

厚钢板激光切割关键技术及应用

唐霞辉



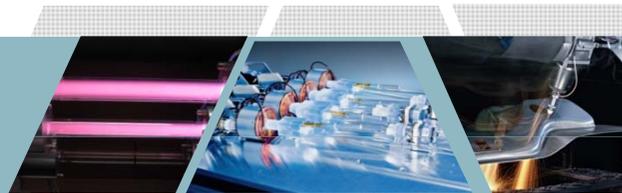
华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

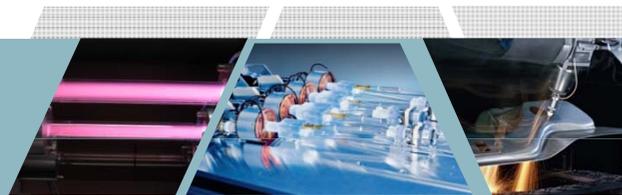
激光加工国家工程研究中心

3 2:49 PM

摘要



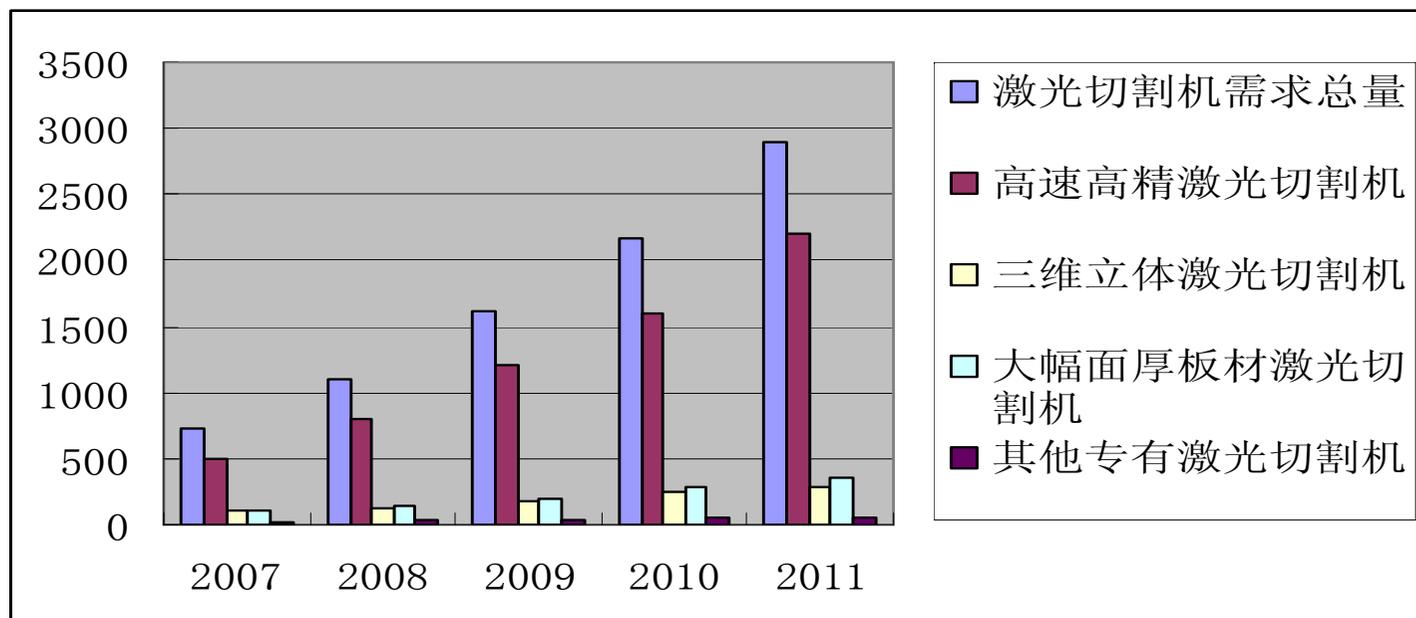
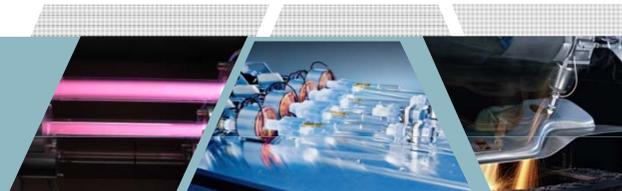
我国激光切割设备处于快速发展阶段，但是厚板激光切割关键技术需要进一步突破。本报告结合**工信部重大专项**，介绍厚板切割在船舶、工程机械、农业机械等应用。重点介绍基于**厚板切割的机床结构、高功率激光器、激光专用控制、光束传输、切割工艺**等核心技术。展望了厚板切割未来发展趋势。



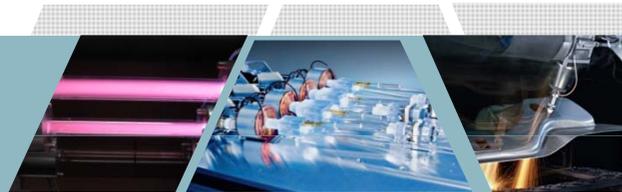
激光切割的发展趋势

- 薄板切割的高精度、高速度
- 高功率、大厚度、宽幅面
- 三维切割
- 特种材料

现状—激光切割



目前，国内已有的高功率激光切割设备已超过**3,600**台。市场以**15%**的年增长率快速增长。



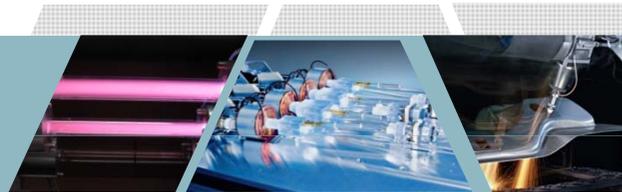
主要内容

一. 厚钢板激光切割应用

二. 大幅面厚板激光切割关键技术

三. 厚板切割发展趋势

一、厚钢板激光切割应用

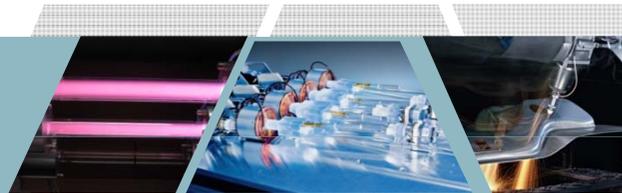


定义：切割厚度碳钢大于15mm。国外达到50mm。

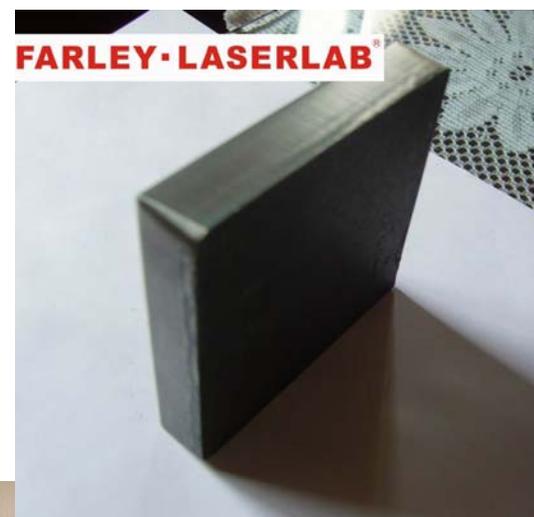
通常：大幅面系统用于厚板切割



船舶行业应用



高功率、宽幅面的激光切割在船厂
已经部分地取代了等离子体切割。





国内首艘新型大型航标工作船



武船“新潜艇”



武船青岛基地



数字化造船

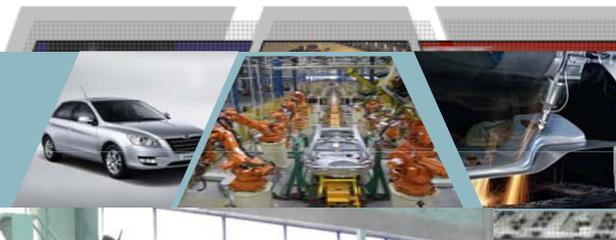


例如： 武船激光切割应用

工程机械



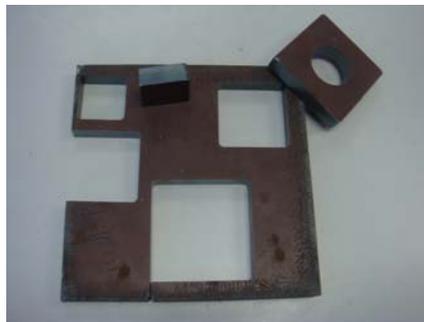
三一重工激光切割机

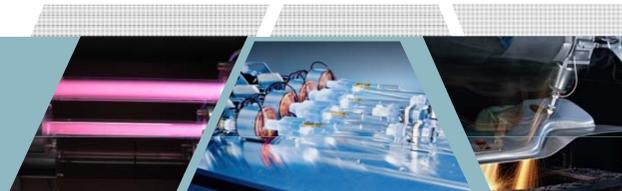


能用激光就不用等离子。能用等离子就不用火焰。截止目前， 已使用约80台激光切割机， 100多台等离子切割机。



中联中科——激光切割机



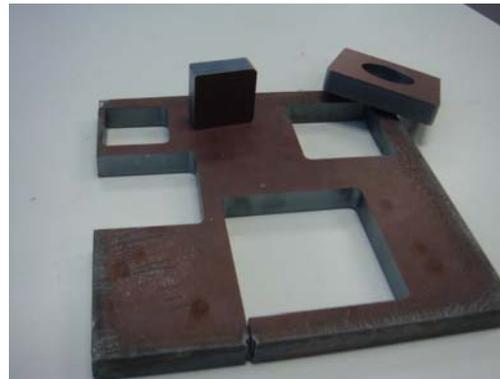


XCMG 配备有 来自武汉Farley Laserlab 的**WALC** 激光切割机





LOVOL 在工程机械和农业机械上应用了激光加工。





重卡 --- 车桥厚板激光切割

农用机械应用



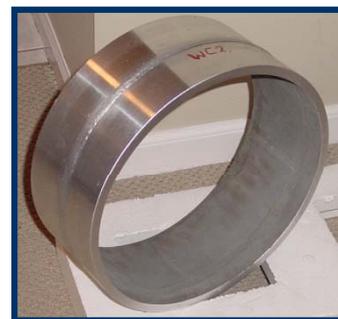
激光切割设备在国内多家农机企业应用



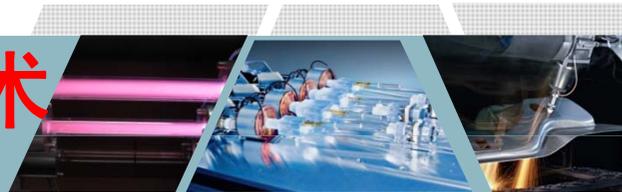


发展厚板切割的意义重大

- 我国船舶制造、汽车、冶金、航空航天等领域所需的中厚钢板的激光切割设备每年需高价从国外进口。
- 我国的激光加工技术与国外差距较大，无法满足上述行业迫切需求，制约了国民经济支柱产业的快速发展。
- 开发大功率宽幅面厚板数控激光切割机，以满足我国造船、汽车、冶金、航空航天行业需求。



