

硅酸铝纤维对氧化硅陶瓷型芯性能的影响

杨建, 玄伟东, 周宇豪, 刘泳鸿, 张强, 何忠书, 王保军, 李霞, 任兴孚, 任忠鸣

(上海大学材料科学与工程学院, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444)

摘要: 以石英玻璃粉为原料, 添加不同含量的硅酸铝纤维, 通过热压注成形法制备出不同硅酸铝纤维含量的氧化硅陶瓷型芯试样, 探究了不同硅酸铝纤维含量对氧化硅陶瓷型芯析晶和性能的影响规律。结果说明: 随着硅酸铝纤维含量的增加, 型芯试样的收缩率逐渐减小, 气孔率逐渐增大, 方石英含量逐渐增多, 而体积密度基本不变; 试样的室温和高温抗弯强度随着纤维含量的增加先增大后减小, 高温挠度逐渐减小。当硅酸铝纤维含量为3wt.%时, 型芯的综合性能最佳, 收缩率为1.0%、气孔率为29.23%、体积密度为1.62 g/cm³、室温抗弯强度为23.36 MPa、高温抗弯强度为31.39 MPa以及高温挠度为0.69 mm。综上所述, 硅酸铝纤维的加入不仅显著降低了氧化硅陶瓷型芯的收缩, 还有效改善了其室温、高温抗弯强度以及高温抗蠕变性能。

关键词: 陶瓷型芯; 硅酸铝纤维; 抗弯强度; 方石英含量

作者简介:

杨建(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为硅基陶瓷型芯复合材料开发及制备。E-mail: 845873327@qq.com

通讯作者:

玄伟东, 男, 研究员, 博士, 博士生导师。电话: 021-66136579, E-mail: wdxuan@shu.edu.cn

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

03-0294-07

基金项目:

国家自然科学基金项目(52274386, 92060104); 上海市科委项目(20511107700); 中国重燃项目(F095)。

收稿日期:

2022-04-01 收到初稿,

2022-05-27 收到修订稿。

航空发动机性能的好坏直接影响飞机飞行的可靠性和飞行能力等, 是一个国家战略性、高尖锐技术的高端产品, 是一个国家顶尖制造水平的主要体现^[1]。推重比则是衡量发动机性能好坏的一个重要指标^[2], 随着现代航空工业技术的快速发展, 发动机推重比日益提高, 而提高发动机推重比的关键是要提高航空发动机涡轮进口燃气的温度, 单纯依靠提高材料的承温能力和采用热障涂层技术已经很难满足叶片服役需求, 因此, 通过复杂气冷内腔结构改善涡轮叶片散热能力已成为当代先进航空发动机制造的关键^[3-4], 而陶瓷型芯作为形成叶片复杂气冷内腔结构的关键技术, 其性能好坏直接决定涡轮叶片的内腔尺寸精度、浇注合格率及铸造成本等^[5-6]。因此, 制造空心叶片的关键是制备出能够形成其复杂内腔结构的陶瓷型芯^[7]。

硅基陶瓷型芯因热膨胀系数小(1 200 °C的烧结温度下热膨胀系数 11×10^{-7} /°C左右, 常温下热膨胀系数 5×10^{-7} /°C左右), 高温性能稳定, 抗热震稳定性好, 高温浇注时成品率高且易被碱液腐蚀脱芯等优点, 从而被广泛的应用于熔模铸造工艺中^[8-11]。据研究表明, 纯氧化硅基陶瓷型芯在烧结过程中收缩率大, 很难保证尺寸的稳定, 且高温挠度较大, 在高温浇注时容易出现偏芯的情况, 造成叶片内腔尺寸的偏差^[12]。现阶段主要是通过二氧化硅基体中加入矿化剂来改善硅基陶瓷型芯的综合性能, 目前常用的矿化剂主要有硅酸锆、氧化铝、莫来石以及一些稀土氧化物^[13-15]。赵登科等人^[16]研究了硅酸锆含量对硅基陶瓷型芯性能的影响, 他们认为随着硅酸锆含量的增加, 型芯样品的收缩率、室温强度、高温挠度逐渐降低, 显气孔率逐渐增大, 高温强度先增加后减小, 当硅酸锆添加量为10wt.%时, 型芯的综合性能最佳。武振飞等人^[17]探究了硅酸锆的含量对硅基陶瓷型芯性能的影响, 发现硅酸锆对方石英析出的影响并不明显, 硅酸锆作为高温稳定相, 在烧结过程中钉扎在石英玻璃附近, 抑制石英玻璃的粘性流动, 起到弥散强化的作用。

