

基于“材料基因组工程”的3种方法在镍基高温合金中的应用

王薪¹, 朱礼龙¹, 方姣¹, 刘军², 戚海英¹, 江亮¹

1. 中南大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083
2. 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083

摘要 “材料基因组工程”强调以产业应用为导向,集成和发展材料的计算工具、试验工具和数据库等核心基础能力,聚焦解决关系国计民生应用中材料的关键问题。本文列举3种基于“材料基因组工程”方法在镍基高温合金中的实际应用,包括高通量合金制备及其关键热力学和动力学数据的高通量采集、显微组织的多尺度和多维度表征、微型试样的力学性能检测。分析表明,定量预测和描述材料成分、工艺、组织和性能关系的计算、表征和数据库技术面临极大挑战,基于“材料基因组工程”的方法将促进镍基高温合金的研发,加快从实验室研究到市场应用的转化。

关键词 材料基因组工程;高通量实验方法;镍基高温合金;扩散多元节

中图分类号 TG111.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.10.007

Applications of “Materials Genome Engineering” based methods in Nickel-based superalloys

WANG Xin¹, ZHU Lilong¹, FANG Jiao¹, LIU Jun², QI Haiying¹, JIANG Liang¹

1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China
2. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract “Materials Genome Engineering” is industrial application oriented. Exploring and using materials computational tools, experimental tools and databases, it emphasizes the integration and development of these three key capabilities to solve materials issues critical to national welfare and people’s livelihood. This paper presents the applications of several “Materials Genome Engineering” based methods in nickel-based superalloys, namely high-throughput alloy fabrication, high-throughput thermodynamic and kinetic data acquisition, multi-scale and multi-dimension microstructure characterization, and miniature specimen testing. Quantitative predictive and descriptive capabilities to reveal the relationships among material composition, processing, structure, and property will undoubtedly be faced with great challenges, but they will progress steadily in this context. “Materials Genome Engineering” based methods will promote the research and development of nickel-based superalloys, accelerating the transition from laboratory work to industrial application.

Keywords Materials Genome Engineering; high-throughput experimental methods; Nickel-based superalloy; diffusion multiple

美国为了提升其制造业在全球的竞争力,于2011年推出“材料基因组计划”(materials genome initiative, MGI)^[1]。MGI的目标是加速先进材料从实验室到市场的转化进程,期使美国在先进材料市场上继续保持领先。截至2014年6月19日,

收稿日期:2015-04-02;修回日期:2015-04-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA03A514);中央高校基本科研业务费专项(2013zzts189)

作者简介:王薪,博士研究生,研究方向为铸造高温合金,电子信箱:xinwang@csu.edu.cn;刘军(通信作者),教授,研究方向为镍基高温合金及新能源材料与器件,电子信箱:liujun4982004@csu.edu.cn

引用格式:王薪,朱礼龙,方姣,等.基于“材料基因组工程”的3种方法在镍基高温合金中的应用[J].科技导报,2015,33(10):79-86.

美国联邦政府已经在 MGI 上投入 2 亿 5 千万美元^[2]。中国近年来支持了以计算为主的“基于集成计算的材料设计基础科学问题”和以实验为主的“高温合金材料设计与制备的基础研究”等项目。随着美国 MGI 的推出,扩大和加强了中国和其他国家对 MGI 的战略研讨。中国围绕材料高通量的制备、设计和表征方法,在近两年也启动了以“集成高通量实验与计算的钛合金快速设计”为代表的 973 计划、863 计划和国家自然科学基金项目等研究。

MGI 主要实施方法是构建材料的计算工具、实验工具和信息化数据库三大基础能力^[1],其组成元素是材料科学与工程研究者所熟悉和必需的。以材料计算为例,早在 1873 年 Gibbs 就为材料热力学奠定了严谨的理论基础^[3],分别在 20 世纪 60 年代和 80 年代材料热力学计算得到了极大发展,当前以相图计算 (computer coupling of phase diagrams and thermochemistry, CALPHAD) 为基础的材料设计已广泛地应用于科学研究和工程领域。同样,在 20 世纪初期,量子力学的发展使得研究人员从理论上计算材料性能成为可能^[4],当前第一性原理计算也得到了广泛应用。另一方面,随着 20 世纪 30 年代电子显微镜的出现,对材料进行表征检测具备了从原子到宏观尺度、从空间二维到包含时间和空间的四维表征等多样并可用的能力^[5]。但是 MGI 的目标比以往更明确,要加速材料发明设计、实现产业应用并对人类福祉和经济安全产生至关重要的作用。这就要求集成材料计算工具、实验工具和信息化数据库三个核心,加快从实验室的材料研究到产业化零部件与集成装备等的应用转化。

