

高温合金空心叶片精密铸造用陶瓷型芯与型壳的研究现状

Research Status on Ceramic Cores and Shells for Superalloy Hollow Blades Investment Casting

康海峰,李 飞,赵彦杰,徐华苹,王 飞,吕和平,孙宝德
(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室,上海 200240)

KANG Hai-feng, LI Fei, ZHAO Yan-jie, XU Hua-ping,
WANG Fei, LYU He-ping, SUN Bao-de
(State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai
Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

摘要: 介绍了高温合金空心叶片熔模铸造用陶瓷型芯与型壳的应用背景,及其对于高温合金空心叶片精密成形的重要意义,概述了采用熔模铸造工艺制备高温合金空心叶片对陶瓷型芯与型壳各项性能的基本要求;并指明了陶瓷型芯与型壳今后的发展方向。分别叙述了陶瓷型芯与型壳基体材料的选择、制备工艺及其对性能的影响,介绍了陶瓷型芯脱除工艺的研究进展及存在的问题。另外,对于陶瓷型芯与型壳定位的精确度、性能匹配性对高温合金空心叶片质量影响进行了评述。

关键词: 陶瓷型芯;陶瓷型壳;高温合金;空心叶片;熔模铸造

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.08.014

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)08-0085-07

Abstract: The application background and key roles as well as the basic performance requirements of ceramic cores and shells used for the investment casting of superalloy hollow blade were introduced, and the future development direction of ceramic cores and shells was described. The raw materials of the ceramic cores and shells, together with the manufacture methods and their influence on the properties were reviewed respectively. The research status and existing problems of leaching technics of ceramic cores were introduced. In addition, the important influence of positioning accuracy and the consistency of ceramic cores and shells on the quality of superalloy hollow blade was evaluated.

Key words: ceramic core; ceramic shell; superalloy; hollow blade; investment casting

随着航天、航空和工业燃气轮机的发展,涡轮发动机的燃气温度不断提高,因此要求不断增加涡轮叶片耐高温的能力。基于此目的,高温合金涡轮叶片在结构方面实现了从实心到空心的发展,在凝固方式方面实现了从多晶、定向凝固以及到单晶的跨越^[1,2]。近净形熔模精密铸造高温合金是当前制造涡轮空心叶片的主要技术之一,而此项技术的前提便是制备性能良好的陶瓷型芯与型壳。

1 陶瓷型芯

当前,叶片的冷却结构已由传统的对流冷却、冲击冷却和气膜冷却等方式发展到高效发散冷却与层板冷却等^[3]。所有的这些冷却方式都与叶片内腔的形状有

关,而内腔形状实现的可能性又取决于陶瓷型芯的性能。目前,陶瓷型芯正向形状更复杂、尺寸更小、性能更高的方向发展,从而极大地促进了高性能铸造高温合金在燃气涡轮叶片中的应用^[4]。

1.1 陶瓷型芯基体材料

制备陶瓷型芯的原材料必须具备以下条件:足够的耐火度(熔点或高温软化点要高于 1600℃);具有较好的热化学稳定性,与合金有元素高温不相容;热稳定性和抗热震性能好,线膨胀系数较小且与型壳相匹配;易脱除,烧成后无过多的高低温晶型转变^[3,5,6]。

国内外常用的陶瓷型芯基体材料主要有石英玻璃、氧化铝、锆英石、氧化镁、氧化锆等,表 1 为常用基体材料的各项热物理性能(膨胀系数为 0~1200℃内的平均值)^[7]。目前,制备陶瓷型芯普遍采用的基体材

料是石英玻璃。

表 1 常用陶瓷型芯基体材料的热物理性能^[7]

Table 1 Physical properties of the ceramic core raw materials^[7]

	Melting point/℃	Moh's hardness	Density/ (g·cm ⁻³)	Expansion coefficient/ (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)
Corundum	2050	9.0	4.6	8.6
Silica glass	~1700	5.0	2.2	0.5
Zircon	<1984	7.5	4.5	4.8
Magnesia	2800	6.0	3.6	14.0
Zirconia	2600	7.0-8.0	5.7	6.0

1.1.1 石英玻璃

氧化硅基陶瓷型芯以石英玻璃作为基体材料,添加氧化铝、莫来石、锆英粉等作为强化相,依靠控制方石英的含量来保证陶芯的性能。研究表明^[8,9],型芯中方石英的含量控制在 5%~15% 时,型芯具有良好的综合性能。Chao Chin-Hsiao 等^[10]以锆英粉作为细骨料研究了 Silica-Zircon 系型芯中 α 相石英含量、孔隙率、烧结温度对其抗弯强度的影响,发现 α 相的低温晶相转变以及黏结剂与骨料间黏聚力的烧失是造成型芯抗弯强度下降的主要原因;当 α 相石英(包括方石英和石英)的质量分数增加 11% 时型芯的室温抗弯强度下降约 3MPa。添加剂和烧结温度对析晶有明显的影响,前者可以改变析晶的起始温度及难易程度,后者能决定析晶的速率从而控制型芯中方石英的含量,通过合理地控制上述两个因素便能获得含适量方石英晶体的陶瓷型芯^[11]。Wang L. Y. 等^[12]通过在基体材料中添加方石英晶种研究了烧结过程中型芯内方石英相含量的变化规律。硅基型芯的析晶过程分形核及晶核生长两个阶段,添加的方石英晶种对型芯析晶率的影响在两个阶段不同:形核阶段,晶种表面作为形核界面可以降低方石英形核能垒,对析晶有促进作用;随着晶种沉浸时间的增长,晶种则对方石英晶核的生长产生抑制作用,这是由于在升温过程中晶种从 α 相向 β 相转变,在相变过程中的体积变化使型芯基体内部产生内压力从而抑制了方石英相的生长。