相比于传统的添加剂, 也有很多学者在石英玻璃基体中添加纤维通过裂纹偏转和纤维拔出效应改善陶瓷型芯性能^[18]。如肖祖德等人^[19]研究了石英纤维对氧化硅基陶瓷型芯性能的影响, 研究表明, 石英纤维在显著降低氧化硅陶瓷型芯收缩的同时, 还明显改善了其室温和高温抗弯强度、抗蠕变性能以及断裂稳定性。黄嘉俊等

人^[20]研究了氧化铝纤维含量对硅基陶瓷型芯性能的影响,指出在型芯烧结过程中,一定量的纤维材料可以与基体材料结合构成型芯的网络骨架,当型芯受到外力时,可以和型芯一起承担外力的作用,另外纤维材料可以阻碍型芯裂纹的扩展,从而增强型芯的综合性能,当加入过量的纤维材料时,由于纤维本身的交织聚集现象,会缠绕在型芯基体中,而且团聚的纤维会割裂基体,反而有利于裂纹的扩展。Niu等人^[21]研究了莫来石纤维对硅基陶瓷型芯性能的影响,指出莫来石纤维可以作为晶核,从而促进方石英的结晶。虽然已经有各类纤维复合陶瓷型芯的报道,但是关于硅酸铝纤维在氧化硅基陶瓷型芯中的应用却未见报道,硅酸铝纤维具有耐高温、热稳定性好、受热膨胀小等优点,如今所熟悉的用途一般是经纺织或编织而成的硅酸铝纤维板、硅酸铝纤维毡、硅酸铝纤维绳、硅酸铝纤维毯等产品^[22],其对氧化硅基陶瓷型芯的作用机制还不清晰。本文研究了不同硅酸铝纤维含量对氧化硅基陶瓷型芯析晶与性能的影响,由于高温下非晶态的硅酸铝纤维可能发生析晶,碎解现象,影响型芯的高温性能,为此在氧化硅基陶瓷型芯中加入10 wt.%硅酸铝以保障其高温性能。

1 试验材料与方法

1.1 制备工艺

本试验是以高纯熔融石英玻璃粉(纯度99.9%以上)作原料,由激光粒度仪测得其粒度分布如表1所示。硅酸铝粒径为325目,经高温煅烧研磨而成,其化学组成如表2所示。试验所用非晶质硅酸铝纤维的形貌如图1所示,其纯度为98.4%,直径为1~10 μm,长度为10~100 μm。采用石蜡作增塑剂。

首先将一定质量配比的石英玻璃粉、硅酸铝、硅酸铝纤维充分混合均匀,其中硅酸铝含量为10 wt.%不变,硅酸铝纤维含量分别为0、3wt.%、5wt.%、

表1 石英玻璃粉粒度分布

Table 1 Grain size distribution of the quartz glass powder

粒径/μm	含量/%
< 10	20.32
10~30	36.95
30~50	29.61
50~95	13.12

表2 锆英粉化学组成

Table 2 Chemical composition of the zircon powder

$w_B / \%$			
ZrO ₂	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
65.5	32.63	0.16	0.08

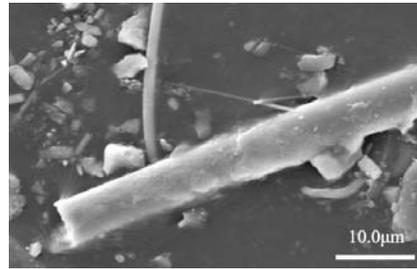


图1 硅酸铝纤维SEM图

Fig. 1 SEM image of the aluminum silicate fibers

8wt.%、10wt.%。将混合均匀的粉料放入干燥箱中进行干燥处理,温度为120 ℃,时间为10 h。然后将烘干的粉料分批次加入到已经熔化的增塑剂中,增塑剂含量为16 wt.%,混合浆料在90 ℃下真空搅拌7 h,得到混合均匀的陶瓷浆料。将制备好的陶瓷浆料倒入压注机,热压注成形制备出尺寸为120 mm × 10 mm × 4 mm的试样条素坯,压注参数见表3。对试样条素坯进行修边和去毛刺处理后,将样品条素坯放入匣钵中用埋粉造型后,放入箱式电阻炉中,经1 200 ℃高温烧结6 h后取出,将烧结后的试样经高温强化和低温强化后烘干,得到陶瓷型芯样品。

