复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第35卷 第6期 6月 2018年
Vol. 35 No. 6 Jun 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20170904.002

复合纤维配比对精铸硅溶胶型壳性能的影响

芦刚*，郭振华，严青松，于航，纪超众
（南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室，南昌 330063）

摘　要： 为了分析复合纤维配比对熔模精铸中硅溶胶型壳的强度和透气性的影响，采用尼龙和陶瓷复合纤维制备硅溶胶型壳试样，在其中加入的尼龙纤维和陶瓷纤维的体积配比为100∶0、82.7∶17.3、61.5∶38.5、34.7∶65.3和0∶100，对获得的复合纤维增强型壳试样的生胚抗弯强度、焙烧后抗弯强度和透气性的变化规律进行研究。结果表明，当尼龙纤维在复合纤维中体积分数从0%～100%变化时，型壳生胚抗弯强度逐渐增大，焙烧后抗弯强度总体变化不明显，透气率先增大后减小。当尼龙纤维的体积分数为82.7%时，透气率达到最大值5.21。根据试样断口形貌及纤维增强行为分析，型壳生胚抗弯强度主要受纤维体积含量的影响；型壳焙烧后抗弯强度和透气性受陶瓷纤维体积含量、涂挂厚度和尼龙纤维烧失后留下孔洞数量的综合影响。

关键词： 复合纤维配比；熔模精铸；硅溶胶型壳；抗弯强度；透气性
中图分类号：　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2018)06-1535-07

Effects of composite fiber ratio on the properties of silica sol shell for investment casting

LU Gang*, GUO Zhenhua, YAN Qingsong, YU Hang, JI Chaozhong
(National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Aeronautical University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to analyse the influence of composite fiber ratio on the strength and breathability of reinforced silica sol shell for investment casting, the bending strength of the embryo and after baking and breathability of composite fiber reinforced shell samples were studied. Ceramic and nylon composite fibers were used to enhance silica sol shell samples. In the slurry, the volume ratio of the nylon fiber and ceramic fiber respectively were 100∶0, 82.7∶17.3, 61.5∶38.5, 34.7∶65.3 and 0∶100. The results indicate that when the proportion of nylon fibers changes from 0% to 100% in the complex fibers, the bending strength of the embryo of the shell increases gradually, the overall change of the fired bending strength is not obvious, and the breathability rate has the trend of increasing first and then decreasing. When the volume content of nylon fibers is 82.7%, the breathability rate reachs maximum, which is 5.21. According to the analysis of the fracture morphology and fiber reinforced behavior, the bending strength of the embryo of mold shell is mainly affected by the volume content of fiber and the flexural strength and permeability of the shell after baking are influenced by the volume content of ceramic fiber, the thickness of coating and the number of holes that the nylon fiber left after being burning.

Keywords: composite fiber ratio; investment casting; silica sol shell; bending strength; breathability

熔模精铸在航空航天领域的应用越来越广泛，尤其在高精度、复杂结构铸件如直升机飞机的传动机匣、火箭发射器的主屏蔽罩、航空发动机的涡轮转子、导向叶轮等方面的应用上起着无可替代的作用[1-3]。目前熔模精铸型壳存在强度与透气性相互制约的关系，型壳强度的增加需要增加厚度，但这会导致型壳散热困难、铸件晶粒粗大，而且铸型透气性差，易产生浇不足等缺陷。为了顺应航空业对

收稿日期： 2017-06-12；**录用日期：** 2017-08-30；**网络出版时间：** 2017-09-04　14:36
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170904.002
基金项目： 航空科学基金(2015ZE56015)；省教育厅项目(GJJ160687)
通讯作者： 芦刚，博士，副教授，研究方向为液态金属精密成形理论及工艺研究　E-mail：aimulalg@163.com
引用格式： 芦刚，郭振华，严青松，等. 复合纤维配比对精铸硅溶胶型壳性能的影响[J]. 复合材料学报，2018，35(6)：1535-1541.
LU Gang, GUO Zhenhua, YAN Qingsong, et al. Effects of composite fiber ratio on the properties of silica sol shell for investment casting[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1535-1541 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

精铸产品性能要求的不断提高，解决熔模精铸型壳强度和透气性相互制约的问题尤为重要。国内外学者对熔模精铸技术进行了不断的探索和研究[2-6]，E. Neussl 等[7]在压制蜡型时将长纤维嵌入蜡型中，通过熔模铸造的制壳工艺将纤维的两端嵌在型壳中，再经过焙烧和浇注步骤将纤维转移到金属零件中以获得金属基复合材料。杨世洲等[8]研究了一种熔模铸造复合型壳的制备工艺，该复合型壳性能较高，其中型壳 1～3 层使用硅酸乙酯浆料，背层使用硅溶胶浆料，可以实现近净形熔模铸造，并且硅酸乙酯-硅溶胶复合型壳结合陶瓷型芯可铸出内腔形状较复杂的精密铸件，铸件精度可以达到 CT5 级，表面粗糙度可以达到 Ra0.8～1.6 μm。型壳制备是熔模精铸技术的关键，型壳性能的好坏直接影响铸件的质量。要获得优质的铸件，必须制造优质型壳。优质的型壳应当满足一系列性能的要求，如强度、透气性、线量变化和退让性等。

