

CP 腐蚀与防护全书

耐热钢和高温合金

中国腐蚀与防护学会 主编

朱日彰 卢亚轩 编著

化学工业出版社

腐蚀与防护全书

耐热钢和高温合金

中国腐蚀与防护学会 主编

朱日彰 卢亚轩 编著

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

耐热钢和高温合金/中国腐蚀与防护学会主编; 朱日彰, 卢亚轩编著. —北京: 化学工业出版社, 1995

(腐蚀与防护全书)

ISBN 7-5025-1158-X

I. 耐… II. ①中… ②朱… ③卢… III. ①耐热钢
②耐热合金 N. ①TG142.73 ②TG132.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 05101 号

出版发行: 化学工业出版社 (北京市朝阳区惠新里 3 号)

社长: 傅增宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所

印 刷: 振南印刷厂

装 订: 三河新集装订厂

版 次: 1996 年 1 月第 1 版

印 次: 1996 年 1 月第 1 次印刷

开 本: 850×1168 1/32

印 张: 10³/₈

字 数: 286 千字

印 数: 1—5000

定 价: 15.80

内 容 提 要

本书较详细地阐述了耐热钢及高温合金的基本原理、组织结构与性能的关系以及高温力学性能与高温腐蚀的基本概念；介绍了国内外研制生产的各类耐热钢和高温合金的成分、组织结构和性能；较全面地概述了耐热钢和高温合金在国民经济各主要工业领域中的应用情况。

本书可供动力、航空航天、机械、冶金、石化、化工、石油材料等工业部中从事设计、制造、维护、研究以及工作以及从事腐蚀与防护工作的工程技术人员使用，也可作为大专院校有关专业的师生参改。

序

腐蚀与防护科学是本世纪 30 年代发展起来的一门综合性技术科学，目前已成为一门独立的学科，并在不断发展。

腐蚀是材料在各种环境作用下发生的破坏和变质，遍及国民经济各部门，给国民经济带来巨大损失。根据工业发达国家的调查，每年因腐蚀造成的经济损失约占国民生产总值的 2—4%，我国每年因腐蚀造成的经济损失至少达二百亿元。搞好腐蚀与防护工作，已不是单纯的技术问题，而是关系到保护资源、节约能源、节省材料、保护环境、保证正常生产和人身安全、发展新技术等一系列重大的社会和经济问题。全面普及科学知识，推广近代的防护技术，以减少腐蚀造成的经济损失，延长材料和设备的使用寿命，促进城乡经济的发展和企业经济效益的提高，是当前急待解决的问题。

为此，中国腐蚀与防护学会和化学工业出版社决定共同组织编写《腐蚀与防护全书》。《全书》分总论、腐蚀理论、环境腐蚀与防护、耐蚀材料、防蚀技术、腐蚀试验与监控等六篇数十个分册，并将陆续出版。

《全书》属于专业百科性质的大型综合性工具书，全面系统地阐述腐蚀学科的理论和应用，总结国内外的腐蚀与防护经验，反映近代的防护技术；内容广泛，兼顾知识性、教育性和实用性。主要供腐蚀与防护专业以及与该专业有关的工程技术人员阅读使用，也可供企业管理干部与大专院校有关专业师生参考。

《全书》的编写工作曾得到腐蚀领域许多专家、工程技术人员及其所在单位领导的热情协助和支持，对此，表示衷心感谢。

由于我们水平有限，缺点和错误在所难免，望读者批评指正。

《腐蚀与防护全书》编委会

1995 年 3 月

目 录

第1章 概 论	1
1. 引 言	1
2. 高温下对金属材料的基本要求	3
3. 耐热钢和高温合金的冶炼、加工工艺的特点	4
3.1 冶炼工艺	4
3.2 铸造	4
3.3 塑性变形加工	5
3.4 热处理	5
3.5 焊接加工	6
3.6 机加工工艺	6
4. 耐热钢和高温合金的发展概况	6
第2章 金属材料的高温力学行为	10
1. 高温力学性能	10
1.1 蠕变性能	10
1.1.1 典型的蠕变曲线	10
1.1.2 蠕变速率与应力的关系	11
1.1.3 条件蠕变极限及其应用	11
1.1.4 温度和材料对蠕变的影响	12
1.2 持久强度	13
1.2.1 持久强度的定义及其确定方法	13
1.2.2 持久强度在实际工程中的应用	14
1.2.3 影响耐热钢持久强度的因素	15
1.3 疲劳性能	16
1.3.1 热疲劳破裂寿命计算	16
1.3.2 影响热疲劳强度的因素	17
1.4 松弛性能	19
1.4.1 现象与定义	19
1.4.2 松弛曲线及其特性指标	20
1.4.3 应力松弛的外推	20

