

FRONTIERS OF MODERN CHEMICAL ENGINEERING,
METALLURGY, AND MATERIAL TECHNOLOGIES

现代化工、冶金与材料技术前沿

中国工程院化工、冶金与材料工程学部 第七届学术会议论文集 (下 册)

王静康 主编



化学工业出版社

中国工程院化工、冶金与材料工程学部
第七届中国会议论文集

上下册

中国工程院 编

FRONTIERS OF MODERN CHEMICAL ENGINEERING,
METALLURGY, AND MATERIAL TECHNOLOGIES

现代化工、冶金与材料技术前沿

——中国工程院化工、冶金与材料工程学部——

第七届学术会议论文集

(下 册)

● 王静康 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

中国工程院化工、冶金与材料工程学部 第七届学术会议论文集目录 (下册)

材料科学与工程

- 定向凝固 TiAl 基合金组织选择及晶向控制 傅恒志, 李新中, 苏彦庆, 郭景杰 (1107)
- 用 300MN 大型水压机干成需 1000MN 设备能力干成的超大型模锻件 曾苏民, 杨文敏, 朱 宏 (1114)
- 简介 Q-P-T 超高强度钢 徐祖耀 (1119)
- 红外光电薄膜材料与器件研究 赵连城 (1123)
- 大块非晶合金复合材料的研究现状与进展 才鸿年, 胡壮麒 (1128)
- 摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究
- 摩擦学在工业节能、降耗、减排中地位与作用的调查 薛群基 (1135)
- 光纤传感技术中的材料问题研究与应用 姜德生 (1136)
- 蓬勃发展的中国生物医学材料 张兴栋 (1137)
- 锗基半导体材料在微纳电子学中的应用研究 屠海令, 肖清华, 苏小平, 马通达, 魏 峰, 杜 军 (1139)
- 关于低碳经济与民爆行业发展的思考 汪旭光 (1144)
- 依托海洋科技优势, 研发特色涉海材料 尹衍升, 刘 涛 (1148)
- 凝固过程的控制——从宏观到微观 介万奇 (1155)
- 矿化胶原纤维的组装机理 崔福斋, 王秀梅, 李恒德 (1166)
- 减细纤维束三维五向锥管形预制体的细观结构 朱建勋, 马文锁, 蒋 云, 杨朝坤 (1171)
- LPPS-TF 功能薄涂层的制备技术及其应用前景 周克崧, 刘 敏, 邓畅光, 邓春明 (1178)
- 新型自初化 Si_3N_4 基陶瓷材料的研究 周 玉, 叶 枫 (1184)
- 汉麻秆芯超细粉体抗老化与微孔物理交联作用 张建春 (1190)
- 新型杂环高性能工程塑料新研究进展 蹇锡高, 王锦艳, 张守海, 刘 程 (1196)
- 大尺寸、高均匀性氧化物电子薄膜材料及其应用 李言荣 (1202)
- 光-pH 双重响应共聚凝胶的合成及响应性能研究 赵义平, 陈 莉, 张青松, 张玉欣, 王 刚 (1208)
- 金属负载型壳聚糖-二氧化硅纳米材料的制备和表征 全新利, 黄 镇, 李永丹 (1213)
- 生物相容性聚碳酸酯聚氨酯作为人工血管的研究 冯亚凯, 赵海洋, 郭锦棠, 赵 焯, 孟繁茹 (1217)
- 水热法制备巢状 CuS 及其结构性能表征 刘 光, 宋大卫, 王一菁, 焦丽芳, 袁华堂 (1221)
- 微米-纳米材料微观结构的透射电镜研究 方克明 (1224)
- 可溶性石墨烯材料的宏量制备及其器件应用
- 陈永胜, 黄 毅, 马延凤, 王 燕, 许艳菲, 张小岩, 梁嘉杰, 吕 歆 (1229)
- 抗菌纳米 ZnO 对聚丙烯的增韧增强及抗菌作用研究 卢秀萍 (1231)
- AL6XN 超级奥氏体不锈钢的疲劳变形及损伤行为 李小武, 马超群, 曹昕明, 段启强 (1235)
- 可低温固化的聚三唑树脂的设计、开发与应用 杜 磊, 黄发荣, 万里强, 扈艳红 (1241)
- Ce- $\text{H}_3\text{PMO}_{12}\text{O}_{40}$ 共掺杂 TiO_2 纳米光催化剂制备及性能研究 张天水, 史慧贤, 杨秋生 (1246)
- 阳离子型淀粉接枝共聚物的合成及在再生纸中的应用 刘全校, 徐丽娟, 许文才 (1250)
- 层合复合材料 Z 向增强技术 陈 利, 王晓旭 (1255)
- 风积沙综合利用技术研究——“以沙精铸、以沙增油、以沙治水”为代表的用沙治沙探索与实践
- 秦升益, 贾屹海, 郭盛昌, 于春洋, 刘 帅 (1260)
- 单晶硅的中子辐照效应 李养贤, 陈贵锋 (1266)
- 镁碳复合储氢纳米材料 周仕学, 杨敏建, 马怀营, 张同环 (1272)
- Mn_2CoZ 合金的结构和半金属性 刘国栋, 代学芳, 刘淑贞, 李养贤 (1276)

