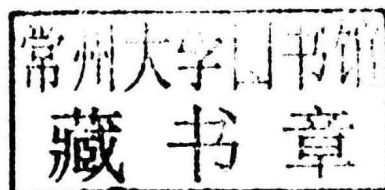


第十三届 中国高温合金年会论文集

■ 仲增墉 主编

第十三届中国高温合金年会论文集

仲增墉 主编



北京
冶金工业出版社
2016

图书在版编目(CIP)数据

第十三届中国高温合金年会论文集 / 仲增墉主编.
—北京: 冶金工业出版社, 2016. 9
ISBN 978-7-5024-7248-1

I. ①第… II. ①仲… III. ①耐热合金—文集
IV. ①TG132. 3—53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 175959 号

出版人 谭学余

地址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红 彭子赫

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7248-1

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2016 年 9 月第 1 版, 2016 年 9 月第 1 次印刷

210mm×285mm; 29.75 印张; 895 千字; 464 页

106.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

第十三届中国高温合金年会论文集

编审委员会

主 编 仲增墉

主任委员 张 继

委 员 张 健 孙晓峰 李嘉荣 肖程波 王志刚
 王 宁 何云华 董建新 王 磊 宫声凯
 刘 林 王 凯

编 审 组 燕 平 李嘉荣 孙晓峰 王志刚 华文杰
 何云华 董建新 王 磊 张义文 杜金辉
 刘建涛 王 莉 李凤艳

编 辑 组 童金涛 王 凯 张兆龙

前 言

中国高温合金年会每四年举办一次，是我国高温合金领域高校、研究院所、生产单位、应用单位开展学术研讨、技术交流的重要平台。2015年5月21日，第十三届中国高温合金年会在北京顺利召开。32家单位的500余名代表参加了此次会议。共汇集了117篇优秀论文收录于《第十三届中国高温合金年会论文集》中。

《第十三届中国高温合金年会论文集》中的论文充分反映了近年来我国高温合金材料研制、生产及应用等方面取得的成绩与突破，主要包括：航空发动机用单晶涡轮叶片、粉末及高性能变形涡轮盘等热端部件的研制，超超临界发电、核电、油气开采等民用领域中新型高温合金材料的开发和应用，高温合金批量生产过程中的质量控制和稳定性提升技术等等。

为了满足新时代我国航空、航天、舰船、能源等高端制造业快速发展的需求，支撑“航空发动机及燃气轮机”、“大飞机”等国家科技重大专项，需要提升国产高温合金批产质量稳定性并降低成本，结合“一材多用”技术扩大产量；利用模拟仿真技术缩短新合金和新技术研发周期和成本；在关键的尖端品种和前沿技术上实现创新和超越；深入研究全寿命服役条件下高温合金材料的组织性能变化，提高应用的可靠性。相信在广大高温合金同仁的共同努力下，中国高温合金事业将取得更加辉煌的成绩！

仲增广

2016.5

目 录

变形高温合金

改进发展高温合金, 推动航空发动机研制	王旭东 王海川 (3)
固溶温度对 GH1016 合金组织和性能的影响	王志刚 李爱民 张鹏 侯智鹏 曹政 王明 王洋洋 刘猛 (7)
GH2036 合金盘坯亮斑问题及解决方法研究	高首磊 (10)
磷化物在 GH2706 合金中的析出规律研究	章莎 信昕 孙文儒 孙晓峰 郭守仁 (14)
GH2761 合金铸态组织中 η 相的溶解及扩散	魏志刚 孙文儒 张健英 谢伟 陈国胜 (18)
GH2901 合金台阶轴表面裂纹原因探析及工艺优化	周江波 (22)
GH2907 合金精锻工艺分析	王志刚 田水仙 杨晓利 李宁 王树才 于杰 侯智鹏 (26)
锻造工艺对 GH2909 合金大规格棒材组织与性能的影响	王信才 韦家向 何云华 (29)
GH3230 合金中 La 元素烧损行为分析	王明 鞠泉 王志刚 邱菊 韩艳云 陈璐柯 (33)
GH3625 合金管坯热挤压温度研究	韦家向 苏承龙 何云华 (37)
GH3625 合金无缝钢管的研制开发	王宝顺 李邦周 杨晨 王曼 苏诚 (41)
高性能涡轮盘材料 GH4065 及其先进制备技术研究	张北江 赵光普 张文云 黄烁 陈石富 (45)
固溶处理冷却速度对 GH4141 合金组织及性能的影响	李宁 李爱民 王艾竹 王树才 闫森 赵凤娟 (46)
长期时效对 GH4169 合金疲劳裂纹扩展行为的影响	姚志远 王磊 刘杨 宋秀 蔡文良 (50)
应变速率对 GH4169 合金激光焊接接头变形行为的影响	李妨 刘杨 王磊 薛霖 (56)
GH4169 涡轮盘锻造与热处理残余应力计算	王彦菊 张勇 关永军 韦家虎 姚波 (61)
锻造开坯对 GH4169 合金棒材显微组织及性能的影响	邓群 杜金辉 曲敬龙 唐超 赵兴东 赵长虹 (65)
GH4169 合金高温疲劳行为的原位观察	吕旭东 邓群 杜金辉 曲敬龙 王氏庆 毕中南 唐超 (69)
航空发动机机匣类 GH4169 合金异形环件锻造工艺研究	罗鸿飞 王华东 杨家典 杨智凯 吴永安 (73)
快锻 + 径锻工艺对 GH4169 合金涡轮盘棒坯组织影响的研究	杨亮 张玉春 吴贵林 王骁楠 李凤艳 王志刚 赵长虹 (77)
GH4169 合金锻造工艺对晶粒尺寸影响研究	裴丙红 (81)
热处理对 GH4169 合金高温性能的改善研究	王龙祥 魏志坚 李培建 奚晓 (85)
磷、硼对直接时效 GH4169 合金 650℃ 长期时效稳定性的影响	孙文儒 信昕 于连旭 郭守仁 胡壮麒 (89)
GH4169G 合金高应变速率超塑性研究	黄林杰 祁峰 张安文 孙文儒 胡壮麒 (93)
IN718 合金快锻细晶大规格棒材的组织与性能	王资兴 陈国胜 王庆增 王磊 (97)
应变速率对时效态 GH4199 合金拉伸变形行为的影响	王冉 王磊 晋俊超 刘杨 宋秀 (102)

