

凝固速度对 Ni/Ni₃Al 基高温合金组织演变及相变行为的影响

李叶凡, 李冲, 余黎明, 刘永长, 李会军
(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: Ni/Ni₃Al 基高温合金因其优异的高温强度、抗氧化性能和抗蠕变能力等优点, 被广泛应用于航空航天等领域。简要介绍了凝固速度对 Ni/Ni₃Al 基高温合金中 γ' , β 相以及碳化物等析出相的组织演变及相变行为的影响, 为 Ni/Ni₃Al 基高温合金非平衡凝固的研究开发及组织调控提供借鉴和指导。Ni/Ni₃Al 基高温合金中 γ' , β 相以及碳化物等析出相对凝固过程中的冷却速度十分敏感。在高凝固速度下, 这些析出相会呈现与低冷却速度凝固截然不同的组织特征, 高凝固速度会使合金中 γ' 尺寸显著减小, 形貌倾向于球形, β 相发生马氏体相变等, 并最终对合金的综合性能产生重要影响。

关键词: Ni/Ni₃Al 基高温合金; 凝固速度; 凝固组织; 相变

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.01.002

中图分类号: TG132.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)01-0019-07

Effects of Solidification Rate on Microstructure Evolution and Phase Transformation Behavior of Ni/Ni₃Al-based Superalloys

LI Ye-fan, LI Chong, YU Li-ming, LIU Yong-chang, LI Hui-jun

(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

ABSTRACT: Ni/Ni₃Al-based superalloys are widely used in aerospace and other fields because of their excellent high temperature strength, oxidation resistance and creep resistance. In the work, the effect of solidification rate on the microstructure evolution and phase transformation behavior (γ' , β phase and carbide precipitates) in Ni/Ni₃Al-based superalloys were reviewed. It provides reference and guidance for the research and microstructure control of non-equilibrium solidification technology for Ni/Ni₃Al-based superalloys. The precipitates of γ' , β and carbides in Ni/Ni₃Al-based superalloys are very sensitive to the cooling rate during solidification. At high solidification rate, these precipitates present different microstructure characteristics from low solidification rate. High solidification rate can significantly reduce the size of γ' phase and make their morphology tend to be spherical. What is more, martensitic transformation occurs in β phase. As a consequence, high solidification rate finally has an important impact on the comprehensive properties of the alloys.

KEY WORDS: Ni/Ni₃Al-based superalloy; solidification rate; solidification structure; phase transformation

在现代先进航空发动机中, 高温合金用量占其总重量的 40%~60%, 高温合金材料的高温综合性能是

制约先进航空发动机发展的重要因素, 其中, Ni/Ni₃Al 基高温合金具有优异的高温综合性能, 在高温环境及

收稿日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51774212); 天津市自然科学基金 (20JCYBJC00950)

作者简介: 李叶凡 (1987—), 女, 博士生, 主要研究方向为高温合金。

通讯作者: 李冲 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属结构材料组织控制。

复杂应力条件下仍具有良好的抗氧化性及组织稳定性,航空发动机中应用最为广泛^[1-4]。铸造 Ni/Ni₃Al 基高温合金的高温性能与其凝固组织特征(包括晶粒大小、析出相形态、分布等)密切相关,控制铸件的凝固组织是凝固成形中的一个重要课题。目前,具有代表性的凝固组织控制方法主要有微合金化^[5-6]、快速凝固^[7-8]、半固态铸造成形以及外场作用^[9]。对于成分确定的铸造 Ni/Ni₃Al 基高温合金而言,其凝固组织则主要由凝固过程决定。凝固过程中的凝固参数,尤其是冷却速度,是影响铸造 Ni/Ni₃Al 基高温合金凝固组织的关键因素,不仅影响合金析出相尺寸、枝晶间距、溶质偏析与碳化物形貌等,同时还对合金组织中各相的析出次序、数量及分布状态具有重要的影响^[8,10-12]。Ni/Ni₃Al 基高温合金中 γ' 、 β 相以及碳化物和 α -Cr 等析出相对凝固过程中的冷却速度十分敏感,在高凝固速度下,这些析出相会呈现与低冷却速度凝固截然不同的组织特征,并最终对合金的综合性能产生重要影响。文中主要综述了凝固速度对 Ni/Ni₃Al 基高温合金中不同析出相演变规律及相变行为的影响。

1 凝固速度对 γ' 析出相演变的影响

Ni/Ni₃Al 基高温合金优异的高温性能主要来自其独特的两相结构:无序的 γ 基体相中分布有高体积分数的有序 γ' 析出相,其中 γ 相为面心立方结构(fcc),对 Co, Cr, Fe, Mo 等元素具有较大的溶解度,是多种元素形成的固溶体。不同温度下各种元素在 γ 相中的溶解度是不同的,而溶解度的变化会导致 γ' 相的析出、碳化物的转变以及 TCP 相的形成等^[13-15]。 γ' 相是 Ni/Ni₃Al 基高温合金中主要的强化相,属于 Cu₃Au 型 L1₂ (CP4) 面心立方有序结构,在其有序结构的每个晶胞中, Ni 原子占据面心位置, Al 原子占据 8 个顶角的位置。

