

单晶高温合金行业现状及其数值模拟应用综述

梁琳^{1*}, 李媛智¹

¹ 中仿科技公司, 漕河泾开发区松江高科技园, 上海, 201612

*通讯作者, 邮箱: info@cntech.com; 电话: 021-37696588

摘要: 单晶高温合金因其优异的高温抗疲劳、抗蠕变性能, 在航空发动机叶片等高端装备制造领域中具有重要的应用。了解单晶高温合金的行业现状及其数值模拟应用, 对于了解产品的市场动向以及提高产品的质量与研发效率具有现实的意义。论文概述了国内外单晶高温合金的行业现状及其数值模拟应用, 重点总结了国内单晶高温合金的研发状况、数值模拟技术在航空发动机用单晶高温合金制备工艺、性能评价等方面的应用, 并提出了改善我国单晶高温合金生长工艺与质量现状的努力方向。

关键词: 航空发动机叶片; 单晶高温合金; 制备工艺; 数值模拟

A review on single crystal super-alloy blade of aviation engine and its applications with numerical simulation

Lin Liang^{1*}, Yuanzhi Li¹

¹ CnTech Co., Ltd, Songjiang High-Tech Park, Caohejing Development Zone, Shanghai, China, 201612

* Corresponding author. Email: info@cntech.com; Tel: +86-21-37696588

Abstracts: Single crystal super-alloy has been widely employed in blade of aviation engine due to its excellent properties such as high anti-fatigue and high anti-creep. It has an important engineering value to understand the developing status of single crystal super-alloy and numerical simulation applied in this field. The industry status and applications with numerical simulation approach of single crystal super-alloy, especially for the developments and simulation state in China, have been reviewed. Some approaches on improving the processing prediction and quality control of single crystal super-alloy are also presented.

Keywords: Blade of aviation engine; Single crystal super-alloy; Processing; Numerical simulation

0 引言

当前,随着科学技术与社会经济的发展,航空航天行业呈现产品军民多样化、市场竞争日益激烈的态势。而涡轮发动机叶片的质量是衡量航空航天产品性能的重要指标。单晶高温合金因其优异的高温抗疲劳、抗蠕变性能,已成为制造涡轮发动机叶片的重要材料。单晶高温合金的生长制备工艺、缺陷预测与控制是影响其工程实际应用的关键因素。传统上一般采用实验方法来研究上述问题。但利用实验方法往往成本高、周期长。随着计算机软、硬件技术的不断进步以及计算数学、计算力学等学科的交叉渗透,数值模拟技术作为实验法的辅助手段,已日益在涡轮发动机叶片等高端装备制造领域中得到广泛的应用。因此,了解单晶高温合金的行业现状及其数值模拟应用,对于了解产品的市场动向以及提高产品的质量与研发效率具有现实的意义。

本文从国内外单晶高温合金的行业现状出发,结合单晶高温合金的制备工艺、性能评价等问题,介绍数值模拟技术在航空涡轮发动机叶片用单晶高温合金中的应用,并提出改善发动机叶片单晶高温合金生长工艺与质量的数值模拟研究方向。

1 国外单晶高温合金行业概况

目前,全球高温合金材料被广泛应用于各个工程领域,但总体而言,核心制造技术主要被为数不多的企业所占据。

据文献[1]报道,全球范围内能够生产航空航天用高温合金的企业不超过 50 家,主要集中在美、英、日等国。发达国家将航空航天领域的高温合金产品视为其长期发展的战略物资,严格控制对外出口。美国航空航天用单晶高温合金的年产量约为 5 万吨,其中约 60%用于民用工业,其研发工艺和应用技术一直处于国际领先水平。主要高温合金企业的营业收入和营业利润均在波动中上升。在美国,生产高温合金水平较高的公司主要有 GE、Pratt-Whitney、Cannon-Muskegon、Inco 以及 Carpenter,其中 GE 公司能够自主研发与生产航空发动机用的高温合金^[1]。

