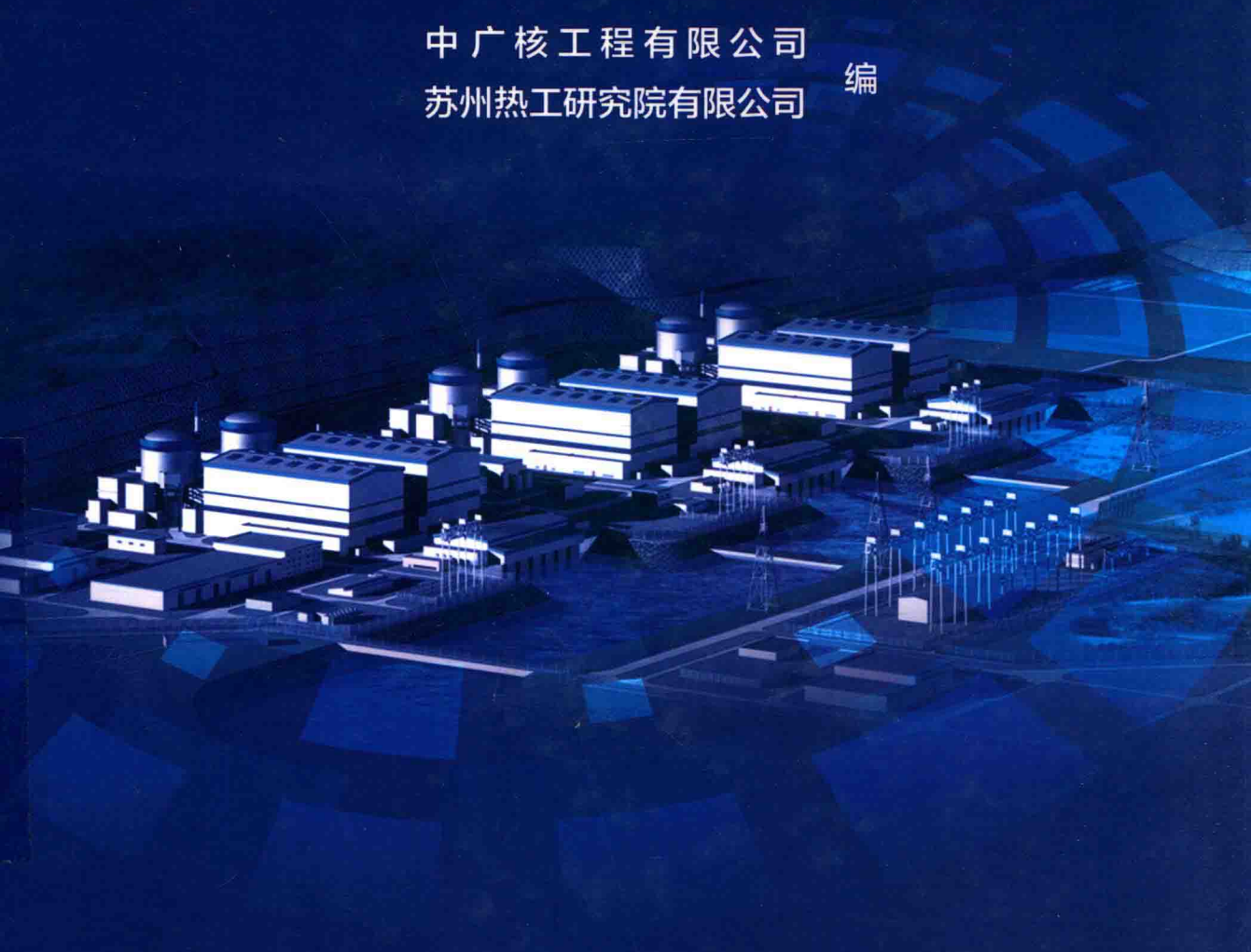


# 核电厂 金属材料手册

中广核工程有限公司 编  
苏州热工研究院有限公司



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

---

# 核电厂 金属材料手册

---

中广核工程有限公司  
苏州热工研究院有限公司

编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

《核电厂金属材料手册》是中广核核电设备自主化和国产化科研成果的重要组成部分,充分反映了近年来关键设备金属材料国产化工作所取得的成绩和宝贵经验,顺应了当前国内核电行业发展的需求。本手册以 CPR1000 堆型为基础,对核电厂金属材料的使用进行全面归纳总结,通过解剖核电厂设备,收集目前已掌握核电厂金属材料役前及在役的性能数据,并对 RCC-M、ASME、俄罗斯核电规范、国内相应标准等进行比较,解析设备用各项材料性能数据与国内外相关标准要求,为核电厂金属材料选材提供参考。

本手册在内容上力求可靠、准确、简明和实用,对重要金属材料化学成分及力学性能进行对比分析,突出金属材料的技术条件、工艺性能和使用性能。同时也将服役核电厂设备的失效案例作为重要内容,对核电厂设计、制造、安装、运行和检修不同阶段金属材料相关典型质量问题进行经验反馈,兼备“经验反馈手册”的作用。

本书可供从事核电厂设计、制造、安装、调试、运行和检修工作的技术人员学习使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

核电厂金属材料手册/中广核工程有限公司,苏州热工研究院有限公司编. —北京:中国电力出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5198-0596-8