表3 热压注工艺参数

Table 3 Process parameters of the hot pressing injection

注射温度/℃	浆料温度/℃	注射压力/MPa	保压时间/s	注射流量/(mL · s ⁻¹)
72	90	4	25	350

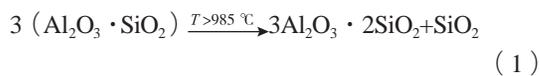
1.2 性能表征

根据HB 5353—2004^[23]规定,采用数显游标卡尺测量烧结前后样品的尺寸测出试样的线收缩率;型芯样品的气孔率和体积密度采用Archimedes法测量;型芯样品的室温和高温抗弯强度采用三点抗弯法测量,测量跨距30 mm,加载速率0.5 mm/min;高温抗弯强度测试前,需将型芯样品放入试验机加热区内升温至1 550 ℃后保温30 min。型芯样品的高温挠度采用双支点法测量,将烧成样品放入箱式电阻炉中,以5 ℃/min的升温速率升温至1 550 ℃后保温30 min,待型芯样品随炉冷却后,测出其热变形量。以五个样品测试结果的平均值作为以上各组数据的有效值。样品测试面经喷金处理后,在日本HITACHI公司SU-1500型扫描电子显微镜下观察型芯样品的断口形貌及显微组织,测试电压为15 kV。采用日本理学的D/MAX型X射线衍射仪测定型芯样品中的物相,测试选用CuK α射线,步长0.02°,扫描速度10°/min。

2 结果与讨论

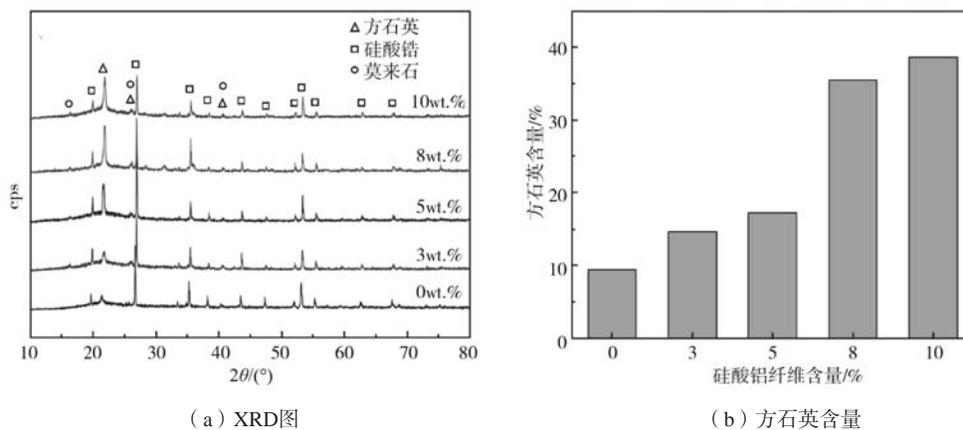
2.1 硅酸铝纤维含量对型芯析晶的影响

方石英作为硅基陶瓷型芯的主晶相，具有优异的高温稳定性，一定量的方石英有助于提高陶瓷型芯的室温和高温强度。但是方石英在降温过程中会由 β -方石英向 α -方石英转变，此过程伴随体积变化产生内应力，致使型芯中微裂纹的形成，所以过量的方石英可能降低型芯的室温强度^[24]。因此，为了探究不同硅酸铝纤维含量对硅基陶瓷型芯析晶的影响，本研究对不同硅酸铝纤维含量的型芯试样进行了XRD物相分析。从图2a中可以看出，随着硅酸铝纤维含量的增加，方石英衍射峰逐渐增强，并且还有少量莫来石相析出，这是因为试验采用的是非晶质硅酸铝纤维，当温度超过985℃时，会在其表面析出方石英和莫来石晶体，反应式如下^[25]：