1.4.4 影响应力松弛的因素	22
2. 金属材料的高温强度理论基础	22
2.1 固溶强化	23
2.2 析出相强化	25
2.2.1 析出相强化合金的相图、组织与热强性间关系	25
2.2.2 析出相强化机理	26
2.2.3 对时效析出型合金的要求	27
2.3 晶界强化	28
2.3.1 等温强度	28
2.3.2 晶界上的杂质元素与晶界强化的关系	29
2.3.3 晶界微量合金元素	30
第3章 金属材料的高温腐蚀行为	32
1. 高温腐蚀的基本概念	32
2. 高温氧化	35
2.1 含义	35
2.2 金属氧化的历程	35
2.3 金属氧化的热力学与动力学	37
2.3.1 金属氧化的热力学	37
2.3.2 金属氧化的动力学	38
2.4 金属的氧化膜	39
2.5 防止高温氧化的措施	40
3. 高温硫化	40
4. 高温氮化	43
5. 高温碳化	44
6. 氢腐蚀	45
7. 金属材料的热腐蚀	46
7.1 热腐蚀的历程	47
7.2 影响热腐蚀的因素及防止措施	50
第4章 耐热钢	52
1. 耐热钢的范畴及分类	52
1.1 引言	52
1.2 耐热钢的分类	52
1.2.1 按钢中的合金元素的含量分类	52

1.2.2	按钢的组织结构分类	53
1.2.3	按钢的特性分类	53
2.	耐热钢的主要成分及合金化	54
2.1	合金元素对耐热钢抗高温氧化的影响	54
2.2	合金元素对耐热钢的热强性的作用	59
2.2.1	耐热钢对合金化的要求	59
2.2.2	耐热钢中常见的合金元素对热强性的影响	60
3.	耐热钢的组织结构与热强性间的关系	66
3.1	钢的显微组织与其热强性间的关系	67
3.2	钢的晶粒度与热强性间的关系	69
3.3	钢的变形组织与热强性间的关系	71
3.4	钢的组织稳定性与热强性间的关系	75
3.4.1	石墨化	76
3.4.2	球化	76
3.4.3	固溶体中合金元素的贫化	77
3.4.4	蠕变过程中析出相类型的转变	78
3.4.5	碳化物在晶内和沿晶析出及聚集	80
4.	珠光体型低合金耐热钢	81
4.1	锅炉用低碳钢	81
4.2	钼、铬钼和铬硅珠光体型低合金耐热钢	84
4.2.1	钼钢	84
4.2.2	铬钼钢	84
4.2.3	含铬为5%的铬钼钢	89
4.2.4	低合金铬钼钢的热处理	90
4.3	多元合金化的珠光体型低合金耐热钢	90
4.3.1	12CrMoV 和 12Cr1MoV 钢	92
4.3.2	多元复合合金化低合金耐热钢	94
4.4	低合金耐热钢的热处理	99
4.4.1	制定热处理工艺的基础	100
4.4.2	热处理工艺参数对低合金耐热钢的组织 and 性能的影响	102
4.4.3	低合金耐热钢的回火脆性	108
5.	奥氏体型耐热钢	108
5.1	奥氏体型耐热钢合金化的特点	109

5.1.1	镍的作用	109
5.1.2	钴的作用	112
5.1.3	碳和氮的作用	114
5.2	奥氏体型耐热钢热处理特征	115
5.2.1	奥氏体型耐热钢的固溶处理	115
5.2.2	奥氏体型耐热钢的时效	118
5.3	简单的铬镍奥氏体型耐热钢的成分、组织和性能	119
5.3.1	18-8 型铬镍奥氏体型耐热钢	119
5.3.2	高铬镍奥氏体型耐热钢	122
5.4	多元合金化的奥氏体型耐热钢	125
5.4.1	以碳化物为主要强化相的奥氏体耐热钢	125
5.4.2	以金属间化合物为强化相的奥氏体耐热钢	132
5.5	铸造奥氏体型耐热钢	137
5.5.1	铬镍奥氏体铸钢	138
5.5.2	低镍、无镍奥氏体耐热铸钢	138
6.	高铬铁素体型耐热钢	142
6.1	高铬铁素体型耐热钢的成分	143
6.2	高铬铁素体型耐热钢的组织和性能	144
6.3	高铬铁素体型钢的脆性	146
7.	马氏体型耐热钢	148
7.1	马氏体型耐热钢的成分与性能	148
7.2	马氏体型耐热钢的特征	151
7.2.1	马氏体型耐热钢的热处理	151
7.2.2	马氏体型耐热钢中的析出相	151
7.2.3	马氏体型耐热钢的疲劳性能	151
7.3	某些马氏体型耐热钢简介	152
7.4	Fe-Cr-Al 耐热合金	154
第 5 章	高温合金	156
1.	高温合金的特征及分类	156
1.1	引言	156
1.2	高温合金的分类、成分和组织	157
1.3	高温合金的生产工艺特点	158
1.3.1	冶炼工艺	158