I. ①核… II. ①中… ②苏… III. ①核电厂—金属材料—手册 IV. ①TG14-62 ②TM623.4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067075 号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:郑艳蓉(010—63412379) 杨 帆(010—63412747)

责任校对:闫秀英 常燕昆

装帧设计:左 铭

责任印制:蔺义舟

---

印 刷:北京盛通印刷股份有限公司

版 次:2017 年 8 月第一版

印 次:2017 年 8 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:34

字 数:803 千字

印 数:0001—2000 册

定 价:188.00 元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

## 编 委 会

主 编 束国刚

副主编 上官斌 范立明 薛 飞 赵彦芬

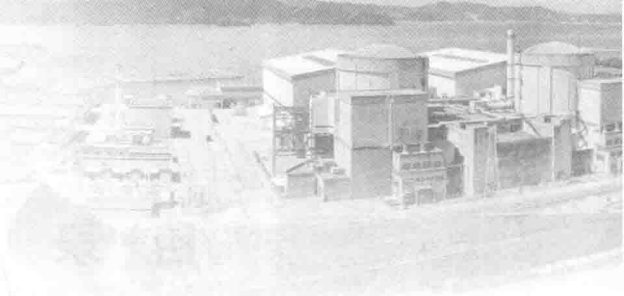
参 编 (按姓氏笔画排列)

王小刚 王永姣 孙 奇 李予卫

邱振生 吴义党 陈忠兵 张 路

林继德 罗志峰 姜家旺 段远刚

逯文新 雷中黎 蒙新明



发展核能在应对全球气候变化、发展低碳经济、优化能源结构等方面的重要性日益凸显，推进核电建设是我国能源中长期发展的重要方向。金属材料是核电工程设备的基础，特别是核岛一回路压力边界设备和常规岛主设备金属材料，其质量和性能的稳定性对核电厂的安全性和使用寿命极其重要。

作为目前全球在建核电机组规模最大的专业化核电工程管理公司，中广核工程有限公司在核电厂批量化建设以及自主化研发过程中积累了大量金属材料的经验和数据，同时苏州热工研究院也参与了金属材料评定和性能研究工作。为了进一步提高核电机组的设计、制造、安装、运行和检修等各个环节的全过程金属材料管理水平，充分发掘在役机组金属材料的可用潜力，有效延长其使用寿命，同时也为正在推进中的自主三代核电技术提供参考数据，中广核工程有限公司与苏州热工研究院联合编写了这本《核电厂金属材料手册》，以供从事核电厂研发、设计、制造、安装、运行和检修工作者查阅和使用。

本手册内容共分 13 章。第 1 章介绍金属材料基础知识；第 2 章介绍核级设备用铸件；第 3 章介绍核级设备用锻件；第 4 章介绍核级板材；第 5 章介绍核级管材；第 6 章介绍核级热交换器传热管；第 7 章介绍核级设备用棒材；第 8 章介绍燃料包壳和燃料格架用金属材料；第 9 章介绍堆内构件、控制棒驱动机构和主设备支承用金属材料；第 10 章介绍汽轮机和发电机用铸锻件；第 11 章介绍常规岛及电厂辅助系统金属材料，包括汽水分离再热器、凝汽器、加热器、除氧器、泵、阀门和管道；第 12 章介绍核级设备用焊接填充材料，包括核级设备用焊接填充材料的分类、成分与性能、质量管理与经验反馈；第 13 章主要介绍 EPR、AP1000、高温气冷堆、华龙一号等先进核电堆型的金属材料性能特点。其中第 2~10 章的内容主要包括工作条件及用材要求、材料性能数据、部件的制造工艺及力学性能和经验反馈。

本手册的顺利成稿，感谢中国广核电力股份有限公司何大波、刘峤、孙峰、张瑜、刘飞华、刘彦章、尹长泉、石英、杨志鹏、乔木和张微啸，以及苏州热工研究院有限公司张国栋、余伟炜、李成涛、牛绍蕊、王宝亮、李燕、朱平、罗坤杰、史芳杰、钱王洁、徐超亮和关商心的支持与帮助。

