

DIHEJINNAIREGANG

低合金耐热钢

周 顺 深 编

上海人民出版

75.635
359
C.2

低合金耐热钢

周顺深 编

31485/1-7



内 容 提 要

本书根据国内生产和科研成果,并综合国外有关资料,介绍汽轮机、锅炉和燃气轮机用的新低合金耐热钢的成分、性能及其应用。对低合金耐热钢的一些基础理论问题,本书亦予述及。全书共分十一章,分别叙述低合金耐热钢的发展和应用、强化原理、合金元素对热强性的影响、组织因素与热强性的关系、钢在高温时的组织稳定性问题、低合金耐热钢高温性能、蠕变脆性、热疲劳、热处理基本原理以及破坏事故分析等内容。书末附有国外常用低合金耐热钢的简单介绍。

本书可供从事动力工业设计、工艺制造技术人员和科研人员以及耐热材料的冶金工作者参考,也可供电厂技术人员和高等院校有关专业师生参考。

低 合 金 耐 热 钢

周 顺 深 编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷三厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 10.25 字数 220,000

1976年8月第1版 1976年8月第1次印刷

统一书号: 15171·254 定价: 0.63 元

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

独立自主、自力更生

打破洋框框，走自己工业发展道路。

前 言

近三十年来，低合金耐热钢迅速发展，并广泛应用于动力、化工、石油等工业部门，尤其是在汽轮机和锅炉制造中，用量更大。

在毛主席的无产阶级革命路线指引下，我国在发展低合金耐热钢方面取得了可喜的成果。特别是无产阶级文化大革命以来，冶金和动力工业战线的广大革命工人、干部和技术人员，以阶级斗争为纲，坚持“独立自主、自力更生”的方针，贯彻执行“鞍钢宪法”，走我国自己工业发展的道路，结合国内资源情况，研制了一系列符合我国国情的低合金耐热钢，初步建立起我国自己的无铬、镍或少铬、镍的低合金耐热钢系统。不少新研制成功的低合金耐热钢的热强性超过了国外同类型钢种的水平，并且具有良好的工艺性能。这些钢种成功地应用于汽轮机、锅炉和燃气轮机设备中，促进了我国电力工业的迅速发展。

本书以汽轮机、锅炉和燃气轮机用低合金耐热钢为基本范围，收集了国内的生产和科研成果，并综合国外有关资料，试图加以总结和讨论，以有益于对低合金耐热钢的系统了解。

在编写本书的过程中，曾得到上海锅炉厂、上海钢铁研究所、上海材料研究所等单位有关同志的热情支持和帮助，在此谨致谢意。

本书在编写内容上注意了理论与实际相结合。但由于本人政治和业务水平不高，收集的资料不够全面，书中一定会有许多缺点和错误，殷切希望读者批评指正。

编 者 1975年10月

32565

目 录

第一章 概论	1
一、锅炉、汽轮机制造与金属材料的关系	1
二、低合金耐热钢的发展和我国的成就	3
三、低合金耐热钢的应用	8
1. 在锅炉设备中的应用	8
2. 在汽轮机中的应用	9
3. 在燃气轮机中的应用	9
4. 在化工、石油设备中的应用	10
5. 在核反应堆中的应用	12
6. 在火箭上的应用	12
第二章 国内低合金耐热钢的发展和应用	13
一、锅炉管子钢	13
1. 对锅炉管子钢的性能要求	13
2. 国内低合金管子钢使用状况	15
3. 国内新管子钢的发展和应用	18
4. 管子钢发展趋势	33
二、汽包用钢	35
三、紧固件用钢	39
1. 对紧固件钢的性能要求	39
2. 国内紧固件钢使用状况	40
3. 新紧固件钢的应用	42
四、转子(主轴和叶轮)用钢	52
1. 对转子(主轴和叶轮)用钢的性能要求	52
2. 转子(主轴和叶轮)用钢	53
3. 大锻件钢的发展	58

五、铸件用钢	60
1. 对铸件用钢的性能要求	60
2. 铸件用钢	60
六、叶片用钢	64
第三章 合金元素对低合金耐热钢热强性的影响	68
一、碳的影响	68
二、铬的影响	70
三、钼的影响	72
四、钨的影响	74
五、钒的影响	78
六、铌的影响	79
七、钛的影响	81
八、锆的影响	83
九、稀土元素的影响	84
十、硼的影响	86
十一、硅的影响	89
十二、锰的影响	90
十三、铝的影响	92
第四章 低合金耐热钢强化原理	94
一、固溶强化	94
二、碳化物相沉淀强化	99
三、晶界强化	103
第五章 低合金耐热钢组织因素与热强性的关系	105
一、金相组织对热强性的影响	105
二、晶粒度的作用	108
三、晶内嵌镶块的形成与强化	112
第六章 低合金耐热钢的组织稳定性	116
一、石墨化	116
二、球化	119

