

电热合金

王振东 宫元生 著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

电 热 合 金

王振东 宫元生 著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电热合金/王振东, 宫元生著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 2

ISBN 7-5025-8191-X

I. 电… II. ①王…②宫… III. 电热合金-基本知识 IV. TG132.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 004358 号

电 热 合 金

王振东 宫元生 著

责任编辑: 陶艳玲

责任校对: 王素芹

封面设计: 张 辉

*

化 学 工 业 出 版 社
材料科学与工程出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市海波装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 19 $\frac{3}{4}$ 字数 532 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8191-X

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

电热合金是将电能转化成热能的功能性合金材料，它的最高工作温度可达 1400°C ，在冶金、机械、石化、电气、建筑、军工、家电等领域中用于制造各种电热元件。目前，电热合金材料已成为一种重要的工程合金材料，在国民经济中占有重要的地位。

电热合金的生产在我国已有五十多年的历程。五十多年来，科研单位、高等院校、生产企业共同努力，根据我国的资源情况，发展建立了以铁铬铝系合金为主体的电热合金体系，研制成功了完整的铁铬铝合金的生产技术，为我国电热合金的继续发展奠定了良好的基础，从而使我国成为世界主要电热合金生产国之一，铁铬铝合金的最大生产国家。

至今，我国尚缺少全面介绍电热合金的性质、生产技术和应用技术方面的著作。在现有条件下，作者根据自己的工作经历写作了此书。希望本书的出版能对我国电热合金的生产发展有所帮助。

本书的撰写和出版承蒙各电热合金生产企业的大力支持和帮助，王生保、胡淑琴、金潮等几位同志在书稿编写过程中参加了资料收集工作，在此表示深切的感谢。同时，向本书中所引文献的作者和提供资料的友人表示感谢。

限于作者的水平，本书不妥之处，敬请读者给予批评指正。

著者

2006 年 1 月于北京

目 录

第一篇 电热合金的特性

1 电加热方法和电热工程材料	1
1.1 电加热方法	1
1.2 电热工程材料	2
1.3 电热工程材料的特点	3
1.3.1 电热工程材料应具备的条件	3
1.3.2 电热工程材料的基本性能和使用温度	3
1.3.3 电热合金的特点	5
1.3.4 高熔点金属电热材料的特点	6
1.3.5 高熔点金属电热材料与环境介质之间的作用	6
1.3.6 非金属电热材料的特点	7
1.3.7 高温熔体的特点	9
1.4 电热合金的分类	9
1.4.1 按合金的化学成分分类	9
1.4.2 按最高使用温度分类.....	14
1.4.3 按合金的炼制方法分类.....	16
2 电热合金的金相组织	17
2.1 镍铬系电热合金的金相组织.....	17
2.1.1 合金的金相组织特点.....	17
2.1.2 镍铬合金中的析出相.....	18
2.2 镍铬铁系电热合金的金相组织.....	19
2.3 铁铬铝系电热合金的金相组织.....	20
2.3.1 合金的金相组织特点.....	20
2.3.2 合金中的析出相和脆性	21
2.3.3 改善铁铬铝系合金脆性的途径.....	24

3 电热合金的抗氧化性能	27
3.1 电热合金抗氧化性能表示方法.....	27
3.2 电热合金的氧化过程.....	27
3.3 电热合金的氧化特点.....	29
3.3.1 镍铬系和镍铬铁系电热合金的氧化特点.....	29
3.3.2 铁铬铝系电热合金的氧化特点.....	32
3.4 稀土元素改善电热合金抗氧化性能的机理.....	38
3.4.1 稀土元素的加入形式及其效果.....	38
3.4.2 稀土元素改善合金抗氧化性能的机理.....	39
3.5 电热元件的预氧化处理.....	40
3.5.1 保护性氧化膜及其作用.....	40
3.5.2 电热元件的预氧化处理.....	41
4 环境介质对电热合金的作用	43
4.1 渗碳性气体介质对电热合金的作用.....	43
4.1.1 渗碳气体对电热元件的作用过程.....	43
4.1.2 电热合金的抗渗碳能力.....	46
4.1.3 强还原性气体中使用的电热合金.....	47
4.2 纯氢对电热合金的作用.....	48
4.2.1 氢气对电热元件的作用过程.....	48
4.2.2 电热合金的抗氢气作用能力.....	50
4.3 纯氮对电热合金的作用.....	50
4.3.1 氮气对电热元件的作用过程.....	50
4.3.2 电热合金的抗氮气作用能力.....	51
4.3.3 改善铁铬铝合金的抗渗氮能力.....	54
4.4 氧化性含硫介质对电热合金的作用.....	54
4.4.1 氧化性含硫介质对电热元件的作用过程.....	55
4.4.2 电热合金的耐 $O_2 + SO_2$ 侵蚀能力	55
4.5 还原性含硫介质对电热合金的作用.....	56
4.5.1 还原性含硫介质对电热元件的作用过程.....	57
4.5.2 电热合金在还原性含硫介质中的耐腐蚀能力.....	57