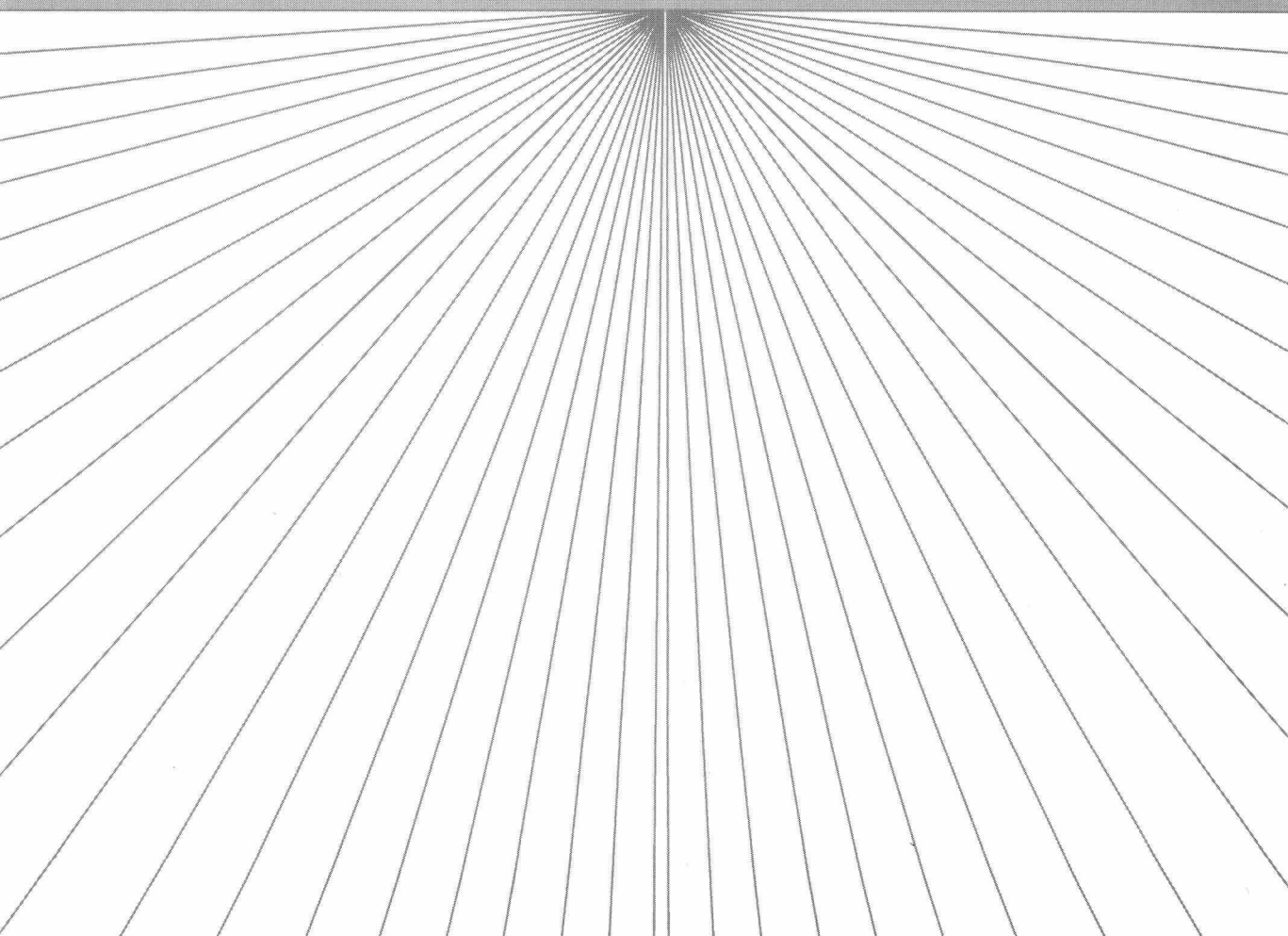
世界 PAN 碳纤维产业发展态势及我国技术差距	徐樑华, 李克健 (1281)
PVC/ABS 共混物的增韧机理	周 超, 张明耀, 张会轩 (1286)
新颖含有烯丙基丙二酸二叔丁酯共聚物的合成及其光刻性质研究	李铁生, 汤彩勤, 许文俭, 毛陆原, 孙永明, 朱 路, 吴养洁 (1291)
ITER 第一壁板用真空热压铍材研究	王战宏, 钟景明, 王 莉, 何季麟 (1299)
复合调制薄膜内应力控制及其性能	冷永祥, 孙 鸿, 黄 楠 (1306)
35CrMo 钢表面宽带激光熔凝过程数值模拟	黎超文, 王 勇, 韩 彬, 韩 涛 (1307)
材料自修复微胶囊的合成	廖乐平, 张 伟, 辛 毅, 赵 阳 (1312)
纳米碳酸钡制备方法的研究进展	于 鲸, 杜 军, 刘作华, 陶长元, 孙大贵 (1316)
抽油杆接箍激光表面强化耐磨性研究	李美艳, 王 勇, 韩 彬, 程义远 (1320)
我国石煤矿提钒技术的研究进展	杜 军, 王 娜, 刘作华, 陶长元, 孙大贵 (1324)
远红外辐射材料的研究进展	由 伟, 王 坤, 李会肖, 贾 杨, 吴晓琴, 杜亚宁 (1328)
等离子弧焊接技术在石油行业中的应用	高 伟, 杨 帆 (1332)
催化裂化富芳烃馏分的组成及炭化行为	隋希华, 李学军, 郭燕生, 吴明铂, 查庆芳 (1337)
空气中炭化研制石油系中间相沥青泡沫炭	杨小军, 查庆芳, 卢水根, 郭燕生 (1343)
N-酰化改性二胺对聚脲扩链反应的影响	宋 蔚, 邓 宇, 刘宗瑜, 郝敬梅 (1348)
石化工业用高温隔热材料的发展	任燕明 (1355)
N80 油管内壁激光合金化层组织与性能研究	程义远, 王 勇, 李美艳, 薛敏鹏 (1361)
Fe-Ga 合金磁致伸缩材料研究进展	张光睿, 江丽萍, 吴双霞, 郝宏波 (1366)
第四组元对 Mg-Zn-Y 二十面体准晶相的影响	赵维民, 王志峰, 李海鹏, 蔚成全 (1370)
半连续无皂乳液聚合制备无偶联剂 SiO ₂ /高聚物纳米粒子	王志强, 李青松, 赵 辉, 刘晨光 (1376)
新型结构复合材料增强体制备技术	杨彩云 (1383)
回火马氏体中合金碳化物形核的三维原子探针表征	刘庆冬, 刘文庆, 王泽民, 周邦新 (1387)
稀土耐热镁合金的研究进展	刘细良, 刘子利, 刘 彪 (1389)
PMMA 对 PVDF/PC 电纺超细纤维的影响	那海宁, 刘希望, 袁晓燕 (1395)
添加氧化钇的碳化硅多孔陶瓷的低温制备	丁书强, 王自强 (1397)
钛合金 BT20 焊接接头腐蚀疲劳性能的实验研究	包俊成, 赵 捷, 王志奇, 马 叙 (1402)
纳米钉对聚苯乙烯催化加氢性能的研究	强明辉, 张 立, 张 辉, 王家喜 (1406)
Pd 在吸铸态 Ti-Zr-Ni 准晶中的合金化	黄火根, 贾建平, 李 嵘 (1410)
Ce/Y 对 AZ91D 镁合金组织和力学性能的影响	许 娟, 李鹏飞, 郭 锋, 高 霞 (1414)
开发超高分子量聚乙烯纤维级专用料	王新威, 张 炜, 张玉梅, 吴向阳, 徐静安 (1418)
搅拌摩擦加工 Al-Mg-Sc 铝合金的超塑性变形行为	刘峰超, 马宗义 (1424)
制备无偶联剂 SiO ₂ /PMMA-DVB 和 SiO ₂ /PS-DVB 交联纳米粒子	王志强, 李青松, 赵 辉, 杨朝合 (1428)
环保型相变材料微胶囊的制备和表征	单新丽, 王建平, 张兴祥 (1434)
半连续无皂乳液聚合法制备亚微米 SiO ₂ /高聚物复合粒子	王志强, 李青松, 赵 辉, 刘晨光 (1439)
有机官能化 MCM-41 在阿莫西林缓释中的应用研究	苏坤梅, 李振环, 张宇峰, 邓艳超 (1445)
生物降解聚(3-羟基丁酸酯-co-4-羟基丁酸酯)共聚酯的结晶行为	卢秀萍, 张 竞, 温 幸, 王素娇 (1450)
线型—梳型共聚物的自组织层次结构	孙 喆 (1455)
抗热腐蚀高温合金的研究与发展	郭建亭 (1458)
酚醛纤维的研究与开发	齐 鲁, 郭金海 (1466)
不同取向疲劳铜单晶体中形变带的微观位错结构	郭巍巍, 周 杨, 李小武 (1471)
ECAP 对退火态 LY12 铝合金高温压缩变形行为的影响	王 尧, 王江伟, 姜庆伟, 李小武 (1477)
多羟多胺在微电子 CMP 及清洗技术中的应用	刘玉岭, 高宝红, 檀柏梅, 周建伟, 王胜利, 牛新环 (1483)
Zn 薄膜的制备及其结构与力学性能的研究	王明霞, 李德军 (1490)
高活性 TiO ₂ 纳米管阵列的制备及其光催化效率研究	侯兴刚, 李 凯, 刘 野, 王守国, 韦淑敏, 斯 琴, 石晓晓, 吴晓玲, 黄美东, 邓湘云 (1494)
新型聚苯胺敏敏材料的合成研究	管永川, 冉慧丽, 李明月, 李桂琴, 蒋登高 (1501)
高压扭转变形奥氏体不锈钢微观组织演变及正逆相变研究	李金国, 滕朕克弥, 梅本实, 户高羲一, 胡壮麒 (1504)

