

HRS 定向凝固技术中隔热挡板的研究进展

杨振宇¹, 汪 骥¹, 陈 昊², 郑素杰¹, 骆凯伦¹, 骆宇时¹, 戴圣龙¹

(1. 北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095;

2. 空军驻北京地区第六军事代表室, 北京 101300)

摘要: 隔热挡板对高速凝固法定向凝固过程具有重要的影响。本文综述了隔热挡板的类型, 对定向凝固过程中温度梯度和液相线等温面曲率的影响, 概述了对镍基单晶高温合金凝固过程中组织细化、改善晶体取向和抑制凝固缺陷的作用。最后, 对隔热挡板技术的发展进行了总结和展望。

关键词: 高速凝固法; 隔热挡板; 镍基单晶高温合金; 温度场; 凝固过程

中图分类号: TG249; TG132.3² **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0239-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0033

Research Progress of Thermal Baffle in HRS Directional Solidification Technology

YANG Zhen-yu¹, WANG Ji¹, CHEN Hao², ZHENG Su-jie¹, LUO Kai-lun¹, LUO Yu-shi¹, DAI Sheng-long¹

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing 100095, China; 2. The Sixth Military Representative Office of Air Force Armament Department in Beijing, Beijing 101300, China)

Abstract: The thermal baffle has an important influence on the high rate solidification (HRS) directional solidification process. This paper reviews the types of thermal baffles, their influences on temperature gradient and liquidus isothermal curvature, and outlines the effects on the refinement of solidification microstructure, improvement of crystal orientation, and suppression of solidification defects during the solidification process of nickel-based single crystal superalloys. Finally, the development directions of thermal baffle technology are summarized, and its future prospects are outlined.

Key words: high rate solidification; thermal baffle; Ni-based single crystal superalloy; temperature field; solidification process

定向凝固技术在工业和高新技术领域应用广泛, 可用于生产磁性材料、自生复合材料以及各种功能晶体, 最具代表性的应用是航空发动机和地面燃气轮机涡轮叶片的制备^[1-2]。如今, 先进航空发动机的涡轮前进口温度已超2 000 K^[3], 几乎所有先进的商用和军用发动机, 都采用定向凝固技术制备镍基高温合金定向/单晶叶片。为充分发挥合金性能潜力, 在定向凝固过程中, 需使合金的<001>晶向与轴向热流方向一致; 同时获得细化的凝固组织和低的显微偏析, 并尽可能避免出现凝固缺陷^[4-6]。国内外大量研究表明, 提高定向凝固过程中固液界面前沿的温度梯度, 降低液相线等温面曲率, 是实现上述目标的重要途径^[2, 7-8]。目前, 航空发动机涡轮叶片的制备主要采用高速凝固法 (High

Rate Solidification, HRS)^[2]。在该方法中, 隔热挡板对温度梯度和等温面曲率的控制影响显著^[8-9]。因此, 本文对HRS定向凝固技术中隔热挡板的类型及其特点进行了总结, 评述了其定向凝固过程中温度场和凝固过程的影响规律, 并进行总结与展望, 以期望为相关研究和实际应用提供参考。

1 隔热挡板的类型与特点

在HRS法定向凝固过程中, 合金铸锭熔化后浇注到热区中预热的铸型中, 铸型放置在水冷结晶器上, 铸型以一定的速度逐渐拉入通过隔热挡板隔开的冷区, 形成沿铸件轴线的一维温度梯度, 在隔热挡板附近凝固, 形成定向凝固组织。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52301064)。

收稿日期: 2025-11-11 收到初稿, 2025-12-03 收到修订稿。

作者简介: 杨振宇 (1989-), 男, 工程师, 主要从事高温合金材料及工艺研究工作。E-mail: xuanshangyiyi@163.com

引用格式: 杨振宇, 汪骥, 陈昊, 等. HRS 定向凝固技术中隔热挡板的研究进展 [J]. 铸造, 2026, 75 (3): 239-245.

YANG Zhenyu, WANG Ji, CHEN Hao, et al. Research progress of thermal baffle in HRS directional solidification technology [J]. Foundry, 2026, 75 (3): 239-245.