“材料基因组工程”(materials genome engineering, MGE) 是 MGI 的另一个称谓。MGE 强调以产业应用为导向,在探索和应用材料的计算工具、试验工具和数据库的基础上,更要集成和发展 MGI 提出的三大核心基础能力,聚焦解决关系国计民生产业应用中材料的关键问题。正如美国科学院和工程院共同设置的国家研究理事会 (National Research Council, NRC) 在 2008 年发表的题为《集成计算材料工程》(integrated computational materials engineering, ICME)^[6] 的报告中,指出 ICME 的关键词是“集成”和“工程”。据此,本文以镍基高温合金为例,探讨基于“材料基因组工程”的 3 种方法的实际应用。

1 镍基高温合金

镍基高温合金在航空航天和电力等的核心动力装备上具有广泛及至关重要的应用。其合金成分通常由 10 个以上的元素组成,包括 Ni、Co、Fe、Cr、Mo、W、Al、Ti、Nb、Ta、Hf、B、C 和 Zr 等。镍元素具有塑形较好的面心立方结构,在与其他元素合金化和在高温服役等条件下,其合金会保持面心立方奥氏体 (γ) 结构^[7]。镍基高温合金中合金元素的强化作用主要分为 5 类^[8]: 1) 固溶强化元素,主要溶于 γ 基体,并因原子半径与镍不同而在基体中产生晶格畸变达到强化作用,如 Cr、Mo 和 W 等; 2) 析出强化元素,主要溶于与基体共格的金属间化

合物 γ' 析出强化相,如 Al、Ti、Nb、Ta 和 Hf 等; 3) 晶界强化元素,此类元素偏析于晶界处,如 B、C 和 Zr; 4) 抗氧化腐蚀元素,如 Cr 和 Al 等; 5) 基体元素,如 Co 和 Fe 等。镍基高温合金的显微组织通常含有基体奥氏体相 γ 、析出强化相 γ' 、碳化物相、硼化物相以及对力学性能有害的 TCP 相等。

除了其合金成份一般多于 10 个元素,镍基高温合金可以采用不同的制造工艺技术路线,使得其组织和性能千变万化。再有,镍基高温合金通常要在高温、高压和高腐蚀的条件下长时间、稳定可靠地工作运转,特别是对于航空和地面用燃气轮机,需要具有优异的综合性能,包括在高温条件下的组织稳定性、抗氧化、抗腐蚀、拉伸强度、蠕变和疲劳等服役性能。仅就含有 8 个合金元素的镍基高温合金成分并且只针对一个服役性能进行优化设计,假设每种合金元素成分最优含量的质量分数介于 0~10%,采用传统的试错法,以每个合金元素的 1% 为增量水平设计试验,要完成合金成分的全面优化,实验需制备大约 10^8 个合金用作检测、分析和优化^[9]。这显然超出了任何实验以及研究项目的能力和时间范畴。

先进高温合金的不断进步得益于制造工艺的创新以及成分、组织和性能匹配关系的新发现。例如,燃气轮机涡轮叶片用铸造镍基高温合金的制造工艺发展经历了等轴晶、定向柱晶、单晶铸造等阶段。再者,自 20 世纪 80 年代开始,单晶镍基高温合金从第 1 代单晶高温合金如 René N4 与 PWA 1480 出现以来,发展了以 René N5 与 PWA 1484 为代表的广泛应用的第 2 代单晶高温合金,第 3 代单晶高温合金如 René N6 与 CMSX-10 也开始得到了应用,和当前在研的以添加铂族金属 Ru、Pt 与 Ir 等合金化元素为特征的第 4 代和第 5 代。每一代单晶高温合金都比上一代的耐高温性能提高了 20~30℃,其研制到应用的时间周期约 8~10 年。高温合金材料成分—组织—性能的精确调控是其研制的技术难点,其研制的时间和投入大带来的高风险是其研究和发展的瓶颈。