1. 球化过程	119
2. 对球化的影响因素	121
3. 球化对性能的影响	122
三、 α 固溶体中合金元素的贫化	125
四、在蠕变过程中碳化物析出相类型的转变	129
五、碳化物在晶内和沿晶界析出及其积聚	132
六、贝氏体组织的稳定性问题	133
第七章 低合金耐热钢高温性能	134
一、概述	134
二、蠕变	135
1. 蠕变曲线	135
2. 蠕变速度与应力的关系	136
3. 条件蠕变极限及其应用	136
三、持久强度	137
1. 持久强度的确定	138
2. 持久强度在设计计算中的应用	140
3. 对持久强度的若干影响因素	142
四、蠕变断裂理论	148
1. 应力集中理论	148
2. 空位理论	151
3. 晶界断裂发展过程的模型	153
4. 蠕变断裂理论在低合金耐热钢中的适用性	154
五、应力松弛	156
1. 松弛曲线及其特性指标	156
2. 应力松弛的外推	157
3. 合金元素对松弛稳定性的影响	160
4. 热处理对松弛稳定性的影响	163
5. 重复加载对松弛稳定性的影响	168
6. 松弛机理	169

六、氧化和腐蚀	170
1. 氧化	171
2. 腐蚀	177
第八章 低合金耐热钢的蠕变脆性	180
一、蠕变脆性基本概念	180
二、蠕变脆性的外推	184
三、金相组织与蠕变脆性的关系	185
四、化学成分对蠕变脆性的影响	188
五、热处理对蠕变脆性的影响	191
六、低合金耐热钢蠕变脆性的原因	194
第九章 低合金耐热钢的热疲劳	199
一、概述	199
二、实际工程中的热疲劳损坏现象	200
1. 燃气轮机零件的热疲劳	200
2. 汽轮机、锅炉设备中的热疲劳现象	202
三、热疲劳试验方法	205
1. 定性比较法	205
2. 定量测定法	208
四、热疲劳破裂寿命计算	209
五、低合金耐热钢的热疲劳强度	210
六、对低合金耐热钢热疲劳的各种影响因素	211
1. 热循环试验条件的影响	211
2. 冷作硬化的影响	213
3. 应力集中的影响	213
4. 显微组织变化的影响	215
七、热疲劳机理	215
1. 强化和“松动”理论	215
2. 热疲劳位错理论	216
第十章 低合金耐热钢热处理	218

一、低合金耐热钢过冷奥氏体等温转变·····	218
二、连续冷却时奥氏体转变的热动力学图·····	220
三、热处理参数对钢性能和组织变化的影响·····	223
1. 奥氏体化温度的影响 ·····	223
2. 奥氏体化后冷却速度的影响 ·····	225
3. 回火温度和回火时间的影响 ·····	229
四、低合金耐热钢的回火脆性·····	233
1. 回火脆性现象 ·····	233
2. 回火脆性本质 ·····	235
五、汽轮机、锅炉主要零部件的热处理 ·····	239
1. 锅炉管子的热处理 ·····	239
2. 紧固件的热处理 ·····	244
3. 汽轮机转子和主轴的热处理 ·····	252
4. 汽缸热处理 ·····	256

第十一章 汽轮机、锅炉主要零部件破坏事故分析·····260

一、管子爆破原因及其分析·····	260
1. 过热器管子的爆破 ·····	260
2. 导汽管的爆破 ·····	263
3. 水冷壁管的爆破 ·····	266
二、螺栓的脆性断裂·····	267
1. 概述 ·····	267
2. 螺栓脆断原因及其分析 ·····	269
3. 螺栓脆断的防止 ·····	276
三、转子(主轴和叶轮)破坏·····	279
1. 转子破坏事故分析 ·····	279
2. 转子脆性断裂的控制 ·····	282
四、汽轮机汽缸裂纹·····	293
1. 汽缸材料的脆性倾向 ·····	294
2. 汽缸温度交变热疲劳损坏 ·····	295