γ' 相是在合金冷却过程中从 γ 相中脱溶析出的,其尺寸、数量、形貌以及分布受冷却速度的影响很大。大量研究^[11,16-19]报道了 γ' 相随冷却速度的变化规律。Zhang 等^[8]通过控制合金凝固过程中的冷却条件,制备了以不同冷却速度凝固的合金样品,研究发现, γ' 析出相形貌演变对冷却速度十分敏感:低冷速凝固时, γ' 相呈现不规则形貌或者立方体形貌;随凝固速度的增加, γ' 相立方体形貌更加规则;快速凝固时, γ' 相呈球形形貌,小尺寸单峰分布于 γ 基体中,如图 1 所示。

平缓的连续冷却可以促进多模式、不同尺寸分布的 γ' 相的析出:一次 γ' 相呈不规则或近立方体状,而二次和三次 γ' 相则大部分呈球形分布。极快的冷却速度会促进 γ' 相的爆发形核,导致小尺寸单峰分布的球形 γ' 相形成。同时,细小均匀分布的 γ' 相提高了合金在高温蠕变试验中的第三级蠕变和断裂寿命^[12]。Singh 等^[20]通过三维原子探针层析成像技术 (APT)

结合能量滤波透射电镜技术 (EFTEM),对在合金连续冷却过程中因多重爆发形核导致的呈不同尺寸分布的多代 γ' 相的形成机制进行了深入研究,研究表明,尽管一次 γ' 相和 γ 基体界面区域成分达到局部平衡,但是在合金连续冷却过程中, γ 基体成分在长程扩散范围内依然呈现非平衡状态,这就导致了小尺寸的二次甚至三次 γ' 相在大的过冷度(或低温)下析出。此外,还对比研究了高温固溶处理后以不同冷却速度 (>300 °C/min (WQ), 280 °C/min (FC) 和 24 °C/min (SC)) 冷却的合金中 γ' 相的组织演变过程^[21],如图 2 所示。结果表明,随着冷却速度的增大,扩散时间和元素流动性受到限制,一次 γ' 相以及二次 γ' 相尺寸减小。同时,这些因素也导致了二次(甚至三次) γ' 相偏离平衡成分:尺寸较大的 γ' 相更接近平衡成分,而尺寸较小的 γ' 相则迅速偏离平衡成分^[21]。这些研究

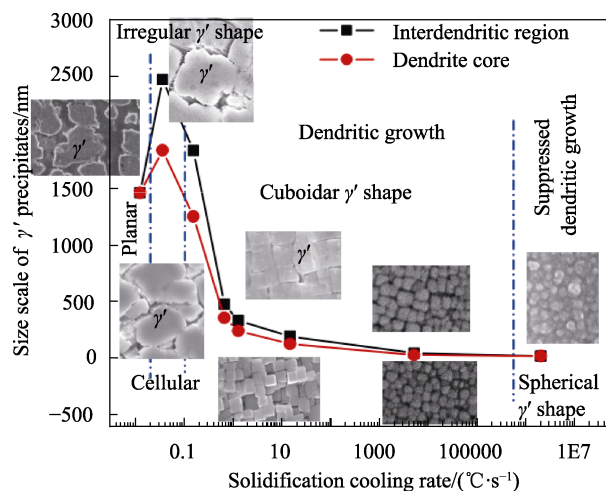


图 1 宽冷速凝固 Ni 基合金中 γ' 析出相形貌演变^[8]

Fig.1 Microstructures evolution of γ' precipitates in a Ni-based superalloys with wide range of solidification cooling rate

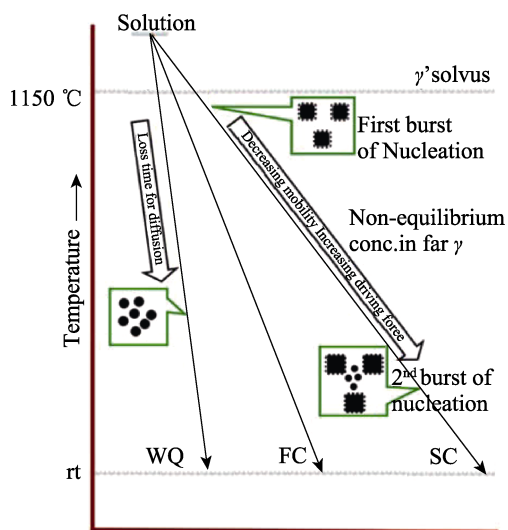


图 2 不同冷速对 γ' 相的析出及其形貌演变的影响示意图^[21]