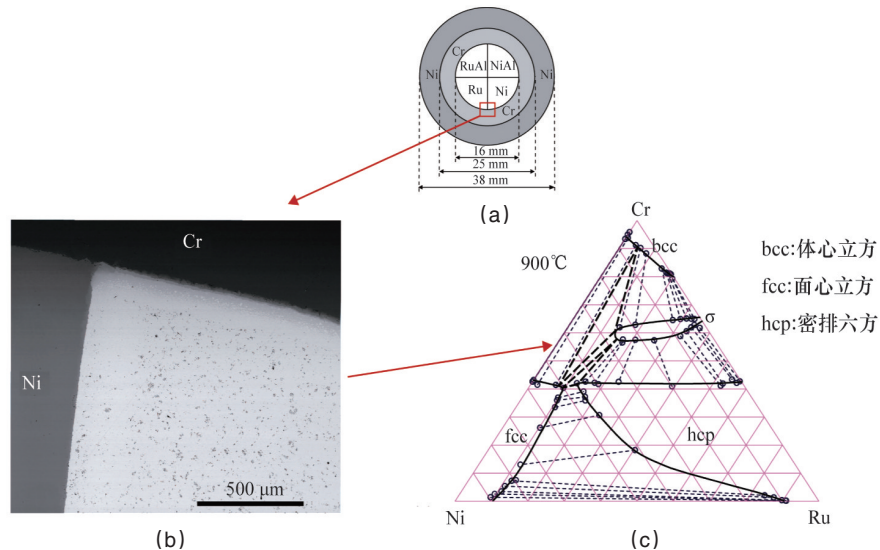
当前,镍基高温合金材料在其相应产品和部件的设计实践中,材料工程师通常需要保障提供强度设计和寿命分析过程中至关重要的性能数据库。为了获得可靠的性能数据库,需要确定材料标准和工艺标准、制备足够批次的材料、加工宏观试样以及表征检测设计所需的性能数据。如图 1^[10] 所示,单晶镍基高温合金需要采用定向凝固专用设备,加工代表材料成均匀性能的宏观试样,在部件的代表性工况条件下表征测试各种性能,并且将叶片部件的服役结果再反馈用于调整并完善性能数据库。

因为新材料从研发到应用周期长、费用高并且风险大,同时为了缩短产品的设计周期,一般在新产品设计开发阶段不会采用没有完整性能数据库的新材料。这使得新材料进入新产品的时间延长,也使得材料工程师更多地成为了材料应用服务工程师而不是材料研发工程师。

定量预测和描述材料成分、组织和性能关系的集成计算技术是镍基高温合金未来研究发展的趋势,需要集成基于 MGE 的可靠的材料计算工具、准确的材料数据库和高通量的

元素在扩散层中的含量与扩散距离的对应关系。Zhao等^[23]建立的从元素扩散成分分布与时间和温度的关系,可快速提取出Cr元素在各相中的扩散系数和成分的关系数据,如图3(d)

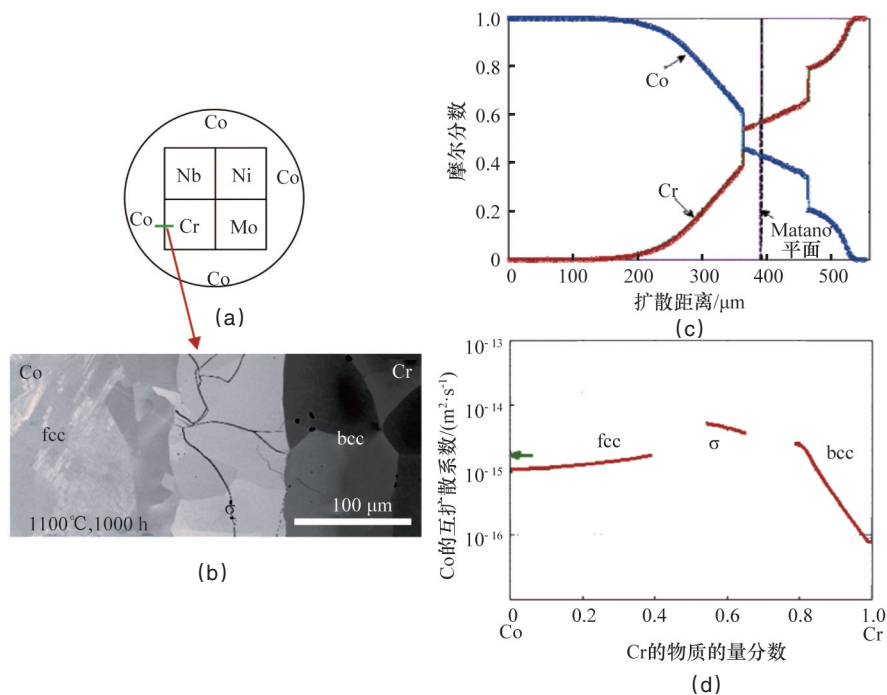
所示。此外,相应的Co-Cr扩散系数数据可以用于基于CALPHAD原子迁移率数据库的建立,从而模拟和计算诸如相关合金材料中相的析出与长大过程及界面反应等问题。



(a) Al-Cr-Ni-Ru 扩散多元节的横截面示意; (b) Cr-Ni-Ru 三元扩散的横截面电子显微镜照片; (c) 结合 EBSD、EPMA 等检测表征工具测定的 Cr-Ni-Ru 三元系在 900°C 的等温截面相图