3. 汽缸铸造质量	295
4. 焊接的影响	296
5. 应力集中的影响	296
附: 国外低合金耐热钢的成分和性能	297
一、Mo 钢和 Cr-Mo 钢	297
二、Mo-V 钢	298
三、Cr-Mo-V 钢和 Cr-Mo-W-V 钢	298
四、Ni-Cr-Mo 钢和 Ni-Cr-Mo-V 钢	299

第一章 概 论

一、锅炉、汽轮机制造与金属材料的关系

提高锅炉、汽轮机组的蒸汽参数和单机容量是提高机组热效率的主要途径。同容量的锅炉、汽轮机组采用中压参数 (35 大气压、435℃) 时,其热效率为 25~26%;若采用高压参数 (90 大气压、500~535℃), 则其热效率可比中压机组增加 4~6%, 燃料可节省 12%;若采用超高压或超临界参数, 则机组热效率还可增加 5~8%, 燃料可再节省 6~7%。提高单机容量可使设备造价降低, 热效率也有所提高, 一台 20 万瓩机组每瓩造价要比 10 万瓩机组降低 20%。因此, 世界各国在设计锅炉、汽轮机组时均倾向于提高机组蒸汽参数和单机功率。图 1-1 表明了资

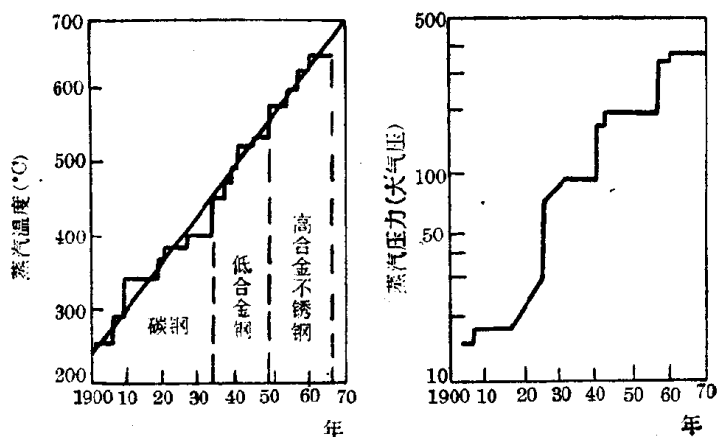


图 1-1 锅炉蒸汽温度、压力与使用材料的变化

本主义国家锅炉蒸汽温度和压力变化情况。目前世界上超临界机组最高参数为 352 大气压、649°C/566°C、566°C 二次再热,但这仅仅是少数几台。

在四十年代汽轮机组一般为低中压机组,高压机组还不多。五十至六十年代末,高压和超高压机组有显著增加,同时也出现了几台超临界机组。但是到目前为止,国外大多数机组的蒸汽参数实际上是停留在 540~570°C、130~240 大气压水平上,其中还有许多机组的蒸汽温度反而退回到 540°C,如美国在 1960~1962 年期间开始运行的 150 台大型锅炉设备中,有 107 台蒸汽温度为 538°C/538°C,占总数的 69%,而 43 台参数为 565°C/538°C,占总数的 28.7%。1963~1965 年期间运行的 43 台中,有 70% 机组为 538°C/538°C,23% 机组为 565°C/538°C。阻碍锅炉蒸汽温度提高的主要原因是由于缺乏既耐高温、工艺性能良好而又廉价的耐热材料。根据目前低合金 Cr-Mo-V 钢抗氧化性能和热强性水平,其最高工作温度为 565~580°C。国外当管子壁温在 600~650°C 时,过热器管子材料是采用 Cr-Ni 型奥氏体钢。但是奥氏体钢的价格比碳钢贵十倍以上,为低合金耐热钢价格的 3~7 倍,因而使电站设备价格急剧上升,提高了电站设备的成本费用,同时奥氏体钢的工艺性能比低合金耐热钢差,故国外在选用锅炉过热器管子钢时都力图避免使用奥氏体钢。

蒸汽参数的提高和单机功率大容量化是目前火力发电设备的一个发展趋向,但是由于缺乏便宜而又能满足性能要求的耐热材料,造成蒸汽温度停留在 540~570°C 水平上。若有合适而廉价的耐热钢,则锅炉蒸汽温度的提高是必然的。

解放后在党和毛主席的英明领导下,我国锅炉、汽轮机制造业有了很大的发展。目前国内锅炉、汽轮机组的生产情况列于

表 1-1。我国自 1954 年生产中压机组以来，在短短十几年内，能够自行设计、制造亚临界参数的 30 万千瓦火力发电机组，其发展速度之快是相当惊人的。为了使我国锅炉、汽轮机组蒸汽温度提高到 570°C 以上，尚须进一步研究解决其汽轮机转子、叶轮、汽缸以及锅炉高温段过热器管子用的低合金耐热钢。

