单晶高温合金超薄铸件雀斑形成机制

姜卫国^{1, 2},张珊珊^{1, 2},董 琳^{1, 2},李凯文³,胡玉坤^{1, 2},孟祥斌^{1, 2}

(1. 潍坊科技学院智能制造学院,山东寿光 262700;2. 潍坊市先进动力系统用热端材料及单晶部件制备重点实验室, 山东寿光 262700;3. 中国科学院金属研究所,辽宁沈阳 110016)

> **摘要:**采用定向凝固工艺,在不同抽拉速率条件下,制备了厚度0.6 mm不同结构单晶高温合金薄板铸件。利用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、X射线三维成像(XCT)观察了铸件宏观组织及枝晶形貌,采用ProCAST软件模拟了铸件定向凝固过程。结果表明:抽拉速率为1 mm/min时,糊状区从凝固炉中心位置向炉壁方向倾斜,中心位置先凝固,炉壁方向后凝固,后凝固枝晶间的液体对先凝固枝晶间进行补缩,先凝固枝晶受径向补缩流动或其引起的热溶质对流冲击导致枝晶断裂,破碎枝晶在先凝固区域长大形成倾斜枝晶或雀斑缺陷;抽拉速率为6 mm/min时,糊状区虽然从中心位置向炉壁方向倾斜,但枝晶间径向补缩流动被发达二次枝晶阻挡,流动冲击较弱,只有极个别枝晶倾斜,无雀斑形成。 关键词:单晶高温合金;定向凝固;枝晶形态;雀斑;补缩流动

随着单晶高温合金中难熔元素含量不断增高及叶片结构日益复杂化[1-3], 雀斑已 成为单晶铸件中常见的一种铸造缺陷,一旦形成便无法通过热处理工艺去除,这将 严重损害合金性能,增加铸件制备成本^[4]。单晶铸件中雀斑影响因素复杂,合金的成 分^[3, 5]、铸件结构^[6-9]、定向凝固工艺及参数^[2, 6, 10]等都会影响雀斑的形成过程。关于 单晶中雀斑形成机制,国内外已进行了大量工作。通常认为:定向凝固过程中,W 和Re等元素富集于枝晶干,而Al和Ti偏析元素富集在枝晶间,糊状区内的熔体密度 越来越小,糊状区上方熔体的密度基本不变化,上重下轻的密度反差引起隧道式的 强烈对流产生,糊状区内的枝晶臂容易被热对流冲击而折断,折断的枝晶臂在铸件 表面聚集或长大,最终形成链状雀斑^[11-12]。依据以上机理,雀斑应该在整个单晶截 面上都有分布,但现有研究表明^[8,13-15]:雀斑一般都只分布在单晶铸件的表面某一区 域,如棱角位置等,而不是所有表面,而密度差引起的对流方向一般与定向凝固方 向一致,这表明单一的热对流并不是导致雀斑产生的唯一原因。已有工作表明^[7,16]: 铸件中枝晶间径向流动可导致突变截面表面枝晶的倾斜或雀斑缺陷产生。而单晶铸 件的凝固顺序一般是中心位置导热性差先凝固,而靠近炉壁的部分后凝固,凝固顺 序的不同可能会产生补缩流动^[17],还有,枝晶间距大小也影响雀斑的形成过程^[2, 18], 因此,为清晰定向凝固过程中雀斑的形成位置及相关机理,本研究中设计了0.6 mm 厚度变截面结构铸件,薄板铸件在定向凝固炉内沿径向分布,利用截面内有限枝晶 数量、不同枝晶间距及先后凝固顺序的不同,研究铸件结构及径向方向流动对雀斑 形成位置的影响及相关机理。

1 试验材料与方法

试验合金为第三代镍基单晶高温合金DD33,合金的名义成分见表1。利用注射 成形工艺制备0.6 mm变截面薄板蜡模,组合后蜡模的空间位置及具体尺寸见图1, A、B、C与D分别代表不同结构的铸件。采用常规工艺制备陶瓷型壳,利用高速凝固 工艺(HRS)及螺旋选晶法制备单晶铸件,合金浇注温度1 520 ℃,定向炉保温炉温