型芯的热线性变化、蠕变率对其使用的稳定性有重要的影响。A. A. Wereszczak 等^[13]通过对 Silica-Zircon 系型芯高温形变的研究指出,型芯的二次烧结和相随的晶型转变是决定其收缩的主要因素,而且氧化硅的含量越高,收缩越严重;高温蠕变对收缩量的影响不大。硅酸锆的含量并不影响蠕变率变化的独立性,方石英的扩散晶化与幂律烧结可能决定陶瓷型芯的蠕变机理。

氧化硅基陶瓷型芯的烧成温度通常约为 1150~1250℃,使用温度为 1520~1550℃。当使用温度超过 1550℃ 时,硅基型芯的高温抗蠕变性和化学稳定性显著下降,易与高温合金中的某些元素,如 Mg, Y, Ti, Al, Hf 等发生化学反应,难以满足复杂结构空心叶片的铸造要求。

1.1.2 氧化铝

氧化铝在焙烧和铸造过程中结构稳定,不发生晶型转变,热膨胀系数低,热化学稳定性良好,故氧化铝基型芯与氧化硅基相比化学稳定性、高温强度与抗蠕变性更好。氧化铝基型芯优良的高温性能归因于高温下莫来石柱状晶群的存在,薛明等^[14]通过实验研究表明,氧化铝基型芯高温下莫来石的生成消耗部分低熔点相,同时棒状或片状的莫来石相自成互锁网络,阻碍了有害玻璃相的黏滞流动,而生成的莫来石相本身具有较高的高温抗蠕变能力。氧化铝基陶瓷型芯烧成温度高于 1300℃,铸造使用温度为 1520~1875℃^[15]。

由于氧化铝的高耐火度,氧化铝基型芯通常难以烧结,且化学脱除困难。矿化剂的加入对氧化铝基型芯的制备及应用有重要意义。覃业霞等^[16,17]分别研究了 MgO、蓝晶石对氧化铝基型芯性能的影响,发现随着 MgO 含量的增加,型芯的相对密度和气孔率均先增加后减小,这主要是生成的 $MgAl_2O_4$ 含量变化对其影响的结果;试样的蠕变则受气孔率和 $MgAl_2O_4$ 含量变化的双重影响,但 $MgAl_2O_4$ 的生成使试样的脱芯性能下降。随着蓝晶石含量的增加,试样的高温抗蠕变性提高,这主要是因为蓝晶石的分解产物 SiO_2 中的 Si^{4+} 与活性组分 Al_2O_3 发生扩散和传质运动,形成了莫来石相,该相在陶瓷型芯内部形成高强的网络互锁,在高温单晶铸造条件下,阻隔了液相的黏滞流动,使得型芯的高温变形速率下降;而蓝晶石在高温下莫来石化的过程中产生的适量膨胀也可以提高型芯的抗蠕变性能。

1.2 陶瓷型芯的制备工艺

陶瓷型芯的制备方法有热压注法、灌浆法、挤压法、传递模法等^[6],目前国内外主要采用热压注法制备陶瓷型芯^[18,19],以热塑性材料为增塑剂配制陶瓷浆料,热压注成形陶瓷型芯坯体,进行脱蜡、高温焙烧,然后将焙烧后的型芯进行整形、强化处理,最终获得尺寸精度符合要求的陶瓷型芯。在陶瓷型芯的制备过程中,耐火粉料的成分配比及粒度级配、烧成温度、炉温均匀性、填料及强化处理等因素对陶瓷型芯的微观结构、高温力学性能均有显著的影响。

徐智清^[20],贺靠团等^[21],覃业霞等^[22]分别研究了粉料粒度对硅基型芯和氧化铝基陶瓷型芯性能的影响。

响,发现对于硅基和铝基陶瓷型芯,基体材料最理想的堆积结构是:以粗颗粒为主体形成高温骨架,中细颗粒填充在粗颗粒的空隙中,产生紧密堆积加固高温骨架,矿化剂的粒度应明显小于基体粉料的粒度,并且要均匀分散到基体中。基体粉料颗粒越细,表面能越大,粉料之间的固相反应就越充分,同时越容易产生液相,从而进一步促进烧结,然而液相量与型芯的高温变形有关,故控制液相量是陶瓷型芯烧结的重要任务。