为了获得综合性能更好的型壳，国内外学者把增强体加入精铸型壳，达到改善型壳性能的目的[9-13]。吕凯等[14]在涂料中添加 1%的硅酸铝纤维能显著增强型壳；添加 0.6%的玻璃纤维，能有效地改善硅溶胶型壳的常温和焙烧后的抗弯强度[15]；天然植物硅酸铝双纤维增强硅溶胶型壳试样受力破坏失效主要由于硅溶胶凝胶膜的断裂、硅酸铝纤维拔出、断裂及脱黏等综合作用所致[16]。C. Yuan 等[17]在硅溶胶浆料中加入尼龙纤维，焙烧以后，显著地改善了型壳透气性。Z. Harun 等[18]在浆料里面加入米糠，焙烧以后显著改善了型壳的孔隙率，降低了裂纹的产生。纪超众等[19]在硅溶胶型壳中加入不同长度的陶瓷纤维，发现陶瓷纤维的长度为 4 mm 时，其综合性能最好。在硅溶胶型壳中添加等含量的陶瓷和尼龙复合纤维来改善其性能，研究发现，当复合纤维含量为 0.6%时，型壳常温强度和焙烧后强度达到最大值；当复合纤维含量为 0.75%时，型壳透气性达到最大。实验发现，型壳焙烧后，尼龙有机纤维被燃烧，在型壳内部形成微孔隙，从而提高精铸型壳透气性，而陶瓷无机纤维仍将在型壳内强化型壳，复合纤维增强型壳同时保证了型壳的透气性和强度[20]。

上述对纤维增强复合材料的研究提供了丰富的参考价值，但是都没有涉及到通过改变复合纤维的配比来增强复合材料。为了获得常温强度更高、高温强度更高、透气性更好的精铸型壳，本研究拟改变陶瓷、尼龙复合纤维配比来制备出不同种类的精铸型壳，最后对制备的型壳试样进行常温、焙烧后抗弯强度和透气性测试，并结合 SEM 断口微观形貌来研究复合纤维配比对型壳试样性能的影响，以期为实际生产提供理论参考。

1　实验材料及方法

1.1　原材料

实验采用的耐火材料为郑州市海旭磨料有限公司生产的白刚玉和亿隆耐火材料厂生产的莫来石；黏结剂为山东济南银丰硅制品有限责任公司生产的纳米碱性硅溶胶，胶体粒径为 9～20 nm，pH 值为 9～10，SiO_2 含量为 29%～31%；陶瓷纤维的直径为 4～8 μm，长度为 3～4 mm，拉伸强度为 4 000 MPa，熔点为 1 800℃，由博华岩耐火纤维有限公司生产；尼龙纤维的直径为 9～13 μm，长度为 3～4 mm，拉伸强度为 900 MPa，熔点为 224℃，由北京融信通科技有限公司生产；表面活性剂为 JFC 润湿剂，由武汉市智发科技开发有限公司生产；消泡剂为正辛醇，由无锡市亚泰山联合有限公司生产；分散剂为羟丙基甲基纤维素（HPMC），一类白色有机高分子粉末，由河北新乐市科维精细化工厂生产。

1.2　试样制备方法

陶瓷纤维和尼龙纤维按不同配比加入到背层和封浆涂料里，其加入量都为硅溶胶质量的 0.6%，配制背层和封浆涂料时，在其中加入的尼龙纤维和陶瓷纤维的体积配比为 100∶0、82.7∶17.3、61.5∶38.5、34.7∶65.3 和 0∶100（实验采用二者之间的质量配比，体积配比为质量配比换算后得到的结果，文中全部采用体积比）。型壳试样制备工艺见表 1。型壳干燥，脱蜡后焙烧。型壳试样焙烧工艺见图 1。

1.3　测试方法

采用上海益环科技有限公司 SWY 液压万能强度试验机，以三点弯曲试验测试抗弯强度的方法（跨距为 60 mm，力的加载速度为 1 mm/min）测定复合纤维型壳的生胚及焙烧后抗弯强度，其试样形状为长方体，尺寸为 70 mm×22 mm×8 mm。采用无锡斯派特分析仪器有限公司 ZTY 智能式型壳透气性测试仪测试纤维增强型壳的透气性，其试样形状为圆柱，尺寸为 Φ50 mm×8 mm。采用美国 FEI 公司的 Quanta200 型扫描电镜观察纤维增强型

http://fcxb.buaa.edu.cn

表 1　硅溶胶型壳试样制备工艺参数

Table 1　Process parameters of silica sol shell specimens preparation

Coating layer	Binder	Refractory powder (mesh)	Powder liquid ratio	Sanding materials (mesh)	Drying time/h
Primary layer(1)	Silica sol	Corundum powder(320)	2.4∶1	Corundum sand(80)	6
Transition layer(2)			1.5∶1	Corundum sand(46)	10
Backup layer(3－5)			1.2∶1	Mullite sand(30/60)	18
Backup layer(6)			1.2∶1	Mullite sand(16/30)	
Seal layer(7)			1.2∶1	—	24