作者简介: 姜卫国(1968-),男,教授,主要研究方向为单晶 叶片制备及凝固缺陷控制。 电话: 13940072571,E-mail: jwg@wfust.edu.cn

中图分类号:TG132.3⁺3 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2024) 10-1359-08

基金项目:

山东省自然科学基金 (ZR2022ME066)资助; 潍坊市科技发展计划 (2022ZJ1097)资助。 收稿日期: 2023-12-25收到初稿, 2024-02-26收到修订稿。

	Table 1 Nominal chemical composition of the DD33 single crystal superalloy										$w_{\rm B}/\%$	
Cr	Co	W	Mo	Re	Al	Ti	Hf	С	Та	Ni		
2.5	9.0	6.0	1.5	4.0	6.0	0.2	0.1	0.01	8.0	余量		







度1 500 ℃, 抽拉速率分别为1 mm/min和6 mm/min。

定向凝固结束后,去除型壳,利用电火花线切割 切取单晶板铸件,然后采用盐酸(75% Vol.)+双氧水 (25% Vol.)腐蚀铸件,腐蚀时间为5~10 min,然后取 出铸件用水清洗,干燥后观察铸件宏观枝晶组织。沿 单晶生长方向,在单晶板铸件起始异常枝晶处且垂直 于定向凝固[001]方向,采用电火花线切割切取试样, 用于观察径向横截面组织,靠近炉壁的方向为外侧, 靠近凝固炉中心的位置为内侧,采用树脂冷镶法镶嵌 试样,经150[#]-2000[#]砂纸磨光后进行抛光,然后进行化 学腐蚀,腐蚀剂成分为4 g CuSO₄+10 mL HCl+20 mL H₂O。利用金相显微镜(OM)观察铸态枝晶组织,采 用Image Tool和Image Pro Plus分布统计铸件的不同位置 的共晶含量及一次枝晶间距,视场数量不少于5个,测 量后计算平均值,一次枝晶间距的计算公式为

$$\lambda_1 = \sqrt{S/N} = \sqrt{1/n_1}$$
 (1)
次枝晶间距; S为视场所包含的面积; N为

视场内所包含的枝晶数; n₁为单位面积内的枝晶数。 沿单晶铸件生长方向,利用电火花线切割切取宽 度为1 mm的长条形样品(包含正常枝晶及起始异常枝 晶部分),利用X射线层析扫描技术(XCT)观察枝晶

空间位置及生长路径。利用ProCAST模拟铸件的凝固

温度场及固液界面形状,具体模拟参数见文献[6]。

2 结果与讨论

式中: 心为一

2.1 不同抽拉速率下铸件的枝晶组织

拉速为1 mm/min时,单晶薄板铸件宏观组织见图 2,可观察到所有结构铸件在靠近凝固炉中心位置都



图2 拉速1mm/min时单晶薄板铸件宏观组织 Fig. 2 Macrostructures of the single crystal thin plate castings at withdrawal rate of 1 mm/min

有异常枝晶形成,其起始位置为图2中圆圈区域,但 其位置并不在突变截面处,且异常枝晶起始位置都不 相同,这表明异常枝晶形成与突变截面结构没有关联 性。单晶薄板中异常枝晶放大图见图3,铸件A中靠近 定向炉中心位置处异常枝晶为典型的倾斜枝晶,见图 3a中白色箭头所指位置,该倾斜枝晶形成后,沿定向 凝固方向生长为杂晶。铸件B中为短小的倾斜枝晶,。 倾斜枝晶长大尺寸有限,在铸件靠近定向凝固炉中心 位置形成雀斑缺陷,见图3b中箭头所指位置。铸件C中 发现有倾斜枝晶形成,并沿定向凝固方向生长,也形 成了类似(杂晶)雀斑组织,见图3c中白色箭头所指 方向。铸件D中,枝晶倾斜明显,同时,还有雀斑缺陷 形成,见图3d中白色箭头所指方向。

