



第十四届

中国高温合金年会论文集

■ 中国金属学会高温材料分会 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

第十四届中国高温合金年会论文集

中国金属学会高温材料分会 主编

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2019

图书在版编目(CIP)数据

第十四届中国高温合金年会论文集 / 中国金属学会
高温材料分会主编. —北京: 冶金工业出版社, 2019. 8
ISBN 978-7-5024-8193-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 176478 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 yjgbs@cnmp. com. cn

责任编辑 高 娜 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8193-3

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2019 年 8 月第 1 版, 2019 年 8 月第 1 次印刷

210mm×285mm; 41. 5 印张; 1194 千字; 651 页

227. 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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

第十四届中国高温合金年会论文集

编审委员会

主 编 中国金属学会高温材料分会

主任委员 张 继

委 员 董建新 王 磊 孙晓峰 李嘉荣 毕中南

肖程波 王志刚 马天军 何云华 刘 林

冯 强 孙宝德 刘兴军 李树索 谢 伟

编 审 组 董建新 王 磊 张 健 李嘉荣 肖程波

王志刚 燕 平 赵光普 刘建涛 毕中南

编 辑 组 王 凯 余 斌 童金涛 迟 海 张兆龙

谢 昀

前 言

中国高温合金年会每四年举办一次，是中国高温合金领域规模最大的学术活动，是“产、学、研、用”各单位开展学术研讨、技术交流和业务合作的重要综合性平台。历届中国高温合金年会均由中国金属学会高温材料分会主办，已成功举办了13届。第十四届中国高温合金年会将于2019年9月22~25日在湖北黄石举行。本届年会将基于一系列国家重大科技专项和重大工程对高温合金提出的新要求，集全国高温合金科技工作者的智慧开展学术和技术研讨，以期推动国产高温合金材料的技术创新、产品生产质量及应用水平的全面提升，助力实现中国高温合金产业的腾飞发展。

为方便高温合金工作者之间开展学术交流，每届中国高温合金年会均出版论文集。本届年会的论文集仍然得到了科研院所、高校、企业和用户单位及科技工作者们的大力支持，共收到论文200余篇，最后经年会学术委员会专家评审，选出其中150篇收录在本论文集中，另有10余篇将在《金属学报》2019年第55卷第9期发表。这些论文展现了近年来中国高温合金在产品稳定性、热处理工艺、仿真模拟技术、新材料研制、成型工艺、高代次单晶等方向的新进展，反映了中国高温合金在科研、生产和应用领域的成绩和突破。

近年来，“军民融合”国家战略、国家部委“十三五”规划、“航空发动机和燃气轮机重大专项”、“新材料研发及工程化重大专项”等政策的逐步实施，为高温合金工作者带来了改革创新、展现聪明才智的大好时机。在此重要历史机遇下，广大高温合金同仁们要共同努力，为早日实现高温合金强国梦贡献自己的力量！

仲增广

2019年5月

目 录

变形高温合金

制备工艺对 GH2901 合金析出相和力学性能的影响

..... 丑英玉 吴贵林 杨亮 齐超 李连鹏 刘猛 潘彦丰 (3)

Laves 相分布对 GH2909 合金持久缺口敏感性的影响 韩光炜 王信才 王志刚 王海川 (7)

低膨胀 GH2909 高温合金弯晶工艺研究

..... 周扬 陈琦 张健 付建辉 王信才 何云华 裴丙红 (11)

两种电渣方式重熔 GH3030 合金对比研究 侯智鹏 张鹏 张姝 于杰 刘猛 (16)

熔炼工艺对 GH3044 合金锻棒组织及性能的影响

..... 李飞扬 张鹏 李宁 王艾竹 韩奎 刘猛 王洋洋 (20)

GH3128 电渣重熔过程中磁-流-热多场数值模拟研究

..... 刘庭耀 张健 何云华 裴丙红 魏育君 (24)

Si 含量对 GH3535 合金中晶粒尺寸分布的影响 蒋力 李志军 (28)

径向锻造变形工艺对 GH3625 锻材组织的影响

..... 王树财 李宁 王艾竹 王志刚 王洋洋 刘猛 李旻才 王明 (32)

GH4061 合金铸态组织特征与均匀化处理工艺 段然 黄烁 胥国华 王磊 赵光普 (35)

GH4065 合金盘锻件的组织和力学性能研究

..... 吕少敏 贾崇林 何新波 田丰 王龙祥 闪郁明 张勇 (39)

树枝晶 GH4065A 高温合金的动态再结晶研究..... 盛涛 宁永权 刘巧沐 (43)

650~750℃ 条件下 GH4065A 合金的持久断裂行为

..... 田强 黄烁 张文云 张北江 秦鹤勇 赵光普 (47)

高合金化 GH4065A 合金电子束焊接工艺研究 赵桐 唐振云 刘巧沐 黄烁 张文云 张北江 (51)