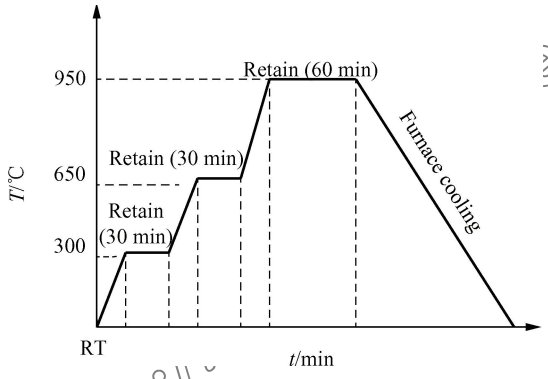


图 1　硅溶胶型壳试样焙烧工艺

Fig. 1　Firing process of silica sol shell specimens

壳的断口形貌，每组实验 6 个样。

2　结果与讨论

2.1　复合纤维配比对型壳抗弯强度的影响

图 2 为复合纤维配比对型壳试样生胚抗弯强度的影响规律。可以看出，当尼龙纤维体积分数为 0%时，型壳的生胚抗弯强度最小，为1.542 MPa。型壳的生胚抗弯强度随着尼龙纤维体积含量的增加而增加，而且增加的速度越来越快。当尼龙纤维体积分数小于 34.7%时，型壳强度随着纤维总体积的增加而缓慢增加；当尼龙纤维分数大于 34.7%时，型壳强度随着纤维总体积的增加而迅速增加。当尼龙纤维所占的比例为 100%，即复合纤维全为尼龙纤维时，型壳的生胚抗弯强度最大，为 3.051 MPa。相比强度最小时，型壳试样的强度提高约 98%。这是由于随着尼龙纤维所占比例的增大，纤维总体积迅速增加，体积增大就能接触到更多浆料；其次尼龙纤维的直径比陶瓷纤维的大，故两根尼龙纤维之间会有更大的空隙，在空隙之间能容纳更多的浆料，故尼龙纤维更易挂浆；在挂浆时，由于尼龙纤维的直径较陶瓷纤维大，随着尼龙纤维体积含量的增加，型壳试样的每一层涂挂层也越厚，型壳厚度的增加是提高其生胚抗弯强度的一个重要因素。当尼龙纤维的体积分数小于 34.7%时，陶瓷纤维占主体，尼龙纤维的增强作用不明显，故强度增加缓慢；当尼龙纤维的体积分数大于 34.7%时，随着其所占比例的增多，上述 3 个增强效应越来越明显，其增强效果也越来越明显，故强度增加越来越快。

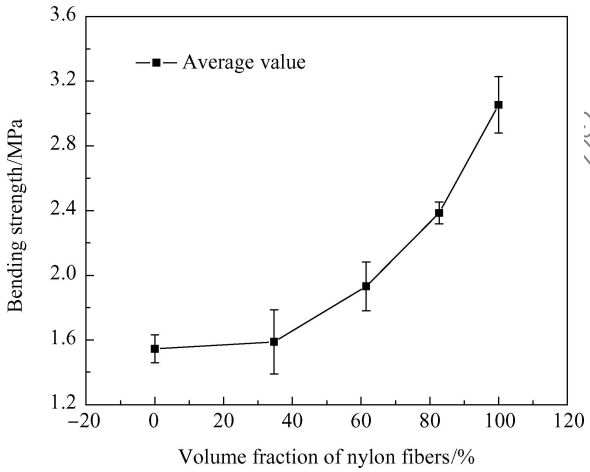


图 2　复合纤维配比对硅溶胶型壳生胚抗弯强度的影响

Fig. 2　Effect of composite fiber ratio on bending strength of embryo of silica sol shell specimens

图 3 为复合纤维配比对型壳试样焙烧后抗弯强度的影响规律。可以看出，当尼龙纤维的体积分数为 0%，即复合纤维全为陶瓷纤维时，型壳焙烧后的抗弯强度的平均值为 4.598 MPa。当尼龙纤维的体积分数从 0%～100%不断增加时，型壳焙烧后的抗弯强度变化不明显。当尼龙纤维的体积分数为 34.7%时，型壳焙烧后的抗弯强度的平均值最小，为 4.14 MPa，相比全部为陶瓷纤维的强度降低约 9.96%。当尼龙纤维的体积分数增加到 61.5%时，型壳焙烧后的平均抗弯强度最大，为 4.924 MPa，相比最小值提高约 19%，相比全部为陶瓷纤维的强度提升约 7.09%。但是随着尼龙纤维在复合纤维中体积分数越大，达到 82.7%时，型壳的焙烧后平均抗弯强度又降低到 4.178 MPa，相比全部为陶瓷纤维的强度降低约 9.13%。当尼龙纤维体积分数为 100%时，即复合纤维全为尼龙纤维，型壳的焙烧后的平均抗弯强度为 4.544 MPa，相比全部为陶