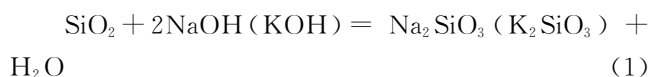
陶瓷型芯的强度是通过烧结建立的,烧结温度及炉温均匀性^[23]对型芯综合性能的影响非常大。薛明等^[24]研究了 AC-2 陶瓷型芯焙烧过程中微观结构的变化,指出陶瓷型芯的焙烧随着增塑剂的融化、迁移、升华和烧失,湿态下均匀包裹着陶瓷颗粒的空间网状、连通的有机高分子增塑剂薄膜发生流淌,网状结构被破坏并出现蜂窝状结构,直到约 600℃ 增塑剂完全烧失;在高温下固体质点间隙缩小,颗粒间相互接触,并由矿化剂作“桥”完成型芯的烧结。贺靠团^[25]通过对 Silica-Zircon 系型芯中烧结温度与其强度、收缩、方石英含量关系的研究,发现在预烧温度范围内随着温度的变化,型芯中析出的方石英尺寸变化不大,晶粒一般在 30nm 左右;该系型芯在 1190℃ 的烧结温度下其抗弯强度最大,当烧结温度高于 1190℃,由于型芯中方石英析出量过多导致大量裂纹产生,烧结强度反而下降。龙永成等^[26],Yu J. B. 等^[27]在研究烧结温度对硅基型芯综合性能的影响时也发现了同样的变化规律。

杨耀武等^[28],薛明等^[14],赵红亮等^[29]分别采用含 Si^{4+} 颗粒的强化剂对氧化铝基陶瓷型芯进行强化处理。研究表明,经强化后氧化铝基陶瓷型芯热强性的提高主要是由于强化剂溶液渗入到陶瓷型芯的孔隙中,其中的 Si^{4+} 粒子与型芯中 Al_2O_3 颗粒发生了扩散与传质作用,再经高温烧结产生莫来石新生片状晶,该晶群在型芯内形成高强的互锁网络,能阻隔单晶浇注时液相的黏滞流动,减少了型芯的高温变形,而生成的莫来石相又具有较高的高温强度。Wu H. H. 等^[30]以氧化钇为矿化剂制备氧化铝基型芯,并研究了氧化钇水溶液对该型芯的强化作用,发现氧化钇溶液对该组分的型芯较硅溶胶有更好的强化效果,使用氧化钇溶液强化的次数越多,型芯中存留的纳米氧化钇越多,其高温性能越好。经氧化钇溶液强化后,型芯内产生新的 YAG 相,YAG 相的生成消耗了型芯中部分低熔点相,且生成的 YAG 相形成网络互锁的结构,阻碍了型芯内微裂纹的扩散及低熔点相的高温黏滞流动,从而提高了型芯的高温综合性能。

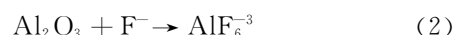
1.3 陶瓷型芯的脱除

陶瓷型芯通常采用化学腐蚀法进行脱除,但经高

温烧结及浇注合金后的型芯结构致密,颗粒间结合牢固,对于复杂薄壁型芯更是难以脱除。由于石英玻璃很容易被碱金属盐所侵蚀形成可溶性硅酸盐,故氧化硅基型芯通常采用高温碱煮的脱芯工艺,脱芯时间随 KOH 或 NaOH 溶液的浓度和温度的不同而有所差别。反应式:



氧化铝在常温和加热条件下几乎不与浓酸或浓碱发生化学反应,因此氧化铝基陶瓷型芯的脱除成为影响其应用的主要障碍。欧美等发达国家一直将氧化铝系陶瓷型芯的脱除视为保密的技术关键。氧化铝基型芯的脱除工艺有两种,其一是用氟盐类化合物作为介质,原理:



此种脱芯方法有时需辅以高压水冲洗。其二为碱液作为介质,辅以高压水,原理是型芯在焙烧过程中 α -氧化铝颗粒表面形成空间网状结构膜——尖晶石,尖晶石在碱液中易被腐蚀,留下结构松散的刚玉粉颗粒,经机械作用很容易被脱除。对于形状复杂、通道细小的型芯的脱芯仍然是国内难以解决的问题之一^[7]。

国内近年来对氧化铝陶瓷型芯的脱除也开展了一些研究,王宝生等^[31]将氧化铝陶瓷型芯放在装有熔融氢氧化钾的压力脱芯设备中煮 4~10h,在碱煮过程中分别施加正压力、负压力或交替施加正负压力,结果表明,负压条件下脱芯效果明显,正压脱芯则需要大于 3.1MPa 的压力才能使型芯脱除。氧化铝基陶瓷型芯的脱除不仅受限于工艺条件,还对设备提出了苛刻的要求。

2 陶瓷型壳

高温合金空心叶片铸造用陶瓷型壳的工作条件非常苛刻,型壳需要在 1550~1600℃ 的高温下长时间工作。因此,优质的型壳应满足以下要求^[32,33]:(1)具有足够的高温强度和高温抗蠕变性能,能够承受熔融金属的热冲击与金属液压力冲击;(2)型壳与高温合金熔体有良好的润湿性和热化学稳定性,与熔融金属不发生明显的化学反应;(3)型壳壁厚不宜太厚,且热物理性能稳定,热膨胀系数低,满足导热性的要求;(4)浇注完毕后,型壳要具有良好的溃散性,易清除。