镍基变形高温合金 GH4065A 的高温低周疲劳行为

..... 黄烁 张文云 刘巧沐 胥国华 赵光普 张北江 (55)

新型变形盘材料 GH4065A 合金的性能特点与应用

..... 黄烁 张文云 刘巧沐 秦鹤勇 赵光普 张北江 (60)

三联冶炼 GH4065A 合金大规格棒材的研制..... 王资兴 黄烁 赵欣 赵雅婷 张北江 赵光普 (64)

新型难变形 GH4065A 合金的异常组织控制..... 于腾 宋彬 黄烁 张北江 于宗洋 (68)

GH4065A 高温合金扩散连接界面的组织演变规律研究 张保云 宁永权 刘巧沐 (72)

高强度高塑性的 GH4099 板材的热处理工艺与性能研究 王福 (76)

正交试验法研究热处理对 GH4105 合金组织和性能影响

..... 王静霖 姚志浩 刘巍 梅林波 陈筱菲 董建新 (80)

GH4105 合金真空感应电极开裂行为 路昊青 王磊 刘杨 宋秀 李强 (84)

GH4141 合金环轧锻件组织均匀性的研究 邱伟 魏志坚 叶俊青 孙文儒 万英歌 邹伟 (88)

- GH4141 合金环轧件组织对拉伸及持久性能的影响 刘芳 信昕 蔡梅 孙文儒 (93)
- GH4145 合金管冷轧有限元模拟 张伟红 王蕾雯 孙文儒 (98)
- 难变形高温合金 GH4151 盘锻件锻造工艺研究
..... 贾崇林 吕少敏 田丰 叶俊青 王龙祥 张勇 田世藩 (102)
- 固溶温度对 GH4151 合金组织及力学性能的影响
..... 唐超 邓群 曲敬龙 毕中南 杜金辉 张继 董志国 赵春玲 陈竞炜 (106)
- 某工程用 GH4169 合金转子锻件的研制 王庆增 田沛玉 吴令萍 (111)
- GH4169 合金高温变形再结晶图及热加工图 蒋世川 张健 何云华 裴丙红 付建辉 韩福 (115)
- GH4169 合金凝固行为研究 陈琦 张健 何云华 裴丙红 (119)
- GH4169 合金热变形过程中的亚动态再结晶行为 付建辉 张健 蒋世川 何云华 裴丙红 (123)
- 国内外三联冶炼 GH4169 合金大规格棒材质量分析 韦康 李鑫旭 张勇 张国庆 (127)
- GH4169 合金微拉伸流动应力与断裂行为尺度效应研究 朱强 王传杰 陈刚 张鹏 (131)
- 不同锻造状态 GH4169 组织与性能的分析研究 李鑫旭 韦康 姜周华 张勇 张国庆 (135)
- 受海洋大气腐蚀影响的 GH4169 合金的冲蚀磨损行为研究 曹夕 文波 曲敬龙 新巴雅尔 (140)
- 应变速率对 GH4169 合金光纤激光焊接接头拉伸变形行为的影响
..... 雷文博 王磊 刘杨 宋秀 王瑞雪 (145)
- 某机匣用 GH4169 合金复杂截面异形环件多道次轧制成型工艺研究
..... 王宇锋 郭欣达 王龙祥 徐东 袁慧 范茂艳 杨志国 (150)
- GH4169 高温合金真空自耗冶炼过程数值模拟
..... 陈正阳 杨树峰 曲敬龙 毕中南 孔豪豪 谷雨 (154)
- 电渣重熔 GH4169 高温合金元素含量变化规律研究 李南 张建伟 曹国鑫 阚志 (158)
- GH4169 中镁元素的挥发动力学模型与实验验证 孟方亮 薛建飞 曹国鑫 阚志 (161)
- 基于 Deform-3D 仿真模拟的 GH4169 径锻工艺研究
..... 赖宇 张健 蒋世川 付建辉 何云华 裴丙红 韩福 (164)
- GH4169 合金锻棒中 δ 相析出规律及其对力学性能的影响
..... 史新波 曹国鑫 付宝全 阚志 陈国胜 (169)
- GH4169 合金盘件晶粒度超声检测灵敏度研究
..... 王知颖 吕旭东 杜金辉 曲敬龙 邓群 吴玉博 (173)
- GH4169 及其改进型合金 10000h 时效组织稳定性研究
..... 韦家虎 付书红 王涛 李钊 董建新 姚志浩 (179)
- GH4169 合金细晶涡轮盘棒坯热加工工艺与机理研究
..... 杨亮 王骁楠 李凤艳 刘宁 吴贵林 潘彦丰 (182)
- 冷拉变形对 GH4169 合金热轧棒材组织均匀性的影响
..... 李凤艳 王志刚 吴贵林 潘彦丰 冯德新 唐荣祥 (185)
- GH4169 和 GH4169D 合金蠕变行为和变形机理研究 陈凯 倪童伟 董建新 姚志浩 (189)
- 再生料制造的 GH4169 铸态组织中 Laves 相消除研究 张志国 沈力 王兴明 许洪运 常松 (193)
- 燃机用 GH4169 大轴径比锻件成型工艺与组织性能控制
..... 张志国 刘婷婷 田伟 崔利民 李本鹏 杨清凯 (198)
- P 在 GH4169 合金中的晶界非平衡偏聚及晶内强化作用研究
..... 孙文儒 张安文 信昕 张伟红 刘芳 祁峰 贾丹 (202)
- 新型难变形高温合金 GH4175 合金涡轮盘制备技术研究
..... 张文云 张北江 黄烁 秦鹤勇 胥国华 田强 赵光普 张继 (206)

