

# 金属激光3D打印的探讨

**刘继常, 王兵**

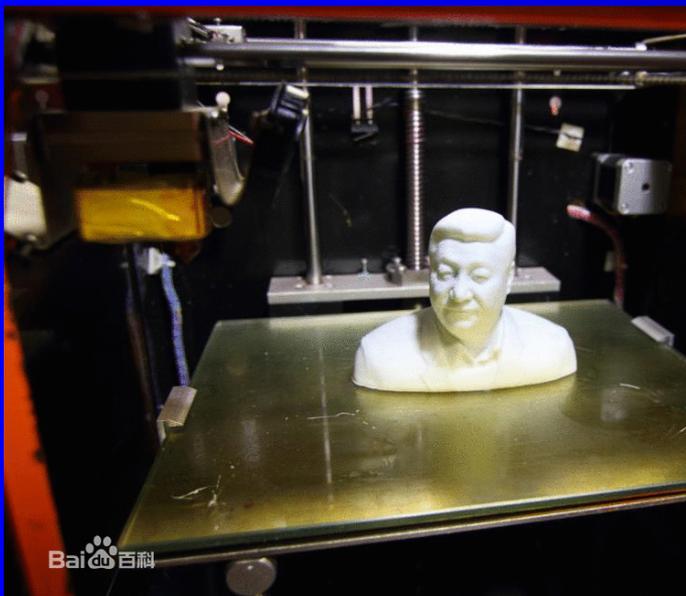
湖南大学

**伍耀庭**

长沙嘉程机械制造有限公司

# 一 金属激光3D打印现状

- 3D打印，即增材制造，过去只是快速成型（增材制造）的一种，现在常常泛指增材制造。
- 它是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可材料，通过逐层打印（增材）的方式来构造物体的技术。
- 打印材料有多种，有金属，也有非金属；有固态，也有液态；有粉状，也有丝状。



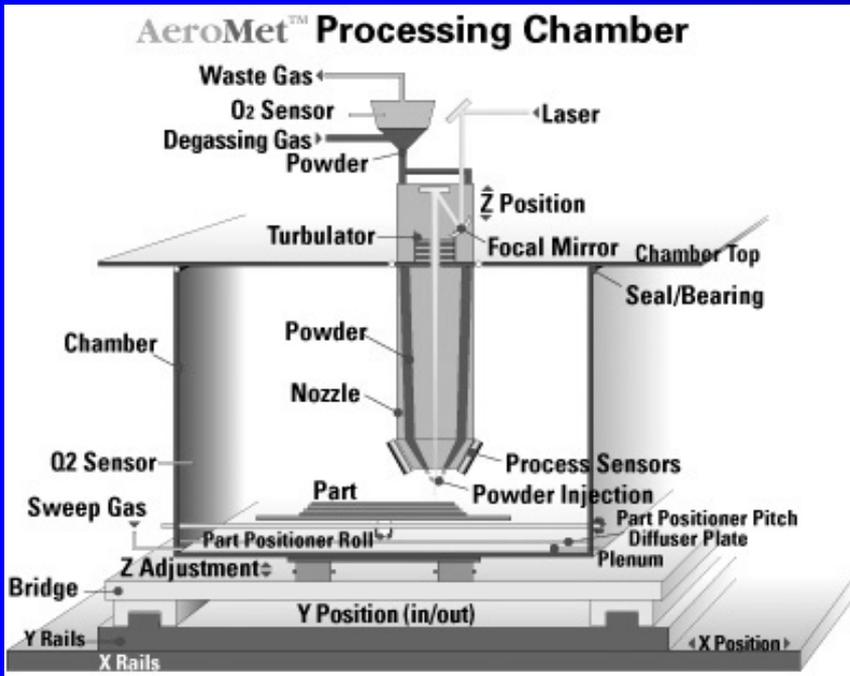


- 历史上出现过以下3种金属3D打印工艺：
- 激光熔覆（激光工程近成形，LENS）
- 选择性激光熔化（SLM）
- 选择性激光烧结（SLS）

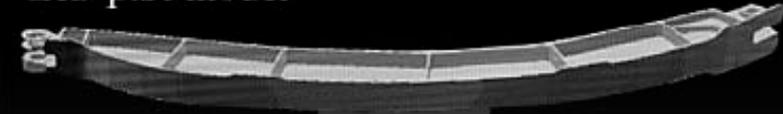
# 1、LENS

- 激光熔覆原本是一种改善基体表面耐磨或耐腐蚀性能的表面处理工艺。它是把一种新材料通过冶金结合的方式以小的稀释率熔覆在基体上。这种表面处理通常只有一层或很少的几层熔覆在基体上。
- 当按零件立体轮廓要求设计的具有一定平面轮廓的多层金属熔覆在基体上时，就可制造出金属零件。
- 1979年开始成为了一种增材制造工艺。
- 代表性的研发与应用单位：美国Sandia国家实验室、Los Alamos国家实验室、宾西法尼亚州立大学、Stanford大学、伊利诺伊大学、密歇根大学、Carnegie Mellon大学、AeroMet公司、Optomec公司、SolidConcepts公司和英国利物浦大学；国内清华大学、华中科技大学、北京航空航天大学、西北工业大学、湖南大学等。