GH4698 合金 750℃ 拉伸塑性影响因素的研究

..... 李凤艳 张玉春 王志刚 赵长虹 吴贵林 李连鹏 王彦良 唐荣祥 管庆阳 (107)

微量元素 P、B 对 GH4706 合金力学性能的影响

..... 黄烁 赵光普 王磊 张北江 胥国华 秦鹤勇 (111)

GH4706 合金超大尺寸棒材冶炼及加工工艺研究

..... 阚志 吴贵林 于腾 张玉春 王志刚 赵长虹 (115)

难变形镍基高温合金 GH4720Li 合金的径锻工艺研究与实践

..... 于腾 吴贵林 阚志 潘慧君 曲敬龙 毕中南 唐超 (118)

新型镍基高温合金 GH4720Li 固溶处理过程中的晶粒长大行为

..... 阚志 杜林秀 (122)

GH4720Li 合金超塑性变形及断裂行为研究

..... 李钊 王涛 付书红 张勇 (126)

U720Li 合金大尺寸盘锻件和环形件锻造工艺研究

..... 王涛 李钊 夏春林 刘东 叶俊青 张勇 付书红 魏志坚 郭灵 (130)

定向凝固 U720Li 合金的高温塑性变形行为

..... 高博 王磊 梁涛沙 刘杨 宋秀 曲敬龙 (135)

重复固溶处理对 GH4738 合金异型丝材组织和性能的影响

..... 方波 陈仲强 冯贞伟 刘艳 孙铁峰 宋玺玉 牛静 曹一超 于广娜 崔媛 张玉忱 (136)

超大型烟气轮机 $\phi 1450\text{mm}$ 涡轮盘用 GH4738 合金成分优化设计研究

..... 姚志浩 董建新 张麦仓 李克雄 张玉峰 谢伟 李蓬川 (140)

固溶温度对优质 GH4738 合金组织及力学性能的影响

..... 曲敬龙 荣义 张麦仓 吴玉博 唐超 毕中南 杜金辉 (144)

喷射成型 GH4738 合金形变组织研究及神经网络预测

..... 王悦 许文勇 刘娜 郑亮 袁华 杨冬野 陈昊 丁方正 李周 张国庆 (149)

制备热历程对 GH4742 合金涡轮盘组织性能的影响

..... 张文云 张北江 陈石富 秦鹤勇 胥国华 赵光普 (153)

海洋环境用新型高强耐蚀 GH4925 合金的显微组织和力学性能

..... 石照夏 颜晓峰 周江波 赵明汉 段春华 (157)

难变形高温合金 GH4976 的热变形行为

..... 张亚洲 张勇 李佩桓 田世藩 (162)

一种高温合金的组织演变规律研究

..... 牛永吉 张志伟 安宁 田建军 史世凤 高杨 (166)

高强高洁净细晶 GH690 合金 C 含量优化控制

..... 颜晓峰 石照夏 赵明汉 段春华 (170)

铸态 690 合金热压缩行为研究

..... 王珏 董建新 王浩宇 (175)