2.1 耐火材料的选择

耐火材料占型壳总质量的 90% 以上,对型壳的高温强度、热化学稳定性、热物理性能起着决定性的影响。高温合金空心叶片熔模铸造用陶瓷型壳的耐火材

料应有足够的耐火度,热化学稳定性良好,热膨胀系数小且均匀;同时还应保证合适的粒度级配^[6]。

制备型壳的耐火材料主要用于两个方面:其一是与黏结剂配制成涂料,要求耐火材料的颗粒较细;其二是用于加固型壳的撒砂材料,其中面层砂要求粒度较细,背层砂较粗^[6]。由于型壳的面层与合金熔体接触,所以要求用于面层的耐火材料能经受金属液的热冲击和热物理化学冲击,用该耐火材料制得的型壳还要有足够的常温强度和高温强度,良好的透气性,抗热震性,脱壳性等性能。国内外熔模铸造用型壳选用的耐火材料主要有锆英石、氧化铝、熔融石英、高岭土、莫来石、莫来卡特(57%的莫来石+玻璃相)等,在定向凝固或单晶高温合金熔模铸造方面,主要以氧化铝作为型壳的耐火材料。

CHEN Y. F. 等^[34]研究了粉料粒度大小及分布对氧化锆陶瓷型壳性能的影响,指出粒度适中、分布窄的粉料所配制的料浆其黏度受剪切速率的影响最小,且在该级配条件下的氧化锆粉料制备的陶瓷型壳具有高的素坯强度及烧结强度。

2.2 黏结剂

黏结剂作为熔模铸造制壳用的主要原材料,其种类和用量等会直接影响型壳及铸件的质量、成本和生产周期。目前高温合金空心叶片熔模铸造用型壳的黏结剂主要有硅酸乙酯和硅溶胶两种^[3]。硅酸乙酯是早期制壳用的黏结剂,但是由于环保的要求,目前国内外多采用硅溶胶作为制备陶瓷型壳的黏结剂^[35]。

硅溶胶是一种无毒无害的绿色环保型黏结剂,主要由纳米的二氧化硅胶体颗粒弥散在水中,随着水分的挥发,纳米二氧化硅颗粒会结合在一起,提供型壳一定的强度。采用硅溶胶制备的陶瓷浆料,流变性能良好,涂挂均匀,但是由于其中的水分挥发速率较慢,所以型壳制备周期较长^[3]。近年来,为了缩短制壳周期,国外杜邦公司、Remet 公司先后推出的 Ludox[®] SK 系列和 Remasol[®] ADBOND[®] 系列快干硅溶胶^[6],国内浙江宇达化工有限公司推出 FS-I, FS-II, FS-III 系列快干硅溶胶。各种型号的快干硅溶胶目前已应用于生产,明显提高制壳效率。

但是,在制备高温合金空隙叶片过程中,因陶瓷型壳与熔融金属接触时间比制备一般的合金铸件要长,硅溶胶黏结剂中的无定形 SiO₂ 会与高温合金中的一些活泼元素发生化学反应,导致铸件表面与内部化学成分偏差大,铸件表面粗糙,力学性能下降。因此,针对含有较活泼元素的高温合金体系,为保证铸型面层的惰性,防止面层与熔融金属发生化学反应,国内外正在研究各种非 SiO₂ 系黏结剂和比如碳质黏结剂、比

SiO₂ 更稳定的氧化物(Al₂O₃, ZrO₂, CaO, Y₂O₃)黏结剂等。

2.3 矿化剂

除了耐火材料基体和黏结剂外,矿化剂在型壳的制备中也扮演着重要的角色。矿化剂可以进一步提高型壳的焙烧和使用性能。张立同等^[36]指出,熔模铸造用型壳所发生的软化变形、裂纹等具有蠕变破坏性质的现象,是由于型壳晶(或粒)界处黏结剂 SiO₂ 所形成的玻璃相在熔融金属动、静压力作用下发生黏性流动的结果。因此,从控制型壳的显微结构出发,使玻璃相转变为晶相,并改善其分布状态,在型壳中形成高温稳定异晶相直接结合的显微结构,是提高型壳在 1550℃ 以上高温抗蠕变性的关键。

在 Al-Si 系耐火材料中,莫来石是高温稳定相。对刚玉型壳进行适当的热处理,使刚玉中形成莫来石桥相连的以三维网络结构形式存在的微结构,将少量的玻璃相同未参与莫来石反应的残余刚玉结合到一起可实现提高型壳高温强度的目的。但是,在无矿化剂存在的情况下,刚玉活性很小,形成莫来石的温度高达 1500℃ 而型壳在达到此温度前早已软化、变形^[33]。添加适量的矿化剂是降低刚玉与 SiO₂ 黏结剂莫来石化温度的常用方法。

