能量线积分, 它反映了裂纹尖端聚集的能量多少。当能量达到材料所能容忍的限度, 即积分值 J_I 达到某一临界值 J_{Ic} 时, 裂纹尖端发生开裂。 J_{Ic} 即为材料的断裂韧性。

可以证明, 在线弹性和小范围屈服情况下,

$$J_I = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 \quad (\text{平面应变})$$

当开裂时, 则有

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} J_{IC}}$$

由上式得知, 若用小试样试验求出临界状态时的 J_{IC} 后, 即可计算出断裂韧性 K_{IC} 值。这样, 对中低强度钢就有可能采取小试样测定出 K_{IC} 值。

J 积分作为断裂判据的参量, 不仅在线弹性范围内有效, 在大范围屈服时也是有效的, 因此它优于应力强度因子等线弹性判据。

断裂韧性单位换算表

	$\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$	$\text{ksi} \cdot \sqrt{\text{in}}$	$\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$	$\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$
$\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$	1	0.91005	31.523	3.2246
$\text{ksi} \cdot \sqrt{\text{in}}$	1.0988	1	34.748	3.5434
$\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$	0.031623	0.028778	1	0.10197
$\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$	0.31011	0.28222	9.8067	1

几种国产钢材的断裂韧性

材料类别	材料名称	处 理 状 态	σ_s	σ_b	$K_{IC}^{-1/2}$	备 注
			MPa		$\text{N} \cdot \text{mm}$	
马氏体 时效钢	18Ni	840℃空冷, 480℃空冷	1780	1830	4140	
	15Ni	800℃空冷, 480℃空冷	1620	1670	2980	
	12Ni	800℃空冷, 480℃空冷	1610	1650	2680	
低碳马 氏体钢	18CrNiWA	900℃空淬, 200℃回火	1000	1280	4260	由 J_{IC} 换算
	20SiMn2MoVA	900℃油淬, 250℃回火	1240	1510	3640	
		900℃油淬, 300℃回火	1240	1490	3600	
	22CrMnSiMoVA	900℃油淬, 200℃回火	1260	1570	3970	
		900℃油淬, 250℃回火	1280	1560	4100	
中 碳 结 构 钢	30CrMnSiA	900℃油淬, 400℃回火	1310	1430	2800	
		900℃油淬, 500℃回火	1030	1180	3750	
	30CrMnSiNi2A	890℃油淬, 260℃回火	1670		2170	
		890℃油淬, 360℃回火	1570		2760	
		890℃加热, 300℃等温	1420		2590	
	32SiMnMoV	920℃油淬, 280℃回火	1840	1970	1550	
		920℃油淬, 320℃回火	1750	1950	1840	
		920℃加热, 260℃等温	1460	1890	1400	
		920℃加热, 320℃等温	1360	1530	2620	

(续表)

材料类别	材料名称	处 理 状 态	σ_s	σ_b	K_{IC}	备 注
			MPa		$\frac{N}{mm}$	
中碳 结构钢	34CrNiMo	850℃油淬, 290℃回火	1460	1690	3110	为 K_{IC} 值
	40CrNiMo	850℃油淬, 400℃回火	1430	1620	3040	
		850℃油淬, 530℃回火	1340	1440	4120	
		860℃油淬, 200℃回火	1610	1980	1360	
		860℃油淬, 380℃回火	1410	1520	2040	
		860℃油淬, 430℃回火	1360	1420	2900	
	40SiMnCrNiMoV	870℃油淬, 260℃回火	1690	1950	2540	
	45	1000℃油淬, 260℃回火	1610	1920	2780	
		890℃油淬, 600℃回火	1430	1550	3030	
			520	820	3250	
基体钢	65Cr4W3Mo2V	1070℃油淬, 540℃二次回火	HRC 62		540	
	65Cr4W3Mo2VNb	1070℃油淬, 540℃二次回火	HRC 58.5		830	
		1120℃油淬, 540℃二次回火	HRC 61.5		680	
		1070℃油淬, 600℃二次回火	HRC 50		1200	
大锻件 用钢	34CrMo1A		730		2970	由 J_{IC} 换算 由 J_{IC} 换算
	30Cr2MoV	940℃空冷, 680~700℃回火	560	700	4500~5000	
	34CrNi3Mo	860℃加热, 预冷到780℃油淬, 650℃回火	560	730	4500~5200	
压力 容器钢	14MnMoNbB	920℃水淬, 620℃空冷	840	890	5100~5300	由 J_{IC} 换算
	18MnMoNiCr	890℃空冷, 660~680℃空冷	470	590	8320~8830	由 J_{IC} 换算
球 墨 铸 铁	铜铝球墨铸铁	正火			1100~1150	大截面铸件
	稀土球墨铸铁	860℃硝盐淬火, 380℃回火	HRC 45~50		1080	
		920℃硝盐淬火, 410℃回火	HRC 46~48		1040	
		880℃加热, 280℃等温	HRC 43~45		1340	
		880℃加热, 310℃等温	HRC 38~42		1650	

