

基于浆料挤出法的铸造型壳增材制造用铝矾土浆料研究

刘洪军^{1, 2}, 王军宏¹, 苏国梁², 李亚敏¹

(1. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃兰州 730050;

2. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃兰州 730050)

摘要: 基于浆料挤出法的铸造型壳增材制造工艺关键在于陶瓷浆料的制备, 研究了以硅溶胶为粘结剂的铝矾土浆料, 分析了浆料成分对浆料性能和增材制造成形效果的影响。结果表明: 球磨时, 浆料粘度随着硅溶胶含量的提高而减小, 分散剂含量为4.1vol%时, 浆料粘度最低; 在球磨后浆料中加入增稠剂, 调控浆料屈服应力在300~400 Pa范围内, 可兼具挤出流畅性和自支持性; 采用优选的浆料成分, 经球磨和调节粘度后, 所制备的浆料挤出成形性良好, 满足型壳增材制造的要求; 层高值为挤出口直径的80%~85%、烧结温度为1 050~1 100 °C时, 增材制造试样的抗弯强度在9 MPa以上, 可获得良好的成形精度。

关键词: 增材制造; 浆料挤出; 铸造型壳; 铝矾土浆料

用增材制造方法直接制造精密铸造用陶瓷型壳, 可以减少工序、降低成本和节能环保, 具有广阔的发展前景^[1-2]。立体光固化成形法 (Stereolithography Apparatus, SLA) 以陶瓷粉末和光敏树脂的混合物为材料, 用紫外光扫描固化, 逐层成形型壳素坯, 脱脂烧结后获得铸造型壳, 可以制备型芯或者型壳型芯一体化的铸型^[3-6]。三维打印法 (Three-dimensional Printing, 3DP) 是将粘结剂在耐火材料粉床上选择性喷射, 分层粘接粉末后形成型壳, 还能够直接制备网格结构型壳^[7-12]。这两种方法具有显著的技术优势, 也取得了良好的应用效果, 但是由于都使用大量的有机粘结剂, 在型壳烧结、金属浇注及落砂清理过程存在环境污染的潜在风险, 而且增材制造设备、材料的投入较大, 运行成本较高。

陶瓷浆料挤出法是一种由熔融沉积制造法 (Fused Deposition Modeling, FDM) 和墨水直写法 (Direct Ink Writing, DIW) 发展而来的铸造型壳增材制造方法, 采用具有剪切变稀性质的耐火材料浆料, 通过非连续挤出方法将挤出丝分层堆积形成型壳。Park等^[13]用不同粒径组成的莫来石和锆英石混合粉末制备浆料, 增材制造的陶瓷型芯在40 °C下的NaOH溶液中溃散性良好; 杨铎等^[14]选择氧化铝和碳酸钙分别作为铸造型壳材料和支撑材料, 通过实验确定了两种浆料配方用于增材制造; 苏国梁^[15]提出了一种基于铝矾土浆料挤出的型壳增材制造工艺和设备, 研究了不同型壳结构对精度的影响。L Yang等^[16]开发出一种流动性和支撑性良好的淀粉基支撑浆料, 在500 °C下可完全烧蚀。陶瓷浆料挤出法制造系统简单、成本低、可采用水基浆料、制造工艺灵活, 有望成为铸造型壳直接增材制造技术的新发展方向。

实现铸造型壳的陶瓷浆料挤出法增材制造, 关键是耐火陶瓷浆料的制备, 浆料决定了挤出堆积过程和型壳质量。陶瓷浆料挤出的相关研究表明, 浆料性能可以通过固相含量和分散剂等浆料成分进行调控^[17-21]。因此, 本文针对铸造型壳的陶瓷浆料挤出法增材制造工艺, 采用与常规熔模铸造的型壳材料体系相似的浆料体系, 研究以硅溶胶为粘结剂的铝矾土浆料, 分析浆料成分对浆料性能和挤出成形效果的影响, 以优化浆料配方, 并对其增材制造效果进行评价, 提供适于铸造型壳增材制造

作者简介:

刘洪军(1974-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为增材制造技术和先进材料制备技术。E-mail: hongjun_liu@hotmail.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

08-1005-07

基金项目:

甘肃省重点研发计划(18YF1GA064)。

收稿日期:

2021-12-24 收到初稿,

2022-02-03 收到修订稿。

的铝矾土浆料。

1 试验材料和方法

1.1 铝矾土浆料

按照表1所示的配方准备原材料，其中铝矾土中 Al_2O_3 含量 $\geq 86\%$ ，粒度 $D_{50}=21.706\ \mu\text{m}$ 。将硅溶胶、分散剂（聚羧酸盐）、丙三醇和聚乙二醇一起磁力搅拌10 min，然后在混合液中加入铝矾土粉末，球磨30 min。球磨后的浆料在挤出前，用增稠剂（ASE-60）提高粘度，使之成为适于挤出的铝矾土浆料。

表1 铝矾土浆料中各组分的含量
Table 1 Composition of the bauxite slurry
体积分数/%

铝矾土	硅溶胶	分散剂	丙三醇	聚乙二醇
35~45	47~57	3.5~4.5	1.45	1.45

1.2 浆料挤出增材制造工艺

用自主开发的实验装置对铝矾土浆料的挤出成形性和型壳的增材制造效果进行测试，实验装置原理示意图见图1。型壳的增材制造工艺过程为：设计CAD模型，输出为STL文件，由分层软件按设定的参数进行切片，生成每层的挤出头运动轨迹数据；将浆料装入料筒中，驱动挤出活塞以设定的速度将浆料从挤出头挤出；挤出头按照轨迹运动，挤出丝分层沉积，在工作台上层层堆积得到型壳素坯；真空冷冻干燥20~30 h除去型壳素坯中大部分水分；最后用箱式电炉高温烧结获得型壳。

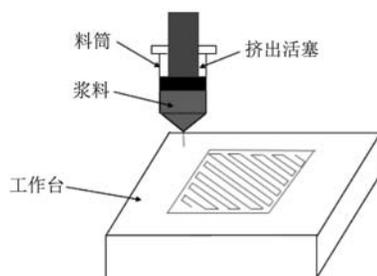


图1 增材制造实验装置原理示意图

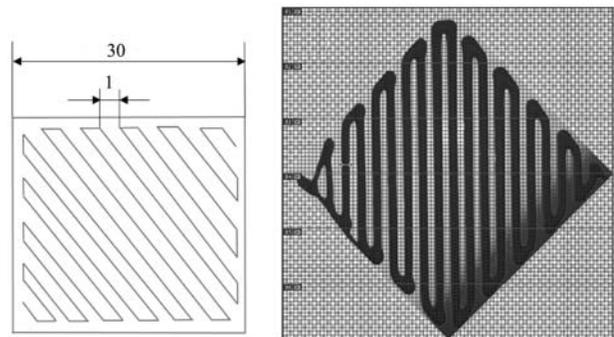
Fig. 1 Schematic diagram of experimental device of the additive manufacturing

1.3 浆料性能测试方法

用NDJ-8S型旋转粘度计测量浆料的粘度。

用图1所示的增材制造实验装置测试浆料的挤出成形性。测试方法为：按照图2a所示的轨迹图案进行铝矾土浆料的单层挤出沉积，挤出口直径、分层高度和挤出头运动速度分别设置为0.86 mm、0.7 mm和10 mm/s；将挤出沉积的样件照片导入Photoshop，用标尺工具将

图片像素信息转换成尺寸信息，在图2b所示的五条等分线上共测量30组挤出丝宽度数据；进行数据处理，通过挤出丝的宽度表征挤出成形的准确性和均匀性。



(a) 轨迹图案

(b) 挤出图案数据处理示例

图2 浆料挤出成形性测试图案

Fig. 2 Test patterns for the extrusion formability of the slurry

1.4 浆料的增材制造评价方法

采用试验优选的铝矾土浆料，设置层高值为挤出口直径的70%~90%，按设计的增材制造工艺制备30 mm × 10 mm × 10 mm的试样，在900~1 100 °C下烧结。用Photoshop标尺工具按图3的方法测量素坯试样和烧结试样的尺寸（测量尺寸低于设计尺寸时，偏差值为负，取10个点的平均值）；采用WDW-100D型电子万能材料试验机测量烧结试样的抗弯强度。尺寸精度和抗弯强度数据取三个试样的平均值，来评价浆料的增材制造效果。

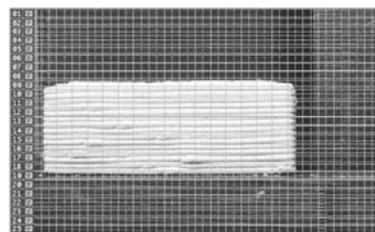


图3 增材制造试样的尺寸测量方法

Fig. 3 Dimensional measurement method of the sample by the additive manufacturing

