

# Design and Manufacture of Individualized Cranio-Maxillofacial Bone Based on the Technologies of Rapid Prototyping Preprocessing

De-min Chen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200011, China

<sup>2</sup> Shanghai BIOC Biomedical Science & Technology Company Limited, Shanghai, 201203, China

E-mail: chendemin@smmail.cn

**Abstract:** Design and manufacture process architecture of individualized cranio-maxillofacial bone plate based on rapid prototyping technology have been an ordinary method of repair for bone defect in cranio-maxillofacial surgery, plastic and reconstructive surgery, which can provide a new means to treatment skull defect, improve operation accuracy, also save time and rise beautiful outlook. This paper provides a review of rapid prototyping technologies, artificial bone materials and its potential application in cranio-maxillofacial reconstruction.

**Keywords:** rapid prototyping; individualize; cranio-maxillofacial bone; artificial bone materials

## 基于快速成型技术的个性化设计制造颅颌骨的研究进展\*

陈德敏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学医学院附属第九人民医院·上海生物材料研究测试中心, 上海, 中国, 200011

<sup>2</sup>上海倍尔康生物医学科技有限公司, 上海, 201203

E-mail: chendemin@smmail.cn

**摘要:** 基于快速成型技术的个性化颅颌骨设计和制造已成为脑外科、口腔颌面外科和整复外科等领域常用的骨缺损修复方法, 不仅可为医生的临床操作使用带来方便, 而且可大大提高临床治疗效果和修复美学效果。新技术涉及的制造工艺和修复体材料有多种, 本文对各自存在的应用特点和研究进展状况作一综合介绍。

**关键词:** 快速成型; 个性化; 颅颌骨; 人工骨材料

### 1 引言

快速成型技术 (Rapid prototyping, RP) 是 20 世纪 80 年代末期诞生的一种新技术, 其综合了计算机辅助设计 (CAD) 计算机辅助制造 (CAM) 技术、数据处理技术、数控技术、激光技术、精密机械驱动技术和材料科学等先进理念, 将任何一个三维实体都视作为多个二维平面沿某一轴向叠加而成。RP 技术已在航空航天、汽车设计、模具制造诸领域得到广泛应用。目前随着计算机三维重建技术的发展和相关处理软件的开发、完善, RP 技术在医学领域方面的应用正开始成为研究热点, 其中在脑颅骨创伤方面以及颅颌骨修复的计算机三维重建和个性化设计制造成为了现实, 为复制出与患者颅颌骨缺损部位几何形态高度吻合、具有良好骨密合性的颅颌骨定制体提供了强有力的技术保障<sup>[1, 2]</sup>。利用 RP 技术可制成与病变

部位 1:1 比例的模型, 在模型上进行模拟手术、假体设计和模拟手术安装。因此可给医生的临床操作、使用带来极大的方便。RP 技术的应用不仅可有效缩短临床手术时间, 而且可大大提高临床治疗效果和修复美学效果, 从而使患者获益<sup>[3, 4]</sup>。自 2004 年上海倍尔康生物科技有限公司在国内率先提供经计算机个性化设计的人工颅颌骨产品以来, 改变了原来国内脑外科修复颅骨缺损普遍采用统一钛金属网预制片的局面, 使计算机数字化设计个性化颅骨板的理念得到了很大的普及和提升<sup>[5, 6]</sup>。此技术的引入不仅能为复制出与患者颅骨缺损部位几何形态高度吻合、具有良好骨融合性的颅骨定制体提供了强有力的保障。另一方面也可给医生的临床操作使用带来极大的方便, 有效缩短临床手术实施过程, 同时也可以大大提高临床治疗效果和修复美学效果<sup>[7, 8]</sup>。

计算机个性化设计、定制人工颅颌骨的流程如图 1 所示。患者的螺旋 CT 数据经标准 DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 文件格式存