二、大幅面激光切割机的关键技术



大幅面激光切割机一般采用机载激光器结构；加工幅面大于 $3\text{m} \times 25\text{m}$ ；切割板厚可达到 40mm 。

2.1 机床系统

2.2 光路系统

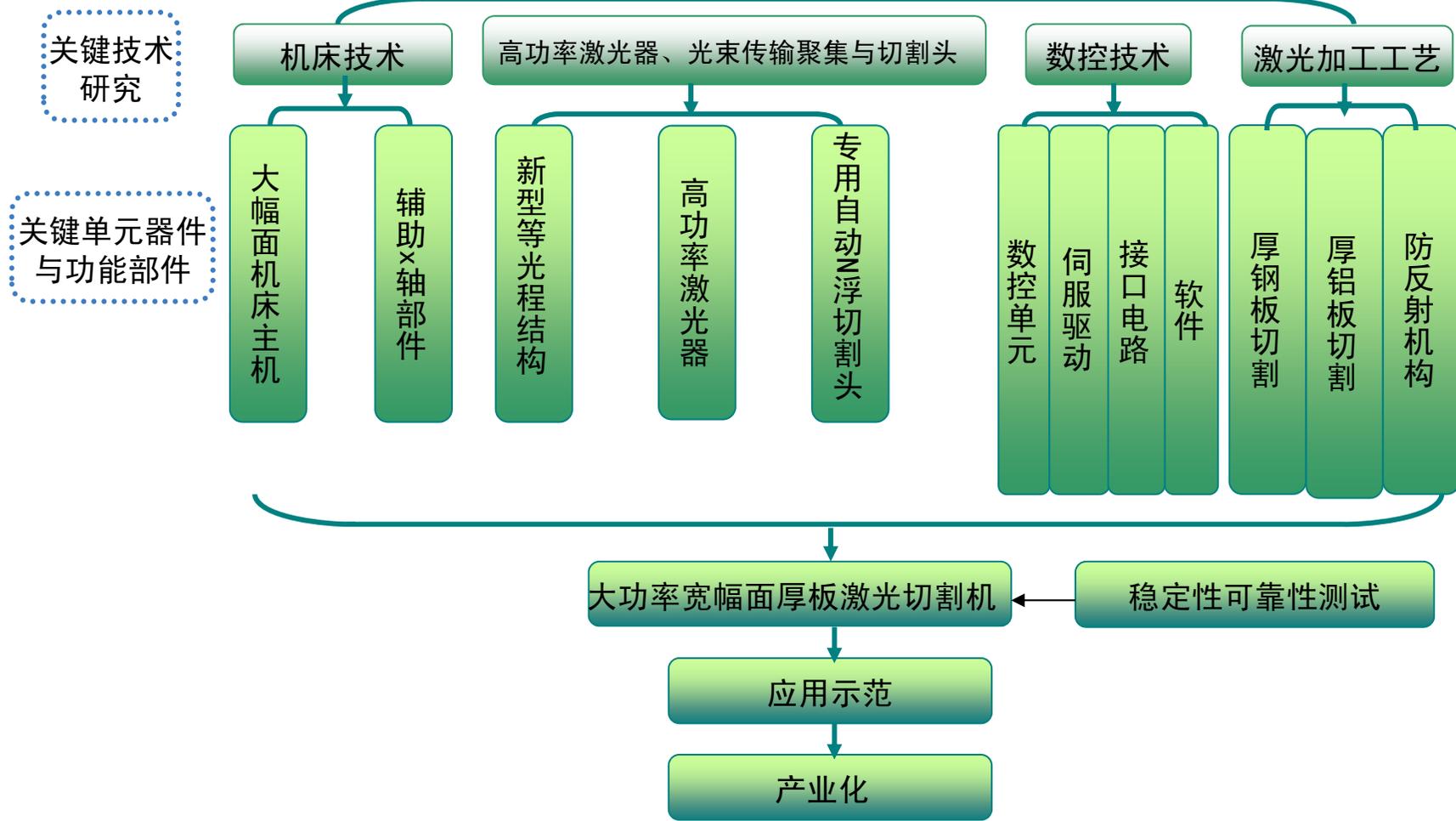
2.3 切割头

2.4 激光器

2.5 切割工艺



大幅面厚钢板数控激光切割机关键技术路线



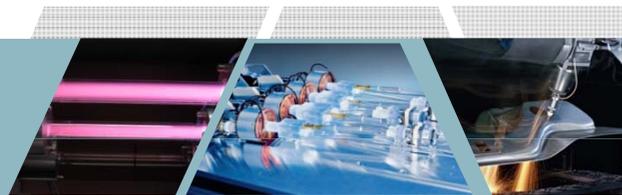
2.1 机床系统--关键技术之一



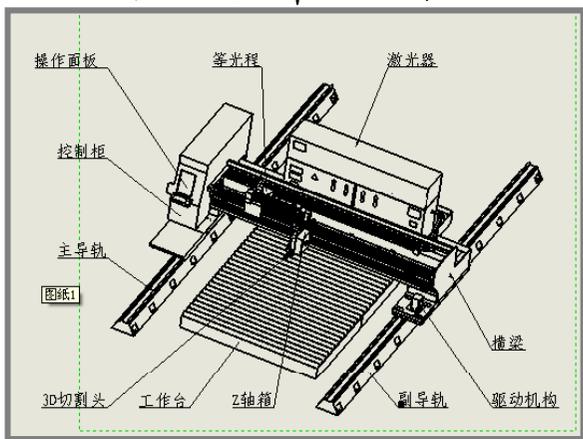
高性能大功率宽幅面厚板激光切割机整体设计

- ▶ 机床技术：高刚性和高稳定性龙门式、无床身结构，宽幅面双边同步驱动、机载激光器、高速启动x-1轴。
- ▶ 全国产化数控系统：7轴控制、平面补偿、机床精度补偿。
- ▶ 高功率、长行程激光光束传输技术：等光程、自动调焦、自动跟踪、厚板专用切割头。

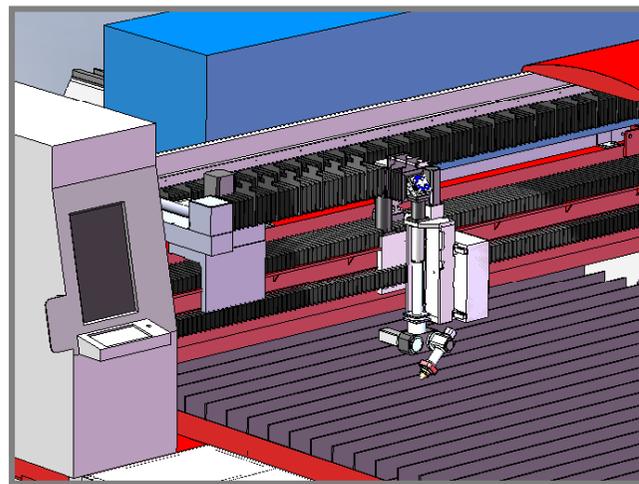




- 双龙门机械结构设计：截面积大，高刚性、高稳定性；
- 配置高质量高精度行星齿轮减速箱：反向间隙小、运动平稳的斜齿轮齿条传动；
- 采用双边驱动系统：增强整个双龙门架（包含机载激光器）运动的平稳性。



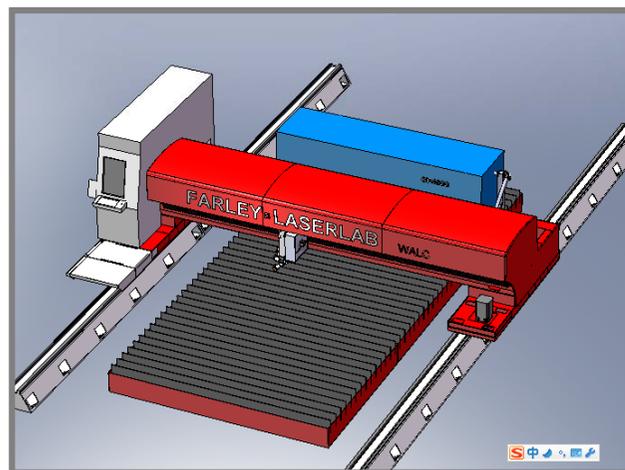
厚板激光切割机结构示意图



厚板激光切割机三维示意图



- ▶ 两个独立的驱动部件：可以单独调整预加负荷和反向间隙，优化系统运动特性。高精度磨制齿轮。
- ▶ 大横截面面积的双支架式钢结构；
- ▶ 主导轨采用宽型的直线导轨：保证X轴的运行精度和导轨的承载能力
- ▶ 付导轨采用淬火后方导轨：提高承载能力和耐磨力
- ▶ 主付导轨单独采用伺服电机驱动：驱动力矩大、响应速度快、同步性能好。



国产数控系统

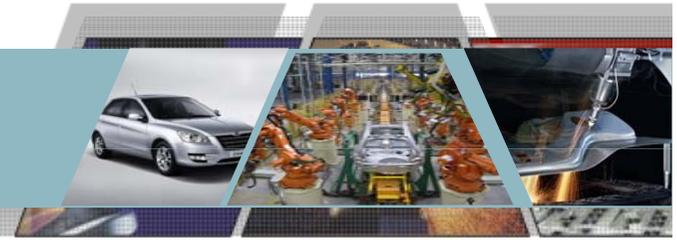


数控单元

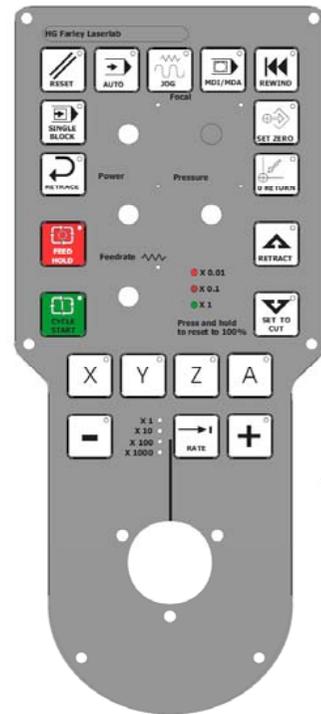


国产激光切割专用数控系统开发

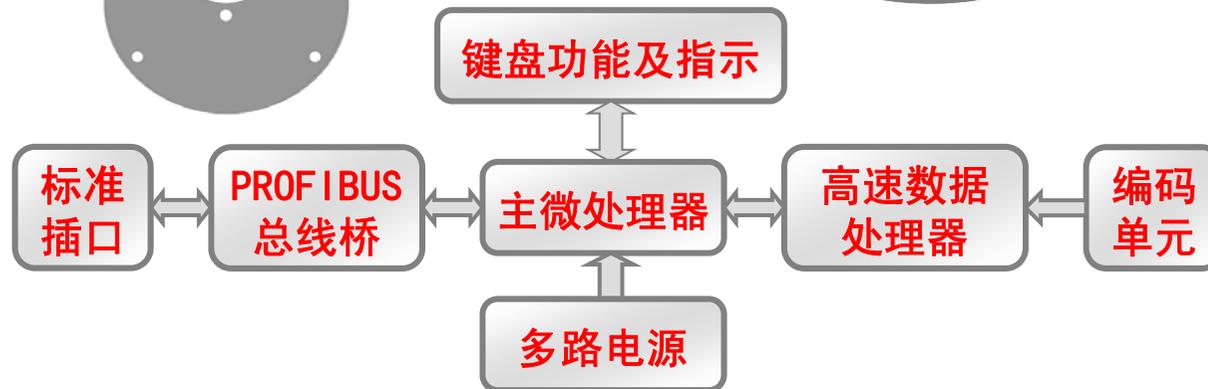
国产数控系统



手持操作单元



手持操作系统可实现：
机床操作功能、
机床回零、
高度跟随、
切割动作、
回退、
机床运动等，
方便用户灵活使用。



西门子840D数控系统的高端自主开发HMI功能



客户自助选择语言



不同权限的强大的密码保护功能

标题显示

切割路径显示

机床坐标显示

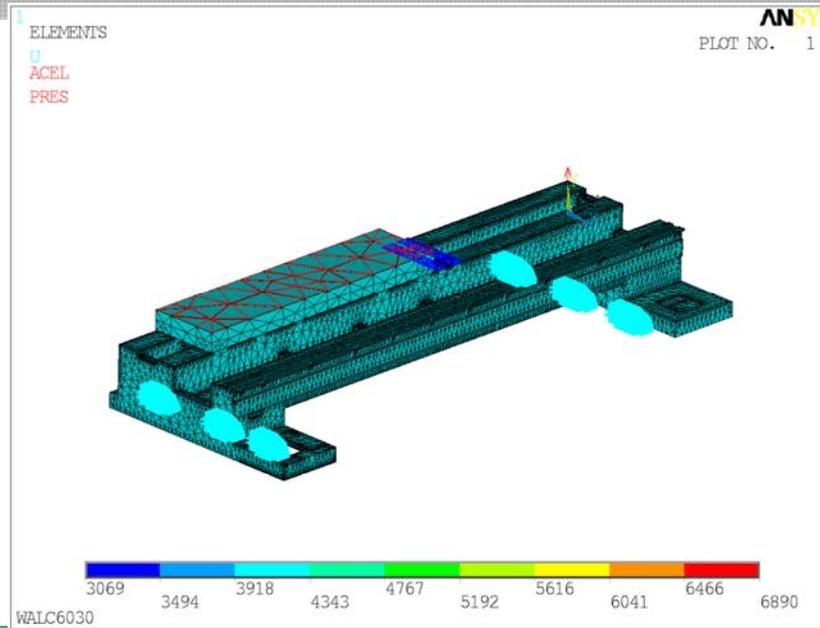
专家数据库显示

菜单选项

控制面板



双横梁龙门结构应力分析



宽幅面激光切割机床

横梁体两端固定，激光头在横梁上左右移动，由于激光器重量大，所以可以忽略激光头对结构的影响。仅考虑激光器的重力对结构的影响（红色压力面），和两个支架对的重力等效压力（蓝色面）。