目前制备高温合金铸造用型壳常选择的矿化剂主要有 Al-Si 系矿化剂及 Al-Si-Mg 系矿化剂。夏明仁等^[37]在研制 811A 型壳的基础上,改用 Al-Si-Mg 系新型矿化剂,成功制备出工作温度高达 1600℃、壁厚只有 3~6mm 的 811B 型壳,加矿化剂的壳型有大量针状莫来石出现,几乎充满了所有间隙。811B 型壳常温强度达 11.2MPa,1500℃ 高温强度达 4~6MPa,采用 811B 生产的 DD-3 单晶涡轮叶片,所得铸件无漏钢、麻点、黏砂和鼓胀等缺陷,且表面光洁。

在定向凝固合金铸造用型壳的制备工艺中,有学者研究了 Si-Ca 系矿化剂、ASM-Cr 矿化剂等;另外, P. M. Curran 等^[38]使用 CaO 对陶瓷型壳进行改性,得到型壳强度高、抗蠕变性能良好的陶瓷型壳;D. G. Charies^[39,40]在浆料中添加平均粒径小于 10μm 的 Al₂O₃ 粉料,所制备的型壳中含有介稳相莫来石,使用该型壳制备的铸件质量良好。

姚建省等^[41]研究了 Al₂O₃-SiO₂-CaO 系矿化剂的加入量及硅溶胶浓度(20%, 25%, 30%, 体积分数,下同)对陶瓷型壳性能的影响。指出随着矿化剂加入量的增加,型壳的力学性能及高温抗蠕变性能随之增加。这是由于矿化剂中 Na₂O, CaO 等氧化物在焙烧过程中形成一定的玻璃相,故型壳的常温强度增加;同时,矿化剂的加入使陶瓷型壳的莫来石化温度降低,且矿

化剂中的叙永土(主要成分 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)高温条件分解出的 SiO_2 与型壳中的 Al_2O_3 形成莫来石相,即二次莫来石化,从而使型壳的高温性能提高。在粉液比相同的条件下,随着硅溶胶浓度的增加,涂料的黏度及剪切应力逐渐增加,浓度为 25% 的硅溶胶制得的陶瓷型壳高温强度及高温抗蠕变性能优越。

2.4 型壳的制备工艺

硅溶胶型壳的制备是一个复杂的物理化学变化过程,即硅酸胶体凝胶的过程。模组在涂挂涂料之后,经过撒砂,将耐火粉料黏结在模组表面,形成所需要的形状;硅溶胶型壳通过干燥途径实现胶凝过程,从而达到硬化的目的。型壳的工艺流程如图 1 所示。

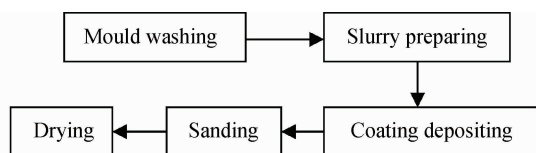


图 1 陶瓷型壳制备的工艺流程

Fig. 1 Process flow diagram of preparing ceramic shell

型壳通常分为面层和背层,根据需要,在面层和背层之间还要加上若干层的中间层,以实现面层到背层的过渡,保证型壳性能的稳定。在蜡模表面进行面层涂挂和撒砂后,进行干燥,之后在面层表面进行中间层或背层浆料的涂挂、撒砂,重复此过程若干次,直至获得厚度符合要求的陶瓷型壳素坯,然后进行脱蜡、焙烧,即可用于高温合金叶片的铸造。

耐火材料的选择、粉液比、涂料黏度、型壳的干燥时间、添加剂等都会影响型壳的质量。针对型壳壁厚不均匀的缺陷,夏明仁等^[37]提出了 3 条措施:(1)在浆料中添加悬浮剂的同时,配合加入适量降黏剂,使浆料变成不带屈服值的假塑性流体;(2)在改善悬浮性后的浆料中添加部分细砂;(3)采用细砂部分代替粗砂作为壳型加固层挂砂。基于以上 3 项措施,他们成功制备了壁厚均匀的 811B 陶瓷型壳。

在单晶叶片的铸造过程中,高的温度梯度有利于提高生产的效率,改善合金的生长方式。型壳作为液态金属凝固时排放热量的重要环节,当其基体材料确定后,壁厚的大小就成为影响液态金属温度梯度的关键因素。张敏华等^[42]分别研究了壁厚为 3~5, 6~7mm 和 9~10mm 3 种不同型壳对快速凝固法(High Rate Solidification, HRS)生产单晶试板时温度梯度的影响,指出在浇注单晶高温合金时,薄壁型壳产生更大的温度梯度;型壳壁厚同时影响到铸件微观结构,薄壁型壳使单晶树枝状晶轴间距缩短。

李冰等^[43],薛明等^[44]通过对基于 SL 原型的快速精铸氧化物陶瓷型壳制备工艺进行研究,将快速成型技术与铸造工艺相结合,解决了陶瓷型壳焙烧开裂的难题,成功制备出氧化锆陶瓷型壳。使用 SL 原型代替蜡模制备型壳,省去复杂的工装和模具,缩短了生产周期,降低了制造成本。

