● 特种铸造 Special Casting ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.018

石膏型水性粘结剂型壳的显微组织与性能研究

许桂平[1,2],李 涛[1,2],刘宝光[1,2],邱保强[1,2],王 旭[1,2]

(1. 上海复合材料科技有限公司,上海 201100; 2. 上海航天树脂基复合材料工程技术研究中心,上海 201100)

摘 要:以石膏型熔模精铸生产空心金属艺术品工艺过程为例,研究了填料、添加剂及水性硅溶胶粘结剂对石膏型壳性能的影响,并通过对显微组织的观察分析了不同配方下石膏型壳,最后得出使其综合性能最佳的配方。此配方可增强石膏型壳的透气性,提高石膏型壳的力学性能和表面质量,减小石膏型壳的开裂倾向。

关键词:石膏型;水溶性硅溶胶;型壳性能;配方;显微组织

中图分类号:TG249 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)10-1096-04

Properties and Microstructure of Gypsum Waterborne Binder Shell

XU Guiping[1,2], LI Tao[1,2], LIU Baoguang[1,2], Qiu Baoqiang[1,2], WANG Xu[1,2]

(1. Shanghai Composite Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 201100, China; 2. Shanghai Aerospace Resin Matrix Composite Materials Engineering Technology Research Center, Shanghai 201100, China)

Abstract: The process of producing hollow metal artwork by gypsum mould investment casting was taken as an example. The influence of filler, additive and water-based silica sol binder on the properties of gypsum shell was studied. By observing and analyzing the microstructure of the gypsum shell under different formulations, the formula with the best comprehensive performance was obtained. This formula can enhance the air permeability of gypsum shell, improve the mechanical properties and surface quality of gypsum shell, and reduce the cracking tendency of gypsum shell.

Key words: gypsum; waterborne binder shell; performance of gypsum shell; formula; microstructure

石膏型熔模精铸是用石膏浆料灌制成铸型,经干燥、脱蜡、焙烧后即可浇注铸件的方法[1,2]。目前国内在石膏型壳制作工艺中常采用传统的水作为粘结剂,而对硅溶胶作为粘结剂以此来固化石膏和加有硅溶胶的石膏型壳的显微组织的研究少有报道[3,4]。

本文研究的石膏型熔模精铸性能及型壳显微组织是在粘结剂为硅溶胶的前提下进行的,以制作佛像艺术品为例,通过测量加入硅溶胶后的型壳的抗拉强度、抗弯强度、针入度及表面粗糙度来反应型壳的强度及抗裂纹能力等性能,并与加入水作为粘结剂的型壳作比较得出最佳的配比,以及对型壳组织结构进行显微组织观察,分析其显微结构对其性能的影响。通过研究发现将传统的水和硅溶胶两种粘结剂的特性结合起来,在石膏型熔模精铸制壳工艺中采用与传统石膏型制壳不同的粘结剂或不同配方的混合粘结剂,可增强石膏型壳的透气性,提高石膏型壳的力学性能和表面质量,减小石膏型壳的开裂倾向。

1 石膏型熔模精铸工艺过程

精铸工艺过程是从蜡模、粉料的配制起至金属液的浇注为止的一系列复杂过程,其中涉及不少的物理化学变化,而工艺过程中的这些变化又受各种工艺参数的影响而最终决定石膏型的综合性能。本实验首先通过硅橡胶模套来制作蜡模,接着混制由不同比例粉料混合而成的石膏浆料,然后灌制成石膏型并进行铝合金浇注成铸件工序,最后通过测定石膏型壳的性能和分析所得铸件的质量来得出最佳的配方,其工艺流程见图 1。

2 实验

2.1 实验材料

实验采用石膏型熔模精铸工艺进行制壳,所用实验材料见表 1。采用自制的真空搅拌与灌浆设备,在真空下搅拌混合,促使浆料中的气体顺利外排[1]。

本设计制作工艺品泥型,采用硅橡胶软模翻制蜡模,制壳工艺采用上述石膏型熔模精铸工艺。

2.2 石膏浆料的配方与配制

石膏混合料浆对石膏型及铸件的质量影响很大,所以应严格控制石膏混合料的成分配比及制浆

收稿日期:2018-02-02

作者简介:许桂平(1994-),福建南平人,助工.主要从事钛合金成形工艺方面的工作.电话:17621327401,
E-mail:498569025@qq.com

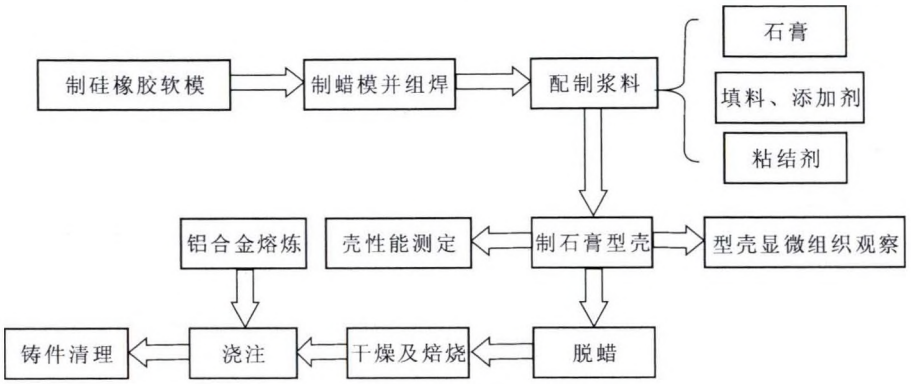


图 1 石膏型熔模精铸工艺流程图

Fig.1 Flow chart of gypsum mold investment casting process

表 1 实验材料

Tab.1 Experimental materials

实验材料		型号等级	产地
主要成分	石膏		甘肃省张掖市
添加剂	脲		
填料	石英粉	100 目	江苏省东海市
	刚玉		
	铝矾土	100 目	江西
粘结剂	硅溶胶		山东

工艺等。石膏混合料浆体是由 α 型半水石膏、填料、添加剂以及粘结剂等组成。适合作石膏型混合料的填料种类有很多，实验主要用到的填料模料有：铝矾土、石英、刚玉。

实验的 9 组配方中所加入的填料有石英粉、铝矾土、刚玉粉，所加入的粘结剂为不同浓度比例的硅溶胶水溶液。具体实验配方如表 2。

表2 添加硅溶胶石膏型配方表

Tab.2 Add silica gel gypsum-type formula table

粉料	粘结剂		配方编号	备注
	水	硅溶胶		
石膏(40%) 石英粉(20%) 铝矾土(20%) 刚玉(20%)	100%	0	1	1 为原配方；其中石膏中含有脲，其约占石膏的 20%，加入粉料前先将其溶入水中，其作用可减小石膏型在加热条件下的收缩。
	90%	10%	2	
	75%	25%	3	
	60%	40%	4	
	50%	50%	5	
	40%	60%	6	
	25%	75%	7	
	10%	90%	8	
	0	100%	9	

配方 1 采用的是原配方，其主要成分是 40%石膏粉加 20%石英粉、20%铝矾土和 20%刚玉粉等填料并添加了脲作为添加剂。加热过程中脲水解发气，膨化抗缩甚至助胀[6]，在 400 ℃左右石膏发生相变收缩，由于脲的作用以及脲缩合物和 $CaSO_4$ 络合物的形成使氮原子固溶于 $CaSO_4$ 晶体内，转移了原先的相变收缩；在 400～700 ℃，生成热解产物可助长石膏继续膨化，并在冷却阶段又能不同程度地抗衡收缩。

在原配方 1 的基础上添加了不同浓度梯度的硅溶胶后得到配方 2、3、4、5、6、7、8 和 9，其型壳的干燥时间要比配方 1 的长，且随着硅溶胶浓度的增加型壳的干燥时间延长，型壳在焙烧后未出现裂纹，由该配方下的石膏型壳浇注出的铸件表面质量良好，线条清晰，纹路明朗。其增强机理是：在石膏型壳干燥过程中，水分不断蒸发散逸，硅溶胶逐渐丧失稳定性，溶胶中的 SiO_2 粒子互相聚集，最后缩聚成三维网络结构的冻胶，将粉料团聚，脱水后成为凝胶，从而使型壳产生强度[2]。

实验是采用手工配制浆料，加入水量的多少，与许多因素有关，既受到固态粉料中石膏、填料、添加剂的种类及其比例的影响；又受到固态粉料粒度、水温等的影响，此次制壳过程中溶液中水和硅溶胶的比例为 1:1，以上述配方 5 为例，具体步骤如下：①首先称取 10 kg 粉料，即石膏 4 kg(包含 0.8 kg 脲)，石英粉 2 kg，铝矾土 2 kg，刚玉 2 kg，接着将其倒入塑料盆中，并且手工捏碎块状成坨的粉料；②接着手工将粉料混合均匀，使其不成块；③分别在粉料中加入 2 000 mm 的水和硅凝胶，手工搅拌 2～4 min 直至搅拌均匀。

2.3 灌制浆料

灌浆前先将制备好的石膏混合浆料在蜡模表面做一层面层，面层厚度为 5～10 mm 为宜，并且待整个面层具有一定强度后，将实验前准备的 15～20 mm 细铁丝插入面层当中的，待细铁丝固定在面层上后(见图 2)，再将其放入纸箱中，接着将剩余的浆料灌入其中制得加固层，为提高浆料的充型能力，应使浆料均匀不结块，浆料的充型速度视浆料的流动性而定。但由于熔模较为简单且受实验设备所限，本次实验采用的是室温下手工涂抹法。

在配制得到均匀的石膏浆料后，立即将浆料涂

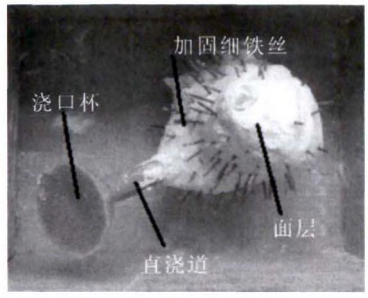


图 2 面层加固效果图
Fig.2 Surface reinforcement effect drawing

抹在蜡模上，由于实验所做的蜡模是复杂的不规则的形状，要涂挂到蜡模的角落是非常困难的，为了在石膏浆体完全凝固前完成涂挂，可两人一起完成，石膏层各方向厚度约为 30～50 mm，如果型壳太薄的话，易使型壳在脱蜡和焙烧过程中产生较大的裂纹且型壳的强调不高；如果太厚，则不利于完全脱蜡并且浪费材料，其效果图见图 3。

图 3 石膏型壳的灌制效果图
Fig.3 Casting effect of gypsum shell

2.4 石膏型壳的成型固化过程

灌浆后的石膏型要先在室温下自然干燥 24 h，膏型做完后应自然晾干 24 h，其次再放入干燥箱在 50 ℃以下烘干，然后把脱蜡后的石膏型在 80～90 ℃流动空气中干燥 10 h 可使用一般电阻丝加热的干燥箱、远红外线加热的干燥箱或有鼓风装置的烘干房，最后焙烧得到石膏型壳。实验采用的是重力浇注铝合金，如图 4，对铸件脱壳得到铸件成品，如图 5。

图 4 填埋下的石膏型浇注图
Fig.4 Gypsum shell under the landfill pouring picture

图 5 填埋下的石膏型浇注图
Fig.5 Gypsum shell under the landfill pouring photo

3 结果与分析

3.1 石膏型壳配方的组成及其性能分析

实验测定上述 9 组配方的石膏型壳焙烧后的抗拉强度，抗弯强度，针入度以及型壳表面粗糙度。其实验结果如表 3，性能综合分析图如图 6。

表3 添加硅溶胶石膏型壳性能测定数据
Tab.3 Addition silica sol gypsum shell performance measurement data

配方	抗弯强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	针入度 /(mm/10)	表面粗糙度 /(10×μm)
1	1.1	1.8	17.0	13.04
2	1.8	2.6	10.0	12.55
3	2.4	3.0	3.0	12.03
4	3.2	3.4	2.5	11.68
5	4.4	5.4	2.5	11.03
6	4.9	6.2	2.5	10.99
7	5.5	7.5	1.2	10.77
8	6.8	7.7	1.0	10.65
9	7.2	8.4	0.9	10.22

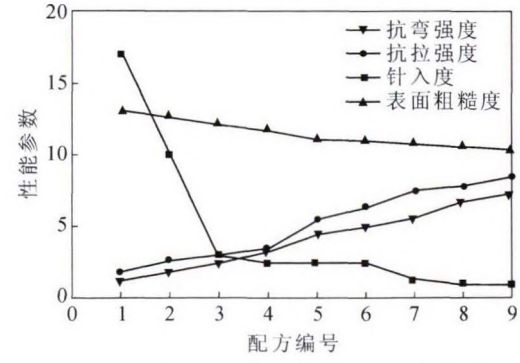


图 6 不同配方下石膏型壳性能综合分析图
Fig.6 Comprehensive analysis of gypsum shell performance under different formulations

从表 3 和图 6 得出：加入了硅溶胶作为粘结剂的配方的抗拉强度和抗弯强度比原配方是单一的水的抗拉强度和抗弯强度要大，比其粗糙度值小，说明由该含有水性硅溶胶的配方制作的石膏型壳在焙烧后不容易开裂且强度较高，但随着硅溶胶浓度的增

加水性硅溶胶石膏型壳的致密度越来越高，石膏型壳中的气体不易排出，透气性不良，从而会导致铸件在浇注的过程中夹杂着气体，原配方的抗拉强度和抗弯强度最低但有着较好的透气性，配方 9 有着较高的抗拉强度和抗弯强度，型壳不易开裂，但其透气性很低，铸件浇注成型后容易形成气孔。

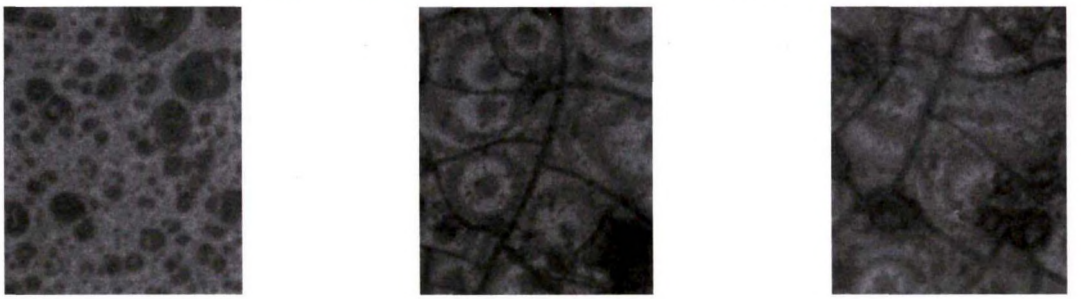
综合各种性能最佳值，配方 5 为最佳石膏型壳配方，即粉料为石膏 40%+ 石英 20%+ 铝矾土 20%+ 刚玉粉 20%+ 脲（占石膏 20%）并以硅溶胶 50%+ 水 50%为粘结剂的配方，且粘结剂占总浆料含量的40%。此种配方制出的石膏型壳抗拉强度为 5.4 MPa，抗弯强度为 4.4 MPa，针入度为 2.5 mm/10，表面粗糙度为 1.103 μm，其综合性能为最佳。按照配方 5 配制粉料所做成的石膏型壳在保证有着较好的表面质和较高的强度的同时，又能减小石膏型壳在焙烧过程中开裂倾向，并且型壳有着良好的透气性，更有利于排气，铸件浇注成型后不易形成气孔。