图2 采用扩散多元节方法高通量测定 Cr-Ni-Ru 三元系相图等温截面

Fig. 2 Determination of the isothermal section of Cr-Ni-Ru ternary phase diagram via high-throughput diffusion-multiple approach



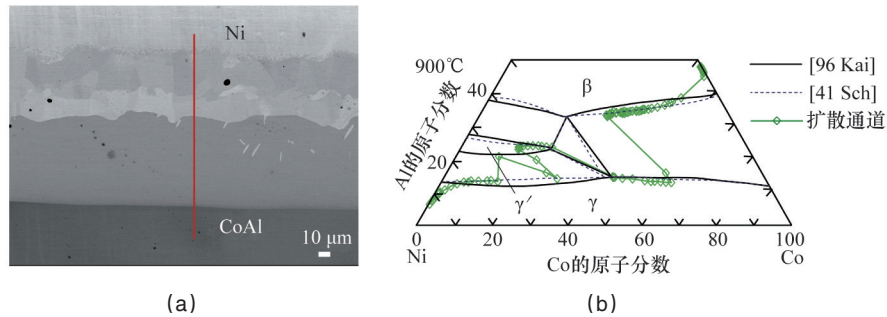
(a) Co-Cr-Mo-Nb-Ni 扩散多元节的横截面示意; (b) Co-Cr 扩散反应区域的 SEM 背散射电子图像; (c) EPMA 测定的各相层中 Co 与 Cr 的含量随扩散距离变化的关系; (d) 从 EPMA 的测定结果分析求解得到的互扩散系数

图3 Co-Cr 二元体系在 1100°C 下扩散系数的测定

Fig. 3 Determination of diffusion parameters of Co-Cr binary system at 1100°C

通过扩散多元节的方法,还可发现新现象并促进材料设计和计算能力的发展。本研究小组获得了CoAl-Ni扩散偶在900℃扩散退火1000 h后所形成的扩散通道(diffusion path),如图4^[24,25]所示,产生了复杂多层的扩散反应。其扩散反应后的微观组织,图4(a)所示,包括以CoAl为主的β相层,高Co的

γ相层,以NiAl为主的γ'相层,和高Ni的γ相层。如图4(b)所示,CoAl-Ni的扩散通道穿过γ/γ'/γ/β相层,Al、Co和Ni 3个元素相互扩散行为及其复杂,亟待发展相应的热力学与动力学数据和计算能力,才能准确预测CoAl-Ni或扩散行为,为材料的科学研究和应用设计提供指导。



(a) 扩散层的背散射电子像,图中直线为EPMA数据采集点,线扫描步长为2 μm;

(b) Al-Co-Ni三元系在900℃的等温截面相图,图中数据点的连线为CoAl-Ni在900℃退火1000 h后的扩散通道

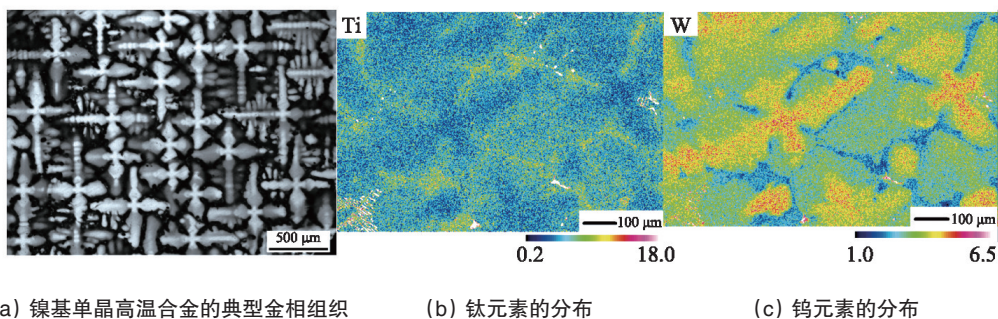
图4 CoAl-Ni扩散通道的测定

Fig. 4 Characterization of CoAl-Ni diffusion path

3 显微组织的多尺度和多维度表征

通过传统实验方法,例如金相显微镜、扫描电子显微镜及透射电子显微镜等,所获得的显微组织数据是二维的,且因为实验方法的限制,通常所得到的显微组织数据也是局部的。以镍基单晶高温合金为例,其中元素的分布会在不同区域有所变化,如图5所示,这是由于铸造过程中的非平衡凝固所造成的偏析。单晶铸造高温合金中元素的偏析趋势,一般是W、Re、Co和Mo会偏析在枝晶干中,而Ti、Ta和Al等γ相