2 试验结果和讨论

2.1 浆料成分对粘度的影响

(1) 硅溶胶含量。浆料制备过程中，硅溶胶的主要作用是铝矾土粉料的分散介质。硅溶胶含量过高，浆料粘度低，不能形成具有自支持性能的可挤出浆料；硅溶胶含量过低，铝矾土颗粒难以良好分散，浆料粘度高，流动性差，挤出困难。图4为硅溶胶含量与球磨后铝矾土浆料粘度的关系，其中分散剂含量为4.1vol%。可见，球磨30 min后，浆料粘度随着硅溶胶含量的增加而迅速减小，硅溶胶含量由48vol%增加到

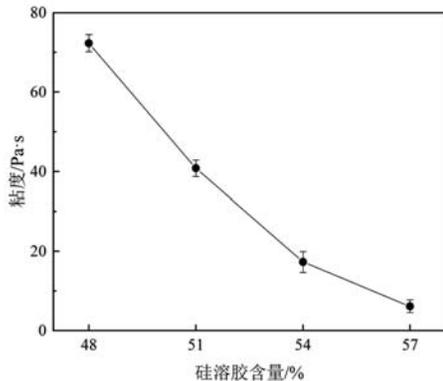


图4 硅溶胶含量和球磨后浆料粘度的关系

Fig. 4 Relationship between silica sol content and viscosity of the slurry after ball milling

57vol%，浆料粘度降低了91.7%。这是因为随着硅溶胶含量的增加，铝矾土颗粒之间的间距增大，范德华力减弱，水化颗粒和相邻颗粒的吸引和碰撞机会变少，流动自由度更高，浆料粘度降低。

(2) 分散剂含量。分散剂聚羧酸盐可以使硅溶胶有效润湿铝矾土颗粒，在颗粒表面形成一个膜层，当颗粒相互靠近时，膜层的空间位阻阻止了颗粒的团聚、絮结和沉降，从而使铝矾土颗粒均匀分散于硅溶胶中，形成稳定的悬浮体。图5是分散剂含量与球磨后铝矾土浆料粘度的关系，其中铝矾土含量为42vol%。可见，球磨30 min后，浆料粘度随着分散剂含量的增加呈现先减小后增大的趋势，分散剂含量为4.1vol%时，浆料粘度最低，为11.4 Pa·s。分散剂含量从4.1vol%降低到3.8vol%，浆料粘度提高了6.4倍。这是由于分散剂不足时，铝矾土颗粒表面不能形成完全的膜层，颗粒在硅溶胶中运动的阻力较大，浆料粘度较高。分散剂含量从4.1vol%提高到4.4vol%和4.7vol%时，浆料粘度分别提高了3.7倍和8.6倍。这是由于分散剂含量过高时，浆料中聚羧酸盐溶解形成的多余大分子链相互缠绕，增强了颗粒间的联结，分散稳定性降低，从而增加了浆料粘度。

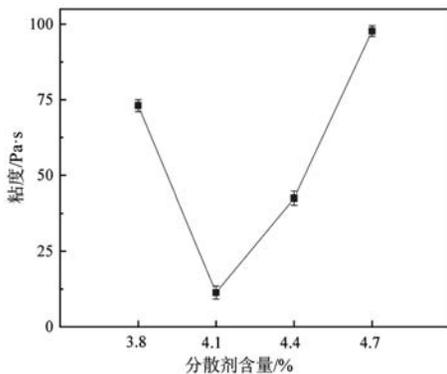


图5 分散剂含量和球磨后浆料粘度的关系

Fig. 5 Relationship between dispersant content and viscosity of the slurry after ball milling

(3) 增稠剂加入量。为了使球磨过程中铝矾土粉末能在硅溶胶中均匀混合和良好分散，需要保持较低的粘度。但是，球磨后浆料不能直接用于挤出成形，需要在挤出前加入增稠剂，以增加浆料粘度，使之变成具有自支持性的类膏体状。根据实际挤出测试：粘度低于100 Pa·s，浆料流动变形明显，不能堆积成形；粘度高于200 Pa·s，浆料挤出困难，容易发生挤出间断和液相迁移现象，甚至不易挤出；粘度在100~200 Pa·s之间的浆料较适于挤出增材制造。从图4和图5的结果看，球磨后浆料均低于100 Pa·s，因此需要通过增稠剂使之提高到100 Pa·s以上。采用ASE-60作为增稠剂，加入球磨后的浆料（分散剂含量为4.1vol%）中并迅速搅拌，浆料粘度的变化见图6。可见，随增稠剂加入量的提高，不同硅溶胶含量的浆料粘度均增加。当硅溶胶含量为51vol%时，加入0.08vol%、0.15vol%、0.21vol%和0.26vol%增稠剂后，浆料粘度分别增加了35 Pa·s、83 Pa·s、140 Pa·s和185 Pa·s。硅溶胶含量不同，增稠剂的增稠效果也不同，固相含量高时，增稠剂的作用更明显。当硅溶胶含量为48vol%、51vol%、54vol%和57vol%时，同样加入0.15%增稠剂，浆料粘度分别增加了111 Pa·s、83 Pa·s、55 Pa·s和30 Pa·s。增稠剂增加浆料粘度的原因在于其可以削弱浆料中铝矾土颗粒表面膜层的空间位阻，强化大分子链的相互联结，促使颗粒间形成较强的相互作用力，增加颗粒运动的阻力，使得粘度增加。