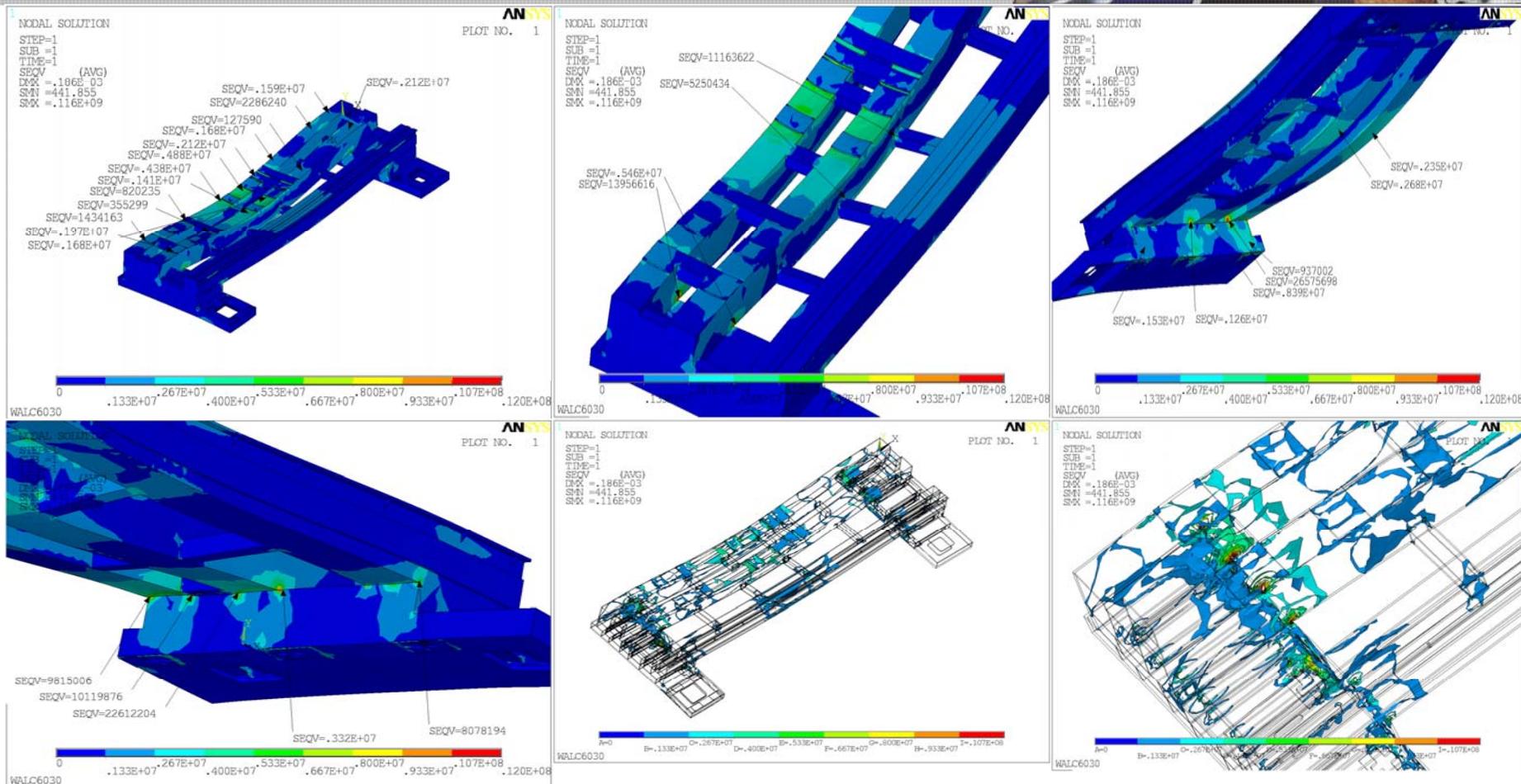


整体施加重力因数9.8N/Kg。在有限元分析中，采用SOLID92号实体单元对模型进行单元划分处理，网格规模达到22万单元。

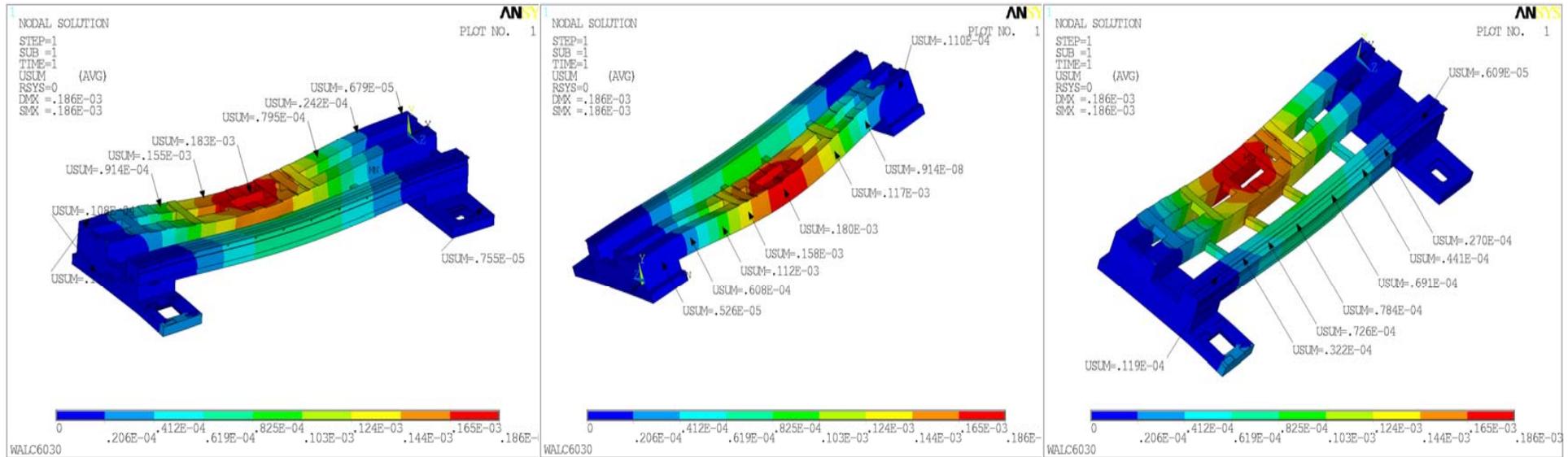
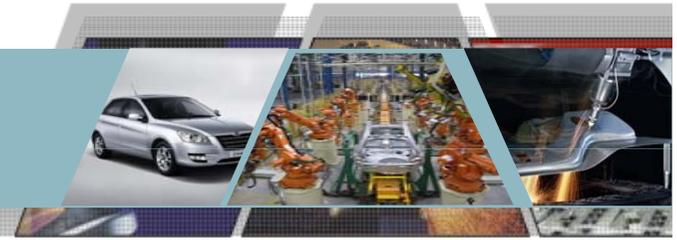
横梁的计算工况和边界条件

- 切割机工作时，承受的激光头重1500Kg和两个支架重量35.5Kg、33kg；
 - 工作时还承受横梁本身的重力
 - 两端固定底部。

Von. Mises应力分布云图



Von. Mises应力分布云图如图所示。横梁体与底座连接处以及横梁中间应力较大，形成的原因是该部分结构承受的载荷集中，变形较大。其中最大应力为116MPa。



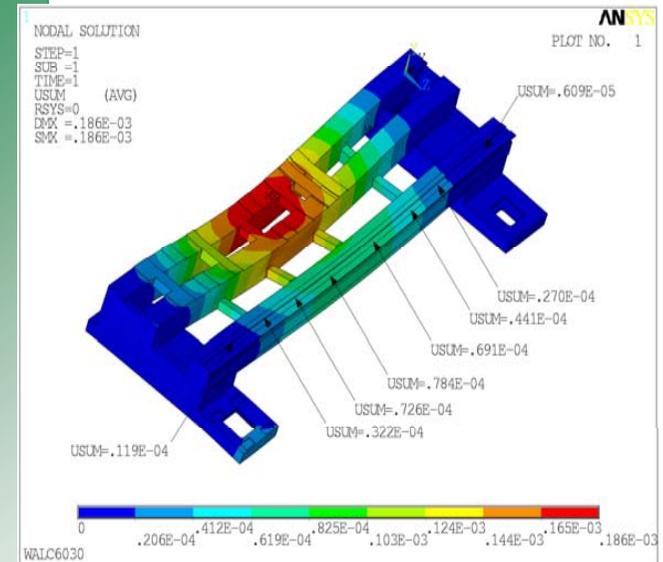
切割机机构位移云图

变形量最大位置位于横梁体上安装激光器的位置周围。最大变形为0.186mm。



从应力分布图上。横梁体上安装激光器的位置载荷处应力较大。还有横梁与底座的直角部位应力也比较集中。但是它们都远远低于Q235的屈服强度，所以从结构的强度上来说完全满足工作需要。

从位移分布云图看，横梁体上安装激光器的位置变形较大，这是正常的，而且由于中间有小横梁将激光器安装梁和Y轴安装梁连接，所以Y轴安装梁的变形也呈现与其类似的变形趋势。但是在上图可以看到**横梁上的导轨安装位置变形都不到1微米，而且分布也较均匀，所以机床的刚度也满足设计要求。**



机床震动特性分析

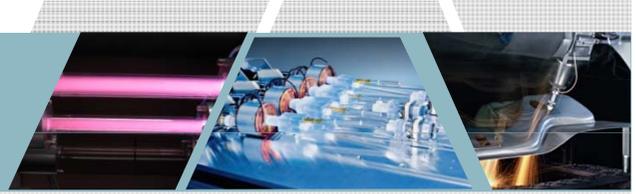


切割机床横梁体材料为**Q235**。

Q235常温下材料特性为：

- 弹性模量 $E=210\text{GPa}$
- 泊松比 $\mu = 0.3;$
- 屈服极限 $\sigma_s = 235\text{MPa};$
- 质量密度 $\rho = 7800\text{kg/m}^3。$

前16阶固有频率及振型

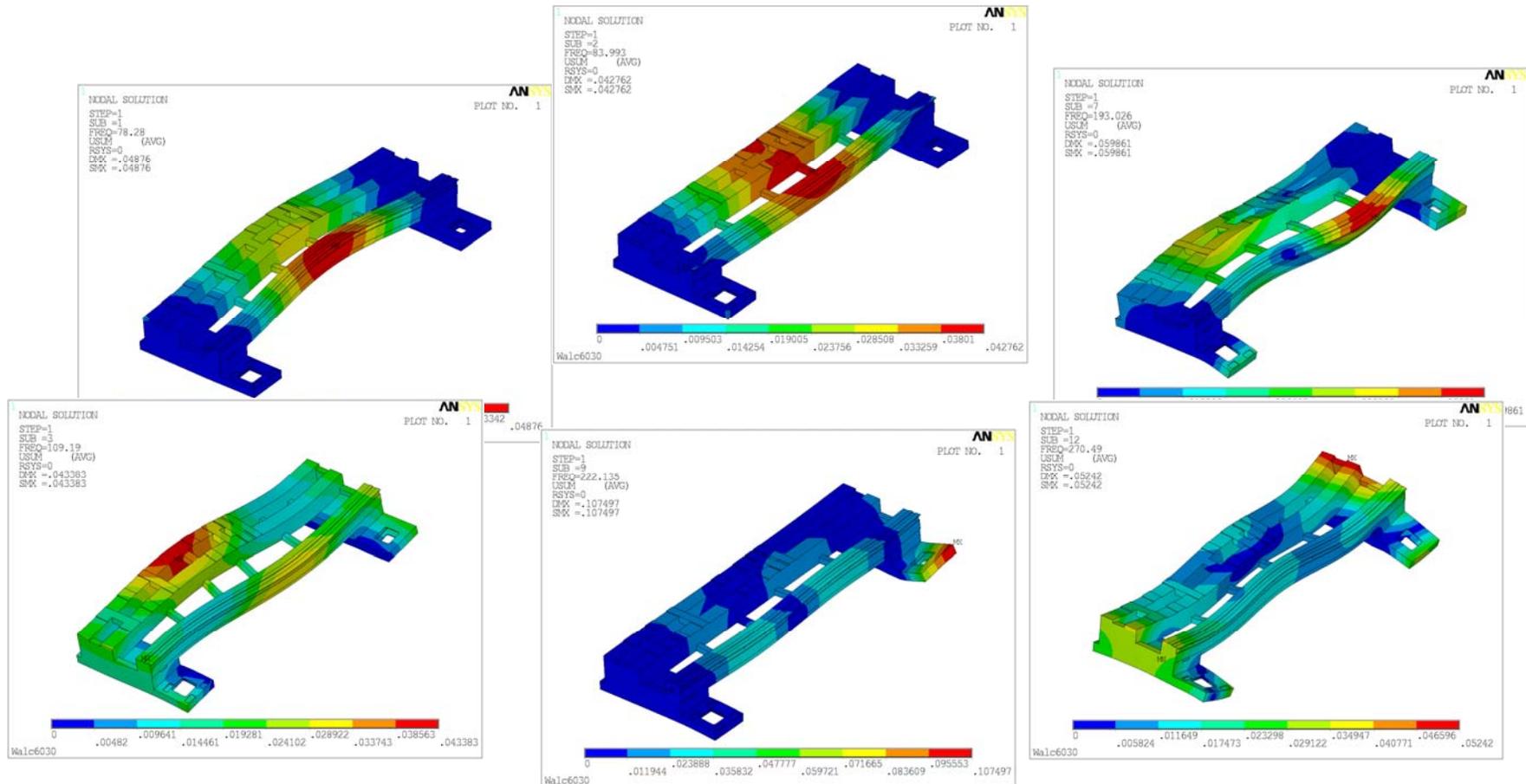


SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	78.280	1	1	1	
2	83.993	1	2	2	
3	109.19	1	3	3	
4	110.14	1	4	4	
5	162.67	1	5	5	
6	185.35	1	6	6	
7	193.03	1	7	7	
8	212.26	1	8	8	
9	222.14	1	9	9	
10	241.14	1	10	10	
11	256.81	1	11	11	
12	270.49	1	12	12	