表 1-1 国内锅炉汽轮机组制造状况

机 组 类 型	主 要 蒸 汽 参 数			配 用 机 组 (万千瓦)
	蒸 发 量 (吨/小时)	蒸 汽 压 力 (公斤/厘米 ²)	蒸 汽 温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	
高 压 锅 炉	220~230	100	540	5.0
高 压 锅 炉	410	100	540	10.0
超 高 压 锅 炉	400	140	550~555	12.5
超 高 压 锅 炉	674	140	540	20.0
亚 临 界 锅 炉	935	170	570	30.0

二、低合金耐热钢的发展和我国的成就

低合金耐热钢的兴起只是本世纪三十年代的事。随着航空、化工、石油和动力工业迅速发展，要求其零部件在更高温度下工作。为了满足这些工业发展的需要，冶金工作者在低碳钢基础上创造了一系列具有足够高持久强度和抗氧化性能良好的低合金耐热钢。图 1-2 表示了低合金钢持久强度与温度间的关系。碳钢一般工作温度在 $450\sim 480^{\circ}\text{C}$ 以下，0.5%Mo 钢出现后使工作温度提高到 500°C 左右，0.5%Mo 钢在 $450\sim 520^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的持久强度比碳钢高 1.5~2.0 倍。低合金 1%Cr-Mo 钢和 Mo-V 钢的持久强度远高于碳钢和 Mo 钢，其工作温度为 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ ，至今还大量应用于锅炉和汽轮机零部件中。随着 2¹/₄Cr-1Mo 钢、1%Cr-Mo-V 钢和 3%Cr-Mo-W-V 钢出现，其

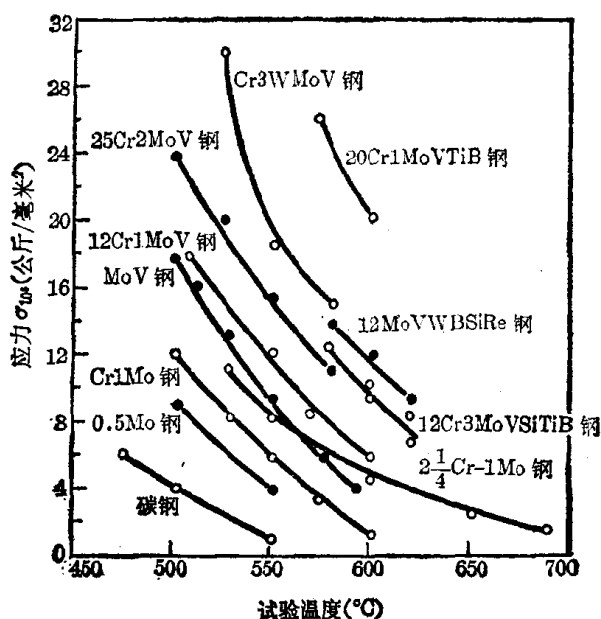


图 1-2 低合金耐热钢持久强度与温度的关系

最高工作温度可达 560~580°C，这些钢目前在锅炉、汽轮机和燃气轮机中已获得广泛应用。为了进一步提高低合金耐热钢的热强性和改善抗氧化性能，现在低合金耐热钢有向多组元合金化方向发展的趋势。许多工作表明：低合金耐热钢的工作温度有可能再提高 40~50°C，在这方面国内外都进行了大量的试验研究工作，我国已研究出几种工作温度在 600~620°C 的新低合金耐热钢。

随着我国动力工业的发展，为了适应锅炉蒸汽温度提高的需要，广大革命工人和技术人员结合我国资源情况开展了新低合金耐热钢的试验研究工作。在毛主席革命路线指引下，特别是在无产阶级文化大革命运动中，对新钢种的研究取得了显著的成果。锅炉设备用新钢种主要是研究汽包钢板材料和锅炉管