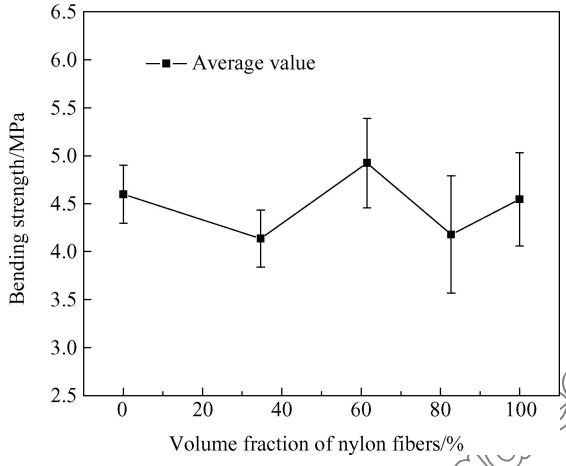


图 3　复合纤维配比对硅溶胶型壳试样焙烧后抗弯强度的影响

Fig. 3　Effect of composite fiber ratio on strength of fired silica sol shell specimens

瓷纤维的强度降低约 1.17%，相比尼龙纤维体积分数为 82.7%时型壳强度有所回升。这是由于复合纤维中尼龙纤维体积含量越大，涂挂每层的型壳试样的厚度越厚；同时型壳焙烧以后，尼龙纤维全部被烧失，产生大量的孔洞，起增强作用的纤维是陶瓷纤维。当尼龙纤维体积分数从 0%增加到 34.7%时，此时厚度增加不多，但是由于陶瓷纤维的减少和孔洞的增加引起的强度降低多于厚度引起的强度增加，因此型壳的强度降低，当尼龙纤维体积分数达到 34.7%时，强度达到最低；当尼龙纤维体积分数从 34.7%增加到 61.5%时，此时厚度引起的强度增加多于陶瓷纤维减少和孔洞增加引起的强度降低，因此强度增加，当尼龙纤维体积分数达到 61.5%时，其强度达到最大；当尼龙纤维体积分数从 61.5%增加到 82.7%时，此时厚度引起的强度增加小于陶瓷纤维减少和孔洞增加引起的强度降低，因此强度降低，尼龙纤维体积分数达到 82.7%时，强度降到最低，但高于尼龙纤维体积分数 34.7%时的强度；当尼龙纤维的体积分数从 82.7%增加到 100%时，此时厚度引起的强度增加大于陶瓷纤维减少和气孔增加引起的强度降低，因此强度增加。但是通过图中的误差棒观察，在不同体积含量条件下，其强度值是有重叠的；尽管随着纤维体积含量的增加，强度平均值呈上下波动，但是纤维随着维体积含量变化的过程中，强度相对于全部为陶瓷纤维时，变动均在 10%之内，综合以上两种结果，得出焙烧后强度的变化都在误差范围之内，强度变动不明显，因此复合纤维的配比对型壳焙烧后抗弯强度的影响很小。

2.2　复合纤维配比对型壳透气性的影响

图 4 为复合纤维配比对型壳试样透气性的影响规律。可以看出，当复合纤维全为陶瓷纤维时，型壳的透气率达到最小，为 2.898。随着尼龙纤维在复合纤维中体积含量的增加，型壳的透气率先逐渐增加，达到最大值 5.21，此时复合纤维中尼龙纤维体积分数为 82.7%，剩下的 17.3%为陶瓷纤维。这个配比下型壳透气性相对于复合纤维全为陶瓷纤维时的型壳透气性提高约 80%，充分地改善了型壳的透气性。这是由于尼龙纤维在型壳焙烧过程中被烧掉，烧掉的尼龙纤维在型壳中留下了许多微小的孔洞，尼龙纤维在复合纤维中所占比例越大，焙烧后形成的孔洞也越多，孔洞的增加提高了型壳的透气性。但当尼龙纤维的体积分数增加到 82.7%后，型壳的透气性反而开始下降。这是由于在挂浆时，发现浆料中尼龙纤维所占比例越大，型壳试样的每一涂挂层的厚度越厚，这样势必阻碍了型壳内气体的顺利排出，当尼龙纤维的体积分数增加到 82.7%之前，孔洞的增加对透气性的正效应大于厚度对型壳透气性的负效应，因此透气性不断改善，同时由于厚度的增加也导致了型壳透气性的增加越来越慢，而尼龙纤维的体积分数增加到 82.7%之后，型壳壁厚效应的增强导致型壳透气性逐渐下降。当全部为尼龙纤维时，型壳透气率为 4.618。