高温高强紧固件用新型变形高温合金——GH4350

- 王涛 付书红 金万军 钟燕 胡轶嵩 李钊 张勇 万志鹏 (212)
- GH4698 高温合金中碳化物的热稳定性及其对合金拉伸断裂行为的影响
- 薛建飞 曹国鑫 杜刚 王玮东 阚志 付宝全 (216)
- GH4698 合金大规格环形件试制工艺研究 韦家向 王信才 岳伟 (220)
- GH4698 合金中第二相阻碍晶粒异常长大的效果 王志刚 李凤艳 侯少林 (224)
- GH4720Li 合金热变形-保温组织传递规律研究..... 江河 范海燕 董建新 (230)
- 动态应变时效对 GH4720Li 合金低周疲劳性能的影响
- 孟令胜 曲敬龙 安腾 毕中南 唐超 杜金辉 曹文博 盛俊英 易出山 (235)
- 高温疲劳中 GH4720Li 合金微结构演化行为
- 谢兴飞 曲敬龙 唐超 毕中南 杜金辉 易出山 盛俊英 (239)
- 均匀化态 GH4720Li 合金铸锭晶粒细化机理研究
- 万志鹏 王涛 李钊 孙宇 李鑫旭 李佩环 张勇 胡连喜 (243)
- GH4720Li 合金成分偏析及二次均匀化研究 吴贵林 唐超 李凤艳 宋彬 (248)
- GH4720Li 合金棒材低倍“鬼脸”形成原因及改善 李钊 王涛 万志鹏 张勇 (252)
- GH4720Li 合金的均匀化开坯控制原则 范海燕 董建新 陈佳语 (256)
- 不同冶炼方式生产的 GH4738 合金热轧棒材组织性能对比 曹秀丽 (260)
- 三联冶炼 GH4738 合金导叶内环等温模锻研制
- 叶康源 姜波 叶俊青 王龙祥 黎汝栋 夏春林 (264)
- 晶粒组织对 GH4738 合金锻件水浸超声波探伤底波损失影响研究
- 徐文帅 陈佳亮 王龙祥 叶俊青 张振 雷静越 (269)
- 优质 GH738 合金高温均匀化处理工艺研究
- 曲敬龙 史玉亭 荣义 杨成斌 刘辉 毕中南 杜金辉 李钢 罗俊鹏 易出山 (274)
- 不同开坯工艺对优质 GH738 合金中夹杂物分布的影响
- 曲敬龙 谷雨 陈正阳 孔豪豪 夏康 荣义 毕中南 李钢 罗俊鹏 易出山 (278)
- 固溶参数对 GH738 冷轧带材显微组织和硬度的影响 文新理 章清泉 (282)
- GH4742 变形高温合金疲劳缺口敏感性的研究 孔维文 袁超 张宝宁 秦鹤勇 赵光普 (287)
- GH4975 合金均匀化及热变形行为研究 向雪梅 江河 董建新 姚志浩 (292)
- 热处理制度对 GH5605 合金碳化物组织分布影响研究 裴丙红 (296)
- GH5605 合金铸态组织分析与 Gleeble 热模拟研究 魏然 牛永吉 章清泉 (300)
- 磷对 GH984G 合金热变形行为的影响..... 吴云胜 秦学智 王常帅 郭永安 周兰章 (305)
- 高钛低铝高温合金 R26 热轧棒材热处理工艺研究 闫森 张欢欢 田水仙 (310)
- 热处理对 MP159 合金冷拔材组织与性能的影响
- 王艾竹 张鹏 李宁 王树财 于杰 李成龙 刘猛 (313)
- 稀土元素 La 和 Ce 改善合金 C-276 锻造塑性的机理研究 张欢欢 贾景岩 王秀芬 郑险峰 (317)
- Haynes282 合金热处理工艺优化研究 王静霖 姚志浩 安春香 沈红卫 董建新 曹允飞 (321)
- 电渣重熔高温合金 CCA617 凝固过程的数值模拟研究
- 刘福斌 王傲 张文超 余嘉 姜周华 李花兵 (326)
- 三联纯净熔炼 Inconel 718 合金研究 张勇 韦康 李鑫旭 李钊 王涛 贾崇林 张国庆 (330)
- 元素 Co 对 IN718 合金组织及力学性能的影响 信昕 刘芳 张伟红 祁峰 贾丹 孙文儒 (335)
- Inconel 740H 均质化研究 耿鑫 彭雷朕 师帅 姜周华 李华兵 (339)
- 氧化处理对 Nimonic80A 室温冲击性能的影响..... 马思文 张琪 赵宝达 原菁骏 陈帅 张麦仓 (344)