可以看到WAL6030主体结构在工作状态下其前12阶固有频率均高于驱动电机频率的50Hz，所以动刚度较好，满足工作要求。



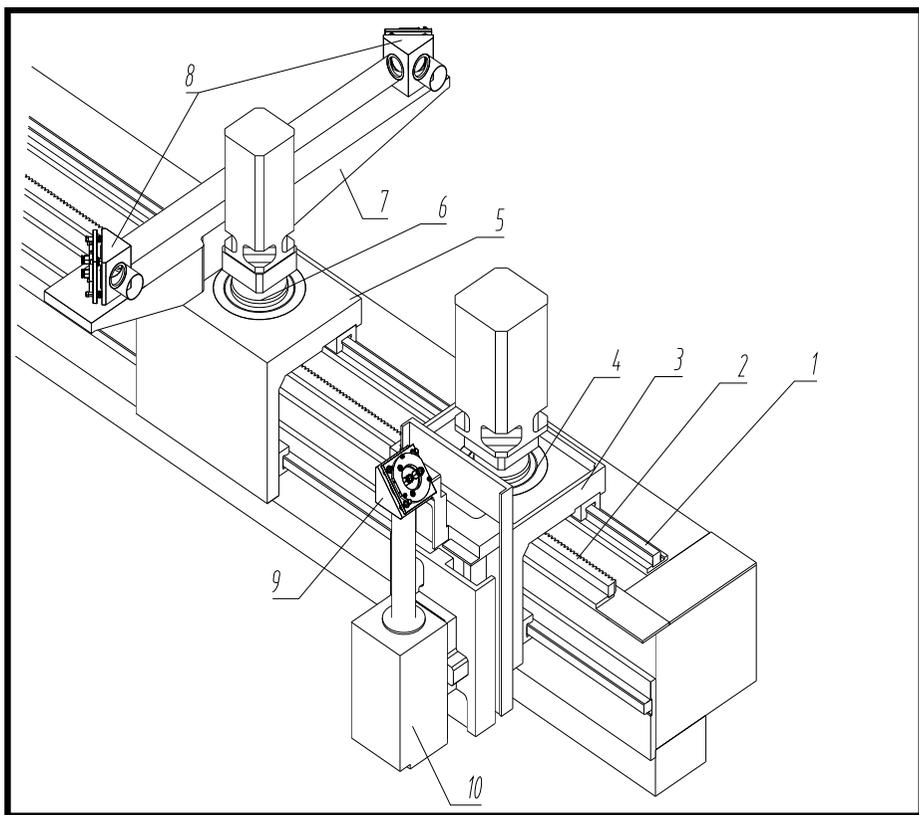
WAL6030主要结构的前16阶固有频率及振型



2.2 光路系统--关键技术之二



等光程机械结构设计



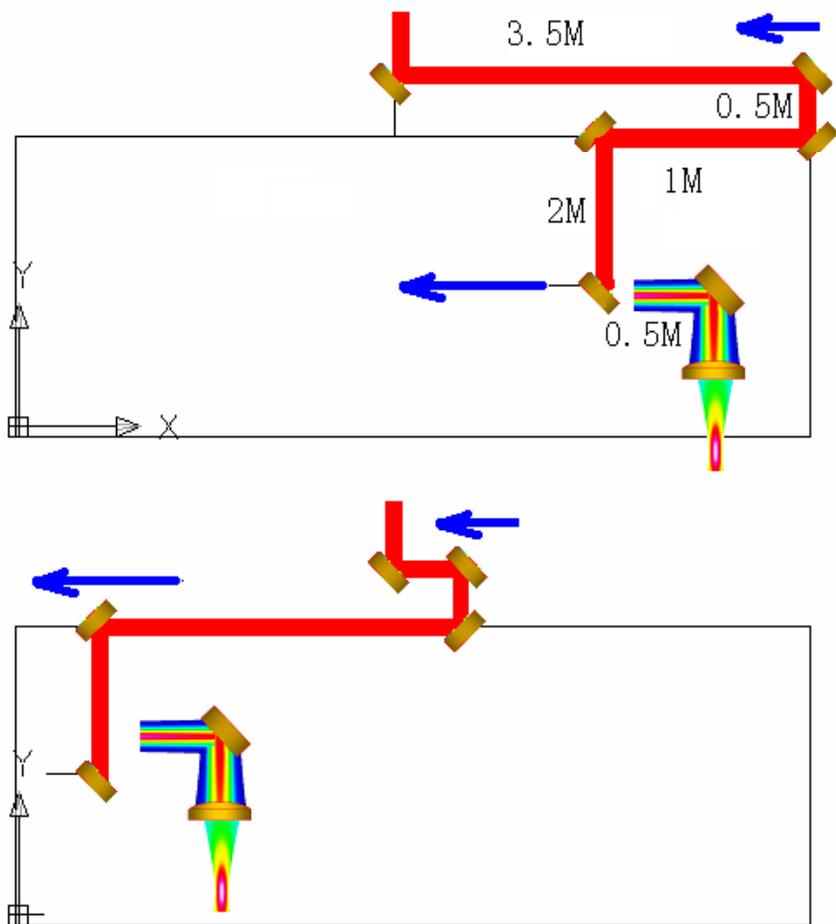
优点:

1. 等光程设计, 在大幅面切割头光程在最佳切割光程5-7m范围内
2. 适用于大幅面的飞行光路系统, 在工作区域任何位置, 加工质量一致辞。
3. 大幅面加工, 一次定位, 保证了加工精度
4. 切割机运行导轨与光路共轨, 保证了光路的稳定性



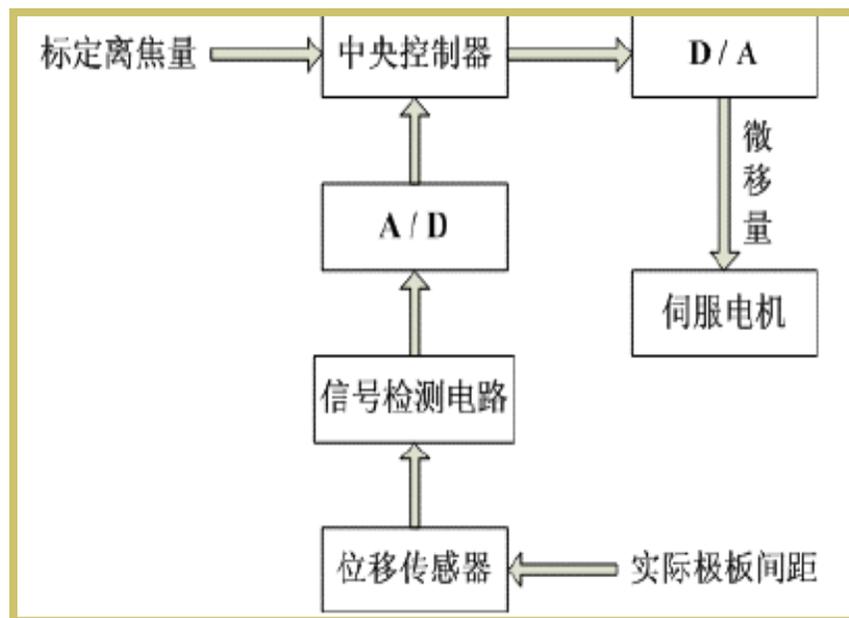
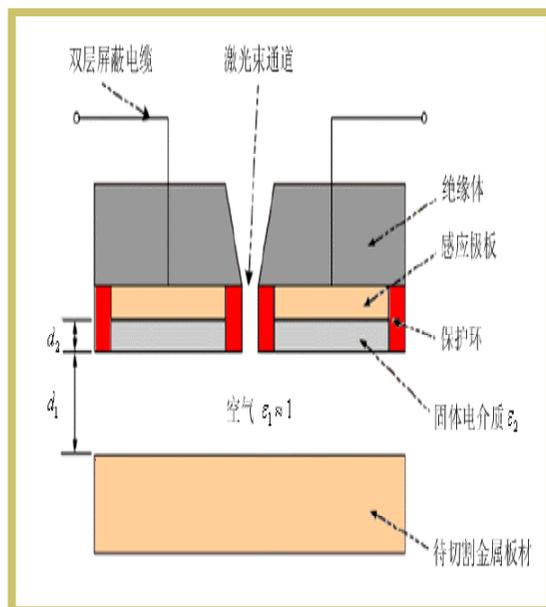
结论