英国是欧盟国家中高温合金研发和生产的主要代表。英国研发高温合金起步较早,其铸造合金技术非常先进,具有代表性的是 Mond Nickel 公司生产的 Nimocast 合金。后来该国 Rolls-Royce 公司研制了 SRR2000 和 SRR2060 等航空发动机用定向凝固单晶合金。近年该公司的主营业务收入和利润一直处于提升的状态。

日本近年来的单晶高温合金工艺发展快速，在镍基单晶高温合金、镍基超塑性高温合金等方面取得较大的成果，已成功开发出在 1200℃ 高温下能保持足够强度的新型耐高温合金。日本高温合金生产企业主要有 IHI、JFE、新日铁和神户制钢等公司。

总体而言，发达国家美、英、日等国在研发与制备航空发动机用高温合金方面具有雄厚的技术实力，其核心技术领跑全球，值得国内单晶高温合金研发与生产人员参考借鉴。

2 国内单晶高温合金行业现状

20 世纪 80 年代初，中航工业航材院在国内率先开展了单晶合金及叶片技术的研究，成功研制了我国第一代单晶高温合金 DD3。20 世纪 90 年代又成功研制了综合性能优异的第二代单晶高温合金 DD6。DD6 合金拉伸、持久、蠕变、疲劳、抗氧化及耐热耐腐蚀性能等达到了国外广泛应用的第二代单晶合金的性能水平。自成功研制我国首件单晶空心涡轮叶片以来，中航工业航材院为多种型号先进航空发动机提供了数万件单晶叶片，某些装配单晶涡轮叶片的发动机已翱翔于蓝天。

国内具有代表性的高温合金研发和生产企业如表 1 所示。

表 1 国内高温合金研发和生产的主要企业

单位	高温合金业务简介
钢研高纳	背靠钢研院，拥有技术、资金、市场和规模等优势。产品涵盖铸造、变形、新型高温合金等。铸造高温合金的产能近 2000 吨，变形高温合金产能超过 150 吨，粉末高温合金产能近 100 吨，ODS 合金、核电等新型高温合金产能近 100 吨
抚顺特钢	国内老牌高温合金生产企业，产品主要以变形高温合金为主，规模国内最大。高温合金产能近 3000 吨，民用产品约占 40%。高温合金营业收入近 6 亿元
宝钢特钢	最初的上钢五厂，也是国内老牌的高温合金生产企业，民用产品占比高，但也生产 GH4169、GH738 等航空航天用变形高温合金。其高温合金产量超过 1000 吨
长城特钢	以一般的变形高温合金产品为主
齐齐哈尔特钢	以生产一般的民用变形高温合金产品为主
北京航材院	技术实力出众，主要从事飞机、发动机和直升机用材料、工艺、检测技术研究，具有高性能材料小批量生产和高难度重要部件的研发能力，在高温合金单晶叶片领域具备较强科研与生产实力
沈阳金属所	以国家重大攻关项目研究为主，涉及高温合金等高端装备材料研发等领域

国内高校及相关企业在耐高温单晶合金方面所做的相关工作综述如下：

钢铁研究总院燕平等^[2]对 DD402(CMSX-2)单晶合金标准热处理状态组织及 850℃ 下 500h、1500h 和 3000h 时效后的组织进行了显微组织观察和比较，测定了长期时效后的高温

持久性能。DD402 单晶合金属于第一代单晶合金，已成功应用于某发动机的 I 级涡轮叶片。为提高我国航空发动机的质量，钢铁研究总院和南方航空动力机械公司共同开展了 DD402 单晶合金及其 I 级单晶涡轮叶片的研制工作。