1.1 外隔热挡板

外隔热挡板通常是HRS法定向凝固设备的一部分，一般由环形结构的耐热材料构成，固定安装在热区和冷区之间。型壳会通过隔热挡板中间的开孔在热区和冷区之间移动。

外隔热挡板的形状和尺寸往往是固定的，它与型壳之间的距离较远，而且型壳各表面与隔热挡板内壁的距离并不相同。这就导致型壳各部分受环形隔热挡板阻挡热量散失的程度存在差异，离环形隔热挡板内壁越远的部分，热量散失就越大^[10]。因此，热区中远离隔热挡板内壁的型壳部分，会有大量热量辐射散失到冷区，严重影响了热区和冷区之间的温度梯度。针对这一情况，研究者们从改善隔热挡板的材质^[11-13]、结构^[11, 14-15]和尺寸^[11]等方面研究了如何提高定向凝固过程中的温度梯度。乐献刚^[9]等研究了不同厚度隔热挡板下镍基单晶高温合金DD6的凝固组织，发现增加隔热挡板的厚度，反而会降低凝固界面前沿的温度梯度。Liu^[16]等通过数值模拟研究发现，相比隔热挡板的厚度，其辐射率对温度梯度的影响更为显著。刘维维^[14]等开发出一种内外径具有高度差的复合隔热挡板，这种挡板通过增大辐射面积、增强反射效果，提高了温度梯度。张健^[11]等人提出，将隔热挡板设计为开孔形状及尺寸与型壳相匹配的随形隔热挡板，能够有效减小隔热挡板与型壳之间的缝隙，提升隔热效果，进而获得更理想的定向凝固组织。Szeliga^[17]等对比了随形隔热挡板和标准环形隔热挡板在定向凝固过程中的温度梯度，结果发现，采用随形隔热挡板能够显著提高温度梯度，提升幅度近30%。

1.2 内隔热挡板

HRS法定向凝固炉的结构一般是上部为圆筒形的加热室，下部为冷却室，中间用隔热挡板隔开，如图1所示。圆桶形加热器会向内辐射热量，对型壳及内部的金属液体进行加热。在这种炉体结构下，单晶叶片采用模组法生产时，叶片面向中柱和炉壁的内外两侧受热及冷却条件严重不对称，致使横向温度场不均匀^[10]。越靠近中柱的位置，凝固过程中温度下降越快。而环形的外隔热挡板会加剧这种不对称性，产生显著的“阴影”效应，使得背向炉壁的一侧更容易出现凝固缺陷^[18-19]。另外，定向凝固过程中，外隔热挡板与型壳之间较宽的间隙，会导致加热区和冷区之间产生大量热交换，降低合金凝固过程中的温度梯度，让凝固缺陷问题更加严重。

随着航空航天装备建设需求的不断提升，单晶叶片的需求量逐年增加^[20-21]。目前在工业生产中，多采

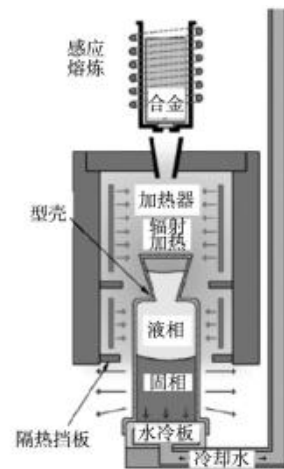


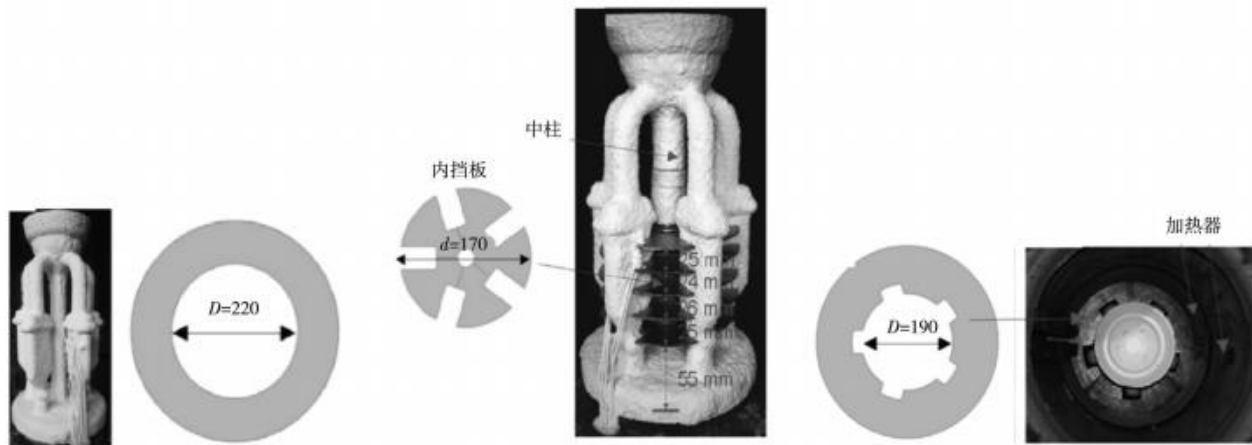
图1 HRS法定向凝固炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the HRS directional solidification furnace

用模组结构一次性生产多个叶片，模组尺寸也越来越大，这使得“阴影”效应愈发明显^[22]。为了提高温度梯度，改善“阴影”效应带来的问题，设置于型壳上的内隔热挡板便应运而生。