拉速为1 mm/min时,铸件A、B、C和D的枝晶形 貌见图4a,枝晶间距统计位置为靠近炉壁区域,其值 分别为(260±20)μm、(240±12)μm、(253±16)μm 和(235±14)μm。异常枝晶起始位置的径向横截面上 共晶分布及含量见图4b,可明显观察到,在所有铸件 中,靠近炉壁位置的共晶含量都明显少于靠近凝固炉 中心位置的共晶含量。四种铸件中,靠近炉壁位置的 共晶含量只有大约1%,而靠近凝固炉中心位置共晶含 量大约为3.6%。

拉速为6 mm/min时,单晶薄板铸件宏观组织见图 5,圆圈位置为异常枝晶起始位置,其局部放大图见



Fig. 3 The dendritic morphologies of the single crystal thin plate castings at withdrawal rate of 1 mm/min



(a)不同位置共晶分布

晶分布 (b)不同位置共晶含量 图4 拉速1mm/min时不同铸件中的共晶分布及含量

Fig. 4 The distributions and the volume fractions of the eutectic of different castings at withdrawal rate of 1 mm/min



图5 拉速6 mm/min时单晶薄板铸件宏观组织 Fig. 5 The macrostructures of the single crystal thin plate castings at withdrawal rate of 6 mm/min

图6。可观察到异常枝晶明显减少,但在铸件靠近定 向炉中心位置的局部仍然有个别异常枝晶形成,其分 布与变截面结构没有关联性,且异常枝晶起始位置不 同。铸件A表面上靠近定向炉中心位置处发现单根倾斜 枝晶,见图6a中白色箭头所指位置,该倾斜枝晶形成 后,沿定向凝固方向生长,尺寸较大。铸件B中发现短 小的倾斜枝晶,该倾斜枝晶尺寸较小,见图6b中箭头 所指位置。铸件C中发现有倾斜枝晶形成,并沿定向凝 固方向生长,但尺寸非常有限,见图6c中白色箭头所 指方向。铸件D中,只观察到有很短的一根倾斜枝晶形 成,见图6d中白色箭头所指方向。

试验研究 FOUNDRY 存造 1361

拉速为6 mm/min时,铸件A、B、C和D的枝晶形 貌见图7a,枝晶间距统计位置为靠近炉壁区域,其值 分别为(251±16)µm、(237±22)µm、(238±21)µm





和(234±28)μm,所有铸件中的枝晶间距相对比拉速 1 mm/min时的枝晶间距都变小,二次枝晶变得发达。 铸件A、B、C和D在异常枝晶起始位置处的横截面上的 共晶体积分数统计结果见图7b。所有铸件中,靠近炉 壁位置的共晶含量都略少于其靠近凝固炉中心位置的 共晶含量。四种铸件中,靠近炉壁位置的共晶含量只 有大约6.0%,而靠近凝固炉中心位置共晶含量大约为 6.5%。



(a)不同位置共晶分布 (b)不同位置共晶含量 图7 拉速6 mm/min时不同铸件中的共晶分布及含量

Fig. 7 The distributions and the volume fractions of the eutectic of different castings at withdrawal rate of 6 mm/min

拉速为1 mm/min时,铸件D的XCT结果见图8。图 8a为铸件的宏观组织,图8b为图8a中方框区域(异常枝 晶起始及生长区域)的局部放大,图8c-f为图8b中不同 区域位置的XCT形貌,从异常枝晶开始形成到长大, 可清晰观察到异常枝晶演化过程。异常枝晶起始位置 靠近凝固炉中心位置,起始位置稍下,枝晶形貌已发 生了变化,有短小的枝晶干出现,但没有明显的倾斜 及断裂现象发生,见图8c箭头所指位置。图8d中箭头 所指位置为倾斜枝晶干起始位置,随定向凝固过程的 进行,倾斜枝晶干长大,但长大尺寸非常有限,其生 长被旁边枝晶所压制,见图8e中下方箭头所指位置, 而上方箭头所指位置为尺寸有限的倾斜枝晶。随着定 向凝固生长,可清晰看到长大的倾斜枝晶及有限长大 的杂晶(雀斑),分别见图8f下方及上方箭头所指位 置。

2.2 不同抽拉速率下模拟结果

不同拉速条件下,不同结构单晶铸件定向凝固过 程中的径向温度梯度(d*T*/d_y或d*T*/d_x)分布见图9。拉 速为1 mm/min时,铸件A、B、C和D的径向温度梯度分