Fig.2 Schematic illustrating the effect of cooling rate on the formation and morphology evolution of γ' precipitates

结果均说明 γ' 相的成分及形貌分布均受冷却速度的影响。此外,在沉淀强化型 Ni/Ni₃Al 基高温合金中, γ' 相以球形析出,在长大与粗化过程中向立方体状转变,且形核与长大过程通常比较短暂^[22-23]。Tien 和 Copley 等^[24]认为, γ' 析出相的形貌演变过程可看作是 γ' 析出相自身弹性应变能与 γ/γ' 相共格界面自由能的竞争过程。小尺寸 γ' 相形核析出后,表面积对体积比值很大,界面能占主导地位,呈球形;随着 γ' 相的长大和粗化,表面积对体积比值减小,界面错配引起的弹性应变能决定 γ' 相的形貌,向立方体状转变。

γ 和 γ' 相均具有面心立方结构,故二者保持共格关系,但是晶格常数上的细微差异会在两相界面上产生晶格错配,从而在 γ' 析出相周围引起弹性应力场,阻碍位错运动,引起合金的强化。 γ/γ' 相界面特征对 Ni/Ni₃Al 基高温合金的组织 and 高温性能具有十分重要的影响,其中, γ/γ' 晶格错配度是表征两相共格界面应变状态的参数,两相错配度大小直接影响 γ/γ' 相的形貌演变和合金的高温性能,是衡量高温合金组织稳定性的一项重要指标^[25-27]。相关研究表明^[28],快速凝固提高了 Cr, Fe 在 γ' 相的溶解度,且 Cr, Fe 原子进入 γ' -Ni₃Al 后占据 Al 位,导致快速凝固 Ni₃Al 基合金枝晶干区域 γ 相和 γ' 相的晶格常数降低,两相晶格错配度绝对值增大,导致 γ/γ' 相界面形成刃型位错,并显著提高了枝晶干 ($\gamma+\gamma'$) 组织的力学性能。

2 凝固速度对 β 相变行为的影响

钢铁研究总院研制出一种含铁的 Ni₃Al 基高温合金,大量 Fe 的加入使合金铸态组织中除传统的 ($\gamma+\gamma'$) 两相区外,还有大量呈块状分布的 β 相生成^[29-30]。 β 相的引入对 Ni₃Al 基合金的加工性能和可焊性是有益的^[29,31-32]。大量文献表明^[33-36],在富 Ni 的 Ni-Al 合金中,由于结构相关性,高冷却速度能够使体心立方 B2-型 β 相发生马氏体相变,转变为有序 fct-L1₀ 结构马氏体。Smialek 等^[36]根据 NiAl 合金马氏体新相的电阻率及表面起伏特性判断马氏体新相具有热弹性,而且马氏体相变温度 (M_s) 与合金中 Ni 的原子数分数 (60%~69%) 线性相关。Schryvers^[33]的研究结果则表明, NiAl 合金 M_s 温度随着冷却速度的提高有轻微的升高。Li 等^[37]通过对一种高 Fe, Cr 的 Ni₃Al 基高温合金的研究发现,合金枝晶间区域存在呈岛状分布的 β 相 (体积分数为 19.4%),快速凝固 ($\sim 10^3$ °C/s) 会导致 β 相发生马氏体相变,转变为 L1₀ 结构孪晶马氏体相。同时, β 相内 α -Cr 颗粒爆发形核析出,体心立方结构 α -Cr 析出相与 L1₀ 结构马氏体基体相界面处的共格应力促进 {111} 原子面上位错向层错和孪晶的转变,并且扩展到周围基体中,形成具有层错与微孪晶亚结构的马氏体 (见图 3)。