内隔热挡板大多采用耐高温且能反射热辐射的石墨材质，在结构上通常设计为单层或多层的随动结构，可以与型壳同步移动^[17]。其形状与模组轮廓相适配，能与外隔热挡板配合，有效抑制热区与冷区之间的热交换，提高温度梯度，减弱“阴影”效应，从而获得更为理想的定向凝固组织。Szeliga^[17, 23-25]等在内隔热挡板方面开展了大量研究工作，他们通过在型壳内设置一个或多个水平石墨挡板，如图2所示^[23]，增强了热辐射屏蔽效果，显著提高了温度梯度，降低了等温面曲率。高雪峰^[26]等将内挡板设计为内层盖状和外层环状的随动结构，与外隔热挡板协同作用，达到抑制热交换、调控温度场的目的，实现了提高温度梯度的效果。秦岭^[27]等提出一种可随凝固进程动态适应叶片几何形状变化的可脱离式内隔热挡板，它通过分段脱离的方式减少热区和冷区的热量交换。数值模拟结果显示，这种挡板可显著提高定向凝固过程中的温度梯度。李海松^[28]等人设计了双隔热挡板结构，环形的外隔热挡板固定在加热区下方，匹配铸件形状的内隔热挡板能够借助伸缩装置在定向凝固过程中始终与外隔热挡板保持平行，实现动态阻挡热散失，提高铸件温度梯度和质量。不过，这两类不随型壳移动的新型隔热挡板在实际应用中的实现方式，还需要深入研究。

Zhang^[29]等在模组中环形分布的叶片内层添加了套筒结构，以此改善热区和冷区的热交换情况。杨文超等^[22]进一步研究发现，这种套筒结构具有加强保温的作用，能够有效改善温度场，提高叶片凝固时的温度



(a) 型壳 (b) 常规外隔热挡板示意图 (c) 内隔热挡板示意图 (d) 内隔热挡板在型壳中 (e) 随形内隔热挡板示意图 (f) 随形隔热挡板安置在炉体

图2 型壳结构与隔热挡板

Fig. 2 Mold shell structures and thermal baffles

梯度, 减小固液界面的弯曲程度, 避免杂晶形核。赵云松^[15]等创新性地设计出一种柔性隔热挡板, 该挡板由石墨环和内层SiC纤维编织的柔性纤维板组成, 兼具内、外隔热挡板的功能, 可以有效解决定向凝固过程中温度梯度不足的问题。

2 隔热挡板对温度场的作用

2.1 隔热挡板对温度梯度的影响

在HRS方法的凝固初期, 主要依靠将铸件热量传导至水冷板来实现冷却。然而, 随着铸件不断被拉出热区, 水冷板的传热效果会迅速下降, 此时铸件的散热逐渐转变为依靠真空中型壳向水冷炉壳的辐射散热。这就导致凝固前沿的温度梯度会随着凝固距离的增加而逐渐降低^[30]。Carter^[31]等人对CMSX-4合金定向凝固过程进行实际测温后发现, 水冷板附近的温度梯度可超过200 K/cm, 但在距离水冷板25 cm的叶片端部, 温度梯度却降至20 K/cm, 具体情况如图3所示^[31]。Szeliga^[25]等通过数值模拟分析也表明, 温度梯度沿铸件高度呈现出明显的阶段性变化。在靠近水冷板的区

域, 由于水冷板的强冷却作用, 温度梯度极高, 且衰减速度很快; 当铸件高度超过临界距离后, 水冷板的影响逐渐减弱, 温度梯度趋于稳定, 此时主要由抽拉速率、铸件形状以及隔热挡板来对其进行调控。

隔热挡板的物理特性和结构设计, 对定向凝固过程中的温度梯度起着决定性作用。Franke^[8]等人运用数值模拟方法, 详细对比了HRS和LMC两种定向凝固工艺下凝固过程中的温度梯度。结果发现, 在小尺寸圆柱铸件中, LMC工艺下的温度梯度约为HRS工艺的1.8倍; 而在涡轮叶片组件等大尺寸复杂铸件中, LMC工艺下的温度梯度更是达到HRS工艺的3倍。因此, 他们认为HRS与LMC工艺在温度梯度上的差异, 主要源于挡板设计不同, 而非散热方式。HRS挡板由于预留开口, 导致热泄漏现象出现; 若采用理想密封挡板, 可缩小与LMC工艺的温度差异。LMC的动态挡板能够随铸件截面自动密封, 显著减少热损失, 其对温度梯度的提升作用比散热机制差异更为显著。Szeliga^[32]等通过使用多层内隔热挡板, 成功使叶片稳态凝固阶段的稳态梯度从16 K/cm提升至25 K/cm, 这充分表明内隔热挡板能够有效提升定向凝固过程中的温度梯度。他们

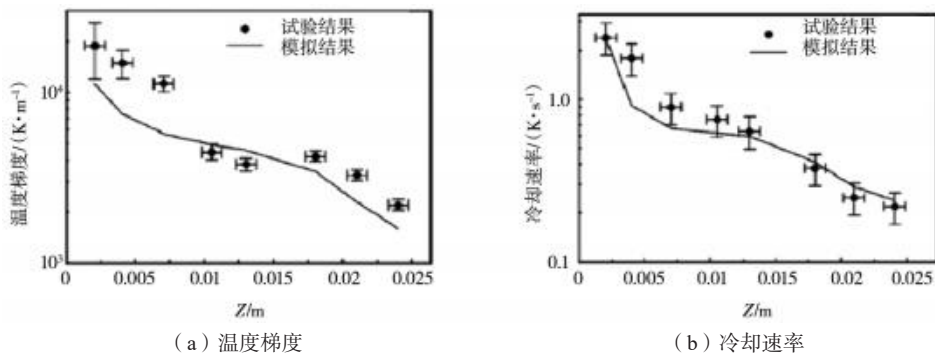


图3 温度梯度和冷却速率随凝固距离的变化

Fig. 3 Changes of temperature gradient and cooling rate with solidification distance

