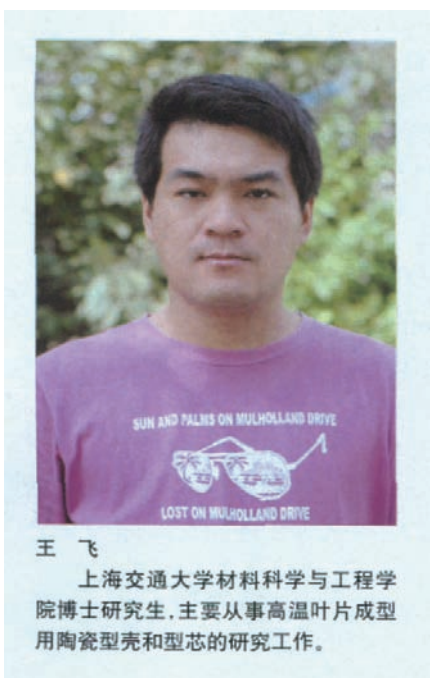


高温合金空心叶片用陶瓷型芯的研究进展*

Review of Ceramic Core for Superalloy Hollow Blade

上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室 王 飞 李 飞 刘河洲 王 俊 孙宝德



提高航空燃气涡轮发动机的性能,首先是要提高涡轮的燃气温度,它决定了动力装置有效功率的实际提高,如燃气温度从 1200℃ 提高到 1350℃,油耗率可降低 8%。采用铸造高温合金制成形状复杂的空心叶片可提高涡轮前温度,但由于金属熔

点的限制,在合金材料上提高叶片的承温能力目前已经接近极限^[1],仅依靠提高发动机热端部件材料的热强性已不能满足我们的要求。因此,不断改善叶片的气冷结构、提高冷却效率已成为涡轮叶片设计与制造者追求的目标^[2-3]。

空心气冷叶片是提高发动机涡轮前温度的重要技术之一。叶片可采用高温合金近净形熔模精密铸造技术制造,该类技术包括近净形铸造工艺设计、熔模材料与精密成形技术、高温陶瓷材料与精密成形技术、高温合金浇注成形与凝固结晶控制技术、铸件后处理与专用工装研究,以及工艺过程中质量控制方法和表

征技术研究。

铸造空心叶片的关键是先制造出能形成叶片复杂内腔的陶瓷型芯。当前,叶片的冷却结构已由传统的对流、回流、撞击孔、气膜冷却等方式发展到高效发散气冷方式,冷却效率已由 300℃ 左右提高到 600℃ 以上^[4]。所以,陶瓷型芯的制造工艺也向形状更复杂、尺寸更小、性能更高的方向发展,从而大大地促进了高性能铸造高温合金在燃气涡轮叶片中的使用,出现了极为复杂的涡轮叶片。叶片的制造从最初的等轴多晶叶片发展到具有复杂气冷通道的定向凝固柱晶叶片和单晶叶片。由于陶瓷型芯的性能是决定叶片成品率和成品质

*上海市科委 2008 重大基础研究项目 (08dj1400403)。

量的关键因素之一,所以,多年以来发达国家对于陶瓷型芯的研究一直没有停止过,并且将其核心技术视为高度机密不予公开。陶瓷型芯制造技术一直是空心叶片铸造中的瓶颈,它决定了叶片的尺寸精度、合格率和铸造成本,因此,不断改进陶瓷型芯材料和制造技术十分重要。

陶瓷型芯材料的选择

空心气冷叶片熔模铸造生产中采用的陶瓷型芯在使用过程中要经受熔融金属液的长时间浸泡,因此,在这样苛刻的工作条件下,陶瓷型芯材料须满足以下要求:熔点或高温软化点要高(1600℃以上);具有较好的化学稳定性,浇注时不与合金中的活泼元素发生反应;热稳定性和抗热震性能好,线膨胀系数较小;型芯易从铸件中清除^[1,5-7]。要满足以上性能要求,必须采用合适的陶瓷型芯基体材料、矿化剂和科学合理的制作工艺。

