● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.001

基于砂型柔性挤压成形工艺的起模时间实验研究

董晓传[1,2],单忠德[1],刘丽敏[1],杨颜绮[1],顾兆现[1],姜二彪[1]
(1.机械科学研究总院集团有限公司 先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100044;2.天津职业技术师范大学 汽车模具智能制造技术国家地方联合工程实验室,天津 300222)

摘　要:基于数字化砂型柔性挤压/切削复合成形技术,研究不同树脂及硬化剂含量对砂型起模时间及性能的影响。实验结果表明,硬化剂含量的变化仅对起模时间呈现非线性影响,而对砂型24 h抗拉强度和透气性几乎无影响。随着树脂含量的增加,砂型起模时间减小,24 h抗拉强度增加,透气性降低,同时对不同硬化剂和树脂配比导致的起模时间规律曲线进行多元线性回归,获得了不同树脂及硬化剂配比条件下的砂型起模时间的预测模型,为砂型柔性挤压成形工艺的排产及生产效率的提高提供了理论依据。

关键词:砂型挤压/切削复合成形技术;柔性挤压;配比方案;起模时间
中图分类号:TG242　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)12-1109-04

Experimental Study on Stripping Time of Molding Sand Based on Flexible Extrusion Process

DONG Xiaochuan[1,2], SHAN Zhongde[1], LIU Limin[1], YANG Yanqi[1], GU Zhaoxian[1], JIANG Erbiao[1]
(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Intelligent Manufacturing Oriented Automobile Die &Mould, Tianjin University of Technology & Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: Based on the flexible extruding/cutting composite forming technology of digital sand mould, the effects of different resin and catalyst content on the stripping time and performance of sand mould were studied. The results show that the change of catalyst content has a nonlinear effect only on the molding time, but has little effect on the 24 h tensile strength and air permeability of sand mold. With the increase of the content of resin sand mould stripping time decreases, and 24 h increase tensile strength, permeability is lower, at the same time with different ratio of resin and catalyst to draw time rule curve of multivariate linear regression, the ratio of different resin and catalyst under the condition of sand mould stripping the prediction model of time, flexible extrusion forming technology for sand production scheduling and production efficiency to provide a theoretical basis.

Key words: hybrid forming technology of sand mold extrusion cutting; flexible extrusion; mix proportion scheme; stripping time

随着航空、航天、核电及船舶等领域的快速发展,对大型复杂铸件尤其是小批量、个性化定制的铸件产品需求量越来越大。传统铸造技术在进行此类铸件的生产时,存在周期长,生产效率低,成本高及污染重等问题。数字化无模铸造复合成形技术通过砂型挤压及切削加工实现复杂铸型的快速制造是解决该问题的有效方法之一[1-3]。

由于砂型挤压及切削分别在两个不同的设备或工位,甚至会出现一台砂型挤压设备对应多台砂型切削设备的情况,因此砂型挤压工步的起模时间决定了无模铸造复合成形的整体加工效率及质量[4,5]。起模时间太快,一方面,可能导致砂型强度不足而坍塌,或在后续切削加工时砂型易开裂或损毁;另一方面,对于需要多次间歇铺砂或者长时间连续铺砂的大型砂型,过快的固化时间会使得砂型沿时间梯度分层。起模时间太慢,降低了砂型的挤压成形效率,不利于砂型快速制造。对于树脂砂而言,树脂及硬化剂的比例对起模时间至关重要[6-9]。在前期的相关研究中,刘丽敏[10]等考虑硅砂、宝珠砂及铬铁矿砂等型砂的切削性能,获得了基于无模铸造复合成形技术的多材质复合铸型用各型砂最优配比范围,但未对砂型的起模时间进行研究。

有鉴于此,针对砂型柔性挤压成形工艺特点,针

收稿日期:2020-10-20
基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51525503);机械科学研究总院技术发展基金(312008Q9)
作者简介:董晓传(1984-),山东烟台人,博士,讲师.研究方向:无模快速铸造复合成形工艺、金属塑性成形工艺与装备.电话:010-82755510,
E-mail:dong_xiaochuan@163.com

对济南圣泉集团股份有限公司的 NP101 和 NP102 树脂及 NP103E 硬化剂产品，研究不同树脂及硬化剂含量的匹配方案对砂型起模时间、24 h 抗拉强度及砂型透气性的影响规律，分析建立适应砂型柔性挤压成形工艺的树脂及硬化剂含量与起模时间的映射关系，提高无模铸造复合成形技术的实际生产效率。

1 实验方法

依据实际生产中树脂及硬化剂常用配比范围，本次实验研究分别设定树脂的比例为 1.0%、1.5%、2.0%及 2.5%(NP101 和 NP102 两种树脂按 1:1 混合后总量)，硬化剂的比例依次为 NP101 树脂含量的 1.0%、1.5%、2.0%及 2.5%，设计单因素变换实验方案共 20 组。

砂型采用“H”形的结构，如图 1。混砂时先将 NP101 和硬化剂 NP103E 混 1 min，再加入 NP102 混 2 min，然后填入砂箱压实，并记录时间，每组配比参数同时制作多个砂块，便于连续进行砂型起模质量检测。

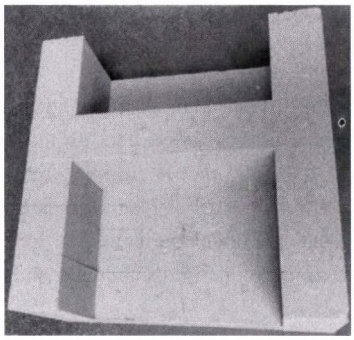


图 1 “H”形结构砂块
Fig.1 “H” shaped sand block

根据前期针对砂型柔性挤压成形工艺的研究结果，结合铸造手册及现场实践经验，设定当砂型表面硬度达到 75 g/mm^2 时，初步视其为可起模状态，此时该砂型相应位置的各挤压触头回程，当触头与砂型脱离后，若砂型出现坍塌或缺损，则不记录时间，并进行下块砂型的观察与测量，若砂型无明显缺损时，则记录时间，从而确定其起模时间，如图 2。

将获得的砂型进行切削，分别制作抗拉强度测试所需的标准“8”字块砂型和透气性测试所需的圆柱形砂型。如图 3。

2 实验结果分析

根据 20 组实验方案，分别进行不同树脂及硬化剂配比的起模时间、24 h 抗拉强度及透气性实验结果的分析。

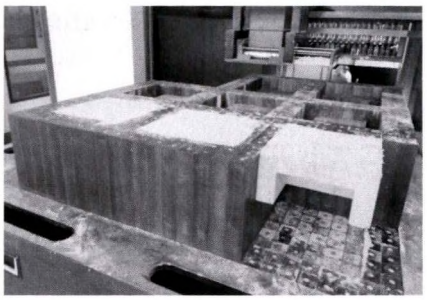


图 2 实验砂型
Fig.2 Experimental sand mold

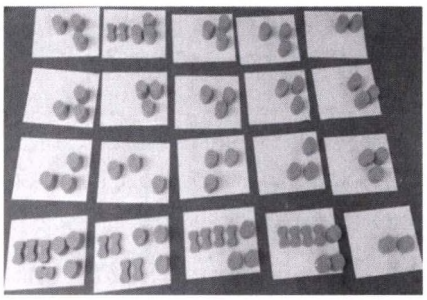


图 3 切制的部分标准砂型测试试样
Fig.3 Some machine cut standard sand mold samples

2.1 起模时间分析

根据树脂及硬化剂的不同比例，获得不同配比对砂型起模时间的影响规律，如图 4。

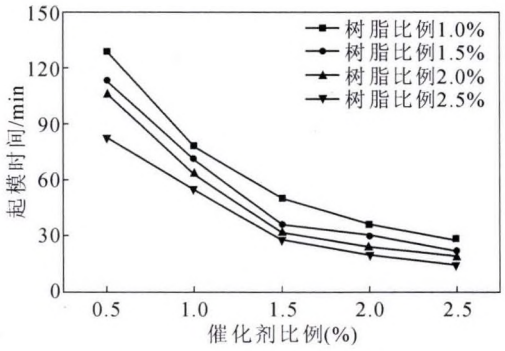


图 4 不同配比对起模时间的影响规律
Fig.4 Influence of different ratio of resins and hardeners on the stripping time of sand mold

由图 4 可知，相同比例的硬化剂条件下，随着树脂含量的升高，起模时间逐渐减少，当树脂含量从 1.0%增加大到 2.5%时，起模时间最大缩短了 50%。这是由于，随着树脂含量的增加，加入的硬化剂能够与更多的树脂分子进行反应，加快了树脂的固化速度，从而缩短了起模时间；相同比例的树脂含量条件下，随着硬化剂比例的升高，起模时间也逐渐减少，且树脂含量高的砂型尤为明显，当硬化剂含量从 0.5%增加大 2.5%时，高树脂含量砂型起模时间最大缩短了 83.1%。同时亦可发现，相同树脂含量情况下，硬化剂对起模时间的影响并非为线性，起模时间的减少幅度随着硬化剂含量的升高有

所减少。

2.2　24 h 抗拉强度分析

根据树脂及硬化剂的不同比例，获得不同配比对砂型 24 h 抗拉强度的影响规律，如图 5。

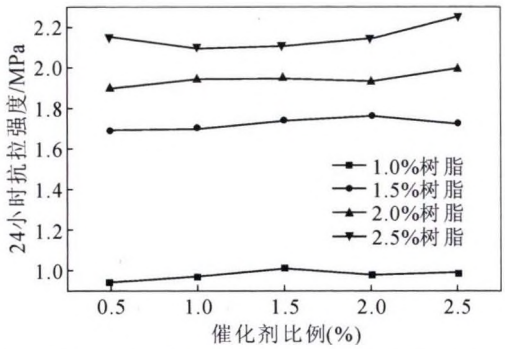


图 5　不同配比对砂型 24 h 抗拉强度的影响规律

Fig.5　Influence of different ratio of resins and hardeners on 24 h tensile strength of sand mold

由图 5 可知，相同比例的硬化剂条件下，随着树脂含量的升高，砂型 24 h 的抗拉强度逐渐增大，且当树脂含量相同的时候，不同硬化剂对砂型 24 h 抗拉强度的影响不明显，每条曲线的标准偏差最大仅为 0.05，这表明，硬化剂仅仅起到了加速砂型固话的时间，但并没有增加砂粒之间的粘接桥数量，从而未增大砂型抗拉强度。另外，树脂含量从 1.0%增大到 1.5%时，砂型的 24 h 抗拉强度大幅增大，约升高了 75%，而树脂含量从 1.5%增大到 2.0%以及从 2.0%增大到 2.5%时，砂型的 24 h 抗拉强度增大减缓，依次约升高了 13.0%及 10.6%。

2.3　透气性分析

根据树脂及硬化剂的不同比例，获得不同配比对砂型透气性的影响规律，如图 6。

相同比例的硬化剂条件下，随着树脂含量的升高，砂型的透气性逐渐减小，这是由于树脂含量增大，增加了粘结桥及粘结膜的数量，填补了砂粒之间的孔隙，进而降低了砂型的透气性，且当树脂含量相同时，不同硬化剂对砂型 24 h 抗拉强度的影响不明显，每条曲线的标准偏差最大仅为 0.5，这表明，硬化剂对砂型透气性影响微弱。

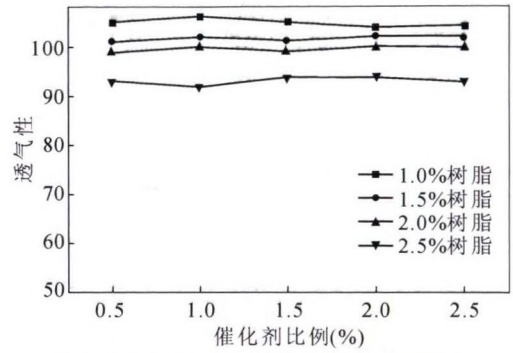


图 6　不同配比对砂型透气性的影响规律

Fig.6　Influence of different ratio of resins and hardeners on sand mold permeability

3　起模时间预测模型

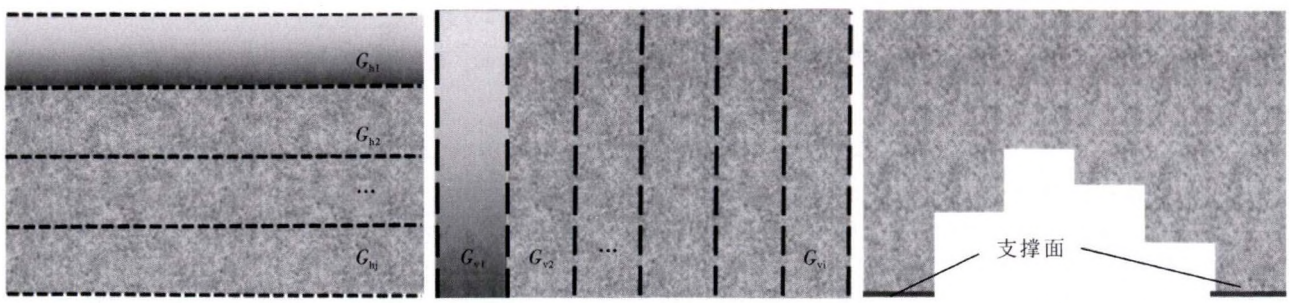
通过上述研究可知，不同树脂及硬化剂的配比对砂型 24 h 抗拉强度及透气性影响均不明显，而对砂型起模时间有较大影响。同时，对于不同尺寸的砂型结构，为了防止出现小尺寸结构起模慢，大尺寸结构砂型梯度分层的问题，对图 4 中曲线进行多元线性回归分析[11]，以硬化剂比例和树脂比例为自变量，以起模时间为因变量，构建该结构砂型任意树脂及硬化剂匹配的临界起模时间预测模型如下式(1)：

$$z=25.643x^2+y^2+8.92xy-135.19x-32.52y+214.235 \tag{1}$$

其中，x 硬化剂比例；y 树脂比例，且 $y\neq0$；z 起模时间，min。

通过校验，该方程拟合度为 0.99。

然而实际生产中，无模挤压成形机制造的砂型形状多样，其结构的支撑状态对砂型的起模时间也有影响。有鉴于此，引入起模特征应力 σ_x 表征不同形状砂型的支撑能力，不难发现，该值与砂型临界起模时间成正比。σ_x 的计算方法如下图 7。对挤压模型按照成形挤压机触头的行和列分别进行离散（如图 7 中 a、b），离散间距为单个触头的宽度，获取每一离散块的重量，再用该重量除以相应离散的行或列的



(a)按列离散　　(b)按行离散　　(c)有效支撑面

图 7　起模特征应力 σ_x 计算示意图

Fig.7　Schematic diagram of calculation of stress σ_x on stripping?time

有效支撑面积(如图 7 中 c 所示),并将得到的所有应力与整个砂型支撑面的平均应力对比,选取其中最大应力将其视为该结构砂型的起模特征应力,如下式(2)。

$$\sigma_x=\mathrm{Max}\left(\frac{G_{v1}}{A_{v1}},\frac{G_{v2}}{A_{v2}},\cdots,\frac{G_{vi}}{A_{vi}},\frac{G_{h1}}{A_{h1}},\frac{G_{h2}}{A_{h2}},\cdots,\frac{G_{hj}}{A_{hj}},\frac{G_{总}}{A_{总}}\right) \tag{2}$$