的研究还表明,增加内隔热挡板的数量,可进一步降低不同凝固阶段温度梯度的不均匀性,但在实际应用中,需要综合考虑装配的复杂程度。通过对比铝制和石墨这两种类型的内隔热挡板下的温度场差异,发现材料热物性对温度梯度的影响相对较小。秦岭^[27]等的研究指出,在叶身中部使用可脱离式隔热挡板,温度梯度可由20 K/cm增加到40 K/cm,榫头处的温度梯度也能提高约6 K/cm。李振峰^[33]等的研究结果显示,综合运用减小外隔热挡板内径、减薄其厚度以及在型壳内设置套筒等措施,可以使定向凝固过程的温度梯度从40.5 K/cm提升到49.7 K/cm。

2.2 隔热挡板对液相线等温面曲率的影响

在镍基单晶高温合金定向凝固过程中,液相线等温面并非平面,而是受到散热特性^[7-8, 25]、合金凝固特性^[9, 30]、铸型结构^[10, 22]以及定向凝固工艺参数^[7-8]等多种因素的耦合作用。由于存在横向温度梯度,等温面会形成一定的曲率。隔热挡板能够显著影响定向凝固过程中热量的分布与散失行为,进而对等温面曲率进行调控。

当抽拉速率较低时,等温面通常位于外隔热挡板以上的加热区,此时热量主要通过铸件的凝固部分散

发^[7],等温面会呈现上凸形状;而在高抽拉速率下,等温面一般位于外隔热挡板以下的冷却区,这会导致横向热传递增加,等温面呈现下凹形状。在合适的抽拉速率下,等温面位于外隔热挡板的中间位置,此时横向热传递较小,等温面近似平坦。

在单晶叶片组模生产过程中,叶片面向中柱和炉壁的内外两侧受热及冷却条件严重不对称,导致横向温度场不均匀。越靠近中柱的位置,凝固过程中温度下降越快,从而产生显著的“阴影”效应,使得等温面呈现明显的上凸形貌^[10]。对比不同底盘直径下模组的凝固过程可以发现,小浇注底盘直径模组的等温面斜率明显小于大尺寸模组,这表明浇注底盘直径越大,等温面上凸的问题就越严重^[22]。

Szeliga^[24-25, 32]等发现,内隔热挡板可以显著降低定向凝固过程中热区与冷区的热交换,有效抑制漏热现象,提高定向凝固温度梯度,使等温面变得更加平坦。通过综合使用随形外隔热挡板和多层内隔热挡板,可以将模组中的横向温度梯度从2.8 K/cm减小到0.2 K/cm,显著降低等温面曲率,如图4所示。杨文超等也发现,在型壳内设置保温套筒,能够缩窄叶身部位的糊状区宽度,显著改善等温线的对称性,降低等温线的弯曲程度。

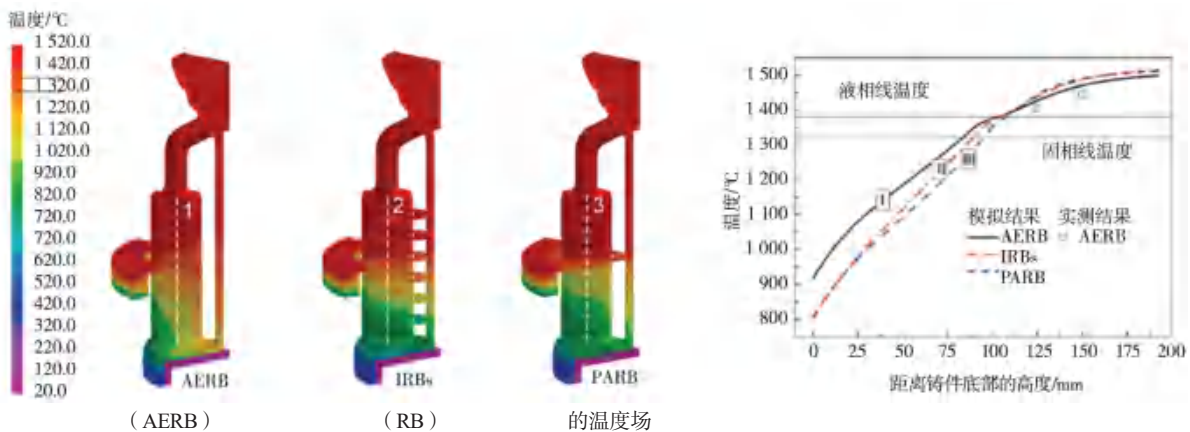


图4 使用改进的内外挡板后温度场和冷却曲线数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of temperature fields and cooling curves after applying improved inner/outer baffles