4.6	卤族元素对电热合金的作用	58
4.6.1	卤族元素对电热元件的作用过程	58
4.6.2	在卤族气体介质中使用的电热合金	59
4.7	制陶炉气对电热合金的作用	59
4.7.1	炉气对电热元件的作用过程	59
4.7.2	烧制陶瓷炉用的电热合金	60
4.8	真空对电热合金的作用	61
4.8.1	真空下电热元件的失效过程	61
4.8.2	真空中使用的电热合金	62
4.9	耐火材料和绝热材料对电热合金的作用	63
4.9.1	耐火材料和绝热材料对电热元件的作用过程	63
4.9.2	电热元件对耐火材料的要求	64
5	电热合金的物理特性	65
5.1	电阻率	65
5.1.1	电阻率的定义	65
5.1.2	电热合金电阻率的特点	65
5.1.3	影响合金电阻率特性的因素	67
5.2	电阻温度修正系数	72
5.2.1	镍铬合金和镍铬铁合金的 C_t-t 曲线	73
5.2.2	正电阻温度系数铁铬铝合金的 C_t-t 曲线	74
5.2.3	负电阻温度系数铁铬铝合金的 C_t-t 曲线	74
5.3	电热合金的热膨胀系数	74
6	电热合金的力学性能	77
6.1	电热合金的室温力学性能	77
6.1.1	镍铬系和镍铬铁系合金的室温力学性能	77
6.1.2	铁铬铝系合金的室温力学性能	78
6.2	电热合金的高温力学性能	80
6.2.1	电热合金的高温短时抗拉强度	80
6.2.2	电热合金的高温持久强度和蠕变强度	82
6.3	铁铬铝合金的脆化倾向对力学性能的影响	83

6.3.1	铁铬铝合金的 475℃脆性对力学性能的影响	83
6.3.2	铁铬铝合金的高温脆性对力学性能的影响	84
6.4	电热合金在不同受力条件下的使用状况	85
7	电热合金的最高使用温度	86
7.1	电热合金的最高使用温度	86
7.2	限制电热合金最高使用温度的因素	86
7.2.1	电热合金化学成分的影响	86
7.2.2	电热合金材料规格尺寸的影响	87
7.2.3	电热元件几何尺寸的影响	89
7.2.4	电热元件工作环境的影响	91
7.2.5	电热元件表面负荷的影响	91
7.2.6	合金炼制方法的影响	91
参考文献		94

第二篇 电热合金的生产方法

8	电热合金的冶炼方法	95
8.1	冶炼方法的发展概况	95
8.1.1	冶炼方法在国内的发展概况	95
8.1.2	冶炼方法在国外的的发展概况	96
8.2	冶炼方法概况	97
8.2.1	感应炉冶炼法	97
8.2.2	真空感应炉冶炼法	97
8.2.3	感应炉-电渣重熔双联法	97
8.2.4	有衬电渣炉-电渣重熔双联法	98
8.2.5	电弧炉-真空精炼炉双联法	98
8.3	双联法的精炼能力	100
8.3.1	碳、氧、氮的去除能力	100
8.3.2	脱磷和脱硫能力	101
8.4	感应炉冶炼镍铬(铁)合金	101
8.4.1	镍铬(铁)合金的感应炉冶炼工艺	101