- 对于飞行光路，在整个切割区域，光路长度保持不变。
- 这保证了一致的切割质量。

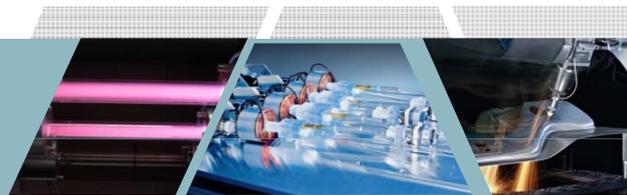




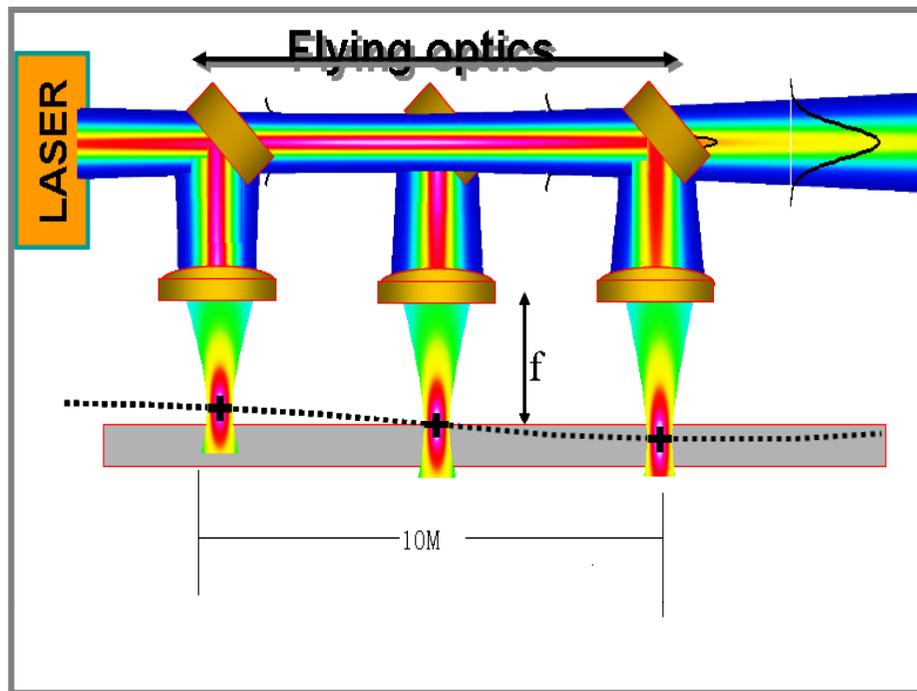
Z 浮的设计与实现



喷嘴（焦点）与工件表面距离高速自动跟踪



自动调焦单元

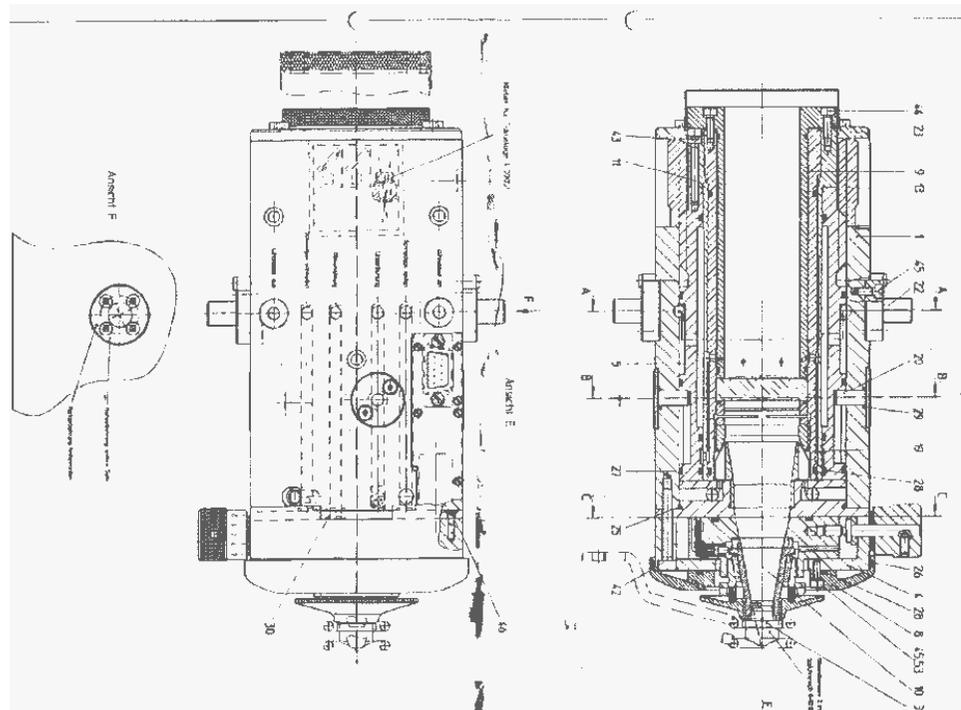


本切割头上装有经过工业实用验证的非接触式光度传感器，在激光加工过程中，它使切割头在工件上方始终保持规定的高度。

3.3 自聚焦切割头--关键技术之三

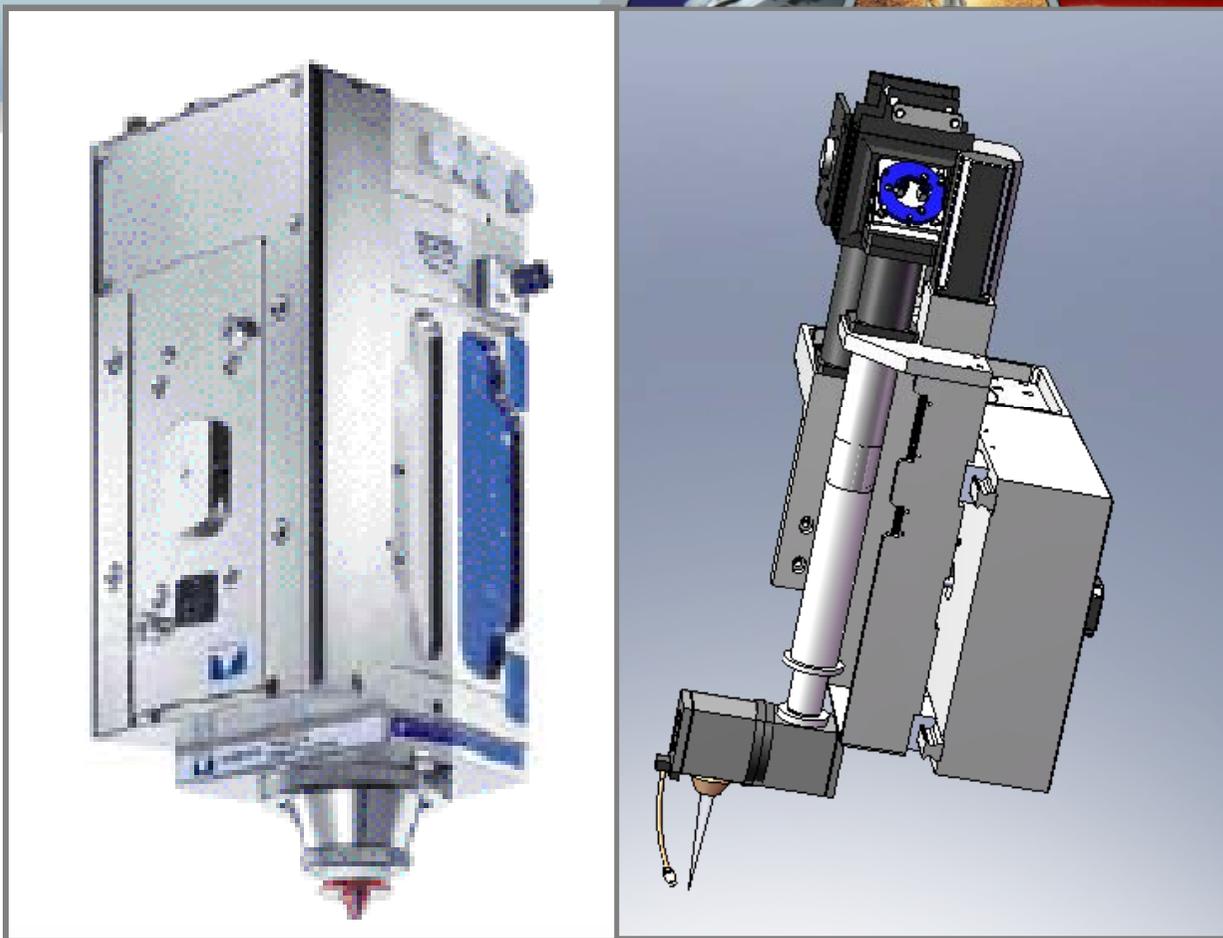


- 自动调整激光焦点:-15mm 到 5mm
- 板材高度自动跟踪, 精度 0.1mm
- 快速更换5" \ 7.5" 镜座, 自动冷却喷嘴



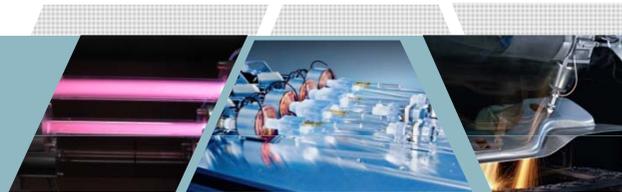
切割头设计

- 自动检边
- 电容高度跟踪
- 自动聚焦
- 切割监测
- 穿透检测
- 自动清洁喷嘴
- 安全防护系统



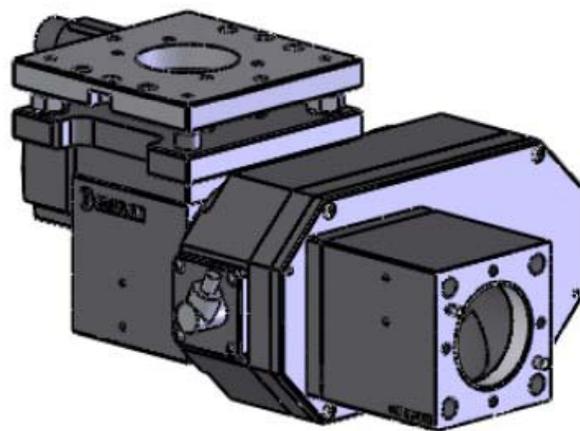
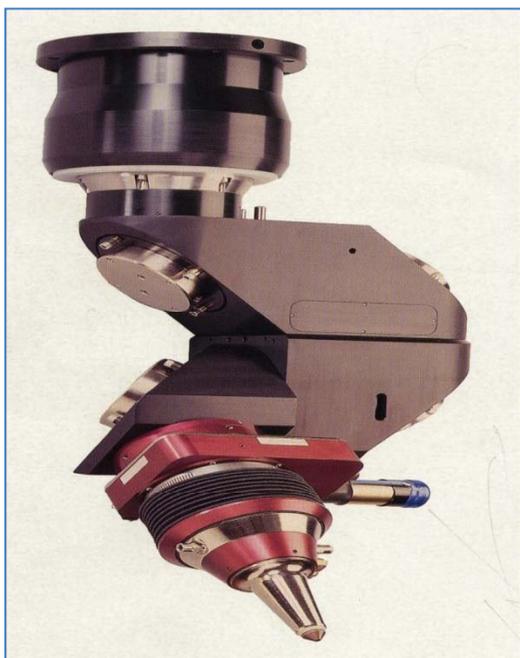
长焦深高功率自动调焦激光切割头、焊接头

要达到切割厚度30mm，激光器功率7KW，长焦深高功率激光切割头是完成切割的关键。



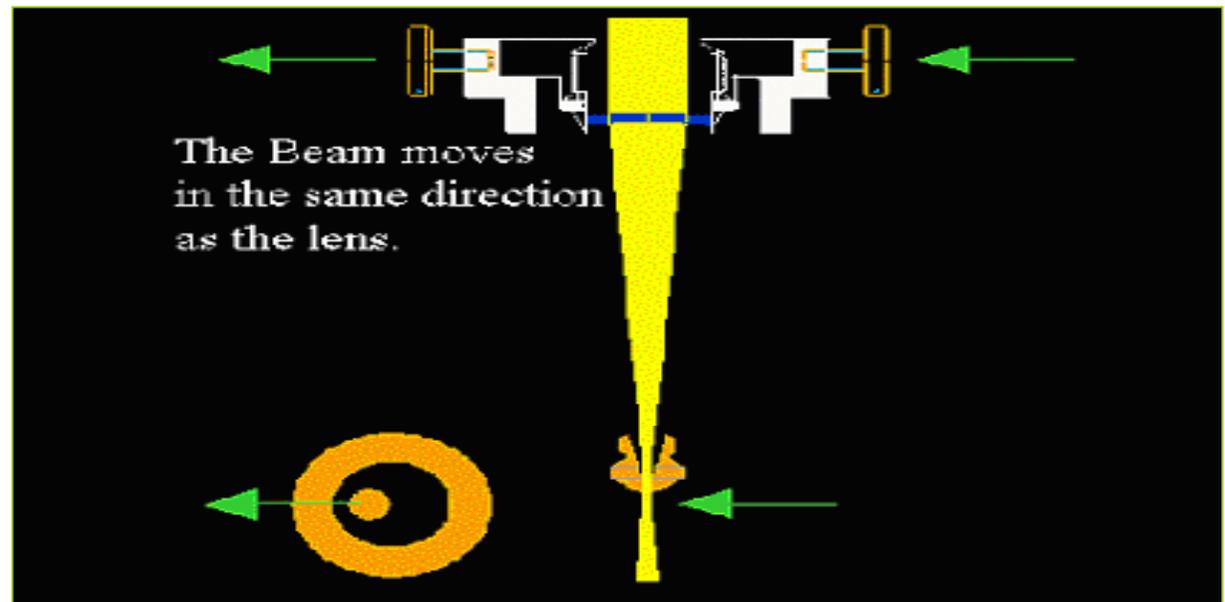
集成坡口切割头

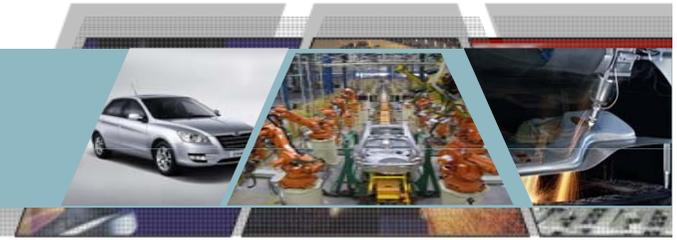
旋转轴A和旋转轴B集成光关节部件，与激光同轴，在轴旋转时，仍能保持激光的方向性，实现全角度的坡口切割。





The cutting head may be directly retrofitted an angle rotating machine, is rotated according to the desired angular position of the nose



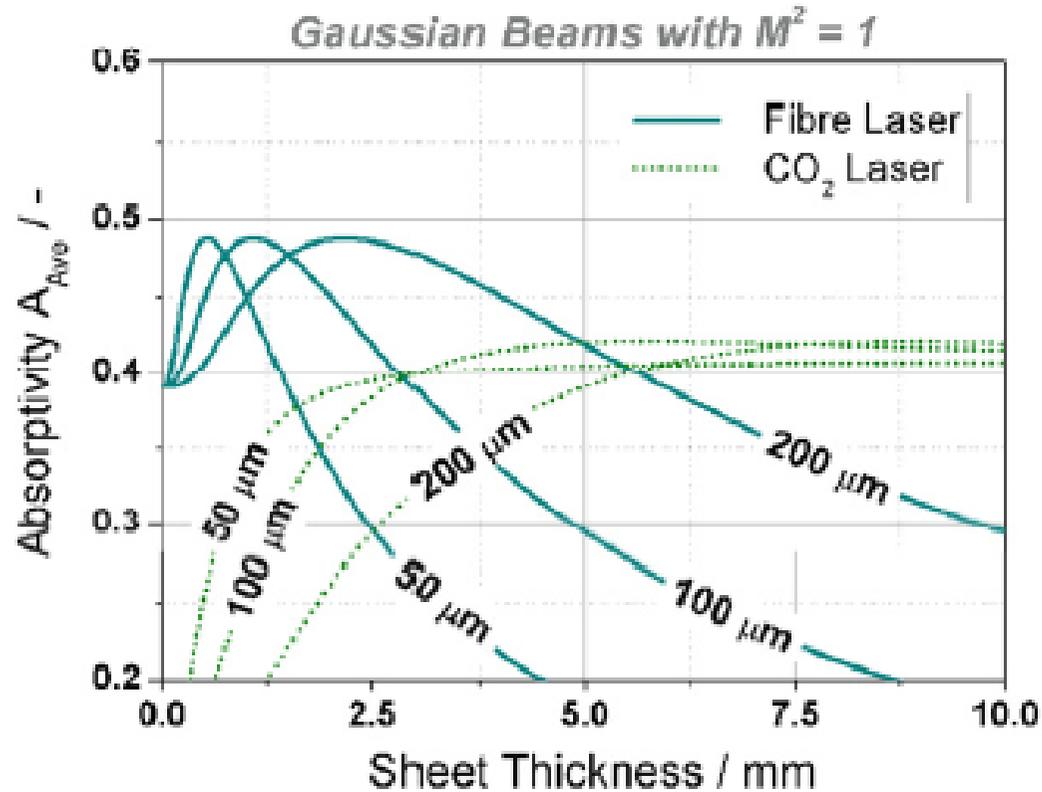


碰到障碍物后切割头
自动保护，光路自动
切断，数控自动锁死，
移开障碍物后自动快
速复位，无需调整外
光路，继续工作。



独特的360度防碰撞激光切割头

3.4 激光器选择--关键技术之四



不同波长下板厚与材料
吸收率的关系

By A. Mahrle & E. Beyer.

德国Fraunhofer激光研
究所

CO₂激光器是厚板激光切割装备中的最佳配置激光器



- 当板厚度小于**6mm**，光纤激光器（**1um**）吸收率更高些；
- 当板厚度近似等于**1mm**，会得到高的吸收率和切割速度；
- 当板厚度大于**6mm**，**CO2**激光器（**10um**）的材料吸收率更好，其切割速度和质量都优于光纤激光器。

CO2 激光器是厚度大于10mm的厚板激光切割的

最佳选择。



高功率、高性能 CO₂ 激光器

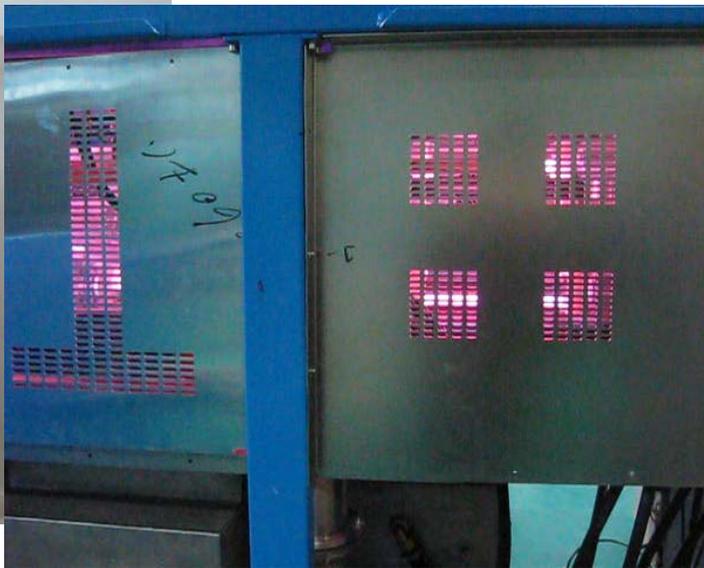
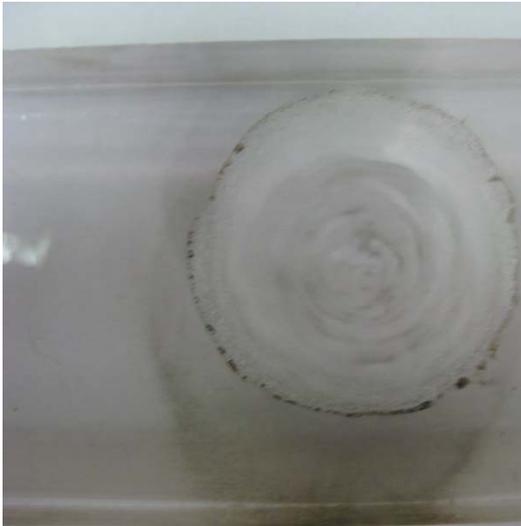


轴快流CO₂激光器



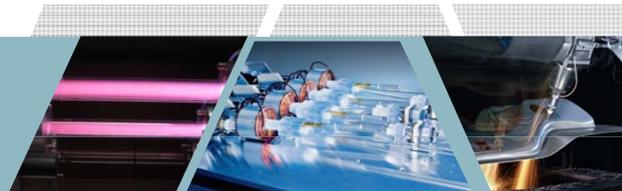
射频板条CO₂激光器

一般的，轴快流和射频板条CO₂激光器是厚板激光切割中最重要的高功率激光源。



HUST--- 7 KW射频激励轴快流 CO2 激光器样机

HUST---2KW CO2 SLAB LASER

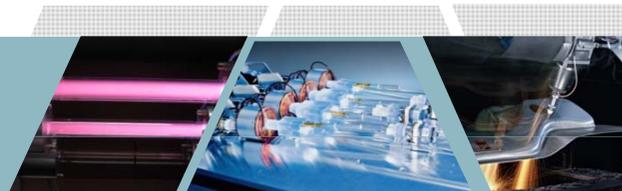


功率计读数
(2.25kW)