超超临界电站紧固件用材料 Nimonic80A 应力腐蚀机制的研究

..... 赵宝达 张麦仓 张琪 马思文 原菁俊 侯为学 (348)

高铬耐蚀高温合金组织性能演变及失效机制研究

..... 严靖博 杨征 张醒兴 袁勇 鲁金涛 谷月峰 (352)

高温合金的再结晶与组织性能调控..... 宁永权 谢炳超 张保云 刘小明 余浩 (356)

ICP 法测定高温合金中钛、铝、铌含量..... 瞿晓刚 (365)

一种超超临界火电用镍基合金的热处理研究..... 张鹏 韩魁 侯智鹏 (368)

固溶工艺对一种钴基高温合金带材组织性能的影响研究

..... 董逸群 牛永吉 张志伟 章清泉 魏然 高杨 (372)

汽轮机叶片用 NiCr20TiAl 合金组织均匀性工艺研究..... 周江波 邓方林 栗硕 (377)

紧固件用典型高温合金应力松弛行为..... 杨静 江河 董建新 (382)

宝钢核电用镍基合金关键材料的研制新进展..... 徐长征 欧新哲 何煜天 马天军 (387)

镁微合金化对热轧 Ni80Cr20 板组织及性能的影响..... 胡显军 范金席 董利明 承龙 方峰 (391)

燃烧室用新型氮化物强化高温合金研究..... 鞠泉 张勇路 马惠萍 (395)

导电结晶器电渣重熔镍基合金数值模拟研究..... 曹海波 姜周华 董艳伍 刘福斌 (400)

一种快速分析高温合金用预熔渣的方法研究..... 柏占明 张嘉宁 张建伟 阚志 (405)

全熔氧含量对真空感应熔炼过程中夹杂物的影响..... 罗文 白宪超 王桐 杨玉军 张晓梅 (409)

挡渣结构对 VIM 流钢系统夹杂物分布的影响..... 白宪超 罗文 荣文凯 杨玉军 张晓梅 (413)

几种电极缺陷对氩气保护电渣重熔过程的分析

..... 杨松 王海江 孙常亮 杨玉军 张晓梅 郭仁辉 冯涛 任伟 (417)

真空自耗熔滴形成过程中夹杂物行为分析

..... 朱洪涛 刘学卉 朱宝明 杨玉军 白宪超 张晓梅 (421)

真空自耗重熔过程中水平磁场对冶金质量影响..... 刘学卉 白宪超 张连嵩 杨玉军 张晓梅 (424)

真空自耗重熔过程中格架对冶金质量的影响..... 白宪超 朱洪涛 张佳维 杨玉军 张晓梅 (427)

强化相 60% 以上难变形盘制备技术与组织性能特征

..... 黄烁 张文云 秦鹤勇 胥国华 赵光普 张北江 (431)

铸造高温合金

胞状再结晶及混合再结晶对单晶高温合金 DD6 拉伸性能的影响..... 熊继春 李嘉荣 (437)

温度对 DD6 单晶高温合金二次 γ' 相演化的影响

..... 喻健 李嘉荣 杨亮 骆宇时 熊继春 韩梅 刘世忠 (442)

小角度晶界对第三代单晶高温合金 DD9 的 1070℃ 拉伸性能的影响

..... 杨万鹏 李嘉荣 刘世忠 王效光 赵金乾 史振学 (446)

小角度晶界对第二代单晶高温合金 DD412 拉伸性能的影响

..... 王钦佳 宋尽霞 惠希东 王定刚 肖程波 (450)

第四代单晶高温合金 DD15 组织稳定性研究..... 史振学 刘世忠 李嘉荣 (455)

第四代单晶高温合金 DD15..... 刘世忠 史振学 李嘉荣 (459)

DD18 单晶高温合金元素偏析与显微组织研究..... 岳晓岱 李嘉荣 刘世忠 (463)

DZ4125 合金在底吹氩过程中夹杂物的运动机制模拟..... 韩少丽 骆合力 李尚平 王建涛 (467)

表面再结晶对 DZ4125 合金涡轮叶片力学性能的影响

..... 宋尽霞 许剑伟 王定刚 关心光 余力 (472)

B、Zr 对 K4169 高温持久性能的影响..... 陈芳 吕水永 年季强 陈颖杰 李淑萍 (477)

不同冷却方式下 Zr 对 K417G 合金 γ' 相析出的影响

..... 祁峰 孙文儒 刘芳 张伟红 信昕 贾丹 苏晓赢 (481)

