

DOI 10.3969/j.issn.0254-0150.2011.01.023

快速砂型铸造用模具表面耐磨涂层的研究*

庞国星¹ 陈华辉²

(1. 北华航天工业学院材料工程系 河北廊坊 065000 2. 中国矿业大学(北京)材料工程系 北京 100083)

摘要: 研究适合快速砂型铸造用模具的表面涂层材料, 该涂层材料由环氧树脂 CYD-128 稀释剂 660A 和固化剂组成, 并添加一定量的微米级 Al_2O_3 颗粒。在 WTM-1E 微型磨损实验机上研究该涂层的耐磨性能, 并用扫描电镜和原子力显微镜分析磨损后的表面形貌。结果表明: 随 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 复合涂层的摩擦因数逐渐增大, 磨损率逐渐降低, 当 Al_2O_3 颗粒质量分数为 5% 时, 磨损率最低; 随 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 复合涂层的磨损机制由黏着占主导逐渐转变为犁削沟占主导; 采用该涂层材料处理后的快速砂型铸造用模具具有一定的耐磨性。

关键词: 快速砂型铸造; 模具涂层; 耐磨

中图分类号: TH 117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2011)1-088-4

Research on Surface Wear-resistant Coating for Rapid Sand Casting

Pang Guoxing¹ Chen Huahui²

(1. Department of Material Engineering North China Institute of Astronautic Engineering Langfang Hebei 065000 China
2. Department of Material Engineering China University of Mining Technology Beijing 100083 China)

Abstract Suitable surface coating material for rapid sand casting mould was studied. This coating material is composed of epoxy resin CYD-128, thinner 660A and curing agent. Small amount of Al_2O_3 particle was added. This coating wear-resistant was investigated with WTM-1E wear-resistant test machine, and the wear appearance was analyzed with SEM and AFM. Results of experiment indicate that with the increase of Al_2O_3 content, friction coefficient of the composite coating is increased, and wear rate is decreased gradually, and the composite coating with 5% Al_2O_3 has the lowest wear rate. The wear mechanism of composite coating is from the adhesive mechanism to the plough mechanism with the increase of Al_2O_3 particle. The rapid sand casting mould treated with this coating material has high wear resistant.

Keywords rapid sand casting mold coating wear-resistance

随着市场竞争的日益激烈, 产品的开发周期、生产周期、更新周期越来越短。因此, 面对一个迅速变化且无法预料的买方市场, 以往传统的大批量生产模式对市场的响应就显得越来越迟缓与被动。快速响应市场需求, 已成为制造业发展的重要方向。快速原型技术(Rapid Prototyping, RP)就是在这种背景下逐步形成并得以发展的^[1-5]。采用这种技术既可以开发功能制件或用于新产品的评价, 也可用于快速制造砂型模具等。粉末激光烧结快速成型工艺(Selective Laser Sintering, SLS)的研究与开发一直是国内外快速成型技术(RP)领域的重要研究方向之一。国内经过几十年的发展, SLS材料取得了长足的进步, 但

是目前 SLS 成型材料的后处理材料和工艺大多不太理想, 使成型件的力学性能不能满足功能性制品的要求。因此, 开发变形小、强度高、无污染、成本低的新型后处理材料与工艺以及功能性涂层的制备是非常必要的。从机械制造的整个工艺过程来看, 铸造生产一般为首道工序, 而铸造生产的首道工序是铸造模具(模型)的制造。砂型铸造用的模具对保证铸件质量、提高劳动生产率、改善劳动条件等都具有重要作用。砂型铸造用模具主要用来形成铸件的型腔, 因此必须具有足够的强度、刚度、耐磨性及与铸造技术要求相适应的表面粗糙度和尺寸精度。快速砂型铸造主要是指缩短生产周期的砂型铸造工艺, 而制模周期是制约铸造生产周期的重要因素之一。快速砂型铸造主要是指基于快速原型的制模工艺, 本研究作者采用的为经快速原型(SLS)方法制造的模型, 再经树脂灌注后可以强化其内部结构和表面性能, 该模型可以直接用砂型铸造用模具, 但应用后发现表面耐磨性较

* 基金项目: 河北省教育厅自然科学科技资助项目 (CL_2005_Z); 北华航天工业学院重点发展学科资助项目 (XK-005-Z)。

收稿日期: 2010-08-09

作者简介: 庞国星(1963-), 男, 教授, 从事耐磨材料及表面工程研究, E-mail: panglfh@163.com.