希望这本手册能为广大热爱和从事核电事业的人士提供有益的知识和借鉴，为我国核电专业队伍的成长及核电建设做出贡献。

由于编写人员的工作经验和水平所限，本手册难免存在纰漏，敬请广大读者批评指正。

《核电厂金属材料手册》编委会

2017 年 5 月

前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 金属材料基础知识 .....                | 1  |
| 第 1 节 铁碳相图及钢的基本组织介绍 .....           | 1  |
| 1.1.1 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图 ..... | 1  |
| 1.1.2 钢的基本组织 .....                  | 3  |
| 第 2 节 钢中的合金元素 .....                 | 6  |
| 1.2.1 合金元素在钢中的分布 .....              | 6  |
| 1.2.2 合金元素的作用 .....                 | 6  |
| 1.2.3 合金元素在钢中的主要强化机制 .....          | 11 |
| 第 3 节 钢的热处理 .....                   | 13 |
| 1.3.1 钢的退火与正火 .....                 | 14 |
| 1.3.2 钢的淬火与回火 .....                 | 14 |
| 1.3.3 钢的形变热处理 .....                 | 15 |
| 1.3.4 钢的表面热处理 .....                 | 15 |
| 1.3.5 钢的化学热处理 .....                 | 16 |
| 第 4 节 金属的物理性能 .....                 | 17 |
| 第 5 节 金属的化学性能 .....                 | 19 |
| 1.5.1 化学腐蚀 .....                    | 19 |
| 1.5.2 电化学腐蚀 .....                   | 19 |
| 1.5.3 腐蚀率 .....                     | 20 |
| 第 6 节 金属的力学性能 .....                 | 21 |
| 第 7 节 金属的焊接性能 .....                 | 26 |
| 1.7.1 金属的焊接性 .....                  | 26 |
| 1.7.2 焊接接头热影响区的基本组织 .....           | 26 |
| 1.7.3 焊接裂纹 .....                    | 27 |
| 第 8 节 材料的辐照效应 .....                 | 28 |
| 1.8.1 辐照损伤类型 .....                  | 28 |
| 1.8.2 辐照损伤机理 .....                  | 29 |
| 1.8.3 辐照效应 .....                    | 30 |
| 第 9 节 金属材料选用原则 .....                | 31 |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 第 10 节 钢铁材料的分类和编号 .....                                        | 32        |
| 1.10.1 中国钢铁材料的分类和编号 .....                                      | 32        |
| 1.10.2 法国钢铁材料分类和编号 .....                                       | 39        |
| 1.10.3 美国钢铁材料分类和编号 .....                                       | 41        |
| 参考文献 .....                                                     | 43        |
| <b>第 2 章 核级设备用铸件 .....</b>                                     | <b>44</b> |
| 第 1 节 工作条件及用材要求 .....                                          | 44        |
| 第 2 节 材料性能数据 .....                                             | 45        |
| 2.2.1 Z3CN20.09M、CF3/CF3A、ZG04Cr20Ni9 .....                    | 45        |
| 2.2.2 23M5M、20CD4M 及 ZG23Mn、ZG20CrMnMo .....                   | 51        |
| 2.2.3 20MN5M、ZG270-480H .....                                  | 55        |
| 2.2.4 FGS Ni20Cr2、A439 Gr. D-2、QTANi 20Cr2 .....               | 59        |
| 2.2.5 20M5M、ZG235-470 .....                                    | 61        |
| 2.2.6 Z5CND13.04、Z5CN12.01、ZG06Cr13Ni4Mo 和 ZG08Cr12Ni1 .....   | 64        |
| 第 3 节 实际部件的制造工艺及力学性能 .....                                     | 67        |
| 2.3.1 Z3CN20.09M .....                                         | 67        |
| 2.3.2 23M5M .....                                              | 77        |
| 第 4 节 经验反馈 .....                                               | 77        |
| 参考文献 .....                                                     | 79        |
| <b>第 3 章 核级设备用锻件 .....</b>                                     | <b>80</b> |
| 第 1 节 工作条件及用材要求 .....                                          | 80        |
| 第 2 节 材料性能数据 .....                                             | 82        |
| 3.2.1 16MND5、A508 Gr. 3 Class1、16MnNiMo .....                  | 82        |
| 3.2.2 18MND5、18MnNiMo .....                                    | 90        |
| 3.2.3 Z6CNNb18.11、347、06Cr18Ni11Nb .....                       | 98        |
| 3.2.4 30M5、25NCD8.05、20NCD8.06、30Mn、25CrNi2Mo、20Cr2Mn2Mo ..... | 106       |
| 3.2.5 X2CrNiMo18.12 (控氮)、026Cr18Ni12Mo2N、TP316LN .....         | 110       |
| 第 3 节 实际部件的制造工艺及力学性能 .....                                     | 112       |
| 3.3.1 16MND5 .....                                             | 112       |
| 3.3.2 18MND5 .....                                             | 125       |
| 3.3.3 Z6CNNb18.11 .....                                        | 127       |
| 3.3.4 30M5 .....                                               | 128       |
| 第 4 节 经验反馈 .....                                               | 129       |
| 3.4.1 反应堆压力容器堆芯筒体中子辐照脆化 .....                                  | 129       |
| 3.4.2 反应堆顶盖硼酸腐蚀 .....                                          | 131       |
| 参考文献 .....                                                     | 132       |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 第4章 核级板材                                    | 133 |
| 第1节 工作条件及用材要求                               | 133 |
| 第2节 材料性能数据                                  | 134 |
| 4.2.1 P265GH、Q265HR                         | 134 |
| 4.2.2 16MND5、A533-B Class1、16MnNiMoHR       | 138 |
| 4.2.3 18MND5、18MnNiMoHR                     | 146 |
| 4.2.4 Z10C13                                | 150 |
| 4.2.5 Z2CND18-12 (控氮)、026Cr18Ni12Mo2N、316LN | 152 |
| 第3节 实际部件的制造工艺及力学性能                          | 155 |
| 第4节 经验反馈                                    | 155 |
| 参考文献                                        | 156 |
| 第5章 核级管材                                    | 157 |
| 第1节 工作条件及用材要求                               | 157 |
| 5.1.1 工作条件                                  | 157 |
| 5.1.2 用材要求                                  | 157 |
| 第2节 材料性能数据                                  | 166 |
| 5.2.1 Z2CN18.10、022Cr19Ni10、304L            | 166 |
| 5.2.2 Z2CND17.12、022Cr17Ni12Mo2             | 168 |
| 5.2.3 Z2CND18.12N、026Cr18Ni12Mo2N           | 171 |
| 5.2.4 Z2CN19.10N、026Cr19Ni10N               | 175 |
| 5.2.5 Z6CND17.12、06Cr17Ni12Mo2              | 177 |
| 5.2.6 NC30Fe、NS3105                         | 179 |
| 5.2.7 TU42C                                 | 180 |
| 5.2.8 TU48C、16Mn                            | 181 |
| 5.2.9 TUE250、P265GH                         | 186 |
| 5.2.10 P280GH                               | 189 |
| 第3节 实际部件的制造工艺及力学性能                          | 190 |
| 5.3.1 Z2CN18.10                             | 190 |
| 5.3.2 Z2CND17.12                            | 191 |
| 5.3.3 Z2CND18.12N                           | 191 |
| 5.3.4 TU42C                                 | 193 |
| 5.3.5 TUE250                                | 194 |
| 5.3.6 P280GH                                | 194 |
| 第4节 经验反馈                                    | 197 |
| 5.4.1 管道热疲劳失效                               | 197 |
| 5.4.2 管道应力腐蚀开裂失效                            | 200 |
| 参考文献                                        | 202 |