介孔玻璃粉末的制备以及与空穴基板复合研究	韩建军, 徐 峰, 赵修建 (1511)
共聚甲基丙烯酸酯纤维及其液态有机物吸附性能	郝秀阳, 封 严, 王鑫博 (1515)
无线射频天线纳米银膜研究	李路海, 辛智青, 唐小君, 李亚玲, 付亚波, 鲁建东 (1519)
二氧化钛纳米管表面生物矿化和细胞培养	冯 波, 汪建新, 陈建敏, 翁 杰 (1523)
稳定剂对氧化锆制品相组成、显微结构和性能的影响	谭清华, 耿可明, 吴爱军, 张 涛, 胡 飘 (1528)
受限对两嵌段共聚物 A_3B_2 相行为的影响	宋庆功, 高文芳, 王子玉, 谭红革 (1534)
U-Ti 合金的动态压缩性能及剪切特征	刘婷婷, 张鹏程, 何立峰, 白 彬 (1538)
掺杂 Fe_2O_3 的锡基氧化物的电化学性能研究	周从雨, 张 颖, 汪大云, 张海芳 (1543)
注射成形钕铁硼黏结磁体的黏结剂	何 洁, 秦万忠 (1548)
四氟乙烯基全氟纤维的机械性能与热力学性能研究	刘海辉, 王 宁, 张兴祥, 靳艳梅 (1555)
氟碳聚合物研究	靳艳梅, 王 宁, 张兴祥, 刘海辉 (1560)
还原气氛下铝电解槽用硅酸铝质耐火砖抗冰晶石电解质侵蚀性研究	章 艺 (1566)
胍基化聚乙烯亚胺非病毒转基因载体	林 琳, 杨建海, 刘文广 (1571)
石墨烯—聚合物高性能复合材料的制备及性质研究	黄 毅, 梁嘉杰, 张 龙, 许艳菲, 王 燕, 马延凤, 李飞飞, 陈永胜 (1574)
导电柔性透明单层石墨与聚 3,4-乙基二氧噻吩杂化材料	许艳菲, 王 燕, 梁嘉杰, 黄 毅, 马延凤, 万相见, 陈永胜 (1576)
分散剂对氧化镧粒径的影响研究	李 茜, 衣守志, 吴 燕, 吴家全 (1578)
阳离子染料可染共聚酯纤维结构的研究	郑 帼, 孙 玉 (1581)
以异喹啉为耦合单元双自由基体系的理论研究	苏 鹏, 储德清, 王立敏, 张景萍 (1585)
室温下纳米 Cu-Nb 合金形变孪生机制的研究	雷若姍, 汪明朴, 郭明星, 李 周 (1589)
聚乳酸的熔体静电纺丝实验探索	刘 勇, 邓荣坚, 郝明凤, 杨卫民 (1594)
基于 Kirkendall 效应制备 $Ce_{1-x}Ti_xO_2$ 中空纳米球	王增鹏, 余建国, 赵永男 (1597)
锆酸钡/聚合物复合中空纳米球对活性染料的可逆吸附	陈 伟, 叶天南, 李 璐, 赵永男, 董正洪, 董永春 (1602)
超级电容器 Mn_2O_4 电极材料的研究	王 雪, 谷慧科, 余建国, 赵永男 (1606)
金属-有机铜 (II) 配合物的合成与结构	韦 宾, 王凤勤, 赵永男 (1609)
PHBV 基温敏纳米复合水凝胶及其生物相容性研究	张青松, 陈 莉, 董友玉, 赵义平 (1613)
超深井用超高强度高韧性石油套管的开发	严泽生, 孙徕博, 张传友, 王青峰 (1622)
掺杂 $Zr(NO_3)_4$ 磷酸盐凝胶的性能研究	何军花, 胡琳娜, 彭会芬 (1628)
纯钽的热等静压制备及其性能研究	鲜晓斌, 叶林森, 冷邦义 (1632)
X65s 无缝管线管显微组织和力学性能关系研究	宁 玫, 孙开明, 李 毅, 苏英群 (1638)
缺陷结构对一维光子晶体带隙拓展的研究	徐 清, 吉亚萍, 黄 鹏, 黄美东 (1644)
溅射沉积 AlN 薄膜的光学性能研究	吉亚萍, 徐 清, 黄美东 (1648)
利用选钛铁尾矿制备 $Fe_3Si-Ti (C, N)$ 复合陶瓷	李兴旺, 徐利华, 李 凯, 刘 明 (1652)
黏结 NdFeB 磁环的研发及量产	秦万忠, 何 洁 (1658)
第二相对 Zr-2 合金在 400℃ 过热蒸汽中腐蚀吸氢行为的影响	姚美意, 王锦红, 周邦新, 李 强 (1663)
690 合金中低 Σ CSL 晶界分布规律的研究	夏 爽, 周邦新, 陈文觉, 李 慧 (1669)
树形聚合物 PAMAM/ Bi_2S_3 复合纳米粒子	贺永强, 高建平 (1673)
PU 改性 PVDF 膜制备及性能研究	王龙庆, 肖长发, 胡晓宇 (1678)
TiO_2 纳米管阵列的应用研究进展	李广忠, 张文彦, 张 健, 汤慧萍, 康新婷, 李亚宁, 许忠国 (1682)
氢同位素及氢在不锈钢中的扩散行为	陈长安, 陈世勤, 熊义富, 高克勤, 孟建波, 任大鹏, 陈丕恒 (1686)
高掺杂铈酸锂晶体 OH^- 吸收光谱的低温研究	阎文博, 陈贵锋, 陈洪建, 李养贤 (1696)
Zn 含量对生物可降解 Mg-Zn-Zr 合金性能的影响	叶新羽, 陈民芳, 由 臣, 刘德宝 (1700)
Fe 掺杂对 Mn_2NiGa 相变与磁性的影响	罗鸿志, 孟凡斌, 冯中秋, 李养贤 (1706)
耐火材料与 TiNi 合金的界面反应	李重河, 高永辉, 国子明, 庞 威, 鲁雄刚, 丁伟中, 钟庆东 (1710)
Fe 掺杂 TiO_2 薄膜磁学性质研究	徐建萍, 李 岚, 张晓松 (1715)
在 AIBA 引发下半连续法无皂乳液聚合制备复合亚微米粒子	王 海, 李青松, 王志强, 赵 辉, 孙兰义, 王云芳, 刘学暖 (1719)

氨水—草酸协同沉淀法制备超细 CeO_2 粉体的研究	李 梅, 胡艳宏, 柳召刚, 郭瑞华, 王觅堂 (1725)
化学沉淀法制备纳米尺度棕榈酸银	李亚玲, 王 水, 杨晓玲, 章 旭, 陈元梅, 宁嘉宁 (1731)
新型含硅芳炔树脂的设计及其开发研究	黄发荣, 杜 磊, 齐会民, 周 燕 (1735)
活性炭微球的制备及其电容性能研究	原 渊, 李现红, 秦 学 (1740)
AM60B 激光熔凝工艺研究	赵 宇, 陈 莉, 赵 静 (1744)
膨胀管的开发与展望	陈玉如, 刘文西, 高志明, 梅 华 (1748)
应用于热管的 Al_2O_3 -水纳米流体热物性参数研究	赵蔚琳, 管延祥, 李金凯, 王建荣 (1752)
多功能医用复合材料的研制	杨文芳, 顾振亚 (1756)
室温条件下的 PVDF 膜表面改性	孟建强, 陈春霖, 倪 磊, 张宇峰 (1761)
柔性石墨烯—氧化石墨烯复合薄膜的自组制备	吕 伟, 夏章讯, 杨全红 (1765)
退火工艺对 Fe-0.3%Si 电工钢微观组织的影响	杨 慧, 金自力, 王井铃 (1766)
电弧喷涂“伪合金”沉积层的硬度及组织分析	赵慧美, 李德元, 宋 丹 (1770)
利用生物相容性促凝剂调节 β -CSH 体外固化性能	张 琦, 韩 艳, 苏光雷, 常 津 (1774)
CPVC/CPE 及 CPVC/CPE/PS 共混体系的性能研究	郭素华, 韩 健 (1781)
PVA/PSSA 共混膜催化酯化制备生物柴油研究	朱木兰, 何本桥, 石文英, 丁金城, 李建新 (1785)
聚硅氧烷纤维素衍生物手性固定相的合成与热稳定性	方智利, 章伟光, 苏文翠, 刘乙辉, 范 军, 彭桂明 (1789)
电子辐照对硅单晶电学性能的影响	陈贵锋, 马晓薇, 白云娜, 阎文博, 崔会英, 蔡莉莉, 郝建刚, 李养贤 (1794)
铸造镁合金凝固过程枝晶形貌的数值模拟	霍 亮, 韩志强, 柳百成 (1797)
聚苯胺电致变色薄膜的制备及性能研究	刘 芬, 董丹霞, 孙冬兰 (1804)
氯磺化聚乙烯增韧聚氯乙烯的研究	王 哲, 倪宏哲, 张明耀 (1805)
9% Ni 钢连铸热塑性研究	赵希庆, 潘 涛, 王青峰, 苏 航, 杨庆祥 (1808)
氮对钕氮微合金中碳钢动态再结晶行为的影响	赵苏娟, 王青峰, 严泽生 (1812)
加热速率对超低碳钢快速热循环组织及性能的影响	淡 婷, 王青峰, 严泽生, 张传友 (1818)
不同共聚单体对丙烯腈聚合物的熔融及分解性能的影响	韩 娜, 张兴祥, 王学晨, 李 军 (1824)
化学气相沉积法在镁粉上原位合成碳纳米相的研究	康建立, 李家俊, 赵乃勤 (1830)
利用化学气相沉积法以无载体的 Ni-Fe 催化剂有效地合成碳纳米洋葱	张晨光, 赵乃勤, 李家俊, 师春生, 杜希文 (1835)
25CrMo48V 超高强度无缝钢管的热处理工艺优化	孙徕博, 张传友, 王青峰, 严泽生 (1840)
二硅化钼氧化的热力学及动力学分析	王 刚, 江 莞 (1845)
超高强度 25CrMo48V 钢淬火马氏体的回火动力学研究	任娟侠, 王青峰, 孙徕博, 严泽生 (1849)
纳米 ZnO/HDPE 抗菌复合材料的性能研究	曾 威, 李树材 (1855)
汉麻秆芯木质陶瓷制备技术研究	马 天, 严自力, 周中磊, 张建春 (1859)
玄武岩长丝蜂窝织物增强复合材料平压性能影响因素优化	张宏杰, 钟智丽, 刘长雷, 刘华武 (1865)
玄武岩/苧麻/聚丙烯复合材料力学性能影响因素研究	邱菊生, 钟智丽, 沈小梅, 刘华武 (1871)
镍基高温合金单晶叶片的定向凝固过程宏/微观数值模拟	许庆彦, 于 靖, 李嘉荣, 柳百成 (1875)
LDPE/EBA 共混膜结晶性能的研究	赵梓年, 李小科 (1881)
壳聚糖/羧甲基纤维素相容性及液晶性研究	马 滢, 刘鹏涛, 惠岚峰, 刘 忠, 司传领 (1885)
N-三甲基取代壳聚糖季铵盐的合成及其抗菌性研究	刘鹏涛, 马 滢, 刘 忠, 惠岚峰, 司传领, 鲁梅芳 (1889)
胆甾醇液晶单体支化的壳寡糖接枝聚己内酯生物材料的制备	李凤红, 司春雷, 吴全才, 张宝砚 (1893)
三维整体编织复合材料的细观结构和性能	李嘉禄, 陈 利, 焦亚男 (1898)
锂离子电池的纳米电极材料的性能研究	李春生, 程方益, 马 华, 赵建智, 李玮锡, 陶占良, 梁 静, 陈 军 (1904)
几种不锈钢的氦渗透扩散测量	黄志勇, 饶咏初, 彭丽霞 (1906)
温度对充氦不锈钢中氦行为影响的实验和理论研究	陈丕恒, 陈长安, 赵雅文, 李 嵘, 李 炬 (1912)
可降解内骨固定用 HA/PLA 复合材料的研究	孙丽丽, 刘德宝, 陈民芳, 崔宏翔 (1919)