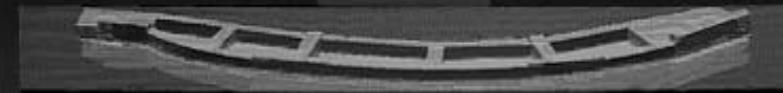
# AeroMet公司



CAD part model



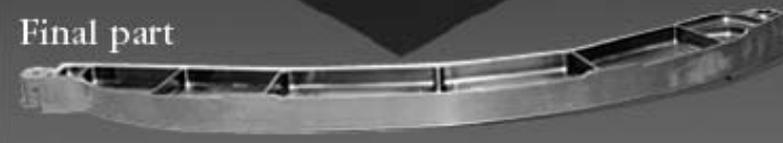
CAD preform model



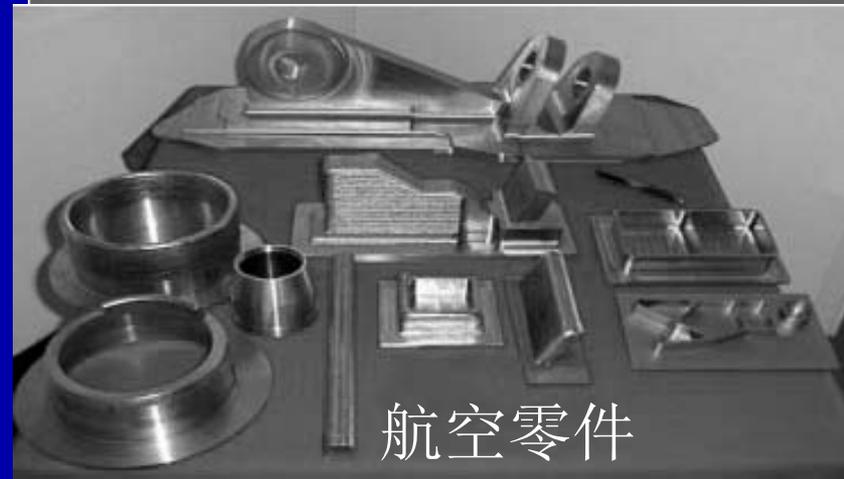
Preform



Final part

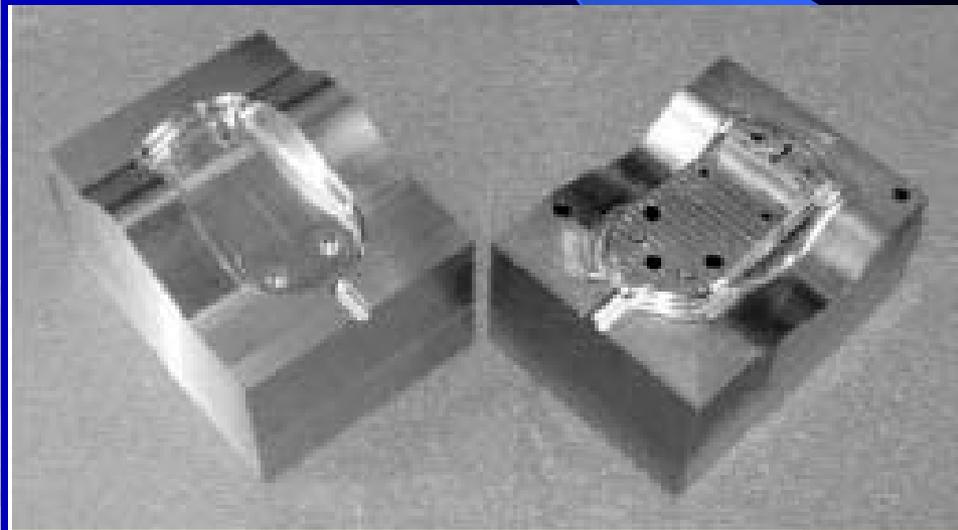


Lasform<sup>SM</sup>系统

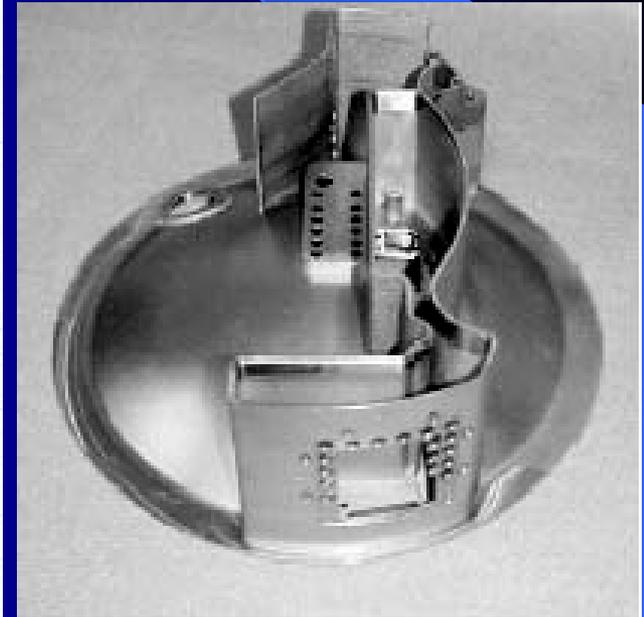
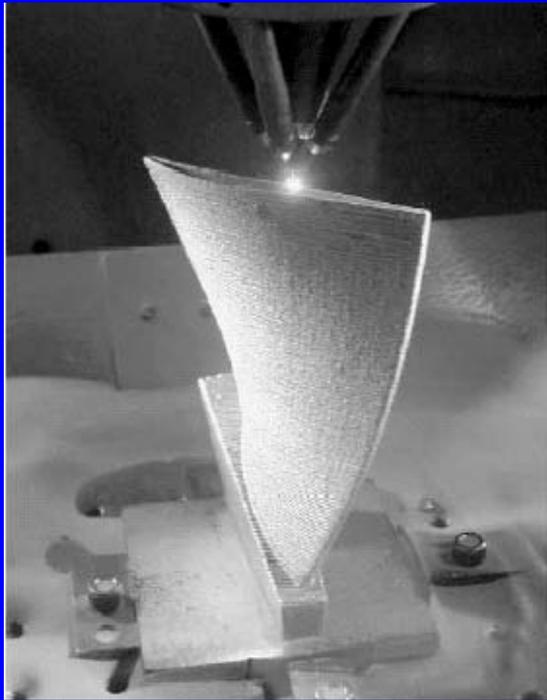


航空零件

# POM公司



# Sandia国家实验室



# SolidConcepts

- 全球首支3D打印金属枪，由总部位于德克萨斯州奥斯汀的3D打印公司“固体概念”（SolidConcepts）设计制造，依照的模板是美军曾经的经典装备布朗宁1911式手枪，3D打印金属手枪在外观上已经和兵工厂生产的原装布朗宁1911式手枪没有差别。
- 3D打印金属手枪成功发射了50发子弹，并在测试中多次击中30公尺外的靶心。