K4208 镍基耐磨高温合金高温氧化性能研究

..... 国为民 杜静 金莹 韩凤奎 曾强 姚志浩 董建新 (485)

基于高梯度定向凝固工艺优化镍基单晶高温合金固溶处理

..... 张琰斌 刘林 黄太文 张军 傅恒志 (489)

单晶涡轮叶片修复技术研究进展..... 韩凤奎 李杨 薛鑫 李维 燕平 (493)

镍基单晶高温合金籽晶的精确制备方法

..... 韩东宇 姜卫国 李一飞 肖久寒 李凯文 郑伟 楼琅洪 (498)

Mo 对一种燃机用单晶高温合金组织的影响

..... 陈金宾 陈晶阳 罗亮 惠希东 肖程波 (503)

铸态高温合金均匀化处理过程中的组织演变..... 余浩 谢炳超 宁永权 (507)

一种含 Re 镍基单晶高温合金显微组织和拉伸性能研究

..... 赵云松 刘砚飞 郭媛媛 张晓铁 赵敬轩 张迈 张剑 骆宇时 (512)

陶瓷型芯对镍基单晶高温合金中雀斑形成的影响..... 王富 马德新 徐文梁 (517)

长期时效对一种第三代镍基单晶高温合金组织演变和力学性能的影响

..... 杨振宇 方向 郑帅 张剑 骆宇时 (521)

W 对第三代单晶高温合金显微组织的影响

..... 王效光 李嘉荣 岳晓岱 史振学 刘世忠 (526)

一种 Ni_3Al 基单晶合金中蠕变的 $[001]$ 取向偏离敏感现象

..... 侯皓章 裴延玲 李树索 宫声凯 (531)

新型镍基耐磨高温合金高温氧化行为研究..... 杨升 国为民 韩凤奎 曾强 赵京晨 燕平 (535)

浇注温度对 IN738 铸造高温合金显微组织和高温性能的影响..... 安宁 牛永吉 王颖 李振瑞 (540)

再结晶对一种单晶高温合金疲劳强度和微观组织的影响..... 谢洪吉 李嘉荣 韩梅 (546)

高温合金单晶叶片铸件中的宏观晶体缺陷..... 马德新 王富 董洪标 (550)

粉末高温合金及新型高温材料

GH4099 合金热等静压成形工艺研究

..... 王冰 姚草根 赵丰 黄国超 (557)

挤压和锻造工艺对 FGH4095 合金力学性能影响研究

..... 彭子超 王旭青 罗学军 马国君 汤悦 (561)

铸 & 锻 FGH4096 合金研究

..... 卢川川 钟燕 付锐 李福林 狄鹏 杜刚 尹法杰 (565)

不同 Ta 含量对 FGH4098 合金 γ' 相和 TCP 相析出行为的影响

..... 邢鹏宇 贾建 黄虎豹 董志国 师俊东 (570)

晶界对 GH4199 合金动态拉伸变形行为的影响

..... 朱旭晖 王磊 刘杨 宋秀 晋俊超 (574)

热变形及热处理过程中 TC17 钛合金组织与取向的关联性

..... 原菁骏 姬忠硕 马思文 赵宝达 乔峰源 张龙 张麦仓 (578)

新型析出强化镍铁基合金 HT700T 组织稳定性研究

..... 张鹏 袁勇 谷月峰 党莹樱 严靖博 鲁金涛 尹宏飞 (583)

应变速率对 DD407/GH4169 激光接头拉伸变形行为的影响

..... 马振 王磊 刘杨 宋秀 赵强 (587)

几种俄罗斯新型高温合金材料介绍..... 于连旭 杨川 王刚 田飞 刘飞扬 (591)

新型 γ' 相强化型钴基高温合金的高温腐蚀行为

..... 王佳慧 王磊 宋秀 刘杨 徐慧琳 高博 (595)

含 Os 新型粉末高温合金组织及其稳定性

..... 张义文 贾建 李晓鲲 钟燕 刘巧沐 邵清安 (599)

含 Ru 新型粉末高温合金探索研究	孙志坤 张义文 贾建 邢鹏宇 盛俊英 易出山 赵兴东 (603)
新一代粉末高温合金的成分设计及研究进展	张义文 贾建 刘建涛 王强 陈竞炜 王刚 (607)
提升铸造 TiAl 增压涡轮心部承载能力的研究	朱春雷 何洪 张继 刘烨 张熹雯 胡海涛 李胜 王红卫 (611)
粉末高温合金热变形行为与本构关系研究	刘小明 宁永权 刘巧沐 (616)
Ni 含量对 Co-Al-W 基高温合金显微组织和硬度的影响	施琦 姚志远 王磊 刘杨 宋秀 (620)
“PPB” 在热等静压成形镍基粉末高温合金中的表征	张莹 刘明东 孙志坤 黄虎豹 何俊 寇录文 (624)
新型粉末高温合金的组织与性能分析	刘建涛 李科敏 谢玲 朱晓蕾 杨升 徐永寿 (629)
1000℃服役可焊轻质高强 Ni ₃ Al 合金研究	王建涛 骆合力 李尚平 韩少丽 (633)
热等静压温度对于一种 Ni-Co-Cr 基粉末高温合金显微组织的影响	黄国超 张绪虎 姚草根 阴中炜 徐桂华 王冰 孟烁 孙亚超 (637)
组合循环发动机用高温合金材料发展需求	王清平 江强 侯金丽 胡尚飞 (641)
镍基高温合金疲劳裂纹扩展寿命的温度敏感性	徐超 董建新 (644)
W 芯 SiC 纤维与元素 Ni、Cr 的界面反应的研究	王法 江河 董建新 姚志浩 (648)