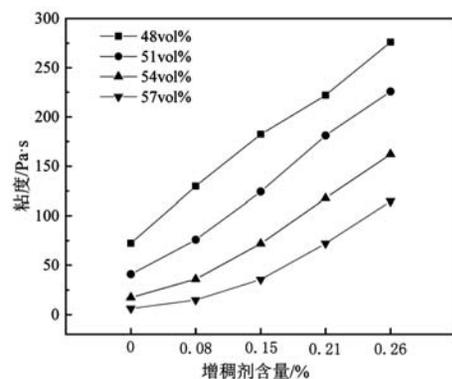


图6 增稠剂加入量与浆料粘度的关系

Fig. 6 Relationship between thickener addition and slurry viscosity

2.2 浆料成分对挤出成形性的影响

由于挤出增材制造的挤出口直径大于层高，意味着挤出丝会受压并向两侧流动，导致其宽度一般大于挤出口直径。不同成分的浆料流动性不同，挤出顺畅程度不同，挤出丝的宽度及其均匀性也不一致。

(1) 硅溶胶含量。制备不同硅溶胶含量的浆料，加入0.21vol%增稠剂并搅拌均匀，挤出成形图2a所示

图案,结果见图7。采用硅溶胶含量在48vol%~54vol%的浆料时,挤出丝较平直规则,表明浆料的自支持性较好,可以用于挤出成形。但当浆料中硅溶胶含量为57vol%时,挤出丝形状不规则,有的地方甚至产生粘连,表明粘度过低,导致浆料离开挤出口后继续发生流动变形,不能用于挤出成形。

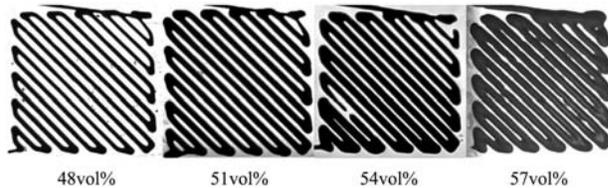


图7 不同硅溶胶含量浆料的挤出成形图案

Fig. 7 Extrusion patterns prepared by the slurries with different silica sol contents

对图7的挤出成形图案进行数据分析,结果见图8。可见,挤出丝宽度随着浆料中硅溶胶含量的增加而增大。挤出丝宽度最大的是硅溶胶含量为57%的浆料,平均宽度为1.36 mm,是挤出口直径的1.6倍。挤出丝宽度最小的是硅溶胶含量为48%的浆料,平均宽度为0.85 mm,接近挤出口直径。图8的误差线显示了挤出丝的均匀性,可以看出,硅溶胶含量为48vol%和57vol%浆料的挤出丝很不均匀,宽度波动较大,最均匀的挤出丝是采用硅溶胶含量为51vol%的浆料成形的图案,挤出丝宽度的波动范围仅有0.04 mm。

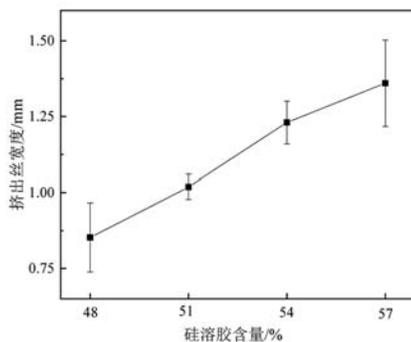


图8 浆料中硅溶胶含量和挤出丝宽度的关系

Fig. 8 Relationship between silica sol content in the slurry and width of the extrusion filaments

浆料具有剪切变稀特性,屈服应力越高的浆料在挤出后更容易保持其形状^[22],其自支持性更好,同时挤出也更困难。浆料的屈服应力可以通过粘度曲线-转速曲线拟合求得,拟合公式见式1。