1 基体材料

目前,国内外常用的陶瓷型芯基体材料主要有石英玻璃、电熔刚玉、锆英石、氧化镁、碳化硅等。其中普遍用于浇注高温合金空心叶片的陶瓷型芯基体材料主要有石英玻璃和电熔刚玉。

(1) 石英玻璃。

石英玻璃是熔融石英在快速冷却过程中来不及结晶而形成的无定形物质,由于其线膨胀系数极小,在20~1200℃范围内仅为 $(0.5 \sim 1.1) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,稳定性极好,并且具有良好的溶失性,因此长期以来一直是国内外应用最广的陶瓷型芯基体材料。

石英玻璃加热到1200℃左右时,开始转变为方石英,这个过程称为“析晶”。析晶产生的体积变化会使陶瓷型芯产生网状裂纹,降低型芯的强度。但析晶使二氧化硅由玻璃态转变为晶态,能有效地抑制玻璃态软

化的黏性流动,减少陶瓷型芯的高温挠度值^[8],显著提高型芯的高温抗变形能力。同时析晶的体积膨胀还可以抵消一部分因烧结而引起的收缩。随着对焙烧和浇注过程中方石英析出量控制能力的不断加强,正确利用析晶的影响,已使石英玻璃基型芯的高温性能有了较大的提高。研究表明,型芯中方石英含量控制在15%左右时,型芯具有良好的综合性能^[9-10]。但当

温度超过1550℃时,硅基型芯的抗蠕变性和化学稳定性难以满足复杂结构空心叶片铸造的要求,并易与高温合金中的某些元素(如C、Mg、Y、Ti、Al、Hf等)发生化学反应,形成金属氧化物或产生气体,使铸件产生氧化物夹杂和气泡缺陷。而且因其热稳定性差而易出现软化变形,造成铸件厚薄不均、型芯偏移、孔腔弯曲或露芯等缺陷。随着叶片材料抗氧化腐蚀性能的不断提高,合金中活性元素的种类更加复杂,石英玻璃基陶瓷型芯与这些活性元素间的化学反应不容忽视。

(2) 电熔刚玉。

随着高温合金叶片由定向柱晶向单晶发展,陶瓷型芯的工作条件变得越来越苛刻,陶瓷型芯要在1550℃以上甚至1650℃的高温金属液中浸泡1h以上,这就要求陶瓷型芯具有更好的高温性能,并且与合金熔体间的化学稳定性更好。