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 第 6 章 核级热交换器传热管 .....                                 | 203 |
| 第 1 节 工作条件及用材要求 .....                                 | 203 |
| 6.1.1 蒸汽发生器传热管 .....                                  | 203 |
| 6.1.2 核级热交换器传热管 .....                                 | 203 |
| 6.1.3 核级热交换器用管材常见材料 .....                             | 204 |
| 第 2 节 材料性能数据 .....                                    | 205 |
| 6.2.1 Tu42C、P265GH .....                              | 205 |
| 6.2.2 Z2CN18.10、022Cr19Ni10、TP304L .....              | 207 |
| 6.2.3 NC30Fe、UNS N06690、NS3105 .....                  | 214 |
| 第 3 节 实际部件的制造工艺及力学性能 .....                            | 227 |
| 6.3.1 TU42C .....                                     | 227 |
| 6.3.2 00Cr19Ni10 .....                                | 228 |
| 6.3.3 NC30Fe .....                                    | 230 |
| 第 4 节 经验反馈 .....                                      | 231 |
| 6.4.1 蒸汽发生器传热管磨损泄漏 .....                              | 231 |
| 6.4.2 高温核取样冷却器传热管泄漏 .....                             | 231 |
| 参考文献 .....                                            | 232 |
| 第 7 章 核级设备用棒材 .....                                   | 233 |
| 第 1 节 工作条件及用材要求 .....                                 | 233 |
| 第 2 节 材料性能数据 .....                                    | 235 |
| 7.2.1 42CrMo4、42CrMoE、42CrMo .....                    | 235 |
| 7.2.2 X6NiCrTiMoVB25-15-2、06Cr15Ni25Ti2MoAlVB .....   | 237 |
| 7.2.3 40NCDV7.03、40CrNi2MoV .....                     | 240 |
| 7.2.4 42CDV4、40CrMoV .....                            | 242 |
| 7.2.5 C45E、C45R、45 碳钢 .....                           | 245 |
| 7.2.6 40NCD7.03、40CrNi2Mo .....                       | 252 |
| 7.2.7 X6CrNiMo16.4、05Cr16Ni4Mo .....                  | 256 |
| 7.2.8 X6CrNiCu17.04、05Cr17Ni4Cu4Nb .....              | 257 |
| 7.2.9 Z6CN18.10、Z5CN18.10、Z6CND17.12、Z5CND17.12 ..... | 269 |
| 7.2.10 Z2CND18.12、026Cr18Ni12Mo2N .....               | 276 |
| 7.2.11 NC30Fe、NS3105 .....                            | 277 |
| 7.2.12 A48、16Mn .....                                 | 278 |
| 第 3 节 实际部件的制造工艺及力学性能 .....                            | 279 |
| 7.3.1 40NCDV7.03 .....                                | 279 |
| 7.3.2 42CDV4 .....                                    | 281 |
| 7.3.3 C45E .....                                      | 284 |
| 7.3.4 X6CrNiCu17.04 .....                             | 286 |

|                                                      |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| 7.3.5 X6NiCrTiMoVB25-15-2 .....                      | 286        |
| 第4节 经验反馈 .....                                       | 287        |
| 参考文献 .....                                           | 289        |
| <b>第8章 燃料包壳和燃料格架用金属材料 .....</b>                      | <b>290</b> |
| 第1节 工作条件及用材要求 .....                                  | 290        |
| 8.1.1 燃料包壳 .....                                     | 290        |
| 8.1.2 燃料包壳常用材料 .....                                 | 291        |
| 8.1.3 高密度乏燃料储存格架 .....                               | 293        |
| 8.1.4 高密度乏燃料储存格架常用材料 .....                           | 294        |
| 第2节 材料性能数据 .....                                     | 295        |
| 8.2.1 Zr-4、UNS R60804 .....                          | 295        |
| 8.2.2 X2CrNi18-9 .....                               | 314        |
| 第3节 实际部件的制造工艺及力学性能 .....                             | 315        |
| 8.3.1 Zr-4 .....                                     | 315        |
| 8.3.2 X2CrNi18-9 .....                               | 317        |
| 第4节 经验反馈 .....                                       | 318        |
| 参考文献 .....                                           | 319        |
| <b>第9章 堆内构件、控制棒驱动机构和主设备支承用金属材料 .....</b>             | <b>321</b> |
| 第1节 工作条件及用材要求 .....                                  | 321        |
| 9.1.1 堆内构件 .....                                     | 321        |
| 9.1.2 控制棒驱动机构 .....                                  | 321        |
| 9.1.3 蒸汽发生器和主泵支承用核级金属材料 .....                        | 322        |
| 第2节 材料性能数据 .....                                     | 324        |
| 9.2.1 Z2CN19.10 N. S、022Cr19Ni10N、026Cr19Ni10N ..... | 324        |
| 9.2.2 Z3CN18.10 N. S、022Cr19Ni10N .....              | 332        |
| 9.2.3 Z2CN18.10、304L .....                           | 335        |
| 9.2.4 NC15Fe、NS3102 .....                            | 339        |
| 9.2.5 Z12CN13、12Cr13NiMo .....                       | 345        |
| 9.2.6 Z6CND17.12、06Cr17Ni12Mo2 .....                 | 350        |
| 9.2.7 X12Cr13、12Cr13 .....                           | 353        |
| 9.2.8 12MDV6、ZG12MnMoV .....                         | 363        |
| 9.2.9 20NCD12、20Cr2Ni3Mo .....                       | 364        |
| 第3节 实际部件的制造工艺及力学性能 .....                             | 365        |
| 9.3.1 Z2CN19.10N. S .....                            | 365        |
| 9.3.2 Z3CN18.10N. S .....                            | 372        |
| 9.3.3 NC15Fe .....                                   | 375        |
| 9.3.4 Z12CN13 .....                                  | 377        |