子用钢；汽轮机用新低合金耐热钢着重研究蒸汽温度 570°C 时的螺栓钢、大型汽轮机转子钢和汽缸铸件钢等。

普通低合金钢除了在化工、石油等部门广泛使用外，在锅炉设备中也获得了应用，它主要是用作锅炉汽包钢板。我国已成功使用的有：15MnV 钢用于中压锅炉汽包，14MnMoV 钢用于 20 万瓩超高压锅炉汽包。国内锅炉用管子钢的研究，其主要中心是将低合金耐热钢管的工作温度提高到 $600\sim 620^{\circ}\text{C}$ 左右。我国研究成功了用于温度 $600\sim 620^{\circ}\text{C}$ 的管子钢 12Cr3MoVSiTiB (II1) 钢和 12Cr2MoWVB 钢 (钢 102)，该二钢种的热强性均超过国外同类型低合金耐热钢，现已用于锅炉过热器和再热器管子。工作温度在 580°C 以下的过热器管子用钢，国内已建立起无铬低合金耐热钢系统，这些钢种有：15MnV、12MnMoV、13SiMnWVB (无铬 7 号)、12MoVWBSiRe (无铬 8 号) 等新钢种。12MnMoV 钢在 550°C 有较高的持久强度，其抗氧化性能与 15CrMo 钢相似，可代用 15CrMo 管子钢。在管子壁温 580°C 以下可用 12MoVWBSiRe 钢代 12Cr1MoV 钢作小口径过热器管子；可用 13SiMnWVB 钢代 12Cr1MoV 钢作大口径钢管。另外，汽轮机用新钢种研究成功的有：20Cr1Mo1VNbTiB (争气 1 号) 和 20Cr1Mo1VTiB (争气 2 号) 新螺栓钢，该二钢种在 570°C 不仅具有高的热强性和松弛稳定性，而且具有小的持久缺口敏感性，现已用于 30 万瓩和 20 万瓩汽轮机组螺栓材料。关于 570°C 汽缸铸件用钢和大型汽轮机转子用钢，国内在进行试验研究，并取得了一定的成果。

前一个时期，国外在汽轮机、锅炉和燃气轮制造中所使用的低合金耐热钢基本上是 CrMo、CrMoV 和 3%CrMoWV 等成熟钢种，对低合金耐热钢的试验研究主要侧重于总结在电站运行的经验，在钢种热强性评定方面积累长期试验数据，以验证外

推法的正确程度,并为强度设计提供正确的依据;在基础理论方面特别注意金相组织、碳化物颗粒大小和弥散程度等组织因素对热强性的影响,并改变热处理参数来控制这些因素的变化,以期指导选择正确的热处理规范。此外,还研究大型汽轮机转子钢的冶金和热加工等工艺性能,以获得优质的转子钢。近年来,国外也研究了一些新低合金耐热钢,其成分和性能列于表 1-2。当锅炉管子壁温 $600\sim 620^{\circ}\text{C}$ 时,过热器管子钢国外最初是用奥氏体耐热钢,现在除了研究 12%Cr-Mo-V 钢系统外,还发展了 6%Cr-Mo-W-V-Ti 钢,该钢在 593°C 持久强度与 Cr18Ni12Nb1 奥氏体钢的持久强度水平相似,具有比较满意的加工工艺和焊接工艺性能。最近也有向低合金耐热钢发展的趋势。日本在 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢基础上添加 Co、Nb、Ti、B 元素发展一种用于 600°C 的管子钢^①,其 600°C 持久强度 $\sigma_{10^5}=11.3$ 公斤/毫米²,比 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢持久强度高 2.6 倍。该钢种目前还处于试验室阶段。苏联研究的 12X2MΦCP 钢企图用于 $600\sim 620^{\circ}\text{C}$ 过热器材料,但该钢在 620°C 持久强度 $\sigma_{10^5}=4.5\sim 5.6$ 公斤/毫米²,抗氧化性能氧化深度为 0.168 毫米/年,根据现有性能尚不能满足壁温 620°C 过热器管子设计技术指标要求。此外,国外也在试制价格低廉、工艺性能良好的低合金耐热钢。英国发展了一种比较经济的管子材料^②,在 1.2%Cr-1%Mo-V 钢基础上降低 Cr、Mo 含量,增加 Mn 含量,此新钢种定名为 Ducolw30。该钢在 524°C 持久强度 $\sigma_{10^5}=18.8$ 公斤/毫米², 570°C 持久强度 $\sigma_{10^5}=6.1$ 公斤/毫米²。最近日本研究了二种无 Cr、Ni 的 Mn-Mo-V 和 Mn-Mo-V-B 低合金耐热钢^③。试验表明:该二钢种 500°C

① 田野崎和夫,铁と钢,1971, V57, No. 2, p. 367.

② J. Lessels, Joint Conference "High temperature properties of steel" April, 1966, p. 16.

③ 三好荣次,行俊照夫,吉川州彦,铁と钢,1970, V56, No. 4, s. 218.