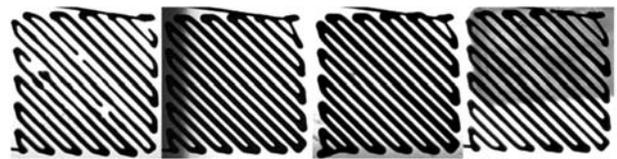
$$\eta = \frac{\tau_0}{\gamma} + K \cdot \gamma^{n-1} \quad (1)$$

式中: η 为浆料粘度, Pa·s; τ_0 为屈服应力, Pa; γ 为剪切速率, s^{-1} ; K 为粘度系数; n 为剪切变稀指数。

上述四种浆料的屈服应力经拟合计算分别为635 Pa、387 Pa、245 Pa和71 Pa。硅溶胶含量为48vol%的浆料,

屈服应力最大,挤出丝宽度最小,接近挤出口直径,挤出丝不均匀,个别挤出过程中出现断丝现象。硅溶胶含量为57vol%的浆料,屈服应力最小,自支持能力很弱,在重力作用下发生变形,挤出丝在基板上呈流动铺展状态,挤出丝最宽,也不均匀。硅溶胶含量为51vol%和54vol%的两种浆料,屈服应力和粘度适中,挤出丝较平直均匀,其中硅溶胶含量为51vol%的浆料兼具挤出顺畅和自支持性,挤出丝宽度为1.02 mm,挤出丝较均匀,浆料的挤出效果最佳。

(2)分散剂含量。固定硅溶胶含量为51vol%,制备不同分散剂含量的浆料,加入0.21vol%的增稠剂,挤出成形图案见图9。浆料中分散剂含量为3.8 vol%时,图案中出现很多断丝位置,不能用于挤出成形;浆料中分散剂含量为4.1vol%和4.4vol%时,图案较完整,挤出丝连续且宽度均匀,可以进行挤出成形;而当分散剂含量为4.7 vol%时,挤出丝粗细不均,用于挤出成形会对增材制造壳质量造成不利影响。



(a) 3.8vol% (b) 4.1vol% (c) 4.4vol% (d) 4.7vol%

图9 不同分散剂含量浆料的挤出成形图案

Fig. 9 Extrusion patterns prepared by the slurries with different dispersant contents

对图9的图案进行数据分析,结果见图10。可见,随着浆料中分散剂含量的增加,挤出丝宽度先增加后略有减小,平均宽度在0.83 mm到1.02 mm之间。从误差线可知:浆料中分散剂含量为3.8 vol%和4.7 vol%时,偏差值分别为0.16 mm和0.09 mm,挤出丝不均匀;浆料中分散剂含量为4.1vol%和4.4vol%时,挤出丝较均匀,偏差值仅有0.02 mm和0.04 mm。

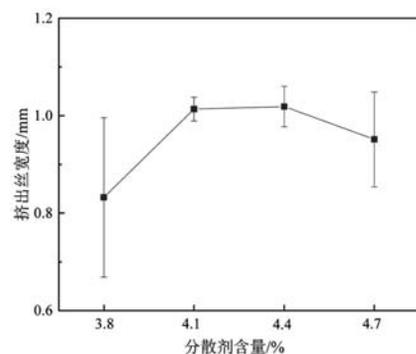


图10 浆料中分散剂与挤出丝宽度的关系

Fig. 10 Relationship between dispersant in the slurry and width of the extrusion filaments

对上述四组浆料的粘度-转速曲线进行拟合,求得屈服应力分别为456 Pa、319Pa、387 Pa和502 Pa。可见,浆料的屈服应力低于400 Pa时,浆料挤出比较顺畅,超过450 Pa时,挤出变得困难,还可能出现挤出间断。进一步对比图7的挤出成形图案,可以看出,浆料的屈服应力小于300 Pa时,挤出丝的流动铺展较大,挤出成形效果不佳。结合挤出成形效果和屈服应力数据,可知,当浆料的屈服应力在300~400 Pa范围内,可以兼具挤出流畅性和自支持性。

2.3 浆料的增材制造评价

综合以上浆料性能实验结果和分析,可以得出:随着硅溶胶含量的提高,球磨后浆料的粘度逐渐降低,挤出丝的平均宽度提高,根据粘度和屈服强度适中、挤出丝均匀顺畅的原则,选择硅溶胶含量为51vol%,分散剂含量为4.1vol%时,浆料的粘度最低,挤出丝最均匀,当减少或者增加分散剂含量,浆料粘度均提高,挤出丝变得不均匀,分散剂过低时甚至出现断丝现象,选择分散剂含量为4.1vol%;随着增稠剂加入量的增加,浆料粘度迅速提高,根据挤出时浆料粘度的适宜范围,选择增稠剂的加入量为0.21vol%。根据以上分析,优选浆料成分为:硅溶胶51vol%、铝矾土42vol%、分散剂4.1vol%、丙三醇1.45vol%、聚乙二醇1.45%。球磨后加入0.21 vol%增稠剂,得到挤出用铝矾土浆料,这时浆料的屈服应力为319 Pa,具有良好的挤出成形性。

