

# 数值模拟技术在航空发动机高温合金单晶叶片制造中的应用\*

## Application of Numerical Simulation Technology in Superalloy Single Crystal Blade of Aeroengine

清华大学机械工程系 许庆彦 潘冬 于靖 柳百成



许庆彦

清华大学机械工程系副教授、博导、系教学业务办主任,主要研究方向为航空发动机高温合金涡轮叶片定向凝固过程的数值模拟。主持和参与国家科技重大专项、863计划、国家973计划、国防973计划、国家自然科学基金等科研项目30多个,发表论文100多篇,合著学术著作4本。

定向凝固单晶叶片铸件生产工艺复杂、控制要求高,因而通过试验研究高温合金单晶叶片的成本较高,且研发周期长。随着现代计算机软硬件技术的发展,数值模拟技术发展迅速,在工业领域得到了广泛的应用。通过数值方法可模拟航空发动机涡轮叶片的定向凝固过程、预测最终的微观组织和缺陷情况,能够优化定向凝固生产工艺,提高叶片质量,降低研发成本,缩短研发时间。

航空发动机是飞机的核心,决定着飞机的性能。而涡轮叶片则是航空发动机中的关键零部件之一。随着人们对发动机推重比等性能要求的不断提高,对涡轮叶片也提出了越来越苛刻的要求<sup>[1-3]</sup>。目前,先进镍基高温合金单晶叶片工作温度已经达到1100℃,发动机燃烧室涡轮前燃气温度已经达到1800℃。

早期的涡轮叶片使用的都是变形高温合金,通过挤压、锻造的手段制造成形。20世纪60年代以后,随着熔模精密铸造技术的发展和合金

成分的改变,铸造高温合金得到了广泛使用,并经历了等轴晶、定向凝固柱状晶和单晶叶片三个发展阶段。

航空发动机涡轮叶片的运行经验表明,涡轮叶片的大多数裂纹都是沿着垂直于叶片主应力方向的晶粒间界即横向晶界上产生和发展的;消除这种横向晶界可大大提高叶片的抗裂纹生长能力<sup>[4]</sup>。1964年,定向凝固叶片最早在美国JT8D发动机上试验成功,1969年正式使用,1970年以后广泛用于军民飞机的发动机,包括F-15、F-16、波音747等。

\* 国家973重点基础研究发展计划(2011CB706801)、863国家高技术研究发展计划(2007AA04Z141)、国家科技重大专项(2009ZX04006-041-04)等资助。

与等轴晶叶片相比,定向凝固柱状晶叶片工作温度提高约 50℃,疲劳寿命提高 10 倍以上。后来美国和前苏联都研发了定向凝固空心涡轮叶片,使得叶片工作温度再提高 50℃,疲劳寿命延长 2 倍。20 世纪 70 年代,单晶叶片正式投入使用后,各国都开发了相应单晶叶片专用高温材料。单晶叶片完全消除了晶界的有害作用,叶片工作温度达到了熔点的 90%,大大提高了叶片性能和寿命。美国和前苏联的第二代和第三代单晶合金都发展成为低铬、高铌、低碳或者无碳的专用合金,如美国的 PWA1480、俄罗斯的 ЖС-36。目前使用单晶叶片的飞机包括 F-16、波音 767、A310、Su-27 等。

但是,单晶高温合金叶片对于制造工艺有很高的要求。在定向凝固单晶叶片铸件中,经常会存在各种各样的缺陷,如双晶和多晶(Bigrains and Multigrains)、杂晶(Misoriented Grains)、雀斑(Freckles)、伪晶(Spurious Grains)等<sup>[5-6]</sup>。缺陷的存在对于高温合金叶片的性能产生了极为不利的影响,需要严格控制缺陷的产生。定向凝固单晶叶片铸件生产工艺复杂、控制要求高<sup>[7]</sup>,因而通过试验研究高温合金单晶叶片的成本较高,且研发周期长。随着现代计算机软硬件技术的发展,数值模拟技术发展迅速,在工业领域得到了广泛的应用<sup>[8-10]</sup>。通过数值方法可模拟航空发动机涡轮叶片的定向凝固过程、预测最终的微观组织和缺陷情况,能够优化定向凝固生产工艺,提高叶片质量,降低研发成本,缩短研发时间。