调制周期对 ZrB_2/WN_x 纳米多层膜的机械性能和结构的影响	刘广庆, 谭明, 邓湘云, 李德军 (1924)
运用磁控溅射系统制备 AlN/ZrB_2 多层膜	孙延东, 王晖, 邓湘云, 李德军 (1928)
多壁碳纳米管对成纤维细胞生长行为的研究	杨莹, 袁丽, 李德军 (1932)
IBAD 参数对 $\text{TiB}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 纳米多层膜结构和性能的影响	董磊, 李德军 (1937)
多壁碳纳米管的血液相容性研究	袁丽, 杨莹, 李德军, 吕晓迎, 黄炎, 曹铮 (1941)
不同调制周期下的 $\text{ZrAlN}/\text{ZrB}_2$ 多层膜的组织结构和机械性能	龚杰, 亢原斌, 邓湘云, 李德军 (1946)
聚醚砜多孔膜的超疏水改性研究	孙旭东, 张玉忠, 李广芬, 李泓 (1950)
模压成型法制备沙漠绿化砖及其性质的研究	陈平, 邓湘云, 何明生, 李德军, 李建保 (1955)
树脂填充 EVAL 中空纤维膜吸附剂的吸附性能研究	校迎军, 张玉忠, 张凤利, 李泓 (1960)
影响电光源用钼钨箔性能的研究	解永旭, 赵兵, 王慧峰, 万庆峰 (1966)
电光源焊料用钼箔的生产工艺及其焊接性能	王慧峰, 万庆峰, 解永旭, 赵兵 (1971)
AIM 胶乳的凝聚研究	关宇, 吴广峰, 张会轩 (1975)
基于单层石墨与二茂铁的杂化材料	闫伟博, 许艳菲, 黄毅, 马延凤, 万相见, 陈永胜 (1977)
尺寸可控的单层氧化石墨的大量制备	张龙, 梁嘉杰, 王艳, 黄毅, 马延凤, 陈永胜 (1980)
MBS 中苯乙烯的结合方式对 MBS/PVC 光学性能的影响	周超, 杨海东, 张会轩 (1983)
织物风格的定量化评价及其应用	朱若英, 潘宁 (1987)
三元乙丙橡胶增韧 PET/PC 共混物的研究	孙树林, 张明耀, 张会轩 (1993)
PBT/PC/ABS 共混体系结构与性能研究	孙树林, 张明耀, 张会轩 (1997)
AIM 中橡胶相交联密度对增韧 PMMA 性能的影响	邹羽, 宋立新, 张明耀, 张会轩 (2001)
铁电薄膜场效应晶体管存储器件理论建模	周益春, 孙静, 张军, 杨锋 (2007)
多尺度稳恒磁场影响化学反应进程及反应产物形貌的初步研究	钟云波, 傅小明, 任维丽, 雷作胜, 任忠鸣, 邓康 (2017)
有机硅改性丙烯酸酯胶黏剂的合成与性能研究	李欣闻, 王玮, 张芳芳, 韩业 (2024)
叉型接头开裂失效分析	王春晖, 邢鹏飞 (2028)
MBS 核壳粒子特征对 PVC/MBS 共混体系性能的影响	陈明, 周超, 牟洋, 薄云飞, 张会轩 (2032)
胺基化反应增容 PC/ABS 共混物	谭志勇, 周超, 孙树林, 张会轩 (2035)
PBT/PCL 共混物的相容性、热性能及相形态研究	曹春雷, 陈敏, 肖凌寒, 张会轩 (2041)
通过多功能无机微球调控杂化直接甲醇燃料电池膜的性能	王景涛, 侯伟强, 姜忠义 (2045)
多孔金属-有机框架材料的设计和合成	张振杰, 师唯, 程鹏 (2053)
禁苯基 Eu^{III} 配合物聚氨酯复合发光材料的制备及性能研究	郭良起, 马松涛, 张强, 王锐, 周立明, 户敏, 高丽君, 方少明, 刘春森 (2057)
Tb、Dy 掺杂 $\text{BaAl}_{12}\text{O}_{19}$ 荧光粉的荧光性能和能量传递	肖林久, 王宁, 贺明睿, 谢颖 (2059)
氧分压对工业纯铁等离子注入及氮化的影响	包娟娟, 刘现, 苏永要, 孙鸿, 白彬, 张鹏程, 冷永祥, 黄楠 (2064)
溶胶-凝胶法合成高容量 LiFePO_4/C 复合正极材料	刘思晨, 魏欣, 焦丽芳, 袁华堂 (2069)
Li-Mg-N-H 材料的储氢性能研究	田超, 杨化滨, 周作祥 (2073)
废轮胎热解炭黑表面性质的研究	张翠, 梁秀清, 张轩, 刘双喜 (2075)
由废轮胎热解炭制备高吸附性能的纳米碳材料	张翠, 梁秀清, 张轩, 刘双喜 (2078)
二甲基亚砷中 Ni^{2+} 的电化学性质的研究	蒲丽, 王建朝, 李冰, 翟晋芳 (2081)
CoCrMo 合金等离子体浸没离子注入及氮化工艺及其性能	周雪婧, 李婧, 孙鸿, 冷永祥, 黄楠 (2085)
BN 纳米材料的制备、性能与应用研究	唐成春, 李养贤 (2089)
$\text{CoS}_{1.97}$ 材料的制备与表征	齐洁, 杨化滨, 周作祥 (2091)
网状 Co-B-Si 复合材料制备及性能	韩燕, 王亚平, 王一菁, 焦丽芳, 袁华堂 (2093)
$\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{B}$ 合金催化 NaBH_4 水解制氢性能研究	李丽, 任秋丽, 王一菁, 王亚平, 焦丽芳, 袁华堂 (2096)
CoB 催化水解 NaBH_4 放氢	任秋丽, 刘光, 王一菁, 焦丽芳, 袁华堂 (2099)
三元层状化合物 M_2GeC ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) 的从头计算	徐学文, 李养贤, 宇霄, 朱教群 (2101)
近红外 $\text{CdTe}/\text{CdS}/\text{ZnS}$ 量子点的合成与表征	苏怀朋, 高丽, 王静康, Wang Y. Andrew, Xu Jian (2105)

