

型壳材料对高温合金叶片组织和性能的影响

李海松^{1,2} 张琼元^{1,2} 伍 林^{1,2} 杨照宏^{1,2} 杨功显^{1,2}

(1.长寿命高温材料国家重点实验室; 2.东方电气集团东方汽轮机有限公司)

摘 要 采用数值模拟方法并结合试验,研究了型壳材料对高温合金叶片组织和性能的影响。结果表明,无陶瓷保温棉时,氧化铝型壳铸件的冷却速率大于莫来石型壳,氧化铝型壳铸件组织及性能较优;有陶瓷保温棉时,氧化铝型壳铸件叶根处冷却速率略低于莫来石型壳铸件,叶身处冷却速率高于莫来石型壳铸件,莫来石型壳铸件叶根处组织及性能比氧化铝型壳铸件略优,叶身组织及性能比氧化铝型壳铸件略差。有陶瓷保温棉时的铸件叶根组织数值模拟结果和试验结果符合。

关键词 型壳材料;高温合金叶片;数值模拟;组织

中图分类号 TG132.3⁺3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.021 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Ceramic Shell Material on the Microstructure and Properties of Superalloy Blade

Li Haisong^{1,2}, Zhang Qiongyuan^{1,2}, Wu Lin^{1,2}, Yang Zhaohong^{1,2}, Yang Gongxian^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Long-Life High Temperature Materials;
2.Dongfang Electric Corporation Dongfang Turbine Co., Ltd.)

Abstract: The effects of ceramic shell materials on microstructure and properties of superalloy blade were investigated by numerical simulation combined with experiments. The results reveal that the cooling rate of alumina shell casting is greater than that of mullite shell casting without ceramic insulating cotton wrapping, and the microstructure and properties of alumina shell casting are better. When the casting is wrapped with ceramic insulating cotton, although the cooling rate of airfoil of alumina shell casting is still greater than that of mullite shell casting, the cooling rate of root of alumina shell casting is less than that of mullite shell casting, which means that the microstructure and properties of root of mullite shell casting are better, while the airfoil of that are worse. The numerical simulation results of the airfoil is coincided with the experimental ones when wrapped with ceramic insulating cotton.

Key Words: Ceramic Shell Material, Superalloy Blade, Numerical Simulation, Microstructure

熔模铸造作为无余量近净成形方法,被广泛应用于重型燃机高温部件的生产制造,特别是高温透平叶片。高温透平叶片作为重型燃机最核心的热端部件之一,品质要求高,结构复杂,制造难度大,一般采用镍基高温合金。镍基高温合金作为沉淀强化型合金,其 γ' 相体积分数、尺寸、形状以及共晶尺寸、碳化物形貌严重影响高温合金的强度和高温性能。陶瓷型壳通过热传导控制高温合金的冷却速率,进而影响凝固相成分及组成。因此,陶瓷型壳对铸件组织及性能的影响很大。

硅溶胶型壳工艺是最广泛的精铸生产工艺,而精铸件的品质很大程度上取决于型壳的品质。张松泉等^[1]对精密铸造型壳工艺进行了研究,但并未研究型壳工艺对铸件性能的影响。KAVOOSI V 等^[2]研究了铝基和锆基型壳在不同冷却速率下对 IN738LC 合金铸件凝固行为和微观组织的影响,但并未考虑陶瓷保温棉的影响。KONRAD C H 等^[3]研究了 IN738LC 合金铸件传热系数和型壳材料参数,确定了型壳预热温度和型壳层数对铸件晶粒尺寸和二次枝晶臂间距的影响。唐亚俊等^[4]研究了电熔莫来石+刚玉制成的型壳对定向凝固叶片表面品质的影响。

本课题针对不同的保温棉包裹方式,研究了莫来石型壳和氧化铝型壳对 IN738LC 镍基铸造合金高温透平叶片组织及性能的影响,以期在高温透平叶片陶瓷型壳选材提供参考。

收稿日期:2020-06-19;修改稿收到日期:2020-08-21
第一作者简介:李海松,男,1987 年出生,工程师,四川德阳(618000),E-mail:675513781@qq.com
引用格式:李海松,张琼元,伍林,等. 型壳材料对高温合金叶片组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):103-107.
LI H S, ZHANG Q Y, WU L, et al. Influence of ceramic shell material on the microstructure and properties of superalloy blade[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):103-107.