|          |            |     |
|----------|------------|-----|
| 9.3.5    | Z6CND17.12 | 380 |
| 9.3.6    | 12MDV6     | 382 |
| 9.3.7    | 20NCD12    | 383 |
| 第4节 经验反馈 |            | 384 |
| 参考文献     |            | 385 |

## 第10章 汽轮机和发电机用铸锻件 386

|                    |                               |     |
|--------------------|-------------------------------|-----|
| 第1节 工作条件及用材要求      |                               | 386 |
| 10.1.1             | 汽轮机缸体                         | 386 |
| 10.1.2             | 汽轮机叶片                         | 387 |
| 10.1.3             | 汽轮机转子                         | 388 |
| 10.1.4             | 发电机转子                         | 388 |
| 10.1.5             | 发电机护环                         | 388 |
| 第2节 材料性能数据         |                               | 392 |
| 10.2.1             | G18CrMo2-6、ZG20CrMo、Gr.5      | 392 |
| 10.2.2             | G17CrMo9-10                   | 393 |
| 10.2.3             | ZG15Cr2Mo1、A356 Gr.10、WC9     | 393 |
| 10.2.4             | GX8CrNi12                     | 396 |
| 10.2.5             | 1Cr12Mo                       | 396 |
| 10.2.6             | X20Cr13                       | 397 |
| 10.2.7             | X5CrMoAl12                    | 398 |
| 10.2.8             | X12CrNiMoV12-2                | 398 |
| 10.2.9             | 1Cr12Ni2W1Mo1V、14Cr12Ni2W1MoV | 400 |
| 10.2.10            | 2Cr12NiMo1W1V、22Cr12NiW1MoV   | 402 |
| 10.2.11            | STM 528                       | 404 |
| 10.2.12            | 26NiCrMoV10-10                | 404 |
| 10.2.13            | B65A-S                        | 405 |
| 10.2.14            | 26NiCrMoV14-5                 | 405 |
| 10.2.15            | 30Cr2Ni4MoV、A470 Gr.C         | 406 |
| 10.2.16            | 25Cr2Ni4MoV                   | 409 |
| 10.2.17            | 26NiCrMo12-6                  | 413 |
| 10.2.18            | 1Mn18Cr18N、A289 Cl.C          | 414 |
| 第3节 实际部件的制造工艺及力学性能 |                               | 420 |
| 10.3.1             | G18CrMo2-6                    | 420 |
| 10.3.2             | G17CrMo9-10                   | 422 |
| 10.3.3             | GX8CrNi12                     | 422 |
| 10.3.4             | X20Cr13                       | 422 |
| 10.3.5             | X5CrMoAl12                    | 423 |
| 10.3.6             | X12CrNiMoV12-2                | 424 |