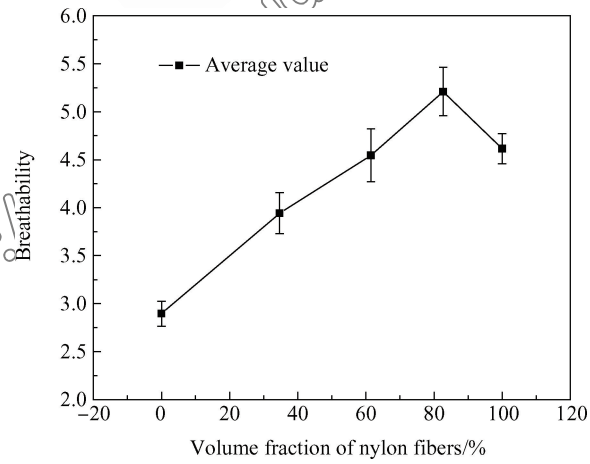


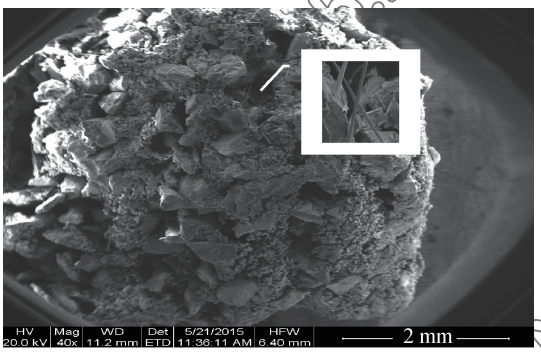
图 4　复合纤维配比对硅溶胶型壳试样透气性的影响

Fig. 4　Effect of composite fiber ratio on breathability of silica sol shell specimens

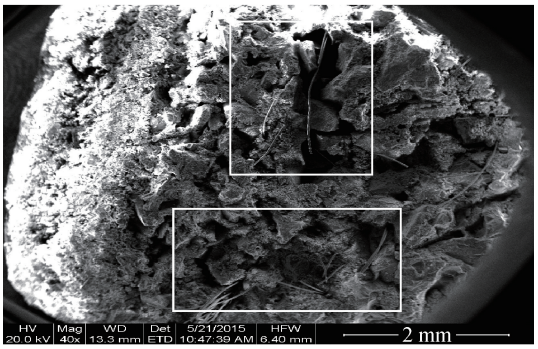
2.3　不同配比复合纤维在硅溶胶型壳中的增强机制

尼龙有机纤维也称聚酰胺纤维，其物化稳定性

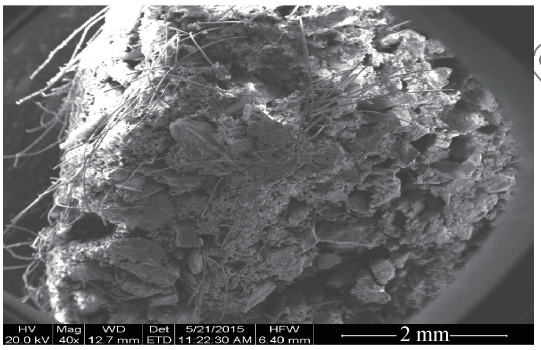
好、透气、耐磨、强韧和张力高，是一种复合材料增强效果很好的高性能纤维，而采用尼龙纤维增强型壳，在型壳焙烧时被烧失留下微孔洞，将会有效提高型壳的透气性且降低残留强度。陶瓷纤维是一种纤维状轻质耐火材料，具有重量轻、耐高温、热稳定性好、导热率低、比热小及耐机械震动的特点，采用陶瓷无机纤维增强型壳，主要提高型壳的强度。陶瓷纤维与尼龙纤维在增强性能上作用效果不尽相同，尼龙纤维在增强型壳透气性上起主要作用。硅溶胶型壳焙烧后的强度主要由陶瓷纤维和尼龙纤维烧后失微孔洞的数量及分布、型壳壁厚决定；透气性则主要受微孔洞的数量及型壳壁厚影响。图 5 和图 6 分别是不同配比复合纤维的型壳生



(a) 100% ceramic fiber



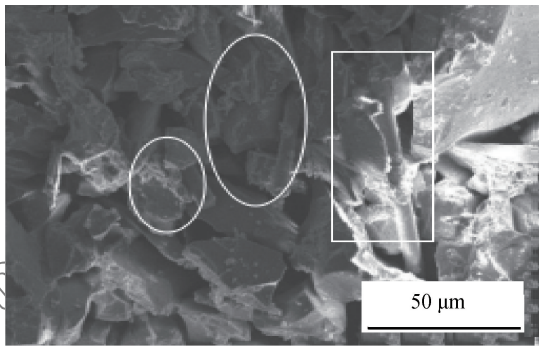
(b) 38.5%:61.5% (ceramic fiber: nylon fiber)