通过XRD图谱对型芯中方石英含量进行定量分

析，结果如图2b所示，从图中可以看出，随着硅酸铝纤维含量的增加，型芯中方石英含量逐渐增多。由于硅酸铝纤维析出的方石英和莫来石晶体可以作为石英玻璃析晶的形核剂，促进了型芯试样中方石英的析出^[26-27]，所以随着硅酸铝纤维含量的增加，型芯试样中方石英含量逐渐增多。为了进一步了解硅酸铝纤维在烧结过程中的析晶行为，从而证实上述分析结果，将硅酸铝纤维在不同温度下保温6 h，图3为不同温度下硅酸铝纤维的XRD图谱，从图中可以看出，当温度低于900℃时，硅酸铝纤维仍然处于非晶态，没有方石英和莫来石析出，当温度升高到1 200℃时，已经开始有大量的方石英和莫来石析出，继续升高温度到1 500℃，方石英和莫来石含量进一步增多，根据上述试验结果可以得出，硅酸铝纤维对硅基陶瓷型芯析晶的影响是基于硅酸铝纤维在烧结过程中析出的莫来石和方石英可以作为石英玻璃析晶的形核剂，从而促进了型芯试样中方石英的析出。



(a) XRD图

(b) 方石英含量

图2 不同硅酸铝纤维含量下型芯试样的XRD图谱和方石英含量

Fig. 2 XRD patterns and cristobalite content of the core samples with different aluminum silicate fibers contents

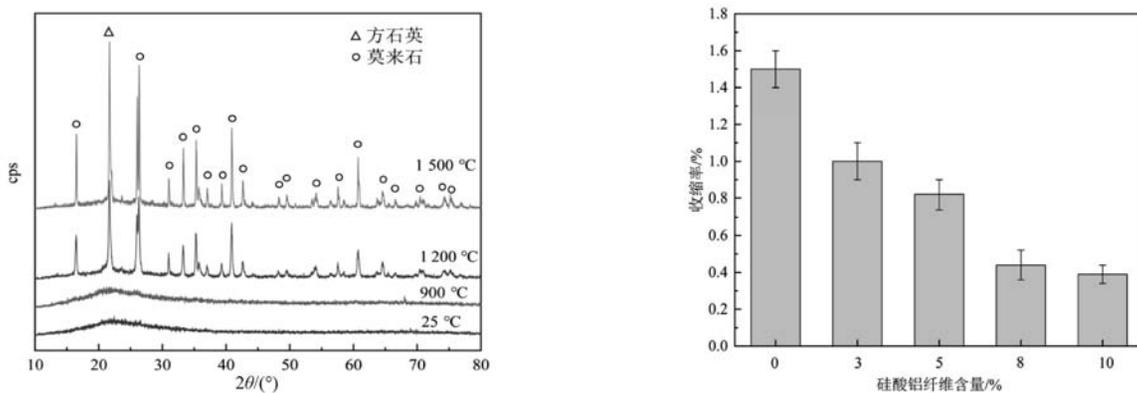


图3 不同温度下硅酸铝纤维的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of the aluminum silicate fibers at different temperatures

图4 不同硅酸铝纤维含量下型芯的收缩率

Fig. 4 Shrinkage rates of the cores with different aluminum silicate fibers contents

2.2 硅酸铝纤维含量对型芯收缩率的影响

图4为不同硅酸铝纤维含量对型芯试样收缩率的影响规律,由图可知,随着硅酸铝纤维含量的增加,型芯的收缩率逐渐减小。当不加纤维时,型芯的收缩率较高为1.5%,当加入3 wt.%的纤维时,型芯的收缩率下降最明显,由1.5%下降到1.0%,当纤维含量为10wt.%时,收缩率最低为0.39%。这是因为硅基陶瓷型芯在烧结过程中,基体材料石英玻璃会随着温度的升高而发生粘性流动,致使型芯向致密化结构转变^[21],此过程会产生较大的收缩效应。然而,硅酸铝纤维在烧结到985℃时会在其表面析出方石英和莫来石晶体^[25, 28](图2),晶态物质的存在会阻碍非晶态物质由于无序性所导致的易流动性,非晶态物质的粘度与引入的晶态物质的量 α 之间的关系式为:

$$\eta = \eta_g (1 + m\alpha) \quad (2)$$

式中: η 为引入晶态物质后,非晶态物质的粘度; η_g 为纯非晶态物质的粘度; α 为引入晶态物质的体积分数; m 、 n 为经验常数^[29]。从式(2)中可以看出,随着析出的晶体含量的增加,石英玻璃粉的粘度增加,粘性流动更加困难,导致收缩率减小。但是,并非所有的硅酸铝纤维都会出现晶化现象,研究表明^[25],当温度为1200℃时,硅酸铝纤维的晶化率为52.3%。所以当烧结完成后,型芯试样中还存在部分未晶化的硅酸铝纤维,从图6断口扫描中也可以清晰的看到纤维的存在。由于纤维的长棒状结构具有较高的长径比,其比表面积明显低于石英玻璃粉^[30],烧结理论认为,颗粒之间的比表面能是烧结的主要驱动力^[31],所以硅酸铝纤维的加入在一定程度上抑制了型芯的烧结过程,降低了陶瓷型芯的收缩。