热轧工艺对 GH690 合金板材组织和力学性能的影响

..... 贾崇林 张国庆 张勇 王涛 李钊 张亚洲 李佩桓 李柏林 (180)

热处理制度对 GH864 合金组织性能的影响

..... 丑英玉 刘晓斌 李凤艳 刘宁 曹政 李如 赵长虹 王志刚 (184)

Incoloy 028 挤压管析出相分析及解决途径

..... 方轶 (188)

冷拔工艺对 MP159 合金组织及性能的影响

..... 王艾竹 王志刚 李爱民 管庆阳 李宁 于杰 王树才 (192)

新型镍基高温合金 Haynes 230 组织性能及热结构研究

..... 李启军 姚草根 吕宏军 单群 赵世强 黄思原 贾新朝 赵丰 (196)

薄壁 HAYNES 230 合金异形环件工艺研究

..... 何涛 杨家典 孙传华 王攀智 (200)

一种新型燃烧室材料 Haynes 282 合金

..... 鞠泉 童金涛 张勇路 马惠萍 (204)

固溶工艺对 Superalloy80A 合金组织与硬度的影响

..... 潘彦丰 吴贵林 王骁楠 齐超 王志刚 刘晓斌 曹政 (208)

UNS N06625 合金热成型参数分析	张春林 宁天信 王新鹏 陈帅超 罗利阳 (212)
超超临界电站用 740H 和 617B 合金焊件组织观察	江河 叶建水 董建新 张麦仓 姚志浩 (216)
Cr 和 Al 元素对镍基高温合金抗氧化性能影响规律研究	章清泉 李明扬 吴会云 曹宇 魏然 (221)
固溶温度对 Ni-Cr-Al 基高温合金组织和性能的影响规律	安宁 牛永吉 张志伟 田建军 李振瑞 史世凤 (225)
一种新型 Fe-Ni-Cr 基高温合金的显微组织和性能	段春华 石照夏 裴丙红 陈霞 (229)
均匀化处理工艺对 Thermo-Span 合金力学性能的影响	于连旭 孙文儒 刘芳 张伟红 信昕 祁峰 贾丹 胡壮麒 (233)
一种镍基高温合金保护气氛电渣重熔大锭冶金质量的研究	李连鹏 邢宝富 关旭东 杨松 潘彦丰 吴贵林 (237)
镍基高温合金热挤压工艺数值模拟	张明 刘国权 刘建涛 胡本芙 (240)

铸造高温合金

吹砂压力与加热温度对 DD406 单晶高温合金再结晶的影响	熊继春 李嘉荣 (247)
DD407 单晶合金拉伸断裂特征	韩凤奎 燕平 赵京晨 黄子琳 王其荣 王燕坡 吴亚夫 (252)
DD407 单晶合金再结晶研究	韩凤奎 燕平 赵京晨 曾强 张龙飞 薛鑫 黄俊 (256)
DD9 单晶高温合金拉伸性能各向异性	王效光 李嘉荣 喻健 刘世忠 史振学 岳晓岱 (260)
Hf 对第二代镍基单晶高温合金 DD11 高温低应力持久性能的影响	赵云松 张剑 骆宇时 唐定中 冯强 (261)
一种低密度定向凝固高温合金 DZ424	宋友辉 吴剑涛 吴保平 李俊涛 董建新 王祯 刘浩然 李培佳 (262)
B 在 K417G 合金中的作用研究	刘芳 于连旭 信昕 孙文儒 郭守仁 胡壮麒 (266)
浇注温度对 K417G 合金组织的影响	信昕 张伟红 郑启 孙文儒 胡壮麒 (270)
K424 薄壁密封片铸件无余量精密铸造工艺研究	王祯 李俊涛 孔胜国 陈兴福 (274)
K488 合金第四级涡轮透平动叶片的熔模精密铸造工艺研究	姚雷 杨曼利 王倩 任占友 谢秋峰 黄俊 薛鑫 孔胜国 李俊涛 (278)
高温时效处理对 K492M 等轴晶铸造高温合金显微组织和持久性能的影响	刘晓光 任晓冬 李相辉 盖其东 胡聘聘 汤鑫 (282)
K4002 合金异型复杂薄壁进气道铸件的成型工艺研究	谢秋峰 吴亚夫 王倩 陈兴福 孔胜国 李维 李俊涛 (286)
凝固方式对 IC10 合金性能的影响	王帅 张帅奇 张俊 谭永宁 (290)
铸态 U720Li 合金中富 Zr 相的溶解与再析出	赵广迪 孙文儒 祁峰 贾丹 郭守仁 胡壮麒 (294)
M951 合金导向叶片组合件熔模精密铸造工艺研究	李杨 刘浩然 李培佳 谢秋峰 孔胜国 李俊涛 (298)
热等静压对一种单晶高温合金组织的影响	史振学 岳晓岱 刘世忠 王效光 李嘉荣 (302)
几种高温合金的单晶叶片可铸性研究	马德新 张琼元 王海洋 王海伟 陈学达 巩秀芳 杨功显 (306)
高温合金叶片单晶凝固技术的新发展	马德新 (310)
抽拉速度和固溶温度对一种单晶高温合金组织和持久性能的综合影响	刘金来 金涛 张炫 赵乃仁 孟祥斌 孙晓峰 (311)