电熔刚玉在焙烧和使用过程中没有晶型转变,结构稳定,耐高温性能好,因此电熔刚玉基陶瓷型芯早

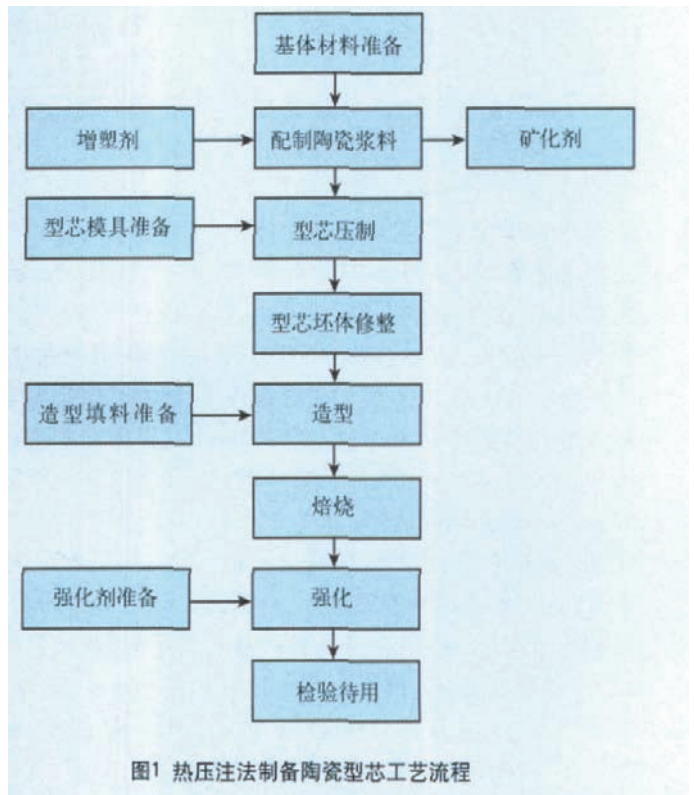


图1 热压注法制备陶瓷型芯工艺流程

在20世纪80年代后期就被前苏联和西方国家成功地用于定向单晶叶片的生产。与石英玻璃基陶瓷型芯相比,电熔刚玉陶瓷型芯的化学稳定性和抗蠕变性更好,可以保证复杂内腔结构中定向单晶空心叶片的尺寸精度和合格率,并降低叶片的制造成本。

高温合金空心叶片用陶瓷型芯基体材料的化学和粒度组成须符合严格的要求。基体材料中的杂质(如 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 和 Fe_2O_3)的存在,会导致型芯在焙烧过程中形成低熔点相,降低型芯的高温抗变形能力,因此,型芯料中应尽量减少杂质含量。

基体材料的粒度是否合理级配将直接影响型芯的烧成温度、烧成收缩、表面质量和高温性能。细颗粒的比表面能高,有利于烧结,但成形性差,会降低型芯的高温抗变形能力;粗颗粒成形性好,有利于复杂型芯的成形,但不利于烧结,型芯表面质量差。可见,粉料中的粗细粒度必须搭配合理并配以相应的烧成工艺,才能

提高型芯的综合性能。徐智清^[11]、张强^[12]、贺靠团^[13]、覃业霞^[14]分别研究了粉料粒度对XD-1硅基型芯和氧化铝基复合陶瓷型芯性能的影响,发现对于硅基和铝基陶瓷型芯,最理想的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,一般矿化剂的粒度应明显小于基体粉料的粒度,并且要均匀分散在基体中。张睿等^[15]在基体 Al_2O_3 粉体中加入了5%~15% (质量分数)的 Al_2O_3 纤维,研究表明:随着 Al_2O_3 纤维含量的增加,材料的抗蠕变性能下降,这主要是由于在高温下 Al_2O_3 晶粒与 Al_2O_3 纤维结合得更加紧密, Al_2O_3 晶粒和 Al_2O_3 纤维交界处的原子通过 Al_2O_3 晶粒和晶界进行扩散,加剧了样品在自身重力作用下发生的蠕变现象。 Al_2O_3 纤维的加入并不能形成弱界面,无法起到增韧作用。

2 矿化剂

矿化剂是用于型芯烧结过程中,在保持其设定性能的前提下降低烧结温度的添加剂。对于氧化铝基陶瓷型芯,为了解决其烧结难、化学脱除难等问题,通常在其中加入矿化剂,以在较低的温度下烧成一定的强度。但矿化剂的加入会牺牲一些高温性能(如蠕变强度等)。因此,希望在烧成的型芯中形成一些高温强化相,以提高陶瓷型芯的综合性能。

根据不同的使用要求,所用的矿化剂会有较大的区别。加入MgO或稀土氧化物(如 Y_2O_3 、 La_2O_3 等),能在焙烧过程中形成可用碱溶液或熔融碱腐蚀的铝镁尖晶石或 $mY_2O_3(La_2O_3) \cdot nAl_2O_3$ 。

MgO的热膨胀系数很高,添加量必须严格控制,超过5% (质量分数)时会增加型芯的膨胀率,如果焙烧温度控制不当,型芯表面易出现鼓包甚至胀裂现象。覃业霞等^[16]研究了MgO含量对氧化铝陶瓷型芯性能的影响,发现随着MgO含量的增加,样品相对密度先增加后减小,并且在MgO的质量分数为1%左右时,相对密度达到最大,这主要是由其中的 $MgAl_2O_4$ 含量变化对其影响的结果。当 Al_2O_3 中加入MgO时,MgO会在 Al_2O_3 的晶界处反应,生成镁铝尖晶石薄层,导致材料的烧结温度下降,这使材料的烧结过程进行得更加充分,气孔率减小。同时,MgO还是晶粒生长抑制剂,可阻止 Al_2O_3 晶粒的生长,因此,当MgO含量进一步增大时,MgO抑制 Al_2O_3 晶粒生长的作用逐渐加强,由于 Al_2O_3 晶粒无法有效地生长以填补气孔,所以大量的气孔被保留下来。