变形高温合金

BIANXING GAOWEN HEJIN



制备工艺对 GH2901 合金析出相和力学性能的影响

丑英玉^{1*}, 吴贵林¹, 杨亮¹, 齐超¹, 李连鹏¹, 刘猛², 潘彦丰¹

(1. 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 辽宁 抚顺, 113001;

2. 抚顺特殊钢股份有限公司锻造厂, 辽宁 抚顺, 113001)

摘 要: 通过对比两种制备工艺生产的 GH2901 合金, 利用金相显微镜和扫描电镜观察 GH2901 合金的析出相形貌及合金力学性能。结果表明: 金相显微镜下观察到的析出相为 MC 型碳化物和 M_3B_2 型硼化物。通过对比两种制备工艺, 得到了控制弥散析出相的方法。

关键词: GH2901 合金; 析出相; 力学性能

Effects of Preparation Processes on the Properties and Precipitated Phases of GH2901 Alloy

Chou Yingyu¹, Wu Guilin¹, Yang liang¹, Qi Chao¹, Li Lianpeng¹, Liu Meng², Pan Yanfeng¹

(1. R&D Center of Fushun Special Steel Co., Ltd., Fushun Liaoning, 113001;

2. Forging Plant of Fushun Special Steel Co., Ltd., Fushun Liaoning, 113001)

Abstract: The precipitated phase morphology and the mechanical properties of GH2901 alloy manufactured by two different processes were observed with metallographic microscope and scanning electron microscope. The results show that the precipitated phases observed under metallographic microscope are MC type carbide and M_3B_2 type boride. By comparing the two manufacturing processes, the method of controlling the precipitating of dispersed phase was obtained.

Keywords: GH2901 alloy; precipitation phase; mechanical property

GH2901 合金是一种 Fe-Ni-Cr 基时效强化型变形高温合金, 该合金原为国际镍公司所研制发展的, 命名为 Incoloy901, 1964 年英国罗·罗公司在斯贝发动机上采用该合金代替镍基合金 Nimonic PK31, 由亨利·维金公司生产, 改称 Nimonic 901^[1]。合金以亚稳态的 γ' 相进行时效强化, 微量的铝元素抑制 γ' 相向 η 相的转化, 合金在 650℃ 以下具有较高的屈服强度和持久性能, 760℃ 以下抗氧化性能良好, 长期使用组织稳定。主要产品有涡轮盘、压气机盘、轴径、静结构件、涡轮外环及紧固件等^[2]。裴丙红^[3]、张欢^[4]等人通过试验研究不同的热处理制度对 GH2901 合金的晶粒度和性能的影响, 而对于 GH2901 合

金的析出相与力学性能方面研究较少。本文通过采用 SEM 及金相观察手段研究 GH2901 合金的析出相对力学性能的关联性, 为相关生产厂提供基础数据。

1 试验材料及方法

试验合金采用真空感应+真空电弧炉 (VIM+VAR) 双联工艺冶炼, 锭型为 $\phi 508\text{mm}$, 将钢锭中切后, 分别采用两种工艺锻造至 $\phi 120\text{mm}$ 棒材, A 工艺采用多火次单向拔长, B 工艺采用逐火次降温墩拔及锻后快冷。成分如表 1 所示。对 A 和 B 两种工艺生产的 $\phi 120\text{mm}$ 棒材, 切取 100mm 长经

* 作者: 丑英玉, 高级工程师, 联系电话: 024-56678195, E-mail: gwhj1-jszx@fs-ss.com

1090℃×2h 水冷、775℃×4h 空冷、715℃×24h 空冷后进行室温拉伸，650℃高温拉伸试验，并利用

金相显微镜、扫描电镜观察析出相形貌，原子探针分析成分。

表 1 合金化学成分
Tab. 1 Chemical compositions of the GH2901 alloy (质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	B	Ti	Mo	Ni	Fe
0.024	0.06	0.02	0.005	0.001	12.50	0.20	0.015	3.00	5.75	42.50	余