(a)取样位置; (b)(a)中局部放大; (c)对应(b)中A区域枝晶形貌; (d)对应(b)中B区域枝晶形貌; (e)对应(b)中C区域枝晶形貌; (f)对应(b)中D区域枝晶形貌
图8 拉速1 mm/min时铸件D的异常枝晶组织(XCT)
Fig. 8 Abnormal dendrite morphologies of the casting D at 1 mm/min



图9 不同拉速下铸件凝固温度梯度分布 Fig. 9 The distributions of temperature gradient of the castings at different withdrawal rates

布明显不同,红色圆圈位置径向温度梯度差别较大, 范围大约为6~10 ℃/m,该温度范围内与图2中异常枝晶 形成的位置基本相一致。拉速为6 mm/min时,铸件A、 B、C和D的径向温度梯度分布与拉速为1 mm/min时差 别不大,对应红色圆圈位置径向温度梯度差别范围大 约也为6~10 ℃/mm,该温度范围内与图5中异常枝晶形 成的位置也基本相一致。

不同拉速下,不同铸件的糊状区形状见图10。拉 速为1 mm/min与6 mm/min时,相同结构铸件的固液界 面形状相似,基本都是由靠近凝固炉中心位置向炉壁 方向倾斜,只是倾斜程度略有差别。

2.3 雀斑的形成机制及影响因素

定向凝固过程中,铸件型壳靠近炉壁的部分直 接辐射加热,而型壳靠近炉中心的部分受到近炉壁型 壳的阻挡作用,导致型壳近炉壁侧温度要高于近中心 位置。当型壳越过定向炉隔热挡板进入到冷区时,型 壳近炉壁处对水冷环直接散热而导致其具有较高的温 度梯度,形成了较窄的糊状区,而型壳近中心侧远离 水冷环,其冷却速度相对较慢,导致较低的温度梯度 和较宽的糊状区。同时,单晶铸件定向凝固过程中, 其温度分布是不均匀的,即铸件内温度梯度不是单向 的,其他方向也存在温度梯度^[19]。由于存在空间梯度 的影响,即糊状区形状为空间曲面^[9,20]。由于超薄结 构铸件厚度方向很薄,可不考虑厚度方向温度梯度 的影响,这样径向温度梯度就可在同一平面内全部 表示出来。铸件定向凝固温度梯度模拟结果(图9)表 明:铸件结构影响径向温度梯度的分布,但对糊状区 形状影响较小,所有结构组件的凝固糊状区都呈倾斜 状,即由近炉中心位置向炉壁方向倾斜,同时,铸件 1364 转告 FOUNDRY 试验研究

靠近炉中心位置的糊状区宽度要大于靠近炉壁的糊状 区宽度(图10)。

薄板定向凝固过程中,糊状区内的枝晶沿Z轴方向 排列,由于厚度很小,厚度方向上的枝晶个数非常有 限,枝晶可近似视为平面排列。依据已有文献雀斑形 成机制^[5, 14, 21-23],密度差引起的热对流导致的异常枝晶 或雀斑应分布在整个铸件表面上,但试验结果表明: 几乎所有铸件的异常枝晶都发生在铸件的靠近凝固炉 中心位置,这说明热对流可能不是引起异常枝晶或雀 斑产生的唯一原因。