型芯中加入少量 TiO_2 可以大大促进 $\alpha-Al_2O_3$ 的烧结,并且可以促进其莫来石化。增加型芯中莫来石的含量,对型芯的高温强度和室温强

度均有好处^[17]。比较理想的矿化反应是矿化剂与氧化铝粉料形成固溶体或共晶体,使刚玉颗粒发生一定程度的晶格畸变,使烧结更具活性。除前面提到的矿化剂以外,常用的矿化剂还有 SiO_2 、 ZrO_2 等氧化物和二者组成的复合矿化剂。

在氧化铝陶瓷型芯的多相组成中,同时存在固相烧结和液相烧结机制。矿化剂及刚玉本身中少量杂质的存在增加了 Al_2O_3 的晶格缺陷浓度,从而加快了传质速度。矿化剂与基体颗粒间发生以固溶矿化作用为主的反应,形成一定量的固溶物和少量低熔点液相,这些液相冷却后便成为玻璃相包裹在刚玉颗粒表面,促进陶瓷型芯在较低温度下烧结。

陶瓷型芯的制备方法

陶瓷型芯的成型方法有热压注法、传递成型法、灌浆成型法等。

热压注成型即低压注射成型(Low Pressure Injection Molding, LPIM),是陶瓷生产中一种重要的成型方法。用热压注法成型的产品尺寸精确,表面光洁度高,更主要的是这种成型方法可以生产形状复杂的产品,因此,在工业陶瓷领域应用较为广泛。热压注成型是目前应用最广的陶瓷型芯制备方法,也是制备高温合金叶片用陶瓷型芯最常用的一种方法。

表1 国内外几种典型的高温空心叶片用陶瓷型芯的主要性能

型 芯	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙率 /%	线膨胀 /($\times 10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1}$)	收缩率 /%	抗弯强度 /MPa	挠度 /mm	表面粗糙度 / μm	溶失性 /min
含氧化钇的 氧化铝基型芯	3.95 ~ 4.10	44 ~ 49		1.8 ~ 2.2	17 ~ 34 (20 $^\circ C$)			
XD-1	2.70	35	0 ~ 1	0.6 ~ 0.8	10 ~ 13 (25 $^\circ C$) 8 (1500 $^\circ C$)		$R_a 6.3 \sim R_a 3.2$	17
AC-1	2.38	34	8	1.5	25 ~ 29 (20 $^\circ C$) 5 ~ 7 (1500 $^\circ C$)	0.8 ~ 1.6		
AC-2	2.10	37	8	0.4 ~ 0.6	20 ~ 28 (20 $^\circ C$) 6 ~ 8 (1500 $^\circ C$)	0.3 ~ 0.7		
Al_2O_3/SiO_2 纳米复合型芯	2.30	37.8		1.26	72 (20 $^\circ C$)	1.1		

热压注成型是在热压注机上进行的。它的基本原理是在压力下将具有较好流动性的热浆料压入金属模内,并在压力的持续作用下充满整个金属模具,同时进行凝固,然后除去压力,拆开模具,形成含蜡的半成品,再经过脱脂(除去粘结剂)和焙烧即可得到制品。其制芯工艺流程如图1所示^[7]。