3 隔热挡板对凝固过程的影响

3.1 隔热挡板对组织尺度和晶体取向的影响

大量研究显示^[29, 34-37],提高定向凝固过程的冷却速率,能够细化枝晶组织,减少共晶含量,降低显微偏析,还能减小各种凝固和固态相变析出相的尺寸,进而提升合金的力学性能。在稳态定向凝固条件下,凝固速率和抽拉速率基本一致,即在相同抽拉速率时,温度梯度越高,定向凝固过程的冷却速率就越

大。隔热挡板可通过提高温度梯度,实现定向凝固组织的细化。Szeliga^[17]等的研究表明,单独使用随形外隔热挡板和多层内隔热挡板,分别能使一次枝晶间距减少7.8%和21%。乐献刚^[9]等研究了外隔热挡板厚度对DD6合金定向凝固组织的影响,发现随着隔热挡板厚度增加,温度梯度降低,合金的一次枝晶间距增大,($\gamma + \gamma'$)共晶含量和尺寸增加,枝晶干与枝晶间的铸态 γ' 尺寸也略有增大,元素偏析程度加剧。

镍基单晶高温合金属于FCC结构晶体,<001>晶

向是枝晶的择优生长方向。李倩^[38]等根据枝晶生长形态，结合定向切割技术，成功标定了铸态镍基单晶高温合金的晶体取向，这表明通过枝晶形态来判定镍基单晶高温合金的晶体学方向具有较高准确性。Elliott^[7]等发现，定向凝固过程中等温面的形状对定向柱晶的形态有显著影响：对于上凸形等温面，枝晶向铸件外

表面生长；下凹形等温面则使枝晶向铸件轴向方向生长；而等温面呈扁平状时，枝晶会向最平行于对称轴的方向生长，如图5所示^[7]。Szeliga^[25]等也发现了类似规律。如前文所述，隔热挡板的应用既能提高定向凝固过程的温度梯度，又能让等温面更趋平坦，有助于获得<001>取向偏离轴向更小的单晶叶片。

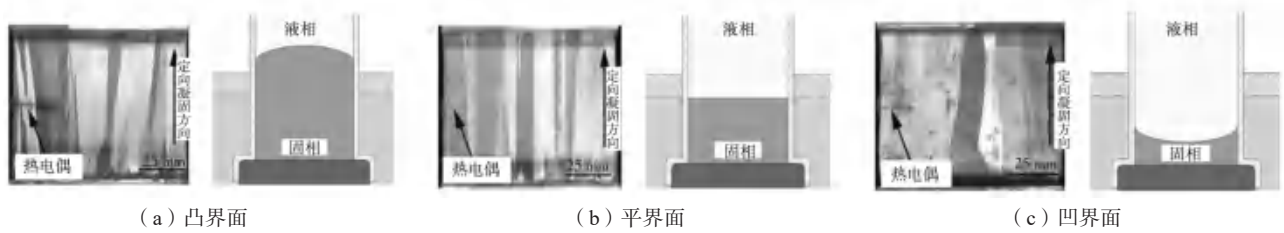


图5 固液界面形状对枝晶生长的影响
Fig. 5 Effect of solid-liquid interface shape on dendritic growth

3.2 隔热挡板对凝固缺陷的影响

在定向凝固过程中，杂晶^[19, 22]、雀斑^[29]、条纹晶^[39]、小角度晶界^[40]和缩松^[23]等凝固缺陷一旦出现，会降低单晶质量，严重时甚至导致产品报废，因此必须严格限制或抑制这些缺陷的产生。杂晶是单晶叶片制备过程中较为严重的缺陷之一。国内外学者深入研究了杂晶缺陷的形成原因，普遍认为凝固界面前沿的形核机制是叶片缘板等突变截面位置产生杂晶缺陷的主要因素^[19, 36, 41]；同时，难熔质点引发的异质形核机制^[42]、枝晶熔断^[43-44]以及枝晶弯曲^[45]等情况，也会导致杂晶缺陷出现。Szeliga^[24]等的研究表明，内隔热挡板能有效降低凝固界面前沿的曲率，如图6所示^[24]，将平台处的最大过冷度从36.5 K降至16.5 K，从而抑制平台杂晶缺陷，但可能会促使条纹晶、小角度晶界和缩松

缺陷的形成。杨文超^[22]等发现，在模组内设置保温套筒，可减小固液界面的弯曲程度，避免缘板面向模组中柱一侧产生杂晶。

雀斑缺陷也是需要严格控制的凝固缺陷^[29, 46-47]，它主要是由于微观偏析致使糊状区内部枝晶间液相密度低于等温面以上区域，引发隧道式强烈对流，促使枝晶臂折断，最终形成链状等轴晶。这种缺陷在温度梯度较低时更容易出现^[48-49]。隔热挡板能够提高定向凝固时的温度梯度，对抑制雀斑缺陷效果显著。秦岭^[27]等人发现，叶片榫头凝固时温度梯度会突然下降，导致该部位局部出现雀斑缺陷，而使用可脱离式隔热挡板（见图7）能提高榫头凝固时的温度梯度，避免雀斑缺陷产生。Szeliga^[17]等也发现，使用多层内隔热挡板可缩短叶根部雀斑链的长度。