|         |                      |     |
|---------|----------------------|-----|
| 10.3.7  | 1Cr12Ni2W1Mo1V ..... | 425 |
| 10.3.8  | STM528 .....         | 426 |
| 10.3.9  | 26NiCrMoV10-10 ..... | 427 |
| 10.3.10 | B65A-S .....         | 428 |
| 10.3.11 | 26NiCrMoV14-5 .....  | 428 |
| 10.3.12 | 25Cr2Ni4MoV .....    | 429 |
| 10.3.13 | 26NiCrMo12-6 .....   | 429 |
| 10.3.14 | 1Mn18Cr18N .....     | 430 |
| 第4节     | 经验反馈 .....           | 431 |
| 10.4.1  | 汽轮机叶片侵蚀 .....        | 431 |
| 10.4.2  | 汽轮机叶轮应力腐蚀 .....      | 432 |
| 10.4.3  | 汽轮机叶片疲劳 .....        | 433 |
| 10.4.4  | 汽轮机叶片振动 .....        | 434 |
| 参考文献    | .....                | 435 |
| 第11章    | 常规岛及电厂辅助系统金属材料 ..... | 437 |
| 第1节     | 汽水分离再热器 .....        | 437 |
| 11.1.1  | 工作条件 .....           | 437 |
| 11.1.2  | 用材要求 .....           | 437 |
| 11.1.3  | 常用材料 .....           | 438 |
| 第2节     | 凝汽器 .....            | 439 |
| 11.2.1  | 工作条件 .....           | 439 |
| 11.2.2  | 用材要求 .....           | 440 |
| 11.2.3  | 常用材料 .....           | 440 |
| 第3节     | 加热器 .....            | 441 |
| 11.3.1  | 工作条件 .....           | 441 |
| 11.3.2  | 用材要求 .....           | 442 |
| 11.3.3  | 常用材料 .....           | 442 |
| 第4节     | 除氧器 .....            | 444 |
| 11.4.1  | 工作条件 .....           | 444 |
| 11.4.2  | 用材要求 .....           | 444 |
| 11.4.3  | 常用材料 .....           | 445 |
| 第5节     | 泵 .....              | 446 |
| 11.5.1  | 工作条件 .....           | 446 |
| 11.5.2  | 用材要求 .....           | 446 |
| 11.5.3  | 常用材料 .....           | 446 |
| 第6节     | 阀门 .....             | 448 |
| 11.6.1  | 工作条件 .....           | 448 |
| 11.6.2  | 用材要求 .....           | 449 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 11.6.3 常用材料 .....             | 449        |
| 第7节 管道 .....                  | 454        |
| 11.7.1 工作条件 .....             | 454        |
| 11.7.2 用材要求 .....             | 454        |
| 11.7.3 常用材料 .....             | 455        |
| 第8节 经验反馈 .....                | 457        |
| 参考文献 .....                    | 462        |
| <b>第12章 核级设备用焊接填充材料 .....</b> | <b>463</b> |
| 第1节 核级设备用焊接填充材料的分类 .....      | 463        |
| 12.1.1 碳钢焊接填充材料 .....         | 463        |
| 12.1.2 低合金钢焊接填充材料 .....       | 464        |
| 12.1.3 不锈钢焊接填充材料 .....        | 464        |
| 12.1.4 镍基合金焊接填充材料 .....       | 465        |
| 12.1.5 钴基合金焊接填充材料 .....       | 466        |
| 第2节 核级设备用焊接填充材料的成分与性能 .....   | 466        |
| 12.2.1 碳钢焊条 .....             | 466        |
| 12.2.2 低合金钢焊条 .....           | 467        |
| 12.2.3 不锈钢焊条 .....            | 470        |
| 12.2.4 镍基合金焊条 .....           | 472        |
| 12.2.5 碳钢气体保护电弧焊药芯焊丝 .....    | 474        |
| 12.2.6 MAG焊用碳钢焊丝 .....        | 475        |
| 12.2.7 TIG焊用碳钢焊丝 .....        | 476        |
| 12.2.8 低合金钢气体保护电弧焊药芯焊丝 .....  | 477        |
| 12.2.9 不锈钢钨极气体保护电弧焊焊丝 .....   | 478        |
| 12.2.10 镍基合金钨极气体保护电弧焊焊丝 ..... | 480        |
| 12.2.11 埋弧焊用碳钢焊丝及焊剂 .....     | 482        |
| 12.2.12 埋弧焊用低合金钢焊丝及焊剂 .....   | 484        |
| 12.2.13 埋弧焊用不锈钢焊丝及焊剂 .....    | 487        |
| 12.2.14 堆焊用不锈钢焊带及焊剂 .....     | 489        |
| 12.2.15 镍基合金堆焊用焊带和焊剂 .....    | 490        |
| 12.2.16 堆焊用钴基合金焊条 .....       | 492        |
| 12.2.17 堆焊用钴基合金焊丝和填充丝 .....   | 493        |
| 第3节 核级设备用焊接填充材料的质量管理 .....    | 494        |
| 12.3.1 焊接材料的评定 .....          | 494        |
| 12.3.2 焊接材料的验收 .....          | 498        |
| 12.3.3 焊接材料的储存 .....          | 503        |
| 12.3.4 焊接填充材料的使用 .....        | 504        |
| 第4节 焊接填充材料使用经验反馈案例 .....      | 505        |

|                                                  |                             |            |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|------------|
| 12.4.1                                           | 压力容器接管安全端在高温水环境中的腐蚀失效 ..... | 505        |
| 12.4.2                                           | 安全端异种钢接头外壁开裂 .....          | 506        |
| 参考文献 .....                                       |                             | 507        |
| <b>第 13 章 EPR、AP1000、高温气冷堆、华龙一号主要用材的介绍 .....</b> |                             | <b>508</b> |
| 第 1 节 EPR 机组主要用材 .....                           |                             | 508        |
| 13.1.1                                           | 反应堆压力容器 .....               | 509        |
| 13.1.2                                           | 蒸汽发生器 .....                 | 510        |
| 13.1.3                                           | 主泵 .....                    | 510        |
| 13.1.4                                           | 稳压器 .....                   | 511        |
| 13.1.5                                           | 主管道 .....                   | 511        |
| 13.1.6                                           | 二回路汽水管路 .....               | 511        |
| 第 2 节 AP1000 机组主要用材 .....                        |                             | 513        |
| 第 3 节 高温气冷堆主要用材 .....                            |                             | 516        |
| 13.3.1                                           | 反应堆压力容器 .....               | 516        |
| 13.3.2                                           | 堆内构件 .....                  | 517        |
| 13.3.3                                           | 蒸汽发生器 .....                 | 517        |
| 13.3.4                                           | 氦气轮机 .....                  | 517        |
| 第 4 节 华龙一号主要用材 .....                             |                             | 518        |
| 13.4.1                                           | 反应堆压力容器 .....               | 522        |
| 13.4.2                                           | 蒸汽发生器 .....                 | 523        |
| 13.4.3                                           | 主泵 .....                    | 523        |
| 13.4.4                                           | 主管道 .....                   | 523        |
| 13.4.5                                           | 稳压器 .....                   | 524        |
| 常用物理量符号及英文缩写 .....                               |                             | 525        |
| 参考文献 .....                                       |                             | 527        |