北京航空材料研究所在单晶高温合金的研制方面做了很多工作。陈荣章^[3]总结分析了单晶高温合金的发展现状，认为从 20 世纪 80 年代初第一代单晶高温合金研制成功以来，单晶合金的发展甚为迅速，第二代、第三代单晶合金相继出现和应用，为航空发动机的性能提高作出了重要贡献。单晶高温合金在先进涡轮发动机叶片中的应用日益扩大。但客观而言，我国在单晶合金工艺研究方面仍落后于当前国际先进水平。张勇^[4]介绍了一种加矿化剂的单晶壳型。该壳型具有高强度、壁薄而均匀的特点，已应用成功于浇注单晶叶片。张兵等^[5]基于近年来国内外对于定向凝固和单晶高温合金再结晶行为的研究，总结了定向凝固和单晶高温合金再结晶的主要影响因素，包括热处理温度与时间、第二相粒子、变形温度等。李影等^[6]总结了镍基单晶高温合金的反常屈服行为，并讨论了导致产生这种反常屈服行为的变形机制以及这些变形机制的发展过程。

中国科学院金属研究所刘春廷等^[7]采用低压气相沉积法，在镍基高温合金 DD32 上制备铝化物涂层。在 900℃、1000℃氧化 500 小时后，表面氧化膜为致密的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和针状的 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。氧化后的铝化物涂层外层为 $\beta\text{-Ni}_3\text{Al}$ ，内层（扩散层）母体为 Ni_3Al 。

中国商用飞机公司朱鸥等^[8]总结了国内外航空发动机用单晶高温合金的热处理工艺，介绍了国外第 1 代至第 3 代单晶合金成分与热处理的关系以及最优的热处理条件。研究结果表明，升温和冷却速率对于单晶高温合金的使用性能影响显著。

中南大学丁智平^[9]以镍基单晶合金涡轮叶片的寿命分析为工程背景，研究了镍基单晶合金的热弹塑性行为和高温低周疲劳性能，并利用有限元分析软件预测了某发动机涡轮盘镍基单晶合金叶片的三维非线性循环应力—应变以及叶片的低周疲劳寿命。赵萍^[10]将晶体塑性理论和非线性随动硬化规律应用于低周疲劳研究，基于国内第一代镍基单晶高温合金 DD3，对其单轴、多轴疲劳开展了研究，并建立了预测航空发动机单晶叶片低周疲劳的本构模型。

北京科技大学孟杰等^[11]研究了热处理温度与时间、变形程度及合金成分等多种因素对镍基单晶高温合金再结晶的影响规律，分析了再结晶对其蠕变和疲劳性能的影响。

南京航空航天大学卿华等^[12]采用实验研究与有限元数值模拟方法相结合的方法对比分析了带孔和不带孔的某第二代镍基单晶合金平板试样的蠕变性能。研究结果表明，高温蠕变下，平板试样的晶体取向与是否开孔对蠕变寿命有明显的影响。

综上所述，国内对单晶高温合金的研究工作主要侧重于单晶高温合金蠕变、疲劳等力学

性能、相关的热处理工艺的研究，对于单晶高温合金生长过程中的缺陷预测、控制与优化的研究鲜有报道。另外，对于单晶高温合金生长的机理研究几乎存在空白。

3 数值模拟技术在航空发动机单晶高温合金叶片领域中的应用现状

用于制造航空发动机涡轮叶片用单晶高温合金的定向凝固铸件生产工艺复杂、控制要求高，因而通过试验研究单晶高温合金叶片的成本较高，且研发周期长。随着计算机软硬件技术的进步，数值模拟技术发展迅速，在工业领域已得到了广泛的应用。利用数值模拟技术，可以有效模拟单晶高温合金的定向凝固生长过程、预测、控制与优化其微观组织与缺陷情况，提高单晶高温合金质量、降低研发成本以及缩短研发时间。

北京航空材料研究院薛明等^[13]模拟分析了空心涡轮叶片在定向凝固过程中陶瓷芯内部的温度分布，研究了陶瓷芯定位及型壳热物性参数匹配的影响。李嘉荣等^[14]采用有限元模拟软件计算了单晶合金定向凝固过程中的温度场。杨亮等^[15]针对单晶高温合金精铸薄壁件制备困难的问题，采用数值模拟方法分析了 DD6 单晶高温合金的定向凝固生长过程。通过研究试件几何形状以及工艺参数对定向凝固生长过程中温度梯度以及糊状区的影响，结果表明，几何形状对单晶高温合金试样的定向凝固生长有重要影响，提高浇注温度或降低轴拉速率有助于提高试样固-液界面前沿液相温度梯度或减小糊状区的宽度。

