

动力与能源用高温结构材料

——第十一届中国高温合金年会论文集

中国金属学会高温材料分会 编



冶金工业出版社

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

动力与能源用高温结构材料

——第十一届中国高温合金年会论文集

中国金属学会高温材料分会 编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2007

内 容 简 介

本书是中国金属学会高温材料分会第十一届中国高温合金年会各专家与会论文集, 共计 161 篇文章, 分成 (1) 变形高温合金; (2) 铸造高温合金; (3) 粉末冶金和弥散强化高温合金; (4) 金属间化合物、金属基或金属间化合物基复合材料; (5) 高温合金的相关技术等五大部分进行介绍。本年会论文集较充分地反映了 2003 年以来在高温合金方面取得的成绩和进步; 对广大科技工作者、生产及教学人员都有参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

动力与能源用高温结构材料: 第十一届中国高温合金年会论文集/
中国金属学会高温材料分会编. —北京: 冶金工业出版社, 2007. 5
ISBN 978-7-5024-4275-0

I. 动… II. 中… III. 耐热合金—文集 IV. TG132. 3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 058510 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
责任编辑 张 卫 (联系电话: 010-64027930, 电子信箱: bull 2820 @ sina. com)
王雪涛 (联系电话: 010-64062877, 电子信箱: 2bs@ cnmip. com. cn)

美术编辑 王耀忠 版面设计 张 青
责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4275-0

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2007 年 5 月第 1 版, 2007 年 5 月第 1 次印刷

210mm × 285mm; 43.75 印张; 1437 千字; 684 页; 1-1000 册

149.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

编 审 委 员 会

主 任 委 员：仲增墉

副主任委员：赵明汉

委 员：仲增墉 赵明汉 冯 涤 谢锡善 韩雅芳

郭建亭 张国庆 张玉春 王治政 王剑志

张 继 李嘉荣 孙晓峰 董建新

编 审 组：袁 英 庄景云 燕 平 李嘉荣 孙晓峰

董建新 童金涛 陈惠霞

前 言

我国高温合金的研制与生产已走过了 50 年的历程，在研究、生产和应用方面都取得了骄人的成绩。四年一度的全国高温合金年会总结和交流了每个阶段所取得的成果和科技进步，对促进我国高温合金生产、应用以及技术水平的提高，起到了重要的作用。

2003 年以来，为适应和满足我国经济和国防建设发展的需要，我国高温合金的研制和生产又取得了可喜的进展，特别是在变形合金的冶炼工艺、热加工工艺、大型盘件生产及变形合金材料在批量生产过程中产品的质量稳定等方面，在单晶、定向凝固合金材料和工艺发展及应用，以及粉末冶金和弥散强化高温合金的研制和应用等方面都取得了具有特色的进步，高温合金在民用工业中的推广应用也取得了明显的进展。《动力与能源用高温结构材料》作为第十一届中国高温合金年会的论文集较充分地反映了四年来取得的成绩和进步。

与西方国家不同，我国高温合金的研制与生产目前正处于一个积极发展阶段，对产量和品种的需求不断增加，对质量的要求不断提高，适用的范围不断扩大。这意味着合金材料的质量有待进一步稳定和提高，生产工艺有待进一步研究、稳定和改进，合金应用中的问题有待进一步研究、解决，新的合金材料有待进一步研究、开发和应用，合金材料在民用工业部门的应用有待进一步扩大。相信在今后的工作中将取得更多、更大的成就。

仲增坤

2007. 3

目 录

第 1 篇 变形高温合金

我国电力工业发展所需高温结构材料的研究	郭建亭 胡壮麒	3
高温合金真空自耗重熔的工艺控制	杨玉军 赵长虹 李爱民 王志刚	7
氦气冷却对高温合金真空自耗重熔的影响	杨玉军 李爱民 赵长虹 田水仙 等	10
几种高温合金铸锭中偏析和均匀化研究	王 玲 董建新 郭 磊 仲博颖 等	14
用精锻机生产高温合金板坯工艺的探索	田水仙 王志刚 杨玉军 李爱民 等	19
高温合金无缝管材制孔工艺探讨	张志国 王兆英 金凯明 杨玉军 等	22
高温合金环件特殊轧制工艺研究	杨 勇 张 华 刘 峰 吴永安 等	25
三种变形高温合金高温氧化行为研究	孙魁平 胡传顺 王秀芬 彭永辉 等	29
一种节镍经济型高温合金 GH1835	曹美姣 张红斌 李守军	33
热加工工艺对 GH2150 合金微观组织的影响	蒙肇斌 王延庆 乔雪璿 缪宏博 等	37
GH2150 合金热加工工艺研究	缪宏博 赵宇新 蒙肇斌 张绍维	42
GH2674 合金大尺寸涡轮盘的工艺研究	马天军 金 鑫 赵玉才 赵雅婷 等	46
GH2761 合金锭的铸态组织及均匀化研究	李爱民 王志刚 李 宁 孙文儒 等	52
直接时效对磷微合金化 GH2761 合金组织的影响	魏志刚 孙文儒 郭守仁 杨树林 等	56
热处理对 GH2761 合金显微组织和拉伸性能的影响	孙文儒 魏志刚 杨树林 郭守仁 等	61
GH2901 合金真空熔炼铸锭中硼的宏观偏析	裴丙红 张红斌 曹美姣 王远明 等	64
GH2909 合金在 700℃ 的氧化行为	赵宇新 张绍维	69
成分调整对高强度低膨胀高温合金热膨胀系数的影响	邓 波 韩光炜	73
合金元素对低膨胀高温合金抗氧化性能的影响	李正栋 张国庆 李 周 赵宇新 等	76
模拟海洋环境下低膨胀高温合金热腐蚀抗力对比研究	邓 波 韩光炜	80
硼对一种铁基高温合金晶界析出相和高温性能的影响	陈国胜 王庆增 周莫华 金 鑫 等	84
长期时效对 GH3044 合金性能的影响	浦惠康 田沛玉	89
GH3276 合金的生产工艺对组织和性能的影响	李光辉 彭永辉 王建豪 王继红 等	93
GH3536 合金轧管产生表面裂纹的原因分析	牛建科 李洪东 李明考	96
GH3600 合金无缝管生产工艺	张志国 王兆英 田水仙 李爱民	99
GH3690 合金晶界反应及模拟运行后的组织演化	郑 磊 张麦仓 董建新 胡尧和	102
GH4049 合金热轧棒材新工艺的研究	王世普 谢 伟 康金波	107
GH4098 合金变形及热处理工艺研究	柏 宇 牛建科 何云华	110
GH4105 合金冷拉棒生产工艺的研究	浦惠康 田沛玉	113
预热处理对改善 GH4133B 合金模锻件低倍粗晶的研究	陈培敦 王俊海	116
真空自耗锭生产工艺对 GH4169 合金组织和力学性能的影响	赵长虹 张玉春 杨玉军 王志刚 等	121
热模锻工艺参数对 GH4169 合金锻件组织和力学性能的影响	叶俊青 张 华 魏志坚 刘 峰	125
GH4169 合金 $\phi 660\text{mm}$ 钢锭快锻开坯工艺过程数值分析	张麦仓 董建新 郑 磊	130
热处理制度的改变对 GH4169 合金显微组织及析出相的影响	邓 群 周莫华 王建平 杜金辉 等	134