2.3 硅酸铝纤维对型芯气孔率和体积密度的影响

图5为不同硅酸铝纤维含量对型芯气孔率的影响规

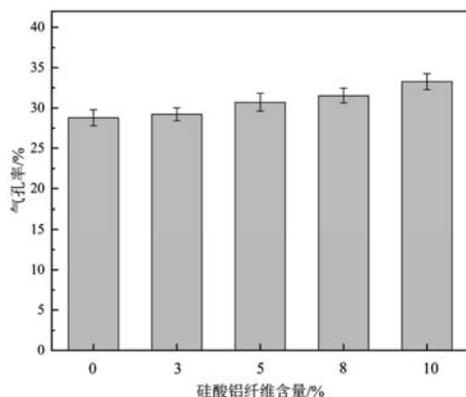


图5 不同硅酸铝纤维含量下型芯的气孔率
Fig. 5 Porosity of the cores with different aluminum silicate fibers contents

律,从图中可以看出,随着纤维含量的增加,型芯的气孔率逐渐增加,当纤维含量为10wt.%时,气孔率最高为33.26%,这与收缩率的变化趋势相对应。为了进一步说明硅酸铝纤维对型芯气孔率的影响,对不同纤维添加量下的型芯断口进行了SEM断口扫描,结果如图6所示,从图中可以看出,纤维穿插在基体中,由于纤维高温性能优异,并不与二氧化硅烧结在一起,导致纤维周围气孔的产生;另一方面,随着纤维含量的增加,型芯试样中方石英和莫来石含量逐渐增多(图2),方石英和莫来石作为高温稳定相抑制二氧化硅的粘性流动,从而颗粒间孔隙增多,气孔率增加。

图7为不同硅酸铝纤维含量对型芯体积密度的影响规律,从图中可以看出,随着纤维含量的增加,型芯的体积密度基本保持不变,一般情况下,随着型芯气孔率的增加,型芯的体积密度应该逐渐减小,但是无论是硅酸铝纤维的密度(2.9 g/cm³)还是由纤维析出

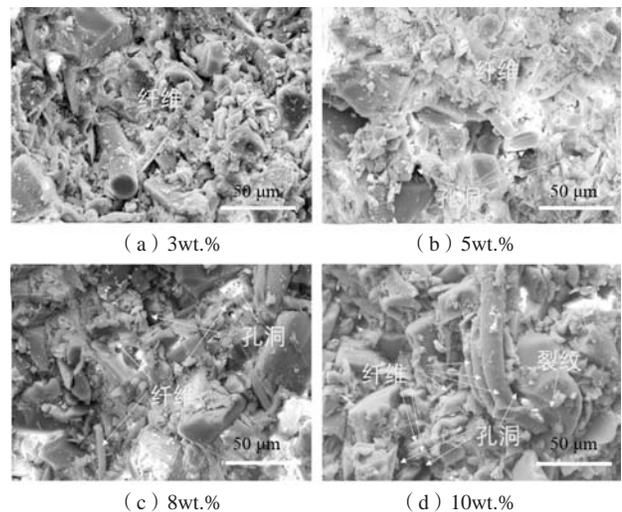


图6 不同硅酸铝纤维含量下型芯断口形貌

Fig. 6 Fracture morphologies of the cores with different aluminum silicate fibers contents

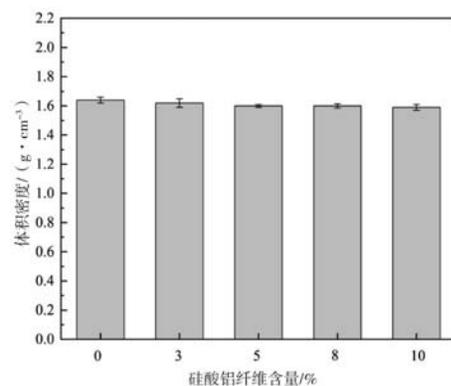


图7 不同硅酸铝纤维含量下型芯的体积密度
Fig. 7 Bulk-density of the cores with different aluminum silicate fibers contents