差。因此, 开发快速砂型铸造, 研究适合的快速砂型铸造模具材料及涂层是很有必要的。

1 快速原型 (SLS) 的基本工艺过程

选择性粉末激光烧结快速成型 SLS 技术是几种最成熟快速原型制造技术之一。与其他快速原型技术同样, 有选择地将可熔化黏结的粉末烧结成型并层层叠加成实体, 是一种基于离散和堆积原理的崭新制造技术。1986年, 美国学者首先提出了 SLS 的思想, 于 1992 年开发了基于 SLS 的商业成型系统 Sinterstation。国内对此进行深入研究的有华中科技大学、北京隆源公司、清华大学、中北大学等。粉末激光烧结快速成型技术一直以速度快、原型复杂系数最大、应用范围最广、运行成本最低著称, 在产品概念设计可视化、造型设计评估、装配检验、熔模铸造型芯、精密铸造、快速制模等方面得到了迅速应用。

如图 1 所示, 粉末材料选择性烧结工艺成型原理是: 计算机控制 CO₂ 激光束按截面轮廓的信息扫描工作台上的一层粉末材料, 单个的微粒便会在他们的接触点凝面成一片层实体, 然后下降活塞带动刚凝固的几何实体向下移动一层的厚度, 接着铺粉辊横跨工作面移动, 铺上新的一层粉末, 此过程反复进行直至生成三维实体; 待工作缸冷却, 取出实体, 去除包裹在原型外的多余的粉末, 再按设计要求对其表面有选择地进行密封、渗透、上漆等处理。

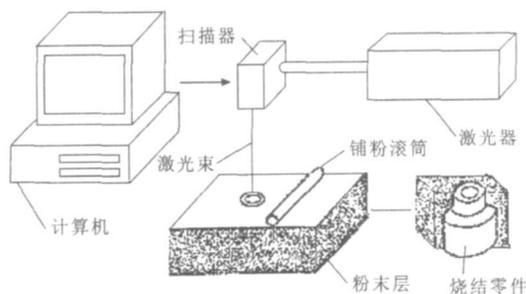


图 1 粉末材料选择性激光烧结工艺原理图

Fig 1 Principle diagram of powder SLS

选择性激光烧结工艺作为快速原型制造技术的重要分支之一, 也是目前发展最快和应用最广的技术之一。它和 SLA、LOM、FDM 构成激光快速成型技术的核心。与其他快速成型技术相比, SLS 以选材广泛、无需设计和制造复杂支撑并且可直接生产注塑模、电火花加工电极以及可快速获得金属零件等功能性零件而受到了越来越广泛的重视。

选择性激光烧结材料是最具潜力、最具活力和诱发力的领域, 国外新工艺的出现往往与新材料的应用有关。成型材料多样性是粉末激光烧结技术最显著的

特点^[2-6], 也成为快速成型技术的发展瓶颈。金属粉末成型一直是 SLS 技术发展的热点, 在推出铁合金(树脂包附着金属粉末)烧结技术后, 2003 年市场上开始出现的铁合金、铁镍合金等直接烧结金属粉末技术代表了 SLS 技术发展的最高成就。目前, 粉末激光烧结快速成型工艺还主要以塑料粉(包括聚苯乙烯(PS)、蜡粉、尼龙等为原料, 由激光辐照使之烧结。聚苯乙烯(PS)粉末受热后可熔化、黏结, 冷却后可以固化成型, 而且该材料吸湿率小, 收缩率也较小, 其成型件浸树脂后可进一步提高强度, 主要性能指标可达拉伸强度大于等于 15 MPa, 弯曲强度大于等于 33 MPa, 冲击强度大于等于 3 MPa, 可作为原型件或功能件使用。由于粉末材料已事先铺就, 光斑或熔池较小, 而且未烧结的粉末起到了支撑作用, 无需附加支撑。因此 SLS 技术制造的零件精度较高且形状较复杂。

2 后处理材料及耐磨涂层制备

选择性激光烧结快速原型件的后处理材料多选择环氧系列树脂^[7-8]。经系列试验, 选择环氧树脂 CYD-128、稀释剂 660A、固化剂(由固化剂 A 和固化剂 B 组成的混合物)的组成物作为后处理涂层材料。针对砂型铸造的模样需要原型件具备一定的耐磨性, 选取确定的后处理涂层材料 200 g, 分别加入不同质量的氧化铝(粒径 2~10 μm)颗粒, 分别取 1%、3%、5%、8%、10% 的加入量(占涂层基体的质量分数), 与树脂混合均匀后涂刷于快速成形工件的表面, 当完全渗透后, 将试件放入事先准备好的烘箱中(温度定在 40℃), 固化 4~5 h 得到原型件的耐磨涂层。磨损试样尺寸: 12 mm × 10 mm × 10 mm, 试样表面用 800# 水砂纸打磨, 对偶件为淬火低温回火态的轴承钢 GCr15 钢球, 硬度为 HRC6Q。磨损试验在 WTM-1E 微型磨损实验机上进行, 对 GCr15 淬火钢球施加一定压力并使其在试件表面按圆周形轨迹滚动, 每个试样的磨损试验时间为 30 min。试验前试样和对偶件钢球表面均用丙酮擦拭干净, 磨损量由 FA2004 数字电子天平测量。磨损试验的数据均为 3 次重复试验数据的平均值。试样硬度由表面洛氏硬度计(HR15Y)测量(实验力为 147 N, 钢球直径为 12.7 mm)。试样的磨损表面经喷金后用日立 S-3400N 扫描电镜进行观察分析, 磨损三维形貌由 CSEM 5500 型原子力显微镜(广州本原纳米仪器有限公司)观察。

3 试验结果分析与讨论

3.1 摩擦学行为分析

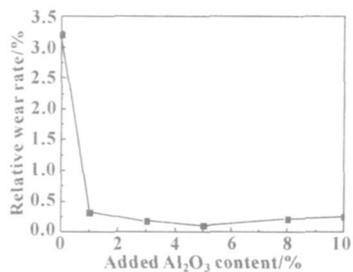
磨损试验的结果见表 1 和图 2。可以看出, 随 Al₂O₃ 颗粒含量的增加, 复合涂层的摩擦因数逐渐增

大, 磨损率逐渐降低, 当 Al_2O_3 颗粒质量分数为 5% 时, 磨损率最低。

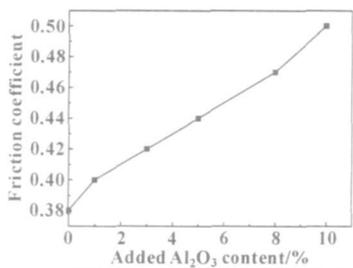
合涂层阻碍磨料运动的能力增强, 磨料对涂层表面的犁削作用行程缩短, 复合涂层的耐磨性能提高。

表 1 Al_2O_3 (微米级) 加入量对涂层硬度和耐磨性的影响
Table 1 The effect on coating hardness and wear-resistant by the added amount of Al_2O_3 particles (in μm grade)

Al_2O_3 (微米级) 质量分数 /%	硬度	磨损率 /%	摩擦因数
0	56	3.2	0.38
1	93	0.32	0.40
3	108	0.18	0.42
5	118	0.11	0.44
8	129	0.21	0.47
10	135	0.25	0.50



(a) 颗粒含量对涂层磨损率的影响



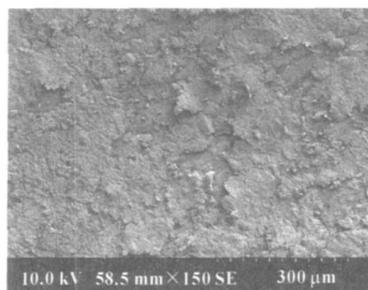
(b) 颗粒含量对涂层摩擦因数的影响

图 2 颗粒含量对试样涂层磨损率和摩擦因数的影响

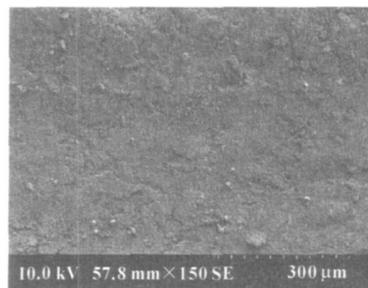
Fig 2 The effect on wear rate and friction coefficient of coating by different added particle content

3.2 磨损表面形貌观察与磨损机制分析

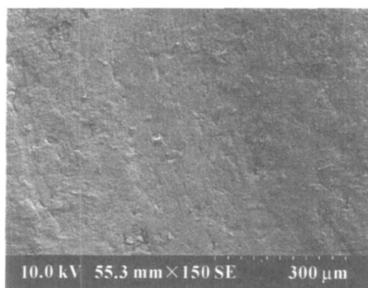
经对未添加颗粒的涂层和不同 Al_2O_3 颗粒含量的涂层的磨损形貌进行扫描电镜观察, 结果如图 3 所示。可知, 未添加颗粒的涂层的磨损表面较为平整, 存在较多的黏着痕迹和极轻微的犁沟; 随着涂层中 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 磨损表面变得越来越粗糙, 犁削沟槽密度增大, 犁沟数量增加, 深度变浅, 长度缩短, 犁削磨损逐渐占主导, 黏着痕迹逐渐减少。随 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 复合涂层的耐磨性能得到提高, 复



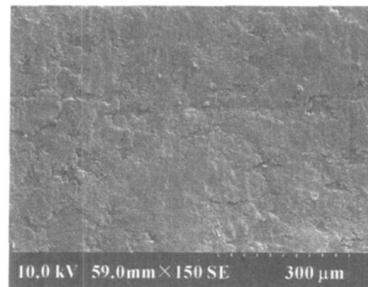
(a) Al_2O_3 颗粒加入量为 0 的涂层磨损形貌



(b) Al_2O_3 颗粒质量分数为 1% 的涂层磨损形貌



(c) Al_2O_3 颗粒质量分数为 5% 的涂层磨损形貌



(d) Al_2O_3 颗粒质量分数为 10% 的涂层磨损形貌

图 3 复合涂层的磨损表面 SEM 形貌

Fig 3 SEM images of the worn surfaces of composite coatings

但是, 随着 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 复合涂层基体对 Al_2O_3 颗粒的固定能力减弱, 使得 Al_2O_3 颗粒脱落, 而成为松散磨料的概率增大, 当 Al_2O_3 颗粒质量

分数大于 5% 后, 这种作用更加明显。随着 Al_2O_3 颗粒的加入, 复合涂层的磨损机制发生变化, 逐渐由黏着磨损向黏着与犁削磨损 (如图 (b), (c) 所示) 转变, 最终几乎全部为犁削磨损 (如图 (c), (d) 所示)。磨损机制转化的原因如下: 由于 Al_2O_3 颗粒

的加入, 强化了基体阻碍了黏着磨损的发生; 磨损过程中 Al_2O_3 颗粒的脱落、碎裂等形成磨料对复合涂层形成犁削磨损。磨损三维形貌观察 (见图 4) 也证实了上述分析。

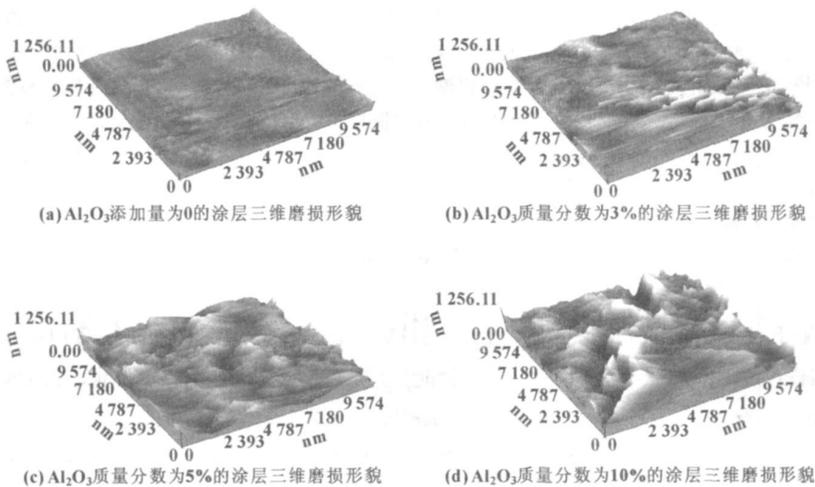


图 4 复合涂层的三维磨损形貌 (AFM)

Fig 4 3D micrographs of worn surface of composite coating

综合以上各种因素, Al_2O_3 颗粒含量的增大一方面使复合涂层的磨损机制发生转变, 降低其表面的黏着现象, 从而提高耐磨性能; 另一方面, 随颗粒含量的增加, 复合涂层对其摩擦副的磨损加剧, 反过来又造成摩擦副对复合涂层表面的磨损程度增加, 磨损过程中产生的摩擦热降低了基体的性能, 减弱了基体对颗粒的固定作用, 颗粒脱落形成松散磨料的概率增大, 松散磨料对复合涂层产生磨损。颗粒含量对复合涂层耐磨性的影响主要在于其对磨损机制的影响, 当颗粒含量较少时, Al_2O_3 颗粒对复合涂层中基体的锚钉作用不足以使磨损机制发生改变, 这时涂层以黏着磨损为主, 涂层的耐磨性较差; 随 Al_2O_3 颗粒含量的增大, Al_2O_3 颗粒对复合涂层的基体的锚钉作用增大, 使复合涂层占主导的磨损机制由黏着磨损逐渐转变为犁削磨损, 复合涂层的磨损率减小, 耐磨性增强。

3.3 模具复合涂层处理效果

对快速原型工件采用环氧树脂 CYD-128 稀释剂 660A、固化剂 (由固化剂 A 和固化剂 B 组成的混合物) 的组成物, 添加质量分数 5% 的 Al_2O_3 (粒径 2~10 μm) 颗粒作为后处理涂层材料, 制备出具有一定耐磨性的快速砂型铸造用模具, 结果如图 5 所示。

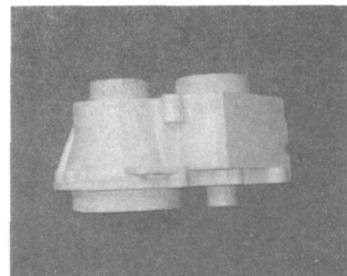


图 5 后处理涂层材料处理的砂型铸造模样

Fig 5 Sand mold pattern after treated by post treatment coating material

4 结论

(1) 制备的复合涂层在干摩擦条件下, 随 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 磨损率逐渐降低, 当颗粒质量分数为 5% 时, 磨损率最低, 随 Al_2O_3 颗粒含量的继续增加, 涂层的磨损率略有增大; 随 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 复合涂层的摩擦因数逐渐增大, 而且摩擦因数的增大幅度逐渐减小。

(2) 随 Al_2O_3 颗粒含量的增加, 复合涂层的磨损机制由黏着占主导逐渐转变为犁削沟占主导。

参考文献

【1】庞国星, 陈华辉, 快速砂型铸造用模具材 (下转第 94 页)

试验结果表明: 内燃机油高温清净性能与其基础油质量、加入添加剂的量和加入添加剂之间的配伍性有着密切的关系。以 PAO4 与 YUBASE6 作基础油的 0W/30 润滑油的高温清净性能明显优于其他润滑油; 随发动机润滑油黏度的增加, 其蒸发损失度逐渐减小; 多级油高温高剪切黏度与其运动黏度有一定的对应性。0W/30 润滑油的高温高剪切黏度明低于其他润滑油。

2.4 黏度等级对润滑性能的影响

采用 GB/T 3142-82 “四球法” 评定润滑油的润滑性能, 考察指标有最大无卡咬负荷 p_B 值、烧结负荷 p_D 值、摩擦因数和磨斑直径, 结果见表 4。

表 4 润滑油润滑性能试验结果

Table 4 Test results of lubricating oils lubricating properties

试验样本	15W/40	10W/30	5W/30	0W/30
p_B / N	1 049	1 049	921	980
p_D / N	2 450	2 450	2 450	2 450
摩擦因数	0.107	0.093	0.086	0.079
长磨斑直径 /mm	0.403	0.387	0.391	0.392

试验结果表明: 四球最大无卡咬负荷 p_B 值基本随润滑油黏度等级的增大而增大; 烧结负荷 p_D 值与黏度之间未呈现直接关系; 黏度等级高, 摩擦因数增大, 磨斑直径也增大。