1 热物性参数

试验合金为 IN738LC 镍基高温合金,通过 JMat-

Pro 材料性能模拟软件计算了合金的热导率、密度和热焓随温度的变化,见图 1。

陶瓷型壳材料分别为莫来石和氧化铝,其热导率和

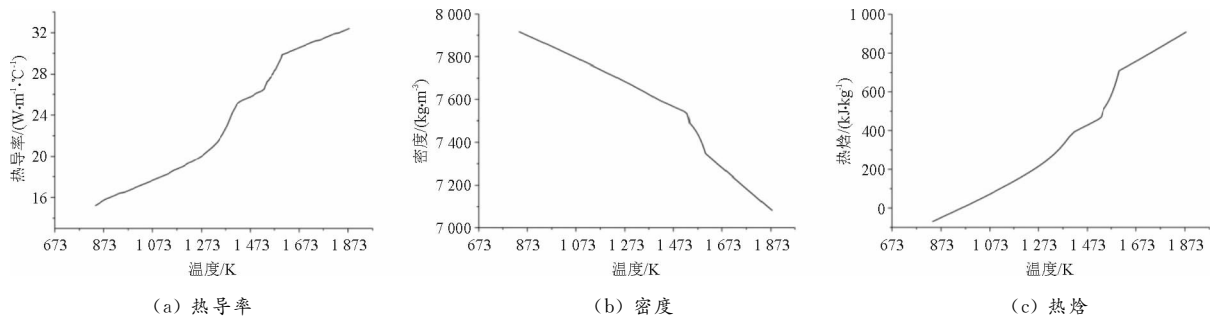


图 1 IN738LC 合金热物性能参数

Fig.1 Thermophysical property parameters of IN738LC alloy

比热容采用 ProCAST 自带数据库数据,见图 2。莫来石和氧化铝的密度分别为 3.15、4.0 g/cm³。由两种型壳材料的热物性参数可以大概计算出,假设型壳体积相同,在型壳预热至一定温度时,氧化铝型壳整体蓄热量约为莫来石型壳的 1.5 倍;氧化铝型壳高温段(1 073~1 473 K)的传热速率约为莫来石型壳的 2 倍。由此可推断出,未包裹保温棉的型壳,在预热后的转运过程中,每降低 1 K,氧化铝型壳所用时间约为莫来石型壳的 3/4,即氧化铝型壳冷却更快,氧化铝型壳的冷却速率约为莫来石型壳的 4/3 倍。

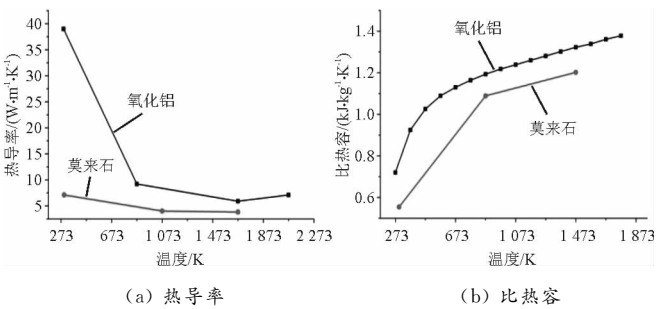


图 2 莫来石材料及氧化铝材料热物性参数

Fig.2 Thermophysical property parameters of mullite and alumina

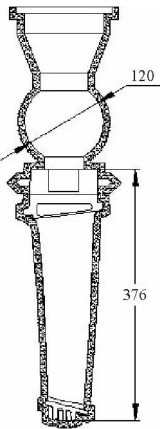


图 3 浇注系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the gating system

表 1 不同温度下的型壳界面传热系数^[3]