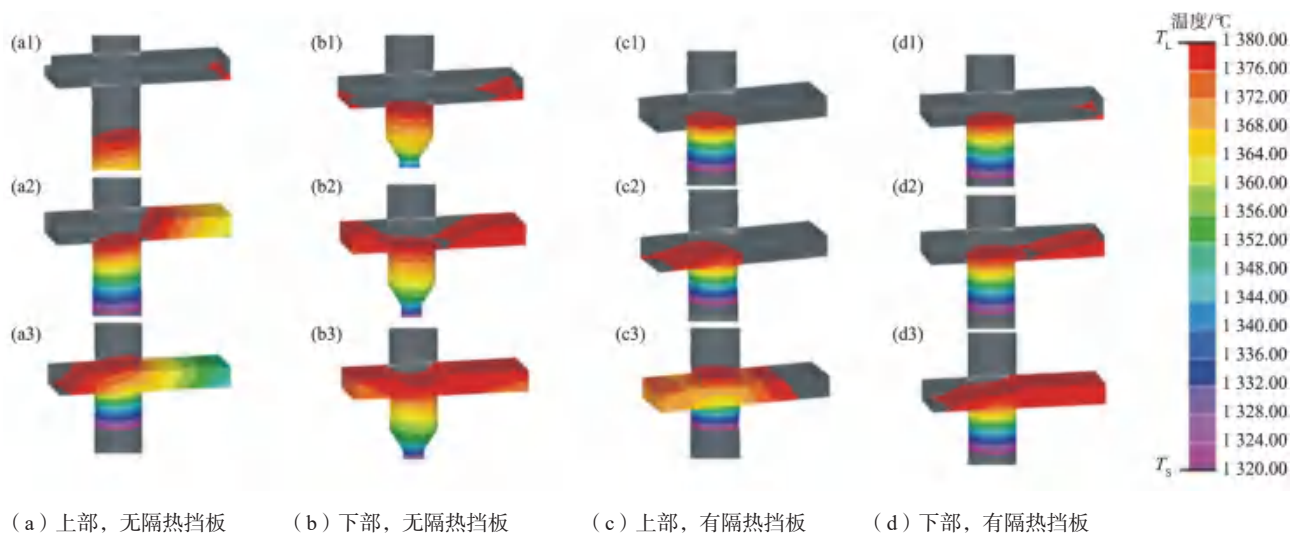
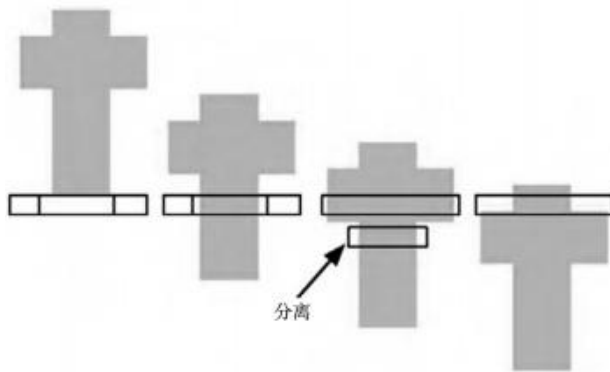


图6 平台液相线等温线形状
Fig. 6 Shapes of the platform liquidus isothermal curves



(a) 初始位置 (b) 开始阶段 (c) 中间阶段 (d) 终了阶段

图7 在凝固过程中可脱离隔热板的运作方式

Fig. 7 Operation mode of the detachable thermal baffle during solidification process

4 总结与展望

在HRS定向凝固技术中，隔热挡板发挥着至关重要的作用。外隔热挡板多为环形结构，因其与型壳距离及位置关系，会导致热区热量辐射散失，影响热区、冷区之间的温度梯度，通过改进材质、结构和尺寸等可优化其效果。内隔热挡板则是为解决模组生产中叶片受热冷却不对称、“阴影”效应及热交换问题而产生，多采用石墨材质，具有多种结构形式，能与外隔热挡板协同抑制热交换，提高温度梯度，改善凝固组织。隔热挡板对温度场的影响显著，其物理特性和结构设计直接决定温度梯度。通过合理设置隔热挡板，如采用多层内隔热挡板、优化外隔热挡板结构等

方式，可有效提升温度梯度，同时降低等温面曲率，使等温面更趋于平坦。在凝固过程方面，隔热挡板能够细化定向凝固组织，减少枝晶间距，并且有利于获得<001>取向偏离轴向更小的单晶叶片，提高晶体取向的一致性。此外，隔热挡板对凝固缺陷的抑制也有一定作用，虽然内隔热挡板在抑制某些缺陷（如平台杂晶）时可能会引发其他缺陷（如条纹晶、小角度晶界和缩松），但总体而言，通过优化隔热挡板的使用，能够有效减少雀斑等缺陷的产生。

