

钛合金铸造用型芯应用现状及展望

李重阳¹, 刘鸿羽¹, 薛松海², 刘时兵¹, 史 昆¹, 张志勇¹, 韩 冬¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 机械科学研究总院海西(福建)分院有限公司, 福建三明 365050)

摘要: 在成形具有复杂内腔结构的钛合金铸件时, 型芯的正确选取和使用至关重要。就目前钛合金铸造应用最为广泛的三种型芯(石墨芯、金属芯、陶瓷芯)进行了系统阐述, 并对未来型芯的发展进行了展望, 以期为我国高端钛合金部件制造水平的提升提供有益借鉴。

关键词: 钛合金铸造; 石墨芯; 金属芯; 陶瓷芯; 3D打印型芯

作者简介:

李重阳(1995-), 男, 硕士生, 主要研究方向为钛合金铸造。电话: 17512404691, E-mail: 764133786@qq.com

通讯作者:

刘鸿羽, 男, 高级工程师, 硕士。电话: 13898867243, E-mail: 13898867243@126.com

中图分类号: TG290

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)09-1023-07

基金项目:

辽宁省科技计划(2019JH8/10100008); 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1808030); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC190490)。

收稿日期:

2021-02-08 收到初稿,

2021-03-23 收到修订稿。

钛合金因其自身卓越的综合性能, 如低密度、高比强度、耐高温和抗腐蚀等, 已成为现代工业中不可或缺的先进结构材料。尤其近几十年来, 伴随着宇航业和国防工业的迅猛发展, 钛合金的使用量和应用水平都有了质的提升。然而, 随着航空和航天技术的不断革新与发展, 关键构件的服役环境也变得日益严苛, 这不仅直接导致钛合金构件结构的复杂化, 而且也对钛合金的铸造水平提出了更高要求。以某钛合金发动机零部件为例(图1), 其整体尺寸约为 $\Phi 300\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 内部多孔多腔、结构复杂且型面质量要求极高。此时仅依靠型壳已无法满足该铸件的铸造需求, 必须借助型芯与型壳相互配合才能实现。由此可见, 型芯的制备已成为铸造具有复杂型腔钛合金铸件不可或缺的先决条件。从最初空心钢管等简单型芯, 到现有的复杂流道、空心叶片等异性型芯的成功制备及应用, 为钛合金铸造奠定了基础。

1 型芯的种类

目前钛合金铸造中常用的型芯种类包括: 石墨芯、金属芯和陶瓷芯。这三种型芯在成形质量、可加工难度和使用成本上都各有优劣, 实际生产中主要根据铸件的成形难度、生产批量以及质量要求等因素来进行选取。

1.1 金属芯

金属芯常用的材料有铸铁、铸钢、铸铜等, 其主要特点为可以采用机加工结合焊接等成形方式, 制备复杂程度高、壁厚小的型芯; 金属芯的热导率要低于石墨芯, 因此可以减缓型芯对金属液的激冷作用。对于难以清理型芯的内腔结构, 金属

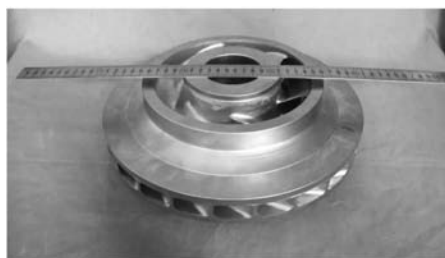


图1 某钛合金发动机零部件

Fig. 1 A titanium alloy part of an engine

芯可以通过化学腐蚀脱芯的方法进行处理。图2为金属芯与石墨型组合图。可以看出，金属芯可以达到石墨芯无法实现的尺寸和形状，而且在搬运、浇注过程中不易损坏，并且在常规机械力破坏脱芯法无法深入的铸件孔隙内部，可以通过化学腐蚀金属芯来完成脱芯。但值得注意的是金属芯在受热后易发生膨胀，这不仅会对铸件成形尺寸精度造成影响，而且金属芯在化学腐蚀脱芯的过程中，也可能会由于长时间浸泡腐蚀液而对铸件表面产生污染。因此在大尺寸型芯的选用上应尽量避免采用金属芯，减少金属芯的蓄热量及酸洗时间。除此之外，金属芯本身强度硬度高，在铸件凝固收缩时无退让性，容易在铸件表面产生微裂纹。