喷射成形 GH4169 合金模锻件研究	许文勇 李 周 张国庆 袁 华 等	139
改型 GH4169 合金组织和性能的研究	杜金辉 曲敬龙 邓 群 庄景云 等	143
硼对 DAGH4169 合金组织和力学性能的影响	黄历锋 孙文儒 赵长虹 郭守仁 等	147
改型 GH4169 合金的研究	付书红 董建新 张麦仓 谢锡善	151
细晶化对 GH4169 合金疲劳性能的影响	贾新朝 姚草根 吕宏军 卢 焰	156
热处理对一种 Ni-Cr-Co 基高温合金组织和性能的影响	陈 伟 李长春 李 辉 楼琅洪 等	160
Ni-Cr-Co 合金中 Mg 的晶界非平衡偏聚	王 凯 王民庆 邓 群 杜金辉 等	166
铝、钛含量对 GH4199 合金组织和力学性能的影响	乔雪璎 王延庆 蒙肇斌	170
多次冲击拉伸对 GH4586 高温合金性能及组织的影响	姚草根 吕宏军 贾新朝 卢 焰 等	175
电场处理对 GH4586A 合金组织及拉伸性能的影响	刘 杨 王 磊 王 帅 胥国华 等	179
GH4586B 合金长期时效后的组织	崔 彤 王 磊 李爱民 杨洪才 等	183
长期时效对一种镍基高温合金断裂韧性的影响	高 帆 王 磊 张 继 刘 杨	187
GH4648 合金在均匀化退火过程中的组织演变	马惠萍 鞠 泉 杨玉军 赵光普	191
GH4648 合金冷轧薄板的热处理与组织和性能的对应关系	王信才 牛建科 韦家向	196
GH4648 合金的高温热变形行为	鞠 泉 马惠萍 周轶群 王世普 等	200
Ni-Cr 基高温合金中 α -Cr 相演变及稳定化处理	毕中南 董建新 张麦仓	205
GH4698 合金真空自耗大锭型的冶炼及加工	吴贵林 田树森 赵长虹 董 健 等	209
GH4698 合金的轧制工艺探讨	王健豪 吴贵林 董 健	213
燃气轮机用 GH4698 合金大尺寸涡轮盘模锻工艺研究	张北江 赵光普 胥国华 秦鹤勇 等	216
GH4698 合金 $\phi 1200\text{mm}$ 涡轮盘固溶处理制度的研究	左 正 秦鹤勇 李建华 程 瑾	221
燃气轮机用 GH4698 合金 $\phi 1200\text{mm}$ 涡轮盘热处理研究	秦鹤勇 王卫红 吴兰福 程 瑾 等	224
燃气轮机用 GH4698 合金涡轮盘和引进盘质量的对比	刘长江 孙忠民 彭建强 胡 平	228
长期时效对 GH4698 合金组织和性能的影响	梁永纯 袁 超 郭建亭 侯介山	232
热变形工艺对 GH720Li 合金微观组织和性能的影响	曲敬龙 杜金辉 邓 群 吕旭东 等	236
经氮冷真空自耗 (VAR) 重熔的 GH4738 合金冶金质量	张立红 陈 杰 曹秀丽 金 鑫 等	240
GH4738 合金涡轮盘剩余寿命预测	韦家虎 张麦仓 董建新	244
GH4738 合金燃气轮机涡轮盘组织和力学性能研究	洪成森 董建新 张麦仓 张立红 等	248
GH4742 合金大锭型均匀化工艺研究	胥国华 张北江 秦鹤勇 赵光普 等	252
GH4742 合金典型组织及性能分析	秦鹤勇 赵彩琴 张北江 胥国华	257
GH4742 合金的热变形行为	吕旭东 邓 群 杜金辉 曲敬龙 等	260
变形高温合金大尺寸棒坯锻造过程中的宏观变形行为	张北江 陈 华 赵光普 胥国华 等	265
GH6783 合金中 β 相特征及与合金力学性能的关系	韩光炜 邓 波 杨玉军 牛建科	271
长期时效后 GH6783 合金组织和性能的变化	韩光炜 牛建科 杨玉军 邓 波	275
抗氧化低膨胀高温合金 GH6783	贾新云 赵宇新 张绍维	280
三种高温合金晶粒尺寸和晶界析出相对冲击韧性的影响	陈国胜 王庆增 周冀华 金 鑫 等	284
700℃ 蒸汽参数超超临界锅炉过热器管材用高温合金	赵双群 董建新 谢锡善	289
NiTiNb 合金管件高速率挤压过程数值模拟	张伟红 张士宏 程 明	294
合金成分对共格析出动力学影响的相场模拟	冯小辉 杨院生 李应举 童文辉	298