材料科学与工程



特邀
论文

定向凝固 TiAl 基合金组织选择及晶向控制

傅恒志, 李新中, 苏彦庆, 郭景杰

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在航空航天及能源领域有重要应用价值的 TiAl 基合金, 由于其 α_2/γ 片层结构的特点, 采用定向凝固技术控制片层取向可以更好地发挥其潜能。本文从相与组织选择及晶体择优生长特性角度, 讨论了具有包晶反应的高温 TiAl 基合金的定向凝固与晶向控制。采用充分形核假设及成分过冷判据 (NCU), 计算了不同成分 TiAl 合金相与组织随凝固参数演化的相选择图, 与实验结果有较好的一致性。在此基础上, 用籽晶法对 TiAl 基合金进行了晶向控制研究, 获得了与生长方向平行的片层取向。

关键词: TiAl 合金; 定向凝固; 组织选择; 晶向控制

引言

在众多的金属间化合物中, TiAl 基合金不仅具有良好的耐高温、抗氧化性能, 而且其弹性模量、抗蠕变性能均比钛合金好得多, 甚至优于 Ti_3Al 基合金, 而与 Ni 基高温合金相当, 但其密度还不到 Ni 基合金的一半, 是一种在航空航天及地面燃气轮机上应用的比较理想的材料。按照美国综合高性能涡轮技术计划 (IHPTET) 和高速民航计划 (HSCT) 及未来可重复使用的航天飞机需求, TiAl 基合金可使燃烧室及高温蒙皮结构使用的工作温度大增而无需 Ni 基高温合金, 它还可使喷气发动机推重比提高 50% 以上^[1,2]。

TiAl 基合金属于典型的包晶系统, 凝固过程中随着成分的改变会经历不同形式的包晶反应, 使它的凝固组织呈现多种类型和形态的变化。在 TiAl 合金众多的组织中, 由 γ -TiAl 和 α_2 - Ti_3Al 构成的全片层结构的综合性能最佳^[3]。由于 γ/α_2 片层结构具有很强的方向性, 采用定向凝固技术, 获得片层取向平行于生长方向的柱晶材料可以显著提高合金的综合性能^[4]。TiAl 基合金片层结构是在包晶相变之后的固态相变过程形成的, 片层取向不仅受固态相变的制约, 而且与液固和包晶耦合相变中的本质特点以及定向凝固过程中的各组成相显微组织的演化和它们各自之间的竞争选择等复杂因素密切相关。因此, 对 TiAl 基合金片层结构取向的主动控制, 必须首先包括对定向凝固 TiAl 合金包晶相变过程的相选择规律进行深入系统的研究。

为了获得 γ/α_2 片层取向与凝固生长方向一致的显微组织, 日本学者 Yamaguchi 等^[5,6] 提出改进的籽晶法来控制凝固取向, 其基本思路是控制合金成分使定向凝固中初生相为 α , 生成与热流方向一致的 α 柱晶并浇注成母锭, 切取 α 晶体并转动 90° 作为供随后合金材料定向凝固的籽晶。这样, 母锭中 α 柱晶择优生长的 $[0001]$ 取向就与随后定向凝固的热流方向垂直, 而新的与热流一致的择优生长方向就与 γ/α_2 片层的取向一致。另外, 部分学者采用合金化处理, 通过加入 β 稳定元素, 使 TiAl 基合金在凝固过程主要析出相为 β , 在后续的固态相变过程中, γ/α_2 片层取向与凝固生长方向呈 0° 或 45° ^[7]。

然而, 对于 γ/α_2 片层取向的控制, 不管是采用籽晶法还是合金化处理, 从相关的基本规律和形成比较成熟有效的实用技术来看, 还有很长的路要走。在采用籽晶法的定向凝固过程中, 首先熔化和凝固的均是籽晶材料, 由于籽晶材料与主体合金成分往往不同, 籽晶材料熔体与主体合金熔体之间不可避免地存在成分过渡区, 它往往导致引晶的失败。而通过合金化处理, 由于受凝固过程中相的竞争选择及非平衡效应影响, 片层取向的控制同样复杂。

因此, 要实现对 γ/α_2 片层取向的控制, 一方面必须对 Ti-Al 合金在定向凝固过程中相关的包晶相变过程及其对组织的影响进行深入的分析; 另一方面, 在采用籽晶法对 Ti-Al 基合金进行晶向控制过程中, 必须尽可能地降低成分过渡区的影响。本文从相与组织选择及晶体择优生长特性角度, 首先研究了不同成分 Ti-Al 二元合金

在定向凝固过程中相和微观组织的演化，在此基础上，采用籽晶法对 TiAl 基合金进行了晶向控制研究。

1 定向凝固 Ti-Al 合金组织选择

Ti-Al 二元合金是典型的包晶系统，在等原子比附近存在 $L + \beta \rightarrow \alpha$ 和 $L + \alpha \rightarrow \gamma$ 两个包晶反应，我们称前者为第一包晶反应，在平衡相图中，其包晶平台成分区间为 44.8~49.4at% Al；后者为第二包晶反应，其包晶平台成分区间为 51.4~55.1at% Al。为了能够较准确的校核模型构造与相选择图的可靠与可用性，我们设计了单相与多相等 5 类共 17 种合金进行综合分析。

表 1 给出了定向凝固 Ti-(44~53)at% Al 合金在不同温度梯度 (G) 与抽拉速度 (V) 比值条件下界面形态及微观组织。表中合金成分为经过化学分析实测成分。图 1 为表 1 中典型生长条件下的固液界面形态，图中的下标号对应表 1 中序号。可看出，对于 Ti-(44~46)at% Al 合金，其基本凝固相为单相 β ，在较高的 G/V 值下，固液界面形态为平界面 (“1”) 和胞状 (“2”)。当初始成分在 47at% Al 附近时，在较高的 G/V 值下，合金的基本凝固相为初生 β 和包晶 α 相，“4”中为典型两相耦合生长组织，随着 G/V 的减小，两相呈枝晶协同生长，如 “5” 所示。根据表 1，当初始成分为在 49at% Al 附近时，合金以

单相 α 生长。对于初始成分在 50at% Al 附近的合金，在较高的 G/V 值下，凝固过程为 α 单相生长，“10”为 α 的平界面形态；随着 G/V 值的降低，固液界面逐渐变为 α 胞晶、 α 胞/枝晶和晶间 γ 相、 α 树枝晶和晶间 γ 相，其中， γ 相是由枝晶间液相直接凝固形成的，体积分数较少，如 “11”、“12” 和 “13” 所示。当初始成分在 52at% Al 附近时，在较高的 G/V 值下，合金呈单相生长，固液界面为 α 的平界面形态，如 “14” 所示；随着 G/V 值的降低，开始出现初生 α 和包晶 γ 的两相生长，“15”为典型两相胞状耦合生长结构，“16”和 “17”中固液界面为 α 枝晶与小平面 γ 的协同生长。

由于 γ 片体的晶体取向与 β 及 α 相的取向存在固定的晶体学关系： $(110)_{\beta} // (0001)_{\alpha} // (111)_{\gamma}$ ，合金在凝固中定向择优生长的 β 与 γ 片体呈 0° 或 45° 的关系，而 α 相则与 γ 呈垂直取向。因而进一步考察典型条件下部分合金定向凝固组织中相关组成相生长取向的关系。图 2 (a) 给出了表 1 中 “3” 条件下，合金纵截面的宏观和微观组织，可看出，最终获得全片层结构。结合微观组织照片，展示片层结构取向主要与生长方向 (GD) 平行，少量片层结构取向与 GD 呈 45° 。具有不同片层取向的晶粒间存在晶界，没有观察到与生长方向垂直的片层取向，说明，该合金在凝固过程为单相 β 生长。