工业氧化铝具有多孔性疏松结构,易于吸蜡和再排出,目前国内常用它作为填料。工业氧化铝粉在使用前要经过1300℃锻烧,使绝大部份的 γ - Al_2O_3 转变为稳定的 α - Al_2O_3 ,从而避免其在作填料时由于晶型转化而产生的体积变化。但工业氧化铝中含有少量的 Na_2O ,在型芯焙烧过程中形成 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元低熔点物质,不可避免地会引起型芯表面和薄边“瓷化”,使型芯光洁度大大降低。所以,愈经多次使用的填料,其所含的 Na_2O 愈少,型芯的光洁度愈好。张强^[18]研究了 Al_2O_3 填料中 Na_2O 对XD-1硅基型芯焙烧过程的影响,发现 Na_2O 等碱土氧化物含量过高会造成型芯中方石英析出量过多,影响硅基陶瓷型芯的烧成率。

炉温均匀性在陶瓷型芯制造过程中起着非常重要的作用。顾国红^[19]研究了在规定的焙烧工艺下,焙烧炉温度场的均匀性对型芯性能的影响。研究表明,炉温均匀性对同炉烧结的陶瓷型芯的抗弯强度、收缩率有直接的影响,钟罩式炉由于其良好的密封性和发热元件的良好分布使炉中温度的均匀性大大优于箱式电阻炉,烧结的型芯性能波动较小。

杨耀武等^[20]、薛明等^[21]、赵红亮等^[22]分别研究了强化处理对氧化铝基陶瓷型芯高温变形能力的影响。研究表明,强化根本改变了氧化铝基陶瓷型芯的高温热强性。氧化铝基陶瓷型芯热强性的提高主要是因为强化处理过程中强化剂溶液渗入

到陶瓷型芯的孔隙中,并到达颗粒边界,其中的 Si^{4+} 颗粒与型芯中 Al_2O_3 颗粒发生了扩散与传质作用,强化后的型芯中出现了莫来石新生片状晶,该晶群在型芯内局部形成了高强的互锁网络,能阻隔单晶浇注时液相的粘滞流动,减少了型芯的高温变形,未经强化的型芯中无莫来石。

陶瓷型芯的研究现状

陶瓷型芯在西方国家的精密铸造中得到了广泛应用,在航空领域已形成了专业化、规模化生产。前苏联早已在1500℃生产柱晶空心叶片时使用氧化铝基型芯。英国、美国在20世纪70年代已经有氧化铝型芯,它多用于共晶合金浇铸条件,即在1850℃的温度下保持16h甚至更长时间的高性能型芯。我国于20世纪80年代初期开始从事定向空心叶片陶瓷型芯的研究工作,北京航空材料研究院等多家单位先后研制成功了多种性能优良的定向凝固空心叶片用陶瓷型芯。国内外几种典型的高温空心叶片用陶瓷型芯的基本性能如表1所示^[23,26,33]。

1 含氧化钇的氧化铝基陶瓷型芯^[23]

含氧化钇的氧化铝基陶瓷型芯是美国专利United States Patent 4837187中介绍的一种陶瓷型芯。型芯的基体材料 Al_2O_3 由粗、细2种粉体组成,平均颗粒尺寸为0.75~3 μm 的 Al_2O_3 至少有1%。矿化剂为氧化钇,其平均粒径约5 μm ;增塑剂及表面活性剂除了有熔烃基石蜡外,还有强化陶芯湿强度的石蜡、抗偏析剂和分散剂油酸;晶粒生长抑制剂氧化镁,其平均颗粒尺寸为0.75 μm ;加入的活性石墨粉作为易溃散粉。陶瓷浆料中粉料占80%~86%、增塑剂占14%~20%(质量分数)。