Tab.1 The heat transfer coefficient of the interface under different temperatures W/(m²·K⁻¹)

温度/K	IN738LC/莫来石型壳	IN738LC/氧化铝型壳
1 023	150	180
1 273	290	210
1 473	380	920
1 573	420	1 840
1 673	430	1 860
1 743	460	1 884

2 数值模拟

针对某重型燃机第 4 级动叶片精密铸造工艺,采用 ProCAST 软件计算了不同保温棉包裹条件下的铸件温度场、冷却速率、晶粒尺寸和二次枝晶间距分布。数值模拟过程中浇注温度设为 1 743 K、型壳预热温度为 1 453 K、型壳层数为 8 层。浇注系统示意图及模拟用边界条件参数分别见图 3 和表 1。微观组织参数采用 ProCAST 数据库中 Ni 合金参数,即最大体形核密度为 10⁸/m³,标准方差形核过冷度为 5 K,平均形核过冷度为 20 K。

2.1 无陶瓷保温棉

首先对无陶瓷保温棉的氧化铝型壳和莫来石型壳进行数值模拟计算,其冷却速率、枝晶晶粒半径和二次枝晶间距见图 4。可以看出,无陶瓷保温棉时,氧化铝型壳铸件的冷却速率快,对应的枝晶晶粒半径和二次枝晶间距比莫来石型壳铸件的小。

从铸件自下而上(叶顶到叶根)等距离选取 5 点,量化两种型壳材料下铸件的冷却速率、枝晶晶粒半径和二次枝晶间距在铸件各部位的变化,其中 0 代表叶顶部位,300 mm 代表叶根部位,见图 5。可以看出,自叶顶

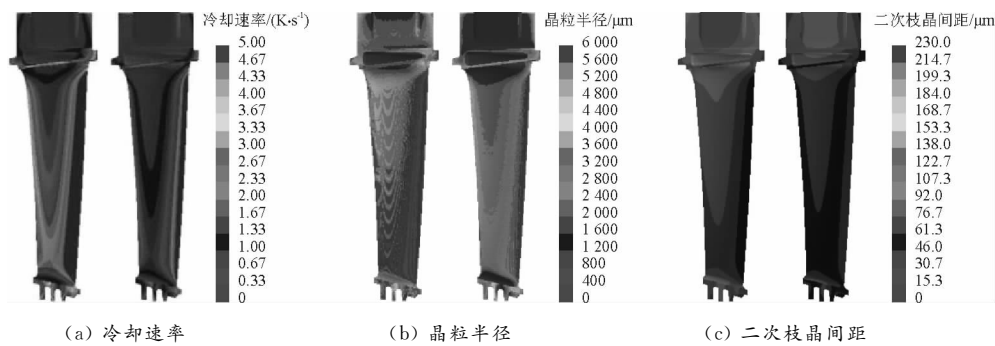


图 4 无陶瓷保温棉时氧化铝型壳(左)和莫来石型壳(右)铸件冷却速率及组织分布

Fig.4 The cooling rate and structure distribution of alumina (left) and mullite (right) shell casting without ceramic insulating cotton wrapping

到叶根,两种型壳材料的铸件冷却速率逐渐降低,枝晶晶粒半径逐渐增大,二次枝晶间距逐渐增大。这是因为铸件叶顶壁薄,蓄热量少,相同散热条件下,冷却速率更快;相反,叶根壁厚,蓄热量多,相同散热条件下,冷却速率慢。冷却速率越快,晶粒形核数越多,枝晶生长越快,

晶粒尺寸越小,二次枝晶间距越小。还可以看出,氧化铝型壳的铸件冷却速率比莫来石型壳的铸件冷却速率大,越靠近叶顶,冷却速率差距越大;氧化铝型壳铸件的枝晶晶粒半径和二次枝晶间距比莫来石型壳铸件的小。由此也可推断出,无陶瓷保温棉,氧化铝型壳铸件的力