Fig. 10 The mushy zones of the castings at different withdrawal rates

模拟结果表明:所有铸件定向凝固过程中其糊 状区内温度是不均匀的,不均匀的温度分布则可导致 糊状区内枝晶凝固顺序不同。靠近凝固炉中心位置 先凝固,靠近炉壁位置后凝固,先凝固枝晶收缩,导 致后凝固枝晶间的液体对先凝固枝晶间进行补缩。一 方面,由于铸件厚度方向很薄,枝晶数量非常有限, 因此,补缩将导致枝晶间液体流动。径向温度梯度越 大,枝晶间的径向流动越强,径向流动液流冲击糊状 区内的枝晶,当冲击强度足够大时,枝晶可能会断裂 并被冲击到先凝固的枝晶间区域并受限长大,也有部 分断裂的枝晶被后续的补缩液所回熔而形成更小的枝 晶碎片;另一方面,由于径向补缩流动的枝晶间液体 成分更接近共晶成分,且其补缩的位置更靠近铸件内 侧,还可能会导致该区域热溶质对流的产生,热溶质 对流将冲击糊状区内的枝晶,导致枝晶臂断裂,断裂 的枝晶臂在枝晶间受限长大,最终形成雀斑或倾斜枝 晶(图11)。当拉速为1 mm/min时,枝晶间距大, 枝晶间补缩通畅,径向截面内共晶含量差异较大,补 缩流动强且对枝晶冲击大,这可能更容易形成断裂枝 晶,形成雀斑倾向增加。共晶统计结果也表明,低拉 速时,铸件不同位置枝晶间共晶含量差异明显,见图 4b。倾斜或断裂枝晶较多且位置与补缩方向相反(图 8),这表明枝晶间补缩流动确实存在且该流动具有一 定的流动冲击强度。当拉速为6 mm/min时,枝晶数量 增多,枝晶间距小,二次枝晶发达,对补缩流动阻碍 作用强,径向截面内共晶含量差异较小,这说明枝晶 间流动相对较弱,断裂枝晶较少,只形成少量的倾斜 枝晶,见图6。



(a)糊状区纵截面
(b)糊状区横截面
图11 铸件凝固过程中补缩凝固流动示意图
Fig. 11 Schematic of the feeding flow of the casting during solidification process

3 结论

(1)拉速为1 mm/min时,糊状区界面从凝固炉中 心位置向炉壁方向倾斜,径向补缩流动强导致先凝固 区域枝晶间共晶量增多,枝晶受径向流动冲击从而可 能导致枝晶断裂,破碎枝晶长大形成倾斜枝晶或雀斑 缺陷。

(2) 拉速为6 mm/min时, 径向截面内枝晶间共晶

含量基本相同,径向补缩流动被发达枝晶阻挡,流动 较弱,只有极个别枝晶倾斜,无雀斑形成。

(3)定向凝固过程中,糊状区内径向温度梯度分 布不同引起枝晶间液体补缩,导致补缩流动或引起热 溶质对流的产生,致使枝晶受冲击并形成倾斜枝晶或 断裂枝晶碎片,枝晶碎片受限长大,形成雀斑,其形 成位置与铸件变截面结构没有关联性。

参考文献:

- [1] 高斯峰,刘林,胡小武,等.镍基高温合金定向凝固过程中雀斑缺陷研究进展[J].材料科学与工程学报,2010,28(1):145-151.
- [2] 陈晶阳,吴文津,李青,等.采用低温度梯度HRS工艺制备的镍基单晶高温合金雀斑组织 [J].中国有色金属学报,2018,28 (12):2485-2498.
- [3] TIN S, POLLOCK T M. Predicting freckle formation in single crystal Ni-base superalloys [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 7199–7205.
- [4] 王志成,李嘉荣,刘世忠,等.单晶高温合金雀斑研究进展 [J]. 材料工程,2021,49 (7):1-9.
- [5] WANG Fu, MA Dexin, ZHANG Jun, et al. Investigation of segregation and density profiles in the mushy zone of CMSX-4 superalloys solidified during downward and upward directional solidification processes [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2015, 620: 24–30.
- [6] HAN Dongyu, JIANG Weiguo, XIAO Jiuhan, et al. Investigation on freckle formation and evolution of single-crystal nickel-based superalloy specimens with different thicknesses and abrupt cross-section changes [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2019, 805: 218– 228.
- [7] LI Qiudong, SHEN Jun, QIN Ling, et al. Investigation on freckles in directionally solidified CMSX-4 superalloy specimens with abrupt cross section variation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 691: 997–1004.
- [8] 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.
- [9] HAN Dongyu, JIANG Weiguo, XIAO Jiuhan, et al. Influence of geometric structure and feeding behavior of casting on freckle formation during directional solidification of a Ni-based single-crystal superalloy [J]. Crystal Research and Technology, 2021, 56 (5): 1–11.
- [10] LI Qiudong, SHEN Jun, QIN Ling, et al. Investigation on local cooling in reducing freckles for directionally solidified superalloy specimens with abruptly varying cross-sections [J]. Materials Characterization, 2017, 130: 139–148.
- [11] 马德新. 高温合金单晶铸件中形状因素对雀斑缺陷的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (12): 4357-4364.
- [12] AUBURTIN P, WANG T, COCKCROFU S L, et al. Freckle formation and freckle criterion in superalloy castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31B: 1–11.
- [13] MA D, BüHRIG-POLACZEK A. The influence of surface roughness on freckle formation in directionally solidified superalloy samples [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43 (4): 671–677.
- [14] 马德新. 定向凝固的复杂形状高温合金铸件中的雀斑形成 [J]. 金属学报, 2016, 52(4): 426-436.
- [15] HONG Jianping, MA Dexin, WANG Jun, et al. Geometrical effect of freckle formation on directionally solidified superalloy CM247 LC components [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 648: 1076–1082.
- [16] QIN Ling, SHEN Jun, LI Qiudong, et al. Effects of convection patterns on freckle formation of directionally solidified nickle-based superalloy casting with abruptly varying cross-setions [J]. Journal of Crystal Growth, 2017, 466: 45–55.
- [17] MAD, WUQ, BüHRIG-POLACZEK A. Some new observations on freckle formation in directionally solidified superalloy components [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011, 43 (2): 344–353.
- [18] 李相伟,王莉,刘心刚,等. HRS和LMC工艺对第三代镍基单晶高温合金DD33中显微孔洞的影响 [J]. 材料研究学报,2014,28 (9):656-662.
- [19] 卢玉章,申健,郑伟,等.单晶铸件凝固过程工艺优化的数值模拟 [J]. 材料工程,2016,44(11):1-8.
- [20] XIAO J, JIANG W, HAN D, et al. Evolution of crystallographic orientation and microstructure in the triangular adapter of grain continuator of a 3rd-generation single crystal superalloy casting during directional solidification [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 898: 1–12.
- [21] 马德新,赵运兴,徐维台,等.单晶高温合金异形铸件中的雀斑研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021,41 (11):1345-1349.

- [22] 闫学伟,许庆彦,杨雪梅,等.单晶叶片定向凝固过程雀斑缺陷数值模拟研究 [J]. 特种铸造及有色合金,2020,40(12):1328-1334.
- [23] SCHNEIDER M C, GU J P, BECKERMANN C, et al. Modeling of micro- and macrosegregation and freckle formation in single-crystal nickel-base superalloy directional solidification [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28A: 1517–1531.

Formation Mechanism of Freckle of Single Crystal Superalloy Casting with Ultrathin Thickness

JIANG Wei-guo^{1, 2}, ZHANG Shan-shan^{1, 2}, DONG Lin^{1, 2}, LI Kai-wen³, HU Yu-kun^{1, 2}, MENG Xiang-bin^{1, 2} (1. School of Intelligent Manufacturing, Weifang University of Science and Technology, Shouguang 262700, Shandong, China; 2. Weifang Key Laboratory of High-Temperature Materials and Single Crystal Components Fabrication Technology for Advanced Engine System, Shouguang 262700, Shandong, China; 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract:

Single crystal plates with a thickness of 0.6 mm and different geometric structures were prepared by directional solidification under different withdrawal rates. The macroscopic morphology and dendrite microstructure of the castings were observed via optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM)and X-ray computed tomography (XCT). The experimental results showed that the mushy zone was tilted from the center of the furnace to the wall of the solidification furnace at a withdrawal rate of 1 mm/min. The part of the casting near the center of the furnace solidified earlier than that near the furnace wall region. The liquid located in the interdendritic region near the furnace center fed the shrinkage of the interdendritic region near the furnace wall. Both the radial feeding flow and thermosolutal convection induced by radial feeding impinged the dendrite, and the dendrite arm was tiled or broken. Then, the tiled and broken dendrites continued to grow and form large tiled dendrites or freckles. When the withdrawal rate was 6mm/min, the mushy zone was tilted from the center to the wall of the solidification furnace. However, the feeding flow was blocked by the developed second dendrites and the intensity of the flow weakens. Therefore, only one or two tiled dendrites and no freckles could be found in the castings.

Key words:

single crystal superalloy; directional solidification; freckle; dendrite morphology; feeding flow