2 试验结果及讨论

2.1 GH2901 合金的析出相

图 1 为两种不同制备工艺下经标准热处理后 GH2901 合金的金相组织，从图中可以看出两种工艺下的晶粒度相差不大，而 A 工艺颗粒析出相呈

链状分布，B 工艺颗粒析出相呈弥散均匀分布。对 A 工艺的析出相进行 SEM 观察及原子探针分析，结果如图 2 所示。从图 2 (a) 二次电子相下可以看出颗粒析出相颜色相同，无法区分，而从图 2 (b) 背散射电子相下可以看出，颗粒析出相呈现两种不同颜色。对不同颜色的析出相进行原子探针分析，结果显示白色颗粒为 Mo 的硼化物，黑色颗粒为钛的碳化物。

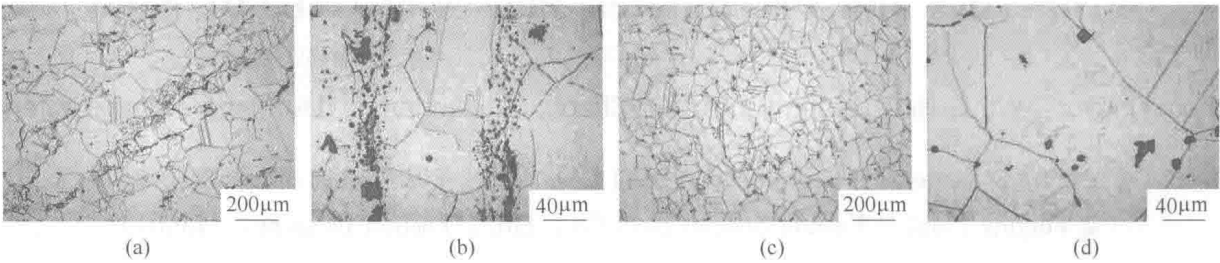
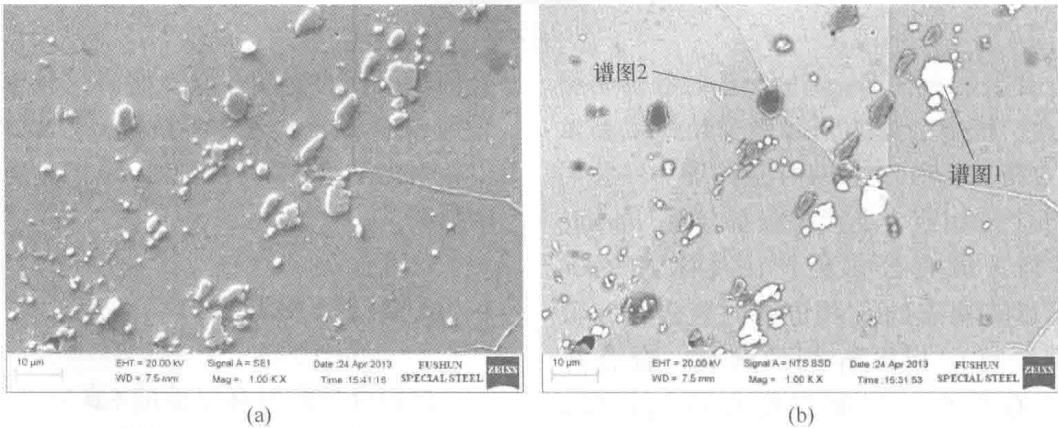


图 1 不同制备工艺下 GH2901 合金金相组织
Fig. 1 Microstructure of GH2901 alloy with different processes
(a) A 工艺金相; (b) A 工艺局部放大金相; (c) B 工艺金相; (d) B 工艺局部放大金相



	C	B	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo
谱图 1		10.116	0.149	0.140	6.744	13.037	11.847	11.094	46.872
谱图 2	15.975				63.758	0.581	0.839	0.875	17.973

图 2 GH2901 合金 SEM
Fig. 2 SEM of GH2901 alloy
(a) 二次电子像; (b) 背散射电子像

2.2 不同制备工艺对 GH2901 合金拉伸性能的影响

图 3 为两种不同制备工艺下 GH2901 合金的力学性能对比,从图 3 中可以看出,A 工艺室温抗拉强度、屈服强度、650℃ 抗拉强度及屈服强度与

B 工艺相差不大。A 工艺下的室温缺口拉伸强度、伸长率、断面收缩率均比 B 工艺低,其中 A 工艺的室温缺口拉伸强度比 B 工艺低了 246MPa, A 工艺室温伸长率比 B 工艺低了 6.5%, A 工艺的室温断面收缩率比 B 工艺低了 7%, A 工艺的 650℃ 伸长率比 B 工艺低了 7.5%。