3 型芯与型壳的定位

高温合金空心叶片的质量直接受陶瓷型芯与型壳高温性能的影响,但同时陶瓷型芯与型壳定位的精确度、性能的一致性也会显著影响叶片的质量。如将型芯压入蜡模中时,应该重点考虑陶瓷型芯在型壳内定位配合对叶片浇注的包芯率、壁厚稳定性的影响;高温条件下陶瓷型芯与型壳以及与熔模铸造工艺之间的配合所产生的陶瓷受热状态和受力状态,这些都直接关系到空心叶片的合格率。

薛明等^[44]通过对定向凝固过程中型芯、型壳温度场的数值模拟,指出氧化铝陶瓷型芯在定向凝固过程中与陶瓷型壳定位适宜采用直接接触定位模式。韩大平等^[45]采用如下的定位方法:叶尖延伸段设置叶尖定位点,叶尖定位点所在的叶尖延伸段作为固定端,采用面直接接触式;榫齿的延伸段也采用点定位,在榫齿延伸段制作两个塔式定位点,采用点直接接触式;排气边涂自由端,并在自由端上制作两个定位点,此处型芯与型壳采用点接触式;型芯叶盆与叶背定位方法相同,定位点位置对称。该方法在生产过程中操作方便、简单,缩短了叶片铸件的铸造周期,提高了铸件合格率及生产效率。李涤尘等^[46]研究了基于光固化快速成型的型芯型壳内外结构一体化制造方法,该方法可以成型任意复杂的、具有空间交错特征的叶片内腔,陶瓷型芯型壳一次性同时成型,自然连接成一体,无需设计制作型芯压制模具和蜡模模具,无需组装,从而保证陶瓷型芯型壳之间的相互位置精度。通过该方法所制备的陶瓷铸型适用于薄壁、内腔结构复杂铸件的生产,能极大提高铸件的合格率。

4 结束语

随着高推比航空发动机和大功率工业燃气轮机的发展,对定向凝固叶片和单晶高温合金空心叶片的需求日趋旺盛。高温合金叶片熔模铸造用的陶瓷型芯和型壳需长时间在高温和液态金属流体静压下工作,这就要求型芯和型壳具有优良的高温强度、抗蠕变性能及高温化学稳定性,且必须保证热膨胀系数差别很小。

形状更复杂、尺寸更小、高温性能愈加稳定是陶瓷型芯的发展方向,而开发耐温能力高于 1600~1700℃ 以上,并在此基础上降低壁厚,提高其高温化学稳定性则是未来高温合金叶片铸造用陶瓷型壳的发展趋势。型芯与型壳定位匹配性、性能一致性对高温合金空心叶片的质量有显著的影响,型芯与型壳的精确定位有助于提高叶片铸件的合格率,经济效益显著。实现型芯、型壳一体化制备则是未来陶瓷铸型的发展趋势。