尽管目前在HRS定向凝固技术中隔热挡板的研究取得了一定成果，但仍有诸多方面值得进一步探索与改进。在隔热挡板的设计与优化上，应加强对新型结构和材料的研究。一方面，深入研究内隔热挡板与外隔热挡板的协同工作机制，探索更高效的组合方式，以实现温度场的精准调控。另一方面，寻找具有更优异隔热性能、热稳定性和耐温性的材料，进一步减少热损失，提高定向凝固过程的效率和质量。对于隔热挡板在不同尺寸、形状和复杂程度铸件上的应用，还需要开展更多的试验研究。同时从工业生产的角度出发，要注重隔热挡板技术的实际应用转化。开发便于安装、拆卸和维护的隔热挡板结构，提高生产效率和设备的可操作性。同时，考虑隔热挡板的生产成本和使用寿命，在保证性能的前提下，降低其制造和使用成本，使其更符合大规模工业化生产的需求，推动HRS定向凝固技术在航空航天、能源等领域的广泛应用，进一步提升相关高端装备的制造水平。

参考文献:

- [1] 张健, 王莉, 谢光, 等. 镍基单晶高温合金的研发进展 [J]. 金属学报, 2023, 59 (9): 1109-1124.
- [2] 刘林, 张军, 沈军, 等. 高温合金定向凝固技术研究进展 [J]. 中国材料进展, 2010, 29 (7): 1-9.
- [3] 陈仲光, 张志舒, 李德旺, 等. F119发动机总体性能特点分析与评估 [J]. 航空科学技术, 2013 (3): 39-42.
- [4] 尹阔, 李龙飞, 赵云松, 等. 小角度晶界对二代镍基单晶高温合金高温蠕变行为的影响 [J]. 航空材料学报, 2025, 45 (5): 112-122.
- [5] 马德新. 高温合金叶片单晶凝固技术的新发展 [J]. 金属学报, 2015, 51 (10): 1179-1190.
- [6] 杨万鹏, 李嘉荣, 刘世忠, 等. 第三代单晶高温合金DD9显微组织薄壁效应 [J]. 材料工程, 2025, 53 (1): 55-64.
- [7] ELLIOTT A J, POLLOCK T M, TIN S, et al. Directional solidification of large superalloy castings with radiation and liquid-metal cooling: a comparative assessment [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2004, 35 (10): 3221-3231.
- [8] FRANKE M M, HILBINGER R M, LOHMÜLLER A, et al. The effect of liquid metal cooling on thermal gradients in directional solidification of superalloys: thermal analysis [J]. Journal of Materials Processing Technol., 2013, 213 (12): 2081-2088.
- [9] 乐献刚, 彭志江, 邹建波, 等. 隔热挡板厚度对DD6单晶高温合金凝固组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (3): 309-313.
- [10] MA D, WU Q, HOLLAD S, et al. Investigation on the asymmetry of thermal condition and grain defect formation in the customary directional solidification process [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2012, 27 (1): 012037.
- [11] 张健, 燕冰川, 楼琅洪. 一种定向凝固铸造用隔热挡板: 200510046341.3[P]. 2006-11-01.
- [12] 李金国, 赵乃仁, 王志辉, 等. 一种新型高温隔热挡板: 01250519.6 [P]. 2002-06-19.
- [13] 刘林, 葛丙明, 张军, 等. 一种定向凝固用复合隔热挡板: 201110087122.5 [P]. 2011-09-14.
- [14] 刘维维, 唐定中. 一种提高单晶凝固温度梯度的复合式隔热挡板: 201110362340.5 [P]. 2014-09-24.
- [15] 赵云松, 张迈, 杨振宇, 等. 一种提高单晶凝固温度梯度的柔性隔热挡板: 202110520517.3 [P]. 2021-08-20.
- [16] LIU Y, SHANG Y, WANG F, et al. A preferred method to prepare a single crystal blade by a downward directional solidification [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1017: 179061.
- [17] SZELIGA D P. Microstructure refinement of single crystal Ni-