清华大学于靖等^[16]基于 CA 模型、枝晶生长机理和热量、溶质传输方程，建立了定向凝固单晶高温合金叶片的三维数值分析模型，考虑了多叶片之间以及加热炉之间复杂的辐射换热，模拟了不同抽拉速度下叶片内部的温度分布，并采用分层算法模拟了定向凝固单晶高温合金叶片的微观组织演变。Pan 等^[17]基于有限差分法数值模拟了航空发动机用单晶的定向凝固生长。研究结果表明，通过适当改变回退率，可以既提高生产能力，又避免产生晶粒缺陷。张航等^[18]采用元胞自动机以及有限差分法也对 DD6 高温合金三维定向凝固枝晶生长开展了数值模拟研究。

在国外，单晶高温合金研发与生产单位非常重视晶体生长过程的全程整体预测以及晶体生长缺陷的预测与优化。为了适应科研与生产的实际需要，结合传热与流体计算力学，国外开展了单晶高温合金生长数值模拟分析软件的研发工作，并在数值分析软件的算法、预测精度与求解效率方面做了很多有益的探索研究。其中，比利时鲁汶大学教授 François Dupret 及其合作者做了诸多研究工作，并提出了卓有成效的晶体生长全局数值模拟算法^[19,20]。基于这些稳健、高效的算法，Dupret 教授主持开发了晶体生长数值模拟软件 FEMAG。该软件可

模拟提拉法、泡生法、区熔法、垂直布里奇曼法、垂直梯度凝固法、定向凝固法、热交换法以及物理气相传输法等晶体生长工艺以及多物理场耦合仿真问题。其中，FEMAG 软件的定向凝固法生长工艺模拟功能颇具特色，通过集成定向凝固法生长工艺条件的设置，不仅可以自动捕捉晶体定向凝固过程中的固-液界面形状与位置，还可以计算熔体对流和辐射传热、预测加热器的功率以及计算氧杂质浓度、控制晶体生长的缺陷。

利用 FEMAG 软件可以有效模拟包括单晶高温合金在内的晶体定向凝固过程以及预测与控制晶体生长的质量，其算法稳健，计算精度高，求解效率高效。而相比而言，国内尚没有研制出同等高效、高精度模拟预测晶体定向凝固法生长的数值分析软件，在这方面的的工作尚需国内的研究人员加以重视，并努力提高晶体生长模拟的研发水平，加快自主研发步伐，以缩小与国外的差距。

4 结束语

作为高端装备制造领域——航空发动机涡轮叶片的重要材料，单晶高温合金的研发与生产应用已日益深入。从国内外单晶高温合金的行业状况看，单晶高温合金的核心制造技术仍然为国外某些发达国家所掌握，研发与生产技术水平仍明显优于国内的同行工作。从研究的方法、研究状况看，国内外对单晶高温合金的力学性能（蠕变、疲劳等）研究较多，采用的手段多为有限元数值模拟方法，在工艺方面也主要侧重于对定向凝固法生长单晶高温合金的研究，对于有限元法以外的其他数值模拟方法、定向凝固法以外的其他生长工艺方法研究颇少。对于单晶高温合金生长机理的理论研究则更为稀少，且难有重大的理论进展突破。从单晶高温合金生长模拟分析软件的研制工作看，国内较国外而言，差距仍很显著。

为此，我们认为，以下几方面值得国内从事单晶高温合金研发与生产的相关人员参考：

（1）鉴于国内在单晶高温合金理论、工艺以及数值模拟分析方面研发相对落后的局面，国内的相关工作者需要予以重视，并努力提高单晶高温合金工艺及其实验、数值预测的研发水平，加快自主知识产权的研发，努力缩小与国外同行的差距。

