

2023 年度发明创业奖·创新奖公示内容

项目名称：单晶高温合金叶片典型铸造缺陷控制技术及应用

推荐单位：中国科学院金属研究所

主要完成人：周亦胄、李金国、孟杰、王新广、于金江、孙晓峰

主要完成单位：中国科学院金属研究所

项目简介：

复杂冷却结构空心单晶叶片的制备是我国先进航空发动机装机和定型的主要技术瓶颈之一。在国家部委重大项目支持下，该项目团队针对复杂结构空心单晶叶片制备过程中出现的主要铸造缺陷开展了全流程控制技术研究，解决了困扰我国复杂结构单晶叶片制造的诸多难题。其主要发明创新点如下：

(1) 发明了预防与控制杂晶、再结晶缺陷形成的技术：根据自行设计的定向凝固过程连续测温装置以及单晶高温合金杂晶形成倾向性的评定方法，发现单晶叶片定向凝固固液界面前沿的温度场分布是控制杂晶形核的决定性因素，提出了在杂晶形成区预置晶核、主动控制局部散热条件以及优化抽拉速度等杂晶缺陷控制方法。研究了单晶叶片的再结晶形核及长大热力学与动力学过程，发现形变储能是诱发单晶高温合金再结晶的本质驱动力，提出了通过控制形变储能减少单晶高温合金叶片再结晶的方法。

(2) 发明了控制晶体取向及减小小角晶界缺陷形成的技术：率先采用双晶与三晶定向凝固生长技术，研究了定向凝固晶粒竞争生长机制，修正了教科书中定向凝固组织形成机制模型，完善了单晶高温合金晶体生长与控制理论，为单晶生长过程中冶金缺陷控制和工艺优化提供了理论指导和技术支持；基于晶粒和枝晶竞争生长理论，提出了螺旋选晶器起始段和螺旋段的优选设计方案。阐明了小角晶界的形成机理是以枝晶偏转方式形成，提出通过控制晶体取向偏离度减少小角晶界缺陷的新思路。

(3) 创新性提出了抑制叶片/陶瓷材料界面反应的新方法：通过澄清高温合金熔体与陶瓷材料的作用机理，发明了通过控制陶瓷型芯与型壳成分以及利用还原性气体抑制陶瓷材料与合金熔体发生界面反应的方法，显著提高了单晶叶片的表面冶金质量。

通过对单晶高温合金典型铸造缺陷的形成机理研究，提出了多项工程上行之有效的缺陷控制措施，发展了一套从模具设计到铸件检验的单晶叶片全流程控制技术，极大地促进了我国单晶叶片铸造技术的进步，技术成果在中航发沈阳黎明、中航发动力、中航发贵州黎阳、安徽应流等公司实现了产业化应用，近些年新增产值超过亿元，为我国多个新型航空发动机的研制提供了叶片保障。

该项目研究期间，获得国家授权专利 25 项，发表 SCI 收录论文 100 余篇。

发明创新情况:

序号	专利名称	专利号	法律状况
1	一种单晶高温合金再结晶形成倾向性的评定方法	201910104367.0	授权
2	一种防止单晶高温合金导向叶片杂晶缺陷形成的方法	201910044569.0	授权
3	平面薄壁铸件的制备方法	201210136757.4	授权
4	一种 Ni 基单晶高温合金生长过程中枝晶间距的控制方法	201710992617.X	授权
5	镍基单晶高温合金精密铸造过程的再结晶倾向性评价方法	201711019309.5	授权
6	一种降低单晶高温合金叶片榫头内部疏松缺陷形成的方法	201910230950.6	授权
7	一种防止单晶高温合金转动叶片杂晶缺陷形成的方法	201910044561.4	授权
8	一种单晶涡轮工作叶片陶瓷型芯的定位方法	201810948495.9	授权
9	一种熔模精铸高温合金铸件的气体保护方法	201510591629.2	授权
10	一种制备大尺寸镍基单晶高温合金棒材的型壳和方法	201610634094.7	授权

论文情况				
序号	论文名称	刊名	作者	影响因子
1	Effect of Y content on interface reaction and wettability between a nickel-base single crystal superalloy melt and ceramic mould	Journal of Alloys and Compounds	Y. Zi; J. Meng; C. W. Zhang; Y. H. Yang; Y. Z. Zhou; Y. T. Ding	6.371
2	Wettability and interfacial reactions of a low Hf-containing nickel-based superalloy on Al ₂ O ₃ -based, SiO ₂ -based, ZrSiO ₄ , and CoAl ₂ O ₄	Ceramics International	H.W. Wang, J.X. Yang, J. Meng, Y.H. Yang, Y.Z. Zhou	5.532

	substrates			
3	Effects of yttrium on wettability and interactions between molten superalloy and SiO ₂ -based ceramic core	Ceramics International	Y. Zi, J. Meng, M. K. Zou, W. Xu, J. G. Li, K. Xu, Y. Z. Zhou	5.532
4	A new model of competitive grain growth dominated by the solute field of the Nickel-based superalloys during directional solidification	Journal of Alloys and Compounds	H.W. Wang, X.L. Zhang, J. Meng, J.X. Yang, Y.H. Yang, Y.Z. Zhou, X.F. Sun	6.371
5	On the dendrite deformation and evolution mechanism of Ni-based superalloy during directional solidification	Journal of Alloys and Compounds	C. Chen, J. X. Sun, A. M. Diao, Y. H. Yang, J. G. Li, Y. Z. Zhou	6.371
6	Effect of solution cooling rate on the microstructure and creep deformation mechanism of a rhenium-free second-generation single crystal superalloy	Journal of Materials Science & Technology	X. P. Tao, Y. L. Du, X. G. Wang, J. Meng, Y. Z. Zhou, J. G. Li, X. F. Sun	10.32
7	Effects of rejuvenation heat treatment on microstructure and creep property of a Ni-based single crystal superalloy	Journal of Materials Science & Technology	K. J. Tan, X. G. Wang, J. J. Liang, J. Meng, Y. Z. Zhou, X. F. Sun	10.32
8	Influence of solidification conditions and alloying elements Re and Ti on micropores formed during homogenization of Ni base single crystal superalloy	Journal of Alloys and Compounds	J. L. Liu, J. Meng, J. J. Yu, Y. Z. Zhou, X. F. Sun	6.371
9	低偏析异质籽晶制备单晶高温合金的籽晶熔合区形成机制研究	金属学报	郭静, 李金国, 刘纪德, 黄举, 孟祥斌, 孙晓峰	1.797
10	单晶高温合金涡轮叶片的常见凝固缺陷及控制方法	特种铸造及有色合金	李金国, 孟祥斌, 刘纪德, 张朝威, 梁静静, 李力刚	0.571