大量实践证明，在金属型（芯）表面进行耐火涂层的涂敷，可有效降低金属芯的激冷效果，改善金属芯的热膨胀带来的影响。所使用涂层的耐火骨料主要为氧化钇、氧化锆、氧化钙等一种或多种氧化物的混合物。郭景杰^[1]曾对不同含量氧化钇稳定的氧化锆涂层在金属型（芯）上进行等离子喷涂，所有耐火涂层均与钛液发生了不同程度的反应，其中4mol%氧化钇部分稳定的氧化锆成形质量最好。姜延亮^[2]在灰铸铁金属型（芯）上分别涂敷氧化钇和氧化铝涂层，结果发现氧化铝涂层与钛液发生了剧烈反应，而氧化钇涂层成形的试样表面平整，无明显反应层。董文博^[3]在氧化钇为耐火骨料的涂层中，对粘结剂的选择以及涂料的配比、干燥方式等进行了优化选择，使得涂料的导热系数更低，金属芯对钛液的激冷作用以及钛液的热损失明显减小。涂层可以有效解决金属芯的激冷作用，但却无法改善型芯退让性的问题。谢华生^[4]曾研发出一种适用于钛铝合金的可溶金属芯，该型芯采用低熔点金属或其合金制备，金属液充型时在型芯表面凝固，具有一定支撑强度时，低熔点型芯便发生软化甚至液化流出，从根本上解决了金属芯没有退让性的问题，通过与耐火涂层的结合，制备出结构完整、表面光洁的铸件空腔。

目前在推进钛合金快速铸造的趋势下，结合实际生产需要，在型芯的选择上，除必须采用金属芯以



图2 石墨型与金属芯组型

Fig. 2 Graphite mold assembled with metal core

外，如薄壁型芯的制备、无法使用机械力破坏脱芯的复杂结构等，大多数仍采用石墨芯或者陶瓷芯。

1.2 石墨芯

石墨作为最早应用于钛合金的造型材料，在钛合金铸造上的应用有捣实型石墨铸造、机加工石墨型铸造两种主要造型方法。随着铸造工艺水平的不断进步，捣实型石墨铸造已经逐渐被淘汰，但机加工石墨型却在不断改进和提高，得到了更加广泛的应用，特别是在大型钛合金铸件的制备上具有重要地位^[5]。

石墨本身强度较高、硬度低、易于加工，不仅在石墨芯的制备上难度低，而且在大型铸件的空腔结构成形用型芯的脱芯上，具有显著的优势。图3为某钛合金泵体石墨型与石墨芯组型图^[6]，可以看出在数控机床加工下，对于简单曲面型内腔，石墨芯完全可以满足使用需求，特别是对于超大型铸件大型芯的选用，石墨芯在脱芯工序中，相较于高温焙烧后形成的陶瓷芯以及需要化学腐蚀或者机加工清除的金属芯，石墨芯的机械力破坏脱除要方便得多，并且钛合金铸造用石墨大多为废电极石墨，在生产成本上也具有优势。

但是，石墨本身的导热性好，而钛液的比热小、易凝固，极易在铸件表面产生冷隔、流痕、裂纹等缺陷，在石墨型铸造生产的铸件外表面上，这些缺陷都可以通过后续的补焊、打磨等工序来进行修补，但在复杂内腔进行这一系列操作的难度系数大，容易为铸件质量埋下隐患。为了解决石墨本身这一特性带来的问题，众多学者对如何提高石墨型（芯）的表面成形质量进行了研究。最常用的手段为在石墨型（芯）表面上涂敷氧化物耐火涂层，通过涂层来改善石墨本身的激冷效果，降低石墨型（芯）的冷却速率，使石墨型（芯）表面平整，提高铸件表面的光洁度和消除毛刺等缺陷。最常用的耐火涂层骨料包括氧化钇^[7]、氧化锆等金属氧化物。赵军^[8]等研究了四种不同氧化物（氧化钇、氧化锆、氧化铝、锆酸钙）耐火涂料对石墨型铸件表面质量的影响，发现氧化钇与氧化锆的成形质量最为优异，未与铸件表面发生明显反应。最近的相关研究进一步揭示，耐火骨料的粉液比对涂层作