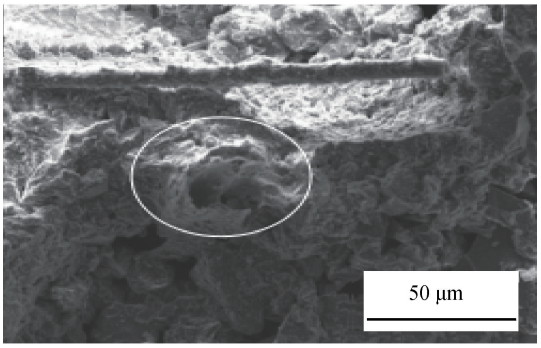
(c) 100% ceramic fiber: nylon fiber

图 5　不同配比复合纤维的硅溶胶型壳生胚试样断口微观形貌

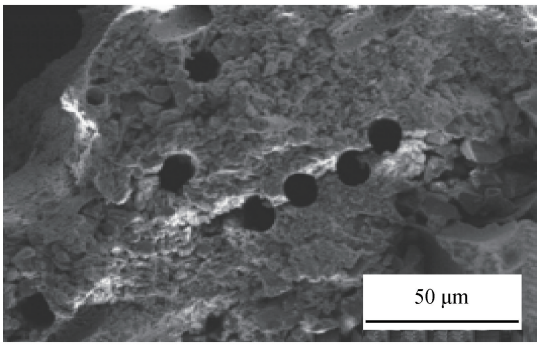
Fig. 5　Fracture micro morphology in specimens of different ratio composite fiber embryo silica sol shell



(a) 100% ceramic fiber



(b) 38.5%:61.5% (ceramic fiber: nylon fiber)



(c) 100% ceramic fiber: nylon fiber

图 6　不同配比复合纤维的焙烧后型壳试样断口微观形貌

Fig. 6　Fracture micro morphology in specimens of different ratio composite fiber fired silica sol shell

胚和焙烧后型壳试样断口微观形貌。图 7 是不同配比的复合纤维的增强行为分析。由图 5 可以看出，随着尼龙纤维体积含量的增加，断口处的纤维越来越多。由图 6 可以看出，随着尼龙纤维体积含量的增加，试样断口处的孔洞越来越多。图 7(a)中，由于陶瓷纤维密度大且单根纤维直径小，所占体积小，与浆料的接触面积小，两根纤维之间所能裹覆的浆料也少，因此陶瓷纤维的挂浆性能差；其次陶瓷纤维直径小，型壳相对较薄，因此此时型壳生胚抗弯强度是最低的。焙烧后陶瓷纤维全部在型壳中增加强度，其焙烧后的强度相对较高，但是由于没

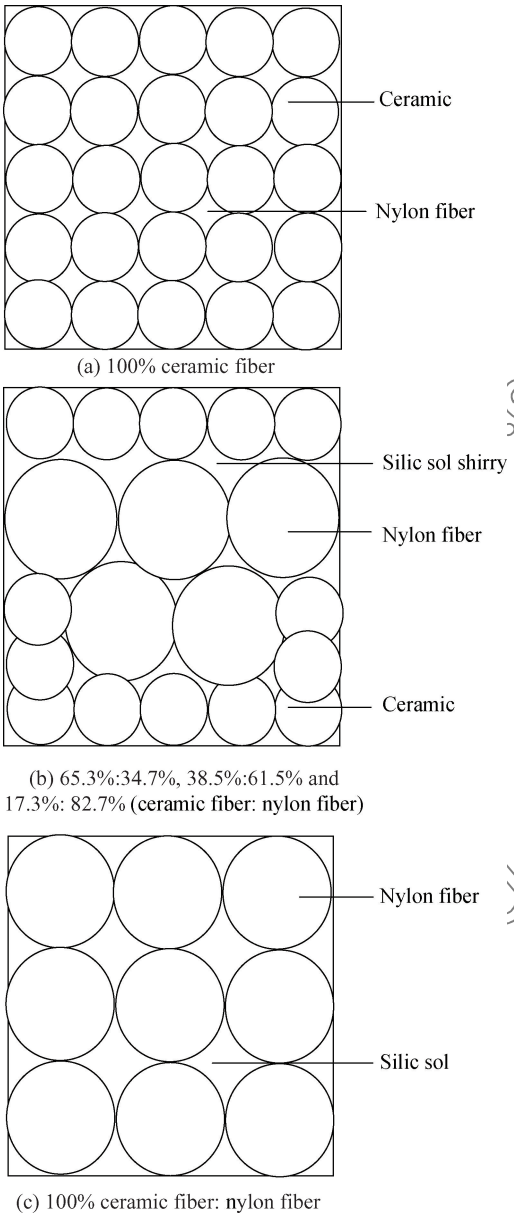


图 7　不同配比的复合纤维对硅溶胶型壳的增强行为

Fig. 7　Different ratio of composite fiber in strength enhancement behavior of silica sol shell