的莫来石密度 (3.16 g/cm^3) 均大于二氧化硅的密度 (2.2 g/cm^3)，当硅酸铝纤维含量增加时，型芯的重量增加，所以总的来说，型芯的体积密度变化不大。

2.4 硅酸铝纤维含量对型芯室温强度的影响

陶瓷型芯在压制蜡模时，要具有一定的室温强度抵抗蜡液的冲击。图8为不同硅酸铝纤维含量下型芯的室温强度变化规律，从图中可以看出，添加纤维后型芯试样的室温强度高于未添加纤维的试样。通过图6的断口形貌可知，一方面，硅酸铝纤维因具有优异的高温稳定性，很难与基体材料烧结到一起，从而在二者之间产生界面，当对型芯样品施加外力时，裂纹在基体材料上发生扩展，遇到基体和纤维之间的界面时，裂纹方向会发生改变，从而延长了裂纹扩展路径，提高了型芯样品的室温强度。另一方面，型芯试样在发生断裂过程中会发生纤维拔出效应，相比于石英玻璃，纤维具有强度高、缺陷少、断裂应变能大等优

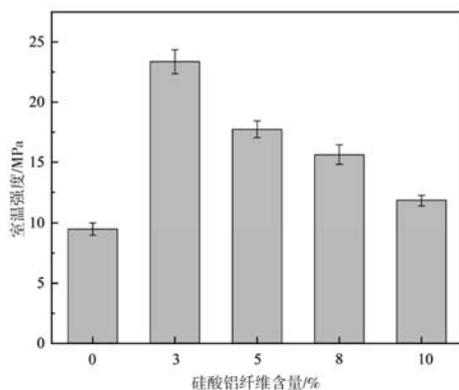


图8 不同硅酸铝纤维含量下型芯的室温强度

Fig. 8 Room temperature strengths of the cores with different aluminum silicate fibers contents

点，所以当发生纤维拔出过程时，会消耗更多的断裂能，从而提高型芯的室温强度。

随着硅酸铝纤维含量的增加，型芯试样的室温强度先增加后减小。当纤维含量为3 wt.%时，型芯试样的室温强度最高为23.36 MPa。当纤维含量继续增加，型芯试样的室温强度逐渐下降，当纤维含量为10 wt.%时，型芯试样的室温强度降低到11.83 MPa。这是因为随着纤维含量的增加，型芯试样中的孔洞逐渐增多，在受到外界载荷的作用时，有效承载面积降低，导致室温强度的下降。另外，纤维含量的增加导致其在基体中分散性变差，从图6d可以看出，部分纤维聚集在一起交叉分布，出现团聚现象，团聚态的纤维会部分的抵消分散纤维对基体材料的强化作用，从而降低型芯的室温强度。但是总的来说，含有纤维的型芯样品

室温强度均高于不含纤维的型芯样品室温强度。

2.5 硅酸铝纤维含量对型芯高温性能的影响

陶瓷型芯在高温浇注时要承受高温金属液的冲击，所以陶瓷型芯必须要有一定的高温强度。图9为不同硅酸铝纤维含量的型芯试样在1550℃下的高温强度。从图中可以看出，随着硅酸铝纤维含量的增加，型芯试样的高温强度先增加后减小，当硅酸铝纤维含量为3wt.%时，高温强度最高为31.39 MPa。这可能是因为在1550℃下，方石英和莫来石大量析出，方石英和莫来石因具有高熔点和硬度，限制了型芯的蠕性流动，从而提高了型芯的高温强度。但是随着大量的方石英和莫来石从非晶质硅酸铝纤维表面析出，破坏了纤维的内部结构，伴随着纤维弹性的下降，甚至可能出现纤维变脆和碎解现象，导致型芯的高温强度降低。当纤维含量较少时，方石英和莫来石的强化作用占据主导地位，所以型芯的高温强度升高，随着纤维含量增多，变脆和碎解的纤维含量也增加，此时纤维变脆和碎解的削弱作用占主导地位，表现出型芯高温强度的降低。

图10为不同硅酸铝纤维含量下型芯的高温挠度。由图可知，随着硅酸铝纤维含量的增加，型芯试样的高温挠度逐渐降低，当纤维含量为10 wt.%时，挠度最低为0.22 mm。实际上，从微观角度来看，陶瓷型芯的蠕变主要是与型芯焙烧过程中生成的方石英量密切相关，方石英作为硅基陶瓷型芯的主晶相，具有优异的高温稳定性，其在高温下钉扎在石英玻璃周围，抑制石英玻璃的粘性流动，增加型芯的高温抗蠕变性能，随着硅酸铝纤维含量的增加，型芯试样中方石英含量逐渐增多，所以型芯试样的高温挠度逐渐降低。