参考文献

- [1] 陈荣章. 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望[J]. 航空制造技术, 2002, (2): 19-23.
CHEN Rong-zhang. Review and prospect of developments of cast superalloys and technology of aeroengine turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, (2): 19-23.
- [2] 田国利. 高效气冷叶片的最新动态[J]. 材料工程, 1999, (7): 42.
- [3] 张立同, 曹腊梅, 刘国利. 近净形熔模精密铸造理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 148-152.
- [4] 顾国红, 曹腊梅. 熔模铸造空心叶片用陶瓷型芯的发展[J]. 铸造技术, 2002, 23(2): 80-83.
GU Guo-hong, CAO La-mei. Development of ceramic cores for investment casting hollow blades [J]. Foundry Technology, 2002, 23(2): 80-83.
- [5] 姜不居. 实用熔模铸造技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2008.
- [6] 姜不居. 熔模铸造手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] 曹腊梅. 定向空心叶片的陶瓷型芯[J]. 航空制造工程, 1995, (10): 11-13.
- [8] 李倩, 马德文, 蒋殷红, 等. 影响定向空心叶片陶瓷型芯性能的一个重要因素——方石英含量的控制[J]. 材料工程, 1994, (5): 18-19.
LI Qian, MA De-wen, JIANG Yin-long, et al. Effect of cristobalite content on the properties of ceramic core in making direction-alloy solidified hollow blade[J]. Journal of Materials Engineering, 1994, (5): 18-19.
- [9] 田国利. 硅基陶瓷型芯方石英含量与叶片浇注不漏芯率的关系[J]. 材料工程, 1995, (7): 33-35.
TIAN Guo-li. Effects of cristobalite content of silica base ceramics core on the rate of qualified pouring[J]. Journal of Materials Engineering, 1995, (7): 33-35.
- [10] CHAO CHIN-HSIAO, LU Hong-yang. Optimal composition of zircon-fused silica ceramic cores for casting superalloys[J]. J Am Ceram Soc, 2002, 85(4): 773-779.
- [11] 张湛. 空心叶片用石英基陶瓷芯的反玻璃化规律[J]. 航空学报, 1988, (12): 582-588.
ZHANG Zhan. Devitrifying rule of silica-based ceramic core for hollow blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, (12): 582-588.
- [12] WANG Ling-yi, HON MIN-HSIUNG. The effect of cristobalite seed on the crystallization of fused silica based ceramic core—a kinetic study[J]. Ceramics International, 1995, 21(3): 187-193.
- [13] WERESZCAK A A, BREDER K, FERBER M K, et al. Dimensional changes and creep of silica core ceramics used in investment casting of superalloys[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(19): 4235-4245.
- [14] 薛明, 曹腊梅. 莫来石相对氧化铝基陶瓷型芯的高温抗变形能力的影响[J]. 材料工程, 2006, (6): 33-35.
XUE Ming, CAO La-mei. Effect of mullite on high temperature anti-deforming capability of alumina-based ceramic core[J]. Journal of Materials Engineering, 2006, (6): 33-35.
- [15] 曹腊梅. 国外定向和单晶空心叶片用型芯的工艺特点[J]. 材料工程, 1995, (5): 20-21.
CAO La-mei. The Processing characters of ceramis core used for directional and single crystal blades[J]. Journal of Materials Engineering, 1995, (5): 20-21.
- [16] 覃业霞, 杜爱兵, 张睿, 等. 精密铸造用氧化铝基复合陶瓷型芯[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(S1): 774-776.
TAN Ye-xia, DU Ai-bing, ZHANG Rui, et al. Alumina-based ceramic core nano-composites for investment casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(S1): 774-776.
- [17] 覃业霞, 潘伟. 蓝晶石对氧化铝基复合陶瓷型芯性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 12(S2): 223-225.
TAN Ye-xia, PAN Wei. Effect of kyanite on properties of alumina-based ceramic core composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 12(S2): 223-225.
- [18] 赵洪亮, 翁康荣, 关绍康. 空心叶片用陶瓷型芯[J]. 特种铸造及有色金属, 2004, (5): 38-41.
ZHAO Hong-liang, WENG Kang-rong, GUAN Shao-kang. Ceramic core for hollow blades[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2004, (5): 38-41.
- [19] 王飞, 李飞, 刘河洲, 等. 高温合金空心叶片用陶瓷型芯的研究进展[J]. 航空制造技术, 2009, (19): 60-64.
WANG Fei, LI Fei, LIU He-zhou, et al. Review of ceramic core for superalloy hollow blade [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, (19): 60-64.
- [20] 徐智清. 粉料粒度对定向空心叶片陶瓷型芯质量的影响[J]. 材料工程, 1995, (5): 29-31.
XU Zhi-Qing. Effect of particle size on quality of ceramic core for DS hollow blades[J]. Journal of Materials Engineering, 1995, (5): 29-31.
- [21] 贺靠团, 马德文, 蒋殷红, 等. 空心叶片复杂硅基陶瓷型芯的粉料粒度[J]. 材料工程, 1992, (1): 34-35.
- [22] 覃业霞, 张睿, 杜爱兵, 等. 粉料粒度对氧化铝基陶瓷型芯材料性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(S1): 711-713.
TAN Ye-xia, ZHANG Rui, DU Ai-bing, et al. Effect of particle size on properties of alumina-based ceramic cores[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(S1): 711-713.
- [23] 顾国红. 焙烧炉温均匀性对陶瓷型芯性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2001, (3): 54-55.
- [24] 薛明, 曹腊梅. AC-2 陶瓷型芯焙烧过程中微观结构的研究[J]. 科技创新导报, 2008, (6): 124-125.
- [25] 贺靠团. 定向硅基型芯的预烧结[J]. 材料工程, 1993, (3): 21-24.
- [26] 龙永成, 刘志义, 郭敏, 等. 烧结温度对硅基陶瓷型芯性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(4): 591-596.
LONG Yong-cheng, LIU Zhi-yi, GUO Min, et al. Effect of sinter-