8.4.2	冶炼镍铬(铁)合金时的质量控制	105
8.5	感应炉冶炼铁铬铝合金	110
8.5.1	铁铬铝合金的感应炉冶炼工艺	110
8.5.2	冶炼铁铬铝合金时的质量控制	113
8.6	真空感应炉冶炼铁铬铝合金	120
8.6.1	铁铬铝合金的真空感应炉冶炼工艺	120
8.6.2	真空感应炉冶炼铁铬铝合金时的质量控制	123
8.7	有衬电渣炉冶炼铁铬铝合金	125
8.7.1	有衬电渣炉的工作原理	125
8.7.2	有衬电渣炉的设备结构	126
8.7.3	铁铬铝合金有衬电渣炉冶炼工艺	127
8.7.4	有衬电渣炉冶炼铁铬铝合金时的质量控制	130
8.7.5	有衬电渣冶炼对电热合金的精炼作用	131
8.8	电渣重熔电热合金	133
8.8.1	电渣重熔电热合金用渣系	133
8.8.2	电渣重熔的工艺参数与相互关系	138
8.8.3	电热合金的重熔特点	141
8.8.4	重熔电热合金的工艺参数	142
8.8.5	重熔电渣钢锭的冷却	144
8.8.6	电渣重熔时合金元素的烧损	145
8.8.7	电渣重熔电热合金的冶金效果	148
8.8.8	稀土氧化物渣重熔电热合金	151
8.9	真空精炼法冶炼铁铬铝合金	153
8.9.1	真空精炼法冶炼铁铬铝合金的基本原理	153
8.9.2	真空精炼法使用的设备概况	153
8.9.3	铁铬铝合金的真空精炼工艺	154
8.9.4	真空精炼炉冶炼铁铬铝合金的质量控制	160
9	电热合金钢锭的开坯与热轧	164
9.1	电热合金的热加工性能	164
9.1.1	铁铬铝合金的热加工性能	164

9.1.2	镍铬(铁)合金的热加工性能	165
9.2	电热合金钢锭的开坯	166
9.2.1	钢锭的锻造开坯	166
9.2.2	钢锭的热轧开坯	169
9.3	电热合金的热轧	171
9.3.1	横列式轧机轧制电热合金	171
9.3.2	半连续线材轧机轧制电热合金	174
10	热轧盘条和钢丝的预处理	178
10.1	盘条的软化处理	178
10.2	盘条和钢丝的碱浸处理	179
10.2.1	熔盐碱浸法	180
10.2.2	溶液碱浸法	181
10.3	盘条和钢丝的酸洗	182
10.3.1	硫酸型酸洗溶液	182
10.3.2	盐酸型酸洗溶液	183
10.3.3	混合酸型酸洗溶液	183
10.4	盘条和钢丝的涂层	183
10.4.1	盐石灰涂层	184
10.4.2	硼砂涂层	184
10.4.3	树脂涂层	185
11	钢丝的拉拔	186
11.1	钢丝拉拔用润滑剂	186
11.1.1	拉丝润滑剂的作用与分类	186
11.1.2	固体润滑剂	187
11.1.3	液体润滑剂	189
11.2	钢丝的拉拔工艺	191
11.2.1	选择、确定拉拔方式	191
11.2.2	确定拔程总压缩率	192
11.2.3	确定道次压缩率	194
11.2.4	道次压缩率的分配	195

11.2.5	粗丝拉拔的模具配置	196
11.2.6	中丝拉拔的模具配置	199
11.2.7	细丝拉拔的模具配置	203
11.3	钢丝的拉拔设备	206
11.3.1	单次拉丝机	206
11.3.2	连续式拉丝机	208
11.3.3	水箱拉丝机	212
11.3.4	拉丝设备的配置	213
11.4	拉丝模	216
11.4.1	拉丝模用材料	216
11.4.2	拉丝模的结构	219
11.4.3	模孔磨损的原因	221
11.4.4	拉丝模芯与模套的装配	222
11.4.5	硬质合金拉丝模的研磨与抛光	223
11.4.6	钻石拉丝模的打孔、研磨与抛光	224
11.4.7	拉丝模的修复	226
11.4.8	钻石模的制模、修模设备	227
12	钢丝的热处理	231
12.1	钢丝热处理的分类	231
12.1.1	中间热处理	231
12.1.2	成品热处理	231
12.1.3	中间热处理与成品热处理的差别	231
12.2	铁铬铝合金丝材的热处理	232
12.2.1	铁铬铝合金的组织特性与热处理的关系	232
12.2.2	铁铬铝合金丝材的热处理工艺	233
12.3	镍铬(铁)合金丝材的热处理	235
12.3.1	镍铬(铁)合金的组织特性与热处理的关系	235
12.3.2	镍铬(铁)合金丝材的热处理工艺	236
12.4	保护气氛连续热处理用设备	237
12.4.1	中粗丝用保护气氛连续热处理生产线	237