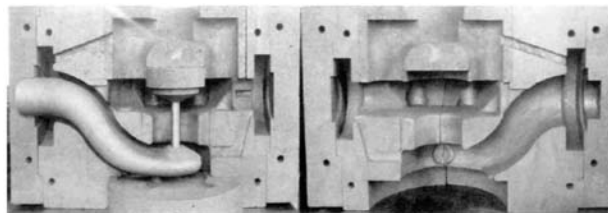


图3 某钛合金泵体石墨型与石墨芯组型图

Fig. 3 Graphite mold assembled with graphite core for casting a titanium alloy pump body

用效果也存在一定影响,当氧化锆为耐火骨料,粉液比为2.5:1时最为适宜^[9]。殷莹^[10]等人对涂层在石墨型(芯)表面涂敷的时间进行了探讨,发现不经过高温焙烧,在石墨真空除气之后进行涂敷的涂层,与石墨型(芯)的结合强度低,容易粘附在金属表面。仅使用保温炉对涂层进行烘干,也无法使涂层内的有机物完全挥发,易在浇注过程中出现气孔、夹杂等缺陷。因此涂层应在石墨型(芯)真空除气前进行涂敷,这样不仅可以增强与石墨型(芯)表面的粘接强度,同时避免了起皮、脱落等现象的发生。

型(芯)表面涂敷稀土氧化物耐火涂层外,为了降低使用成本,在保证质量的前提下,出现了氧化物混合涂层材料等新工艺。聂广卫^[11]将二氧化锆、二氧化钛以及氯化钛三种耐火骨料按一定比例进行配比,与粘结剂乙酸锆、分散剂、消泡剂等组分一起,混合制成了一种钛合金铸造用石墨型(芯)涂膏。该涂膏中不含贵金属氧化物,成本低,可以显著降低铸件表面粗糙度和污染层厚度,使成形表面更加平整。胡博^[12]等人提出了一种石墨表面孔洞修复方法,通过石墨粉、粘结剂二醋酸锆、润湿剂和工业纯酒精混合,制备出石墨孔洞填充剂,在石墨真空除气前涂敷表面,再用砂纸将涂刷痕迹打磨平滑。该工艺对石墨型芯表面的坑洞及加工痕迹进行了修复,完全消除了铸件表面的毛刺,流痕数量也明显减少,表面质量得到改善,减少了后续的打磨程度。

1.3 陶瓷芯

陶瓷芯的表面成形质量在三种型芯中最高,根据陶瓷芯成形方法的不同可分为热压注成形、凝胶注模成形及3D打印陶瓷技术等^[13],目前热压注成形技术应用最为广泛,后文将对新兴的3D打印陶瓷芯进行阐述。传统的热压铸成形等方法制备陶瓷芯,离不开模具的制备,因此也限制了陶瓷芯的复杂程度。模具的制作成本较高,但是在批量生产中却能够显著提高效率、压缩成本。图4为某发动机铸件用陶瓷芯与石墨铸型组型,该实心结构的陶瓷芯在脱芯工艺上仍采用机械力破坏脱芯手段,但由于陶瓷高温烧结后强度硬度得到显著提升,清理难度要略高于石墨芯。但在铸件结构允许的情况下,例如骨架类铸件,可以采用中空薄壁状陶瓷芯,这样不仅可以节省原材料,还有利于后续铸件脱芯。

陶瓷芯的表面成形质量要优于其他两种型芯,其耐火骨料仍主要以难溶金属氧化物为主。传统的高温合金空心叶片用陶瓷芯主要有氧化硅基和氧化铝基陶瓷芯两种,但是这两种材料对于熔融钛液不具备高温反应惰性,容易在铸件表面形成极厚的反应层,影响

铸件质量^[14]。因此人们开始借鉴于熔模铸造型壳用氧化物耐火材料,包括氧化钽、氧化钇、氧化锆、氧化钙等一种或几种氧化物的混合物。其中氧化钽是最早被应用于陶瓷型(芯)中的耐火氧化物,但是由于其具有放射性,已经被淘汰^[15]。氧化钇作为陶瓷型壳面层耐火材料和型芯耐火骨料具有十分显著的优势,其耐热温度高,具有十分优异的化学反应惰性,使钛合金铸件的成形表面质量高^[16]。但是由于稀土氧化物价格昂贵,许多科研工作者一直在寻找可以替代或者降低氧化钇含量的混合型氧化物耐火骨料。作为稀土氧化物陶瓷芯的替代物,氧化锆陶瓷型芯成为首选。通过热挤压成形的氧化锆陶瓷芯,在1 700 °C时没有与TC4合金发生明显的界面反应,并且具有十分优异的强度及较低的热膨胀率^[17]。氧化锆近年来价格也在逐步攀升,为了进一步降低氧化锆在型芯骨料中的含量,于瑞龙^[18]等制备了氧化镁掺杂氧化锆钛合金用陶瓷型芯,加入氧化镁的含量可达25%,并通过一系列矿化剂的定量加入,改善了陶瓷芯的综合性能^[19]。该工艺制备的陶瓷芯与铸件的反应层厚度在50 μm以内,且高温抗弯强度为9.67 MPa,膨胀率仅为0.52%。