输出光斑模式—LASER MODE

2.5 厚板激光切割工艺--关键技术之五



厚板切割的机制， **O₂**辅助激光熔切。

主要特点

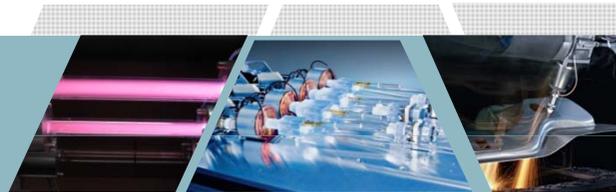
(1) 打孔

(2) 坡口

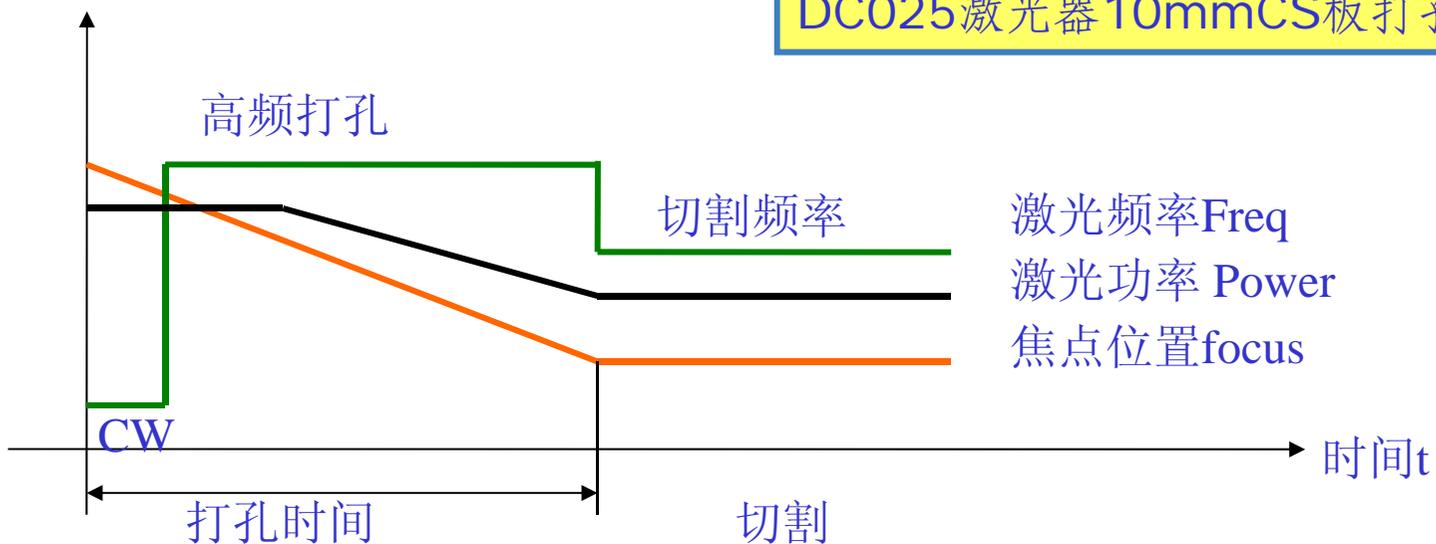
(3) 渗透检测

(4) 防反射

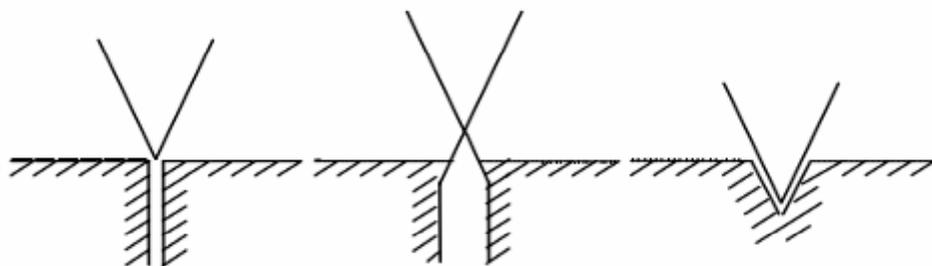
(1) 厚板打孔工艺



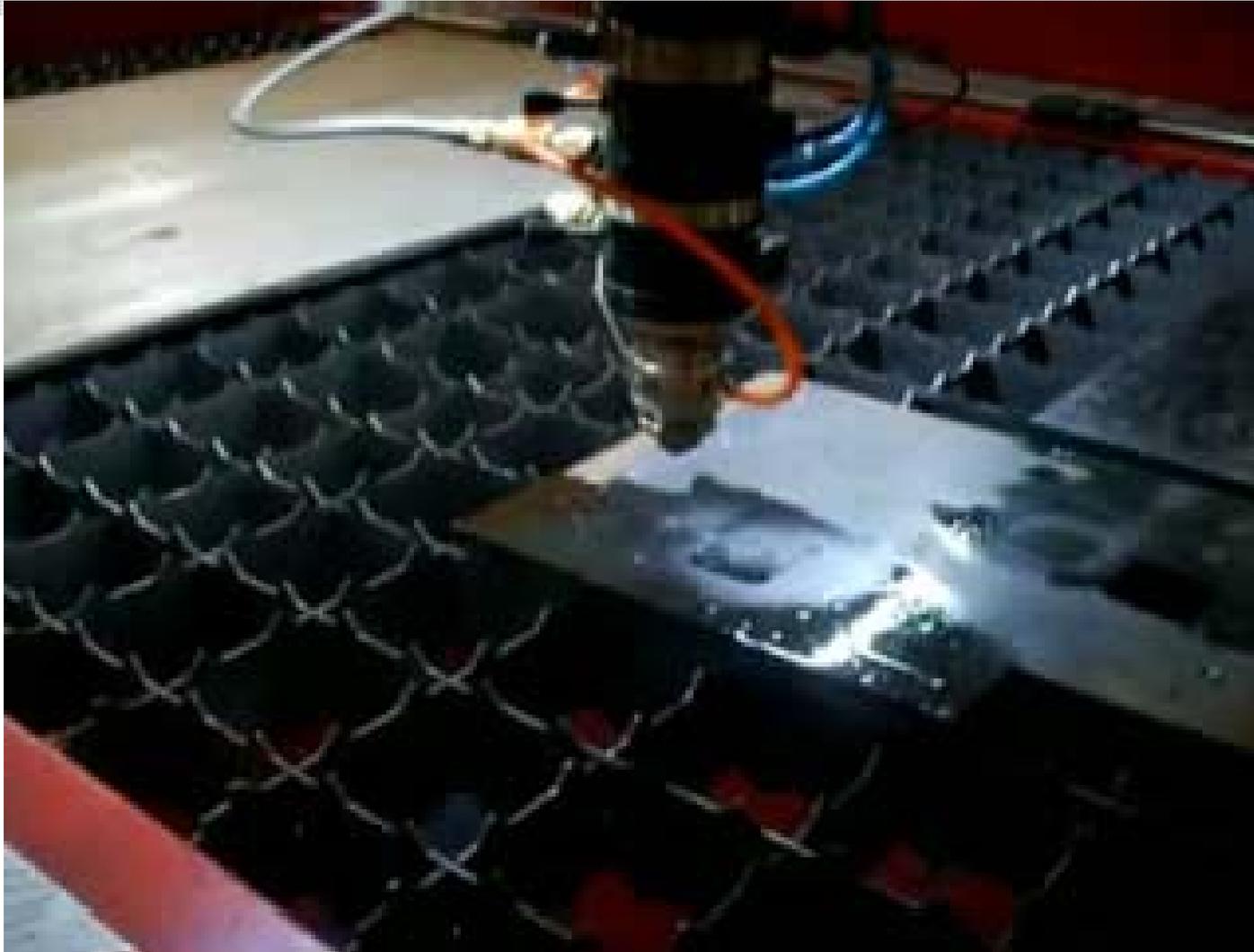
DC025激光器10mmCS板打孔时间：1.6S



变换打孔工艺参数

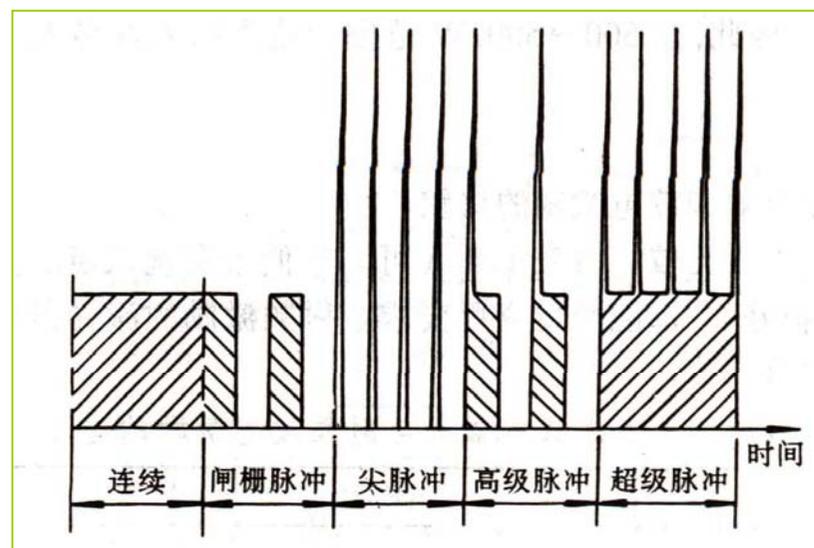
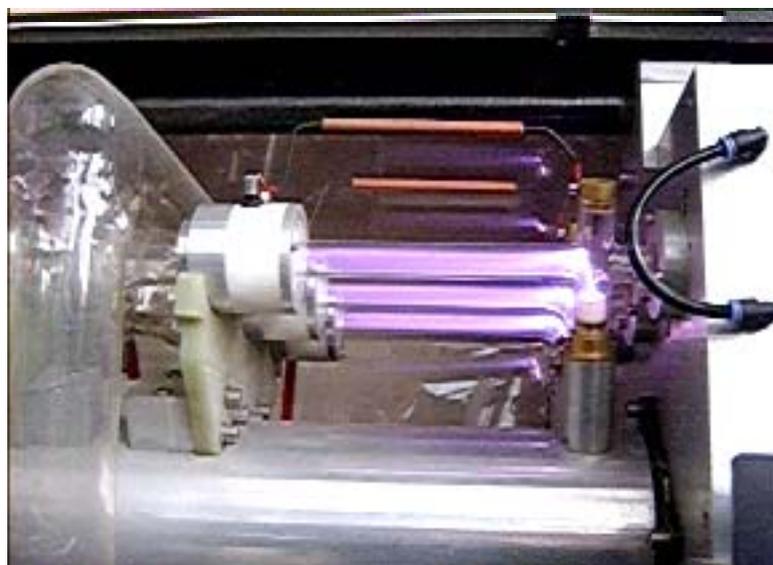
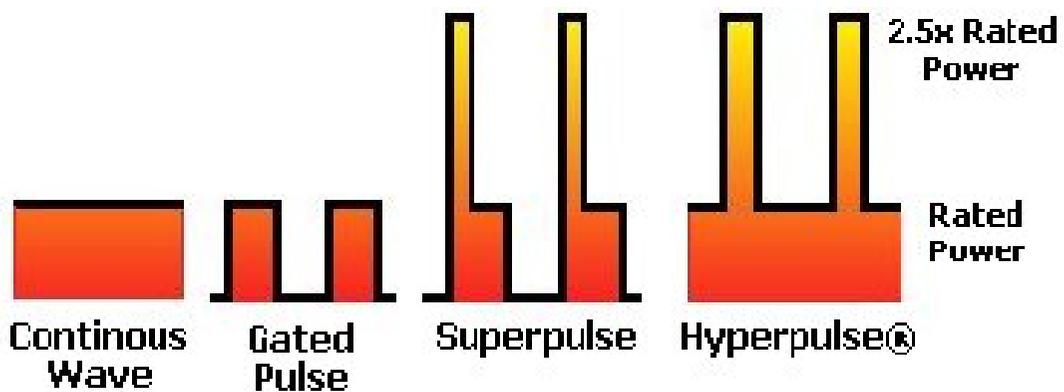
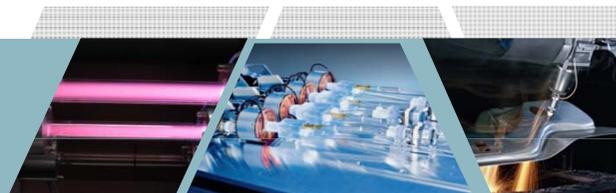