## 高温合金定向凝固过程数值模拟研究现状

### 1 国外定向凝固及单晶叶片微观组织模拟研究现状

国外针对定向凝固过程的数值模拟始于 20 世纪 80 年代,主要针对宏观温度场的模拟计算。Fu 和

Wilcox 等人<sup>[11]</sup>计算了 Bridgman 定向凝固装置内铸件的温度场,并分析了挡板厚度对界面扰动的敏感性和固液界面前沿温度的梯度的影响。Jasinski 等人<sup>[12-13]</sup>计算了一维情况下 Bridgman 定向凝固过程热量传输过程。Naumann<sup>[14-16]</sup>计算了一维情况下水平 Bridgman 定向凝固过程的横向加速度引起的轴向加速度的稳定性,并在此基础上模拟了二维温度和溶质的分布情况。Bussac 和 Gandin<sup>[17]</sup>分析了 Bridgman 定向凝固生产单晶叶片过程中温度梯度和拉速对斑点缺陷形成的影响。Ouyang 等人<sup>[18]</sup>模拟了 Bridgman 定向凝固  $\beta$ -NiAl 合金的温度场分布,模型考虑了相变动力学、导热、对流、辐射、物性参数以及系统复杂几何形状的影响,并分析了重要工艺参数对固液界面前沿温度梯度的影响。Schneider 等人<sup>[19]</sup>基于多相流模型模拟了镍基高温合金单晶叶片的偏析和斑点缺陷的形成。Wang 和 Overfelt 等人<sup>[20]</sup>考虑辐射因素模拟了二维条件下的定向凝固过程。

20 世纪 90 年代以来,对定向凝固过程中微观组织演变的数值模拟成为研究热点。Gandin 和 Rappaz<sup>[21]</sup>基于 CA-FE 方法模拟了二维条件下 Al-Si 合金 Bridgman 定向凝固的晶粒生长过程。Kermanpur 和 Varahram 等人<sup>[22]</sup>基于 CA-FE 方法模拟了液态金属冷却(LMC)定向凝固工艺条件下单晶涡轮叶片的晶粒长大,研究了工艺参数对单晶组织生长和缺陷的影响。Lee 等人<sup>[23]</sup>基于 CA-FD 方法,模拟了不同工艺参数条件下的枝晶生长过程,并研究了叶片截面形状突变对单晶生长造成的不利影响。Zhu 等人<sup>[24]</sup>采用规则/非规则混合格网的方法模拟了单晶叶片的定向凝固过程。

### 2 国内定向凝固及单晶叶片微观组织模拟研究现状

刘世忠、李嘉荣等人<sup>[25-26]</sup>采用

ProCAST 有限元模拟软件计算了单晶合金试板的定向凝固过程温度场。薛明等人<sup>[27]</sup>采用 ProCAST 软件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,研究了陶瓷芯定位以及与型壳热物性参数匹配的影响。本文作者等人<sup>[28-32]</sup>基于 CA 模型、枝晶生长机理和基本的热量、溶质传输方程,提出了定向凝固单晶叶片三维数值模拟模型;考虑了多叶片之间以及与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及单晶叶片的微观组织演变。

## 镍基高温合金定向凝固涡轮叶片的数值模拟研究

### 1 涡轮叶片定向凝固过程的温度场数值模拟

高温合金叶片的定向凝固生产过程在真空环境中进行(如图 1 所示),凝固过程中型壳表面与定向凝固炉炉壁之间以及型壳表面彼此之间的辐射换热对叶片内部的等温面分布有着重要影响。定向凝固过程中叶片和型壳一直随着结晶器向下抽拉,型壳与炉壁之间的相对位置关系和辐射情况也一直处于动态变化过程,因而在实际生产中如何控制型