 **SOLID CONCEPTS®**



 **Baidu 百科**

- “**固体概念**”使用的DMLS技术是最精确的3D打印工艺之一，其精确度超过1911系列枪支对零件的要求。此外，3D打印金属件的内部孔隙融模铸造件更小，与传统的加工技术相比可以制造更加复杂的零件。该公司此前曾运用这项技术制造过医疗器械和汽车工具。
- 为了打印这只手枪，首先创建了一个3D模型，然后使用金属激光烧结工艺（DMLS）加热金属粉末使其凝固成型，移出支撑材料；修饰枪膛使其可以正常射击；用激光烧结把手等等环节，最后使用现成的弹簧和弹匣。

- 3D打印金属手枪是由超过30个3D打印原件组装而成，包括不锈钢和一些特殊合金材料，枪栓、枪管和很多内部零件都是由不锈钢17-4打印材料制造而成，还有一些部件是由镍镉铁合金625制造的，包括枪框、扳机、撞锤，还有碳纤维填充尼龙材质的手柄。这个技术工艺的核心是金属激光烧结，制作一个手枪所需要的设备成本约在85万美元。
- 3D打印手枪，证实3D金属打印技术很可靠、很精确、很实用。能在五天内制造出3D打印手枪。



- 固体概念公司3D打印副总裁费尔斯通（Kent Firestone）指出：“这把3D打印金属枪的诞生，证明了3D打印技术应用于类似产品大规模生产的可行性和耐用性。”“有一个普遍误解，即3D打印不精确或强度不够，我们正在努力改变人们的观念。”
- 任何技术都是一把双刃剑。在憧憬3D打印技术可能给人们带来便利的同时，有人担忧，通过3D打印，是否会降低武器制造的门槛，导致武器流入恐怖分子手中？金属手枪打印出来后，以后想要犯罪似乎容易了许多。