激光焦点不同位置示意图

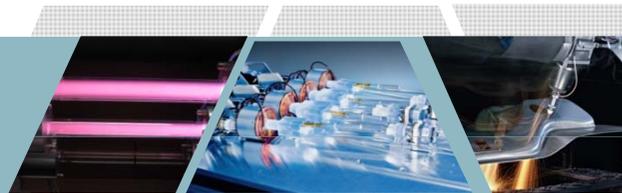


厚板打孔、切割

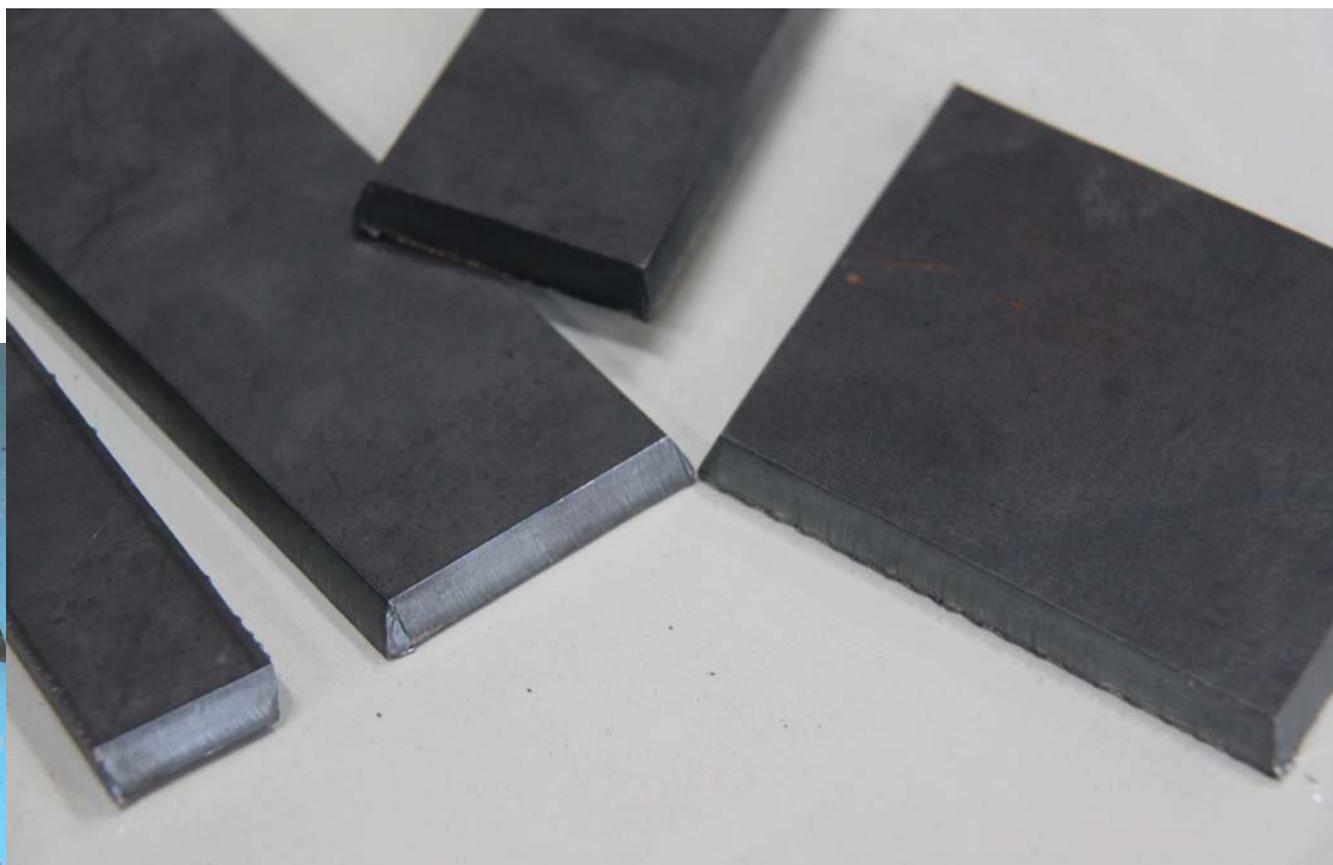




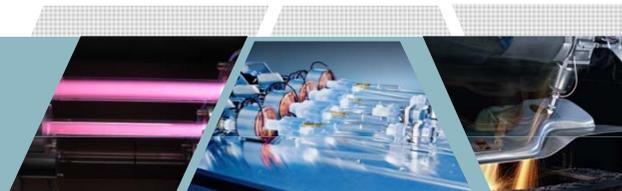
超脉冲激光打孔



(2) 坡口切割---厚板切割的典型特点---为焊接做准备



坡口切割

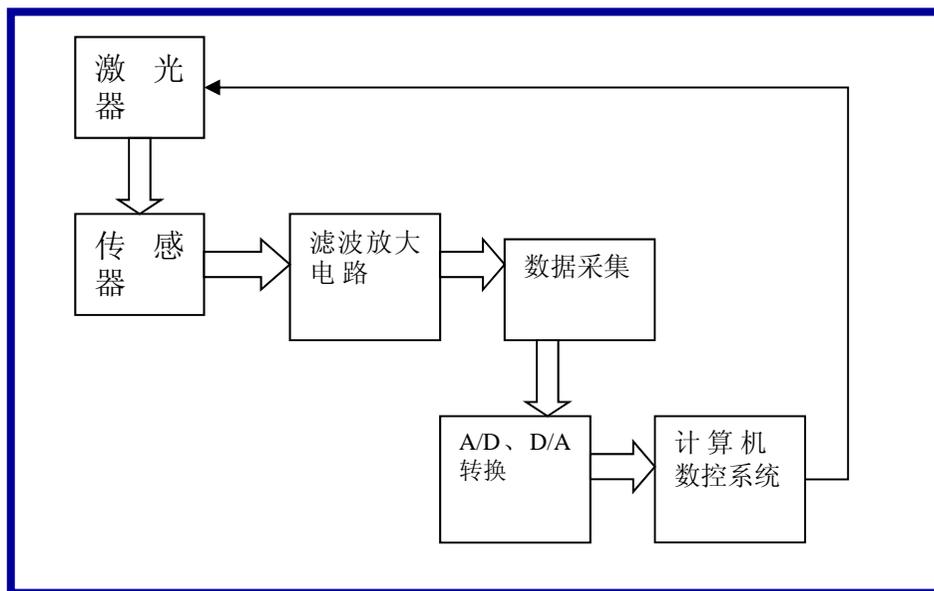
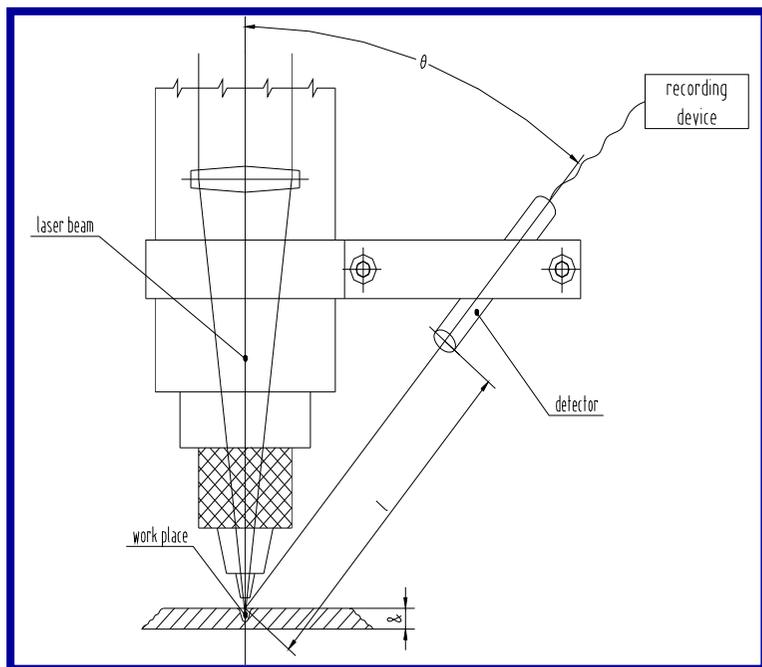
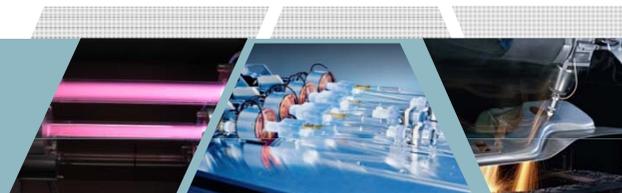


国内激光切割行业领军企业
激光切割技术世界领先企业

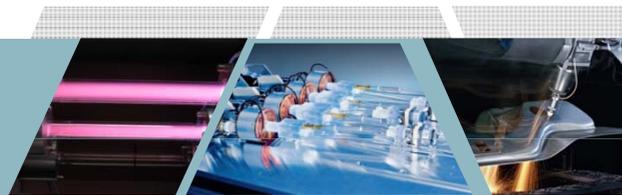
FARLEYLASERLAB

www.farleylaserlab.cn

(3) 激光穿透检测



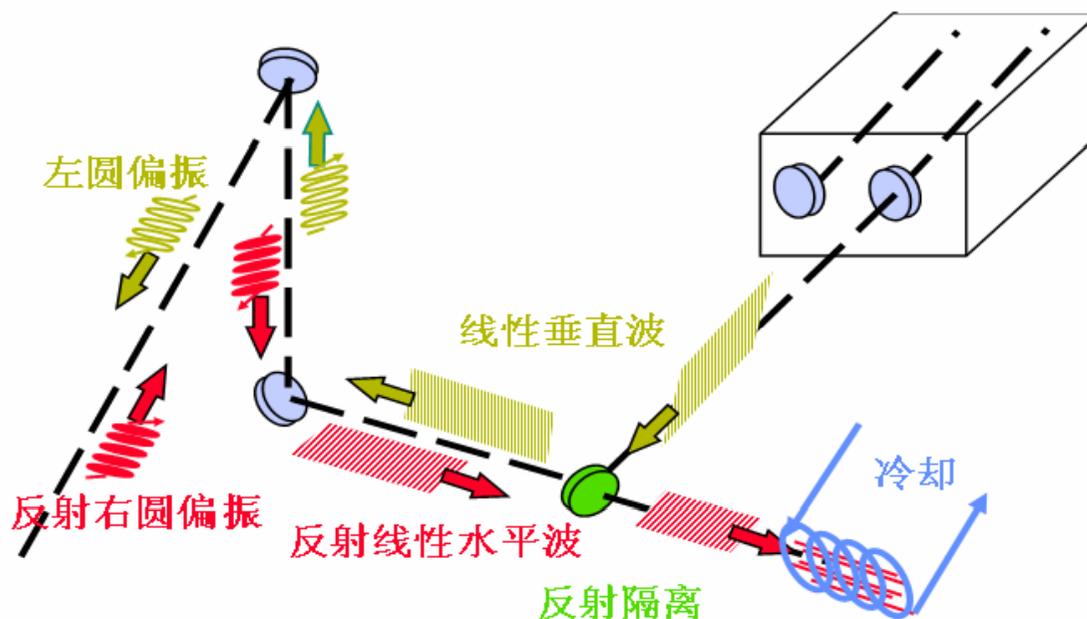
基于红外技术的脉冲打孔穿透检测方法，保证了高质量的穿透效果



(4) 防反射

对非金属材料的高功率激光切割，防反射保证了切割头不会被损坏，切割头装有防反射光学镜组。

Reflection Absorption



三、厚板激光切割展望



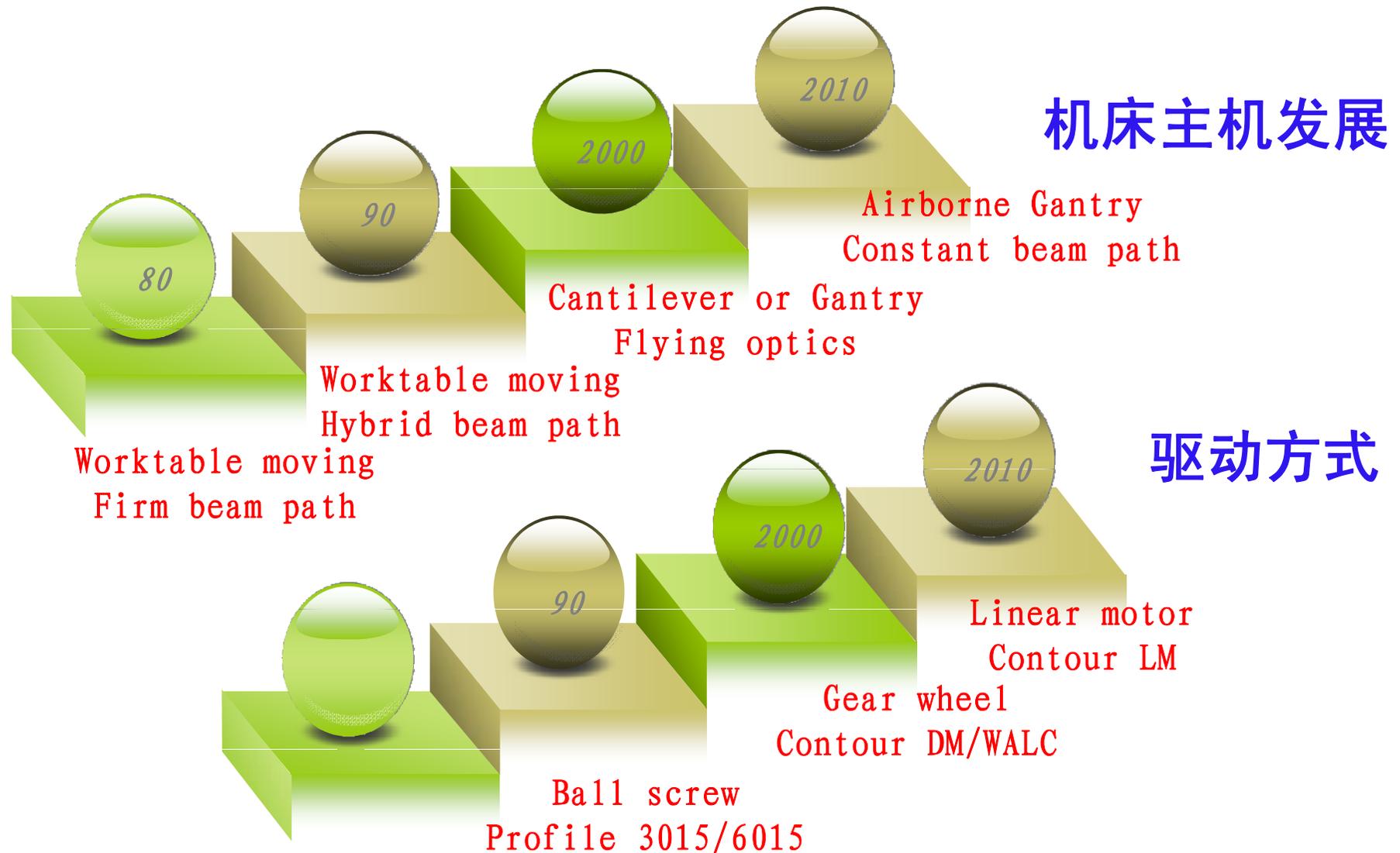
- 整体发展趋势
- 切割、焊接一体机
- 光纤激光器切厚板
- 有色金属厚板切割
- 半导体激光器直接切割厚板

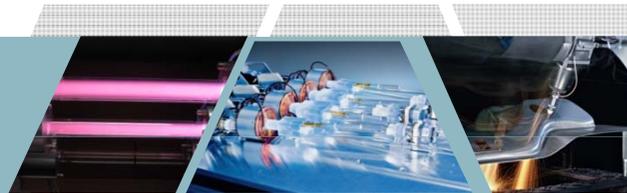
3.1 整体趋势

(1) 厚板切割：火焰—等离子体—激光

Items	Flame Cutting	Plasma Cutting	Laser Cutting
Material	Mild steel	Mild steel, Stainless steel, Aluminum	<25mm Mild Steel, <15mm Stainless steel, Aluminum,
Quality	Huge heat affection A lot of burs Bad precision	Small heat affection A few burs Bad precision	Little heat affection Few burs Good precision
Efficiency	Long preheating More pierces Low speed	Fast piercing Good speed	Very fast piercing Fast speed
Cost	Low efficiency Low machine cost Big using cost	Good efficiency Good machine cost Low using cost	High efficiency High equipment cost Low operating cost

(2) 激光切割系统结构的发展趋势

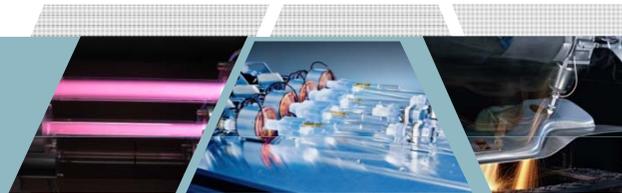




(3) 产业规模发展趋势---产业基地会越来越来大

如武汉法利莱----已经在葛店建立生产基地，年产400台套能力，形成3m*12m,4m*20m,5m*30m 的机床配套3KW-7KW激光器的大幅面激光切割机系列产品。





3.2 切割焊接多功能一体机



大幅面激光切割焊接一体机

3.3 光纤激光器切割、有色金属切割



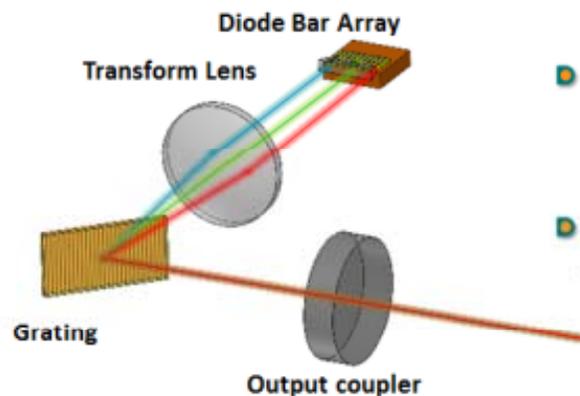
光纤激光器切割铜板

3.4 高功率半导体激光切割厚板



direct-diode lasers can offer compelling advantage.
Using Beam Combining to Increase Brightness

Disruptive Simplicity



- Invented at MIT
- Exclusively licensed to TeraDiode



The “DIOCUT” system enter the laser macro cutting market. The system is demonstrated by cutting aluminum, stainless steel, copper and mild steel. The cutting edge quality is comparable with CO2 laser cuts.