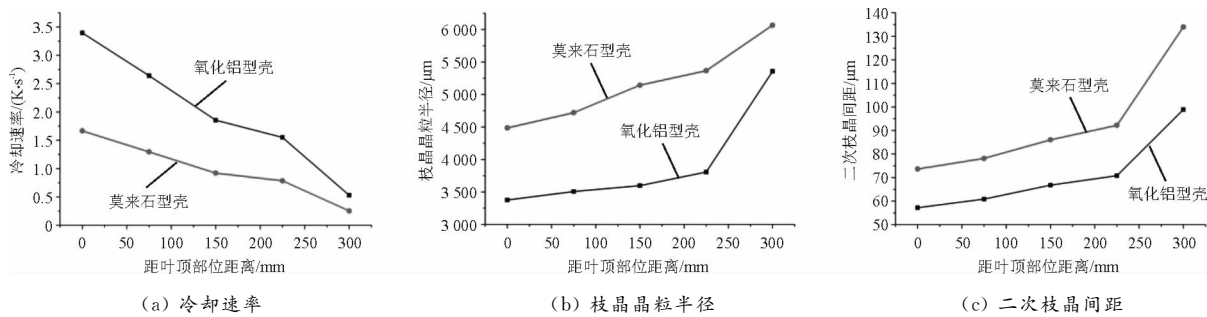


图 5 无陶瓷保温棉时铸件自叶顶到叶根冷却速率及组织分布

Fig.5 The cooling rate and structure distribution of castings from the tip to the root without ceramic insulating cotton

学性能要优于莫来石型壳的。

2.2 有陶瓷保温棉

对包裹了陶瓷保温棉的氧化铝型壳和莫来石型壳进行数值模拟,陶瓷保温棉采用摩根产 6 mm 和 13 mm 的厚度,叶根到叶身中部包裹 13 mm 厚,叶身中部到叶顶包裹 6 mm 厚。两种型壳材料铸件的冷却速率、枝晶晶粒半径和二次枝晶间距见图 6。可以看出,包裹

陶瓷保温棉后的两种型壳铸件的冷却速率均显著减小,除排气边外,铸件其他部位冷却速率均小于 1 K/s;对应的铸件枝晶晶粒半径和二次枝晶间距增大。还可以看出,包裹陶瓷保温棉后,两种型壳铸件的冷却速率、枝晶晶粒半径和二次枝晶间距的差值变小。由此可推断出,包裹陶瓷保温棉后的两种型壳铸件的力学性能接近,差异性减小。

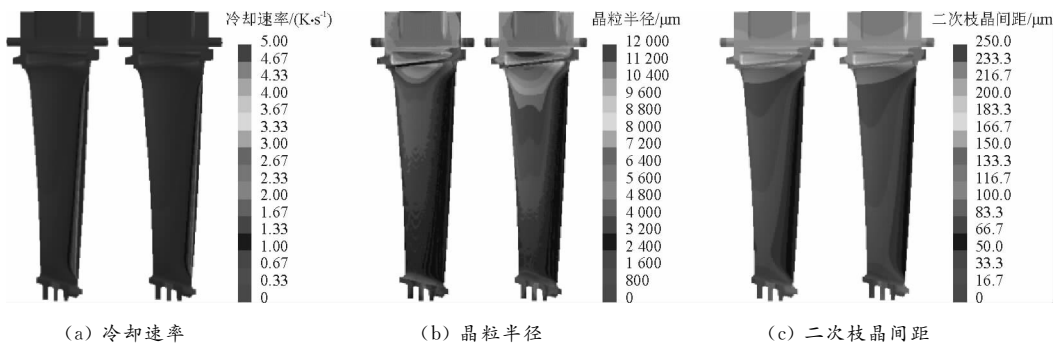


图 6 有陶瓷保温棉时氧化铝型壳(左)和莫来石型壳(右)铸件冷却速率及组织分布

Fig.6 The cooling rate and structure distribution of alumina (left) and mullite (right) shell casting wrapped with ceramic insulating cotton