组成元素会偏析在枝晶间中。不仅元素的分布会在不同区域有所变化,而且晶体取向在各个区域也有差异。单晶高温合金的力学性能具有强烈的非各向异性,<001>晶体方向具有优异的综合力学性能。它虽名为单晶体,但严格意义上是以树枝晶结构为主体的多晶体结构,其组织中含有小角度晶界,以及除了γ相和与之共格的γ'相之外的其他相组织。标准的劳埃背散射衍射法所测定的晶体取向是一个平均的结果,并不能表征整个区域的信息。



(a) 镍基单晶高温合金的典型金相组织

(b) 钛元素的分布

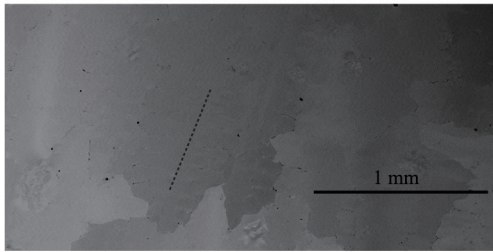
(c) 钨元素的分布

图5 一个镍基单晶高温合金的元素面分布(颜色差异表示含量的不同)

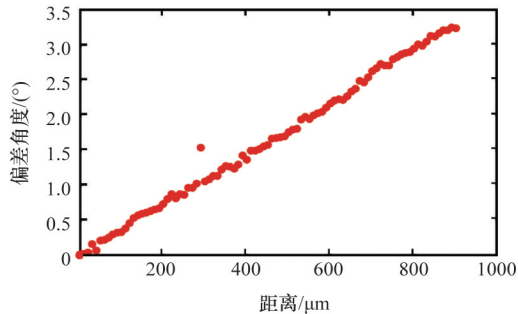
Fig. 5 Elemental mapping of one nickel-based single crystal superalloy (different colours represent concentration distribution)

通过EBSD和同步辐射的研究,结果表明在单个枝晶间存在取向差异^[26,27](图6),此外各个树枝晶之间的取向也存在差异(图7)。正是由于镍基高温合金在显微组织上的非均匀性,传统的连续体有限元模型已经不能够准确地预测其性能。耦合多尺度(multi-scale)的模拟方法和基于材料显微组织(microstructure-based)的性能计算方法有了很大发展。同时,显微组织的多尺度多维度组织结构检测表征工具和方法也有了长足的进步,可以表征材料各向异性和组织不均匀性

等信息,为进一步发展显微组织与性能的相互关系奠定了基础^[28]。美国空军研究实验室在镍基单晶高温合金多尺度显微组织的表征上做了许多工作^[29-38]。他们利用机械切割或者FIB(focused ion beam, 聚焦离子束)得到一层一层的切片,分析后得到每个切片的显微组织,通过算法自动识别出枝晶干与共晶组织区域,然后再使用数字化处理得到三维组织。如图8所示,一个从微观结构尺度上重建的空心叶片结构,由此可以看出,在部件不同部位,材料存在着不均匀性。



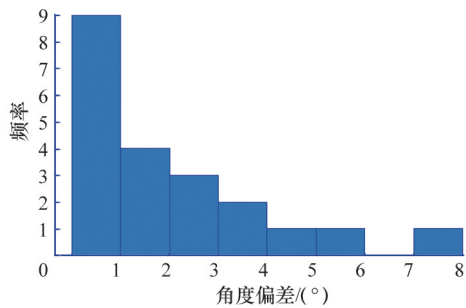
(a) 一个镍基单晶高温合金的FSD(forward scatter detector)图像, 虚线为EBSD线扫描数据采集点



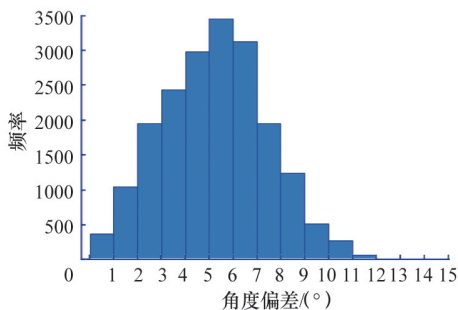
(b) EBSD各个数据采集点离第一个数据点取向的差异分布, 线扫描步长为10 μm

图6 通过EBSD测定单个树枝晶间的取向差异

Fig. 6 Misorientation inside one dendrite characterized by EBSD



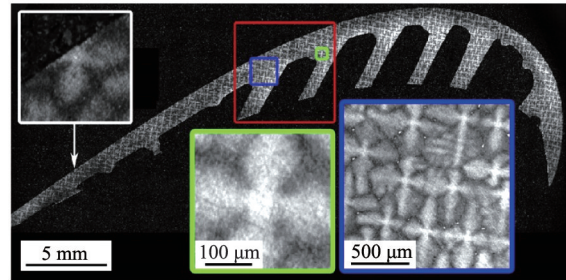
(a) 通过同步辐射测定21个树枝晶之间的取向差异^[28]