3 结论

内燃机油的黏度对其低温性能影响显著, 高黏度等级润滑油温度较低时黏度增加较快, 影响发动机的低温启动并加剧磨损。内燃机油的黏度对其高温性能有所影响, 较高的黏度有利于减小蒸发损失, 对高温清净性影响不大。另外, 内燃机油的黏度对润滑性能有较大影响, 较高的黏度有利于摩擦表面油膜的形

成, 改善润滑, 但由于较大内摩擦力, 会导致功耗增加。

参考文献

- 【1】T曼格, W 德雷泽尔. 润滑剂与润滑 [M]. 赵旭涛, 王建明, 译. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 【2】徐寅生. 车用发动机对润滑油的性能要求 [J]. 润滑与密封, 2002, 27(3): 85-86.
- 【3】Impact at Low Temperature of the Latest Revisions to the SAE J300 Viscosity Classification on Passenger Car Engine Oils from the Asia Pacific Region [C]. 中国润滑油国际研讨会, 2002.
- 【4】王朝忠, 张鹏辉. 汽车润滑油粘度变化对发动机的影响及预防探要 [J]. 润滑与密封, 2003, 28(3): 64-65.
Wang Chaozhong Zhang Penghui Influence and Precaution for the Variation of Vehicle Lubricating Oil Viscosity [J]. Lubrication Engineering 2003, 28(3): 64-65.
- 【5】王海林, 何效平, 朱均. 在用内燃机性能模糊综合评价 [J]. 润滑与密封, 2003, 28(2): 49-51.
Wang Hailin He Xiaoping Zhu Jun Fuzzy Mathematics Methods for Evaluating the Engine Oil Performances [J]. Lubrication Engineering 2003, 28(2): 49-51.
- 【6】叶孝强. 润滑油的抗凝措施 [J]. 润滑与密封, 1983, 8(6): 24.
- 【7】冯心凭, 贺产鸿, 周友良. 高温高速行车试验中油品运动黏度与磷谱分析相关性的研究 [J]. 润滑与密封, 2002, 27(3): 60-62.
Feng Xinping He Chanhong Zhou Youliang The Study of Correlation between Dynamic Viscosities of Oils in High Temp & High Speed Road Tests and Phosphorescence Spectrum Analysis [J]. Lubrication Engineering 2002, 27(3): 60-62.
- 【8】莫易敏, 邹岚, 赵源, 等. 基础油黏度对磨损自补偿性能影响研究 [J]. 润滑与密封, 1998, 23(1): 34-36.
Mo Yinmin, Zou Lan, Zhao Yuan, et al Effect of Base Oil Viscosity on the Characteristic of Wear Self-compensation [J]. Lubrication Engineering 1998, 23(1): 34-36.
- 【5】Chua C K, Chou S M, Wong T S. A Study of the State of the Art Rapid Prototyping Technologies [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 1988, 14(2): 121-125.
- 【6】王运赣. 快速成型技术 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999, 25-29.
- 【7】王晓洁, 张炜, 谢群炜. 热塑性树脂改性环氧基体配方研究 [J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(2): 21-23.
Wang Xiaojie Zhang Wei Xie Qunwei Research on Epoxy System Modified by Thermoplastic Resin [J]. Aerospace Materials & Technology 1999, 29(2): 21-23.
- 【8】Barehy G G, Oberck Papathanas K I, et al. liquid crystalline epoxy thermals based on dihydroxy ethylstilbene synthesis and characterization [J]. Polymer Science Part A: Polym Chem, 2006, 60: 2021-2023.

(上接第 91 页)

料的新进展 [J]. 铸造技术, 2005, 26(1): 77-78.

Pang Guoxing Chen Huahui The New Development of the Mold Material for Rapid Sand Casting [J]. Foundry Technology, 2005, 26(1): 77-78.

【2】尹希猛, 王运赣, 黄树槐. 快速成型技术: 90年代新的制造工具 [J]. 中国机械工程, 1993, 4(6): 25-27.

【3】Lanout Wood Rapid Prototyping An Introduction [M]. USA: Industrial Press Inc 1993.

【4】黄树槐, 肖跃加, 莫健华, 等. 快速成型技术的展望 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(1): 195-200.

Huang Shuhuai Xiao Yuejia Mo Jianhua et al Prospects of Rapid Prototyping Technology [J]. Chinese Mechanical Engineering 2000, 11(1): 195-200.