3.2　微观组织分析

组成材料各元素原子结构，原子间相互作用相互结合，原子或分子在空间排列，运动规律，以及原子集合体的形貌特征，因此探测物体内部微结构对于材料的研究有着重要的物理意义。

常见的熔模铸造粘结剂有水玻璃、硅溶胶和硅酸乙酯等[6]，实验采用了水、硅溶胶两种粘结剂作为对比，采用上述石膏型壳浆料配方 1，由 100%的水，0 的硅溶胶配制而成，配方 2，由 50%的水，50%的硅溶胶配制而成，、配方 3 表示 0 的水，100%的硅溶胶配制而成，不同配比下型壳 550 ℃焙烧后的显微组织分别如图 7(a)、7(b)、7(c)、所示。

从图 7 显微结构中可观察到，单纯以水作为粘结剂的配方 1 试样粉料之间的结合较为松散，50%的硅溶胶和 100%的硅溶胶的配方 2 和 3 石膏型壳的显微组织图相差不大，都能在试样中能观察到较为明显的网状结构，但配方 3 中由于微观组织结合过于紧密，导致石膏型壳透气差，所以配方 2 水性硅溶胶作为粘结剂的试样网格结构非常细密，透气型良好[5]。除此之外，由于在熔模精铸—石膏型铸造中加入硅溶胶作为增强剂，在石膏型壳干燥过程中，水分不断蒸发散逸，硅溶胶逐渐丧失稳定性，溶胶中的 SiO_2 粒子互相聚集，最后缩聚成三维网络结构的冻胶，脱水后成为凝胶，从而使型壳提高了石膏的强度。



(a)配方1石膏型壳的显微组织图　(b)配方2石膏型壳的显微组织图　(c)配方3石膏型壳的显微组织图

图 7 不同配方下石膏型壳的显微组织

Fig.7 Microstructure of gypsum shell under different formulations

为粘结剂的石膏型壳，不论焙烧前或后，随着水分不断的蒸发散逸，硅溶胶逐渐丧失稳定性且 SiO_2 粒子互相聚集，最后缩聚成三维网络结构的冻胶，显微组织均能明显的观察到清晰、细密、均匀的网状结构。熔模精铸石膏型工艺中用水性硅溶胶代替水作为粘结剂，不仅可以增强石膏型壳的透气性，有效的阻止了石膏型壳的断裂，提高石膏型壳的强度。

4　结语

（1）在石膏型熔模精铸工艺过程中，实验石膏型的制备工艺过程是从蜡料、石膏型混合料配制起至型壳的焙烧一系列复杂过程，并且从显微组织的观察中可以分析得到不同粉料及粘结剂的配方对石膏型壳的宏观性能的影响。

（2）以水为粘结剂的石膏型壳，不论是焙烧前或后，显微组织观察中无网状结构；添加水性硅溶胶

参考文献：

[1] 万红，熊博文，徐志锋. 石膏型熔模精铸水性硅溶胶制壳工艺研究[J]. 铸造技术，2010, 31(12)：1658-1659.

[2] 李传拭. 石膏材料和石膏型制造工[J]. 铸造，2006(9): 55-58.

[3] 高以熹.石膏型熔模精铸工艺及理论[M]. 西安：西北工业出版社，1992.

[4] 张立同，曹腊梅，刘国利，等. 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.

[5] 苗红顺，王高潮，万红. 基于选域激光烧结技术的石膏型精密铸造工艺研究[J]. 热加工工艺，2006(1): 55-57.

[6] 罗启全. 铝合金石膏型精密铸造 [M]. 广州： 广州科技出版社，2005.