12.4.2	细丝用保护气氛连续热处理生产线·····	240
12.5	保护气氛连续热处理的若干技术问题·····	241
12.5.1	保护气体的选用·····	241
12.5.2	影响保护气氛连续热处理丝材表面光亮度的因素·····	242
12.5.3	氨分解气体的净化·····	245
12.5.4	氨分解气体的安全使用与管理·····	246
13	带材的轧制·····	248
13.1	电热合金带材及其分类·····	248
13.2	热轧带材·····	248
13.2.1	钢坯·····	248
13.2.2	钢坯加热·····	249
13.2.3	热轧机组·····	249
13.2.4	钢坯的热轧工艺·····	249
13.2.5	热轧钢带的软化处理与酸洗·····	250
13.3	冷轧带材·····	251
13.3.1	带坯用钢锭的锻造开坯·····	251
13.3.2	带坯的热轧·····	252
13.3.3	热轧带坯的预处理·····	253
13.3.4	钢带的冷轧·····	255
13.3.5	冷轧钢带的热处理·····	259
13.3.6	冷轧钢带的平整和纵剪·····	260
13.4	冷轧扁丝·····	262
13.4.1	冷轧扁丝用圆丝坯料·····	263
13.4.2	冷轧扁丝的生产工艺流程·····	265
13.4.3	扁丝冷轧设备·····	267
	参考文献·····	268

第三篇 电热合金的应用

14	基础电热元件的计算·····	269
14.1	基础电热元件计算用参数·····	269

14.1.1	热负荷强度及表示方法	269
14.1.2	选择热负荷强度的原则	270
14.1.3	表面负荷及其选择	272
14.1.4	面积电流及其选择	275
14.2	线材电热元件的计算方法	280
14.2.1	公式法计算线材尺寸	280
14.2.2	查表法计算线材尺寸	282
14.2.3	图解法计算线材尺寸	285
14.3	带材电热元件的计算方法	290
14.3.1	公式法计算带材尺寸	290
14.3.2	查表法计算带材尺寸	292
14.3.3	面积电流法计算带材尺寸	293
14.4	扁丝电热元件的计算方法	295
14.4.1	公式法计算扁丝尺寸	295
14.4.2	换算法计算扁丝尺寸	296
15	装配式电热元件的计算	298
15.1	辐射管电热元件及其计算方法	298
15.1.1	辐射管电热元件的工作原理	298
15.1.2	辐射管电热元件的应用范围	298
15.1.3	辐射管电热元件的结构形式	299
15.1.4	辐射管电热元件用材料	301
15.1.5	辐射管电热元件用电热体的计算	305
15.1.6	商品辐射管电热元件	309
15.2	金属管状电热元件及其计算方法	313
15.2.1	金属管状电热元件的结构和用途	313
15.2.2	金属管状电热元件用电热体的计算方法	314
16	电阻炉的设计计算	323
16.1	电阻炉加热功率的确定方法	323
16.1.1	热平衡法	323
16.1.2	面积负荷法	323
16.1.3	容积法	324