为了更好的比较评估铸件力学性能,从铸件自下而上(叶顶到叶根)等距离选取 5 点,量化两种型壳材料下铸件的冷却速率、枝晶晶粒半径和二次枝晶间距在铸件各部位的变化,见图 7。可以看出,和无陶瓷保温棉时结果相似,整体上氧化铝型壳铸件冷却速率大于莫来石型壳

型壳铸件;氧化铝型壳铸件枝晶晶粒半径和二次枝晶间距小于莫来石型壳铸件。但是莫来石型壳铸件叶根部位的冷却速率稍大于氧化铝型壳铸件;莫来石型壳铸件叶根部位的枝晶晶粒半径和二次枝晶间距稍小于氧化铝型壳铸件。这说明莫来石型壳铸件叶根部位的力学

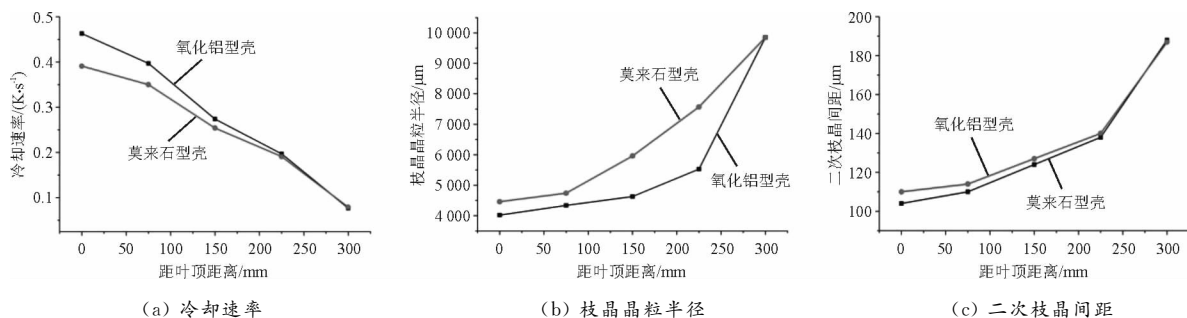


图 7 有陶瓷保温棉时铸件自叶顶到叶根冷却速率及组织分布

Fig.7 The cooling rate and structure distribution of castings from the tip to the root with ceramic insulating cotton

性能要优于氧化铝型壳铸件的。

出现上述现象的可能原因是,无陶瓷保温棉时,氧化铝型壳热导率大于莫来石型壳,且型壳外部直接接触大气,辐射和热对流可充分保证型壳热量的散失,故氧化铝型壳铸件冷却速率大,此时型壳热导率是制约铸件冷却速率的主要因素;有陶瓷保温棉时,对型壳和铸件均起到保温效果,由于莫来石型壳比热容小,来自铸件的热量使莫来石型壳温度增加,且增加值大于氧化铝型壳,导致莫来石型壳和陶瓷保温棉间温差大,热量传导快,但氧化铝型壳比热容大,蓄热能力强,此时型壳比热容和型壳保温棉间温差是制约铸件冷却的主要因素。

型壳温度变化见图 8,可以看出,相同时间内(浇注完成后的 55 s),莫来石型壳叶根处温度增加值为 181 K,叶身温度增加值为 105 K;氧化铝型壳叶根处温度增加值为 168 K,叶身温度增加值为 101 K。由图 2 可知,两种型壳材料在 1 473 K 时的比热容比为 1.2 : 1.3,由此可推断出,铸件叶根处型壳蓄热量的比值约为 1,而叶身处约为 1.04。说明两种型壳材料的叶根处型壳吸收铸件的热量几乎相等,而在叶身处氧化铝型壳吸收铸