- based superalloy by improvement of thermal radiation shielding in the industrial-scale Bridgman solidification process [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 118: 104868.
- [18] 张小丽, 周亦青, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金杂晶形成倾向性的研究 [J]. *金属学报*, 2012, 48 (10): 1229-1236.
- [19] 马德新, 王富, 孙洪元, 等. 高温合金单晶铸件中杂晶缺陷的试验研究 [J]. *铸造*, 2019, 68 (6): 558-566.
- [20] 谢君, 周亦青, 李金国, 等. 一种基于数值模拟的大模组单晶叶片杂晶缺陷控制方法: 202410019656.1 [P]. 2024-05-14.
- [21] 申健, 张健, 董加胜, 等. 利用液态金属冷却定向凝固技术进行高效密排单晶叶片的制备方法: 202011457377.1 [P]. 2024-03-12.
- [22] 杨文超, 撒世鹏, 郝文硕, 等. 不同模组结构高效制备单晶叶片定向凝固过程的温度场及组织模拟 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52 (11): 3847-3856.
- [23] DARIUSZ S, KAMIL G, WALDEMAR Z. The control of solidification of Ni-based superalloy single-crystal blade by mold design modification using inner radiation baffle [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20: 1700973.
- [24] SZELIGA D, KUBIAK K, SIENIAWSKI J. Control of liquidus isotherm shape during solidification of Ni-based superalloy of single crystal platforms [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 234: 18-26.
- [25] SZELIGA D, KUBIAK K, MOTYKA M, et al. Directional solidification of Ni-based superalloy castings: thermal analysis [J]. *Vacuum*, 2016, 131: 327-342.
- [26] 高雪峰, 王亮, 张朝威, 等. 一种用于型壳高效制备单晶叶片的仿形隔热挡板装置: 202410812005.8 [P]. 2024-10-18.
- [27] 秦岭, 沈军, 杨功显, 等. 新型可脱离式隔热板对燃气轮机叶片定向凝固过程的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45 (5): 1284-1289.
- [28] 李海松, 杨啊涛, 张琼元, 等. 一种提高定向凝固铸件温度梯度的铸造装置及方法: 202011425735.0 [P]. 2021-04-27.
- [29] ZHANG Y, JIA Y, ZHOU J, et al. Effect of withdrawal rate on freckle formation of large-size directional solidified nickel-based superalloy blades [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 1518-1530.
- [30] 任能, 杨绿伟, 李军, 等. 高温合金定向凝固数值模拟研究进展 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43 (10): 1336-1350.
- [31] CARTER P, COX D, GANDIN C-A, et al. Grain selection in single-crystal superalloy castings [M]// *Solidification and casting*. CRC Press, 2016.
- [32] SZELIGA D, ZIAJA W, MOTYKA M, et al. Application of inner radiation baffles in the Bridgman process for flattening the temperature profile and controlling the columnar grain structure of directionally solidified Ni-based superalloys [J]. *Materials*, 2019, 12 (6): 935.
- [33] 李振铎, 雷四雄, 王玉雷, 等. 模组结构和隔热装置对定向叶片晶粒组织的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37 (5): 510-512.
- [34] AI C, ZHOU J, LI S, et al. Effect of withdrawal rate on the microsegregation, thermophysical properties and spatial orientation of a Ni₃Al based single crystal superalloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 660: 159-165.
- [35] AI C, ZHOU J, ZHANG H, et al. Misorientation induced by withdrawal rate transition and its effect on intermediate temperature stress rupture properties of a Ni₃Al based single crystal superalloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 637: 77-83.
- [36] HUO M, LIU L, YANG W, et al. Dendrite growth and defects formation with increasing withdrawal rates in the rejoined platforms of Ni-based single crystal superalloys [J]. *Vacuum*, 2019, 161: 29-36.
- [37] XUE Y, WANG X, ZHAO J, et al. Effect of withdrawal rate on solidification microstructures of DD9 single crystal turbine blade [J]. *Materials*, 2023, 16 (9): 3409.
- [38] 李倩, 陈昊, 刘志欣, 等. 金相分析法标定铸态镍基单晶高温合金晶体取向 [J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34 (11): 1250-1255.
- [39] XU W, WANG F, MA D, et al. Sliver defect formation in single crystal Ni-based superalloy castings [J]. *Materials & Design*, 2020, 196: 109138.
- [40] HUO M, LIU L, YANG W, et al. Formation of low-angle grain boundaries under different solidification conditions in the rejoined platforms of Ni-based single crystal superalloys [J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 34 (2): 251-260.
- [41] QIU F, BU K, ZHENG B, et al. Control of edge plate stray grain of single-crystal turbine blade by using process bar method [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14: 144-154.
- [42] HUANG X, ZHANG Y, LIU Y, et al. Effect of small amount of nitrogen on carbide characteristics in unidirectional Ni-base superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1997, 28: 2143-2147.
- [43] GU J, BECKERMANN C, GIAMEI A. Motion and remelting of dendrite fragments during directional solidification of a nickel-base superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1997, 28: 1533-1542.
- [44] WANG F, LIU Y, YANG Q, et al. Microscale stray grains formation in single-crystal turbine blades of Ni-based superalloys [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 191: 134-145.
- [45] SUN D, LIU L, HUANG T, et al. Insight of the dendrite deformation in Ni-based superalloys for increased misorientation along convergent boundaries [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2018, 28 (4): 489-495.
- [46] 李金国, 孟祥斌, 刘纪德, 等. 单晶高温合金涡轮叶片的常见凝固缺陷及控制方法 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41 (11): 1321-1327.
- [47] WANG Z C, LI J R, LIU S Z, et al. Effects of shell mold heating temperature on microstructures and freckle formation of single crystal superalloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34 (4): 1191-1203.
- [48] LI Q, SHEN J, XIONG Y, et al. Prediction of freckle formation in directionally solidified CMSX-4 superalloy [J]. *Materials Letters*, 2018, 228: 281-284.
- [49] WANG F, MA D X, BÜHRIG-POLACZEK A. Effect of ceramic cores on the freckle formation during casting Ni-based single crystal superalloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 50 (2): 804-815.