\*上海市科委发展基金项目资助 (0607H1294); 上海市重点学科建设项目资助 (S30206)



图1 计算机个性化设计、定制人工颅颌骨流程图

Fig1 The procedure of the digital manufacture for cranioplasty plate

盘后，采用 MIMICS、MedGraphics 等一类医用图像处理软件对 DICOM 数据自动处理，通过对骨组织区域识别、提取和三维叠加，完成颅颌骨缺损几何模型的三维重建。重建好的数据经过转换输出为快速成型机可识别的 STL 格式文件。通过对 STL 文件进行“切片”软件处理，得到有特定厚度的一系列片层信息及扫描加工路径信息格式文件，由这些信息经过程序处理依次控制快速成型机。

## 2 快速成型技术工艺

RP 技术不同于传统的制造工艺，其采用非接触加工，不需要任何刀具，生产过程数字化，产品的制造过程不受零件任何复杂程度限制，可以制造任意形状。RP 技术成为近 20 年来制造技术领域的一次重大突破，也为医学领域的应用带来了广阔的前景。目前在医学领域的应用主要在于医疗诊断和外科手术手术策划以及植入体的个性化定制，它能有效地提高诊断和手术水平、缩短时间、节省费用。因此，国际上将 RP 技术与 CT 和 MRI 技术相结合应用于医学领域已成为研究热点。

RP 技术自诞生以来，已经发展了十几种工艺。目前常用的较为成熟的制造工艺有以下几种：

(1) 分层实体添加法 (Laminated Object Manufacturing, LOM)，主要以纸片为原料，通过激光烧蚀逐层黏结制成。(新加坡 KINEGRY 公司 ZIPPY-1 型快速成型机)

LOM 法制成的模型表面精度较高，只须对轮廓线进行切割，适合做大件和实体件。但是制作过程中需要人员看护，以防止纸卷扯断，且不宜做薄壁原型，最终完成的蚀刻模型还需依靠人工剥离，产生的废料多，原料利用率低，而且在型腔内部残留的碎纸片不易清除；成形件表面比较粗糙并有明显的台阶纹；成形件强度差，易吸湿膨胀、分层，不易长期保存。

(2) 立体光固化成型法 (Stereo Lightgraphy Apparatus, SLA)，又称光敏液相固化法，以光敏固化树脂液为原料，通过紫外光照射逐层固化制成。(西安交通大学研制的 CPS250B 型快速成型机)

SLA 法加工的产品有较高的精度和强度，表面质量高，适合做小件和精细件，成形件适宜携带和保存。但是系统成本高，其使用的光固化树脂价格昂贵，每千克达上万元，且原料不宜长时间存储；此外在模型

制造中需设计支撑。

(3) 选择性激光烧结法 (Selected Laser Sintering, SLS)，以 HPS 工程塑料粉末为原料，通过激光照射逐层烧结制成。(北京隆源自动化成型有限公司生产的 AFS-320 型激光快速成型机)

SLS 法选材广泛，任何受热黏结的粉末都有被用作 SLS 原材料的可能，可烧结蜡粉、聚碳酸酯、工程塑料、陶瓷、金属粉末等多种材料，材料利用率高，无浪费，制造成本低，造型速度较快，而且烧结时无需支撑，可以成型几乎任意几何形状的零件。整个加工过程完全自动化，可做到无人值守。但成形件强度和精度不是很高。目前使用较多的烧结材料以工程塑料为主，原料成本约为 160 元/千克。

(4) 熔融沉积制造法 (Fused Deposition Modeling, FDM)，以塑料丝为原料，通过成形头加热和挤压，由喷嘴吐出呈熔融态材料，并迅速凝固形成轮廓形状薄层，经层层堆积制成模型。(清华大学企业集团北京殷华快速成形与模具技术有限公司生产的 MEM 系列熔融挤压快速成形机)