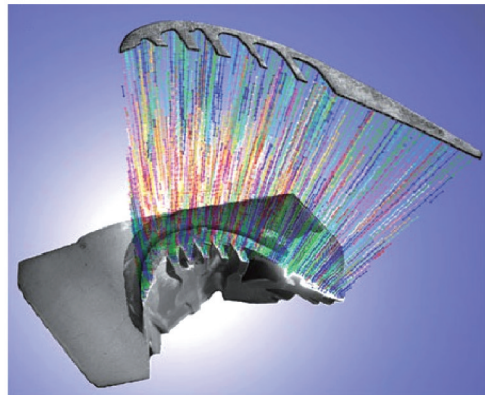
(b) 通过EBSD大面积扫描得到19259个数据点的取向差异分布

图7 镍基单晶高温合金各个树枝晶的取向偏离<0 0 1>方向的角度差分布

Fig. 7 Misorientation distribution of dendrites with respect to <0 0 1> orientation of nickel-based single crystal superalloy



(a) 一个切片中的显微组织,利用数字化处理可以自动识别枝晶干和枝晶间的位置^[37]



(b) 通过连续切片重构以显微组织表示的涡轮叶片示意^[29]

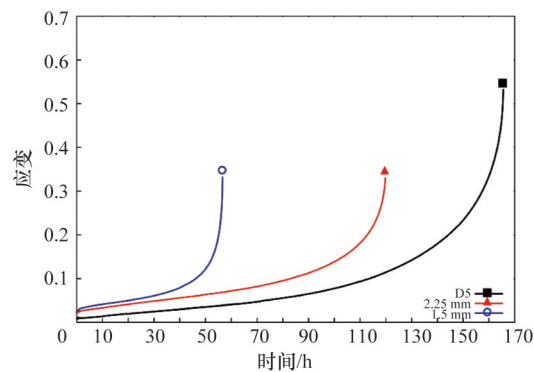
图8 通过连续切片法重构空心叶片的三维组织

Fig. 8 Reconstructed three-dimensional microstructure by serial sectioning

如果在进行连续切片的同时使用EBSD对切片进行取向或者晶粒尺寸分析,图像重构之后便可得到三维的晶体取向分布信息。

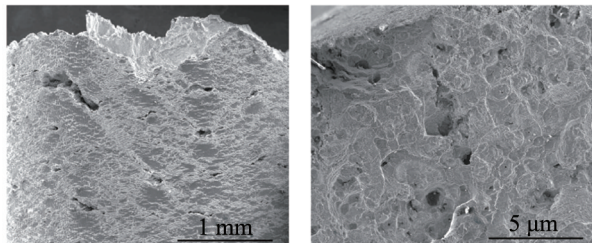
4 微型试样的力学性能检测

叶片部件在显微组织上存在不均匀性,其不同部位的力学性能也各不相同。单晶叶片部件由于其形状复杂,不同部位厚度不一,在通过定向凝固法制备的时候,就会产生温度梯度的改变,从而其成分有偏析并且组织也有不同。叶片在服役过程中,就会产生力学性能的不一致,对结构和强度设计是一个挑战。从图9可以看出,不同试样尺寸的蠕变寿命与蠕变速率各不相同。蠕变断裂的过程是一个裂纹萌生、延展和结合的过程,如图10所示,在蠕变后断面周围会有无数细小裂纹,由于材料形状不同,这些裂纹所产生的应力集中状态也不相同,必定会导致各个部位蠕变寿命不同。Uchic等^[39,40]对镍基单晶高温合金进行了微小样品的单轴压缩实验,通过FIB对大块试样进行切取,发现在样品直径为10 μm时其压缩力学行为与大块样品无明显区别,但当样品直径为5 μm甚至更小的2 μm时,压缩力学性能会明显降低。通过确定样品尺寸对材料性能影响的内在机理,从而量化其影响程度,将对材料部件性能的预测和验证至关重要。



D5为标距段直径为5 mm的棒材试样,2.25和1.5 mm分别为不同板材试样的厚度

图9 在982°C/248 MPa条件下某种高温合金的蠕变曲线
Fig. 9 Creep curve of a nickel-based superalloy at the testing condition of 982°C/248 MPa