1.3.2	热加工和冷加工	159
2.	铁镍基高温合金	160
2.1	引言	160
2.2	铁镍基高温合金的成分及合金元素作用	162
2.3	三种类型的强化相	163
2.4	我国生产的铁镍基高温合金	164
2.4.1	GH132 合金	164
2.4.2	其他铁基高温合金	165
3.	镍基高温合金	168
3.1	引言	168
3.2	合金元素在镍基高温合金中的作用	168
3.3	固溶强化的镍基变形高温合金	179
3.4	金属间化合物强化的镍基变形高温合金	181
3.5	镍基高温合金的热处理	185
3.6	镍基铸造高温合金	186
4.	钴基高温合金	189
4.1	钴的基本特性	189
4.2	钴基高温合金的合金化	192
4.3	钴基高温合金的成分及性能	194
4.4	铸造钴基高温合金	198
5.	钛基高温合金	200
5.1	引言	200
5.2	全 α 相钛合金	201
5.3	近 α 相钛合金	201
5.4	$\alpha + \beta$ 型钛合金	202
5.5	β 相钛合金	204
6.	新型高温材料	205
6.1	金属间化合物	205
6.1.1	金属间化合物的结构	207
6.1.2	金属间化合物的强度	211
6.1.3	金属间化合物的脆性	213
6.1.4	金属间化合物的高温氧化性能	214
6.1.5	几种金属间化合物材料	216

6.2	氧化物弥散强化合金	220
6.3	定向和单晶高温合金	225
6.3.1	定向凝固合金	226
6.3.2	单晶高温合金	228
6.3.3	定向共晶合金	230
6.3.4	定向凝固合金和单晶合金的性能	230
第6章	耐热钢和高温合金在工业领域中的应用	233
1.	引言	233
2.	航空发动机用高温合金	233
2.1	航空发动机的工作条件及对合金的要求	233
2.2	航空发动机各部件使用的高温合金	236
3.	燃气轮机用高温合金	241
3.1	对合金材料高温性能的要求	241
3.2	燃气轮机中应用的高温合金	243
4.	煤的转化用高温合金	248
4.1	煤的气化、液化技术特点及对合金材料高温性能的要求	248
4.2	煤的气化时产生的高温腐蚀形态及使用的高温材料	249
5.	汽车、拖拉机工业用高温金属材料	253
5.1	排气阀用材	253
5.1.1	内燃机排气阀对材料使用要求	253
5.1.2	排气阀材料	254
5.2	热发生器用材料	258
5.3	增压器材料	259
5.4	烧嘴材料	260
6.	石化工业用高温材料	261
6.1	对材料的要求	261
6.2	裂解炉管用高温材料	263
6.3	石化工业中应用的耐热钢及高温合金	263
6.4	高温装置的材料失效	268
7.	原子能工业用高温合金	271
7.1	钠冷反应堆燃料包壳材料和结构材料	271
7.1.1	燃料元件包壳材料	271
7.1.2	耐热钢和高温合金在钠冷反应堆包壳材料中的应用	272