- 3D打印主要是对物体结构部件的复制，在任何一种枪支的解剖结构在各种工具书中都能够找到，因此，枪支不难被制造，但子弹却很难找到，没有结构程式就不能制造子弹。
- 在制作这种所谓的枪支或者零件的粉末上，保持结构强度，说明它能够有一定的实用用途，但是仅限于短周期或者是短时间内的使用，没有办法在长时间内满足使用的要求。通过3D打印得到的武器结构强度，需要进一步论证。3D打印技术只是解决了能不能做的问题，至于能做到多好，今后还需要进一步研究、进一步探索。

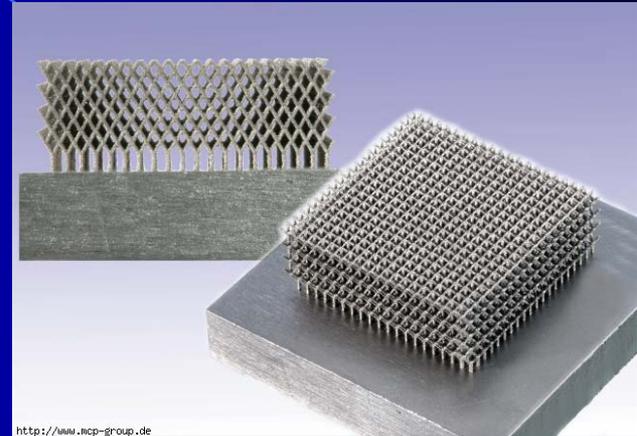
## 2、SLM

- **德国Fraunhofer Institute for LaserTechnology (ILT)最早提出了直接制造金属零件的选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术。金属粉末的快速成型技术，用它能直接成型出接近完全致密度的金属零件。**
- **设备供应商主要有德国的MCP、EOS、TRUMPF，日本的MATSUUR和美国的PHENIX。**
- **国内华南理工大学、华中科技大学、湖南大学（与长沙嘉程机械制造有限公司合作）进行了研发。**
- **SLM技术克服了选择性激光烧结SLS技术制造金属零件工艺过程复杂的困扰。**

# MCP, SLM, 德国



<http://www.mcp-group.de>



<http://www.mcp-group.de>



<http://www.mcp-group.de>

# EOS



- 根据成型件三维CAD模型的分层切片信息，扫描系统（振镜）控制激光束作用于待成型区域内的粉末。一层扫描完毕后，活塞缸内的活塞会下降一个层厚的距离；接着送粉系统输送一定量的粉末，铺粉系统的辊子铺展一层厚的粉末沉积于已成型层之上。然后，重复上述2个成型过程，直至所有三维CAD模型的切片层全部扫描完毕。这样，三维CAD模型通过逐层累积方式直接成型金属零件。最后，活塞上推，从成型装备中取出零件。至此，SLM金属粉末直接成型金属零件的全部过程结束。

## 二、问题

- 质量问题
- 效率问题
- 成本问题
- 成形能力问题
- 市场问题

# 1、质量问题

## 1) 尺寸精度与表面质量不高

- 过程不稳定——太费神



要加强检测控制

Sample produced with unsteady powder feed rate

# 手工修正工具



## 2) 3D打印应力较大

太大的应力导致  
变形、开裂



裂开



变形：圆环不圆

### 3) 内部质量

- 内部组织不是理想的那么好，导致使用性能问题。

## 消除或减小应力的措施

- 1) 改进工艺：改善温度分布，以减小热应力
- 2) 改善结构：避免应力集中；调节壁厚、结构，改善温度分布，以减小热应力
- 3) 优化材料：调节成分，改善力学性能，提高抵抗开裂的能力