第 2 篇 铸造高温合金

真空镍钎合金在铸造高温合金中应用的研究	胡尧和 董建新 谢锡善 任福全 等	305
高 B 低 C 高温合金 K405BC 组织及性能研究	郑 亮 肖程波 唐定中	309

改型 K417L (M17L) 镍基高温合金热腐蚀行为	韩汾汾 韦 华 李 辉 郭广思 等	313
K424 合金的低周疲劳性能研究	陈 卓 甄宝林	317
热控凝固铸造 K424 合金特性研究	吴剑涛 冯 涛 李俊涛 赵明汉 等	322
K435 合金的高温蠕变行为及机理	侯介山 郭建亭 周兰章 秦学智 等	326
返回料比例对 K444 合金组织和力学性能的影响	李志军 周兰章 郭建亭	331
K445 合金的高温氧化行为	李友林 袁 超 郭建亭 陈国胜	336
K446 合金的高周疲劳行为	郭晓光 郭建亭 袁 超 杨洪才	341
K447 合金的热疲劳行为	张 剑 袁 超 郭建亭 陈岁元 等	345
抗热腐蚀镍基铸造高温合金 K452	袁 超 郭建亭 李谷松 王 华	348
K452 合金在长期时效期间的微结构演化	秦学智 郭建亭 袁 超 侯介山 等	352
熔体过热处理对铸态 K465 合金组织的影响	裴忠治 李俊涛 赵明汉 田彦文	356
K487 铸造高温合金的显微组织和性能研究	王 祯 李俊涛 赵明汉 姚 曼	360
K4202 镍基铸造高温合金的研究	邵 冲 李俊涛 吴剑涛 赵明汉	364
K4208 耐磨铸造高温合金的组织 and 性能	国为民 赵明汉 吴剑涛 赵京晨 等	368
高温合金熔体整体弱磁场过冷处理细晶铸造工艺	赵京晨 燕 平 韩凤奎	372
熔体过热处理对一种新型镍基高温模具合金组织和性能的影响	李 青 宋尽霞 肖程波 王定刚 等	376
定向凝固高温合金缺陷诊断专家系统	谢永军 黄朝晖 唐定中 张宏伟 等	380
第二代定向凝固柱晶高温合金 DZ406 (DZ6)	黄朝晖 谭永宁 贾新云 张宏伟 等	384
一种新型定向凝固柱晶高温合金 DZ408 (DZ8) 的研究	谭永宁 黄朝晖 贾新云 张 强 等	389
DZ411 (DSM11) 合金 γ' 粗化与持久性能	李 辉 楼琅洪 史学军 张 匀	392
DZ417G 合金的长期时效稳定性	周兰章 肖 旋 郭建亭 于海朋	395
DZ4125L 合金叶片生产中的热裂纹问题研究	刘恩泽 郑 志 刘志强 张凌峰	400
DZ4142 合金的微观组织和稳定性	刘恩泽 郑 志 孙树臣 于忠锋 等	403
DZ640M 合金中的碳化物析出行为	于 腾 王 磊 赵 阳	407
喷丸处理后的 DZ640M 合金表面再结晶行为研究	赵 阳 王 磊 于 腾 丁海峰	411
一种定向凝固高温合金再结晶的影响因素研究	谢 光 王 莉 张 健 楼琅洪	414
一种定向凝固镍基高温合金中 μ 相的析出及其有害作用	赵 镨 楼琅洪 文 怡 姜卫国 等	418
固溶温度对一种定向凝固柱晶高温合金组织和力学性能的影响	余 力 陈荣章	423
碳含量对一种定向凝固高温合金铸态组织的影响	燕冰川 张 健 楼琅洪	428
液态金属冷却定向凝固对铸件显微组织的影响	赵 坦 燕冰川 申 健 张 健 等	432
熔体超温处理对 DD403 单晶高温合金枝晶间距和显微偏析的影响	邹敏明 张 军 刘 林 傅恒志	437
第二代单晶高温合金 DD406 (DD6) 低周疲劳行为	刘维维 唐定中 李嘉荣 刘世忠 等	440
第二代单晶高温合金 DD406 (DD6) 的 1070℃ 蠕变性能	李嘉荣 赵金乾 王开国 刘世忠 等	444
长期时效对第二代单晶高温合金 DD406 (DD6) 显微组织的影响	金海鹏 李嘉荣 刘世忠	448
凝固速率对 DD432 单晶高温合金组织的影响	于金江 孙晓峰 赵乃仁 金 涛 等	453
一种单晶高温合金的拉伸性能及微观变形特征	刘金来 金 涛 张静华 孙晓峰 等	458
热处理对一种镍基单晶高温合金 TLP 接头组织的影响	刘纪德 金 涛 赵乃仁 王志辉 等	463
不同结构单晶镍基合金的蠕变特征及组织演化规律	杜洪强 田素贵 于兴福 孟凡来 等	468
Al、Ti 和 Ta 对单晶高温合金组织和性能的影响	刘丽荣 金 涛 孙晓峰 管恒荣 等	473
元素铈对一种镍基合金晶格常数及 γ/γ' 错配度的影响	李 唐 田素贵 孟凡来 杜洪强 等	478

Re 在单晶高温合金持久过程中的作用	骆宇时 李嘉荣 刘世忠 韩 梅 等	482
抽拉速率对一种镍基单晶高温合金凝固组织的影响	韩凤奎 赵京晨 燕 平	486
直流电流对一种镍基单晶高温合金 γ' 相溶解的影响	李应举 杨院生 冯小辉	490