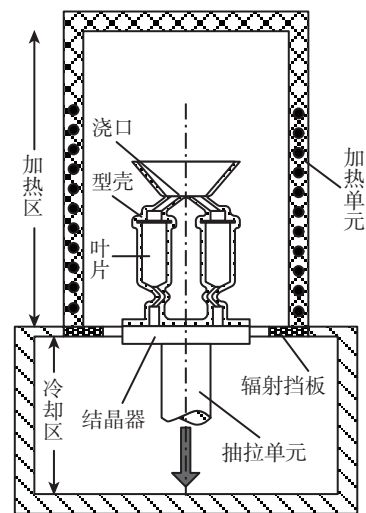


图1 Bridgman定向凝固过程示意图

壳与炉壁间的辐射以获得叶片内部的理想等温面分布是一个极富挑战性的难题。

通过对涡轮叶片定向凝固过程的分析,我们建立了叶片的定向凝固过程简化的物理模型。考虑到定向凝固过程中炉壁温度的不均匀分布,因此建立了高温合金叶片定向凝固过程温度场模拟的数学模型,提出了基于 Monte Carlo 射线追踪法处理热辐射<sup>[30-31]</sup>。通过法向射线加密提高了炉壁辐射的计算精度,并采用叶片三维有限差分网格和炉壁二维网格混合使用的方法减小计算规模、提高计算效率。

图2所示为模拟得到的定向凝固过程中型壳表面及定向凝固炉炉壁纵截面的温度分布,其中Z轴方向为定向凝固炉的轴向(抽拉方向的反向)。抽拉过程中,定向凝固炉炉壁的挡板区域中温度变化最为显著,挡板上表面由于受到加热区高温炉壁的辐射保持在很高的初始温度,挡板下表面由于受到下方冷却区的辐射散热作用温度较低。

图3为抽拉过程中叶片沿Z向的温度梯度的分布和变化情况。抽拉过程中叶片内部Z向温度梯度分布整体比较均匀。

## 2 单晶高温合金叶片选晶过程的数值模拟研究<sup>[32]</sup>

目前国内外广泛使用的单晶叶片生产是螺旋选晶法,因此,选晶器在单晶叶片的生产中具有举足轻重的地位。整个选晶器由位于下部的引晶段、中部的螺旋段和上部的过渡段组成。选晶器的选晶作用主要依靠其自身的几何形状和结构实现。从形状上分,选晶器可以分为单螺旋、双螺旋等。螺旋的螺距、直径等都对选晶作用有直接的影响。