- ring temperature on properties of silica based ceramic core[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(4): 591-596.
- [27] YU J B, REN Z M, WANG B Q, et al. Effect of sintering systems and colloidal silica sols on the mechanical properties of oriented silica-based ceramic core materials[J]. Advanced Materials Research, 2011, 177: 418-420.
- [28] 杨耀武, 曹腊梅, 才广慧. 强化处理对单晶叶片用氧化铝基陶瓷型芯的影响[J]. 航空材料学报, 1995, 15(3): 33-38.
YANG Yao-wu, CAO La-mei, CAI Guang-hui. The effect of strengthening treatment on alumina-based ceramic cores for single-crystal blades[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1995, 15(3): 33-38.
- [29] 赵红亮, 翁康荣, 关绍康. 强化处理对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 陶瓷型芯高温变形的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2003, (5): 7-8.
ZHAO Hong-liang, WENG Kang-rong, GUAN Shao-kang. Influence of strengthening treatment on the deformation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ nano-compound ceramic core at high temperature[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003, (5): 7-8.
- [30] WU H H, LI D C, TANG X J, et al. Improving high temperature properties of alumina based ceramic cores containing yttria by vacuum impregnating[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(4): 823-828.
- [31] 王宝生, 成来飞, 张立同. 氧化铝基陶瓷型芯的脱芯工艺研究[J]. 铸造, 2005, 54(8): 758-760.
WANG Bao-sheng, CHENG Lai-fei, ZHANG Li-tong. Study on core leach technics of alumina base ceramic core[J]. Foundry, 2005, 54(8): 758-760.
- [32] 刘孝福, 姜延春, 苏贵桥, 等. 定向凝固用陶瓷型壳高温力学性能研究现状[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(10): 913-917.
LIU Xiao-fu, LOU Yan-chun, SU Gui-qiao, et al. Survey of elevated mechanical properties of ceramic shell mold in directional solidification[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(10): 913-917.
- [33] 张勇. 型壳厚度对单晶铸件凝固界面温度梯度的影响[J]. 铸造技术, 1998, (3): 42-43.
ZHANG Yong. Effect of shell thickness on temperature gradient of single crystal superalloy castings[J]. Foundry Technology, 1998, (3): 42-43.
- [34] CHEN Yan-fei, XIAO Shu-long, TIAN Jing, et al. Effect of particle size distribution on properties of zirconia ceramic mould for TiAl investment casting[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(S2): 342-347.
- [35] 罗宁, 张锡平, 闫双景, 等. 熔模铸造型壳的现状[J]. 特种铸造及有色合金, 2002, (5): 30-31.
LUO Ning, ZHANG Xi-ping, YAN Shuang-jing, et al. Present status of molding shell in investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2002, (5): 30-31.
- [36] 张立同, 杨兴华. 电熔刚玉型壳的抗蠕变性与显微结构[J]. 铸造, 1985, (3): 25-30.
ZHANG Li-tong, YANG Xing-hua. The creep resistance and microstructure of shells for the corundum[J]. Foundry, 1985, (3): 25-30.
- [37] 夏明仁, 张勇. 单晶叶片高强度薄壁壳型研究[J]. 材料工程, 1997, (9): 15-18.
XIA Ming-ren, ZHANG Yong. A high strength thin-wall shell mould for single crystal blade[J]. Journal of Materials Engineering, 1997, (9): 15-18.
- [38] CURRAN P M, FASSLER M H, PERRON J S. Calcia modified ceramic shell mold system[P]. CA Patent: 1080428, 1980-07-01.
- [39] CHARIES D G. Ceramic investment molds embodying a metastable mullite phase in its physical structure superalloys[P]. USA Patent: 4188450, 1980-12-12.
- [40] CHARIES D G. Method for making investment casting molds for casting of superalloys[P]. USA Patent: 4026344, 1977-03-31.
- [41] 姚建省, 刘晓光, 唐定中, 等. 矿化剂加入量及硅溶胶浓度对陶瓷型壳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38, (S2): 1222-1225.
YAO Jian-sheng, LIU Xiao-guang, TANG Ding-zhong, et al. Effect of proportion of mineralizer and concentration of silica sol on properties of ceramic shell[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38, (S2): 1222-1225.
- [42] 张敏华, 李冰, 陈建华. 基于 SL 原型的陶瓷型铸造型壳焙烧过程开裂问题的探讨[J]. 中国铸造装备与技术, 2003, (4): 16-18.
ZHANG Min-hua, LI Bing, CHEN Jian-hua. Discussion about cracking of SL pattern ceramic shell in baking[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2003, (4): 16-18.
- [43] 李冰, 李涤尘, 张敏华. 基于 SL 原型的快速精铸氧化物陶瓷型壳制备工艺研究[J]. 铸造技术, 2004, 25(3): 189-191.
LI Bing, LI Di-chen, ZHANG Min-hua. Research related to the preparation process of rapid precision casting oxide ceramic shell based on SL pattern[J]. Foundry Technology, 2004, 25(3): 189-191.
- [44] 薛明, 曹腊梅, 刘世忠, 等. 定向凝固过程中型芯型壳温度场数值模拟[J]. 铸造, 2007, 56(3): 287-289.
XUE Ming, CAO La-mei, LIU Shi-zhong, et al. Simulation of temperature fields on ceramic core and ceramic shell during directional solidification process[J]. Foundry, 2007, 56(3): 287-289.
- [45] 韩大平, 贾石, 杜洪强, 等. 一种空心叶片型芯与型壳定位的方法[P]. 中国专利: 200910188303, 2010-04-21.
- [46] 李涤尘, 吴海华, 卢秉恒. 型芯型壳一体化空心涡轮叶片制造方法[J]. 航空制造技术, 2009, (3): 38-42.
LI Di-chen, WU Hai-hua, LU Bing-heng. Shaping method of hollow turbine blades with integral shell and core ceramic mold[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, (3): 38-42.

收稿日期: 2012-04-12; 修订日期: 2013-03-06

作者简介: 康海峰(1987-), 男, 硕士研究生, 从事高温叶片成型用陶瓷型芯与型壳方面的研究, 联系地址: 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学材料 B 楼 405 室(200240), E-mail: haisong008@gmail.com