第 3 篇 粉末冶金和弥散强化高温合金

粉末冶金高温合金盘件等温锻造技术	王淑云 杨洪涛 李惠曲	497
粉末冶金高温合金的组织 and 性能研究	张义文 陶 宇 张 莹 刘建涛 等	501
表面形变强化对粉末冶金高温合金组织与性能影响研究	邹金文 汪 煜 王仁智	507
粉末冶金高温合金中非金属夹杂物的损伤力学行为研究	周晓明 汪武祥	511
直接热等静压 FGH4095 粉末冶金高温合金预处理组织研究	王旭青	516
FGH4095 (FGH95) 合金涡轮盘不同部位的蠕变性能分析	罗学军 王旭青 呼 和 邹金文 等	520
晶粒度对 FGH4096 合金性能的影响	陶 宇 刘建涛 张国星 张义文 等	524
FGH4096 合金在控制冷却过程中 γ' 相析出行为的研究	刘建涛 胡本芙 刘国权 张义文 等	528
冷却速度对 FGH4096 合金中 γ' 相形态的影响	田高峰 胡本芙 贾成厂 李慧英	534
一种粉末冶金高温合金涡轮盘热处理残余应力分析	汪 煜 邹金文 王仁智 周晓明 等	538
一种粉末冶金镍基高温合金中的缺陷分析	刘明东 张 莹 张义文 陶 宇	542
粉末冶金高温合金中粉末颗粒间断裂的形貌特征	张 莹 张义文 刘明东 张 娜	545
氧化物弥散强化 MGH2756 合金板材的组织 and 性能	田 耘 柳光祖 杨 峥	550
一种氧化物弥散强化合金的塑性研究	颜晓峰 柳光祖 刘万生 田 耘 等	554
工艺参数对弥散强化高温合金中氧化物颗粒制备的影响	杨 峥 柳光祖 田 耘	557
ODS 合金 MA 工艺各参数间数学关系的建立	杨 峥 柳光祖 田 耘	560

第 4 篇 金属间化合物、金属基或金属间化合物基复合材料

热等静压对吸铸态 NiAl 基共晶合金微观组织和高温强度的影响	淮凯文 郭建亭 李虎田 高 强	565
热处理对 NiAl-Cr (Mo) 共晶合金组织及断裂韧性的影响	盛立远 郭建亭 谢 亿 周兰章	569
微量 B 和 Dy 对铸造 NiAl-Cr (Mo) 共晶合金组织与力学性能的影响	高 强 郭建亭	573
应用 IC6 金属间化合物高温材料制造导向器叶片	刘庆琛	577
Ni ₃ Al 基金薄壁件熔模精铸工艺研究	曹 栩 骆合力 李尚平 张喜娥 等	582
Ni ₃ Al 基金薄壁精铸件充型过程研究	张喜娥 骆合力 李尚平 曹 栩 等	586
微量 Hf 对变形 TiAl 合金组织和力学性能的影响	昌 霞 韩鹏彪 司家勇 张 继	590
铸态 Ti-22Al-25Nb 合金热变形机理研究	梁晓波 张 艺 张建伟 李世琼 等	594
热处理对一种新型 Nb 基高温合金组织的影响	贾丽娜 郭喜平 易良玉	598
Zr 对铸态 Nb-22Ti-16Si 原位复合材料组织和性能的影响	田玉新 周兰章 郭建亭	602
铌硅化物基超高温合金表面渗硅层的结构及高温抗氧化性能	赵陆翔 郭喜平 姜嫄嫄	606
一种新型的高温表面耐磨 Cr ₃ C ₂ /Ni ₃ Al 复合材料	李尚平 骆合力 曹 栩 张喜娥 等	612

第 5 篇 高温合金的相关技术

FGH4096 合金惯性摩擦焊接头组织分析	何胜春 张田仓 郭德伦	619
DZ4125 合金 TLP 接头组织及力学性能研究	张 蕾 侯金保 魏友辉	623

IC10 合金 TLP 扩散焊接头强度与分析	侯金保 张 蕾 魏友辉	627
GH2907 与 C_f/SiC 陶瓷基复合材料高温钎焊连接性能研究	张 勇 张国庆 冯 涤 何志勇 等	632
GH2907 合金的氧化行为及防护涂层研究	张绍维 韦家虎	637
航天用高温合金热结构抗氧化涂层技术研究	姚草根 贾中华 吕宏军 陈道勇 等	640
Al-Si 和 NiCr-CrAl 涂层对 IC6AE 合金抗氧化性能的影响	张春晓 曹大明 罗俊义 王德洪 等	644
NiCr-CrAl 渗层对 K465 合金抗燃气热腐蚀性能的影响	王定刚 宋尽霞 肖程波 李 青 等	648
一种高铬高温合金的物理化学相分析	刘庆斌 卢翠芬 李冬玲	652
一种镍基单晶高温合金析出相的物理化学相分析	卢翠芬 刘庆斌 马文有	659
高温合金中铈元素的分析测定	庞晓辉 刘 平 杨军红	663
高温合金在 EPMA/SEM-EDS 条件下合金相准确定量的 新方法	彭志方 杨志刚 阎光宗 陈盛广 等	666
ICP-AES 法测定镍基钎料中铬、硅元素含量	石晓丽 杨春晟	670
采用超声衰减系数法测量镍基粉末冶金高温合金中的孔洞	张 娜 张 莹 张义文 陶 宇 等	673
GH4037 轧制棒材探伤杂波的探讨	董 健 刘 宁 朱宝明 田树森	677
国军标《航空航天用高温合金成品化学成分允许偏差》的应用	王 晔	680

第 1 篇 变形高温合金

我国电力工业发展所需高温结构材料的研究

郭建亭[●] 胡壮麒

(中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要 本文简要介绍了我国电力工业(煤电、气电和核电)的发展以及高温结构材料的需求和研究现状。

关键词 高温结构材料, 电力工业, GH2984 过热器合金, 抗热腐蚀高温合金, GH3690 合金管, 燃气涡轮

Study on the High Temperature Structural Materials for Chinese Power Industry Development

Guo Jianting[●] Hu Zhuangqi

(Institute of Metal Research, CAS, Liaoning Shenyang 110016, China)

Abstract The development of power industries including coal power, gas power and nuclear power and the status quo of high temperature structural materials in China were investigated in the present paper.

