

熔模铸造硅溶胶快速制壳工艺研究与实践

柳建国¹, 马波¹, 朱家辉², 李锐¹, 蓝勇¹

(1. 东风精密铸造有限公司, 湖北十堰 442714; 2. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 介绍了熔模铸造水玻璃工艺转型升级, 实现熔模铸造硅溶胶快速制壳批量应用。该工艺从模料与制壳材料选取、快干剂添加、在线快速制壳、蒸汽脱蜡及蜡料回收处理等工序进行优化升级, 彻底消除了水玻璃、盐酸、氯盐等污染物的使用, 实现了酸雾、钠盐的零排放。

关键词: 熔模铸造; 水玻璃型壳; 硅溶胶; 快速制壳; 快干剂; 蒸汽脱蜡

熔模铸造水玻璃精铸工艺在我国工业化应用已经有近60多年的历史, 发展至今每年大约150万吨精铸件, 为我国经济发展做出了巨大贡献。期间虽然在模料、制壳材料、硬化剂及制壳工艺等方面进行了大量改进和创新, 但其酸雾、氯盐等污染问题一直没有得到根本性解决。

1 工艺升级方案探讨

传统水玻璃精铸工艺多以石蜡-硬脂酸为主, 使用过程容易发生皂化反应, 回收通常采用盐酸进行处理, 氯化氢酸雾污染严重; 制壳过程采用氯盐化学硬化产生大量的钠盐和氯化氢酸雾污染, 脱蜡时采用氯化铵或盐酸补充硬化, 焙烧过程中会有氯盐及氯化氢产物^[1]。

当前氯化铵硬化水玻璃型壳工艺已经被国家列为落后工艺, 盐酸在很多地方也被禁止使用, 随着环保压力的增大, 传统水玻璃精铸工艺的转型升级势在必行。

为解决传统水玻璃精铸工艺的污染、成本、周期及质量等关键问题, 东风精铸工艺转型升级总体思路如下:

(1) 采用原有模料(石蜡-硬脂酸), 粘结剂为硅溶胶, 制壳取消氯盐硬化, 脱蜡和蜡处理取消氯化铵或盐酸的使用, 从根源上消除污染物的产生;

(2) 制壳材料采用石英系砂粉;

(3) 自主研发出快干、强化添加剂, 实现制壳快干、型壳薄壁高强;

(4) 制壳环境“温度+湿度+风速”有效控制;

(5) 低温模料微压蒸汽脱蜡。

在此基础上, 原有工艺布局方面无需做大的调整, 制壳周期和综合成本不高于传统水玻璃型壳工艺, 彻底消除了钠盐、氯化氢气体和氨气污染, 同时铸件质量也得到了提升^[2], 如表1所示。

通过质量、成本、交期和环保指标综合对比可知, 东风精铸低成本薄壳硅溶胶快干工艺是传统水玻璃精铸工艺转型升级的最佳方案。

2 东风精铸硅溶胶快速制壳工艺研究与应用

目前, 国内80%的熔模铸造企业为传统的水玻璃熔模铸造工艺或硅溶胶-水玻璃复合熔模铸造工艺, 以生产汽车、船舶、工程机械、轨道交通、机床等零部件为主。传统水玻璃精铸工艺需要氯盐硬化型壳, 环境污染严重。而中温模料的全硅溶

作者简介:

柳建国(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事铸造技术及节能减排研究工作。
E-mail: liuyang139@163.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)10-1081-06

基金项目:

国家重点研发计划(2017YFF0207902)。

收稿日期:

2020-03-27 收到初稿,

2020-04-07 收到修订稿。

胶工艺,制壳周期和成本是传统水玻璃精铸工艺的2~3倍,不适应传统水玻璃精铸工艺升级、批量生产^[3]。

东风精铸在精密铸造行业内率先研发出一种环保、高效、低成本的硅溶胶快速制壳工艺,淘汰了水玻璃制壳工艺,并大批量应用于汽车零部件生产。

2.1 硅溶胶快速制壳工艺要求

目前,精铸行业内硅溶胶快速制壳技术,主要是在涂料中添加快干、强化等有机高分子聚合物水溶液,通过增加胶凝核心,加快胶凝过程,物理绑缚作用和增强作用实现快干(表2)。目前市场上有熔模铸造专用快干硅溶胶、NP快干添加剂^[4]。东风精铸自主

研发出适合中大件、批量化生产模式快干剂,可实现悬链线在线硅溶胶快速制壳。表3、表4分别为东风精铸的快速制壳干燥环境参数及快速制壳耐火材料选择。

一般加固层层数 ≥ 2 层,视产品大小而定;封浆干燥时间与环境参数可不作特定要求,与模组存放同时进行。(若为蒸汽脱蜡可无封浆层)。

2.2 硅溶胶快速制壳快干剂开发

熔模精密铸造制壳涂料技术领域中快干剂将直接影响型壳及铸件的质量、生产周期和成本。为寻求适合自己的快干剂,东风精铸进行了大量的研究和试验,发现大多数是以醇基硅酸乙酯粘结剂发展为水基

表1 不同工艺对比
Table 1 Comparison of different process

类别	名称	方案简述	质量、成本、周期	备注
传统精铸	水玻璃型壳工艺	①采用石蜡—硬脂酸模料,石英系砂粉;②水玻璃粘结剂,采用氯盐湿法硬化,下线后存放24 h,3 kg件制壳周期31.5 h;③热水脱蜡,氯化铵或盐酸补充硬化	①制壳周期31.5 h;②存在钠盐和氯化氢等污染物	适合一般精铸件
东风精铸方案	低成本环保薄壳硅溶胶快干工艺	①采用石蜡—硬脂酸模料或新型低分子模料,石英系砂粉;②普通硅溶胶粘结剂,添加快干、强化剂,下线免存放,3~5 kg件制壳周期15 h;③微压蒸汽脱蜡	①尺寸精度和表面粗糙度提高一个等级;②综合成本不升高,制壳周期缩短10~15 h;③无钠盐和氯化氢等污染物	适合一般精铸件
中温模料	硅溶胶工艺	①采用树脂基模料;②普通或快干硅溶胶粘结剂,面层用锆英或刚玉砂粉,加固层用优质莫来石砂粉,常规产品制壳周期3~4.5天;③蒸汽脱蜡	①尺寸精度和表面粗糙度提高2~4个等级;②吨铸件制壳成本增加2 000~3 500元,制壳周期增加20~45 h;③无钠盐和氯化氢等污染物	适合于附加值较高的产品

表2 主要快速制壳涂料构成
Table 2 The main rapid shell coating composition

层次	涂料组元						目前行业内主要快干技术对比
	硅溶胶	快干剂	耐火粉料	表面活性剂	消泡剂	其他添加物	
表面层	√	√	√	√	√	可选	①熔模铸造专用快干硅溶胶,价格昂贵,适合高附加值精铸件
过渡层	√	√	√	可选	可选	可选	②NP快干剂+硅溶胶,价格较贵,适合中、小一般商用精铸件
加固层	√	√	√	-	-	可选	③东风精铸快干剂+硅溶胶,价格适中,适合中大件、批量化生产精铸件

表3 东风精铸用快速制壳干燥环境参数
Table 3 Drying environment parameters of rapid shell making used by DongFeng Investment Casting

层次	温度/℃	湿度/%	风速/($m \cdot s^{-1}$)	快速制壳层间干燥时间/h
面层	≥ 22	≤ 60	3~7	≤ 3
过渡层	≥ 22	≤ 60	3~7	≤ 3
加固层	≥ 24	≤ 45	≥ 6	≤ 2
封浆	≥ 24	≤ 45	≥ 6	≤ 1

一般加固层层数 ≥ 2 层,视产品大小而定;封浆干燥时间与环境参数可不作特定要求,与模组存放同时进行。(若为蒸汽脱蜡可无封浆层)

硅溶胶粘结剂,大大降低了对环境的污染。然而,现有技术中的快干剂尚且无法满足生产的需要,还存在很多的不足,比如现有技术中的快干剂因干燥速度慢、稳定性低、铸件废品率高等缺点,严重影响了生产周期、增加了生产成本,有待进一步的改进。另外,硅溶胶中含有60%的自由水,快干剂的加入必然使其保存期大大缩短。试验发现,若将快干粉剂不溶于水而将其与耐火材料混合再直接加到硅溶胶涂料中,短时间内涂料就胶凝“老化”,由此可见,快干剂的加入方法会直接影响硅溶胶(涂料)使用寿命及成本,为此必须进行“改性”处理,使其使用寿命延长至半年以上,因而导致成本剧增,这正是多年来快干硅溶胶(剂)未能广泛应用的主要原因之一。

东风精铸所要解决的技术问题是针对上述现有技术的不足而提供一种使用方便、防老化、干燥速度快的一种高效精密铸造制壳涂料用快干剂。其中一种技术方案为:由质量分数为0.05%~2.00%的絮凝剂和98%~99.95%的溶剂组成,所述絮凝剂为聚丙烯酰胺、聚丙烯酸钠中的一种或2种的组合,溶剂为蒸馏水或去离子水。

快干机理研究:通过对熔模铸造硅溶胶制壳涂料中添加不同配比快干剂,对涂料的絮凝性、粘合性、增稠性、降阻性、分散性、稳定性等特性进一步研究,旨在提高涂料胶体稳定性,改善型壳透气性、湿强度、高温强度及残余强度。

絮凝性:能使硅溶胶的胶粒絮凝成大颗粒,同时将其中的自由水分(约占总水分60%)被排挤到胶团表面,在风干时易于挥发,实现“快速干燥”。

粘合性:快干剂水溶液本身是一种具有优良弹

性的“软性”胶体,它在硅溶胶(是一种“刚性”胶体)失水胶凝,产生收缩应力时能达到吸收、缓解应力(有退让性),具有物理“绑”的作用,可提高型壳湿强度达30%,防止型壳产生裂纹的作用。

增稠性:它对硅溶胶还有提高涂挂性、覆盖性,增加涂层厚度的功能。如石英(精制石英粉或熔融石英粉)表面层硅溶胶涂料与蜡膜表面润湿性极差,会改善面层浆涂挂性。

降阻性:它能使流体(涂料)的流动性提高50%~80%。有利于型壳(铸件)质量的稳定和提高,防止了因涂料堆积、型壳焙烧过程而使铸件产生“渗钢”缺陷。

分散性:能使涂料中耐火材料分散性改善,细粉($d < 5 \sim 10 \mu\text{m}$)含量增高。涂料的涂挂性、涂层厚度增加、致密度提高。

稳定性:快干剂能提高硅溶胶涂料的稳定性,一般由原来3天提高到7天。其本身是“络合剂”中的一种,与水中或耐火粉料中的金属离子(Na, Ca, Fe等)发生“螯合”作用,又称“螯合剂”,金属封锁剂或“水质软化”剂,能减少上述金属氧化物对涂料的有害影响,提高涂料的“稳定性”,延长了使用寿命。

多孔性:熔模铸造型壳经高温焙烧,型壳中有机高分子聚合物(NP)就已燃烧殆尽不留残渣、余灰,气化分解后留下多量微孔,能提高型壳透气性20%,脱壳性10%,降低了铸件废品率,提高了后处理生产效率。

分3组试验进行快干剂不同配比效果对比,如表5所示。

表4 东风精铸用快速制壳耐火材料
Table 4 Rapid shell-making refractories used by DongFeng Investment Casting

耐火材料	层次	筛号/目	备注
制壳粉料	面层、过渡层、加固层	≥ 200	
制壳砂料	面层	40~70/40~100/80~120	产品结构差异调整
	过渡层	30~60	
	加固层	10~30	

表5 快干剂不同配比效果对比
Table 5 Effect comparison of fast drying agent with different ratios

试验组号	快干剂配比	涂料主料	与非快干制壳效果对比
1	0.05%的聚丙烯酰胺+99.95%的去离子水	硅溶胶+制壳粉料	①制壳周期缩短1/2以上;②型壳湿强度 \uparrow 30%,透气性 \uparrow 20%,脱壳性 \uparrow 10%
2	1%的聚丙烯酰胺+1%的聚丙烯酸钠+98%的去离子水	硅溶胶+制壳粉料	①制壳周期缩短1/2以上;②型壳湿强度 \uparrow 30%,透气性 \uparrow 20%,脱壳性 \uparrow 10%
3	2%的聚丙烯酰胺+98%的去离子水	硅溶胶+制壳粉料	①制壳周期缩短1/5以上;②型壳湿强度 \uparrow 30%,透气性 \uparrow 15%,脱壳性 \uparrow 10%

经过上述试验发现，试验1具有较好的干燥性能。本发明提供一种高效精密铸造制壳涂料专用快干剂，与传统快干剂相比具有快速干燥、提高型壳湿强度、防止开裂、改善透气性及脱壳性等优点，而且使用起来也很方便，有效提高了工作效率、缩短了生产周期、减少制壳砂粉材料消耗，降低了制造成本，具有很好的经济使用价值。但有机高聚物最大的缺点是其水溶性液体的保存期很短，逾期就会降解，絮凝失效，尤其是在剪切应力下更易“老化”。因加入的时机不同，其效果则大相径庭，使用过程中要严格按快干剂技术要求操作，以免造成损失。

2.3 硅溶胶快速制壳工艺验证

熔模铸造型壳质量直接影响铸件的尺寸精度和表面品质，最核心的型壳性能包含强度、耐火度和透气性三个方面，在涂料中添加自主研发的快干剂、强化剂及纤维后改变了胶体间的作用力，使得粉料不易沉淀，更加均匀，解决了涂料干燥过程中的开裂倾向。表6和图1为面层涂层厚度对比，面层涂料的粉液比可达2.2（图2），面层致密度的改善提高了铸件表面的质量。

采用高聚物、纤维和无机强化剂对涂层进行复合强化，通过多组正交试验，研究不同长度、不同含量的碳纤维、玻璃纤维、聚丙烯纤维、木纤维对型壳强度、涂料粘度、透气性能的影响，系统解决型壳透气性、背层型壳强度兼顾提升的问题，成功实现了背层涂料集配强化（图3-4）。

并通过“温度+湿度+风速”的实施，底部风管风口正对模组底面、侧面近距离吹风，与湿型壳水分自重迎合，加快水分蒸发干燥，一般产品面层干燥小于3 h，背层干燥时间小于2 h，型壳下线后实现免存放可直接脱蜡、焙烧浇注^[5]。

东风精铸自主研发的硅溶胶快速制壳工艺已经实现悬链线/机械手在线制壳、稳定批量化生产，图5为

表6 涂层重量统计
Table 6 Weight of coating

序号	类别	粘度/s	涂片前重量/g	涂片后重量/g	涂料重量/g
1		71	60.50	61.71	1.21
2	原有	67	60.44	61.53	1.09
3	涂料	63	60.33	61.46	1.13
4		61	60.73	61.59	0.66
5	新配	58		63.12	2.39
6	方涂	62	60.73	63.19	2.46
7	料	66		63.21	2.48
8		75		63.72	2.99

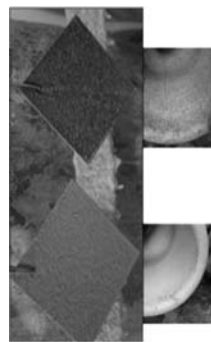


图1 面层涂层厚度对比

Fig. 1 Surface coating thickness comparison

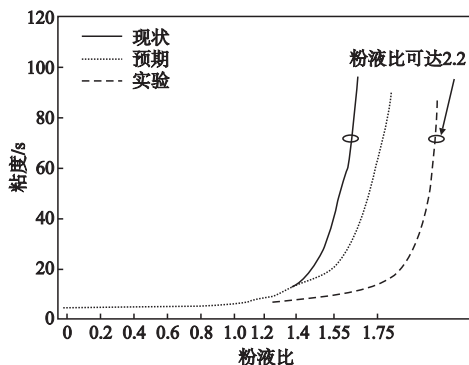
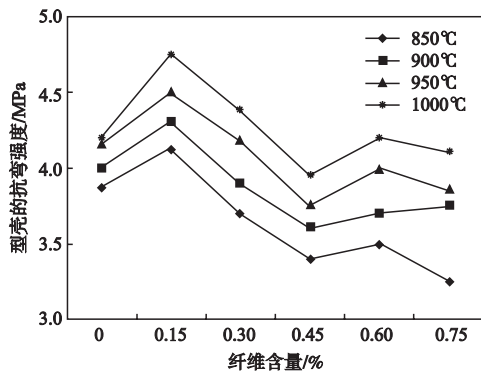
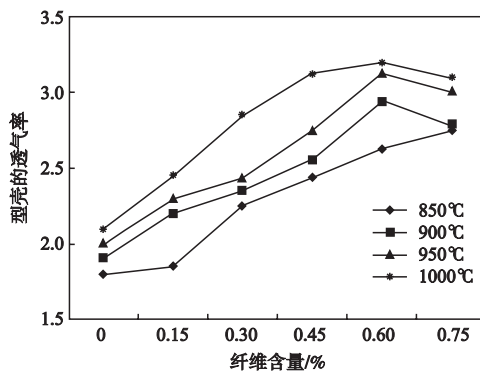


图2 面层涂料的粉液比曲线

Fig. 2 Curves of powder liquid ratio of surface coating



(a) 型壳强度



(b) 透气性

图3 快干剂和纤维对型壳强度、透气性影响

Fig. 3 The effect of fast drying agent and fiber on strength and permeability of shell mold

底部风管送风模式。例如：一般10 kg级精铸件制壳层数由6.5层减少至4.5层，型壳厚度由原10~12 mm降到6 mm以内，图6为水玻璃型壳与硅溶胶薄壳对比效果，全部制壳时间 ≤ 12 h，型壳重量与模组重量之比 ≤ 0.6 ，制壳周期与水玻璃制壳工艺周期相当。

3 脱蜡及蜡回收工艺优化

传统水玻璃精铸工艺升级为硅溶胶快速制壳工艺后，为解决硅溶胶型壳蒸汽脱蜡工艺要求，经过多轮的试验验证，东风精铸开发出适合石蜡-硬脂酸模料或新型低分子模料通过式微压蒸汽脱蜡工艺及专用设备（图7），它不仅降低了高温对蜡料损害及水浴脱蜡对型壳强度损伤，而且还提高了效率，改善了作业环境，同时使蒸汽脱蜡能耗比水浴能耗下降30%。最终用环保无挥发性的有机酸代替盐酸进行蜡处理，经过回收处理的蜡料，强度和灰分指标均合格（图8）。

4 工业化应用与行业推广

硅溶胶快速制壳实现技术突破后，东风精铸实现了由制模-取模-组树-制壳-脱蜡-焙烧-浇注“制程一线通”工程（图9），促进精铸行业全序工业化、智能化进步，使劳动效率大大提高。

东风精铸自主研发的低成本环保薄壳硅溶胶快干工艺除了自己应用，为推进行业传统精铸工艺转型升级，近两年已对行业内传统精铸工艺10余家企业输出技术服务。随着国家环保治理，预计未来两年内全行业的传统精铸工艺将淘汰落后、转型升级完毕。低成本环保薄壳硅溶胶快干工艺服务典型企业生产现场如图10所示。

5 结论

熔模铸造硅溶胶快速制壳工艺同时具有环保、低成本和短周期三方面的优势，是传统水玻璃精铸工艺



图5 底部风管送风模式
Fig. 5 Bottom duct air supply mode



图6 水玻璃型壳与硅溶胶薄壳对比
Fig. 6 Comparison of sodium silicate shell and silica sol shell



图7 微压蒸汽脱蜡生产线
Fig. 7 Micro-pressure steam dewaxing production line

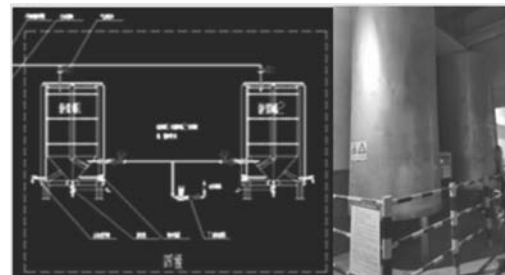


图8 蜡料静止处理系统
Fig. 8 Wax static treatment system

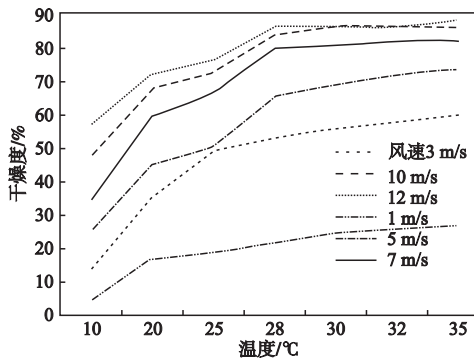


图4 温度、湿度、风速对干燥度影响
Fig. 4 The influence of temperature, humidity and wind speed on dryness



图9 “制程一线通”示意
Fig. 9 “Process line” signal



图10 硅溶胶快速制壳生产线

Fig. 10 Silica sol rapid shell production line

转型升级的最佳方案，是主流硅溶胶精铸制壳工艺缩短周期理想选择，该工艺关键技术要点可概括为：

(1) 开发出与国际快干水平相当、低成本的快干胶，熔模铸造制壳涂料中通过添加快干剂等添加物，有效提高了型壳湿强度、高温强度，使型壳制壳层数缩减1/4~1/3，砂粉消耗及固废排放下降30%。

(2) 对干燥环境如风速、温度、湿度等工艺参数的优化调整，形成了一套完整的超薄型壳快速制壳工艺，型壳下线后免存放可直接脱蜡，使制壳时间由传统水玻璃精铸工艺36 h缩减至15 h，比主流硅溶胶制壳工艺周期缩短60%以上。通常情况硅溶胶快速制壳与水玻璃精铸工艺制壳周期相当。

(3) 彻底消除了传统精铸行业盐酸、氯化铝等酸碱污染物使用。全行业推广后，我国现有传统精铸工艺减少酸性物质用量超过10万吨/年，辅料消耗与固废排放减少超过100万吨/年。

参考文献：

- [1] 吉荣, 肖泽辉. 我国熔模铸造和实型铸造的回顾与展望 [J]. 铸造, 2002 (3): 323-324.
- [2] 景宗梁, 陆黎明, 陆洲. 水玻璃型壳新型硬化剂的研制及应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010 (12): 1127-1129.
- [3] 姜不居, 周泽衡, 陈冰, 等. 熔模铸造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 籍君豪. 低温蜡-硅溶胶型壳的应用实践 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27 (4): 283-275.
- [5] 吕志刚, 姜不居, 闫双景, 等. 风速和湿度对硅溶胶干燥过程的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2003, 19 (4): 48-49.

Research and Practice on Process of Fast Shell-Making with Silica Sol in Investment Casting

LIU Jian-guo¹, MA Bo¹, ZHU Jia-hui², LI Rui¹, LAN Yong¹

(1. Dongfeng Investment Casting Co., Ltd., Shiyan 442714, Hubei, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

This article focuses on the transformation and upgrading of the process of investment casting water glass to achieve the batch application of fast silica sol shell making in investment casting. The processing technology is optimized and upgraded from the pattern material and shell material selection, fast drying agent addition, on-line rapid shell-making, steam wax removal and wax recovery treatment process and so on, and completely eliminate the use of water glass, hydrochloric acid, chloral acid and other pollutants. Consequently, it achieves the zero emission of acid mist and sodium salt.

Key words:

investment casting; sodium silicate shell mold; silica sol; fast shell making; fast drying agent; steam dewaxing