一种含 2% Ru 单晶镍基合金的组织结构与蠕变性能	李秋阳 田素贵 蒋崇亮 丁鑫 (315)
一种新型 Ni 基单晶高温合金的高温循环氧化行为	赵运兴 刘军 王薪 江亮 (319)
高温合金定向凝固中铸件形状对雀斑形成的影响	马德新 (323)
镍基单晶高温合金中微孔对材料持久断裂行为的影响	曾强 燕平 张龙飞 黄秋玉 (327)
晶粒组织结构对镍基高温合金持久性能的影响	李相伟 谢光 董加胜 张功 董哲 彭建强 楼琅洪 张健 (331)
镍基单晶高温合金冷热循环过程中圆孔周围裂纹萌生与扩展行为	王莉 周忠娇 张少华 降向冬 楼琅洪 张健 (335)
碳含量对一种镍基高温合金组织的影响	张伟红 信昕 贾丹 于连旭 孙文儒 胡壮麒 (336)

新型高温合金及前沿技术

脉冲电流下 GH4169 合金高温拉伸性能及动态再结晶的研究	苑丹 王磊 刘杨 宋秀 刘超 (343)
降低变形高温合金 GH4169 盘件残余应力试验研究	张勇 李佩桓 王涛 李钊 张亚洲 贾崇林 (347)
静电场处理对 GH4169 合金中 δ 相析出行为的影响	王磊 安金岚 刘杨 宋秀 胥国华 赵光普 (351)
静电场处理对 GH4169 拉伸变形行为的影响	费璟璐 王磊 刘杨 王尧 (352)
重型燃机 GH4706 合金超大型涡轮盘制备工艺的优化与实施	赵光普 张北江 黄烁 秦鹤勇 张文云 阙智 魏志刚 齐占福 谢静 (356)
VIM + PESR + VAR 三联工艺 GH4720Li 合金的冶金质量	王庆增 张月红 吴静 王资兴 陈国胜 陆勇 曲敬龙 唐超 (360)
SiC _p /GH4738 复合材料的界面行为与高温拉伸性能	李佩桓 曲选辉 张勇 黄浩 张国庆 王涛 张亚洲 贾崇林 (364)
镍基粉末高温合金 FGH4096 的拉伸性能及其失效机制	刘小涛 丁晗辉 杨川 刘锋 江亮 (368)
热挤压态 FGH4096 镍基粉末高温合金的热变形行为的研究	杨川 刘小涛 司家勇 刘锋 江亮 (372)
FGH4096 合金盘件双组织热处理的数值模拟及试验验证	刘建涛 陶宇 张义文 张国星 刘明东 钟燕 董志国 (377)
微量元素 Hf 对 FGH4097 粉末高温合金力学性能的影响	张义文 吕日红 韩寿波 张莹 王鸣 李晓欣 胡本芙 (381)
微量元素 Hf 对镍基粉末高温合金 FGH4097 显微组织的影响	张义文 韩寿波 贾建 刘建涛 胡本芙 (385)
热处理工艺对 MGH956 合金冷轧板材再结晶的影响	田耘 柳光祖 杨峥 (386)
核电用钴基高温合金 SG6 冷拔材研制	邢宝富 阙志 山富余 管庆阳 赵长虹 (390)
一种粉末高温合金涡轮盘热处理残余应力分析	马国君 武丹 王旭青 陈昊 丁方正 (394)
新型第三代粉末高温合金的喷射成型制备研究进展	葛昌纯 郝志博 袁超 张玉春 叶俊卿 (397)
高性能粉末高温合金长期时效 γ' 相粗化动力学	闫飞 刘国权 张义文 吴凯 胡本芙 (402)
拉伸试验测试不确定性发生机理探讨	徐庭栋 刘珍君 王凯 (406)
一种氩气雾化镍基高温合金粉末的组织结构研究	焦东玲 彭翰林 郑亮 Hong Z. L. 李周 刘仲武 张国庆 (410)

耐高温轻质 Nb-Ti 合金制备及组织性能研究

..... 李启军 姚草根 吕宏军 单群 贾新朝 丁水 涂昱 (415)

Ni 基粉末高温合金 γ' 相溶解温度的成分敏感性研究

..... 田高峰 陈阳 王悦 周磊 武丹 邹金文 (419)