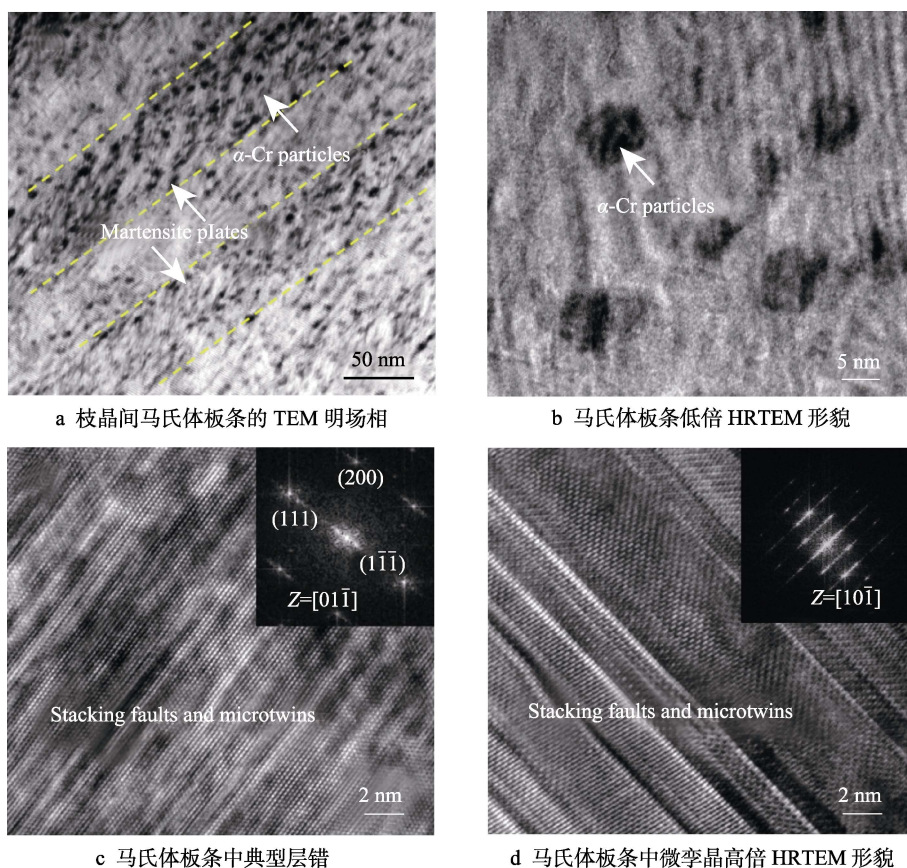


图 3 快速凝固 Ni₃Al 基合金枝晶间马氏体相的 TEM 形貌^[37]

Fig.3 TEM micrographs for interdendritic martensite of rapidly solidified Ni₃Al-based alloy

Boullay等^[38]对NiAl合金中马氏体相变过程中的晶体学进行了深入研究。结果表明,在Ni-Al体系的马氏体相变中,奥氏体相是体心立方(bcc)B2-结构的 β 相,其中过量的Ni原子通过随机占据Al位进行调节。马氏体相变是无扩散型固态相变,原子协同做小范围位移,以无扩散方式进行晶格改组。在相变过

程中,一对相互垂直的 $\langle 110 \rangle_{B2}$ 方向发生均匀收缩,而其所在平面法向 $\langle 001 \rangle_{B2}$ 均匀膨胀,使其轴比增大至 $c/a \approx 0.86$ ^[39]左右,便得到 $L1_0$ 马氏体点阵。被拉长的立方轴作为马氏体fct-结构中的 c -轴,奥氏体中原子的有序排列能够在马氏体相中保留下来,如图4所示^[38]。

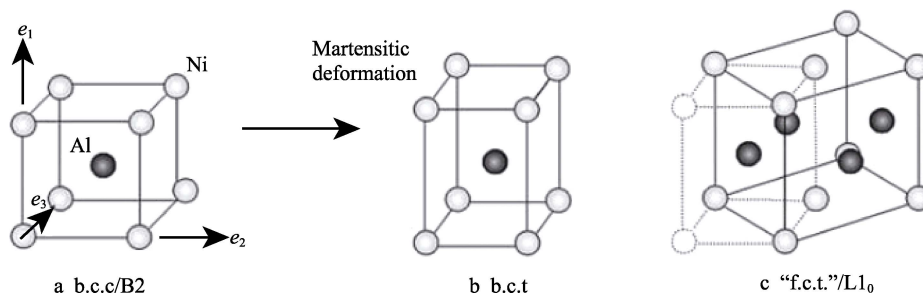


图4 Ni-Al奥氏体向 $L1_0$ 马氏体转变示意图,后者有两种可能的单胞选择^[38]

Fig.4 Schematic representation of transformation from Ni-Al austenite to $L1_0$ martensite, the latter with two possible choices for the unit cell

3 凝固速度对 α -Cr相、碳化物等其他析出相的影响

除了 γ' 、 β 相之外,Ni/Ni₃Al基高温合金中还会有碳化物^[40-42]和 α -Cr^[43-46]等其他析出相生成,并对合金的性能产生重要的影响。其中, α -Cr相也是Ni/Ni₃Al基合金中比较常见的析出相。Pérez等^[46]通过研究一种快速凝固的Ni₃Al-Cr合金发现, α -Cr相颗粒的体积分数、尺寸大小和分布对合金的力学性能具有重要的影响。快速凝固获得的Ni₃Al-Cr合金,在750℃下热处理会引起 α -Cr相颗粒的大量析出,导致合金脆化;当热处理温度提高至900℃或1000℃