对该浆料的增材制造效果进行了验证,用增材制造实验装置制备了壁厚为3 mm、外边长为20 mm的方框壳状样件,该样件的堆叠层数是8层,高度约为6 mm,在1 050 °C烧结2 h后的样件见图11。可见,挤出丝均匀平直,形状规则,分层结构清晰,无挤出中断和流动坍塌情况,表明优选的铝矾土浆料可以较好满足浆料挤出法增材制造工艺的要求。

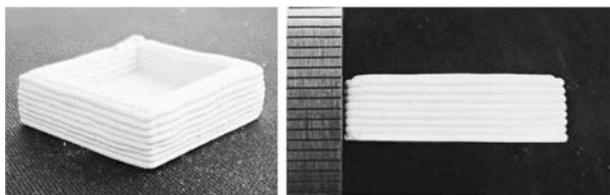


图11 以优选浆料增材制造的验证样件

Fig. 11 Validation sample prepared by the additive manufacturing process with optimized slurry

为了进一步评价这种浆料的增材制造效果,按照上述设计的工艺流程制备了增材制造试样,分析了增材制造的挤出成形层高值和烧结温度对试样抗弯强度和尺寸偏差的影响,结果见图12和图13。由于增材

制造型壳素坯的强度不高,主要是通过硅溶胶凝胶后生成的Si-O-Si的空间网络结构获得一定的湿强度,只要求承受自身重量即可,不进行夹持、合箱等承力操作,素坯经高温焙烧后才获得高强度。因此,只检测增材制造试样烧结后的抗弯强度。

层高值以挤出口直径的百分比表示,代表了挤出口与沉积平面的距离。层高值为100%时,这个距离与挤出口内径相同,挤出丝可以保持挤出时的较圆整形态,沉积时几乎不承受挤出头的压力,与下层的结合较弱。因此,为了增加层间的结合强度,层高值一般都小于100%。从图12可知,在层高值从70%到90%的范围内,增材制造试样的抗弯强度在6.38 MPa到9.37 MPa之间,抗弯强度随着层高值的减小而降低。层高值越小,挤出口距离沉积平面越近,挤出丝和下层已堆积部分受到的压力越大,同时挤出体向两侧的扩展越多,对相邻挤出丝的推挤力也更大,导致增材制造试样内部存在内应力和微观结构不均匀情况,在干燥和焙烧过程中出现微裂纹的倾向增加,从而造成抗弯强度降低。层高对增材制造试样的尺寸偏差也有明显的影响,本文的尺寸偏差指的是试样尺寸偏离试样设计尺寸的平均值。当层高值低于80%时,挤出丝呈现过挤压,侧向扩展过大,素坯的尺寸偏差大于1 mm,烧结收缩后尺寸偏差仍在0.45 mm以上。当层高值为80%和85%时,挤出丝均匀平直,层内和层间挤出丝之间结合良好,素坯的尺寸偏差分别为0.08 mm和-0.09 mm,烧结后在-0.57 mm和-0.71 mm。当层高值为90%时,挤出头到沉积平面的距离较大,结合强度较弱,有时出现挤出丝被拖动的情况,影响素坯成形精度,尺寸偏差为-0.21 mm,烧结后达-1.16 mm。因此采用优选浆料增材制造成型壳时,可设置层高值为挤出口直径的80%~85%,抗弯强度在9 MPa左右,素坯的成形精度良好,烧结后型壳的收缩不大。

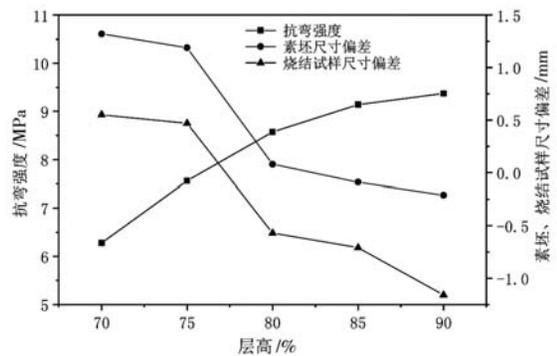


图12 层高对增材制造试样抗弯强度和尺寸偏差的影响

Fig. 12 Influence of layer height on bending strength and dimensional deviation of the additive manufacturing samples