件的热量大于莫来石型壳。莫来石型壳叶根处和氧化铝型壳叶根处温度差达到 13 K,在同样的蓄热量下,莫来石型壳铸件叶根处通过陶瓷保温棉热传导量大,冷却速率快,此时型壳保温棉温度差是制约铸件叶根冷却的主要方式;莫来石型壳铸件叶身处和氧化铝型壳铸件叶身处温度差仅为 4 K,型壳保温棉间热量传导速率小于型壳从铸件的吸热速率,导致氧化铝型壳冷却速率快,此时型壳比热容是制约铸件叶身冷却的主要方式。

3 试验验证

采用保温棉包裹后对氧化铝型壳和莫来石型壳进行浇注,并在氧化铝型壳的叶根处安装了测温 4 号热电偶,实际测温曲线和数值模拟温度曲线,见图 9。可以看出,数值模拟的温度曲线和实际测温曲线趋势基本一致,平均冷却速率实际值为 0.10 K/s,模拟值为 0.11 K/s,误差在 10% 左右。误差产生的原因主要是数值模拟过程中无法实现陶瓷保温棉的实体建模,此工作的研究将在后续开展。

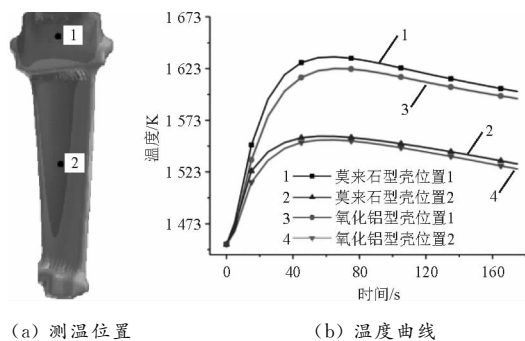


图 8 型壳温度变化

Fig.8 The temperature variation of the shell

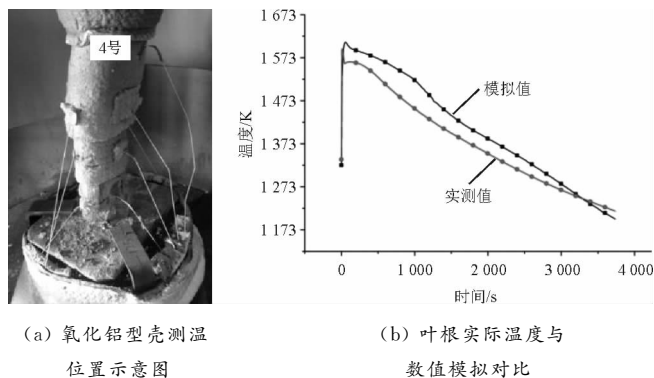


图 9 氧化铝型壳材料型壳及测温曲线

Fig.9 The position and thermometry curves of alumina shell

3.2 力学性能

从得到的氧化铝型壳铸件和莫来石型壳铸件的叶根上取标准拉伸试样,测试室温和高温拉伸性能。室温及高温拉伸性能结果见表 2,每只叶根可取 4 个试样,两种型壳材料的取样位置相同。

可以看出,莫来石型壳铸件的室温抗拉强度(σ_b)和屈服强度($\sigma_{0.2}$)略高于氧化铝型壳,其中抗拉强度增加了1.5%~3.0%,屈服强度增加了3.3%~4.7%;莫来石型壳的高温抗拉强度和屈服强度略高于氧化铝型壳,仅有 1 个试样的抗拉强度低于氧化铝型壳,其中高温抗拉强度增加了 0.7%~4.7%,高温屈服强度增加了 2.2%~5.4%。从伸长率(δ)可以看出,室温和高温下莫来石型壳铸件的伸长率略高于氧化铝型壳,其中室温伸长率增加了约 20%,高温的为 1.4%,但莫来石型壳

铸件的高温伸长率分散度较大。从断面收缩率(Z)可知,氧化铝型壳铸件的均高于莫来石型壳的。

表 2 氧化铝型壳和莫来石型壳铸件叶根处的力学性能
Tab.2 Tensile performance of alumina shell casting and mullite shell casting