表 1 定向凝固 Ti-(44~53) at%Al 合金实验结果

	C ₀ (at%)	G/V(Ks/m ²)	界面形态	微观组织
1	44.86	1.43×10 ¹⁰	Plane	β plane
2	45.14	3.75×10 ⁹	Cells	β cells
3	46.18	4.8×10 ⁹	Cells	β cells
4	47.24	3×10 ⁹	Cellular dendrites	β cells+ α cells
5	47.17	1.6×10 ⁹	Cellular dendrites	β + α dendrites
6	47.11	1.2×10 ⁹	Dendrites	β + α dendrites
7	49.13	3.8×10 ⁹	Cells	α cells
8*	49.05	1.75×10 ⁹	dendrites	α dendrites
9*	49.11	0.8×10 ⁹	Dendrites	α dendrites
10	50.06	1.8×10 ¹⁰	Plane	α plane
11	50.21	3.52×10 ⁹	Cells	α cells
12	50.28	1.8×10 ⁹	Cellular dendrites	α cells+ γ
13	50.11	1.2×10 ⁹	Dendrites	α dendrites+ γ
14	52.27	2.1×10 ¹⁰	Planar	α plane
15	52.07	4.2×10 ⁹	Coupled growth	α cells+ γ
16	52.03	2.1×10 ⁹	Cellular dendrites	α cellular dendrites+ γ
17	52.16	1.05×10 ⁹	dendrites	α dendrites+ γ

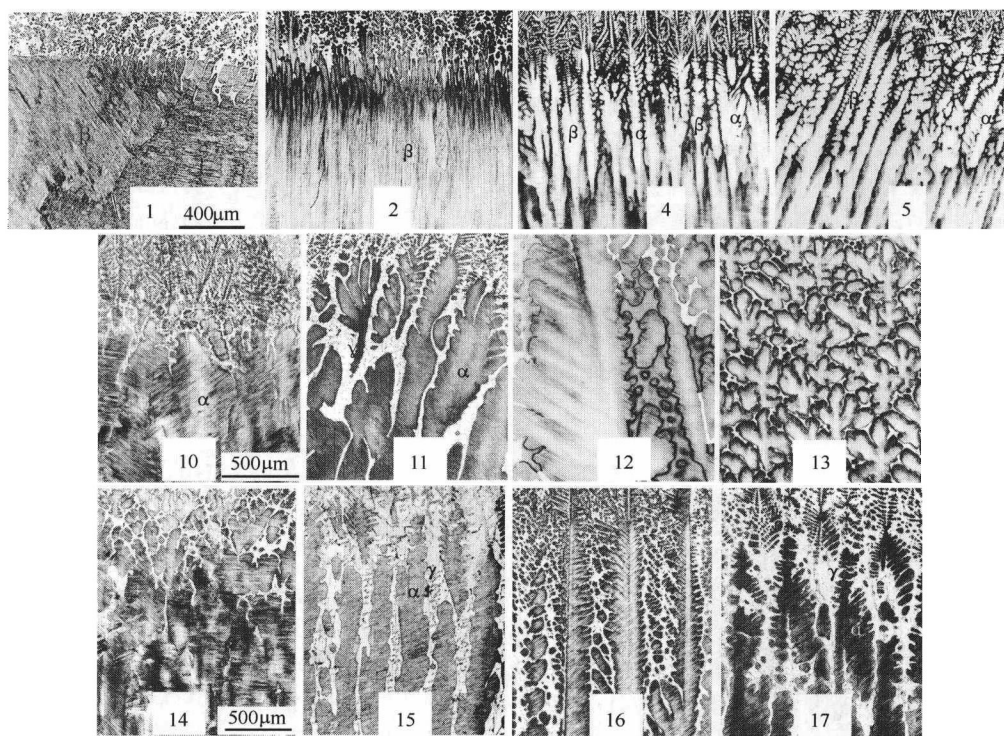


图1 定向凝固 Ti-(44~52) at%合金固液界面形态

图2(b)给出了表1中“4”条件下合金纵截面的宏观和微观组织,可看出,最终获得全片层结构,大部分片层取向与GD呈45°,少量片层取向与GD垂直。说明,随着初始Al含量的增加及G/V值的降低(相对“3”),合金开始出现初生 β 和包晶 α 两相生长,其中, β 体积分数较大。结合图1中固/液界面形态,可看出,两相呈典型胞状耦合生长。

图2(c)给出了表1中“5”条件下,合金纵截面的宏、微观组织及片层取向。与“4”比较,初始Al含量几乎不变,但G/V值显著降低。可看出,在最终获得的全片层结构中,与GD垂直的片层结构取向较多,而与生长方向平行的片层取向相对较少。结合图1中固液界面形态,可知,在该凝固条件下,初生 β 和包晶 α 两相呈胞/枝晶协同生长,其中,包晶 α 相的体积分数较多。图2(c)中还可观察到包晶两相晶界呈锯齿状,表明,在凝固过程中存在一定程度的包晶反应, α 相的生长吞噬部分 β 相。

当合金成分越过49at%Al,如“7”,与“5”比较,合金成分与G/V均增大,最终获得全片层结构。由于热流传输方向与生长方向的偏离,

导致晶体生长与片层取向发生轻微倾斜。通过观察微观固液界面形态,显示晶体呈胞状生长,部分胞晶尖端出现轻微侧枝,侧枝与胞晶主轴呈60°,展示了 α 相的特征。图中未观察到初生 β 相的存在。

图2(e)表示合金“12”在初始凝固阶段,单相 α 以胞晶形式生长,随着凝固的进行, α 胞晶间逐渐出现少量自液相析出的 γ 相。 α 在后续固态相变形成的片层结构取向与GD接近于垂直。

图2(f)给出了表1中“17”条件下,合金纵截面的宏观和微观组织。可看出,在初始凝固阶段,由于大量晶粒的无序萌生和竞争生长,以及稳定的单相热流尚未完全形成,部分 α 晶粒不仅会偏离整体试样生长方向,而且其生长并非按[0001]的择优取向,出现了部分 α 晶粒沿 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 晶向生长。这样在固态相变之后该 α 晶粒的生长取向遂与 γ 片层的取向一致[图2(f)右下],随着凝固的进行,竞争占优的晶粒生长方向逐渐调整到与GD平行。图2(f)右侧即表示试样下部个别晶粒的非择优生长发展至部分 α 晶粒的取向与 γ 片体取向一致(中),再延伸到大