有尼龙纤维，因此没有孔洞，且陶瓷纤维分布比较紧密，导致此种情况下的透气性最差。由图 7(c)可以看出，由于尼龙纤维密度小且单根直径大，所占体积大，与浆料的接触面积达到最大，两根纤维之间裹覆的浆料量多，因此其挂浆性能远优于陶瓷纤维；尼龙纤维直径大，型壳壁厚相对较大，此时挂浆量最多，因此其生胚抗弯强度最大。焙烧后尼龙纤维全部被烧失，产生大量的孔洞，同时型壳壁厚达到最大，两种效应均达到最大，此时焙烧后强度的变化在误差范围之内，相对全部为陶瓷纤维的强度变化不大，但是由于壁厚效应起主要作用，因此型壳透气性下降。图 7(b)中，随着尼龙纤维体积含量的增加，挂浆量越来越多，因此强度逐渐增加，尼龙纤维的体积分数在 0%～34.7%时，陶瓷纤维占主体，挂浆量增加不多，壁厚效应较小，因此其强度增加缓慢；焙烧后尼龙纤维被烧失产生的孔洞效应与留在型壳中增加强度的陶瓷纤维效应相当，故此时强度变化不明显；焙烧后孔洞增加，且此时壁厚效应不明显，因此此时透气性有所改善。当尼龙纤维体积分数在 34.7%～61.5%时，随着尼龙纤维体积含量的增加，壁厚效应和孔洞效应逐渐增强，陶瓷纤维效应逐渐减弱，孔洞效应强于壁厚效应，故型壳的透气性进一步得到改善；此时孔洞效应的负效应稍微弱于壁厚效应和陶瓷纤维的正效应，但是整体变化依然在误差范围之内，故此时强度变化不明显；当尼龙纤维体积分数在 61.5%～82.7%时，孔洞效应和壁厚效应不断增强，陶瓷纤维效应减弱，但陶瓷纤维对其强度的影响不可忽略，孔洞效应和陶瓷纤维效应的总效果略微强于壁厚效应，但是焙烧后的强度变化依然在误差范围之内；此时孔洞效应对透气性改善的正效应依然强于壁厚负效应，透气效果继续增强。当尼龙纤维的体积分数在 82.7%～100%时，陶瓷纤维含量少，其效应不明显，此时起主要作用的是孔洞效应和壁厚效应，此时壁厚效应对强度的正效应和孔洞效应的负效应相当，因此其强度整体变化不明显；但是壁厚对透气效果的负效应强于孔洞正效应，因此透气性有所降低。焙烧以后，3 种效应相互影响，强度变化在误差范围之内，强度整体的变化趋势不明显，却对透气性有着显著影响。

3　结　论

（1）当复合纤维中的尼龙纤维体积分数从 0%～100%变化时，硅溶胶型壳生胚抗弯强度随着尼龙纤维含量的增加而增大，当复合纤维中全为尼龙纤维时，常温抗弯强度最大，为 3.051 MPa；型壳焙烧后抗弯强度的变化在误差范围之内，变化不明显，因此受复合纤维配比的影响很小。

（2）当复合纤维中尼龙纤维的体积分数在 0%～100%变化时，硅溶胶型壳的透气率先增大后减小，当尼龙纤维的体积分数为 82.7%时，型壳的透气率达到最大值 5.21。

（3）硅溶胶型壳的生胚抗弯强度主要受纤维体

http://fcxb.buaa.edu.cn

积含量的影响；型壳焙烧后的抗弯强度主要受陶瓷纤维体积含量、焙烧后型壳内部孔洞的数量、分布和型壳壁厚的综合影响；型壳透气性主要受焙烧后的孔洞数量和型壳壁厚的影响。

参考文献：

[1] 肖树龙，陈玉勇，朱洪艳，等. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J]. 稀有金属材料与工程，2006，35(5)：678-681.
XIAO Shulong，CHEN Yuyong，ZHU Hongyan，et al. Research status and development of investment casting of large and complex thin-walled titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2006，35(5)：678-681 (in Chinese).

[2] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造，2012，61(4)：347-356.
LV Zhigang. History and development trend of investment casting industry in China[J]. Foundry，2012，61(4)：347-356 (in Chinese).

[3] 何树先，王俊. 大型复杂薄壁高温合金铸件熔模精铸技术的研究进展[J]. 热加工工艺，2013(21)：5-8，12.
HE Shuxian，WANG Jun. Research progress of investment casting technology for large and complex thin-walled high temperature alloy castings[J]. Hot Processing Technology，2013(21)：5-8，12 (in Chinese).

[4] CHHABRA M，SINGH R. Rapid casting solutions：A review[J]. Rapid Prototyping Journal，2010，17(5)：328-350.