## 金属材料基础知识

金属通常分为黑色金属和有色金属。黑色金属通常包括铁及其合金、钢、锰及铬等；有色金属包括轻金属（铝、镁、锂等），重金属（铜、锌、镍、铅等），贵金属（金、银、铂族），稀有金属（钛、锆、钒、钨、钼等）；另外，还有类金属（铀、钍）等。在金属材料中钢铁材料由于其众多优异性能，不但能满足大多数条件下的应用，而且价格低廉，因此钢铁材料的产量在金属材料中具有绝对优势，占世界金属总产量的95%。在世界金属矿储量中，铁矿资源比较丰富和集中，就世界地壳中金属矿产储量来讲，则非铁金属矿储量大于铁矿储量，如铁只占5.1%，而非铁金属中铝为8.8%，镁为2.1%，钛为0.6%。但非铁金属冶炼较困难，所需能源消耗大，因而生产成本低，限制了生产总量的增长幅度。

到目前为止，工业化生产的金属材料可分为钢铁材料（包括碳钢、低合金钢、合金钢、高温合金、铸钢和铸铁），非铁金属材料（包括铝合金、镁合金、铜合金、钛合金、锆合金、锌合金等），金属功能材料（包括磁性合金、电性合金、弹性合金、减振合金、形状记忆合金、储氢合金等），以及近代发展起来的金属间化合物材料和金属基复合材料。

### 第1节 铁碳相图及钢的基本组织介绍

#### 1.1.1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

合金相图表示在平衡条件下（极其缓慢加热和冷却）合金成分、温度和组织状态之间的关系图形，又称合金状态图。采用热分析法，对铁碳合金系中不同成分的铁碳合金进行加热熔化，观察它们在极其缓慢加热和冷却过程中内部组织的变化，测出其相变临界点，并标于“温度”和“成分”坐标中，绘制成相图。铁碳合金相图是研究铁碳合金的重要工具，了解和掌握铁碳合金相图，对于钢铁材料的研究和使用，各种热加工工艺的制定以及工艺废品原因的分析等方面都有重要的指导意义。

在铁碳合金中，铁与碳可形成一系列稳定的化合物（Fe<sub>3</sub>C、Fe<sub>2</sub>C、FeC），当碳的质量分数超过6.69%时，铁碳合金脆性大，没有实用价值。所以在铁碳合金相图中，只有Fe-Fe<sub>3</sub>C这一部分相图有实际意义。因此，铁碳合金相图实际上是Fe-Fe<sub>3</sub>C相图。图1-1是Fe-Fe<sub>3</sub>C相图，图中各特性点的温度，碳浓度及含义见表1-1。各特性点的符号是国际通用的，不能随意更换。

相图的液相线是ABCD，固相线是AHJECF，相图中有五个单相区：

ABCD 以上——液相区（L）；

AHNA—— $\delta$  固溶体区 ( $\delta$ );

NJESGN——奥氏体区 ( $\gamma$  或 A);

GPQG——铁素体区 ( $\alpha$  或 F);

DFKL——渗碳体区 ( $\text{Fe}_3\text{C}$  或  $C_m$ )。

相图中有七个两相区, 它们分别存在于相邻两个单相区之间。这些两相区分别是:  $L + \delta$ 、 $L + \gamma$ 、 $L + \text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\delta + \gamma$ 、 $\gamma + \alpha$ 、 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$  及  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 。

铁碳相图上有三条水平线, 分别是  $HJB$ ——包晶转变线;  $ECF$ ——共晶转变线;  $PSK$ ——共析转变线。Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图由包晶反应、共晶反应和共析反应三部分连接而成。