时,高温使 α -Cr相颗粒重新固溶于 γ' -Ni₃Al中,从而提高了合金塑韧性。当Ni/Ni₃Al基高温合金中添加过量的Cr,Mo等元素时,会促进拓扑密堆相(TCP相)产生,如P相、 σ 相和 μ 相等^[13,47]。TCP相为有害相,它的产生会消耗合金中大量的固溶强化元素,且形成后无法通过热处理消除,其存在会明显降低合金的高温强度和组织稳定性。例如, σ 相的生成会消耗大量固溶于 γ 相中的Cr原子,极大降低了合金的抗氧化性能;在蠕变过程中,带状的 μ 相附近会产生应力集中,促进裂纹的萌生和扩展,加速高温合金的寿命退化^[48]。

碳化物是铸造高温合金中常见的强化相之一,主

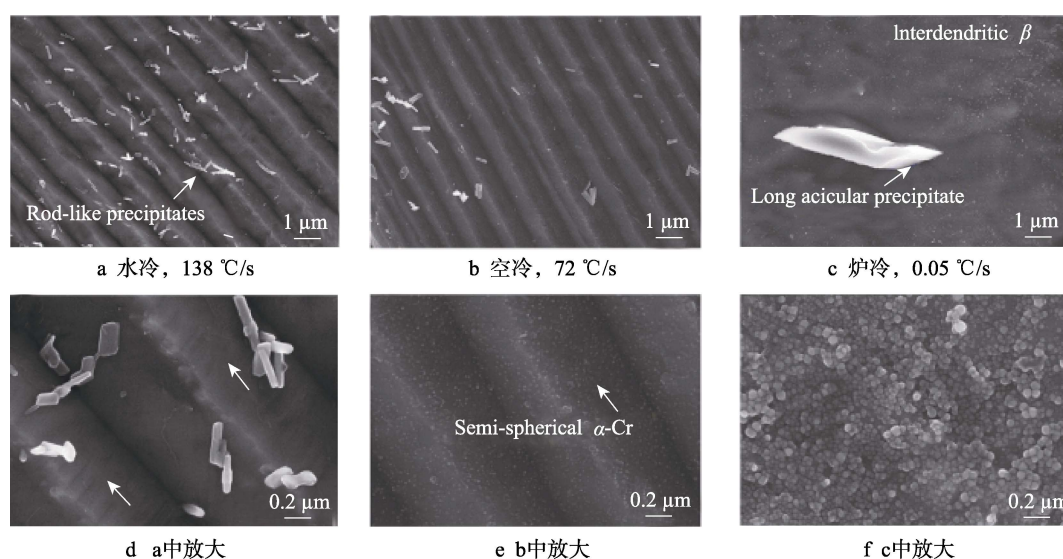


图5 1200℃/10h固溶处理后,不同冷却速度多相Ni₃Al基合金枝晶间 β 相及内部析出相形貌演变^[53]

Fig.5 Low (a-c) and high (d-f) magnified SEM morphologies of the interdendritic β phase in multiphase Ni₃Al-based alloy subjected to 1200℃/10h solution treatment and cooled at different speed, (a, d) water cooling, 138℃/s, (b, e) air cooling, 72℃/s, (c, f) furnace cooling, 0.05℃/s

要存在形式包括 MC^[49], M₆C^[15], M₇C₃^[50], M₂₃C₆^[15,42] 类型。Yu 等^[51]研究表明,凝固速率对于碳化物的生长形貌、分布、成分和生长机制有重要的影响。随着凝固速率的增大,碳化物体积分数增加,其形貌发生改变,由小块状、短棒状转变为中国结状。同时,在枝晶界面处,凝固速率增加,碳化物细化,但是,在低凝固速率下,凝固速率增大,碳化物尺寸变大。Li 等^[52]在 DD3 镍基合金中也发现了相似的碳化物演变规律。此外, Wu 等^[53]对一种高 Fe, Cr 含量的实验新型多相 Ni₃Al 基合金进行过固溶处理(1200 °C 下保温 10 h)后,以不同冷速冷却处理(水冷、空冷和炉冷),结果发现 β 相对冷却速度十分敏感。在不同的冷却速度下,枝晶间 β 相内出现 3 种析出相:杆状碳化物 Cr₃C₂ (见图 5a)、近球状 α -Cr 以及针片状 γ' 析出相(见图 5c),如图 5 所示。通过拉伸蠕变性能测试证明,虽然 Ni₃Al 基合金枝晶间 β 相的存在提高了合金的热塑性以及焊接性能,但是在一定程度上降低了合金的高温蠕变性能。