(a) 断面周围有许多微小裂纹 (b) 组织内部有许多孔洞以及高温产生的氧化物

图10 蠕变后断面电子显微镜像

Fig. 10 Fractograph of creep ruptured samples

5 展望

“材料基因组工程”即MGE应以产业应用为导向,需集成和发展材料计算工具、实验工具和信息化数据库平台的能力,可以聚焦解决对国家安全和国民经济发展具有重要作用的镍基高温合金自主研制和应用的难题。定量预测和描述材料成分、组织和性能关系的集成计算技术是镍基高温合金未来研究发展的趋势,需要集成基于“材料基因组工程”的可靠的材料计算工具、准确的材料数据库和高通量的材料表征检测工具。在今后5~10年,可以预期有更多的高通量计算和表征检测方法,更完善并多样的材料数据库,日趋成熟的热力学、动力学和微观组织仿真模拟,更多的材料设计—计算—表征一体化的成功实例。同时,将看到基于材料成分和微观组织的力学性能预测将持续面临可靠性、准确性和普适性等的挑战,缺陷(包括位错、层错、夹杂物等)的定量表征和计算模拟仍然是难题。如Schafrik所言:“材料科学家仍然相信显微组织控制材料性能,但是材料工程师明白是缺陷决定了有用的性能。”^[41]这是面向应用的MGE方法需要跨越的另一个挑战。总而言之,基于“材料基因组工程”的方法可以极大

地促进镍基高温合金的研发,加快从实验室的研究到市场应用的转化。

参考文献(References)

- [1] National Science and Technology. Materials genome initiative for global competitiveness[R]. Washington DC: Office of Science and Technology Policy, 2011.
- [2] Office of Science and Technology. Fact Sheet: The materials genome initiative—Three years of progress[R]. Washington DC: Office of Science and Technology Policy, 2014.
- [3] Gibbs J W. A method of geometrical representation of the thermodynamic properties of substances by means of surfaces[J]. Transactions of the Connecticut Academy, 1873, 2: 382–404.
- [4] Service R F. Materials scientists look to a data-intensive future[J]. Science, 2012, 335(6075): 1434–1435.
- [5] Zewail A H. Four-dimensional electron microscopy[J]. Science, 2010, 328(5975): 187–193.
- [6] Committee on Integrated Computational Materials Engineering NRC. Integrated computational materials engineering[M]. National Academies Press, 2008.
- [7] Reed R C. The superalloys: Fundamentals and applications[M]. Cambridge University Press, 2006.
- [8] Sims C T, Stoloff N S, Hagel W C. Superalloys II[M]. Wiley-Interscience, 1987.
- [9] Reed R C, Tao T, Warnken N. Alloys-by-design: Application to Nickel-based single crystal superalloys[J]. Acta Materialia, 2009, 57(19): 5898–5913.
- [10] Cowles B, Backman D, Dutton R. Verification and validation of ICME methods and models for aerospace applications[J]. Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 2012, 1(1): 2.
- [11] American Society of Mechanical Engineers. V V 10. Guide for verification and validation in computational solid mechanics[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [12] Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting NRC. Application of lightweighting technology to military vehicles, vessels, and aircraft[M]. Washington DC: National Academies Press, 2012.
- [13] Zhao J C. Combinatorial approaches as effective tools in the study of phase diagrams and composition-structure-property relationships[J]. Progress in Materials Science, 2006, 51(5): 557–631.
- [14] Zhao J C, Zheng X, Cahill D G. High-throughput diffusion multiples[J]. Materials Today, 2005, 8(10): 28–37.
- [15] Zhao J C. The Diffusion-multiple approach to design alloys[J]. Annual Review of Materials Research, 2005, 35(1): 51–73.
- [16] Zhao J C. Reliability of the diffusion-multiple approach for phase diagram mapping[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(12): 3913–3925.
- [17] Zhao J C, Jackson M R, Peluso L A, et al. A diffusion multiple approach for the accelerated design of structural materials[J]. Materials Research Society Bulletin, 2002, 27(4): 324–329.
- [18] Zhao J C, Jackson M R, Peluso L A, et al. A diffusion-multiple approach for mapping phase diagrams, hardness, and elastic modulus[J]. Journal of the Minerals Metals and Materials Society, 2002, 54(7): 42–45.
- [19] Zhao J C. A combinatorial approach for structural materials[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(3): 143–147.