## 2、效率问题

- 太慢：一般要花几小时直至几十小时才能完成一个零件的制造。
- 还带来如下问题：
  - ✓ 对设备的严峻考验；
  - ✓ 要消耗较多能源。

买高档配件？

提高成本！

# 3、成本问题

- 太高：

- 原材料贵；

- 固定成本分摊费用高；

- 还有效率问题带来的成本问题。

设备寿命以万小时计，  
用不了几年！

## 4、成形能力问题

- 悬臂？
- 带孔件？

## 5、市场问题

- 目前雷声大，雨点小。有人感觉到有点被忽悠了。
- 原因不仅是前面几个问题导致的，还有认识的误区，以及相应的设计、制造理念问题。
- 我个人认为，是发高烧了。

# 三、路在何方？

- 号准市场的脉搏；
- 集中精力解决应用中出现的问题；
- 积极开展宣传推广；
- 以市场需求为导向，开发新的工艺方法。

# 一) 号准市场的脉搏

- 关键是退烧后市场的脉搏要号的准。
- 我们的措施是成立专门的市场研究小组从事市场调研、市场细分、评价决策等工作。

## 二) 集中精力解决应用中出现的 技术问题

## 三) 积极开展宣传推广

- 理性看待3D打印与3D再制造，既不是神话，也不要说胡话；
- 积极把好的应用实例展示出来；
- 通过媒体进行适度的理性宣传；
- 加强与潜在用户的沟通。

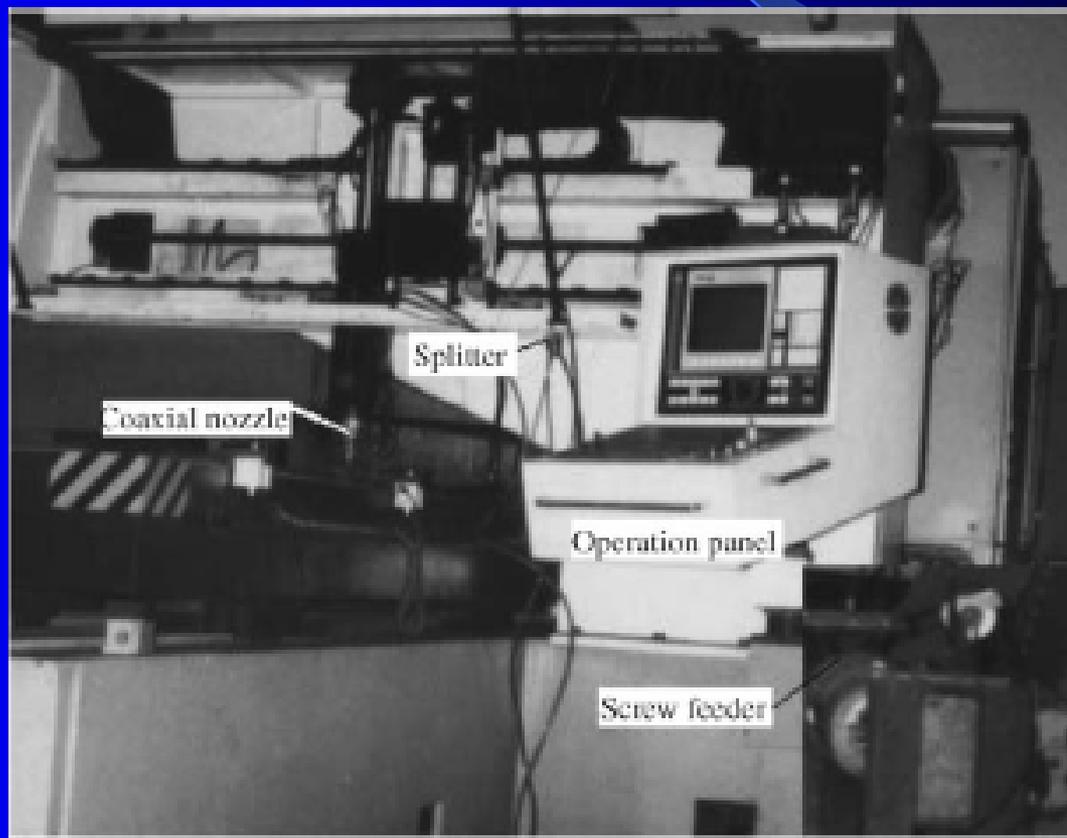
## 四) 开发新的工艺方法

- 有的情况用现有的工艺方法解决不了，能否开发新的工艺方法？
- 针对某个需求，如果现有的工艺方法成本太高、效率太低，能否找新的工艺方法来降低成本、提高效率？

# 三、湖南大学的研究与应用

- 湖南大学从2000年开始研究激光熔覆理论与技术。

湖南大学的激光熔覆成形系统（已废弃）



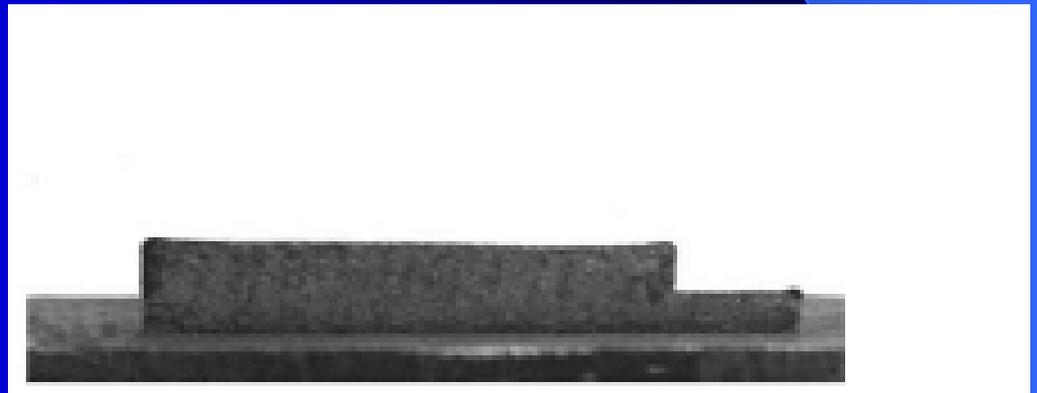
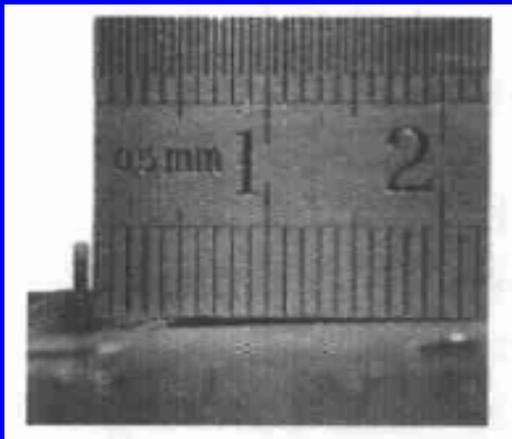