在陶瓷芯中加入氧化镁不仅能够降低型芯的成本,而且由于氧化镁与水可直接发生反应,生成氢氧化镁,这极大程度地降低了复杂内腔陶瓷芯的清理难度。除氧化镁之外,氧化钙与熔融钛液之间的高温反应惰性要高于氧化镁,并且价格更为低廉。韩绍娟^[20]等将质量分数在4%~20%之间的氧化钙,与氧化锆、氧化钇混合制备而成的钛合金精密铸造用陶瓷芯,耐火度和抗热冲击性能优异,不会与钛合金溶液发生明显的化学反应,具有优异的脱芯能力,并且常规存储时对水分、气体的吸附能力较低,不易受潮溃散。北京航空航天大学^[21]研发的氧化钙基陶瓷芯,最高使用温度可达1 850 °C,其中氧化钙的含量在74.9%以上,其余为少量的氧化钽、氧化钇与氧化锆。值得注意的是,虽然氧化钙的成本低廉,其高的质量占比可以降低

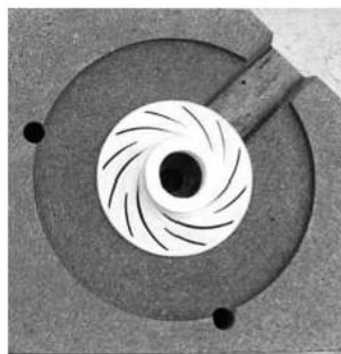


图4 某发动机铸件用陶瓷芯
Fig. 4 Ceramic core for an engine casting

低陶瓷芯的成本,但也会使得型芯对水气的敏感性提高,不利于型芯的运输和长时间存放,并且在陶瓷型壳与陶瓷芯配合使用时,难以避免会与水基涂料接触,这也是氧化钙陶瓷芯使用时需要注意的。另外,氧化钙的致密化处理也十分重要,否则质地疏松的氧化钙陶瓷表面会出现掉渣、掉粉现象。

除了难溶金属氧化物作为陶瓷芯耐火骨料外,科研工作者们也在积极寻找其他种类的耐火材料。有“白石墨”之称的氮化硼不仅高温下化学惰性高,还具有十分优异的耐热性和热强性,其热膨胀系数低,常温下的抗弯强度可达到70 MPa左右,并且具有可切削加工性,可以通过加工得到复杂形状^[22-23]。有研究^[24]表明氮化硼粉可代替金属氧化物作为钛合金精密铸造陶瓷型壳的面层材料,型壳与铸件表面反应程度低,生成的污染层厚度小。但是由于氮化硼陶瓷的常温硬度高,在制作陶瓷芯时,复杂内腔结构不易脱芯,于是为了改善型芯的脱芯性能,可适当地在耐火骨料中添加少量的氧化钙或者氧化镁,基于水溶芯原理进行脱芯^[25]。南海^[26]等人研发的一种氧化硅基钛合金铸造用陶瓷型芯,通过在氧化硅陶瓷型芯表面涂敷氧化锆或者氧化钇涂层,来隔绝钛液与型芯基体之间的反应;该型芯的制备成本低,脱芯率高,但铸件表面污染层最大厚度达到0.4 mm,与其他种类的型芯仍有较大差距。

2 3D打印型芯的制备

3D打印技术近几年来发展迅速,可成形的材料多种多样,包括石蜡、塑料、金属、陶瓷等。在铸造行业上,3D打印技术的应用主要包括在成形铸件表面进行增材制造、通过3D打印技术制备铸型或型芯、直接成形铸件模样(应用于砂型、消失模或熔模精密铸造)等几种主要类型^[27]。