图4为选晶器内的温度场分布模拟结果。图中所示坐标系的X轴方向为结晶器半径方向,X坐标值越大表明该点位置越靠近定向凝固炉

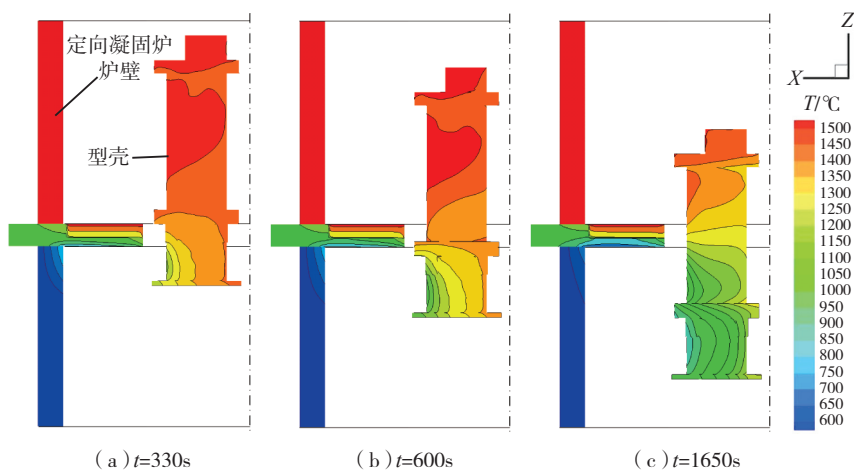


图2 不同时刻型壳及定向凝固炉炉壁温度场分布

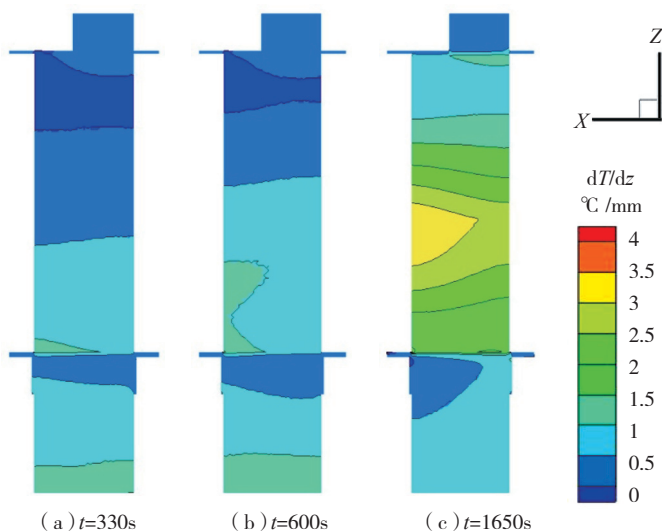


图3 叶片Z向温度梯度分布

炉壁;Z轴方向为抽拉的相反方向。可以看出随着抽拉的进行,选晶器内温度从下至上逐渐降低。不同抽拉时刻引晶段内等温面的分布接近水平,螺旋段内的温度分布较均匀,有利于晶粒在选晶器内的平稳生长。

图5为选晶器内的Z轴方向温度场梯度分布的模拟结果。引晶段内温度梯度等值面分布接近水平且彼此间隔均匀,温度梯度的分布和变化比较均匀;抽拉后期阶段,引晶段内温度梯度等值面与水平面间的倾斜角增大,且彼此间的间隔变化较大。

图6为选晶器内晶粒竞争生长

过程的模拟结果。图中采用不同的颜色区分不同的晶粒,以显示晶粒的形貌。

图7为引晶段表面微观组织的模拟与实验结果对比。引晶段底面以上一段距离内存在大量细小的晶粒。从底面向上,晶粒数量迅速减少且晶粒宽度逐渐增大,最后出现一定数量的粗大柱状晶一直延伸到引晶器的顶部。模拟获得的引晶器表面微观组织形貌与试验结果非常接近。