移动式半导体激光机器人多功能3D加工系统（在麓谷）

# 1、研究内容简介

## 1) 试验成形薄壁零件。

- ✓ 我们最薄的样品厚度为0.4mm左右（2003年）。

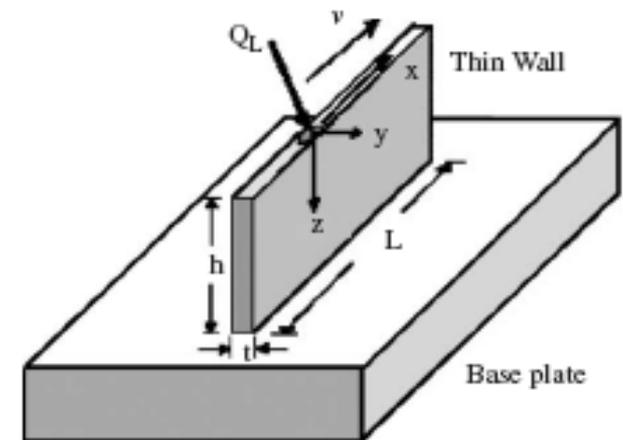


## 2) 理论模型研究

### a. 壁厚模型

$$R_m = \delta/2$$
$$= \left( \frac{AP}{2^{3/2} \rho c_p (T_m - T_0) \sqrt{Kt} [\operatorname{erfc}(1) - 1/(e\sqrt{\pi}) + 1/\sqrt{\pi}]} \right)^{2/3}$$

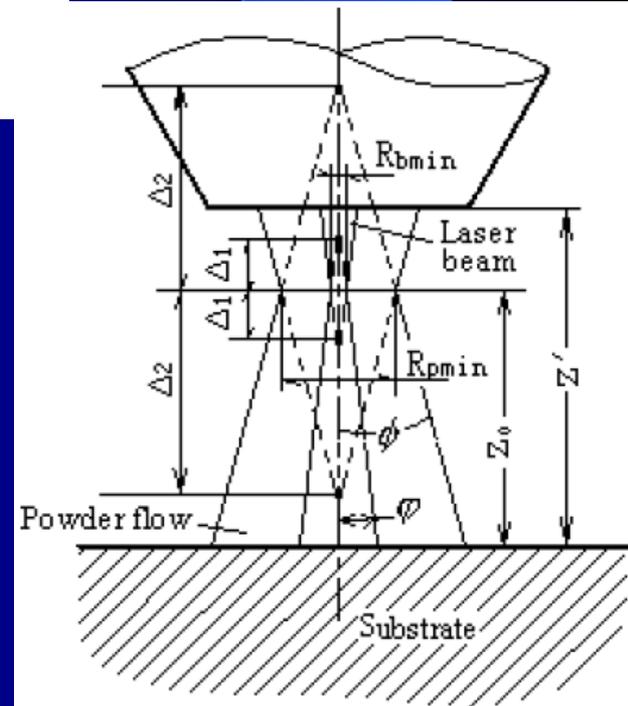
$$t_f = \frac{2H_w L \rho R_m}{\dot{m}_p} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-2R_m^2}{R_p^2}\right) \right]^{-1}$$



## b. 功率衰减模型

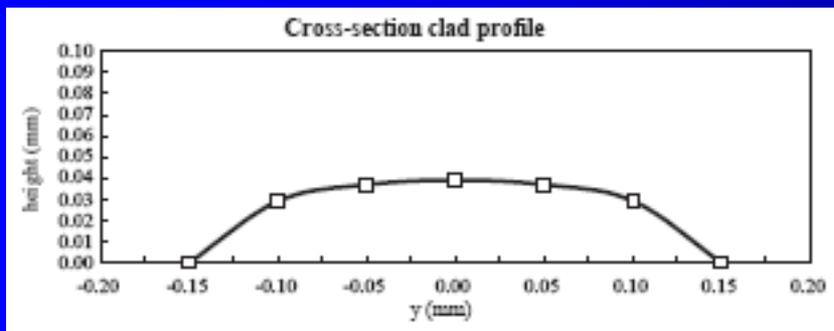
$$P'' = P' \beta'' = P_0 \beta' \beta'' = P_0 \beta,$$

$$\beta = \beta' \beta'' = \exp\{C \dot{m}_p \{2 \arctan(A \Delta_1 + B) - \arctan[A(\Delta_1 + z_0) + B] - \arctan[A(z' + \Delta_1 - z_0) + B]\}\},$$



## c. 熔覆带轮廓模型

$$Z_2 = \frac{m_p}{\sqrt{2\pi}\rho v R_p} \exp\left[-\frac{2y_2^2}{R_p^2}\right] \times \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{2}x_1/R_p} \exp(-\alpha^2) d\alpha + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{2}x_2/R_p}^0 \exp(-\alpha^2) d\alpha \right),$$



### 3) 控制理论与方法研究

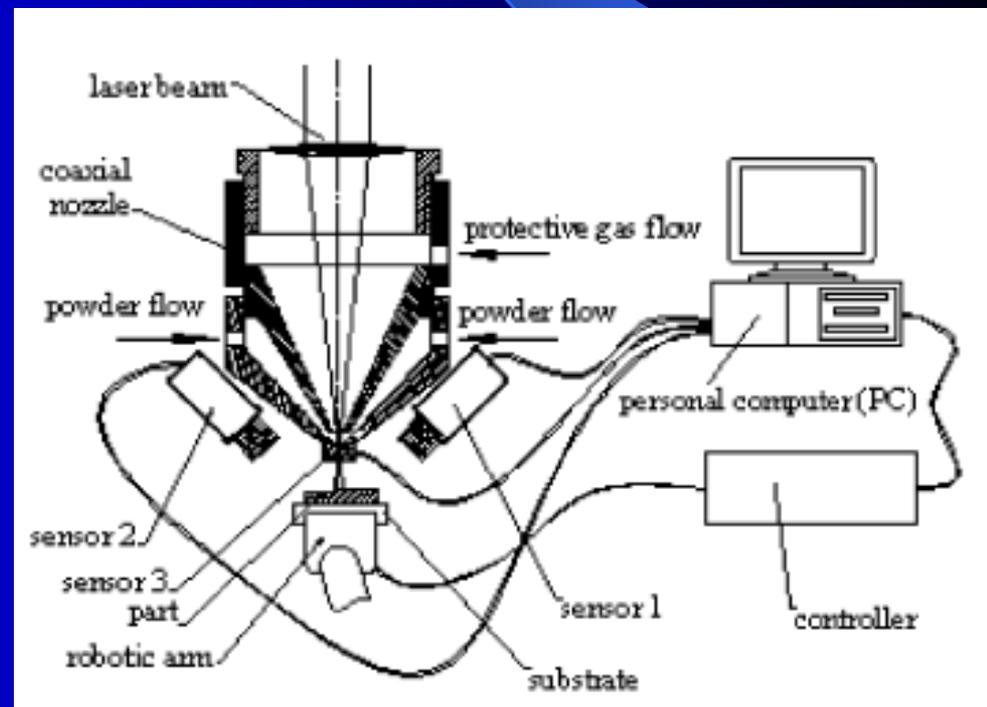
- 提出了运动调节方法（2003年）。

$$G = \frac{g}{\left[ \left( h + \sqrt{x^2 + y^2} \tan \theta_1 \right) \tan \phi \right]^2} \times \exp \left[ - \left( \frac{3\sqrt{x^2 + y^2}}{\left( h + \sqrt{x^2 + y^2} \tan \theta_1 \right) \tan \phi} \right)^2 \right],$$