Key words high temperature structural materials, power industry, GH2984 superheater alloy, hot corrosion resistant super-alloys, GH3690 alloy tube, gas turbine

电力工业是国民经济可持续发展的先行工业, 至2002年, 我国无论是电力装机容量还是发电量都已跃居世界第二位, 仅次于美国。在各种能源中, 煤炭的蕴藏量是最为丰富的。2000年煤炭占我国能源消费总量的67%, 其中40%用于发电。2000年煤电的装机容量占全国总装机容量的67.3%。中国水利资源丰富, 但水电装机容量仅占全国总装机容量的24.8%。核电和气电还处于初期发展阶段, 分别占0.7%和0.3%。今后10~20年, 中国将大力提高煤的利用, 发展高效清洁的超临界和超超临界火电厂。建设十多座大型水电能源基地。新建一批天然气发电站和1000MW级压水堆核电站。逐步改变中国的能源结构, 提高水电、气电和核电在能源结构中的比重。

除水电外, 无论是煤电还是气电和核电的发展都需要有相应的高温结构材料作为支撑, 性能优异的耐热钢和高温合金材料成为电力工业发展的技术关键。

1 煤电的发展与高温材料的研究

1.1 中国煤电发展概况

中国是世界上最大的燃煤国, 然而, 目前火电机

组平均单机容量不足100MW, 有相当部分为超高压、高压蒸汽参数的机组, 亚临界300MW机组占火电总装机容量不足50%, 平均供电煤耗达399g/(kW·h), 比国外先进水平高70~80g/(kW·h), 高出25%以上, 资源浪费太大, 废气排放严重。发展超临界和超超临界机组是提高煤炭利用率, 降低环境污染的有效而经济的途径之一。

亚临界、超临界和超超临界机组的净效率, 供电煤耗和蒸汽参数见表1。从表可见, 随着蒸汽温度不断提高, 机组效率不断增大, 供电煤耗不断降低。2005年, 国外超超临界机组的参数已达到33.5MPa, 610℃/630℃/630℃。预计到2015年参数可达40MPa, 700℃/720℃/720℃。随着蒸汽参数进一步的提高, 对高温材料的要求愈来愈高。过热器与再热器是锅炉中工作环境最为恶劣的部件, 承受的压力最大, 温度最高, 因此, 要求材料具有良好的抗蠕变性能, 同时还要满足管子对蒸汽侧的抗氧化性能和对烟气侧的抗腐蚀性能的要求。

目前, 超临界和超超临界电站锅炉所需关键高温材料, 主要依靠进口。作者等^[1,2]研制成功的铁基高温合金GH2984可以用作超超临界锅炉过热器和再热器管材。

● 郭建亭 (1938~), 男, 本科, 研究员, E-mail: jtguo@imr.ac.cn

表1 亚临界、超临界和超超临界机组的净效率和供电煤耗^[2]

Table 1 Net efficiency and coal consumption of various coal power generators

蒸汽参数	机组净效率/%	供电煤耗 /g · (kW · h) ⁻¹
17MPa, 538/538℃	37 ~ 38	330 ~ 340
24MPa, 538/538℃	40 ~ 41	310 ~ 320
30MPa, 566/566/566℃	44 ~ 45	290 ~ 300

1.2 超超临界锅炉过热器和再热器候选材料 GH2984

20世纪60年代末,中国科学院金属研究所开始研制一种适合我国高参数舰船主锅炉过热器管长期使用的新型铁基高温合金。至70年代研制成功并生产用于新型主锅炉过热器的GH2984合金管材,装载舰船并经十年海上实际使用考核。全面检查表明, GH2984管完好无损,还可继续使用^[2]。GH2984合金是过热器管材料的主要用材,其主要性能与美国特殊金属公司2003年正式公布的Inconel 740合金^[3]处于同一水平,而价格要便宜得多,这为我国超超临界机组早已作好了过热器和再热器材料的技术储备。GH2984合金的主要特点有如下几方面^[2]:

(1) 高Fe无Co的化学成分。与类似合金比较, GH2984合金中不含钴, Inconel 740、Inconel 617和Nimonic 263等合金都含有 $w(\text{Co})12\% \sim 21\%$ 。而且GH2984合金含 $w(\text{Fe})$ 达 $32\% \sim 34\%$, 镍含量减少, 其他合金Fe均为杂质元素。此成分特点将带来十分可观的经济效益。

(2) 强度优异的力学性能。合金室温至高温拉伸强度以及 $650 \sim 750^\circ\text{C}$ 持久强度非常良好。室温和 700°C 拉伸强度明显高于常用高性能管材合金Inconel 625和Nimonic 263。持久强度高于Nimonic 263, 与Inconel 625相近。在 700°C , 3万h和10万h的持久强度, 与Inconel 740合金处于同一水平, 同时 650°C 和 750°C 的持久强度也基本一样。

(3) 耐蚀性良好的化学性能。由于合金的 $w(\text{Cr})18\% \sim 20\%$, 可形成致密而牢固的 Cr_2O_3 为主的氧化膜, 所以抗氧化性和抗热腐蚀性良好。另外, 合金抗晶间腐蚀性能优异, 在各种不同热处理状态或焊接后没有发生晶界腐蚀。

(4) 较为稳定的显微组织。合金经 $700^\circ\text{C} \times (1000 \sim 18000) \text{ h}$ 长期时效后的组织和力学性能研究结果表明, 合金组织和性能比较稳定, 满足大型舰船及超超临界电站锅炉长期使用的需要。

(5) 易于成形的工艺性能。合金冷热压力加工性

能好, 特别是管材成形性能优异。

2 燃气轮机的发展与高温合金的应用

2.1 中国燃气轮机的发展与应用

20世纪60年代中国开始自行设计并生产透平燃气初温为 700°C 等级的燃气轮机。70年代中期开始生产透平初温为 990°C 等级23000kW燃气轮机, 1978年完成第一台国产化样机的试制工作。80年代与美国GE公司合作生产透平初温 1100°C 等级的MS6001B型燃气轮机, 单机功率40MW, 效率32%, 国产化率60%~70%。为了利用冶金企业的高炉煤气, 2002年与GE达成协议, 合作生产燃烧低热值燃料的燃气轮机。2003年中国的几家汽轮机厂分别从美国GE公司、日本三菱公司等引进技术, 生产100MW和200MW等级的重型燃气轮机发电机组, 目前合作项目顺利进行。

中国轻型燃气轮机制造主要集中在航空工业系统, 20世纪70年代开始, 在航空发动机基础上改型生产了WJ5G、WJ6G、WP6G、WZ6G等型号的工业燃气轮机100多台(套), 用于石油、石化和邮电等部门。1986年, 与美国普惠公司合作开发FT8燃气轮机, 功率25MW、效率38.4%, 是世界上同功率等级中效率最高的。

随着中国经济的快速发展, 燃气轮机的应用获得快速增长, 截止1999年底, 中国发电用燃气轮机的装机总容量为5939MW(不包括港澳台地区), 占当年全国发电装机容量的2%。其中, 重型燃气轮机4735MW, 占79.7%, 而且已从20世纪80年代的简单循环为主逐步过渡到联合循环为主, 发电用重型燃机中, 已有77.5%组成了联合循环发电机组^[11]。标志着中国燃气轮机电站已迈入大容量高效率发展阶段。据2003年统计, 发电用燃机总装机容量已达7000MW, 占全国发电装机容量已上升至3%。我国现有燃气轮机大多数为进口机组, 主要用于发电。按发电千瓦计, 国产部分只占7%左右。进口机组主要分布在沿海经济高速发展区和大中城市。

为了减少燃煤电厂的污染, 应提高燃气轮机组发电比例。因此, 未来5~10年我国对燃气轮机的需求数量很大, 总数将达34000MW左右。燃气轮机的热端部件往往需要综合性能优异的高温合金材料。我国已经研究了一批力学性能良好、抗氧化和抗热腐蚀性能优异的高温合金。

2.2 燃气轮机用高温合金

2.2.1 涡轮叶片和导向叶片

1973年中国科学院金属研究所等科研单位开始研

制 K438 合金, 1976 年试制出两台 (套) K438 合金 I 级涡轮叶片, 代替国外生产的 Rene77 涡轮叶片, 装在进口的两台 2.3 万 W 燃气轮机上, 运行效果良好。近年来作者等^[4-7]研制成功 K435、K444、K452 和 GH4413, 分别用于制备国内新型燃气轮机的涡轮叶片和导向叶片。这些合金化学成分上的共同特点为:

(1) 通常 $w(\text{Cr})$ 在 15% 左右, 可保证零件表面生成有防护性的 Cr_2O_3 保护膜。

(2) 难熔元素通常在 7% ~ 10% 左右。W 和 Mo 的氧化物也能同 Na_2SO_4 反应, 降低熔盐中氧化物离子浓度, 对抗热腐蚀是有利的。

(3) 适当含量的 Al 和 Ti, 保证合金有足够的 γ' 的数量, 以确保合金所需良好的高温强度。同时, 不致因为 γ' 数量太多, 而严重降低抗热腐蚀性能。

此外, 通常含有 $w(\text{Co})$ 10%, 对合金基体进行固溶强化。含有微量的锆, 以强化晶界, 有利于提高高温蠕变和持久性能。四种合金还不含钼, 能大幅度降低合金的价格。K435 和 K444 合金 900℃ 的持久强度在较短持久时间较 K438 合金优异, 在较长持久时间两者相近。四种新研制的抗热腐蚀高温合金的抗张强度和屈服强度都明显优于 K438 合金, 而塑性相当。K435 合金在 800 ~ 900℃, 1000 ~ 10000h 长期时效后, 组织中无 σ 相析出。与标准热处理状态比较, 力学性能变化不大, 说明长期时效过程中组织是比较稳定的。除 K444 合金在 3000h 时效之后有少量 σ 相外, K452 和 GH4413 合金的力学性能和组织在不同温度长期时效过程中的变化规律与 K435 合金类似。

对于燃气轮机涡轮叶片和导向叶片, 往往要经受燃气中所含 Na_2SO_4 和 NaCl 造成的热腐蚀, 我们在实验室采用熔盐坩埚试验法, 在同一条件下测试了 K435、K444、K452 和 K438 合金的抗热腐蚀性能, 试验结果列于表 2。从表可见三种合金的抗热腐蚀性能较 K438 合金好得多, 平均腐蚀速率要低一个数量级。金相组织观察表明, 三种合金在 75% Na_2SO_4 + 25% NaCl 溶盐中, 腐蚀深度也比 K438 合金浅得多。说明三种合金抗热腐蚀性能非常优异, 适合于制作燃气轮机的涡轮叶片和导向叶片。

表 2 K435、K444 和 K452、K438 热腐蚀试验结果

Table 2 Corrosion resistance of K435, K444 and K452、K438 alloy

合 金	温度/℃	时间/h	平均腐蚀速率/ $\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{h})^{-1}$
K435	900	200	0.281
K444	900	100	0.116
K452	900	100	0.190
K438	900	100	1.904

2.2.2 涡轮盘

中国目前主要用作燃气轮机涡轮盘的高温合金有 4 种, 即 GH2132、GH4738、GH4698 和 GH4742。作者等^[8]新近开展了将 GH4698 和 GH4742 制作大型燃气轮机涡轮盘的研究, 在冶炼工艺和锻造工艺方面进行了较为深入的研究, 确定了合适的工艺路线与参数。

GH4698 合金涡轮盘坯最大直径达 1200mm, 质量 1.3t, 这在中国是首次研制这样大规格尺寸的难变形高温合金涡轮盘。为了保证涡轮盘有足够大的锻压比, 以使盘坯组织均匀, 力学性能良好, 母合金采用 6t 真空感应炉熔炼, 选用 $\phi 660\text{mm}$ 真空自耗锭型。真空感应熔炼时将 Al、Ti、Nb 含量控制在上限, 以保持 γ' 相数量不低于 27%, 从而使合金具有良好的高温强度。同时, 熔化期采用低真空, 并适当延长熔化期时间, 以加强去气效果。适当提高配 C 量, 增强高真空下的 C-O 反应, 达到去气去夹杂目的。在真空自耗重熔时, 采用低熔速熔炼, 熔滴脉冲控制, 短弧操作和氦气冷却等技术, 使钢锭结晶状况良好、枝晶偏析减轻、宏观偏析消除, 确保合金锭质量良好。采用高温均匀化退火, 通过高温扩散使钢锭成分均匀化, 改善热加工性能。钢锭开坯在 2000t 快锻机上进行。采用保温毡进行包裹, 钢锭经开坯锻造成 $\phi 435\text{mm} \times 1115\text{mm}$ 棒料。

在 30000t 水压机上进行难变形合金大尺寸涡轮盘的模锻, 选择合适的热加工工艺参数, 并采用包套技术和一火两行程等工艺, 在国内首次完成了难变形高温合金大尺寸涡轮盘饼坯模锻。

3 核电的发展与耐蚀高温合金传热管的生产

通过秦山二期和岭奥项目的合作生产, 中国已经掌握了单回路 30 万 kW 反应堆的 60 万 kW 核电机组的制造技术。2002 年中国核电的装机容量和发电量分别占全国总装机容量和总发电量的 1.2% 和 0.7%。为了提高核电的供电比例, 应尽快建设一批 1000MW 级压水堆核电站, 力争核发电量在 2010 年达到 1270 ~ 1400 万 kW, 2002 年达到 3000 ~ 4000 万 kW^[9], 分别占当年总发电量的 4.8% 和 6.7%。当前的主要任务是降低建设费用, 缩短建设周期, 使上网电价与常规电价相竞争。

压水反应堆 (PWR) 核电站中最关键的高温材料是蒸汽发生器传热管用高温合金, 早期的传热管使用 304 不锈钢或 316 不锈钢, 由于使用过程中出现严重的应力腐蚀开裂, 而造成多次停堆事故。以后改为 Inconel 600 或 800 合金, 取得较好效果, 但耐蚀性能仍不理想。为了提高反应堆的可靠性, 20 世纪 80 年代末, 法国首先采用抗腐蚀性能优异的 Inconel 690 代替 Inconel 600 制作新一代蒸汽发生器传热管, 以后美国和

日本也相继使用,应用效果很好^[10]。大亚湾核电站的蒸汽发生器采用由法国提供的 Inconel 690 合金管。我国从 20 世纪 90 年代开始研制 GH3690 合金管材,研究表明,GH3690 管材的制备和热处理制度的选定是生产合格管材的关键问题。

用真空感应炉+电渣炉双联熔炼工艺生产 GH3690 合金锭,经开坯后制成管坯,然后挤压或轧制成合金管,试验结果^[11]指出,GH3690 合金铸态试样中硫含量小于 $20 \times 10^{-4}\%$ 时,合金的断面收缩率超过 50%,而硫含量大于 $20 \times 10^{-4}\%$ 时,合金的断面收缩率低于 50%,塑性变差。在 900~1000℃,硫含量对面缩率影响明显;1000℃以上,硫对合金塑性影响相对变小。当断面收缩率大于 50% 的大型工业合金铸锭完全可以锻造,并可轧制出板材和管材时^[12],在冶炼过程中应尽可能使钢锭中的硫含量降低至小于 $20 \times 10^{-4}\%$,最好达到 $10 \times 10^{-4}\%$ 左右,才能保证铸锭有很高的热塑性,轧制成合金管材。国内的研究结果表明^[13],在真空感应炉中造渣,并加入脱硫剂,随后进行电渣重熔精炼,可将 GH3690 合金的硫含量降低至 $10 \times 10^{-4}\%$ 左右。加工成管材时具有良好的高温塑性,使从电渣锭到成品管的成材率可以达到 42% 以上,取得了良好的经济效益^[13]。

GH3690 合金是 $w(\text{Cr})$ 高达 30% 的镍基合金,Cr 含量高可使合金具有良好的抗腐蚀性能,但如果热处理制度不合理,可能出现较严重的晶间腐蚀或碱应力腐蚀。文献[14]结果表明,1000~1100℃范围固溶处理,晶间腐蚀率增加较小,在 50% NaOH 高浓度碱溶液中的应力腐蚀影响不显著。经 715℃ 分别进行 2~30h 时效后,结果表明,保持 15h 的晶界腐蚀速率最低,而保持时间对碱应力腐蚀开裂敏感性几乎没有影响。因此,确定 GH3690 合金管的热处理制度为 1050℃ 固溶处理,然后经 715℃ × 15h 时效热处理。此时,晶界贫 Cr 区的 Cr 含量已有相当程度的提高,碳化物有一定程度的长大,而且呈链状分布,这时的热处理使合金达到了最佳耐腐蚀性能。