将陶瓷浆料混合均匀,并加热到80~125℃范围内待用。将混好的热浆料压射到型芯压型中,压力达

到1.38~10.34MPa,压型是否加热取决于型芯的复杂程度,型芯固化后就可将其从压型中取出。将压好的型芯取出后放在型芯托上,型芯托通常分为上、下两半。型芯先置于下托上,上面用石墨粉盖上进行预焙烧,焙烧期间石墨粉靠毛细作用将型芯中的增塑剂吸出。预焙烧的时间和温度取决于型芯的截面厚度,温度为232~288℃,可持续68h。预焙烧后把型芯上部的石墨粉刷干净,将上托放在下托上,使型芯密封在托中,升温进行型芯的烧结,升温速度为60~120℃/h,烧结温度为1600~1700℃,烧结时间为48h。在烧结期间,型芯组织中较细的 Al_2O_3 颗粒与 Y_2O_3 及 MgO 会发生化学反应,生成 $3\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$,某些细的 Al_2O_3 与 MgO 反应生成 MgAl_2O_4 。这种陶瓷型芯的微观结构特点是存在未反应的 Al_2O_3 颗粒,它的表面成分为 $3\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$ 多晶,并且还含有 MgAl_2O_4 。在烧结期间,碳质易溃散剂也从型芯中燃烧除净,结果在型芯中形成网状孔隙。

含氧化钇的氧化铝基陶瓷型芯可在1600℃工作,可用于生产含活泼金属的高温合金空心叶片。在加压容器中用标准苛性碱溶液处理,不到60h即可容易地将型芯从铸件中清除干净。

2 含氧化钪的氧化铝基陶瓷型芯^[24]

含氧化钪的氧化铝基陶瓷型芯是美国专利United States Patent 5977007中介绍的一种陶瓷型芯。氧化钪约占陶瓷粉料的15%~35%;第二种陶瓷粉料可为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Y_2O_3 、 Er_2O_3 或其他粉料中的一种,占陶瓷粉料的60%~80%,再加0~10%的易溃散剂和10%~20%的增塑剂(质量分数)。 Er_2O_3 最好用经锻烧或熔融的氧化钪粉,粒径小于325号筛,第二种陶瓷粉料(如 Al_2O_3)最好有粗、细2种,颗粒尺寸为325号筛~900号筛。增塑

剂和易溃散剂成分同上述含氧化钇的氧化铝基陶瓷型芯。

将陶瓷浆料在V型混料机中混合均匀,然后将热陶瓷浆料用3.45~13.80MPa的压力压射到型芯压型中,待浆料凝固后,打开压型取出型芯坯体放在型芯下托上,将下托上的型芯坯体用石墨粉盖上进行预焙烧,然后把上部石墨粉刷干净,盖上上托使型芯密封在托中,升温进行焙烧,升温速度约为60~120℃/h,升至烧结温度1650~1670℃,保温1h。型芯的主要相是未起反应的 Al_2O_3 陶瓷粉,同时存在反应生成的 Er_2O_3 - Al_2O_3 石榴石相和少量反应的 Er_2O_3 及 ErAlO_3 相。 Er_2O_3 - Al_2O_3 石榴石相将 Al_2O_3 连结在一起。

氧化钇基陶瓷型芯不与镍、钴基高温合金反应,在凝固过程能保持型芯尺寸稳定,孔隙率高(体积孔隙率45%~55%),可用于定向凝固镍、钴基合金涡轮叶片的生产中。

3 XD-1型氧化硅陶瓷型芯^[25-27]

XD-1型硅基陶瓷型芯是北京航空材料研究院研制成功的一种用于铸造浇注温度较低的柱晶叶片的陶瓷型芯,其成分(质量分数)为50%~80%的 SiO_2 和20%~50%的 ZrSiO_4 。 ZrSiO_4 的添加,既可提高型芯强度,又能抑制石英玻璃高温时的粘滞流动,从而降低型芯的收缩率,提高型芯尺寸的稳定性^[28]。

4 AC系氧化铝陶瓷型芯^[29-31]

北京航空材料研究院于20世纪90年代先后研制成功了AC-1和AC-2型氧化铝陶瓷型芯,用于制备定向凝固单晶叶片。

AC-1型芯是适合我国第一代单晶合金在1540~1580℃浇注条件下的陶瓷型芯,其主要成分(质量分数)为:92%~99%的 α - Al_2O_3 ,1%~8%的TC-1矿化剂,13%~18%的增塑剂。 α - Al_2O_3 是由不同粒度的粉料混合而成,其中粗粉含量(质量分数)为60%~75%。以50