7.1.3 耐热钢和高温合金在钠冷反应堆结构材料中的选用	273
7.2 燃料棒元件定位格架	273
7.3 反应堆用螺钉材料	274
7.4 液态金属铯中的腐蚀和 18-8 型不锈钢耐热钢的应用	274
7.5 高温气体炉用高温合金	275
8. 宇航工业用高温金属材料	278
8.1 火箭技术对高温材料的要求	278
8.2 耐热钢及高温合金在宇航工业中的应用	280
9. 水泥、搪瓷工业用高温金属材料	281
9.1 水泥工业用高温金属材料	281
9.2 搪瓷和日用陶瓷工业用高温金属材料	283
10. 冶金工业中应用的耐热钢与高温合金	284
11. 硅酸盐工业中用高温金属材料	287
11.1 玻璃工业对高温材料的要求	287
11.2 玻璃纤维工业用高温合金	288
11.3 玻璃拉管用高温材料	290
12. 火力发电设备用高温金属材料	291
12.1 锅炉钢管用耐热钢	292
12.1.1 对锅炉管材料的要求	292
12.1.2 锅炉钢管材质的选用	292
12.2 锅炉钢板用耐热钢	292
12.2.1 工作条件对锅炉钢板的要求	293
12.2.2 锅炉钢板的选用	293
12.3 叶片用耐热钢	293
12.3.1 汽轮机叶片对材料的要求	294
12.3.2 叶片材料的选择	295
12.4 汽轮机、燃气轮机紧固件材料	295
12.5 汽轮机叶轮、主轴和转子用耐热钢	296
附录 中国高温合金化学成分、主要用途	298
参考文献	312

第1章 概 论

1. 引 言

耐热钢和高温合金是指在高温下工作的金属材料。金属材料使用温度的高低是一个相对概念，例如，对蒸汽轮机和锅炉来讲，在本世纪 30—40 年代蒸汽温度不过 400—450℃，蒸汽压力不过近 100 大气压，而现在蒸汽温度已达 650℃，蒸汽压力也高达 240 大气压以上，因此所使用的金属材料也从低碳钢发展到复杂的各类合金钢。耐热钢使用温度最高也就 600—700℃。现代航空工业的发展出现了超音速飞机，其发动机的工作温度高达 1200℃，从而，出现了各类镍基、钴基合金。由此可见，根据工程结构的要求不同，耐热钢和高温合金的使用温度范围是十分宽广的，从几百度到千度以上。一般来讲，耐热钢和高温合金工作温度是指该金属或合金的 $(0.3—0.5)T_{\text{熔点}}^{\circ}\text{C}$ 以上的温度。图 1-1 中列出了一些金属和合金的熔点。由图可知，鉴于它们的本质不同，其使用温度也是各不相同，铁基、钴基和镍基合金的使用温度一般不超过 1000℃，温度再高就必须选用难熔金属（指熔点高于 1650℃的金属）或其合金了。作为高温下使用的工程材料，必须具有高温下优良的综合力学性能和抗腐蚀性能。实践表明，图 1-1 中所列的难熔金属，除铬外，在空气或其他氧化性气氛中其抗高温氧化的能力都很差，必须借助于耐蚀涂层，方可勉强使用。

耐热钢和高温合金是在高温下工作的金属材料的统称。实践中，根据金属材料所处工作环境的不同和受力状态的差异，可将耐热钢及合金分为热稳定性金属材料 and 热强性金属材料。热稳定性金属材料主要是指在高温静态下不受外力的情况下工作的材料。例如，各类加热马弗炉罩、炉底板、加热用元器件等。在这种工作条件下，主要要求材料具有优良的抗高温氧化性能。热强性金属材料则不同，除要求在高

温下具有优异的抗高温腐蚀性能外，更重要的是要具有优良的、综合的高温力学性能，最典型的例子是燃气轮机的叶片、涡轮盘等部件，在这些情况，部件的受力状态往往是十分复杂的，介质环境也是十分苛刻的。

所以，在阐述耐热钢和高温合金时，可将它们分为热稳定性钢和合金及热强性耐热钢和合金两类。当然，也可以按照耐热钢和高温合金的使用范围来进行分类，如炉用耐热钢和合金，电阻丝用耐热钢及合金，叶片用耐热钢及合金等等。

2. 高温下对金属材料的基本要求

实践中，对高温下工作的工程结构材料的要求十分苛刻，概括起来主要要求是：

(1) 优异的、综合性的高温力学性能。也就是说要求材料具有优良的抗蠕变性能，足够的高温持久强度，良好的高温疲劳性能，适当的高温塑性等，以保证金属材料在服役期间内安全工作，具备应有的使用寿命。

(2) 在相应的工作环境中具有良好的耐高温腐蚀性能。也就是说，在受力或不受力的高温工作环境中，能耐高温氧化或耐高温硫化，或耐混合气氛中的高温腐蚀等性能。能达到设计要求的使用寿命，保证不因高温腐蚀而使材料遭受破坏。

(3) 高温下使用的材料应具有足够好的冶炼加工等工艺性能。高温下的工作部件的形状往往是十分复杂的，对所使用材料的化学成分的要求也是十分严格的，因此要求这些材料要具有良好的冶炼工艺性以及足够好的铸造、锻造、焊接、机加工性能等以保证能获得实际工程中所需要的工程部件和设备。