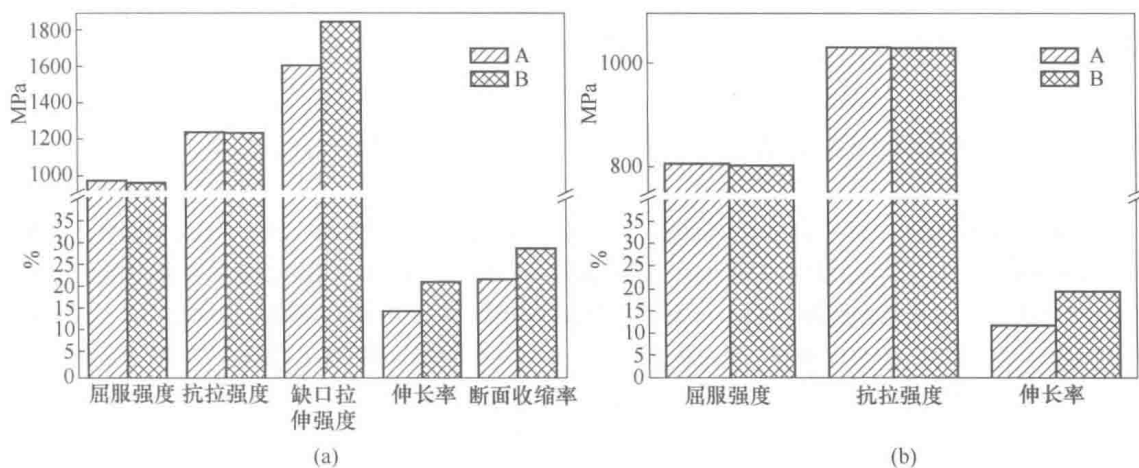


图 3 不同工艺下力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of different processes

(a) 室温力学性能; (b) 650℃ 高温性能

2.3 分析与讨论

高温合金手册^[2]中描述 GH2901 合金经标准热处理后的组织为: γ 基体、 γ' 、TiC、 M_3B_2 型硼化物,以及微量的 Ti(CN)、Ti₂(CS)。球形 γ' 相均匀弥散分布于晶内,直径约为 14~20nm,约占合金的 11.6%, w (碳化物+ M_3B_2) 约占 0.27%~0.35%。图 2(b) 中黑色颗粒为 MC 型碳化物,白色颗粒为 M_3B_2 型硼化物。一次 MC 碳化物是在凝固过程中形成的,不均匀地分布在合金中,具有穿晶和沿晶形态,经常存在于枝晶间。 M_3B_2 硼化物具有四方点阵结构,经标准热处理,固溶于基体中的硼以颗粒状或小块状的主要沉淀的晶界上。颗粒状 M_3B_2 硼化物沿加工方向分散分布,位于相交晶界处,可减小在断裂负载下相交晶界处开裂。硼化物是仅在晶界上可以看见的硬而不易溶解的颗粒,形状看上去为块状至半月形,硼化物的作用是为晶界提供 B。

A 工艺采用的是多次单向拔长锻制棒材,金属的变形方向是单向的,随着棒坯直径的减小,开坯变形程度的增加,碳化物和硼化物呈链状沿变形方向分布。B 工艺采用的是逐火次降温锻拔

及锻后快冷锻制棒材,在锻粗过程,随着锻粗压下量的增加,碳化物和硼化物随着金属的流动,会向棒材边缘散开,因此逐火次锻拔开坯可以使碳化物和硼化物分布更加均匀,而锻后快冷可以避免锻后冷却过程中碳化物和硼化物的二次析出。

A 和 B 两种工艺经标准热处理后的晶粒尺寸相差不大,由于成分相同,析出 γ' 相量也相差不大,所以 A 和 B 两种制备工艺对 GH2901 合金室温抗拉强度、屈服强度、650℃ 的抗拉强度、屈服强度影响不大。

A 工艺下 MC 碳化物和 M_3B_2 型硼化物呈链状分布,而 B 工艺 MC 碳化物和 M_3B_2 型硼化物呈均匀弥散分布,可以有效阻止晶界滑移,提高塑性。这使得 B 工艺的室温缺口拉伸强度、室温拉伸塑性及 650℃ 拉伸塑性优于 A 工艺。

3 结论

(1) GH2901 合金在金相下观察到的析出相为 MC 型碳化物和 M_3B_2 型硼化物。

(2) 不同制备工艺对 GH2901 合金室温抗拉强度、屈服强度、650℃ 的抗拉强度、屈服强度影

响不大。B 工艺得到弥散分布 MC 型碳化物和 M_3B_2 型硼化物使其具有良好的室温、高温拉伸塑性及室温缺口拉伸强度。

参考文献

[1] 王家正. 在材料技术条件中应当如何提出要求——对斯贝发动机用 Nimonic901 合金技术条件的剖析 [J].

材料工程, 1983 (4): 34~38.

[2] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册 (上册) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 458.

[3] 裴丙红. 热处理对 GH2901 合金的力学性能和晶粒度组织的影响 [J]. 特钢技术, 2008 (1): 13~17.

[4] 张欢, 李庆, 郭子静, 等. 热处理对 GH2901 合金组织和硬度的影响 [J]. 铸造技术, 2015 (11): 2643~2645.