二、应力腐蚀及临界应力强度因子 K_{ISCC} 在拉应力和腐蚀介质的共同作用下,出现的脆性断裂称为应力腐蚀。有不少机器零件是在腐蚀介质中工作的,在长期的介质和拉伸应力(包括残余应力)的作用下,往往发生低应力脆断。在应力腐蚀下的零件,其裂纹很细小,表面上只能看到轻微的痕迹。应力腐蚀开裂的断口,具有脆性断裂的形貌,裂纹沿晶或穿晶扩展,并存在大量二次裂纹。

一般说来,材料的强度愈高,其应力腐蚀开裂的敏感性愈大。例如,碳钢在大气中,没有应力腐蚀开裂倾向,但是低合金高强度钢在同样的环境中,在相当低的应力水平下就很容易产生应力腐蚀开裂。

为了提高零件抗应力腐蚀能力,可以采取下面的措施。应力方面,由于应力腐蚀开裂敏感性随拉应力的增加而增加,因此应把材料表面的拉应力降低到低于材料的应力界限值,如采用退火工艺和喷丸处理等。环境介质方面,尽量减少或消除助长开裂的化学离子,在腐蚀介质中添加防腐剂,以减慢或消除环境对材料的腐蚀开裂作用。材料方面,选用在该环境下对应力腐蚀较不敏感的材料,或采用保护镀层、阴极保护等。

应力腐蚀裂纹的扩展速率主要受裂纹尖端的应力强度因子 K_I 所控制。当 $K_I < K_{ISCC}$ 时,

裂纹实际上不扩展。 K_{ISCC} 称为应力腐蚀临界应力强度因子,它是用断裂力学来描述材料在某一特定介质中抗应力腐蚀断裂的特征参量,其物理意义是含有宏观裂纹的材料在应力腐蚀条件下的断裂韧性。

三、多次冲击试验 一般的冲击韧性试验是用大能量将标准试样一次冲断。而实际上承受冲击载荷的零件很少承受这么大的冲击载荷,以致一次冲断,而是承受较小的冲击载荷,经受上万次或更多次数的多次冲击后才断裂的。因此有必要进行多次冲击试验。多次冲击试验是在小能量多次冲击作用下测定冲击抗力的试验方法。

与疲劳试验相似,根据多次冲击试验可以作出冲击能量 A 和冲击破断次数 N 的关系曲线,即 $A-N$ 曲线,见图1-2。

材料在小能量多次冲击下的受力状态是交变应力,所以它的破坏属于疲劳类型。但由于多冲载荷具有冲击性,作用时间短,应力、应变速度高,因此多冲抗力与一般的疲劳强度又有所不同。

从多次冲击试验 $A-N$ 曲线图可以看出,高强度低韧性材料和低强度高韧性材料,其 $A-N$ 曲线有交点。在交点下方冲击能量较低时,高强度低韧性材料的多冲寿命长,在交点上方冲击能量较高时,低强度高韧性材料的多冲寿命长。随着冲击能量的降低,多冲抗力高峰向高强度,低韧性状态转移。因此小能量多冲抗力主要地决定于强度,较大能量冲击次数较少时,冲击抗力主要决定于韧性。在交点附近,表明决定多冲抗力的主导因素发生转化。

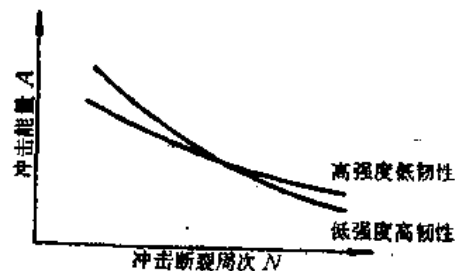


图 1-2 多次冲击试验 $A-N$ 曲线

高强度或超高强度钢,其韧性一般较小,这时适当增加韧性(最好不降低强度)对提高多冲抗力将起显著作用。特别在材料存在尖锐缺口、裂纹,应力集中系数较大时,多冲抗力对材料的韧性、塑性要求较高。