$(x < 0),$

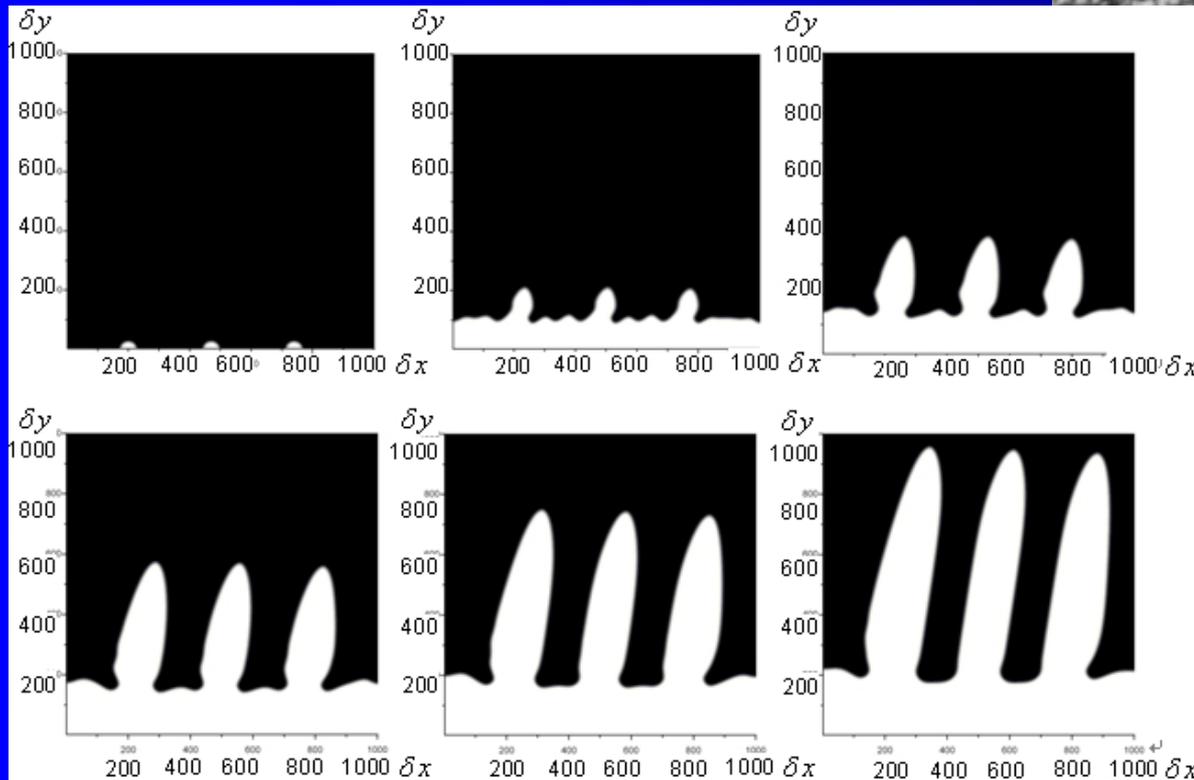
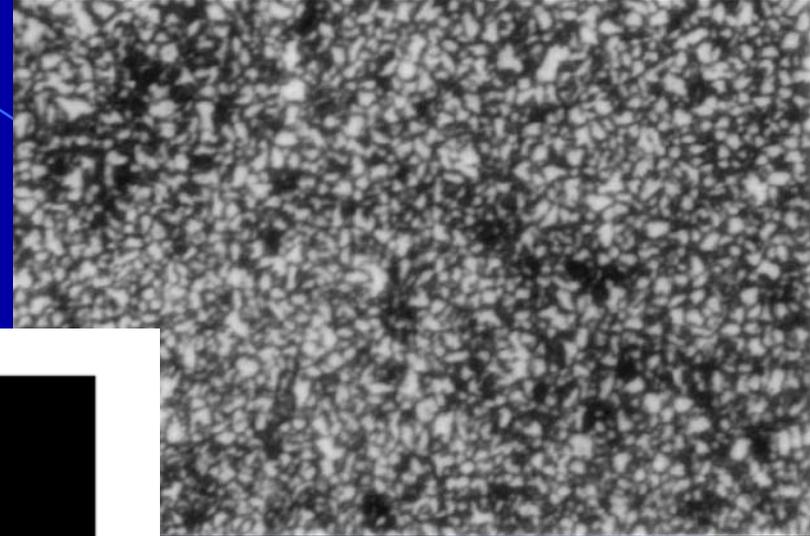
$$G = \frac{g}{\left[ \left( h + \sqrt{x^2 + y^2} \tan \theta_2 \right) \tan \phi \right]^2} \times \exp \left[ - \left( \frac{3\sqrt{x^2 + y^2}}{\left( h + \sqrt{x^2 + y^2} \tan \theta_2 \right) \tan \phi} \right)^2 \right],$$

$(x \geq 0).$



## 4) 晶粒形态

- 在熔覆层内发现了柱状/等轴晶转变。
- 相场法模拟晶粒生长。



熔池底部微观组织演化过程

- 加拿大国家研究委员会科学技术信息研究所 (CISTI) 2008年在相关期刊上发表的激光熔覆科学技术全球发展状况的文章 ( Dubourg L, Archambeault. J. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 5863-5869 ) 中, 把我们的研究工作评价为亚洲区在该方面研究的典型代表之一。

## 2、应用

- 通过与企业合作，主要应用：
  - 金属零件或模具激光3D打印，开发了激光熔覆3D打印装备和SLM3D打印装备；
  - 金属零件或模具修复再制造，开发了移动式修复装备。

# 新近开发的激光熔覆3D打印设备





半导体激光器机器人加工系统（主要用于修复再制造）



# 部分3D打印样品



## 四、我们的目标和任务

- 目标：既可以向社会奉献高性价比的装备，又可以为广大用户提供3D打印加工服务。
- 任务：优化现有的设备，开发新的设备，提升加工服务能力。