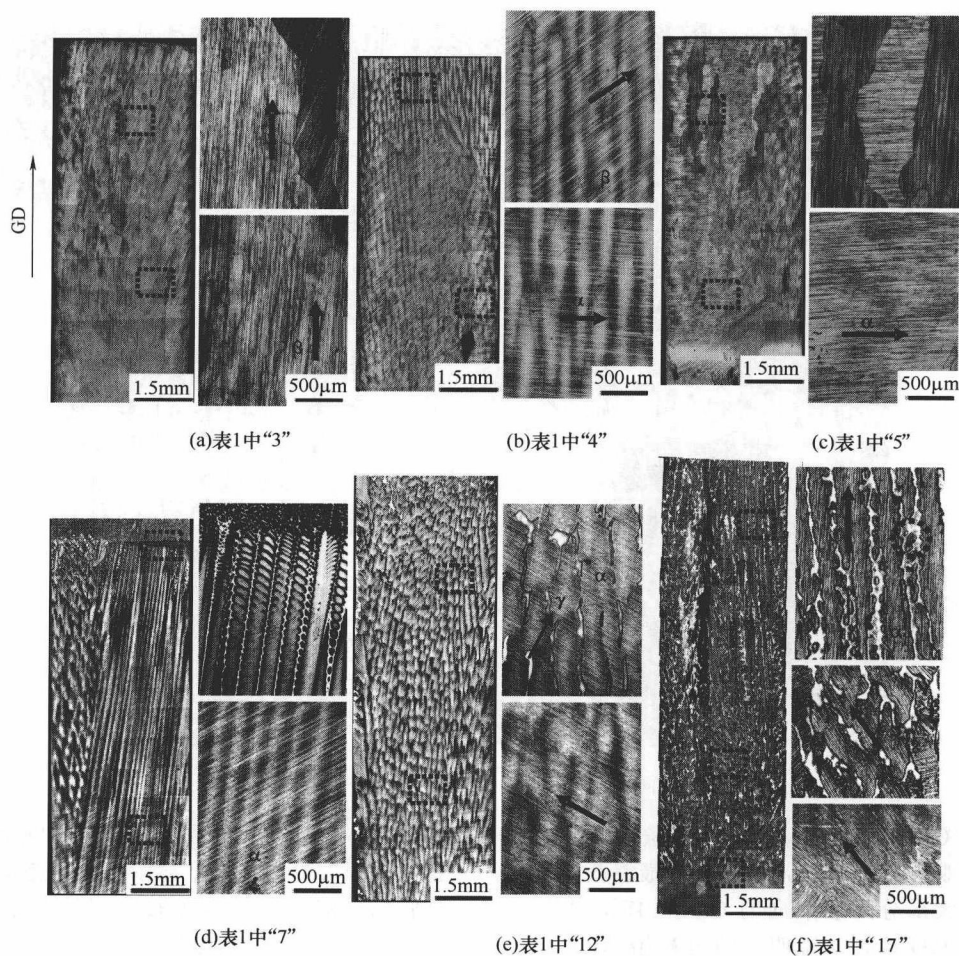


图2 表1中不同条件下定向凝固 Ti-Al 合金宏观和微观组织

部分晶粒的生长取向与 γ 片体的 (111) 面相平行 (上)。上述结果再次启示, 选择凝固组织为单相 α 的合金成分, 控制 α 相沿非择优生长取向的 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 生长是完全可以获得 γ 片层与试样生长方向一致的凝固组织。从微观组织照片可看出, α 以胞状枝晶方式生长, 晶间出现大量的 γ 相。另外, 图中还可观察到许多“破碎”的枝晶臂, 如图中虚线圆圈中所示, 这是由于发生了 $L + \alpha \rightarrow \gamma$ 包晶反应, 导致 α 以胞状枝晶侧枝发生“熔断”造成的。受铸态晶粒片层取向及初始晶粒竞争生长的影响, 最终形成的片层取向与 GD 平行。

采用充分形核假设和成分过冷判据 (即 NCU), 构建了二元包晶合金相选择模型^[8]。利用该模型并假设包晶两相形核过冷度均为 2K, 计算获得了 Ti-Al 二元包晶合金相选择图, 即相

和微观组织与合金成分及工艺参数 G/V 的关系图, 如图 3 所示。图中还给出了表 1 中的实验结果以对照和验证。可看出, 理论预测的单相 β 、 β 与 α 两相协同生长以及 α 单相生长与实验结果吻合较好, 而对 α 与 γ 的协同生长理论预测与实验结果有一定差距。究其原因主要由于包晶相 γ 是化合物相, 呈典型小平面模式生长。而目前对于小平面对形核与生长的认识还不充分, 在构建相选择模型时, 往往对其采用与非小平面相似的处理, 可能导致一定的偏差。

上述结果表明, 对于初始成分在 44.8 ~ 49.4at% Al 范围的二元 Ti-Al 合金, 凝固过程析出相为初生 β 和包晶 α 相, 在后续固态相变过程形成全片层结构, 片层取向与合金成分、凝固条件以及定向凝固启动阶段铸态晶粒片层取向密切相关。当初始成分小于 45at% Al 时, 在宽的

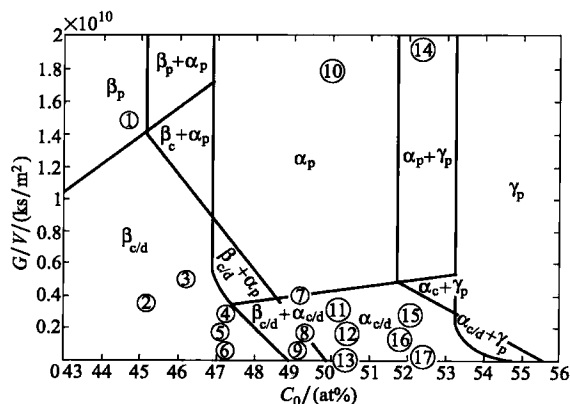


图3 Ti-Al二元包晶合金相选择图
(两相形核过冷度均为2K)

G/V 范围内,合金凝固过程为单相 β 生长,最终形成的片层结构取向与生长方向呈 0° 或 45° 。当初始成分大约在49at%Al时,合金凝固过程为单相 α 生长,最终形成的片层结构理论上与凝固生长方向垂直,但受定向凝固启动阶段铸态晶粒片层取向的影响,通过控制 α 相的非择优生长生长取向,可以得到平行于生长方向的凝固组织。因此,理论上,如果选择合适籽晶材料,通过定向凝固工艺,采用籽晶法可以对该成分合金进行晶向控制。

2 定向凝固 TiAl 基合金晶向控制

由前面的分析可以看出, α_2/γ 片层组织的取向除受凝固中相的竞争选择及非平衡效应影响之外,合金的固态相变也起到重要的作用。所以,仅靠在凝固过程中控制TiAl合金的片层取向在实践上是困难的。因此,常规的定向凝固技术不能保证获得平行于凝固方向的 α_2/γ 片层组织。

Yamaguchi等^[5-7]以Ti-43Al-3Si合金为籽晶材料,采用籽晶法,对Ti-Al基合金进行晶向控制研究,获得了不同成分合金在Ti-43Al-3Si籽晶上的凝固组织^[9]。尽管定向凝固过程中的初生相均为 α ,满足了籽晶法的基本要求,但是当籽晶材料与主体合金成分相差较大时,并不能获得预定取向的片层组织。因此,探求与主体合金成分相近的新籽晶材料一直是TiAl基合金晶向控制研究的一个热点问题。近来, Lee等^[10]开发了Ti-46Al-1.5Mo-1.2Si(at%)籽晶材料,并成功实现对目前被认为极具应用前景且与籽晶成分相近的

Ti-46Al-0.5W-0.5Si合金的晶向控制。然而,若籽晶材料与主体合金成分相差较大,则不可避免地存在成分过渡区,它可能导致合金凝固路径的改变,甚至新相的形核,从而阻断主体合金与籽晶材料的充分接触,导致引晶的失败^[10]。

显然,如果选择成分相同的籽晶材料与主体合金,则完全可以避免成分过渡区的出现,而且,图2中结果表明,定向凝固启动阶段铸态晶粒对后续定向凝固晶粒内部片层结构取向有引晶作用,因此,利用合金自身充当籽晶材料来进行晶向控制是可能的,我们称之为“自引晶”。要通过“自引晶”实现晶向控制,必须要求合金的基本凝固相为 α 。下面,以Ti-49.05Al、Ti-43.43Al-2.86Si和Ti-47.4Al-1.53Mo-1.42Si三种 α 凝固合金为例,分析通过“自引晶”控制晶向结果。

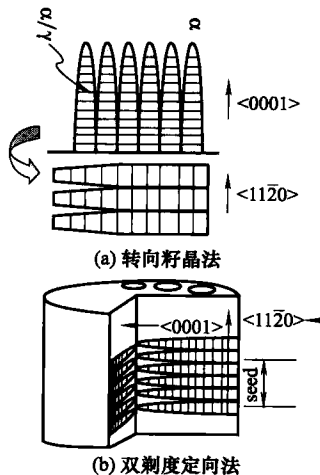


图4 两种控制 γ 片层取向的方法

传统籽晶法首先需制备沿 $\langle 0001 \rangle$ 取向择优生长的籽晶锭,切取合适尺寸的籽晶,旋转 90° ,再与选用合金连接,制成母合金棒。此时籽晶沿试样轴向即为垂直于 α 相 $\langle 0001 \rangle$ 晶向的 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 。经定向凝固即可得到 γ 片层与试样定向生长一致的凝固组织,通常称为“转向籽晶法”。这种方法对籽晶需要切取、转向、与母合金连接比较复杂。我们利用电磁冷坩埚技术,在冷坩埚中熔化选定成分合金后,断电、激冷和快凝,形成 α 单相的横向柱晶,然后按需切取试样,其纵向晶向即为 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$,定向凝固后即可得到与试样轴向同方向的 γ 片层。这种方法由于是利用两个温度梯度形成的定向组织,故将其称为“双梯度定向法”。用它制备完全