2.1 3D打印陶瓷芯

3D打印陶瓷制品,按原材料初始状态分类可有片材、丝材、浆材及粉材四种。适用于3D打印的陶瓷材料目前主要有氧化物陶瓷(氧化硅、氧化铝)、磷酸三钙陶瓷、有机前驱体基陶瓷材料以及碳化硅、氮化硅、碳硅化钛陶瓷^[28-29]。其中3D打印氧化铝及氧化硅基陶瓷在高温合金空心叶片用陶瓷芯的制备上,具有十分成熟的应用^[30-31],相较于其他种类的陶瓷材料,这两种陶瓷芯只需考虑如何降低基体与钛合金界面反应程度即可,用于钛合金铸造用型芯的可行性较高。有学者^[8]曾在石墨铸型表面涂敷氧化铝涂层,结果铸件表面与氧化铝涂层发生了剧烈反应,表面显微硬度变化层厚度在700 μm以上,因此3D打印氧化硅基和氧化铝

基陶瓷进行高惰性耐火涂层的保护,这对于提高铸件表面质量是十分必要的。

为了获得高质量的铸件表面,仍需要采用耐火度较高的氧化物材料进行陶瓷3D打印。目前以氧化钇为主要基体材料的陶瓷3D打印工艺尚未有具体报道,而氧化锆陶瓷直接成形研究相对较多,但氧化锆陶瓷的3D打印工艺也面临着许多难题,主要包括打印工艺的选择、原材料的制备以及打印设备三个方面。德国的HAGEDORN曾使用SLS技术对氧化铝-氧化锆陶瓷修复体进行打印成形,结果成形件表面粗糙,内部存在许多裂纹,而且精度低,难以成形大尺寸复杂件。史玉升^[32]通过SLS技术与CIP(冷等静压)相结合,制备出高致密度氧化锆陶瓷件,解决了SLS成形件密度低的问题,但是陶瓷件尺寸收缩大,无法保证所制备陶瓷芯的尺寸精度。喷墨成形打印技术由于设备本身的局限性,无法成形在Z轴方向具有不同高度的陶瓷件,这一点极大地限制了陶瓷件的尺寸。此外,陶瓷墨水的制备也存在两个问题,一是墨水中固相含量与粘度、分散性之间的相互矛盾,二是陶瓷墨水与打印设备的适配性^[33]。除上述成形工艺外,光固化成形、浆料直接成形等许多技术都在氧化锆陶瓷3D打印领域有成功的应用^[34],但受成形尺寸的影响,主要集中在陶瓷饰品、口腔医学等领域,暂无在钛合金铸造领域上的大规模应用。

3D打印钛合金铸造用陶瓷芯,最为主要的目的在于提高型芯制备的复杂程度,基于3D打印技术直接成形原理,可成形的型芯复杂度要远高于机械加工的石墨芯、金属芯以及模具成形的常规陶瓷芯。对于复杂内腔型芯的脱芯,化学腐蚀法要比机械力破坏脱芯方法更加适用。氧化硅基陶瓷芯的脱除要简单得多,其通常采用脱芯釜设备,在一定压力和温度下,将型芯在脱芯介质(沸腾的氢氧化钾或氢氧化钠碱溶液)中浸泡,促使二氧化硅与碱溶液发生反应,生成可溶于水的硅酸盐,从而完成脱芯。相比之下,氧化铝基陶瓷中主要成分为刚玉,耐蚀性更高,脱芯难度也随之加大。提高氧化铝陶瓷芯的脱芯能力主要有两种途径,一是提高型芯的孔隙率,但这势必会影响到型芯的强度;二是优化脱芯的工艺方法和设备^[35]。西方国家在氧化铝陶瓷脱芯工艺上的研究要早于我国,具有明显的技术领先优势,并且大部分仍处于保密状态,目前已知的主要方法为通过高压将高温苛性碱溶液引流或者喷射在型芯上,或者以高压脉冲的方式冲击型芯进行腐蚀脱芯^[36-37]。沈阳铸造研究所曾相继提出了浓度70%的氢氧化钾脱芯液、压力3.8 MPa和温度380 ℃的高温高压沸腾碱溶液脱芯工艺及浓度70%氢氧化钾脱芯液、压力25 MPa和脱芯温度390 ℃的三次循环脱芯