[5] VAEZI M，SAFAEIAN D. Gas turbine blade manufacturing by use of epoxy resin tooling and silicone rubber molding techniques[J]. Rapid Prototyping Journal，2010，17(2)：107-115.

[6] 刘夏，余建波，杨治刚，等. 快速干燥法制备硅溶胶型壳过程的研究[J]. 铸造，2014，63(10)：1043-1046.
LIU Xia，YU Jianbo，YANG Zhigang，et al. Research on the process of producing the silicasol shell by quick drying methods[J]. Foundry，2014，63(10)：1043-1046 (in Chinese).

[7] NEUSSL E，SAHM P R. Selectively fiber-reinforced components produced by the modified investment casting process [J]. Composites：Part A，2001，32：1077-1083.

[8] 杨世洲，傅骏. 一种高性能熔模铸造复合型壳的制备工艺[J]. 铸造技术，2010，31(5)：628-630.
ZHOU Shiyang，FU Jun. Preparation process of high performance investment casting composite shell[J]. Foundry Technology，2010，31(5)：628-630 (in Chinese).

[9] LIU Q B，LEU M C，RICHARDS V L. Fracture toughness of ceramic moulds for investment casting with ice patterns [J]. International Journal of Cast Metals Research，2007，20(1)：14-24.

[10] MAITY P C，MAITY J. Development of high strength ceramic shell for investment casting[J]. Indian Foundry Journal，2011，47(7)：23-26.

[11] 孔凡涛，赵而团，陈玉勇，等. 一种钛合金熔模铸造用纤维增强薄壁型壳的制备方法. 中国：CN102527937A[P]. 2012-07-04.
KONG Fantao，ZHAO Ertuan，CHEN Yuyong，et al. A titanium alloy casting with fiber reinforced thin-wall shell preparation method. China：CN102527937A[P]. 2012-07-04 (in Chinese).

[12] 赵松. Ti-47Al-2Cr-2 Nb 合金熔模精密铸造工艺研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008.
ZHAO Song. Study on precision casting technology of ti-47al-2cr-2nb alloy investment casting[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2008 (in Chinese).

[13] 陈合芝. 熔模铸造硅溶胶型壳的研究进展[J]. 金属加工(热加工)，2016(11)：67-69.
CHEN hezhi，Research progress of silica sol shell for investment casting[J]. Metal Working (Hot Working)，2016(11)：67-69 (in Chinese).

[14] 吕凯，刘向东，王浩，等. 短切硅酸铝纤维增强硅溶胶型壳的抗弯强度及高温自重变形[J]. 材料工程，2015，43(7)：56-61.
LV Kai，LIU Xiangdong，WANG Hao，et al. Flexural strength and high temperature self weight deformation of chopped silica fiber reinforced silica sol shell[J]. Materials Engineering，2015，43(7)：56-61 (in Chinese).

[15] 吕凯，刘向东，王浩，等. 玻璃纤维增强硅溶胶型壳的强度及高温自重变形[J]. 特种铸造及有色合金，2014，34(9)：958-962.
LV Kai，LIU Xiangdong，WANG Hao，et al. Strength and high temperature deformation of glass fiber reinforced silica sol shell[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys，2014，34(9)：958-962 (in Chinese).

[16] 吕凯，刘向东，李艳芬，等. 纤维增强熔模铸造复合型壳的性能及断口形貌[J]. 北京航空航天大学报，2014，40(10)：1361-1365.
LV Kai，LIU Xiangdong，LI Yanfen，et al. Performance and fracture morphology of fiber reinforced investment casting composite shell[J]. Journal of Beijing University Aeronautics and Astronautics，2014，40(10)：1361-1365 (in Chinese).

[17] YUAN C，JONES S. Investigation of fiber modified ceramic moulds for investment casting[J]. Journal of the European Ceramic Society，2003，23(3)：399-407.

[18] HARUN Z，KAMARUDIN N H，TAIB H M. Effect of rice husk on fired ceramic shell strength[J]. Advanced Materials Research，2013，795(1)：732-737.

[19] 芦刚，纪超众，严青松，等. 陶瓷纤维长度对复合精铸型壳抗弯强度与透气性的影响及增强行为[J]. 复合材料学报，2017，34(4)：637-644.
LU Gang，JI Chaozhong，YAN Qingsong，et al. Influence of ceramic fiber length on flexural strength and permeability of composite investment casting shell[J]. Journal of Composite Materials，2017，34(4)：637-644 (in Chinese).

[20] 毛蒲，芦刚，严青松，等. 复合纤维含量对精铸硅溶胶型壳强度及透气性的影响[J]. 中国有色金属学报，2015，24(1)：174-178.
MAO Pu，LU Gang，YAN Qingsong，et al. Effects of composite fiber content on strength and breathability of silica sol shell for investment casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2015，24(1)：174-178 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn