● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.001

数字化柔性挤压成形工艺对砂型性能影响规律的研究

郭莉军,单忠德,刘丽敏
(机械科学研究总院 先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100044)

摘　要:为了使数字化柔性挤压砂型具有优良的砂型性能,研究了砂型数字化柔性挤压成形工艺对砂型性能的影响规律。结果显示:树脂含量较低时,砂型抗拉强度随着挤压压强的增大而增大;当树脂含量大于 2.4% 时,砂型抗拉强度随着挤压压强的增大而减小。随着树脂含量的增大,砂型的抗拉强度升高。在树脂含量相同条件下,砂型透气性随着挤压压强的升高而降低;在挤压压强相同的情况下,砂型透气性随着树脂含量的升高而降低。在树脂含量一定的前提下,挤压压强小于 0.15 MPa 时,砂型紧实度随着挤压压强的增大而增大;当挤压压强大于 0.15 MPa 时,挤压压强对砂型紧实度的影响较小。

关键词:无模铸造精密成形技术;数字化柔性挤压;砂型造型;抗拉强度

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)02-0097-04

Effect of Digital Flexible Extrusion Process on the Properties of Sand Mold

GUO Lijun, SHAN Zhongde, LIU Limin
(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to make the digital flexible extrusion sand mold have excellent sand mold properties, the influence of the digital flexible extrusion technology on the sand mold properties was studied. The results show that the tensile strength of sand mold increases with the increase of extrusion pressure when the resin content is low. When the resin content is greater than 2.4%, the tensile strength of sand mold decreases with the increase of extrusion pressure. With the increase of content, the tensile strength of sand mold increases. Under the same condition of resin content, sand permeability decreases with the increase of extrusion pressure. Under the premise of certain resin content, when the extrusion pressure is less than 0.15 MPa, the compactness of the sand mold increases with the increase of the extrusion pressure. When the extrusion pressure is greater than 0.15 MPa, the impact of the extrusion pressure on the compactness of the sand mold is less.

Key words: precision forming technology of pattern-less casting; digital flexible extrusion; sand molding; tensile strength

基于去除加工原理的砂型无模铸造精密成型技术[1,2]是一种直接铸型快速、绿色制造方法,通过现代数控加工技术和传统铸造技术之间的融合,快速制造出所需砂型,实现了铸件生产的数字化、精密化、柔性化、自动化、绿色化[3-5]。

数字化柔性挤压成形技术,可实现砂型近净成形的快速铸造。将无模铸造精密技术与砂型数字化柔性挤压成形有机结合,可以加快铸型制造速度、减小砂型切削量、缩短产品试制时间、减小原材料消耗及环境污染。另外,采用数字化柔性挤压成形技术能够对砂型的性能进行调节。本文开展了砂型数字化柔性挤压成形工艺对砂型性能影响规律的研究。

1　实验方法

试验所用型砂原材料规格如表 1 所示。

采用 SHY 叶片式树脂砂混砂机进行混砂。图 1 所示为机械科学研究总院开发的 DCMFP1500 砂型数字化柔性挤压成形设备,图 2 所示为该设备的柔性挤压阵列单元,共包含 900 个挤压头,单个挤压头的上表面尺寸为 50 mm×50 mm,使用该设备可以实现最大尺寸为 1500 mm×1500 mm×300 mm 砂型的

收稿日期:2019-11-29
基金项目:国家杰出青年科学基金(51525503);机械科学研究总院技术发展基金(311908Q)
作者简介:郭莉军(1981-),山西朔州人,博士,工程师.研究方向:无模快速铸造复合成形工艺.
电话:18810297389,E-mail:someboy1981@163.com
通讯作者:单忠德(1970-),山东高密人,博士生导师,研究员,中国工程院院士.研究方向:数字化绿色制造工艺及智能装备.E-mail:shanzd@cam.com.cn

表1 试验材料规格
Tab.1 Test material specifications

序号	名称	型号	规格
1	型砂	承德围场型砂	70-140 目
2	树脂	圣泉碱性酚醛树脂	JF-103A
3	固化剂	圣泉碱性酚醛树脂固化剂	HQG20

图 1 数字化柔性挤压成形设备
Fig.1 Digital flexible extrusion forming equipment

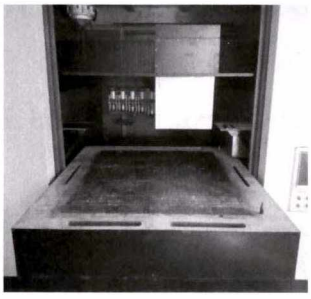


图 2 柔性挤压阵列单元
Fig.2 Flexible extrusion array

数字化柔性挤压近净成形。

砂型数字化柔性挤压成形技术是由设计人员通过 CAD 三维软件设计出砂型 CAD 三维模型，在 CAD 三维环境中基于砂型柔性近净成形优化算法优化出近净成形砂型 CAD 三维模型，并直接驱动砂型柔性挤压成形工作平台上的柔性挤压阵列单元进行形状逼近；砂型柔性挤压阵列单元形成柔性挤压模具填装近净成形砂型型腔，经填砂、挤压、固化等工序实现砂型的近净成形。图 3 为柔性挤压原理示意图。数字化柔性挤压砂型的强度受到砂型材料、挤压压力、砂型树脂含量等的影响。

利用 CAMTC-SMM1500S 型号砂型数字化无模铸造精密成形机，将不同挤压压强条件下所制备的砂型沿高度方向切削加工出砂型抗拉强度测试用的标准“8”字型试样，如图 4 所示。将所得的标准“8”字型进行装夹，并通过 SQS-Ⅱ智能型砂强度机进行抗拉强度的测试。

本文还开展了挤压压强对砂型透气性的影响规律研究，在保压时间 30 min 条件下，通过试验研究了挤压压强对不同树酯含量砂型透气性的影响。利用 CAMTC-SMM1500S 型号砂型数字化无模铸造精密成形机，从砂型分别切削透气性试样 3 个，直径为 ϕ50 mm，高度 50 mm，通过 ZTY 智能透气性测定仪检测试样的透气性。

实验制备砂型的配方为：型砂、碱性酚醛树脂和固化剂质量比分别为 1 000:10:2.5、1 000:15:3.75、1 000:20:5、1 000:25:6.125 和 1 000:30:7.5。通过试验研究了砂箱内的预固化阶段施加的挤压压强变化（0、0.15、0.30、0.45 和 0.60 MPa）对砂型试样抗拉强度、透气性、紧实度的影响。保压时间 30 min。

2 实验结果分析

2.1 柔性挤压压强对砂型抗拉强度的影响

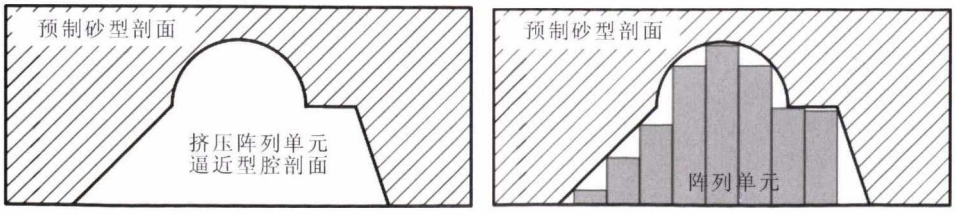
在不同树脂含量条件下，挤压压强对砂型抗拉强度的试验结果如表 2 所示。

表 2 挤压压强对砂型抗拉强度的影响
Tab.2 Effect of extrusion pressure on tensile strength of sand mold

树酯含量	不同挤压压强下砂型的抗拉强度 /MPa				
w(%)	0	0.15	0.30	0.45	0.60
1.6	1.680 7	2.021 8	2.016 6	2.034 5	2.096 5
2.0	2.065 3	2.261 8	2.364 2	2.377 1	2.418 4
2.4	1.986 7	2.267 3	2.123 3	2.010 9	2.081 4
2.8	2.860 7	2.556 7	2.612 7	2.364 1	2.508 6
3.2	3.289 3	3.019 6	2.983 1	3.108 9	3.084 7

根据表 2 的数据绘制不同树脂含量在不同挤压压力下的砂型抗拉强度关系，如图 5 所示。

当树脂含量在 1.6%~2.4%内时，砂型试样的抗拉强度伴随着挤压压强的增大而增大。随着挤压强度的增加，型砂之间的空隙被不断压缩，砂粒之间的粘结桥数量增加，因此砂型的抗拉强度也随之增大。当挤压压强大于 0.1 MPa 时，型砂的孔隙几乎被压



(a)复杂曲面结构砂型型腔剖面　(b)阵列单元形状逼近

图 3 柔性挤压原理图
Fig.3 Schematic diagram of flexible extrusion

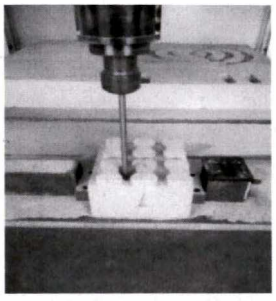


图 4 砂型试样切削加工
Fig.4 Sand sample cutting

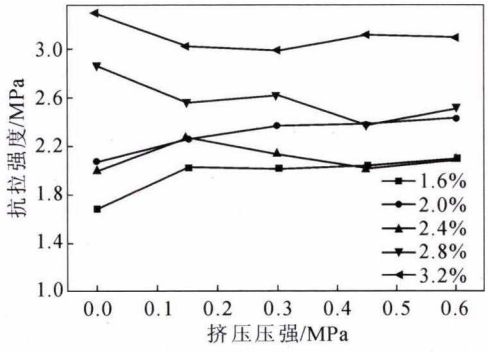


图 5 挤压压强对砂型抗拉强度影响规律曲线
Fig.5 The effect of extrusion strength on the tensile strength of sand mold

缩到最小，所以砂型形成的粘结桥数量和砂型强度也达到了最高值，此时砂型抗拉强度随挤压压强的增大趋势变缓，并最终趋于稳定。

当树脂含量大于 2.4% 时，砂型试样的抗拉强度伴随着挤压压强的增大而减小。砂型在加压固化阶段中，砂型会有一定的回弹膨胀[7]。这种膨胀抵消了一部分挤压压力的作用，回弹作用减小了砂型粘结桥的接触面积，树脂的粘结作用减小，所以砂型抗拉强度降低。当挤压压力一定时，随树脂含量的增加，砂型的抗拉强度升高。

砂型强度会直接影响铸件的质量和打箱时铸型的溃散性。若终砂型强度太低，则铸件易发生胀箱或其他铸造缺陷；若砂型强度过高，又会使落砂比较困难。因此，砂型的强度一般要大于 1.20 MPa、小于 2 MPa，砂型强度各个企业有自己的具体强度标准[8]。当树脂含量在 1.6%~2.0%、挤压压强小于 0.15 MPa 时，砂型即能满足抗拉强度的使用性能。

2.2 挤压压强对砂型透气性的影响

透气性是树脂砂性能的重要指标之一。在浇注过程中，树脂砂型会产生大量气体。若树脂砂型透气性低，排气能力差，则容易发生呛火，或形成气孔、浇不足等缺陷。树脂砂型透气性过高，又可能造成铸件表面粗糙和发生粘砂缺陷。因此，深入了解树脂砂透气性的影响因素，有效控制树脂砂透气性，对于减少铸件缺陷有重要的意义。

通过 ZTY 智能透气性测定仪检测的试样透气性结果如表 3 所示。

表3 挤压成形对透气性的影响
Tab.3 The effect of extrusion on permeability of sand mold

树脂含量	不同挤压压强下砂型的透气性				
w(%)	0 MPa	0.15 MPa	0.30 MPa	0.45 MPa	0.60 MPa
1.6	104	88	85	70	69
2.0	73	68	65	70	63
2.4	65	63	60	65	65
2.8	73	69	70	68	62
3.2	49	51	52	50	49

由表 3 可知，砂型透气性受挤压压强影响较大。在树脂含量相同的条件下，砂型透气性随着挤压压强的升高而降低；在挤压压强不变的情况下，砂型透气性随着树脂含量的升高而降低。根据表 3 绘制挤压成形对透气性的影响规律曲线图，如图 6 所示。

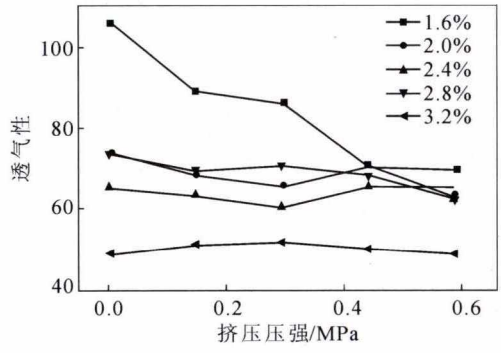


图 6 挤压成形对透气性的影响规律曲线
Fig.6 The effect of extrusion on permeability of sand mold

其中，当树脂含量在 1.6%~2.0%时，砂型透气性伴随着挤压压强的升高明显降低；当树脂含量大于 2.0% 时，型砂透气性随着挤压压强的升高变化不大。出现这种变化趋势的原因：一是伴随着挤压压强的增强，砂型内部单位体积内型砂颗粒数量增多，导致透气性降低；二是树脂含量的增加导致砂型内部砂粒间间隙的减小，导致气体流动阻力增大，砂型透气性降低。

综上，树脂含量控制在 1.6%~2.0%、挤压压强小于 0.15 MPa 时，砂型拥有合适的透气性能。

2.3 挤压压强对砂型紧实度的影响

保压时间 30 min 条件下，挤压压强对不同树酯含量砂型紧实度的影响如表 4 所示。

根据表 4 绘制不同挤压压强条件下砂型紧实度变化趋势图，如图 7 所示。可见，在树脂含量一定的条件下，砂型紧实度随着挤压压强在 0~0.15 MPa 内增大而增大，当挤压压强大于 0.15 MPa 时，砂型紧实度恒定在一定范围内，且波动幅度较小。

在挤压压强为零时，预固化型砂依靠自身重力

表4 不同挤压压强条件下砂型紧实度

Tab.4 The compactness of sand mold under different extrusion pressure

挤压强度 /MPa	不同树脂含量砂型的紧实度 /g·cm^{-3}				
	1.6%	2.0%	2.4%	2.8%	3.2%
0	1.651	1.878	1.901	1.903	1.905
0.15	1.577	1.889	1.904	1.901	1.903
0.30	1.534	1.886	1.907	1.907	1.908
0.45	1.511	1.891	1.901	1.907	1.907
0.60	1.507	1.894	1.903	1.909	1.909

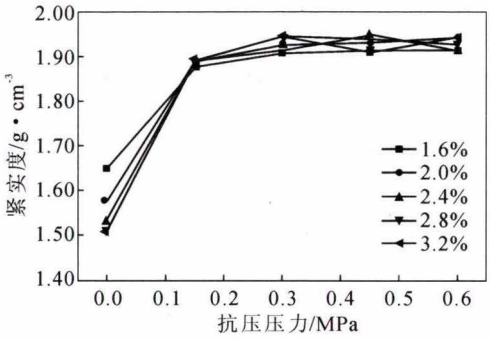


图 7 不同挤压压强条件下砂型紧实度变化趋势

Fig.7 The effect of extrusion on compatibility of sand mold

沉降紧实；当挤压压强大于 0.15 MPa 时，挤压压强对砂型紧实度的影响较小。

3 结论

(1)在数字化柔性挤压砂型时，当树脂含量较低时，挤压砂型的抗拉强度随着挤压压强的增大而增大；当树脂含量大于 2.4%时，挤压砂型的抗拉强度随着挤压压强的增大而减小。随着树脂含量的增大，挤压砂型的抗拉强度升高。

(2)在树脂含量相同的条件下，挤压砂型的透气性随着挤压压强的升高而降低；在挤压压强相同的情况下，挤压砂型的透气性随着树脂含量的升高而降低。

(3)在树脂含量一定的前提下，挤压压强在 0~0.15 MPa 内时，挤压砂型的紧实度随着挤压压强的增大而增大；当挤压压强大于 0.15 MPa 时，挤压压强对砂型紧实度的影响较小。

(4)树脂含量在 1.6%~2.0%、挤压压强小于 0.15 MPa 时，数字化柔性挤压砂型即能获得良好的砂型性能。

参考文献：

[1] 单忠德. 无模铸造[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

[2] 刘丰，单忠德，李柳，等. 大型薄壁壳体件无模铸造技术研究[J]. 铸造技术，2013，34(10)：1324-1326.

[3] Werling J M. Versatile core sand test method [J]. AFS Transactions, 2004, (108): 1-7.

[4] Dobosz S M, A Grabarczyk, K Major-Gabryś, est al. Influence of quartz sand quality on bending strength and thermal deformation of moulding sands with synthetic binders [J]. Archives of Foundry Engineering, 2015, 15(2): 9-12.

[5] Dong Xiao-li, Li Xin-ya, Shah Zhong-de. Rapid manufacturing of sand molds by direct milling [J]. Tsinghua Science & Technology, 2009(14)：212-215.

[6] W A Ayoola, S O Adeosun, O S Sanni, et al. Effect of casting mould on mechanical properties of 6063 aluminum alloy [J]. Journal of Engineering Science & Technology, 2012, 7(1): 89-96.

[7] 谢祖锡，向青春，毛萍莉. 两种高紧实度砂型回弹的检测与分析[J]. 铸造，2004, 53(9):705-708.

[8] 刘卫东，曹文. 型砂级配对树脂砂抗拉强度的影响 [J]. 铸造，2012，61(4)：422-424.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　电话/传真：029-83222071　技术咨询：13609155628