工艺^[38-39], 并针对燃气机涡轮叶片用复杂氧化铝陶瓷芯研发了一套高温高压脱芯装置, 对其他种类的氧化铝陶瓷芯的脱芯工艺也具有普遍适用性^[40]。朱伟军^[41]等人研发了一种通过气流搅拌来加快氧化铝陶瓷芯脱芯的设备, 解决了在沸腾碱溶液脱芯过程中流道深处的碱液流动受阻和脱芯速率缓慢的问题, 提高了脱芯效率。

2.2 3D 打印砂芯

钛合金砂型铸造从最开始的捣实型石墨铸造, 到如今以水玻璃砂、锆英砂、镁橄榄石砂、铝矾土等铸型材料, 结合硅溶胶、锆溶胶等粘结剂, 钛合金快速砂型铸造也在不断发展。图5为水玻璃砂铸型配合表面涂敷不同目数氧化锆与硅溶胶、酒精及PVB配制而成的涂料, 浇注而成的铸件表面形貌^[42]。可以看出铸件表面存在大量细小的孔洞结构, 界面反应污染层厚度在130 μm以上, 与石墨型铸件表面成形质量相比, 仍存在较大差距。肖强伟^[43]曾以铝矾土配合硅溶胶的砂型铸造工艺, 砂型与砂芯相结合, 表面涂覆氧化钇耐火涂层, 生产出某大型钛合金泵体, 但铸件内部存在局部缩松, 并且在尺寸上有超差情况。与普通石英砂相比, 镁橄榄石等优质铸型材料成本略高, 因此也有

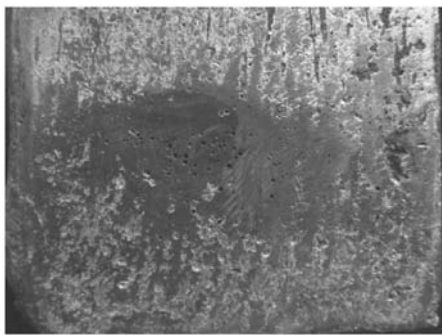


图5 水玻璃砂铸型成型的钛合金铸件表面
Fig. 5 Surface of titanium alloy casting produced with sodium silicate sand mold

学者进行了梯度砂型的研究制备, 即内层使用高质量耐火材料, 而外层使用常规耐火砂, 来降低砂型铸造的成本。

3D打印砂型(芯)工艺目前发展十分成熟, 以3DP工艺为例, 采用石英砂与有机粘结剂的逐层打印, 快速成形, 目前广泛应用于铸钢件的生产。但是该工艺在钛合金领域的应用主要受制于所使用的有机粘结剂发气量大, 无法直接进行浇注; 砂型(芯)高温性能差, 无法满足涂敷耐火涂层焙烧后仍需要保证一定的强度。在解决发气量的问题上, 国内外的学者已经开始对无机粘结剂的砂芯3D打印工艺展开了研究, 包括磷酸盐无机粘结剂、硅酸钠无机粘结剂与双组分热硬化无机粉末粘结剂等多项研究^[44-46]。这在很大程度上解决了发气量的问题, 但是当砂型(芯)的烘烤温度达到800 °C以上时, 整体的残留强度低于0.5 MPa, 无法进行耐火涂层的涂敷和焙烧, 不能满足钛合金真空离心铸造所需强度。若能够直接采用硅溶胶、水玻璃等高温性能较好的无机粘结剂, 并解决打印设备对该种类粘结剂的适用性问题, 将会极大地降低钛合金型芯的制备成本及生产周期。

3 展望

在现代高端装备轻合金铸造领域, 为了能够保证铸件运行的平稳性和安全性, 大都采用整体结构件, 因此型芯的使用毋庸置疑, 并且由于铸件内表面修补的可操作性低, 所以对于型芯成形的表面质量提出了更加严苛的要求。现有的钛合金用型芯基本满足当下生产需要, 但各类型芯的优缺点也十分明显, 我们需要基于型芯的复杂化、高惰性、高精度、易脱除和低成本的目标, 在现有的工艺基础上继续探索, 或者开辟新的领域, 如进一步探索氧化钇、氧化锆陶瓷3D打印工艺的研究, 以及复杂陶瓷芯的脱芯工艺; 开发3D打印砂芯在钛合金铸造中的应用等, 以满足我们日益提高的钛合金铸造技术水平的需要。

参考文献:

- [1] 郭景杰, 丁宏升, 苏彦庆, 等. 等离子喷涂金属型与钛熔体的界面反应研究 [J]. 铸造, 1998 (11): 3-7.
- [2] 姜延亮, 刘鸿羽, 马志毅, 等. 钛合金金属型铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (5): 454-458.
- [3] 董文博. TA15钛合金金属型涂层制备的研究 [C]//2019年第九届全国地方机械工程学学会学术年会, 2019.
- [4] 谢华生, 杨洪涛, 赵军, 等. 可熔金属芯在金属型铸造Ti₃Al基合金中的应用 [J]. 铸造, 2001 (3): 134-137.
- [5] 赵军. 钛合金石墨型铸造技术国内外发展现状及趋势 [C]//2019中国铸造活动周, 2019.
- [6] 王彦鹏, 伞晶超, 姚谦, 等. 钛合金泵体石墨型铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2014, 63 (8): 828-830.
- [7] 肖强伟, 纪志军, 贾志伟, 等. 一种钛及钛合金铸造用石墨基型芯及其制备方法: CN108044042A [P]. 2018-05-18.
- [8] 赵军, 张静, 金磊, 等. 涂层材料对钛合金机加工石墨型铸造工艺成形质量的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46 (S1): 190-194.

- [9] 赵军, 张建中, 金磊, 等. 钛合金石墨型铸造用 ZrO_2 涂层性能研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (6): 563-567.
- [10] 殷莹, 薛芃, 陈战考. 石墨型铸造钛铸件表面质量的提高 [J]. 金属加工 (热加工), 2016 (21): 60-62.
- [11] 聂卫广, 方公军. 一种钛及钛合金铸造用石墨型涂料膏及其制备方法和应用: CN110899609A [P]. 2020-03-24.
- [12] 胡博, 刘海涛, 张卫国, 等. 一种钛合金铸造用石墨型表面孔洞的修复方法: CN108246977A [P]. 2018-07-06.
- [13] 梁启如, 吴玉胜, 刘孝福, 等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展 [J]. 铸造, 2018, 67 (9): 790-793.
- [14] 曾洪, 赵代银, 何建, 等. 燃机透平叶片熔模精密铸造用陶瓷型芯研究进展 [J]. 东方汽轮机, 2019 (2): 69-72.
- [15] ZHOU X B, HOSSON J T M D. Reactive wetting of liquid metals on ceramic substrates [J]. Acta Materialia, 1996, 44 (2): 421-426.
- [16] 康永旺, 郭丰伟, 李明. 一种精密铸造用氧化钇基陶瓷型芯及其制备方法: CN110256077A [P]. 2019-09-20.
- [17] 彭德林, 王蔚. 钛合金精密铸造陶瓷型芯 [J]. 铸造, 2006 (10): 1082-1084.
- [18] 于瑞龙, 尹绍奎, 谭锐, 等. MgO掺杂 ZrO_2 陶瓷型芯与钛合金铸造反应的研究 [C]//第十三届全国铸造年会暨2016中国铸造活动周, 2016.
- [19] 于瑞龙, 尹绍奎, 姜延春. 铸造钛合金用氧化锆掺杂氧化镁陶瓷型芯性能研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (11): 1037-1044.
- [20] 韩绍娟, 许壮志, 程涛, 等. 钛合金精铸用陶瓷型芯材料: CN1793033 [P]. 2006-06-28.
- [21] 周铁涛, 高鹏. 一种钛合金铸造用氧化钙基陶瓷型芯及其制备方法: CN102531648A [P]. 2012-07-04.
- [22] 徐鹏金. 浅析六方氮化硼陶瓷的制备与应用 [J]. 中国粉体工业, 2019 (1): 12-16.
- [23] 李宗鹏, 梁兵, 宁志高, 等. 氮化硼陶瓷纤维的制备与应用 [J]. 当代化工, 2017, 46 (7): 1453-1457, 1461.
- [24] 毛协民, 李重河, 沈彬, 等. 用于钛及钛合金精密铸造的氮化硼陶瓷型壳的制备方法: CN1876272 [P]. 2006-12-13.
- [25] 高博, 王伟, 姜银珠, 等. 一种钛合金铸造用陶瓷型芯: CN104072145A [P]. 2014-10-01.
- [26] 南海, 黄东, 赵鹏, 等. 一种钛及钛合金铸造用氧化硅基陶瓷型芯的制备方法: CN103693976A [P]. 2014-04-02.
- [27] KANG J W, MA Q X. The role and impact of 3D printing technologies in casting [J]. China Foundry, 2017, 14 (3): 157-168.
- [28] 周俊良, 常鸿祥, 陈相序. 3D打印陶瓷在现代产品设计中的运用 [J]. 中国陶瓷工业, 2018, 25 (4): 45-47.
- [29] 杨铎. 陶瓷型壳3D打印关键技术研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [30] 陈典典, 鲍明东, 李鑫, 等. 3D打印氧化硅基陶瓷型芯的各向异性研究 [J]. 中国陶瓷, 2020, 56 (5): 33-39.
- [31] 李琴, 张硕, 赵代银, 等. 3D打印空心叶片用氧化硅陶瓷型芯工艺及应用研究 [C]//2019中国铸造活动周, 2019.
- [32] 史玉升, 刘凯, 李晨辉, 等. 氧化锆零件激光选区烧结/冷等静压复合成形技术 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (21): 118-123.