4 结语

高凝固速度可以有效减小 Ni/Ni₃Al 基高温合金偏析,更好地发挥合金元素的强化作用,有效克服传统材料制备工艺中容易出现的高偏析、显微疏松、热裂和夹杂等组织缺陷,显著改善合金的综合性能,而且还能够形成完全过饱和固溶体,增加弥散析出的小尺寸 γ' 强化相的数量,增加其强化效果。同时,可以通过控制合金中析出相的形态、尺寸和分布以及亚稳相的形成,制备出综合性能更加优异的高温合金,可显著扩展合金材料在实际中的应用,这对 Ni/Ni₃Al 基高温合金的进一步推广和使用具有重要的指导意义。实用化应用依然存在不完善之处:高凝固速度下的组织预测和理论模型不够准确、完善,对凝固过程的组织演化过程认识不够深入;高凝固速度 Ni/Ni₃Al 基合金的高温力学性能(如蠕变强度、疲劳寿命等)数据还不全面,微观组织与力学性能特征关系还未系统建立,因此,实现高凝固速率下 Ni/Ni₃Al 基高温合金的大规模工业化制备应用还需要继续深入研究探索。

参考文献:

- [1] WU Jing, LI Chong, LIU Yong-chang, et al. Effect of Annealing Treatment on Microstructure Evolution and Creep Behavior of a Multiphase Ni₃Al-Based Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 623—635.
- [2] PEI Jian-lu, LI Ye-fan, LI Chong, et al. Microstructure-Dependent Oxidation Behavior of Ni-Al Single-Crystal Alloys[J]. Journal Materials Science &

Technology, 2020, 52: 162—171.

- [3] 张鹏, 杨凯, 朱强, 等. 微量元素对镍基高温合金微观组织与力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2018, 10(2): 1—6.
- ZHANG Peng, YANG Kai, ZHU Qiang, et al. Effect of Microelement on Microstructure and Mechanical Property of Nickel-base Superalloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(2): 1—6.
- [4] WU Yu-ting, LIU Yong-chang, LI Chong, et al. Coarsening Behavior of γ' Precipitates in the $\gamma'+\gamma$ Area of a Ni₃Al-Based Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 526—533.
- [5] AI Chen, LI Shu-suo, LIANG Yun-fei, et al. Influence of Mo and Ta Additions on Solidification Behavior of Ni₃Al Single Crystal Alloys[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2015, 25(4): 353—360.
- [6] SUN Fei, MAO Sheng-cheng, ZHANG Jian-xin. Identification of the Partitioning Characteristics of Refractory Elements in σ and γ Phases of Ni-based Single Crystal Superalloys Based on First Principles[J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 147(3): 483—487.
- [7] 翟薇, 常健, 耿德路, 等. 金属材料凝固过程研究现状与未来展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1953—2008.
- ZHAI Wei, CHANG Jian, GENG De-lu, et al. Research Status and Future Prospect of Solidification Process of Metal Materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1953—2008.
- [8] ZHANG Yong-jun, HUANG Yu-jin, LIN Yang, et al. Evolution of Microstructures at a Wide Range of Solidification Cooling Rate in a Ni-Based Superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 570: 70—75.
- [9] 林小婷, 徐瑞, 樊志斌, 等. 铝、镁合金高压凝固及高压凝固理论研究进展[J]. 精密成形工程, 2016, 8(6): 1—7.
- LIN Xiao-ping, XU Rui, FAN Zhi-bin, et al. High-pressure Solidification of Al and Mg Alloys and Theroretical Research Progress of High-pressure Solidification[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6): 1—7.
- [10] MALLIKARJUNA H T, CALEY W F, RICHARDS N L. The Effect of Cooling Rate on the γ' Composition, Morphology and Corrosion Behaviour of IN738LC[J]. Corrosion Science, 2019, 149: 37—44.
- [11] ZHAO Zhan, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, et al. Solidification Characteristics and Microstructures Evolution of Ni-Based Superalloy K424 with Different Solidification Cooling Rates[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(11): 1332—1341.
- [12] KAVOOSI V, ABBASI S M, MIRSAED S M G, et al. Influence of Cooling Rate on the Solidification Behavior and Microstructure of IN738LC Superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 291—300.
- [13] ANTONOV S, HUO Jian-jie, FENG Qiang, et al. σ and η Phase Formation in Advanced Polycrystalline Ni-Base

- Superalloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 687: 232—240.
- [14] ZHANG H W, QIN X Z, WU Y S, et al. Effects of Cr Content on the Microstructure and Stress Rupture Property of a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy during Long-Term Thermal Exposure[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 718: 449—460.
- [15] LIU L R, JIN T, ZHAO N R, et al. Formation of Carbides and their Effects on Stress Rupture of a Ni-base Single Crystal Superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 361(1/2): 191—197.
- [16] LI Gong, CHEN Bo, ZHANG Long, et al. Effect of Cooling Rate on Microstructure, Microsegregation and Mechanical Properties of Cast Ni-based Superalloy K417G[J]. *Journal Materials Science & Technology*, 2018, 34(5): 811—820.
- [17] WU Hong-yu, HUANG Zai-wang, ZHOU Ning, et al. A Study of Solution Cooling Rate on γ' Precipitate and Hardness of a Polycrystalline Ni-based Superalloy Using a High-Throughput Methodology[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 739: 473—479.
- [18] RADIS R, SCHAFFER M, ALBU M, et al. Multimodal Size Distributions of γ' Precipitates During Continuous Cooling of Udimet 720 Li[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(19): 5739—5747.
- [19] LI Ye-fan, LI Chong, WU Jing, et al. Microstructural Feature and Evolution of Rapidly Solidified Ni₃Al-based Superalloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2019, 32(6): 764—770.
- [20] SINGH A R P, NAG S, CHATTOPADHYAY S, et al. Mechanisms Related to Different Generations of γ' Precipitation during Continuous Cooling of a Nickel Base Superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(1): 280—293.
- [21] SINGH A R P, NAG S, HWANG J Y, et al. Influence of Cooling Rate on the Development of Multiple Generations of γ' Precipitates in a Commercial Nickel Base Superalloy[J]. *Materials Characterization*, 2011, 62(9): 878—886.
- [22] ARDELL A J. Trans-Interface-Diffusion-Controlled Coarsening in Ternary Alloys[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(20): 7749—7754.
- [23] ARDELL A J. Trans-Interface-Diffusion-Controlled Coarsening of γ' Precipitates in Ternary Ni-Al-Cr Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(20): 7828—7840.
- [24] TIEN J K, COPLEY S M. The Effect of Uniaxial Stress on the Periodic Morphology of Coherent Gamma Prime Precipitates in Nickel-base Superalloy Crystals[J]. *Metallurgical Transactions*, 1971, 2(1): 215—219.
- [25] LUO Liang, AI Chen, MA Yue, et al. Influence of Temperature on the Lattice Misfit and Elastic Moduli of a Ni Based Single Crystal Superalloy with High Volume Fraction of γ' Phase[J]. *Materials Characterization*, 2018, 142: 27—38.
- [26] LONG Hai-bo, WEI Hua, LIU Yi-nong, et al. Effect of Lattice Misfit on the Evolution of the Dislocation Structure in Ni-based Single Crystal Superalloys during Thermal Exposure[J]. *Acta Materialia*, 2016, 120: 95—107.
- [27] DING Qing-qing, LI Su-zhi, CHEN Long-qing, et al. Re Segregation at Interfacial Dislocation Network in a Nickel-Based Superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2018, 154: 137—146.
- [28] LI Ye-fan, LI Chong, YU Li-ming, et al. Characterization of γ' Precipitate and γ/γ' Interface in Polycrystalline Ni₃Al-based Superalloys[J]. *Vacuum*, 2020, 176: 109310.
- [29] 段修涛, 李尚平, 骆合力, 等. 一种含铁 Ni₃Al 基合金的热变形行为[J]. *钢铁研究学报*, 2015, 27(3): 70—74.
- DUAN Xiu-tao, LI Shang-ping, LUO He-li, et al. Hot Deformation Behavior of a Ni₃Al-Fe Alloy[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, 27(3): 70—74.
- [30] 段修涛, 李尚平, 骆合力, 等. 变形 Ni₃Al 基合金的热处理工艺[J]. *钢铁研究学报*, 2015, 27(11): 60—65.
- DUAN Xiu-tao, LI Shang-ping, LUO He-li, et al. Heat Treatment Process for Ni₃Al-based Wrought Superalloy [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, 27(11): 60—65.
- [31] 彭为康, 润长生, 戴延丰, 等. Ni₃Al 基高温合金 JG4356 焊接性能和工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(1): 55—58.
- PENG Wei-kang, RUN Chang-sheng, DAI Yan-feng, et al. Study on Welding Properties and Technology of Ni₃Al-based Superalloy[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(1): 55—58.
- [32] 骆合力, 李尚平, 曹栩, 等. 可焊高强 Ni₃Al 基 MX246AG 合金研究[C]// 第十二届中国高温合金年会, 成都, 2011, 559—561.
- LUO He-li, LI Shang-ping, CAO Xu, et al. Study on Weldable High Strength Ni₃Al Based MX246AG Alloy[C]// The 12th China Superalloy Annual Meeting, Chengdu, 2011, 559—561.
- [33] SCHRYVERS D, HOLLAND-MORITZ D. Austenite and Martensite Microstructures in Splat-Cooled Ni-Al[J]. *Intermetallics*, 1997, 6(1998): 427—436.
- [34] POTAPOV P L, POLIAKOVA N A, UDOVENKO V A. The Shape Memory Behavior in 63.8Ni-Al Alloy[J]. *Scripta Materialia*, 1996, 35(3): 427.
- [35] CHAKRAVORTY S, WAYMAN C M. The Thermoelectric Martensitic Transformation in β NiAl Alloys: I. Crystallography and Morphology[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1976, 7(4): 555—568.
- [36] SMIALEK J L, HENEMANN R F. Transformation Temperatures of Martensite in β -Phase Nickel Aluminide[J]. *Metallurgical Transactions*, 1973, 4: 1571—1575.
- [37] LI Ye-fan, LI Chong, WU Jing, et al. Formation of Multiply Twinned Martensite Plates in Rapidly Solidified Ni₃Al-based Superalloys[J]. *Materials Letters*, 2019, 250: 147—150.
- [38] BOULLAY P, SCHRYVERS D, BALL J M. Nano-Structures at Martensite Macrotwin Interfaces in Ni₆₅Al₃₅[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(5): 1421—1436.