其中,G_{h1}、…、G_{hj}、G_{v1}、…、G_{vi} 分别为整行和整列的离散砂块重量;A_{h1}、…、A_{hi}、A_{v1}、…、A_{vi}——分别为整行和整列的离散砂块地面的有效支撑面积;$G_{总}$ 砂块总重;$A_{总}$ 砂块总的支撑面积。

此处,假设其它结构及尺寸的临界起模时间与式(1)成线性正比关系,则可获得基于柔性挤压工艺的砂型临界起模时间计算方程式(3)。

$$z=k(25.643x^2+y^2+8.92xy-135.19x-32.52y+214.235) \tag{3}$$

其中,k 特征系数;σ_H 式(1)代表“H”形砂型的特征应力。

4 结论

(1)硬化剂对起模时间具有显著影响,随着硬化剂含量的增加,起模时间减小且变化趋势为非线性,而对 24 h 抗拉强度及透气性无影响。随着树脂含量的增加, 起模时间逐渐减少,24 h 抗拉强度增加,透气性降低。

(2)建立了以硬化剂比例和树脂比例为自变量的不同砂型起模时间预测模型。

参考文献:

[1] 单忠德. 复杂铸件无模复合成形制造技术与装备研究[C]// 中国机械工程学会,2017 中国铸造活动周论文集. 中国机械工程学会, 铸造行业生产力促进中心: 中国机械工程学会铸造分会, 2017.

[2] Yoon H S, Kim E S, Kim M S, et al. Towards greener machine tools-a review on energy saving strategies and technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 48: 870-891.

[3] A Josan, C Pinca Bretotean, S Raiu. Critical analysis of the influence of the possibilities of establishing the moulding technology on obtaining the castings[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 294(1).

[4] 刘丽敏,单忠德,兰盾,等. 基于无模铸造精密成形技术的型砂切削性能研究[J]. 铸造,2016,65(12):1167-1171.

[5] 刘丽敏,单忠德,兰盾,等. 基于无模铸造精密成形技术砂型坎合组装方式研究[J]. 铸造技术,2017,38(2):354-359.

[6] Nouira I, Ffein Y, Hadj-alouane A B. Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness-dependent demand [J]. International Journal of Production Economics. 2014, 150: 188-198.

[7] 侯明鹏, 丁宾. 砂型数字化加工能耗影响因素分析及节能控制技术研究[J]. 机电产品开发与创新, 2019, 32(6):66-67, 103.

[8] 谢大进,余欢,徐志锋,等. 数控铣削工艺参数对覆膜砂砂型表面品质的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(6):1228-1232.

[9] 刘大海,白慧光,邓小范. 工艺参数对 7075 铝合金变截面板时效成形回弹的影响[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(6) : 55-61.

[10] 刘丽敏,单忠德,杨颜绮,等. 优质高效砂型 / 芯复合成形工艺研究[J]. 铸造技术, 2019, 40(12) : 1281-1285.

[11] 申国哲,葛永鹏,刘立忠,等. 基于数值模拟和回归正交设计的 AA5754 铝合金温成形回弹特性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版),2017,48(10): 2590-2596.

2021 年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志, 月刊,1979 年创刊, 中国铸造协会会刊, 被 20 余家数据库收录。中国标准刊号: ISSN1000-8365/CN61-1134/TG,国内外公开发行,国内邮发代号:52-64,国外发行号:M855。

报道范围:报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究,并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目:试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象:国内外铸造企业,科研院所,高等学校,铸造原辅材料厂商,设备、仪器厂商,铸件采购商等。

广告范围:刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格:请从当地邮局订阅,也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年 12 期,每期定价 25 元,平寄全年 300 元(含邮费),挂号全年 336 元,快递全年 420 元。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

邮购地址:陕西省西安市碑林区友谊西路 127 号西北工业大学凝固楼 301 室

联系人:李巧凤 029-83222071 **电话/传真:**13991824906 **网址:**www.zhuzaojishu.net **E-mail:**zzjs@263.net.cn

银行汇款:户 名:陕西铸造技术杂志社有限责任公司
账 号:3700 0235 0920 0091 309
开户行:中国工商银行西安市互助路支行