Ni 基定向凝固高温合金表面 CoCrAlY 黏结层在 1050℃ 长期热暴露条件下的组织演变

..... 任维鹏 李青 宋尽霞 肖程波 何利民 (423)

一种新型粉末镍基高温合金的热变形行为及其组织演变

..... 何国爱 刘锋 江亮 (427)

数值模拟技术在高温合金熔模精密铸造中的应用进展

..... 王浩 朱小武 金海鹏 韦家虎 (431)

不同打孔工艺对孔边微观组织的影响

..... 周忠娇 王莉 赵民革 黄敏 常剑秀 楼琅洪 张健 (435)

硫氰酸盐光度法测定高温合金中铁含量方法的改进

..... 杨道兴 (439)

提高镍基高温合金表面质量的 CC-ESRR 新工艺

..... 郑亚旭 姜方 都郢祁 郭保善 林鹏 薛正学 (444)

铈团簇可能性的第一性原理计算

..... 王子 江勇 刘锋 黄再旺 江亮 (448)

高温合金热加工高通量测试方法及应用研究

..... 司家勇 廖晓航 谢利强 刘锋 (452)

掺杂元素和 γ' 相溶解对 Ni-Cr-Fe 基高温合金热膨胀系数的影响

..... 池天惠 施展 李晓菲 李卫彬 卢勇 杨水源 王翠萍 刘兴军 (457)

γ/γ' Ni-Al 合金中 γ' 溶解对热膨胀系数的影响

..... 施展 李晓菲 池天惠 李卫彬 卢勇 杨水源 王翠萍 刘兴军 (461)

变形高温合金

BIANXING GAOWEN HEJIN



改进发展高温合金，推动航空发动机研制

王旭东¹，王海川²

- (1. 中航涡轮院材料应用研究室，成都，610500；
2. 钢铁研究总院高温材料研究所，北京，100081)

摘要：简述高温合金在航空发动机的应用和需求，剖析存在问题，提出改进发展高温合金，推动航空发动机研制的建议。

关键词：高温合金；航空发动机；应用；研制

Improved Development Superalloys, Promote the Aero-engine Development

Wang Xudong¹, Wang Haichuan²

- (1. Air Turbine Materials Research Laboratory, Chengdu, 610500; 2. High Temperature Materials Research Division, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing, 100081)

Abstract: A brief introduction to the Superalloys in Aero-Engine applications and needs. Analysis on main problems and propose recommendations to improve development Superalloys.

Keywords: superalloys; aero-Engine; application; research

高温合金是为满足航空发动机热部件对材料的苛刻要求而开始研制的，现已成为军用和民用发动机不可取代的关键材料。

1 高温合金在航空发动机中的作用和地位

高温合金在 600℃ 以上具有良好的综合性能，在现代航空发动机研制中的用量占到发动机质量 40% ~ 60%，被誉为“先进发动机的基石”。高温合金已成为决定发动机技术发展进程的关键因素。军用发动机通常以推重比综合评定其技术水平，提高涡轮前温度是提高推重比最直接的途径。航空装备不断升级，对发动机推重比的要求越来越高，对高温合金的依赖越来越大，要求越来越苛刻。改进发展高温合金，推动航空发动机研制，任重而道远。

2 高温合金在航空发动机的应用及需求

发动机是飞机的“心脏”，是尖端制造业典型代表，集中了工业化、信息化的技术精华，被誉为现代工业“皇冠上的明珠”，最能体现一个国家的工业基础、科技水平和国防实力。

航空发动机在高温、高压、高转速下长期工作，高温合金是热部件的首选材料，主要用于燃烧室、涡轮、喷管等热部件和压气机后段零件，见图 1。

2.1 在压气机部件的应用及需求

压气机的功能是进一步压缩空气，为燃油的燃烧提供气源，也为热部件冷却、冷部件加温及封严提供高速气流。压气机进出口气流的平均温

度 300 ~ 600℃，峰值温度超过 700℃，总压比超过 20。

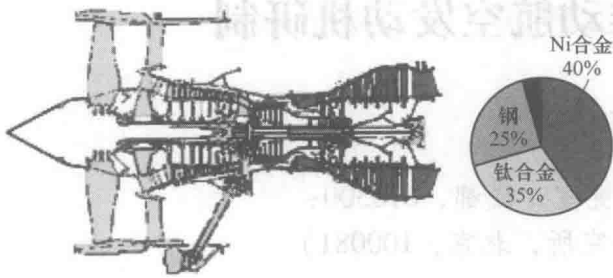


图 1 高温合金在现代民用航空发动机的应用部位
Fig. 1 Application parts of Superalloys in Aero-engine

压气机部件用材料较多，高温合金是关键材料之一。压气机后段温度较高，采用 GH4169 等变形合金制造转子件（叶片、轮盘等）和静子件（叶片、机匣等）。性能更优的粉末盘、GH4169G、718Puls 已在先进发动机中应用。为满足先进高性能发动机需求，国内外正在研究 TiAl 系金属间合金、Ti 基复合材料（MMC）等轻质材料。

2.2 在燃烧室部件的应用及需求

燃烧室的功能是将燃油的化学能释放为热

能，是发动机热能发源地。燃烧室进出口气流平均温度 600 ~ 2000℃，芯部燃气平均温度 1500 ~ 2100℃。有两股气流冷却燃烧室降低壁温。燃烧室是温度最高、温度变化最大的热部件。

燃烧室部件用的高温合金种类较多，以变形合金为主，主要用于内外机匣、火焰筒等零件。传统的高温合金板材受合金熔点限制，已基本达到许用极限温度，难以进一步发展，须研究新材料和制备技术，以满足使用需求。目前国际上研究比较热门的新材料有陶瓷基复合材料（CMC）、MMC、机械合金化合金（ODS）、TiAl 金属间化合物和多孔层板等，用于火焰筒的 CMC 已可耐 1670℃ 高温。

2.3 在涡轮部件的应用及需求

涡轮的功能是将燃气的热能转化为机械能，驱动压缩系统转子，为发动机和飞机提供机械能。涡轮是热负荷和机械负荷最大的热部件。涡轮盘和叶片是发动机技术难度的典型代表，最能体现“一代发动机、一代材料、一代工艺”的变化和高温合金的发展，见表 1、图 2。

表 1 各代发动机性能和涡轮盘、叶片材料变化

Tab. 1 The performance characteristic of generations of engines and the change of disk and blade material

项 目	II	III	IV	V
推重比	4 ~ 6	7 ~ 8	9 ~ 10	15 ~ 20
压气机出口温度/℃	377 ~ 427	527 ~ 627	577 ~ 627	677 ~ 927
涡轮前温度/℃	977 ~ 1227	1327 ~ 1477	1577 ~ 1677	1977 ~ 2077
涡轮盘轮缘温度/℃	< 600	650	700	780 ~ 950
典型发动机	WP8、斯贝 MK202、WP7、WP13	F404、F110、M88-2、WS10	F119、EJ200	预计 2018 年问世
涡轮盘材料	Fe-Ni 基、Ni 基合金、GH3036、GH2901、GH4133B	Ni 基高温合金、粉末盘 GH4169、FGH95	第二代粉末盘 Rene88DT、N18	双性能粉末盘、纤维增强超合金
涡轮叶片结构	实心，简单空心	气膜冷却复杂空心	高效复合冷却空心	双层壁超冷，铸冷
涡轮叶片材料	铸造合金，定向凝固	定向凝固，第一代单晶	第二代单晶合金	第三代单晶，TiAl 金属间化合物

导向叶片调整燃烧室出口燃气流动方向，是涡轮部件受热冲击最大、温度最高的零件。一般来说，同一状态下导向叶片的平均温度比工作叶片高 100℃ 左右，但应力较低。

工作叶片是离心负荷最大、工况最恶劣的零

件。叶片在高温下高速旋转做功，承受的离心力相当于自重的 20000 倍，犹如“冰质糕匙搅热汤”，对材料、工艺和设计都是严峻考验。

熔模精铸技术突破后，采用定向凝固制备的定向、单晶合金的许用温度接近其初熔点的 90%，

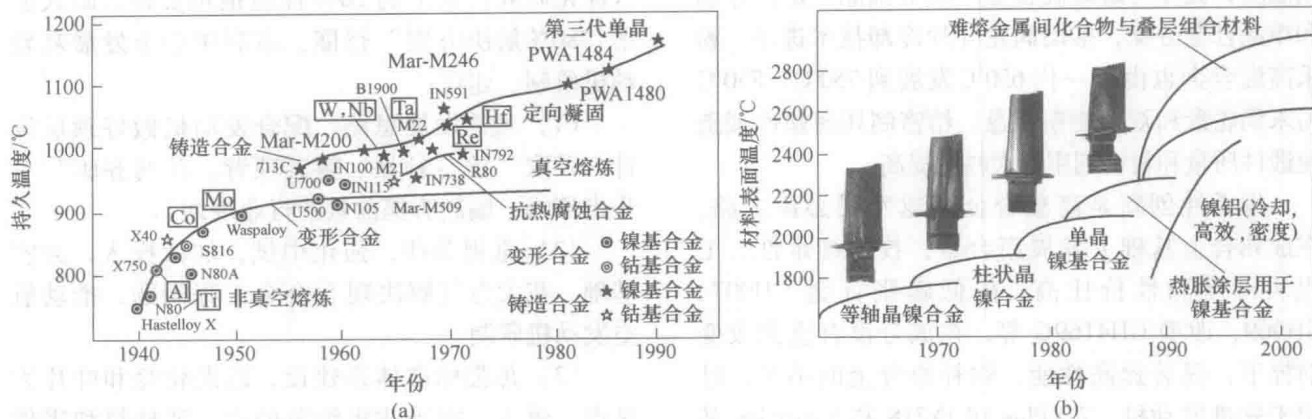


图2 高温合金发展

Fig. 2 Development Superalloys

(a) 高温合金发展; (b) 涡轮叶片材料发展

各国先进航空发动机都采用定向、单晶合金制造涡轮叶片提高工作温度。F119 发动机用二代单晶 PWA1484 制成的超级冷却铸冷涡轮叶片, 工作温度达到 $1621 \sim 1677^{\circ}\text{C}$ (比 F100 高 200°C)。

国际上单晶合金发展很快, 现已发展到第五代。单晶合金熔点有限制, 提高叶片工作温度主要靠冷却技术。冷却效果越高, 叶片内腔结构越复杂, 制造难度越大, 需要发展制造工艺和新材料。目前国际上已在研究对开单晶叶片、多孔层板叶片和耐温更高的 Nb-Mo 合金、CMC 叶片、碳/碳复材整体涡轮等。

涡轮盘是四大热部件质量和负荷最大的零件。盘轮缘温度 $550 \sim 750^{\circ}\text{C}$, 轮毂约 300°C , 温差应力和离心应力很大, 还需承受启动、停车的大应力交变疲劳。GH4169 涡轮盘用量最大, 性能更优的粉末盘成为涡轮盘的首选, 第二代粉末盘、双性能粉末盘已在先进发动机应用。第三代粉末盘、纤维增强金属基涡轮盘、单晶叶片 + 粉末盘整体涡轮等是当前热门研究课题。

2.4 在加力燃烧室和喷管部件的应用及需求

加力燃烧室组织第二次燃烧, 使燃气进一步加温加速, 通过喷管按设定方式急速排出而产生推力。加力燃烧室和喷管工况恶劣, 尾喷口燃气的温度 $727 \sim 1877^{\circ}\text{C}$, 燃气的速度在亚声速和超声速之间, 内壁主要承受燃气冲刷、热应力和振动应力等。

加力燃烧室和喷管部件用变形高温合金较多, K24 等铸造合金主要制造喷管调节片等薄壁件。调

节片长、宽、厚悬殊精铸工艺难度不亚于涡轮叶片。更耐温的 CMC 调节片已在先进发动机应用, 减重效果显著。

3 改进发展高温合金, 推动航空发动机研制

我国航空发动机长期落后于国外先进水平, 航空材料是三大制约因素之一。高温合金是航空材料主体, 剖析其技术难点和创新思路, 对加快合金发展, 推动发动机研制至关重要。

3.1 高温合金的技术难点与创新

在高温环境下材料各种性能退化加速, 组织性能不稳定, 在温度和应力交互作用下容易变形、裂纹、氧化腐蚀等, 危及使用安全。合金耐温能力和组织稳定性主要取决于其化学成分和组织结构。成分复杂、合金化程度高, 容易元素偏析、变形困难和组织不均, 对铸造和变形合金组织性能危害极大。合金在试验室的组织性能, 不能完全代表零件在服役环境下材料的组织性能, 目前尚难以表征二者材料行为和损伤失效模式的对应关系, 需成倍增加试验考核成本和风险。这些都是高温合金研究和应用的技术难点。

高温合金发展是合金化理论和制备工艺不断改进创新的过程, 工艺对合金发展起到极大推动作用。真空熔炼技术, 去除有害杂质和气体, 精确控制合金成分, 使高温合金组织性能不断提高。定向凝固、粉末冶金、等温锻造等工艺创新, 推动合金迅猛发展和发动机技术进步。如定向凝固技术提高合金许

用温度,促使铸造高温合金形成等轴晶、定向柱晶和单晶合金分支,推动涡轮叶片冷却技术进步。粉末高温合金也由第一代 650℃ 发展到 750℃、850℃ 粉末涡轮盘和双性能粉末盘。精密制坯超塑性锻造使锻件质量和材料利用率大幅度提高。

继承性创新是高温合金快速发展必由之路。在成熟合金基础上发展新合金,技术继承性、工程认可度和性价比高。如低膨胀合金 GH907、GH909,改型 GH4169G 等,在成分没有重大改变前提下,显著提高性能,弥补原合金的不足,已用于先进发动机。718Plus 在 IN718 和 Waspaloy 基础上发展的新合金,许用温度达到 704℃,填补了这一档次盘类合金空白。