不需籽晶的可控 γ 片层取向的母合金试棒, 也可制备各种成分的籽晶, 然后与主体合金试棒连接进行定向凝固。两种控制 γ 片层取向方法示意地表示在图 4 中。

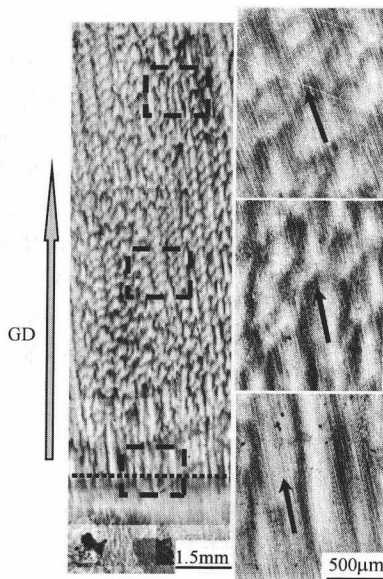


图 5 以 Ti-49.05at%Al 为籽晶和母体合金, $V=10\mu\text{m/s}$ 时, 定向凝固组织

图 5 给出了经过图 4 双梯度定向处理后, 籽晶材料和主体合金均为 Ti-49.05at%Al, 生长速度为 $10\mu\text{m/s}$ 时, 定向凝固后的宏观和微观组织。可看出, 定向凝固启动后, 柱晶沿 GD 方向生长, 表现出良好的定向生长特性, 在定向凝固启动界面附近 (图中虚线) 没有观察到类似文献 [7-9] 中的成分过渡区。结合微观组织照片, 可看出, 籽晶材料内部的片层结构取向与 GD 基本平行, 且籽晶很好地起到了引晶的作用, 导致定向生长晶粒内部片层取向也与 GD 基本平行。

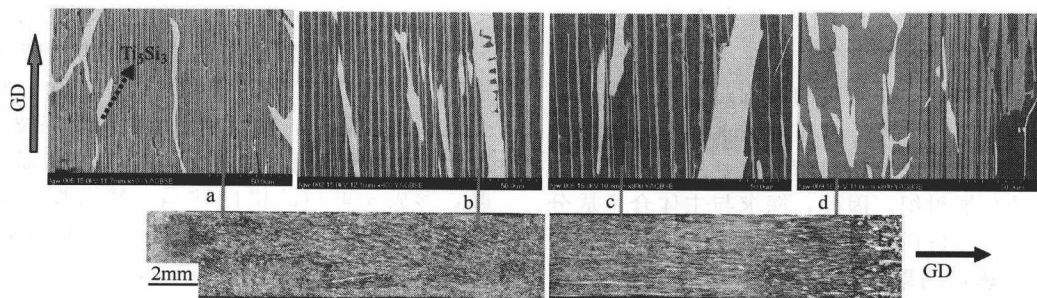


图 7 沿图 6 中试样生长方向不同位置的纵截面 BSE 照片

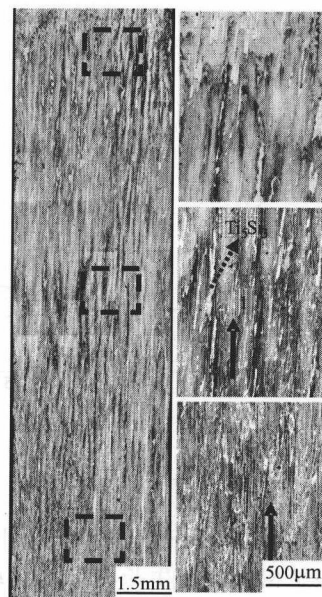


图 6 以 Ti-43.43Al-2.86Si 为籽晶和母体合金, $V=5\mu\text{m/s}$, 定向凝固组织

以 Ti-43.43Al-2.86Si 合金为籽晶和主体合金, 定向凝固的实验结果如图 6 所示。由于籽晶材料与主体合金成分, 与图 5 类似也没有观察到明显的成分过渡区。随着凝固的进行, α 胞晶逐渐沿 GD 方向生长, 胞晶尺度较细, Ti_5Si_3 相分布于 α 相中, 两者以共晶模式生长。在随后的固态相变过程中 α 相转变为 α_2/γ 片层结构。图 7 中沿 GD 方向试样不同位置的纵截面 BSE 照片展示, 铸态晶粒充当籽晶起到了很好的引晶作用, 整个试样中片层结构取向与 GD 平行, 且沿 GD 方向, 片层间距逐渐增大。片层间距与合金的冷却速率 ($G \cdot V$) 密切相关, 在凝固初期, 冷却效率高, 因此, 片层较细, 随着凝固的进行, 冷却速率有减小的趋势, 片层间距增大, 在快速液淬过程中, 片层间距变小。从图 7 中还可

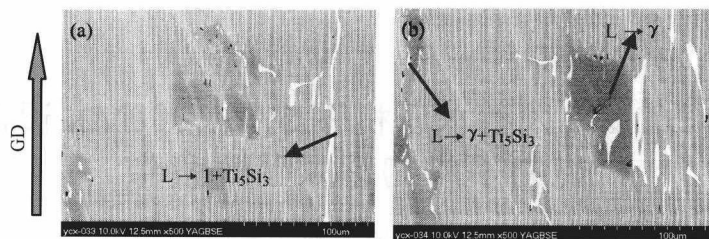


图8 Ti-47.4Al-1.53Mo-1.42Si合金定向凝固试样不同位置的高倍BSE照片

以观察到化合物相 Ti_5Si_3 表现出一定的定向生长特性。

我们再以 Ti-47.4Al-1.53Mo-1.42Si 合金为主体材料与籽晶进行定向凝固试验，也取得了成功。定向凝固启动后， α 相以枝晶形式沿 GD 方向连续生长，枝晶尺度较小。铸态晶粒中片层结构取向与 GD 平行。合金同时充当籽晶材料，成功引晶，导致最终整个试样中片层结构取向均与 GD 平行。图8给出了该合金 α_2/γ 片层结构的高倍BSE照片， Ti_5Si_3 相分布于 α 相及自液相析出的 γ 相中，均以共晶形式形成，且表现出较好的定向生长特性。

上述三个结果说明，对于基本凝固相为 α 的TiAl基合金，选择同成分的籽晶材料和主体合金，通过“自引晶”，可以实现晶向控制。

3 结论

系统研究了 Ti-(44~53)at% Al 合金在不同 G/V 值条件下相和微观组织的形成与演化，并采用 NCU 模型计算首次获得了 TiAl 合金的相选择图，理论预测结果与实验结果吻合较好。根据相选择图，当初始成分小于 45at% Al 时，合金凝固过程为单相 β 生长，最终形成的片层结构取向与生长方向呈 0 或 45°。当初始成分大约在 49at% Al 时，合金凝固过程为单相 α 生长，选择合适籽晶材料，通过定向凝固工艺，采用籽晶法可以对该成分合金进行晶向控制。当初始成分在 45~49at% Al 之间时，凝固过程存在 $L+\beta\rightarrow\alpha$ 包晶反应，出现包晶两相生长，最终形成的片层结

构取向较为复杂。当初始成分大于 50at% Al，凝固过程存在 $L+\alpha\rightarrow\gamma$ 包晶反应，后续形成的片层结构中含有凝固析出的脆性化合物相 γ ，对于合金的性能不利。

对 Ti-49.05Al、Ti-43Al-3Si 和 Ti-46Al-1.5Mo-1.2Si 三种 α 凝固合金，通过“自引晶”进行晶向控制研究，表明，由于籽晶材料和主体合金同成分，消除了传统籽晶法中存在的成分过渡区，使得籽晶材料能很好地起到引晶作用，最终各个合金中定向凝固晶粒内部片层结构取向与籽晶材料内部片层取向取得一致。

参考文献

- [1] Loria E A. *Intermetallics*, 2000, 8: 1339-1345
- [2] 李成功, 傅恒志, 于翔. 航空航天材料. 北京: 国防工业出版社, 2002: 16-18
- [3] Kim Y W. *JOM*, 1994, 46: 30-38
- [4] Yamaguchi M. In: Darolia R, editors. *Structural intermetallics*. Warrendale (PA): TMS; 1993: 127
- [5] Johnson D R, Masuda Y, Inui H, Yamaguchi M, et al. *Mater Sci Eng A*, 1997, 239-240: 577-583
- [6] Kishida K, Johnson D R, Masuda Y, Yamaguchi M, et al. *Intermetallics*, 1998, 6: 679-683
- [7] Kim M C, Oh M H, Lee, J H, et al. *Mater Sci Eng A*, 1997, 239-240: 570-576
- [8] Hunziker O, Vandyoussefi M, Kurz W. *Acta Mater.*, 1998, 46: 6325
- [9] Lee H N, Johnson D R, Inui H, Oh M H. *Mater. Sci. and Eng. A*, 2002, 329-331: 19-24
- [10] Zhang C J, Xu D M, Fu H Z. *J. Crystal Growth*, 2008, 310 (15): 3604-3609