应用多冲抗力的规律,对于延长承受小能量多次冲击载荷的零件的使用寿命,能起一定作用。可以根据材料的小能量多次冲击 $A-N$ 曲线作为选材和制定工艺的参考。

四、系列冲击试验和断口形貌转变温度FATT 中低强度的体心立方金属如铁素体型的

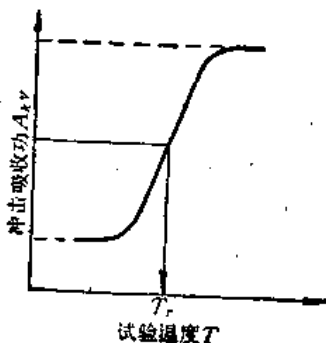


图 1-3 冲击吸收功-温度转变曲线

的碳钢和合金钢随着试验温度的降低,冲断试样所需要的冲击吸收功也将降低。但这种变化并不是随温度缓慢地变化,而是在某一温度范围内急剧地降低,如图1-3所示。在高于这一温度范围时,系韧性断裂;在低于这一温度范围时,系脆性断裂。材料由韧性状态向脆性状态转化的温度叫脆性转变温度。实际上,脆性转变温度是一个温度区间,但是为了工程上的使用方便,通常按照冲击吸收功、断口形貌或膨胀量确定某一温度来表示材料的脆性转变温度。

还有其他确定脆性转变温度的定义和方法。按不同定义所确定的脆性转变温度其物理

意义并不相同, 所得的脆性转变温度数值可以相差很大。因此在评定材料的脆性转变温度时, 要注意它的评定方法。

为了掌握材料随工作温度下降而变脆的倾向, 必须进行系列冲击试验。将试样在不同的温度下进行冲击试验称为系列冲击试验。通过系列冲击试验, 可以分别得出冲击吸收功、断口形貌和膨胀量与温度的关系曲线, 从而确定脆性转变温度。进行系列冲击试验必须采用夏比V型缺口试样, 以灵敏地反映材料的脆化倾向。

由于根据冲击试验对脆性转变温度有不同的定义和确定方法, 下面介绍几种常用的方法。

能量转变曲线和能量脆性转变温度:

图1-3所示的冲击吸收功-温度转变曲线即所谓能量转变曲线。能量脆性转变温度的定义是韧性断口面积为100%的最低温度的冲击吸收功和脆性断口面积为100%或接近100%的最高温度的冲击功之差的50%所对应的温度。

断口形貌转变曲线和断口形貌转变温度:

将断口形貌的面积百分数与试验温度的关系绘成曲线, 即为断口形貌转变曲线, 见图1-4所示。断口形貌转变温度的定义是断口面积呈现出50%脆性断口和50%韧性断口时所对

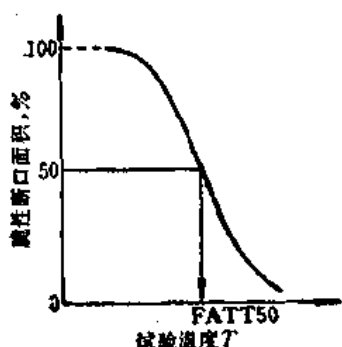


图 1-4 断口形貌-温度转变曲线

应的温度, 用 $FATT_{50}$ 表示。影响材料 $FATT_{50}$ 的因素很多, 如化学成分、热处理状态、冶金质量等。对于大型锻件如汽轮机转子、汽轮发电机转子等, $FATT_{50}$ 是一个重要的指标, 因为材料的冶金缺陷如偏析、非金属夹杂、有害元素含量、裂纹、白点等明显地提高脆性转变温度, 所以 $FATT_{50}$ 数值的高低, 综合反映出材料的冶金质量。

能量准则:

采用某一规定的冲击吸收功水平所对应的温度作为脆性转变温度。例如对于船用钢板, 为了防止脆性断裂, 大量试验证明夏比V型缺口试样冲击吸收功必须大于20.3J(15英尺-磅), 以对应此值的温度作为脆性转变温度。根据不同要求, 冲击吸收功有采用20英尺-磅(27.1J)或30英尺-磅(40.7J)为标准的。还有采用0.4倍最大冲击吸收功或最大和最小冲击吸收功的算术平均值所对应的温度作为钢的脆性转变温度。

五、落锤试验和无塑性转变温度NDT 落锤试验是由美国海军研究所于1952年创立, 已广泛用于研究结构钢发生脆性断裂的必要条件。该试验方法已列入美国ASTM E208标准。目前, 落锤试验方法已成为锅炉、压力容器抗断设计重要的依据。钢的无塑性转变温度也与钢的断口形貌转变温度 $FATT$ 建立了联系。