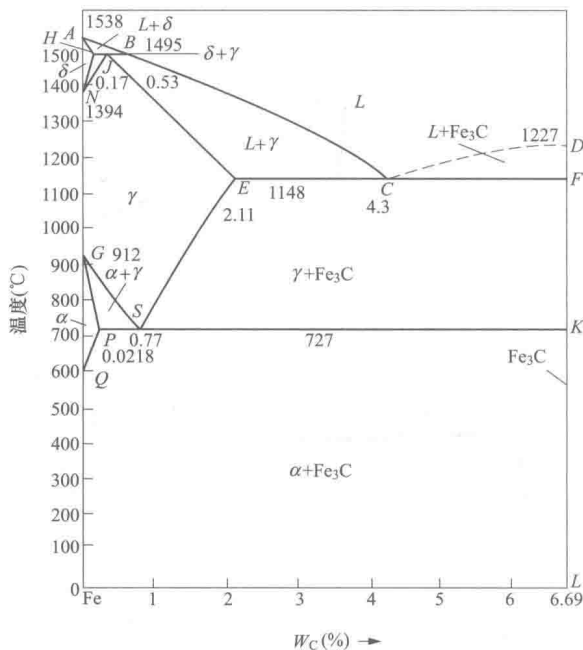


图 1-1 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图

表 1-1

铁碳合金相图中的特性点

| 符 号 | 温度 (°C) | 碳含量 (%) | 说 明                                          |
|-----|---------|---------|----------------------------------------------|
| A   | 1538    | 0       | 纯铁的熔点                                        |
| B   | 1495    | 0.53    | 包晶转变时液态合金的成分                                 |
| C   | 1148    | 4.3     | 共晶点                                          |
| D   | 1227    | 6.69    | 渗碳体的熔点                                       |
| E   | 1148    | 2.11    | 碳在 $\gamma$ -Fe 中的最大溶解度                      |
| F   | 1148    | 6.69    | 渗碳体的成分                                       |
| G   | 912     | 0       | $\alpha$ -Fe 与 $\gamma$ -Fe 相互转变温度 ( $A_3$ ) |
| H   | 1495    | 0.09    | 碳在 $\delta$ -Fe 中的最大溶解度                      |
| J   | 1495    | 0.17    | 包晶点                                          |
| K   | 727     | 6.69    | 渗碳体的成分                                       |

续表

| 符 号 | 温度 (°C) | 碳含量 (%) | 说 明                                |
|-----|---------|---------|------------------------------------|
| N   | 1394    | 0       | $\gamma$ -Fe 与 $\delta$ -Fe 相互转变温度 |
| P   | 727     | 0.0218  | 碳在 $\alpha$ -Fe 中的最大溶解度            |
| S   | 727     | 0.77    | 共析点 ( $A_1$ )                      |

注 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中, PSK 线称为  $A_1$  线, GS 线称为  $A_3$  线, ES 线称为  $A_{cm}$  线, 以上 3 条线是钢固态相变的临界点, 在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 合金热处理过程中具有非常重要意义, 下文会做详细介绍。

Fe 和 Fe<sub>3</sub>C 是组成 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的两个基本组元。由于铁和碳之间不同的相互作用, 铁碳合金相图中存在固溶体和金属化合物两类不同的固态相结构。

### 1.1.2 钢的基本组织

钢的基本组织包括奥氏体、铁素体、渗碳体、珠光体、贝氏体、马氏体、莱氏体、魏氏组织和碳化物等, 它们的具体含义及特征如下所述。

#### 1.1.2.1 奥氏体

奥氏体是碳或其他合金元素溶于  $\gamma$ -Fe 中形成的间隙固溶体, 用  $\gamma$  或 A 表示。奥氏体具有面心立方晶格结构, 由于面心立方晶格原子间的空隙比体心立方晶格大, 因此溶碳能力强。在 727°C 时可溶碳为 0.77%, 随着温度升高溶碳能力增加, 在 1148°C 溶碳量最高, 为 2.11%。奥氏体的晶粒呈多边形。铁-碳合金中的奥氏体在室温下是不稳定的, 把奥氏体过冷到不同温度时, 可以发生珠光体转变、贝氏体转变及马氏体转变。奥氏体晶粒的大小对上述三种转变的组织 and 性能影响很大。

合金钢中加入扩大  $\gamma$  相区的合金元素如 Ni、Mn 等, 可使奥氏体在室温, 甚至在低温时成为稳定相, 这种以奥氏体组织状态使用的钢称为奥氏体钢。奥氏体的强度和硬度都不高, 强度约为 392MPa, 硬度约为 160~200HB。碳的溶入也不能有效地提高奥氏体的强度和硬度。面心立方晶格滑移系多, 故奥氏体塑性好, 延伸率可达 40%~50%。面心立方晶格为密排晶体结构, 故奥氏体比容小, 其中铁原子的自扩散激活能大, 扩散系数小, 热强性能好, 故奥氏体钢可作为高温用钢。奥氏体具有顺磁性, 故奥氏体钢可作为无磁性钢。奥氏体的导热性能差, 线膨胀系数高, 故奥氏体钢又可用作热膨胀灵敏的仪表元件。

#### 1.1.2.2 铁素体

铁素体是碳和其他合金元素溶于  $\alpha$ -Fe 中所形成的间隙固溶体, 以  $\alpha$  或 F 表示。碳溶于  $\delta$ -Fe 中而形成的固溶体为  $\delta$  固溶体, 以  $\delta$  表示, 也是铁素体。铁素体为体心立方晶格, 由于晶格中最大间隙半径比碳原子半径小许多,  $\alpha$ -Fe 几乎不能溶碳, 但由于有晶格缺陷存在,  $\alpha$ -Fe 中仍能溶入微量碳, 在 727°C 时溶碳能力最大, 碳的质量分数约为 0.0218%。随着温度的降低, 溶碳量逐渐减少, 在 600°C 时溶碳量约为 0.0057%, 在室温时, 溶碳量约为 0.0008%, 因此其室温时的性能几乎与纯铁相同。

铁素体强度约为 180~280MPa, 硬度为 80~100HB。铁素体在 770°C 以下具有铁磁性。铁素体是低、中碳钢和低合金钢的主要显微组织。按钢的成分和形成条件的不同, 铁素体的形态有等轴状、块状、网状和针状。一般随钢中铁素体含量的增加, 钢的塑性和韧性提高, 强度下降。钢中加入缩小  $\gamma$  区的合金元素如 Si、Ti 和 Cr 等, 可得到室温和高温下都