## 3 单晶叶片试件定向凝固组织的数值模拟

定向凝固过程中,型壳的抽拉速度对叶片质量有着重要影响。当抽

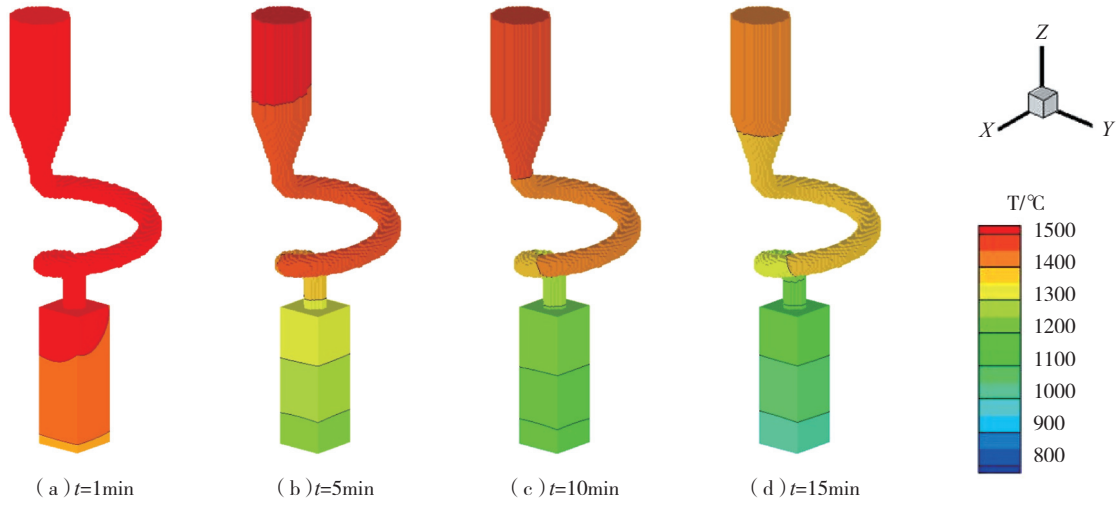


图4 不同时刻选晶器内温度场模拟结果

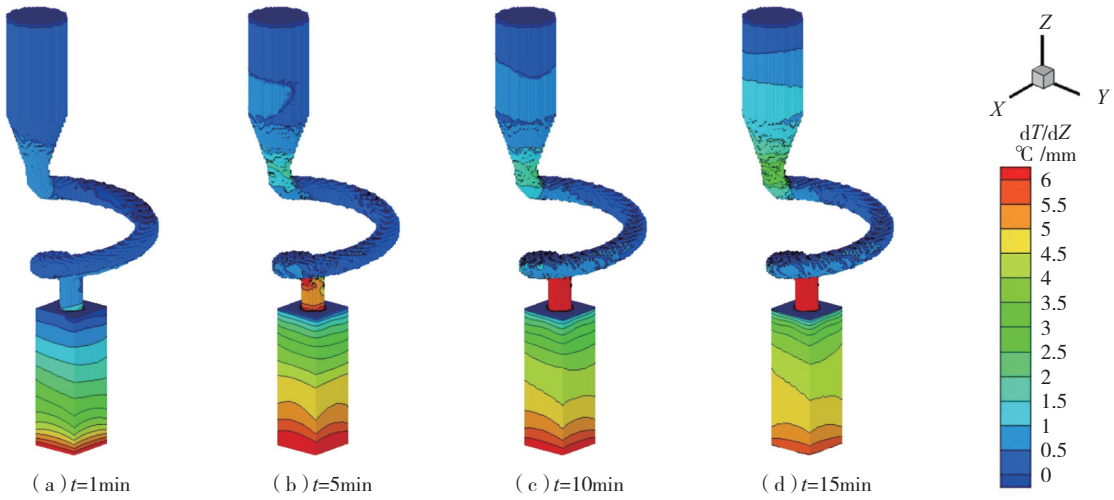


图5 不同时刻选晶器内Z向温度梯度模拟结果

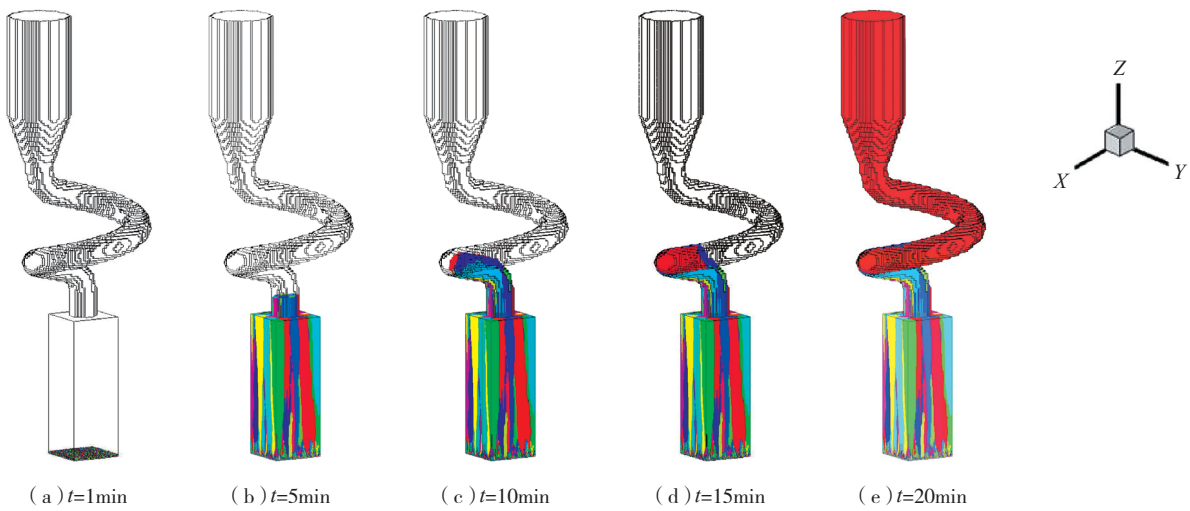


图6 选晶器内晶粒生长过程模拟结果

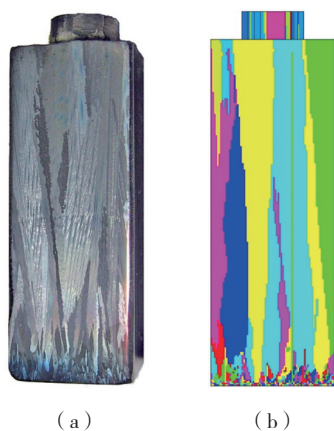


图7 引晶段表面微观组织模拟与试验结果

拉速度过快时,叶片凝固过程释放的热量无法及时地沿抽拉方向导出,会导致固液界面下凹,出现斜晶、横向境界或者等轴晶缺陷。当型壳抽拉速度过慢时,不仅生产效率低,且高温型壳与金属液长时接触,容易造成粘砂等各种缺陷。同时,抽拉速度较低时叶片的凝固速率降低,容易出现粗大晶粒缺陷。采用数值模拟技术,模拟定向凝固过程中叶片内部微观组织的演变过程,预测凝固结束涡轮叶片的柱状晶形貌,分析抽拉速度对叶片微观组织的影响,可为实际工艺优化提供理论参考,节省大量的合金原料和实验费用。