LIMO-----2 kW diode laser system



The 2 kW DIO CUT system can be applied in oxygen cutting. The cutting edge quality is comparable and the speed is very close to the speed of fiber and CO₂ lasers.



Laser oxygen cut mild steel



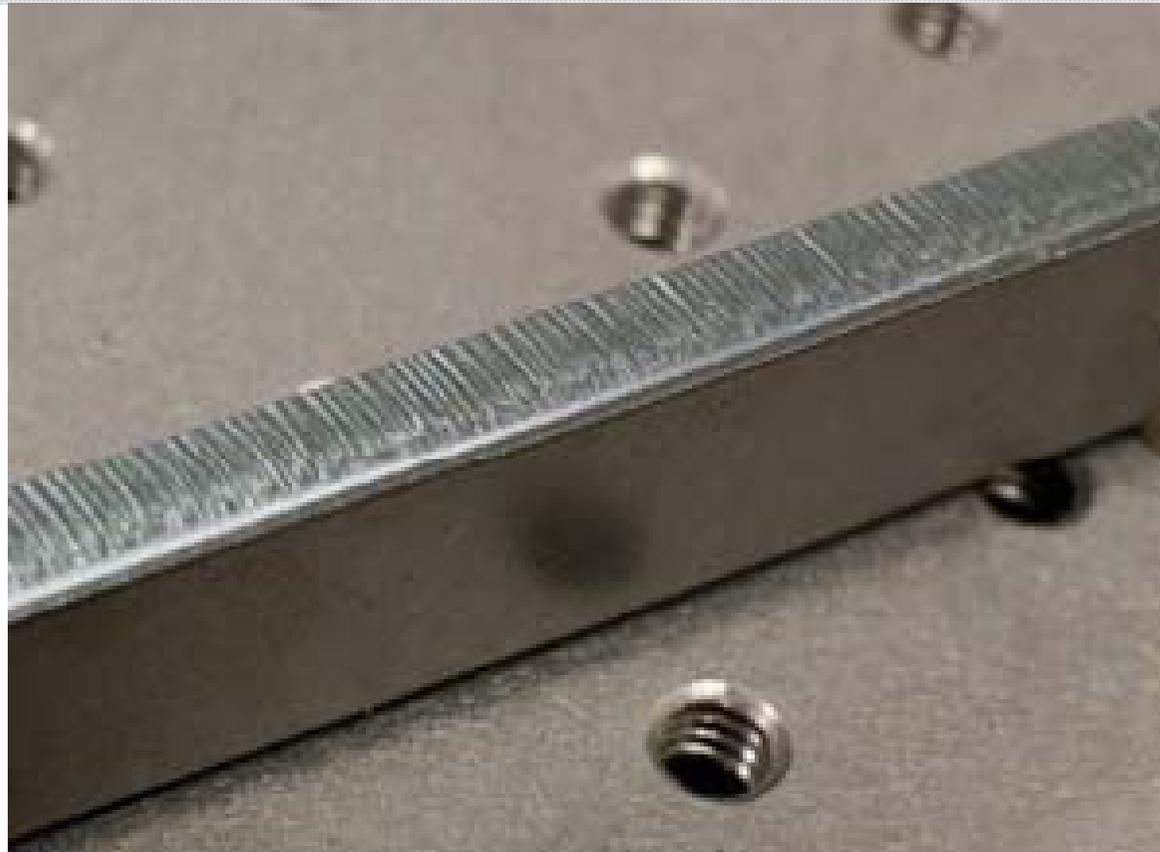
美国TERADIODE

2kW Direct Diode Laser System at 970nm with 100 μ m fiber

Key Specifications & Features

- **Beam parameter product of 4mm-mrad**
- **<50 μ s rise/fall times**
- **40% wall plug efficiency**



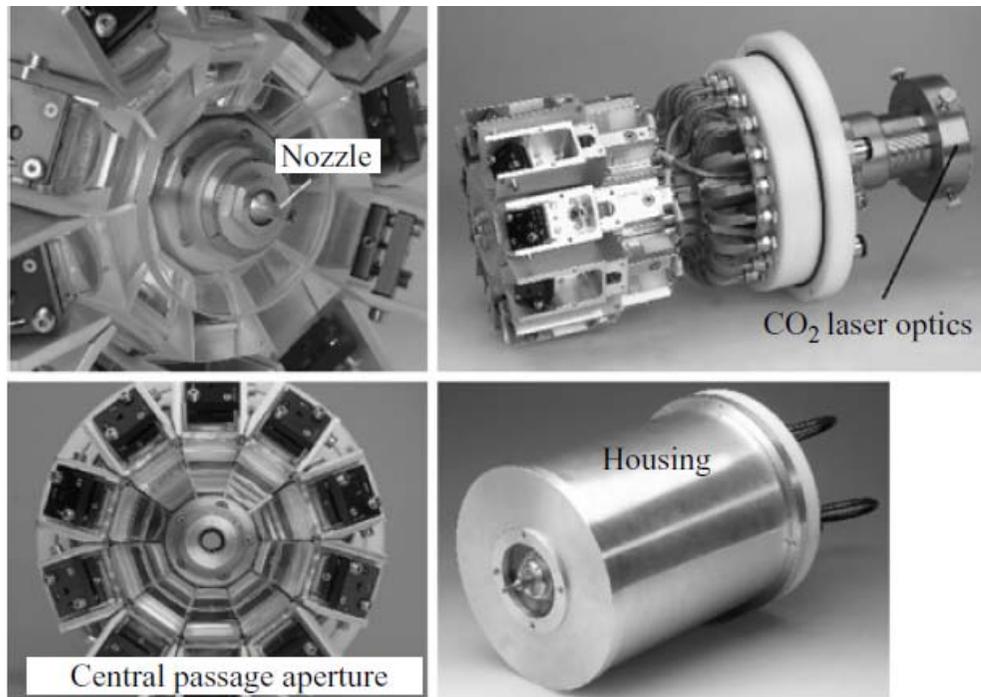


6mm thick mild steel, cut with TeraDiode's 1 kW laser and oxygen assist gas.

Annular diode laser beam device



The device contains ten adjustable diode laser modules that are coaxially arranged around a hollow cylindrical carrier. The central passage is CO₂ laser .



For oxygen cutting applications, Oxygen is fed toward the center of the annular beam via a passage aperture and a Laval nozzle that is located at the aperture's end.



Autogenous cutting

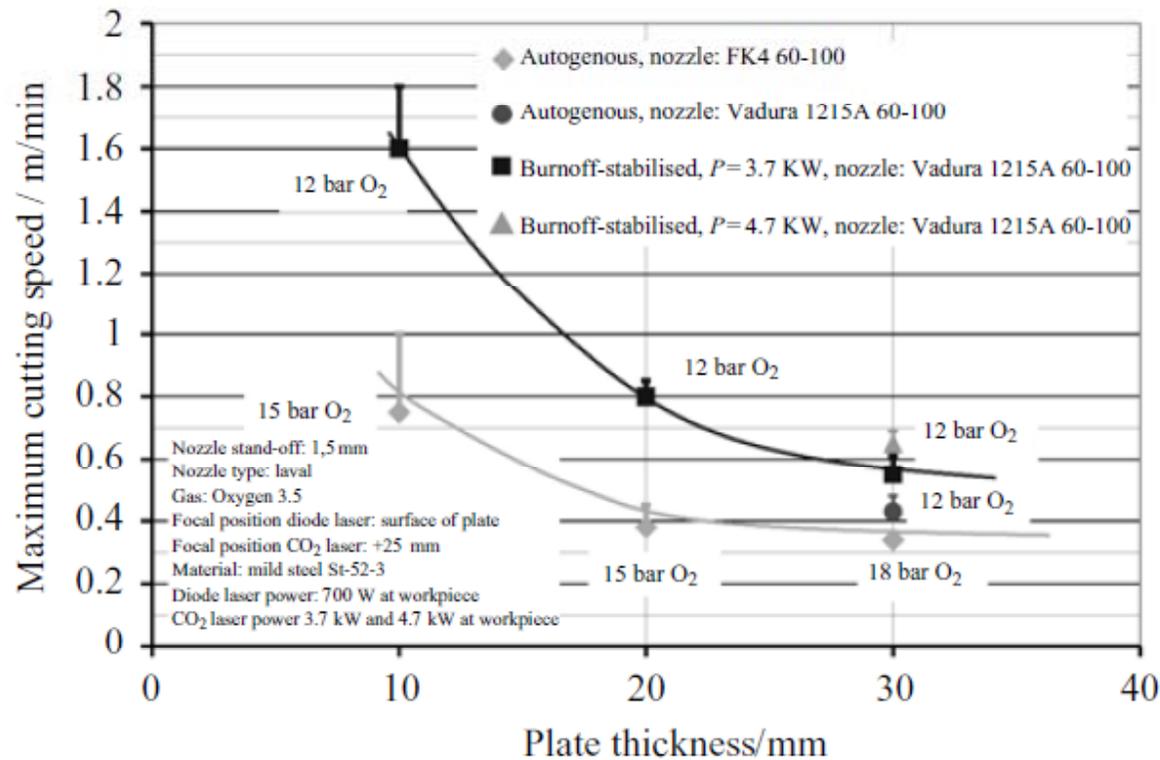
of 10-mm mild steel

St52-3 with 700-W

diode laser

power+2KW CO2

laser. $v=0.45$ m/min



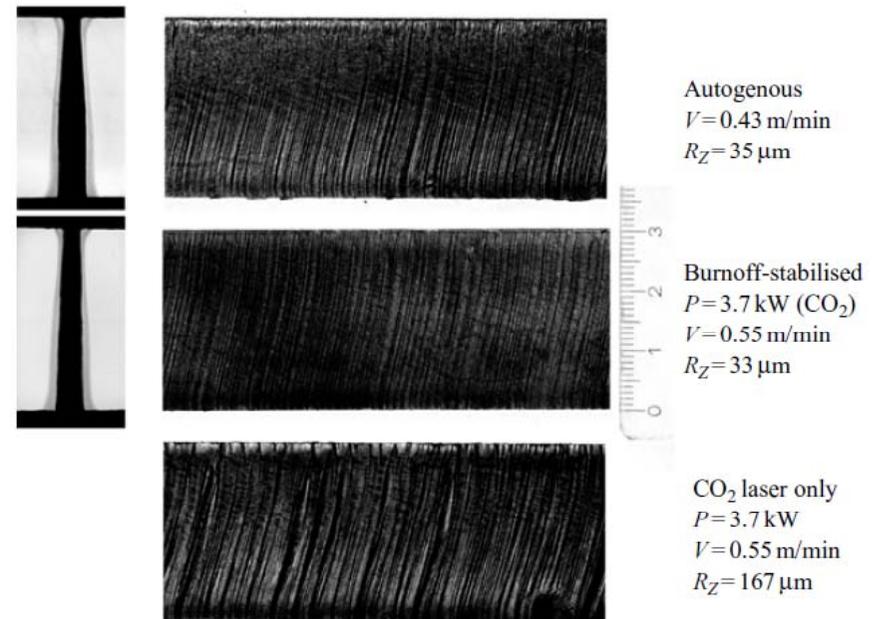
The achieved maximum cutting speeds during autogenous and burnoff-stabilized laser beam oxygen cutting of mild steel versus the plate thickness.



Cut kerfs and cut edges for autogenous cutting, burn off-stabilized cutting and laser beam oxygen cutting with the CO₂ laser only



Autogenous contour cuts in 10mm mild steel ($v=0.45$ m/min, nozzle:FK4 60-100)



Material: St 52-3, 30 mm
 Nozzle: Vadura 1215A 60-100
 Nozzle stand-off: 1.5 mm
 Gas: 12 bar oxygen 3.5
 Diode laser power: 700 W at workpiece
 Focal position diode laser: surface
 Focal position CO₂ laser: +25 mm



结束语

厚板激光切割具有大市场、大厚度、大幅面、大功率。

谢谢！

唐霞辉：txh1116@hust.edu.cn

13908648657