16.2	电阻炉的工作电压与接线形式	327
16.2.1	电阻炉的工作电压确定方法	327
16.2.2	电阻炉的接线形式	327
16.3	电阻炉电热元件的选择与计算	329
16.3.1	电热元件的选择	329
16.3.2	电热元件的计算	330
16.3.3	电阻炉电热元件计算举例	330
17	电热元件的加工成形	333
17.1	电热元件的成形	333
17.1.1	带材波形元件的成形与计算	333
17.1.2	线材螺旋形元件的成形与计算	334
17.2	电热元件的加工成形温度	335
17.2.1	镍铬和镍铬铁系合金材料的加工成形温度	335
17.2.2	铁铬铝系合金材料的加工成形温度	336
17.2.3	加热条件	336
17.3	电热元件的焊接	336
17.3.1	电热合金的焊接性能	337
17.3.2	电热合金的焊接方法	337
17.3.3	电热元件的焊接形式	339
17.3.4	引出棒用材料	341
18	电热合金快速寿命试验方法	344
18.1	快速寿命试验的实际意义	344
18.2	电热合金快速寿命试验方法标准	344
18.2.1	高电阻电热合金快速寿命试验方法（中国 GB/T 13300—91）	344
18.2.2	电热合金线材和带材的寿命试验方法（日本 JIS C 2524—1979）	350
18.2.3	镍铬和镍铬铁电热合金快速寿命试验方法（美国 ASTM B76—90）	354
18.2.4	铁铬铝电热合金快速寿命试验方法（美国 ASTM B78—90）	364

19 电热合金技术标准	373
19.1 电热合金技术标准的说明	373
19.2 电热合金技术标准	373
19.2.1 中国电热合金技术标准	373
19.2.2 日本电热合金技术标准	390
19.2.3 美国电热合金技术标准	408
19.2.4 德国电热合金技术标准	414
19.2.5 俄罗斯电热合金技术标准	429
20 我国电热合金生产概况	445
20.1 生产概况	445
20.1.1 电热合金的产量和产品结构	445
20.1.2 电热合金的产品质量控制和新产品	446
20.1.3 电热合金的生产工艺	447
20.1.4 电热合金生产用设备	448
20.2 电热合金和电热元件生产厂概况	449
21 电热合金计算用数据	453
21.1 电热合金常用性能数据	453
21.1.1 电阻温度修正系数表	453
21.1.2 电热合金电气物理性能表	453
21.1.3 电热合金的力学性能表	453
21.1.4 常用线规号码的公制对照表	453
21.1.5 摄氏与华氏温度对照表	461
21.2 电热合金计算用数据表	465
21.2.1 计算用数据表内容说明	465
21.2.2 线材计算用数据表	468
附录 电热合金计算用数据表	475
附录 A 线材计算用数据表 (表 A0~表 A20)	475
附录 B 带材计算用数据表 (表 B0~表 B20)	497
附录 C 扁丝计算用数据表 (表 C0~表 C12)	560
参考文献	612

第一篇

电热合金的特性

1 电加热方法和电热工程材料

1.1 电加热方法

由于电流具有热效率高、易于输送、易于控制和不污染环境等诸多优点，因此，电加热方法已经在工业部门和家用电器领域得到了广泛的利用。

电加热方法是将电能转化为热能并加以利用的过程。按其转化原理可分为以下几种。

(1) 等离子体加热：利用在电场作用之下气体分子电离而形成的高温等离子流，加热物质。

(2) 电子束加热：利用在电场作用之下形成高能电子流轰击物质产生热量，加热物质。

(3) 电弧加热：利用在两极之间产生的电弧加热物质。

(4) 感应加热：利用电磁感应原理，在金属中产生的感应电流加热金属。

(5) 电阻加热：利用导体自身电阻而产生的热量加热物质。

在这 5 种加热方法中，尽管电阻加热法在热效率、能流密度诸方面不及其他方法，但是，由于其电阻加热方法具有线路简单、不需要复杂的加热装备、使用方便、价格便宜等优点，因此，在实际应用，特别是在工业部门中的各种加热炉和干燥设备以及家用电器

领域中得到广泛应用。

电阻加热所依赖的导体包括：纯金属、合金、非金属、熔体等多种材料。电阻加热是上述 5 种加热方法中应用最广泛的一种。涉及的温度范围从 $250\sim 2500^{\circ}\text{C}$ 。以下介绍的电热工程材料就是在电阻加热领域中的导体材料。

1.2 电热工程材料

电阻加热时所利用的导电材料称之为电发热体。许多材料都可以在电流通过时产生电阻热，但是只有那些能有效地将电能转化为热能电发热体材料，才有可能用来制造成工业电加热元件和家用电器用的电热元件。可以制造电热元件的电发热体材料叫做电热工程材料。

电热工程材料按其组织结构特点可以分为电热合金、高熔点金属、非金属和高温熔体四大类别。每个类别包括的材料如下。