在不同抽拉速度条件下,单晶叶片试件凝固约 20% 时的晶体生长界

面形状特征如图 8 所示。在抽拉速度低时,晶体生长界面形状较为平坦,没有明显的下凹弯曲;随着抽拉速度的不断提高,晶体生长界面开始呈现下凹弯曲,且界面下凹曲率逐渐增大;当抽拉速度提高后,界面呈现出明显的月牙形,叶身水平方向上两侧部位优先于中部生长。在晶体生长界面不断向前推进过程中,界面形状基本保持稳定,界面下凹曲率没有发生明显变化。

图 9 所示为单晶叶片试件凝固约 60% 时晶体生长界面形状,此时晶体生长界面接近缘板位置,对比不同抽拉速度条件下的结果看出,抽拉速度低时,初始晶粒的生长界面较为平坦,缘板边角位置没有新形核晶粒产生;抽拉速度增大时,在初始晶粒向缘板空腔延伸生长之前,在缘板边角部位产生了 3 个新形核晶粒。如果抽拉速度过大,不但缘板边角部位出现新晶粒形核,甚至在叶身与螺旋选晶器的连接段就发生新晶粒形核现象。

图 10 为采用分层计算法得到的某抽拉速度时叶片的微观组织演变。在图中 25min 时,在缘板处形成了杂晶。杂晶的出现意味着固液界面推进的速度低于温度下降的速度,当枝晶未充满缘板时,缘板其中一个角的

温度即达到了形核温度,从而导致新晶粒形核、长大,形成了杂晶。

### 结束语

镍基高温合金单晶叶片是高推重比先进航空发动机的关键部件之一,其优越的高温抗蠕变性能是传统等轴晶叶片和柱状晶叶片所不可比拟的。美国已将镍基合金单晶叶片大量应用在军、民用航空发动机上。但单晶叶片制造过程中容易出现杂晶、多晶等结晶缺陷,严重制约了单晶叶片在航空发动机中的应用,影响了高推重比发动机的研制。

传统的试错法研制单晶叶片成本高、周期长,而且无法确知叶片凝固过程中温度梯度和凝固速度的实际变化。为解决高温合金单晶叶片研制和生产中的缺陷问题,国外(如英、美、德等)早已将实验研究与建模仿真密切结合,进行了大量的基础性研究工作,揭示了工艺参数与温度梯度、凝固速度、微观组织之间的内在关系,并据此指导工艺参数的制订,最终提高了单晶叶片的合格率。近年来发达国家更是加强了这方面的研究工作。