（2）国内关于单晶高温合金的研发与生产多为独立进行，多个单位与行业的合作较少，资源的配置利用较为分散。开展多方合作研发，集中多方的研发优势，对于核心技术的攻关、资源的高效配置以及研发效率的提高具有重要的促进作用。

（3）引进、吸收、消化国外先进的研发经验与技术，开展拥有自主知识产权的晶体生长数值分析软件的研发工作，对于提升我国在单晶高温合金数值模拟分析方面的技术水平与

核心竞争力具有现实的意义。

参考文献

- [1] 徐志国. 高端装备制造关键材料 遥看高温合金两千亿市场空间. 证券导报数字报 D04.
- [2] 燕平,单熙,赵京晨,等.DD402单晶合金及其 I 级单晶涡轮叶片的组织稳定性.航空材料学报.1998,10: 2-12.
- [3] 陈荣章. 单晶高温合金发展现状. 材料工程, 1995, 8: 2-12.
- [4] 张勇. 单晶高温合金叶片用熔模壳型的研制. 航空制造工程,1998, 4: 20-22.
- [5] 张兵,李田华,周静怡. 定向凝固和单晶高温合金再结晶影响因素. 航空科学技术, 2014, 25:109-113.
- [6] 李影,苏彬. 镍基单晶高温合金的反常屈服行为与变形机制. 材料工程, 2004, 3:45-48.
- [7] 刘春廷,孙晓峰,管恒荣. 含镍单晶高温合金铝化物涂层的高温氧化行为.航空材料学报,2003, 10:118-122.
- [8] 朱鸥,李玉龙,张燕,等. 航空发动机用单晶铸造高温合金热处理工艺. 铸造技术, 2013, 334:1137-1140.
- [9] 丁智平. 复杂应力状态镍基单晶高温合金低周疲劳损伤研究. 中南大学博士学位论文, 2005.
- [10] 赵萍. 航空发动机单晶叶片的多轴低周疲劳研究.中南大学博士学位论文, 2011.
- [11] 孟杰,金涛. 镍基单晶高温合金的再结晶. 材料工程, 2011,6:92-98.
- [12] 卿华,江和甫,温卫东,等. 镍基单晶合金气冷叶片模拟试样的蠕变性能研究. 航空动力学报, 2007, 22: 773-778.
- [13] 薛明,曹腊梅,刘世忠,等.定向凝固过程中型芯、型壳温度场数值模拟. 热加工工艺,:2006,35:86-88.
- [14] 李嘉荣,刘世忠,史振学,等. 第三代单晶高温合金 DD9. 钢铁研究学报(增刊 2), 2011,23:337-340.
- [15] 杨亮,李嘉荣,金海鹏,等. DD6 单晶精铸薄壁试样定向凝固过程数值模拟. 材料工程,2014,4(11):15-22.
- [16] 于靖,许庆彦,柳百成. 铸钢件熔模精密铸造凝固过程数值模拟. 铸造, 2006,55: 473-476.
- [17] Pan D., Xu Q., Yu J., et al. Numerical simulation of directional solidification of single crystal turbine blade casting. International Journal of Cast Metals Research, 2008, 21(1-4): 308-312.
- [18] 张航,许庆彦,史振学,等. DD6 高温合金定向凝固枝晶生长的数值模拟研究. 金属学报,2014,50(3): 345-354.
- [19] Dupret F., Van den Bogaert N. Modelling Bridgman and Czochralski growth, in Handbook of Crystal Growth, Vol. 2B, Chapter 15, ed. Hurle D. T. J., North Holland, 1994:875-1010 .
- [20] Dupret F., Nicodeme P., Ryckmans Y., et al. Global modeling of heat transfer in crystal growth furnaces. Int. J. Heat Mass Transfer. 1990, 9: 1849-1871.