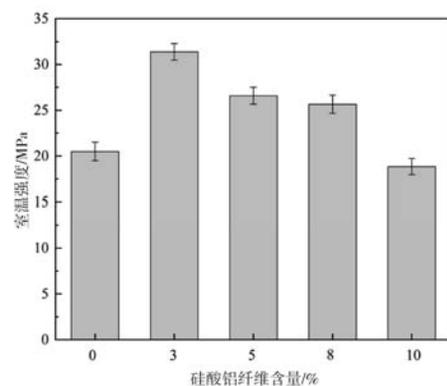


图9 不同硅酸铝纤维含量下型芯的高温强度

Fig. 9 High temperature strengths of the cores with different aluminum silicate fibers contents

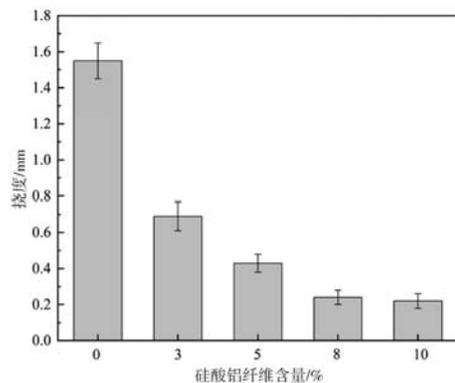


图10 不同硅酸铝纤维含量下型芯的高温挠度
Fig. 10 High temperature deflections of the cores with different aluminum silicate fibers contents

3 结论

(1) 高温烧结时, 硅酸铝纤维析出的方石英和莫来石可作为形核剂, 促进石英玻璃析晶, 随着方石英的大量析出, 纤维自身将发生变脆和碎解, 降低型芯试样的强度。

(2) 随着硅酸铝纤维含量的增加, 硅基陶瓷型芯试样的收缩率逐渐减小, 气孔率逐渐增加, 体积密度基本保持不变, 室温强度先增大后减小, 高温强度先增大后减小, 高温挠度逐渐减小。

(3) 当纤维含量为3wt.%时, 型芯的综合性能最佳, 收缩率为1.0%、气孔率为29.23%、体积密度为 1.62 g/cm^3 、室温抗弯强度为23.36 MPa、高温抗弯强度为31.39 MPa、高温挠度为0.69 mm。

参考文献:

- [1] 陈晓燕, 肖旅, 余建波, 等. 高温合金空心叶片用陶瓷型芯概述 [J]. 铸造, 2016, 65 (9): 868-873.
- [2] 吴学辉, 程邦勤, 陶增元. 推重比10一级发动机技术改进方案分析 [J]. 航空动力学报, 2005, 20 (1): 38-43.
- [3] 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.
- [4] 康海峰, 李飞, 赵彦杰, 等. 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 [J]. 材料工程, 2013 (8): 85-91.
- [5] 赵红亮, 翁康荣, 关绍康, 等. 空心叶片用陶瓷型芯 [J]. 特种铸造及有色合金, 2004, 24 (5): 38-40.
- [6] 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.
- [7] 张玲, 刘建平, 孙革, 等. 单晶叶片用硅基陶瓷型芯制备与性能研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (8): 941-943.
- [8] 张伟, 张玉军, 陈坤. 浅谈熔模铸造陶瓷型芯研究现状 [J]. 陶瓷, 2007 (12): 8-11.
- [9] ROSU H A. Core molding composition: US4989664 [P].1991-02-05.
- [10] RAJEEV V N, JOHN C. Reinforced quartz cores for directional solidification casting processes: US6029736 [P].2000-02-29.
- [11] LONG Y C, LIU Z Y, GUO M, et al. Effect of sintering temperature on properties of silica based ceramic core [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16 (4): 591-596.
- [12] 张一或. 矿化剂与添加剂对氧化硅陶瓷型芯性能影响的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [13] 潘继勇, 刘孝福, 何立明, 等. 硅基陶瓷型芯的研究进展 [J]. 铸造, 2012, 61 (2): 174-178.
- [14] 方仁德, 杨华亮, 廖有为, 等. 矿化剂对莫来石陶瓷影响的研究 [J]. 佛山陶瓷, 2016, 26 (2): 14-17.
- [15] 刘孝福, 姜延春, 苏贵桥, 等. 锆英粉矿化剂对氧化铝基陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (10): 994-1000.
- [16] 赵登科, 玄伟东, 刘利俊, 等. 硅酸锆含量对硅基陶瓷型芯性能的影响 [J]. 上海大学学报, 2019, 25 (4): 453-461.
- [17] 武振飞, 乔经纬, 庞佳敏, 等. 硅酸锆含量对硅基陶瓷型芯材料性能的影响研究 [J]. 山东陶瓷, 2019, 42 (3): 13-15.
- [18] 郭景坤. 纤维补强陶瓷复合材料的进展 [J]. 材料科学与工程, 1989 (2): 7-13.
- [19] 肖祖德, 玄伟东, 段方苗, 等. 石英纤维对氧化硅陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (9): 1072-1079.
- [20] 黄嘉俊, 严青松, 芦刚, 等. Al₂O₃纤维含量对硅基陶瓷型芯性能的影响及增强机制 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (11): 1234-1238.
- [21] NIU S, XU X, LI X, et al. Microstructure evolution and properties of silica-based ceramic cores reinforced by mullite fibers [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 829: 154494.
- [22] 陈照峰, 吴操, 杨勇, 等. 航空级超细玻璃纤维棉毡的制备及隔音隔热性能研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48 (1): 10-15.
- [23] 国防科学技术工业委员会. 熔模铸造陶瓷型芯性能试验方法: HB5353—2004 [S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2004.
- [24] ZAWRAH M F, HAMZAWY E M A. Effect of cristobalite formation on sinterability, microstructure and properties of glass/ceramic composites [J]. Ceramics International, 2002, 28 (2): 123-130.
- [25] 操光辉, 吴申庆, 舒光冀. 硅酸铝纤维及其预制件的结构转变特性 [J]. 铸造, 1998 (1): 16-19.

- [26] 李寒松, 玄伟东, 潘文轩, 等. 电熔莫来石含量对硅基陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (8): 861-865.
- [27] 刘利俊, 刘超, 玄伟东, 等. 方石英的含量对氧化硅陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (6): 634-639.
- [28] 试验生产工段冶炼组. 硅酸铝耐火纤维保温帽对铸造高温合金铸锭质量的改进 [J]. 航空材料, 1982 (3): 17-19.
- [29] KIM K D, LEE S H, AHN H k. Observation of nucleation effect on crystallization in lithium aluminosilicate glass by viscosity measurement [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 336 (3): 195-201.
- [30] 范红娜. 空心叶片用氧化硅-莫来石陶瓷型芯制备与性能的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [31] 康丹, 许峰, 胡小方, 等. 基于在线实验的微波电磁场中材料烧结驱动力分析 [C]//中国力学大会——2013论文摘要集. 2013: 367.

Effect of Aluminum Silicate Fibers on Properties of Silica Ceramic Core

YANG Jian, XUAN Wei-dong, ZHOU Yu-hao, LIU Yong-hong, ZHANG Qiang, HE Zhong-shu, WANG Bao-jun, LI Xia, REN Xing-fu, REN Zhong-ming
(Department of Material Science and Engineering, State Key Laboratory of Advanced Special Steels, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract:

Silica ceramic core samples with different contents of aluminum silicate fibers were prepared by hot-pressing injection method with quartz glass powder as raw material. The effect of the aluminum silicate fibers with different contents on crystallization and properties of the silica ceramic cores was investigated. The results showed that with the increase of the aluminum silicate fibers content, the shrinkage rate of the core sample gradually decreased, the porosity gradually increased, the content of cristobalite gradually increased, but the volume density was basically unchanged. The flexural strength at room temperature and high temperature increased first and then decreased with the increase of the fibers content, and the high-temperature deflection decreased gradually. When the content of the aluminum silicate fibers was 3 wt.%, the core had the best comprehensive performance, with a shrinkage rate of 1.0%, porosity of 29.23%, volume density of 1.62 g/cm³, bending strength of 23.36 MPa at room temperature, bending strength of 31.39 MPa at high temperature, and high-temperature deflection of 0.69 mm. In conclusion, the addition of the aluminum silicate fiber not only significantly reduced the shrinkage of the silica ceramic core, but also effectively improved its room temperature bending strength, high temperature bending strength and high temperature creep resistance.

Key words:

ceramic core; aluminum silicate fibers; bending strength; cristobalite content