迄今为止,针对高温合金叶片定向凝固过程的数值模拟研究已经取得较大的研究进展,但是很多方面还

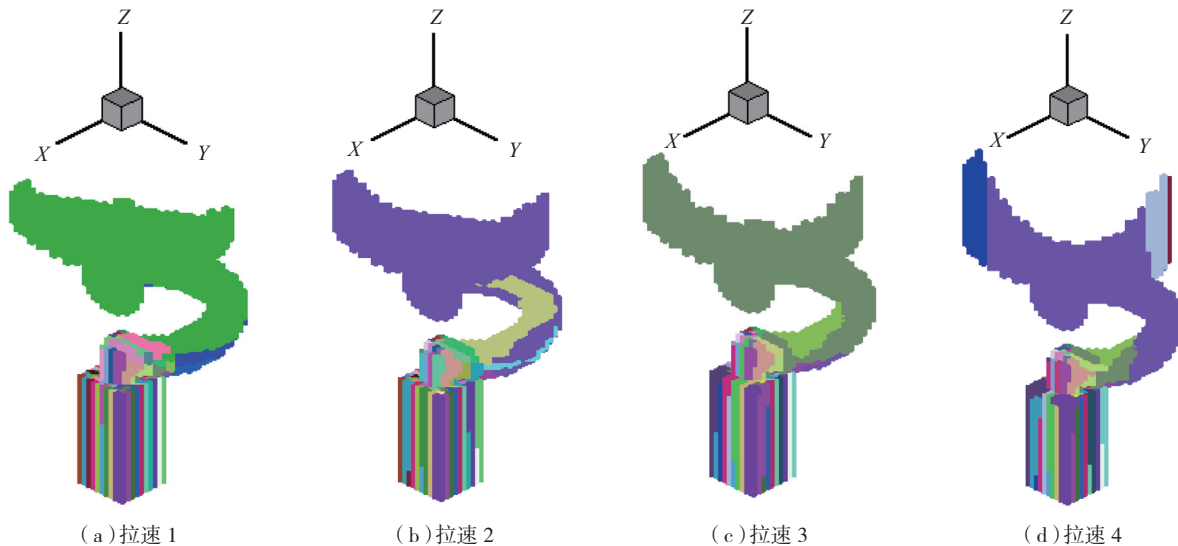


图8 单晶叶片试件凝固约20%时晶体生长界面形状



图9 单晶叶片试件凝固约60%时晶体生长界面形状和晶粒形核

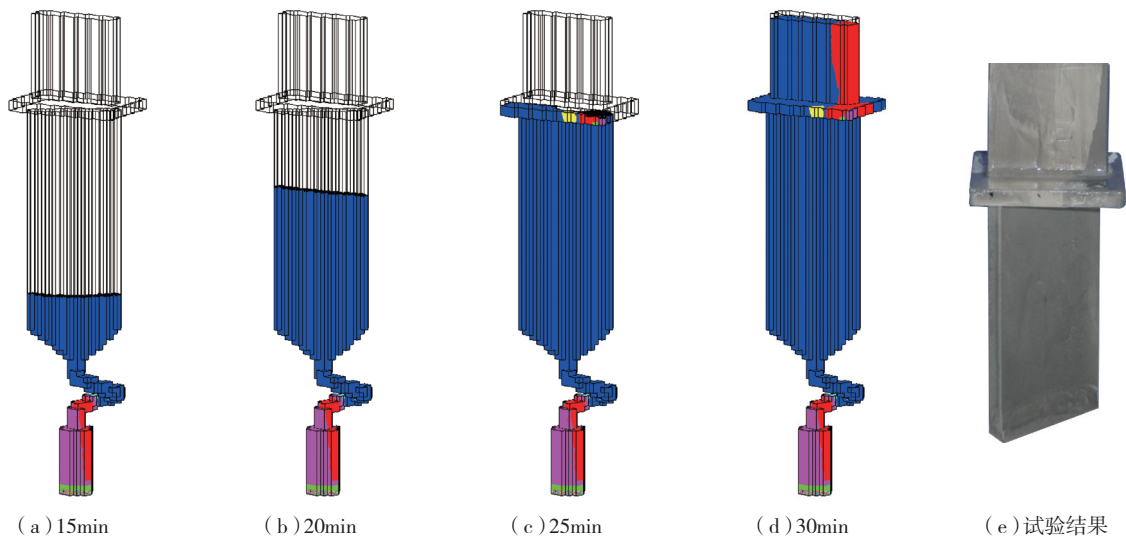


图10 匀速条件下不同抽拉时刻微观组织

有待改进和继续深入研究。例如：

(1) 物理模型比较简单。定向凝固炉的结构非常复杂,但为了简化问题,在模拟仿真过程中做了大量简化,因此对炉内复杂的换热现象的处理有待于进一步提高。

(2) 高温合金组元多达 10 种以上,相互作用复杂。但是目前的研究仍然停留在二元、三元的合金水平,无法真正反映和描述晶体生长中的复杂现象,因此与实际情况尚有较大差距。

(3) 目前的镍基高温合金微观组织模拟大多基于二维模拟,且只考虑单相的生长过程,未考虑低熔点相、二次相的析出等。

应该说,国内外研究者在单晶叶片的定向凝固过程数值模拟方面开展了大量卓有成效的工作,并取得了长足的进步和巨大的成绩。但是,解决上述问题将使人们对单晶叶片的定向凝固过程理解得更深刻,可更好地控制单晶叶片的质量。因此,通过数值模拟和实验研究相结合的方法,

进一步对定向凝固过程中高温合金的热力学与动力学、枝晶的生长、溶质的再分配等现象进行数值模拟,真正实现工艺可控、晶体生长可控,在这方面还有很长的路要走,需要我们在将来的研究工作中付出更大的努力。

本文共有参考文献 32 篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)