	氧化铝型壳				莫来石型壳			
	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	Z / %	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	Z / %
室温	895	774	6.0	10	914	807	7.5	10
	867	768	5.5	7	893	794	7.5	10
	841	748	6.5	13	853	783	6.5	9
高温 (928 K)	1 015	672	9.0	16	1 057	704	12.0	16
	994	687	9.5	16	1 041	702	9.5	16
	973	673	9.0	19	952	691	8.5	13
	944	652	9.0	16	951	687	7.0	16

对室温拉伸试样的螺纹端部进行取样分析,结果见图10。可以看出,氧化铝型壳和莫来石型壳铸件的叶

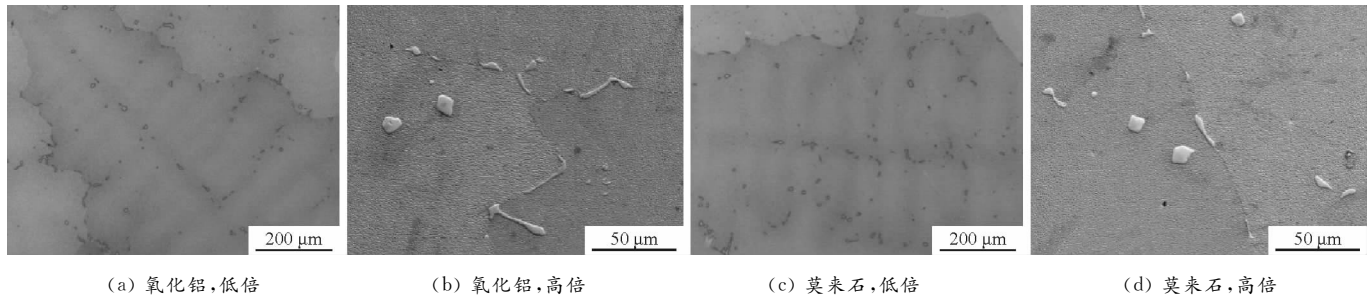


图 10 两种型壳材料的微观组织
Fig.10 Metallographic structure of two kinds of shells

根处二次枝晶臂间距,碳化物和 γ' 相尺寸、形貌相差不大,也间接证明了数值模拟结果的相对准确性。

对比有陶瓷保温棉的数值模拟结果,可以看出,模拟数据和试验数据均表明,莫来石型壳叶根处的性能略优于氧化铝型壳,模拟数据和试验数据一致。

4 结 论

(1)无陶瓷保温棉时,氧化铝型壳铸件的冷却速率大于莫来石型壳,此时氧化铝型壳铸件的组织较为细小、致密。

(2)有陶瓷保温棉时,氧化铝型壳铸件叶根处冷却速率略低于莫来石型壳,而叶身处冷却速率高于莫来石型壳,此时莫来石型壳叶根处组织略优于氧化铝型壳,叶身组织比氧化铝型壳的略差。

(3)无陶瓷保温棉时,型壳热导率是制约铸件冷却的主要因素;有陶瓷保温棉时,型壳比热容和型壳与保温棉间温度差是制约铸件冷却的主要因素。

(4)有陶瓷保温棉时,氧化铝和莫来石型壳浇注铸件的叶根组织及性能的数值模拟结果和试验结果相符。

参 考 文 献

[1] 张松泉,曾洪,朱广智,等. 失重法在熔模铸造制壳工艺开发中的应

用[J]. 东方汽轮机,2014(1): 36-39.
[2] KAVOOSIV, ABBASIS M, GHAZIMIRSAEDS M. Influence of cooling rate on the solidification behavior and microstructure of IN738LC superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 291-300.
[3] KONRAD C H, BRUNNER M, KYRGYZBAEV K. Determination of heat transfer coefficient and ceramic mold material parameters for alloy IN738LC investment castings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 181-186.
[4] 唐亚俊,于洋,张静华,等. 型壳耐火材料对无余量定向凝固叶片铸件质量的影响[J]. 特种铸造及有色合金,1991(1):20-22.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com