3.2 改进发展高温合金措施的建议

我国高温合金历经 60 年发展,建立了合金体系,形成设备比较先进、有一定规模的生产基地,基本解决国内需求。但基础薄弱,预研和中试不足,材料滞后而疲于奔命。研发或仿制合金通常做到国外同类产品原性能的 80%,难有经费再投

入深化研究,余下的 20% 性能很难实现,陷入所谓“80% 解决方案”怪圈,不利于合金发展和发动机研制。建议:

(1) 理清发展思路,配合发动机做好顶层设计,采取“填空补缺、望其项背、并驾齐驱”三步走策略,编制有提前量的行业规划。

(2) 重视预研,强化中试,加大投入,夯实基础,花大力气解决现有合金工程问题,推动航空发动机研制。

(3) 加强标准体系建设,以涡轮盘和叶片为试点,建立、完善注重细节的主、辅材料和零件制造工艺的协调配套企业标准。

(4) 强化全过程控制,推行首件批准和质量承包程序管理,做到“凡事有章可循、凡事有人监督、凡事可以追溯、凡事有人负责”。

(5) 加强残存、痕迹元素研究,控制合金纯净度,在材料标准中按不同级别规定残存、痕迹元素总个数、单个及总和的允许极限。

(6) 系统研究返回料再利用,降低生产成本,提升产品竞争力。

固溶温度对 GH1016 合金组织和性能的影响

王志刚, 李爱民, 张鹏, 侯智鹏, 曹政, 王明, 王洋洋, 刘猛

(抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 辽宁 抚顺, 113001)

摘 要: 本文研究了 980 ~ 1160℃ 之间不同固溶温度对 GH1016 合金的晶粒组织、硬度、室温拉伸性能和 750℃ 拉伸性能的影响。结果表明, GH1016 合金的再结晶开始温度和完成温度分别为 1010℃ 和 1040℃; 在 1040 ~ 1160℃ 之间, 随着固溶温度的提高合金的晶粒度、强度、硬度变化很小, 室温拉伸塑性有小幅提高, 750℃ 拉伸塑性先下降后上升, 1130℃ 达到最低点。

关键词: GH1016 合金; 固溶温度; 组织性能

Effect of Solution Temperature on Microstructure and Properties of GH1016 Alloy

Wang Zhigang, Li Aimin, Zhang Peng, Hou Zhipeng, Cao Zheng,
Wang Ming, Wang Yangyang, Liu Meng

(R&D Center of Fushun Special Steel Co., Ltd. Technology Center, Fushun Liaoning, 113001)

Abstract: This paper studies the effects of different solution temperature at 980 ~ 1160℃ on grain structure, hardness, tensile properties at room temperature and 750℃ tensile properties of GH1016 alloy. The results show that recrystallization of GH1016 alloy starts and finishes at 1010℃ and 1040℃ respectively. With the increasing of solution temperature between 1040℃ and 1160℃, the grain size, strength and hardness have a very small change, and the tensile plasticity has a little increase at room temperature. At 750℃, tensile plasticity decreases firstly, and then increase, and at 1130℃, it reaches to the lowest point.

Keywords: GH1016 alloy; solution temperature; microstructure and properties

GH1016 合金是以 Fe-Ni 为基体, 以铬、钨和钼等元素进行强化的固溶型变形高温合金^[1], 具有良好的抗氧化性和抗冷热疲劳性能。GH1016 合金可在 950℃ 以下长期使用, 应用于制造航空发动机燃烧室板材冲压件和焊接结构件, 是我国自主研发的铁基合金之一^[2]。20 世纪 90 年代开始, 国内科技工作者^[3,4]对 GH1016 合金 750℃ 拉伸性能的影响因素进行了较详细的研究。文献 [3] 指出, GH1016 合金的 Ca + Mg 残余含量控制在 0.005% ~ 0.0083% 对 750℃ 拉伸塑性大有好处。文献 [4] 指出, GH1016 合金采用 1160℃ × 40min、炉冷至 1050℃ × 2h 空冷处理, 合金的 750℃ 拉伸

塑性可得到大幅度提高。但是固溶处理温度对 GH1016 性能的影响, 没有文献报道。本文通过不同固溶温度处理后合金的综合性能进行比较, 分析了晶粒度对合金性能的影响, 为以后工业生产的组织控制提供借鉴。

1 试验材料和方法

试验采用中频感应 + 电渣工艺生产的 GH1016 合金, 化学成分如表 1 所示。锭型为 $\phi 360\text{mm}$, 在 3150t 快锻机上锻造成 120mm 方坯, 然后在方坯上相当于 1/4 对角线的位置沿纵向切取 $\phi 15\text{mm}$ 拉伸