(4) 适宜的经济可行性。即在选材时，除应注意到材料的寿命外，还必须兼顾到材料的成本、加工制造部件或设备的成本、部件的可更换性、安全可靠等因素，全面地衡量经济的可行性。

上述对高温下使用材料的基本要求在具体工程中必须进行综合考虑，特别是在设计选材时要全面考虑。

3. 耐热钢和高温合金的冶炼、加工工艺的特点

实践表明,耐热钢和高温合金的成分和杂质含量与其性能有密切的关系,而它们的成分与杂质含量又与其冶炼工艺息息相关。因此,选择正确的冶炼工艺是保证耐热钢和高温合金具有高性能的重要手段。而以后的材料的加工工艺方法也对它们的性能有着极为重要的影响。因此,在必须简要地介绍一下耐热钢和高温合金的冶炼、加工工艺方法。

3.1 冶 炼 工 艺

除部分低合金珠光体耐热钢外,大部分耐热钢和高温合金都是在电弧炉或在感应电炉中熔炼的。为了进一步地提高它们的质量,降低杂质和气体的含量,许多耐热钢,特别是高温合金采用真空熔炼浇注、电渣重熔、区域熔炼、炉外精炼等方法冶炼。表 1-1 中列出了几种冶炼工艺特点的比较。可根据对耐热钢和高温合金的具体要求选择合适的冶炼工艺。

表 1-1 几种冶炼工艺特点的比较

工艺特点	电弧炉	电弧炉+ 真空精炼	感应炉	真空感 应炉	等离 子炉	电渣 重熔	真空自 耗 炉
合金适应性	差	好	好	很好	很好	好	很好
炉渣(熔盐)处理	好	好	差	差	好	很好	差
成分控制	好	好	好	很好	很好	好	很好
除 气	很差	好	很差	很好	好	差	很好
碳 脱 氧	差	很好	差	很好	好	差	很好
去 硫	很好	好	差	差	好	很好	差
杂质挥发	很差	好	差	很好	差	好	很好
凝固控制	很差	很差	很差	很差	很差	很好	很好

3.2 铸 造

珠光体型耐热钢有良好的铸造性能。可用于生产需要铸造的部件。

高合金耐热钢及高温合金多采用精密铸造生产所需的铸件,如铁基、镍基和钴基合金铸造的涡轮叶片,增压器整体、涡轮等。

鉴于这类材料的冷、热加工工艺性能都很差,为了消除高温下晶界的弱化现象,发展出了定向结晶法、单晶法,这可以与合金设计成分相配合,采用定向共晶来强化合金。这些铸造工艺能提高合金的使用温度。

为使单相的铁素体钢、奥氏体钢和合金获得合适的初次晶粒度,只能在冶炼浇注时加入能细化晶粒的元素、铸型表面晶粒细化剂以及选择合金相应的凝固条件。

3.3 塑性变形加工

珠光体型耐热钢具有较好的塑性变形性能,可轧制、锻造成各种型材。铁素体型耐热钢可获得缺陷较少的钢锭,压力加工工艺性能也好。由于它有晶粒长大倾向,锻造时加热的上限温度必须严格控制。奥氏体-铁素体双相钢的塑性加工工艺性能较差,加工时易出现裂纹。奥氏体钢和合金的铸锭易产生诸如穿晶的柱状组织,偏析带过大和晶粒粗大等缺陷。由于奥氏体钢和合金的导热性差,膨胀系数大,热加工加热时须缓慢加热,否则可能引起内部裂纹。

还须指出,由于耐热钢和高温合金的热塑性变形抗力大,模锻叶片和涡轮盘要求有较高的模锻温度,且模锻温度范围较窄。

3.4 热处理

耐热钢和高温合金的组织、性能与热处理有密切关系,通过适宜的热处理工艺,可充分发挥材料的潜力。珠光体耐热钢通常在正火或调质状态下使用。马氏体耐热钢采用调质处理。正火或调质的目的是为了获得稳定的组织,良好的综合力学性能和高温强度。

铁素体钢不能通过热处理强化,只在 750—950℃ 下进行退火处理,退火后须快速冷却以避免 475℃ 脆性。

奥氏体钢和合金按其加工特点可分为冷变形、热变形和铸造三类合金。冷变形合金在固溶化状态或稳定化状态使用。退火是为了稳定