- [39] 王永前, 张春生, 赵连城. NiAl 合金的 B2→L₁₀(3R)马氏体相变晶体学研究[J]. 稀有金属, 1996, 20(6): 414—420.
WANG Yong-qian, ZHANG Chun-sheng, ZHAO Lian-cheng. Crystallographic Study on B2→L₁₀ (3R) Martensitic Transformation of NiAl Alloy[J]. Rare Metals, 1996, 20(6): 414—420.
- [40] LI Qiu-yang, TIAN Su-gui, YU Hui-chen, et al. Effects of Carbides and Its Evolution on Creep Properties of a Directionally Solidified Nickel-Based Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 633: 20—27.
- [41] DONG Xiao-ming, ZHANG Xiao-li, DU Kui, et al. Microstructure of Carbides at Grain Boundaries in Nickel Based Superalloys[J]. Journal Materials Science & Technology, 2012, 28(11): 1031—1038.
- [42] WANG D, ZHANG J, LOU L H. Formation and Stability of Nano-Scaled M₂₃C₆ Carbide in a Directionally Solidified Ni-Base Superalloy[J]. Materials Characterization, 2009, 60(12): 1517—1521.
- [43] 董建新, 张麦仓, 谢锡善. 镍基 IN718 合金时效过程中 α -Cr 相演变行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 30(11): 1153—1156.
DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, XIE Xi-shan. Evolution of α -Cr Phase in Ni Based IN718 Alloy during Aging[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 30(11): 1153—1156.
- [44] 王改莲, 吴翠微, 张麦仓, 等. α -Cr 在 Inconel718 合金中析出行为的微观分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(1): 37—40.
WANG Gai-lian, WU Cui-wei, ZHANG Mai-cang, et al. Micro Analysis of Precipitation Behavior of α -Cr in Inconel718 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(1): 37—40.
- [45] 董建新, 张麦仓, 曾燕屏, 等. 高 Cr 高温合金中 α -Cr 相的析出方式[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(2): 186—190.
DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, ZENG Yan-ping, et al. Precipitation Mode of α -Cr Phase in High Cr Superalloy[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2002, 24(2): 186—190.
- [46] PÉREZ P, GONZÁLEZ P, GARCÉS G, et al. Microstructure and Mechanical Properties of a Rapidly Solidified Ni₃Al-Cr Alloy after Thermal Treatments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 302: 137—145.
- [47] HUO Jia-jie, SHI Qian-ying, ZHENG Yun-rong, et al. Microstructural Characteristics of σ Phase and P Phase in Ru-Containing Single Crystal Superalloys[J]. Materials Characterization, 2017, 124: 73—82.
- [48] TIAN Su-gui, WANG Ming-gang, LI Tang, et al. Influence of TCP Phase and Its Morphology on Creep Properties of Single Crystal Nickel-Based Superalloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(21/22): 5444—5451.
- [49] 赵希宏, 黄朝晖, 谭永宁, 等. 新型 Ni₃Al 基定向高温合金 IC10[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 20—24.
ZHAO Xi-hong, HANG Chao-hui, TAN Yong-ning, et al. A New Ni₃Al Based Directional Superalloy IC10[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 20—24.
- [50] KONDRAT E S Y, KRAPOSHIN V S, ANASTASIADI G P, et al. Experimental Observation and Crystallographic Description of M₇C₃ Carbide Transformation in Fe-Cr-Ni-C HP Type Alloy[J]. Acta Materialia, 2015, 100: 275—81.
- [51] YU Zhu-huan, LIU Lin, ZHAO Xin-bao, et al. Effect of Solidification Rate on MC-Type Carbide Morphology in Single Crystal Ni-Base Superalloy AM3[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(10): 1835—1840.
- [52] LI X W, WANG L, DONG J S, et al. Effect of Solidification Condition and Carbon Content on the Morphology of MC Carbide in Directionally Solidified Nickel-base Superalloys[J]. Journal Materials Science & Technology, 2014, 30(12): 1296—1300.
- [53] WU Jing, LI Chong, LIU Yong-chang, et al. Influences of Solution Cooling Rate on Microstructural Evolution of a Multiphase Ni₃Al-Based Intermetallic Alloy[J]. Intermetallics, 2019, 109: 48—59.