4 其他能源的发展

到 2020 年中国将建成 14 个大型水电能源基地,2010 年水电发电量力争达到 1.39~1.53 亿 kW,2020 年达 1.86~2.43 亿 kW。中国还将扩大生物能源发电,

风力发电和地热发电等。

5 结语

中国能源紧缺,人均能源储量远远低于世界平均水平,所以必须走能源结构多样化、能源优质化的道路。能源资源储量中煤炭占 92%。为了提高煤的利用率,减少环境污染,中国将在 2020 年以前大力建设超临界和超超临界发电机组。为改变目前不太合理的能源结构,将加强燃气轮机发电机组的制造和核电站的建设,所有这些都与高温材料,尤其是高温合金的发展密切相关,中国必将大力开展能源用高温材料的研究与生产。

参考文献

- 1 中国科学院金属研究所,冶金工业部上海第五钢铁厂,造船总公司七院 703 所. GH984 合金研制总结, 1991
- 2 Guo J T, Du X K. A Superheater Tube Superalloy GH2984 with Excellent Properties, *Acta Metall. Sinica*, 41. 2005
- 3 Smith G D, Sizak H W. *Corrosion 2000*, Houston: NACE International 2000, 00256, 1
- 4 周兰章,王勇,郭建亭. K444 合金研究报告, 2003, 待发表
- 5 周兰章,侯介山,郭建亭. K435 合金研究报告, 2003, 待发表
- 6 袁超,李谷松,郭建亭. K452 合金研究报告, 2003, 待发表
- 7 袁超,贺维勇,郭建亭. GH413 合金研究报告, 2003, 待发表
- 8 赵光普,张北江,郭建亭,袁超等. 燃气轮机大型涡轮盘研究进展, 2006, 待发表
- 9 中国科协能源科学技术综合专题组. 2020 年的中国能源科学技术发展研究, 2004, 待发表
- 10 李强,周邦新. 690 合金的显微组织研究. *金属学报*, 2001, (37): 8
- 11 张炳大,刘奎,侯翠萍,张顺南. S, Mg 对 Inconel 690 合金热塑性的影响. *金属学报*, 31 (增刊), 1995, S258
- 12 Yamaguchi S, et al. *Met Technol*, 1979, 171
- 13 李守军,胡尧和,梅洪生等. GH3690 镍基高温合金的脱硫. *钢铁研究学报*, 2003, 15 (7): 317
- 14 邱绍宇,苏兴,文燕等. 热处理对 690 合金腐蚀性能影响的实验研究. *金属学报*, 1995, (16): 336

高温合金真空自耗重熔的工艺控制

杨玉军^① 赵长虹 李爱民 王志刚

(东北特殊钢集团公司抚顺特殊钢股份公司, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要 本文总结了新型真空自耗炉三年来的生产实践, 结合国外对真空自耗重熔工艺的研究, 对高温合金真空自耗重熔过程中的电流、熔化速率、熔滴频率等控制参数的选择及影响进行了初步阐述。

关键词 高温合金, 真空自耗重熔, 工艺控制

Control of Vacuum Arc Remelting Process for Superalloys

Yang Yujun^① Zhao Changhong Li Aimin Wang Zhigang

(Northeast Special Steel Co., Ltd., Liaoning Fushun 113001, China)

Abstract Based on the practice imported VAR furnace for three years and the foreign development of the VAR process the relationship and choose of current, melt rate, drips in vacuum arc remelting process were discussed in this paper.

Key words superalloy, vacuum arc remelting, process control

真空自耗重熔工艺是为了冶炼钛、锆、钼等合金发展起来的一种冶炼工艺, 但因真空重熔具有去除氮和氢等气体、有害元素(蒸汽压高)、减少氧化物夹杂、实现重熔锭底部至顶端的定向凝固、减轻合金锭中偏析等优点而逐渐应用于特殊钢及高温合金成品钢锭的最终冶炼工序, 以满足航空、航天领域对金属材料的苛刻要求。本文根据我厂新引进的真空自耗设备调试时期所进行的试验工作, 对熔化速率、电流、熔滴频率的关系以及对冶炼过程和冶金质量的影响进行了初步的总结和讨论。

1 试验的过程

新型 12t 真空自耗炉自从安装投产后, 到目前为止共计生产了高温合金 240 余炉。利用消化和摸索该自耗炉工艺的机会, 统计分析了不同锭型、不同钢种的熔化速率、电流、熔滴频率的关系, 分别分析了电流、熔化速率、熔滴控制对冶炼过程稳定性的影响。

2 工艺过程

2.1 真空自耗重熔

图 1 是真空自耗重熔设备的原理示意图。该装置

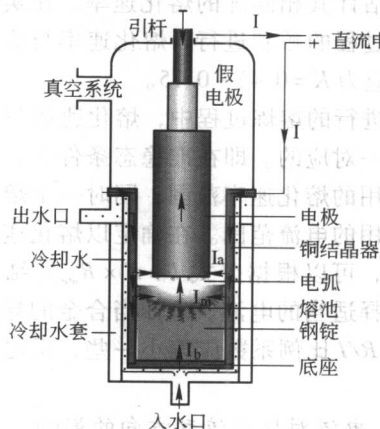


图 1 真空自耗重熔设备示意图

Fig. 1 Sketch of VAR system

由水套、结晶器、炉体、引杆、伺服机构、真空系统组成。在工作时, 结晶器浸入水套中, 并与熔炼电源的正极相连。电源的负极与引杆连接, 该引杆通过滑动的真空密封进入炉内。待熔炼的电极夹紧在控制活塞的机座上。当炉膛抽空以后, 下降电极与在结晶器底座的同种材料的金属垫料触发电弧, 利用电弧产生

^① 杨玉军 (1972 ~), 男, 硕士, 高级工程师。