FDM 法无激光器损耗，材料利用率高，原材料便宜，机器运行费用极低。但对于近乎水平的悬空平面，需要设计支撑架，对于高度较高的模型，成型时间比较长。并且由于产品是在半熔融状态下逐渐固化，所以表面精度较低。

(5) 三维打印法 (Three Dimension Printing, 3DP)，此方法与 SLS 法相似，只是激光束被电控喷头所喷出的粘结剂替代。喷头在粉末层表面有选择性地施加粘结剂，通过逐层粘结、叠加制成。(上海富奇凡机电科技有限公司生成的 LTY 型三维打印快速成型机)

3DP 法的成型材料可选用一些价格比较便宜的原料，如石膏粉、淀粉、蜡粉或塑料粉，并且喷头可喷射多种颜色的粘结剂，制作出彩色三维工件。

选择何种快速成型工艺通常需要考虑以下几方面的因素：成本、加工速度、加工精度、对材料的要求以及模型的尺寸和几何形状。由于目前还没有一种制作工艺能够满足所有要求，因此必须综合考虑性价比指标。

## 3 个性化定制体人工骨材料

### 3.1 钛金属板

钛金属材料是目前临床常用的一种医用金属材料，其优点是具有良好的生物相容性，化学性能非常稳定，无老化、无腐蚀，不引起排异或过敏反应，机械强度优异，抗冲击力强；并且质量轻，比重 4.5 左右，弹性模量与骨组织相近，适合各种灭菌方式。钛金属颅颌骨定制体的制造主要采用两种方法实施，一是金属翻模铸造法，二是数控机床切铣法。这两种加工方法都可获得很高的修复体精度，但又都需要特殊

的加工设备及较长的工艺周期,操作复杂,产品制作成本高。此外由于金属材料易导热导电,导热系数高,故患者手术后头部对外界温差反应变得敏感,容易产生不适。而长期的温差变化也会对脑组织产生慢性损伤<sup>[9]</sup>。

### 3.2 聚醚醚酮(Poly Ether Ether Ketone,PEEK)

PEEK 是一种新型耐高温的热塑性工程塑料<sup>[10]</sup>,在 20 世纪 70 年代末被英国 Victrex 公司开发成功并商品化,80 年代中期在美、英发达国家的航天尖端领域上得到应用。90 年代以来 PEEK 材料作为最热门的高性能工程塑料之一在许多领域受到应用。PEEK 材料也是长期以来被作为一种重要的战略性军工材料,属于开发国家对许多国家限制出口的原材料之一。我国于 20 世纪 80 年代开始进行 PEEK 技术研发,历经 20 多年,吉林大学特种工程塑料研究中心开发出了具有自主知识产权的 PEEK 树脂合成路线并建成 500 吨/年工业化装置,打破了英国公司独家垄断生产经营的局面。国产 PEEK 树脂主要性能达到国外同类产品水平,而原料和设备全部立足于国内,降低了生产成本。

PEEK 塑料具有以下性能特征:①高耐温性,其负载热变形温度高达 316℃,长期使用温度达到 250℃;②优良的耐疲劳性以及高强度、高模量和高断裂韧性,弯曲强度达到 142MPa;③耐化学腐蚀性优良,可耐酸碱侵蚀;④有自润滑性;⑤阻燃性好,不加任何阻燃剂就可达到相关阻燃标准;⑥易加工性,由于它具有高温流动性好和热分解温度很高等特点,可采用注射、挤出、模压和吹塑等方法成型;⑦耐水解;⑧耐磨;⑨耐辐照;⑩良好的电绝缘性能。

PEEK 塑料主要用于航空航天、汽车制造、电子电器、机械及医疗等领域,可以替代铝和其它金属材料制造飞机内、外零部件;可取代金属作为制造发动机内罩的原材料,以及汽车的轴承、垫片、密封件、离合器齿环等各种零部件。在医疗方面,PEEK 树脂除用于生产灭菌要求高、需反复使用的手术和牙科设备及制作一些精密医疗仪器外,最重要的应用是可以制作人工骨(如骨科用的椎间融合器),用 PEEK 树脂制作的人工骨除具有质轻、无毒、耐腐蚀性强等优点外,还是塑料材料中与人体骨骼最接近的材料,可与骨组织有机结合,所以用 PEEK 塑料制造人工骨是其在医疗领域方面一个非常重要的应用,其潜在的应用前景和经济价值将是可观的<sup>[11-12]</sup>。

PEEK 塑料的成型温度比较高,接近 400℃,因此对成型设备的高温加工性有一定的要求,必须采用特殊的高温注塑机。特别是对于单个患者的个性化定制体,需要量身定制注塑模具,这无疑增加了制作成本和制作周期。

### 3.3 EH 复合型骨水泥

EH 复合骨水泥由羟磷灰石粉剂颗粒和 EAM 医用树脂塑型剂两部分组成,具有调和后在室温下可快速固化的特点,因此特别适合于取石膏模浇注制造,对任何复杂的几何形状都能胜任。并且定制个性化颅颌骨的制造周期很短,一般可在 2 天内完成。

EH 复合骨水泥材料的化学组成和物理特性与人体骨组织相近,材料固化后化学性能稳定,不溶于水,是热的良好绝缘体,抗压强度、抗拉强度在皮质骨和松质骨之间,密度与人体骨组织相当,对 CT、MRI 成像均不影响。EH 复合骨水泥在生物相容性方面仍然保持了羟磷灰石所具有的良好骨结合性,同时具有塑型容易的特点<sup>[13-18]</sup>。

由 EH 复合骨水泥材料翻制而成的个性化颅骨的外观和理化性能与人体颅骨很相似,几何外形可以与患者缺损颅骨部位大小一致,能与周围骨组织形成完美的嵌合衔接,达到良好的外观美学效果,并有利于修复体与骨组织之间的骨性结合。对于那些额面部复合骨缺损的病种,如颅骨带眉弓塌陷、带眼眶、鼻根复合缺损病例优越性更加突出<sup>[19]</sup>。对有些颞部凹陷处部位,可通过增加厚度进行适当垫高,以弥补由于软组织缺失造成的术后外观塌陷,从而得到较佳的美学效果。作为嵌入性修补材料的一种,其较覆盖性材料(钛网类)更符合患者的解剖生理特点,在术后能做到“解剖复位”。

EH 复合骨水泥固化体的基质为 EAM 树脂,其实质为顺丁烯二酸酐改性的双酚 A 双甲基丙烯酸缩水甘油酯复合树脂,羟磷灰石粉末颗粒作为填料混合于基质中。目前固化体的最大弱点是机械强度较低,耐冲击强度差,抗弯强度在 20-30MPa 范围,因此对于大弧度的骨缺损修复需考虑适当增加定制体厚度来加以弥补。

### 3.4 钛合金网

钛合金网是脑外科用于颅骨缺损修补最常用的材料,1965 年人们首次将钛合金网引入颅骨成形术,发现数年后钛网下的硬膜无任何组织反应,具有良好的生物相容性。钛合金网无毒、无老化、无腐蚀,组织反应轻,其孔大而密,有利于液体引流和组织贯穿生长及钛螺钉固定。钛合金网强度符合要求,抗击打能力强。钛网板材薄,工艺精细,质地轻,其比重 4.5;医用产品的厚度一般在 0.4-0.9mm 范围,易于修剪、塑形和固定<sup>[20]</sup>。

多年来颅骨缺损修补的主流产品以钛合金网为主,以往传统的手工塑形依靠手术时医生当场剪裁和弯制,因此较难达到理想的外观美学效果,且劳动强度大、手术时间长,增加了感染概率。此外为了便于成型,往往需将钛网作楔形裁剪,这样无疑会破坏钛网的完整性,从而降低修复体的强度和稳定性,影响术后安全及易引发感染。虽然可以通过金属模具压制工艺来解决此问题<sup>[21]</sup>,但开一副金属模具制作周期

长、费用高，且模具固定后，无法解决修复体压制后产生的回弹问题，从而对修复体的配合精度产生影响。为了克服上述缺陷，国内吉林大学开发出了可与钛合金网数字化定制体制作相匹配的无模多点成型技术<sup>[22]</sup>。

#### 4 无模多点成型技术

无模多点成型是金属板材三维曲面成形的一种快速、柔性、数字化成形新技术，其原理是将传统的整体模具离散成一系列点阵排列、高度可调的基本体（冲头），由上下两组基本体群构成所要求的包络面（或成形曲面）取代传统实体模具曲面进行板类件压制成形<sup>[23]</sup>。无模多点成型技术最大优点是节省了冲床用金属模具的制作，因此特别适合个性化定制体单个零件的制造。但由于患者的颅骨缺损部位和面积不尽相同，加上外科植入常用的 Ti6Al4V 钛合金网材料伸长率低，不易发生塑性变形且容易断裂，均匀变形能力差，使钛合金网压制成形过程中可能会产生某些缺陷（如拉裂、起皱和回弹等），给成形结果会带来一定不确定性<sup>[24]</sup>。缺陷不仅使定制体强度降低，还增加修整时间并影响整体美观。

由无模多点成型技术制作的钛合金网定制体仍然属于覆盖式而非嵌入式修复体，修复体边缘要将缺损部位周围覆盖 10-15mm 用于钛螺钉固定<sup>[25, 26]</sup>。因此需要有一定的技术保证两者良好的贴合，以增加手术的成功率和患者术后的舒适及美观。

#### 5 研究趋势和展望

基于快速成型技术制作的三维模型为临床医生提供了患者头颅骨立体的实体影像，使诊断变得更加准确和简便，有利于进行手术模拟和翻制个性化植入物。这些优点缩短了手术时间，提高了手术效果。因此已成为当今脑颅颌面外科中不可缺少的工具。但直到目前为止所使用的快速成型材料尚不能满足骨植入体的力学强度和生物学性能要求，因此还无法实现个性化骨定制体的直接制造。

有人曾经提出基于快速成型医工结合的敏捷制造系统的设想（图 2），即随着材料科学的发展，不久的将来可直接采用与人体骨有相同力学特性和良好生物相容性的材料，使快速成型加工出的模型直接用于临床治疗。这一制造流程将大大加快医疗手术方案的论证过程，并保证手术的成功率。从每一个患者取得 CT 数据到临床手术的实施，最多花费几个小时，为手术的实时性提供强有力的技术支持。



图 2 敏捷制造系统

Fig 2 Agile manufacturing architecture

为了能够实现敏捷制造这一设想，需要机械制造、材料科学诸方面的协同发展，开发和生产可以直接面向最终骨修复定制体的快速成型工艺、设备及相匹配的生物材料，这一直是 RP 生产商和研究人员不懈追求的目标。

从 90 年代后期起有不少研究者在这方面进行了探索。新加坡国立大学 Dietmar 等用 FDM 成型工艺研制骨组织工程框架结构模型。麻省理工学院的 Lindar 等采用 PMMA 骨水泥材料研究开发了基于 3DP 工艺的人工骨成型设备。Dayton 大学通过 LOM 工艺对用 HA/玻璃材料制成的薄片进行了人工骨成型研究。密西根大学采用 SLA 工艺对 HA 粉末与可光固化的丙烯酸酯单体液配对进行快速成型研究。

利用 RP 技术制造骨组织工程支架是近年来研究的一个方向。它可以精确控制支架的微孔结构尺寸、数量和分布，形成适合种子细胞分化、增殖生理环境的三维立体架构，同时满足解剖学形态<sup>[27]</sup>。清华大学曾研制了 T(组织工程材料) + F(框架成形材料) 成形工艺来生成人工骨。该工艺路线的要点在于，首先用框架成形材料(聚乳酸, PLLA)，通过精密熔融挤出成形技术，制备出具有较好的生物力学性能的多孔基底框架结构，然后通过沉积技术将组织工程材料(纳米羟基磷灰石/胶原自组装材料)沉积在 F 材料的表面，制备成骨组织工程支架。这种工艺路线既能获得较好的生物力学性能，又能保持骨组织工程材料的诱导成骨性能。清华大学还研制了低温喷射成形工艺制作骨组织工程用支架：将溶解于有机溶剂内的聚乳酸 PLLA 与纳米羟基磷灰石/胶原自组装材料均匀混合之后，通过喷头在低温环境中制备成多孔结构。在此过程中还通过多喷头技术实现骨生长因子(BMP)的多维复合，多孔支架结构经冷冻干燥之后，有机溶剂升华，留下大量更为微细的孔洞。有机溶剂不仅充当溶剂角色，还起到了造孔剂作用。该成型过程在低温下进行，避免了由于加热对生物活性因子的影响。

目前研究较多的基于 SLS 工艺的金属直接成型技术代表了 RP 技术的发展方向，也已逐渐趋于成熟。金属直接成型模具已在海外得到应用，并带动诞生了以金属直接成型为主要技术的模具制造企业<sup>[28]</sup>。国内四军大也有尝试激光快速成形镍铬烤瓷合金试件的

报道<sup>[29]</sup>。但由于人工骨材料对各种性能方面的特殊要求，因此最终实现个性化骨定制体的直接制造还需要多方面科研人员的不断探索。

#### References (参考文献)

- [1] Winder J, Cooke RS, Gray J, et al. Medical rapid prototyping and 3D CT in the manufacture of custom made cranial titanium plates[J]. J Med Eng Technol, 1999, 23(1):26-28.
- [2] D'Urso PS, Earwaker WJ, Barker TM. Custom cranioplasty using stereolithography and acrylic[J]. Br J Plast Surg, 2000, 53(3): 200-204.

- [3] Lin CC,Lo LJ, Lee MY, et al. Craniofacial surgical simulation: Application of three-dimensional medical imaging and rapid prototyping models[J]. *Chang Gung Med J*, 2001, 24(4): 229-238.
- [4] Hieu LC, Bohez E, Vander Sloten J, et al. Design and manufacturing of cranioplasty implants by 3-axis milling[J]. *Technol Health Care*, 2002, 10(5): 413-423.
- [5] Demin Chen, Yirong Liu, Jun Liu, et al. Bioactive artificial bone material and CAD/CAM techniques for reconstruction of skull plate[J]. *BME&Clin Med*, 2005, 9(1): 17-19(Ch).  
陈德敏, 刘义荣, 刘俊, 等. 生物活性人工骨结合 CAD/CAM 技术重建颅骨板制作系统[J]. *生物医学工程与临床*, 2005, 9(1): 17-19.
- [6] Demin Chen, Yirong Liu, Jun Liu. Reconstruction of skull using the rapid prototyping preprocessing technologies[J]. *J Biomed Eng Res*, 2009, 28(3): 215-218(Ch).  
陈德敏, 刘义荣, 刘俊. 应用快速成型技术重建人工颅骨[J]. *生物医学工程研究*, 2009, 28(3): 215-218.
- [7] Xuming Yang, Weidong Wang, Xiaoming Wu, et al. Computer individual designed EH implants in reconstruction for patients with skull bone defect in the fronto-temporal area[J]. *Suzhou University Journal of Medical Science*, 2006; 26(6): 1066-1067(Ch).  
杨旭明, 王伟东, 吴晓明, 等. 计算机三维个体化设计 EH 材料修复额颞顶部颅骨缺损[J]. *苏州大学医学杂志*, 2006, 26(6): 1066-1067.
- [8] Jianjun Xu, Huashan Ding. Computer individual designed EH compound implants in reconstruction for the skull bone defect in the fronto-temporal area[J]. *Chin J Clin Neurosurg*, 2006, 11(12): 748-749(Ch).  
徐建军, 丁华山. 计算机三维重建 EH 复合型颅骨预制体修复额颞顶大面积颅骨缺损[J]. *中国临床神经外科杂志*, 2006, 11(12): 748-749.
- [9] Blake GB, MacFarlane MR, Hinton JW. Titanium in reconstructive surgery of the skull and face[J]. *Br J Plast Surg*, 1990, 43: 528-35.
- [10] Anno. European plastics[J]. *News*, 2003, 30(3): 41.
- [11] Xiaoming Cui. Development and application of specoal engineering plastics polyetheretherketone[J]. *Engineering Plastics Application*, 2004, 32(10): 63-66(Ch).  
崔小明. 特种工程塑料聚醚醚酮的开发与应用[J]. *Engineering Plastics Application*, 2004, 32(10): 63-66.
- [12] Chun Zhao, Yulong Zhang. Polyetheretherketone[M]. Beijing: Chemistry Industry Publisher; 2008: 221-228(Ch).  
赵纯, 张玉龙. 聚醚醚酮[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 221-228.
- [13] Xiaoyun He, Shufang Zhang. Clinical experience of 42 cases of EH composite artificial bone material in repair of skull defect[J]. *Chinese Journal of Dental Materials and Devices*, 2008, 17(4): 221-222(Ch).  
何晓云, 张树芳. EH 复合人工骨材料修补颅骨缺损 42 例的临床体会[J]. *口腔材料器械杂志*, 2008, 17(4): 221-222.
- [14] Bin Chen, Lianqing Wang, Hongchun Chen, et al. Analysis of effect of 17 cases of digital shaped EH compound implants in repair of skull defect[J]. *Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 2008, 7(1): 107-108(Ch).  
陈斌, 王奕清, 陈红春, 等. 数字化预制复合材料 EH 修补颅骨缺损 17 例分析[J]. *临床和实验医学杂志*, 2008, 7(1): 107-108.
- [15] Shuming Ye, Yong Ding. Study on the computer individual designed EH implants in repair of skull defect[J]. *Chin J Modern Clinical Medicine*, 2007, 6(8): 13-15(Ch).  
叶树铭, 丁勇. 计算机辅助个体化设计 EH 复合材料型颅骨瓣在颅骨修补术中的应用初探[J]. *中国现代临床医学杂志*, 2007, 6(8): 13-15.
- [16] Hui Wu, Bo Xiao, Zhian Zhu, et al. Analysis of effect of individual prefabricated EH compound implants on repairing cranial bone in patients with cranial bone defect. *Chin J Clin Neurosurg*, 2007, 12(5): 285-287(Ch).  
吴慧, 肖波, 朱志安, 等. 个体化预制 EH 复合材料颅骨修复效果分析[J]. *中国临床神经外科杂志*, 2007, 12(5): 285-287.
- [17] Haiquan Xia, Zuchen Li. Observe of effect of digital bone cement in repair of skull defect[J]. *Modern Practical Medicine*, 2007, 19(9): 736-737(Ch).  
夏海全, 李祖晟. 颅骨缺损数字化骨水泥修补的效果观察[J]. *现代实用医学*, 2007, 19(9): 736-737.
- [18] Wenxu Zhao, Liqing Liao, Weiguo Chen. Application of individual prefabricated EH compound implants for the cranial bone defect. [J]. *Chin J Clin Neurosurg*, 2009, 14(4): 234-235(Ch).  
赵文旭, 廖黎庆, 陈卫国. 个性化预制 EH 复合材料在颅骨缺损修复中的应用[J]. *中国临床神经外科杂志*, 2009, 14(4): 234-235.
- [19] Cao D, Yu Z, Chai G, et al. Application of EH compound artificial bone material combined with computerized three-dimensional reconstruction in craniomaxillofacial surgery[J]. *J Craniofacial Surgery*, 2010, 21(2): 1-4.
- [20] Pou AM. Update on new biomaterials and their use in reconstructive[J]. *Surgery*, 2003, 11(2): 240-244.
- [21] Peng Ren, Jia Li, Zhibo Wang, et al. Skull repair technology based on CAD/CAM[J]. *Design and Research*, 2007, 5: 11-13(Ch).  
任鹏, 李佳, 王志波, 等. 基于 CAD / CAM 的颅骨修补术[J]. *设计与研究*, 2007, 5: 11-13.
- [22] Wei Liu, Shusheng Jia, Chuanmin Zhang, et al. The digital manufacturing technology of titanium prosthesis for cranioplasty based on multi-point forming[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(7): 1205-1207(Ch).  
刘伟, 贾树盛, 张传敏, 等. 基于多点成形的颅骨钛板假体数字化制造技术[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(7): 1205-1207.
- [23] Guomin Chu, Yansheng Li, Jingyun Han, et al. Research on the digital manufacture technology in the manufacturing of titanium cranioplasty plate[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(4): 384-389(Ch).  
褚国民, 李彦生, 韩景芸, 等. 钛金属板颅骨修复体数字化制造研究[J]. *应用基础与科学学报*, 2003, 11(4): 384-389.
- [24] Guomin Chu, Renyuan Fei, Jingyun Han, et al. The forming simulation of the customised titanium alloy cranial prosthesis[J]. *Manufacturing Automation*, 2004, 26(12): 35-38(Ch).  
褚国民, 费仁元, 韩景芸, 等. 个性化钛合金颅骨修复体成形仿真[J]. *制造业自动化*, 2004, 26(12): 35-38.
- [25] Yonchuan Guo, Xing Suo, Hongchuan Guo, et al. Application of digital shaped implants for the cranial bone defect[J]. *Chin J Neurosurg*, 2005, 21(4): 252-253(Ch).  
郭永川, 索新, 郭宏川, 等. 颅骨修复体数字化塑形在颅骨成形术中的应用[J]. *中华神经外科杂志*, 2005, 21(4): 252-253.
- [26] Hanchun Chen, Zhimin Wang, Dongyi Jiang, et al. Application of individual manufacturing technology based on Spiral CT and multi-point forming in repair of skull defect[J]. *Suzhou University Journal of Medical Science*, 2008, 28(1): 168-169(Ch).  
陈寒春, 王之敏, 蒋栋毅, 等. 螺旋 CT 结合数字化多点成型技术在颅骨缺损个体化修补中的应用[J]. *苏州大学学报(医学版)*, 2008, 28(1): 168-169.
- [27] Chuanglong He, Liewen Xia, Yanfeng Luo, et al. The application and advancement of rapid prototyping technology in bone tissue engineering[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2004, 21(5): 871-875(Ch).  
何创龙, 夏烈文, 罗彦凤, 等. 快速成型技术在骨组织工程领域的应用进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2004, 21(5): 871-875.
- [28] Tao Feng, Zhigang Li. The latest developments of rapid prototyping and rapid tooling technologies[J]. *Die & Mould Industry*, 2004, 4: 3-5(Ch).  
冯涛, 李志刚. 快速成型与快速制模技术的最新发展[J]. *模具工业*, 2004, 4: 3-5.
- [29] Ruijie Dang, Bo Gao, Xiaoming Zhao, et al. In vitro elements release of Ni-Cr PFM alloy fabricated by laser rapid forming technology[J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2009, 25(5): 621-623(Ch).  
党瑞杰, 高勃, 赵晓明, 等. 激光快速成形镍铬烤瓷合金离子溶出体外实验研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2009, 25(5): 621-623.