增材制造型壳强度的建立主要是高温时铝矾土颗粒在硅基粘结剂作用下的熔接和相转变,烧结后莫来

石相增加以及硅溶胶结晶化转变, 这个过程中烧结温度很关键^[23]。从图13可知, 烧结温度在1 000 °C以下时, 试样强度不高, 在3 MPa以下。当烧结温度达到1 000 °C时, 试样强度迅速提高至7.36 MPa, 约为950 °C下烧结试样的2.6倍, 在此温度下铝矾土原料中的高岭石以及叶腊石基本都转换成了氧化铝和莫来石^[24], 建立了较高的型壳强度。烧结温度高于1 000 °C, 没有新强化相生成且硅溶胶的结晶化转变基本结束, 但由于铝矾土颗粒间熔接程度随烧结温度升高而增加, 颗粒联结更紧密, 型壳强度继续提高, 1 100 °C时达到9.53 MPa。随着烧结温度提高, 增材制造试样的尺寸收缩量增大, 900 °C时烧结的试样尺寸与设计尺寸基本一致, 1 000 °C、1 050 °C和1 100 °C时尺寸偏差分别为-0.29 mm、-0.57 mm和-0.55 mm。烧结温度提高, 铝

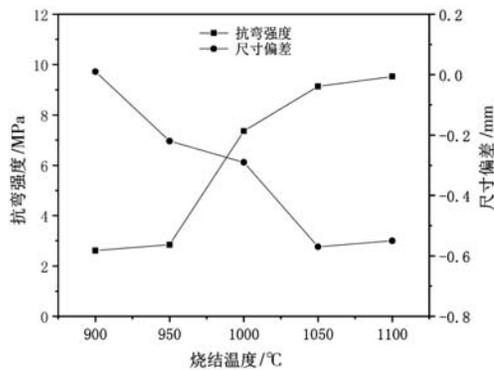


图13 烧结温度对增材制造试样抗弯强度和尺寸偏差的影响
Fig. 13 Influence of sintering temperature on bending strength and dimensional deviation of the additive manufacturing samples

矾土颗粒间的熔合桥接增强, 颗粒间孔隙体积和尺寸减少, 烧结致密程度增加, 导致试样收缩量增大。综合烧结试样的抗弯强度和尺寸偏差结果, 采用优选浆料增材制造成形型壳时, 较合适的烧结温度在1 050~1 100 °C, 抗弯强度可以达到9 MPa以上, 烧结收缩比较稳定, 在切片软件中通过尺寸补偿后, 可获得较高的型壳精度。

3 结论

(1) 浆料的粘度随着硅溶胶含量的提高而减小, 分散剂为4.1vol%时, 浆料的粘度最低, 球磨后浆料的粘度随着增稠剂加入量的提高而增加。通过浆料成分和制备工艺的匹配, 调控挤出用铝矾土浆料的屈服应力在300~400 Pa范围内, 可以兼具挤出流畅性和自支持性。

(2) 通过试验优选的浆料中, 硅溶胶含量为51vol%, 铝矾土含量为42vol%, 分散剂4.1vol%。球磨后加入0.21vol%增稠剂调节粘度, 浆料挤出成形性良好。

(3) 型壳增材制造样件表明浆料挤出成形良好、无挤出中断和流动坍塌情况; 随着层高值和烧结温度的提高, 增材制造试样的强度增加, 尺寸偏差值降低; 层高值为挤出口直径的80%~85%, 烧结温度在1 050~1 100 °C, 浆料的增材制造效果良好。增材制造实验表明, 本文开发的铝矾土浆料可以较好满足浆料挤出法增材制造工艺的要求。

参考文献:

- [1] 苏国梁, 刘洪军, 李亚敏. 精铸型壳的增材制造技术研究进展 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (1): 139-145.
- [2] TANG S Y, YANG L, FAN Z T, et al. A review of additive manufacturing technology and its application to foundry in China [J]. China Foundry, 2021, 18 (4): 249-264.
- [3] ESPOSITO C C, MONTAGNA F, GRECO A, et al. Free form fabrication of silica moulds for aluminium casting by stereolithography [J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12 (4): 184-188.
- [4] 胡可辉, 赵鹏程, 吕志刚. 光固化增材制造技术在熔模铸造中的应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 155-159.
- [5] ZHOU W Z, LI D, CHEN Z W, et al. Direct fabrication of an integral ceramic mould by stereolithography [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224 (2): 237-243.
- [6] BAE C J, HALLORAN J W. Integrally cored ceramic mold fabricated by ceramic stereolithography [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2011, 8 (6): 1255-1262.
- [7] 赵火平, 叶春生, 樊自田, 等. 粘结剂体系对微喷射粘结成形砂型精度和性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (3): 223-227.
- [8] PABLO R G, PABLO E R V, ANA I F A, et al. Feasibility of calcium sulfate moulds made by inkjet 3D printing for rapid casting of aluminium alloys [J]. Metals, 2020, 10 (6): 802.
- [9] SINGH J P, SINGH R. Investigations for statistically controlled rapid casting solution of low brass alloys using three dimensional printing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223 (9): 2125-2134.
- [10] RODRIGUEZ-GONZALEZ P, ROBLES V P E, FERNANDEZ-ABIA A I, et al. Application of vacuum techniques in shell moulds produced by additive manufacturing [J]. Metals, 2020, 10 (8): 1090.

- [11] 胡杰, 邢金龙, 韩文. 增材制造陶瓷粉末制备工艺研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (11) : 1212-1214.
- [12] SHANGGUAN H, KANG J, YI J, et al. The Design of 3D-printed lattice-reinforced thickness-varying shell molds for castings [J]. Materials, 2018, 11 (4) : 535.
- [13] PARK H Y, KIM E H, CHO G H, et al. Process development of fabricating ceramic core using 3D printing technique [J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 231: 382-387.
- [14] 杨铎. 陶瓷型壳3D打印关键技术研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [15] 苏国梁. 基于浆料挤出的铝矾土型壳增材制造工艺研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [16] YANG L, TANG S, LI G, et al. Layered extrusion forming of complex ceramic structures using starch as removable support [J]. Ceramics International, 2019, 45 (17) : 21843-21850.
- [17] LI Y Y, LI L T, LI B. Direct ink writing of 3-3 piezoelectric composite [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 620: 125-128.
- [18] FRANCHIN G, WAHL L, COLOMBO P. Direct ink writing of ceramic matrix composite structures [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100 (10) : 4397-4401.
- [19] EZRA F, ESTHER G T B, FINN G, et al. Robocasting of structural ceramic parts with hydrogel inks [J]. Journal of the European Ceramic Society, 36 (10) : 2525-2533.
- [20] 秦宝宏, 刘洪军, 郝国晖. 制备工艺因素对碳化硅水基浆料粘度的影响研究 [J]. 材料开发与应用, 2015, 30 (4) : 55-59.
- [21] 刘洪军, 李焯, 翟亚楠. 水基牙科3Y-ZrO₂浆料的制备工艺研究 [J]. 中国陶瓷, 2014, 50 (6) : 63-67.
- [22] PERROT A, RANGEARD D, PIERRE A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques [J]. Materials and Structures, 2015, 49 (4) : 1-8.
- [23] 毛健, 刘洪军, 李亚敏, 等. 烧结温度对增材制造精密铸造型壳材料性能的影响 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (7) : 607-611.
- [24] 杨中正, 杨道媛, 赵顺波, 等. 高铝矾土制备莫来石加热过程相变研究 [J]. 材料导报, 2010, 24 (S1) : 502-505.

Investigation on Bauxite Slurry for Additive Manufacturing of Casting Shell Mold Based on Slurry Extrusion Method

LIU Hong-jun^{1,2}, WANG Jun-hong¹, SU Guo-liang², LI Ya-min¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract:

The preparation of ceramic slurry is the key to the additive manufacturing process of casting shell mold based on slurry extrusion method. Bauxite slurry with silica sol as binder was investigated and the effects of slurry composition on slurry properties and extrusion process were analyzed. During ball milling, the slurry viscosity decreased with the increase of silica sol content, and the slurry viscosity was the lowest when the dispersant content was 4.1 vol%. Adding thickener into the slurry after ball milling was used to adjust the yield stress of the slurry in the range of 300-400 Pa, and the slurry had good extrusion fluency and self-supporting ability. With the optimized slurry composition, the slurry prepared by the ball milling and viscosity adjustment had good extrusion formability and met the requirements of the shell mold preparation. When the layer height was 80%-85% of the nozzle diameter and the sintering temperature was 1 050-1 100 °C, the bending strength of the additive manufacturing samples was more than 9 MPa, and a good forming accuracy was obtained.

Key words:

additive manufacturing; slurry extrusion; casting shell mold; bauxite slurry