~200℃/h的升温速度从室温升到1250~1450℃,保温4~10h后断电,待炉中温度冷却到200℃以下后出炉,按此工艺可获得80%以上烧成率。AC-1型芯研制成功后,用其制成了4种不同型号发动机叶片型芯,并用DD3、DZ4、DZ22合金在4种不同类型定向凝固炉中浇注了近250片的定向和单晶叶片,LM-1脱芯剂能使其顺利地脱芯。实践表明,AC-1型芯能承受高达1560℃的工作温度,烧成率一般大于70%,浇注的叶片壁厚较为均匀。

为了满足我国第二代单晶合金叶片生产的工艺需要,即叶片浇注温度的提高,需要氧化铝型芯具有更高的高温性能和在高温下表现出对合金元素很好的化学惰性,并且在焙烧时具有很小的烧成收缩和易于烧成的特点。为此在AC-1型芯的基础上开展了对AC-2型氧化铝基陶瓷型芯的研究工作。AC-2型芯的成分尚未见具体报导。AC-2型氧化铝陶瓷型芯的性能比AC-1有了很大的提高,在保证足够的烧成抗弯强度的前提下,收缩率和挠度有了明显的改善,使型芯的高温变形率下降,提高了AC-2型芯的高温性能和单晶浇注时叶片的烧成率。

5 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 纳米复合陶瓷型芯^[22,32-33]

中国科学院沈阳金属研究所制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 纳米复合陶瓷型芯。试验原料为 α - Al_2O_3 微粉、莫来石粉和 SiO_2 纳米粉,增塑剂为70%石蜡和30%蜂蜡的混合物。为防止常压烧结过程中晶粒长大,加入1%的 MgO 粉体作稳定剂。

SiO_2 纳米粉的加入大大改善了材料的流动性和烧结状态; SiO_2 纳米粉的最佳加入量约为5%(质量分数);加入 SiO_2 纳米粉后,型芯的室温强度可提高到纯 Al_2O_3 陶芯的3~4倍; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 纳米复合陶芯的脱芯较为容易,采用熔融状态的TZ脱芯剂,再辅以高压水冲洗,

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 纳米复合陶芯能够被利脱除。试验证明该陶芯能满足压蜡模、脱蜡、脱芯及浇注的需要。

6 RBA系氧化铝陶瓷型芯^[1,34]

RBA系氧化铝陶瓷型芯,即反应结合氧化铝陶瓷型芯是国内研制出的另一种用于单晶浇注的陶瓷型芯。它是在氧化铝陶瓷型芯中加入活性添加剂铝粉,铝粉在500℃左右开始氧化生成氧化铝,将适当粒度的电熔刚玉结合在一起形成强度,1350℃即可完成烧结。由于反应生成的是不稳定的 $\text{H-Al}_2\text{O}_3$,在脱除型芯时容易从结合点破坏,因而使得脱芯变得容易。RBA氧化铝陶瓷型芯经过近百片定向凝固空心叶片的浇注考核,证明烧结成晶率高达90%以上,浇注漏芯率极低,满足了定向单晶的铸造要求。

结束语

高温空心叶片陶瓷型芯的制造技术在各国外都是核心机密,正因为这种技术封锁,我国的陶瓷型芯生产技术与发达国家有着较大的差距,至今国内还没有高水平、商品化的陶瓷型芯专业生产厂,这极大地限制了我国精铸水平的发展。目前,国内用于高温单晶定向浇注的陶瓷型芯产品类型单一,成形工艺传统,行业发展缓慢,这已经严重制约了我国航空事业的发展。因此,应加大对陶瓷型芯的研究力度,在提升原材料性能的同时,不断完善配套的生产工艺和检测设备,深入探讨和研究一些关键的科学问题。同时,建立我国陶瓷型芯商品化的专业生产厂,打破精铸生产厂之间的技术封锁,做到资源、技术与信息共享,以满足我国航空发动机发展的需要。

本文有参考文献34篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 岩石)