- [20] Zhu L L, Jiang L, Zhao J C, et al. Experimental determination of the Ni-Cr-Ru phase diagram and thermodynamic reassessments of the Cr-Ru and Ni-Cr-Ru systems[J]. Intermetallics, in Press.
- [21] Zhang Q, Zhao J C. Impurity and interdiffusion coefficients of the Cr-X (X=Co, Fe, Mo, Nb, Ni, Pd, Pt, Ta) binary systems[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 604: 142-150.
- [22] Zhao J C, Zheng X, Cahill D. High-throughput measurements of materials properties[J]. Journal of the Minerals Metals and Materials Society, 2011, 63(3): 40-44.
- [23] Zhang Q, Zhao J C. Extracting interdiffusion coefficients from binary diffusion couples using traditional methods and a forward-simulation method[J]. Intermetallics, 2013, 34: 132-141.
- [24] Kainuma R, Ise M, Jia C C, et al. Phase equilibria and microstructural control in the Ni-Co-Al system[J]. Intermetallics, 1996, 4(Suppl 1): 151-158.
- [25] Schramm J. Nickel-Cobalt-Aluminium ternary system[J]. Z Metallkd, 1941, 33: 403-412.
- [26] Wu E, Sun G, Chen B, et al. A neutron diffraction study of lattice distortion, mismatch and misorientation in a single-crystal superalloy after different heat treatments[J]. Acta Materialia, 2013, 61(7): 2308-2319.
- [27] Hussein N S, Kumah D P, Yi J Z, et al. Mapping single crystal dendritic microstructure and defects in Nickel-base superalloys with synchrotron radiation[J]. Acta Materialia, 2008, 56(17): 4715-4723.
- [28] Ghosh S, Dimiduk D. Computational methods for microstructure-property relationships[M]. Springer, 2010.
- [29] Groeber M A, Haley B K, Uchic M D, et al. 3D reconstruction and characterization of polycrystalline microstructures using a FIB-SEM system[J]. Materials Characterization, 2006, 57(4-5): 259-273.
- [30] Uchic M D, Groeber M A, Dimiduk D M, et al. 3D microstructural characterization of Nickel superalloys via serial-sectioning using a dual beam FIB-SEM[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(1): 23-28.
- [31] Bhandari Y, Sarkar S, Groeber M, et al. 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis[J]. Computational Materials Science, 2007, 41(2): 222-235.
- [32] Ghosh S, Bhandari Y, Groeber M. CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(3): 293-310.
- [33] Groeber M, Ghosh S, Uchic M D, et al. A framework for automated analysis and simulation of 3D polycrystalline microstructures: Part 1: Statistical characterization[J]. Acta Materialia, 2008, 56(6): 1257-1273.
- [34] Tschopp M A, Groeber M A, Fahringer R, et al. Automated detection and characterization of microstructural features: Application to eutectic particles in single crystal Ni-based superalloys[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2010, 18(2): 025014.
- [35] Tschopp M A, Groeber M A, Fahringer R, et al. Symmetry-based automated extraction of microstructural features: Application to dendritic cores in single-crystal Ni-based superalloys [J]. Scripta Materialia, 2010, 62(6): 357-360.
- [36] Tschopp M A, Groeber M A, Simmons J P, et al. Automated extraction of symmetric microstructure features in serial sectioning images[J]. Materials Characterization, 2010, 61(12): 1406-1417.
- [37] Uchic M, Groeber M, Shah M, et al. A Novel multi-modal 3D characterization system to quantify grain-level microstructural features in macro-scale volumes[J]. Microscopy and Microanalysis, 2011, 17(Suppl2): 988-989.
- [38] Groeber M, Jackson M. DREAM.3D: A digital representation environment for the analysis of microstructure in 3D[J]. Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 2014, 3(1): 5-21.
- [39] Uchic M D, Dimiduk D M, Florando J N, et al. Sample dimensions influence strength and crystal plasticity[J]. Science, 2004, 305(5686): 986-989.
- [40] Uchic M D, Dimiduk D M. A methodology to investigate size scale effects in crystalline plasticity using uniaxial compression testing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 400-401: 268-278.
- [41] Schafrik R. Materials in jet engines: Past, present, and future[EB/OL]. [2015-04-02]. <http://materialeducation.org/educators/mstem/2006/docs/Schafrik%20History%20of%20Mtls%20in%20Jet%20Engines%201%20%20.pdf>.

(编辑 陈华姣)

·学术动态·



中国科学技术协会

2015 国际食品安全大会在北京召开

2015年4月20—23日,由国际食品科技联盟、中国食品科学技术学会、国家食品安全风险评估中心共同主办的“2015国际食品安全大会”在北京举办。中国科协副主席、书记陈章良出席并致辞。

在新修订的《食品安全法》即将发布之际,本次大会邀请国际食品安全联盟、全球食品可追溯中心、欧洲可追溯研究中心及国内相关领域的专家,围绕“构建安全与健康食品产业链”主题进行交流和研讨。

国际食品安全大会2010年首次举办,至今已召开5届,均由中国国际科技会议中心承办。本届大会会有400余名代表参会,其中外宾代表20人。