- [33] 汪丽霞, 何臣, 侯书恩. 纳米氧化锆陶瓷墨水的制备 [J]. 矿产保护与利用, 2005 (1): 29-32.
- [34] 李亚运, 司云晖, 熊信柏, 等. 陶瓷3D打印技术的研究与进展 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45 (6): 793-805.
- [35] 潘珊, 徐新发, 姜涛, 等. 单晶叶片用氧化铝陶瓷型芯的发展概况 [J]. 科技与企业, 2013 (14): 300.
- [36] SCHLIENGER M E, BALDWIN M, EUGENIO A. Method and apparatus for removing ceramic material from cast components: EP1497059 [P]. 2008-07-23.
- [37] KRUGLOV E P, KOCHETOVA G K. Improvement of a technological process for ceramic core removal out of internal cavities of aircraft GTE turbine blade castings [J]. Russian Aeronautics (Iz VUZ), 2007, 50 (2): 227-229.
- [38] 李彪, 姜延春, 于波, 等. 空心叶片氧化铝基陶瓷型芯高温高压脱芯工艺研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 1-6.
- [39] 李彪, 姜延春, 于波, 等. 氧化铝基陶瓷型芯的高温沸腾脱芯工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (11): 1074-1077.
- [40] 姜延春, 于波, 李彪, 等. 一种氧化铝基陶瓷型芯用高温高压脱芯装置和脱芯方法: CN106583695A [P]. 2017-04-26.
- [41] 朱伟军, 李涤尘, 鲁阳, 等. 一种通过气流搅拌提高氧化铝基陶瓷型芯脱除速率的脱芯设备: CN107855503A [P]. 2018-03-30.
- [42] 王菊线. 钛合金砂型铸造用醇基涂料研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [43] 肖强伟, 范世玺, 纪志军, 等. 大型钛合金泵体的特种砂型铸造工艺研究 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (3): 60-64.
- [44] KIM E H, CHOI H H, JUNG Y G. Fabrication of a ceramic core for an impeller blade using a 3D printing technique and inorganic binder [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53, 43-47.
- [45] 邢金龙, 陈学更, 何龙, 等. 新型改性磷酸盐无机粘结剂热硬砂性能研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (8): 773-775, 779.
- [46] 邢金龙, 何龙, 韩文, 等. 3D砂型打印用无机粘结剂的合成及其使用性能研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (9): 851-854.

Application Status and Prospect of Cores for Casting of Titanium Alloys

LI Chong-yang¹, LIU Hong-yu¹, XUE Song-hai², LIU Shi-bing¹, SHI Kun¹, ZHANG Zhi-yong¹, HAN Dong¹
(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Haixi (Fujian) Institute, China Academy of Machinery Science & Technology Co., Ltd., Fuzhou 365050, Fujian, China)

Abstract:

When forming Ti alloy castings with complex cavity structures, the correct selection and use of cores are essential. Consequently, three kinds of cores used widely in titanium alloy casting, namely graphite core, metal core and ceramic core, were described in detail in this paper, and the development of cores for titanium alloy casting in the future was also prospected. It is expected that the present work can provide some useful references for improving the manufacturing level of high-end titanium alloy castings in China.

Key words:

titanium casting; graphite core; metal core; ceramic core; 3D printing core
