

金刚线切割机主切割单元参数研究

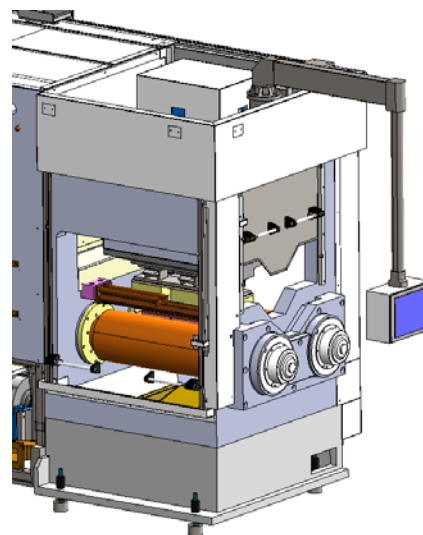
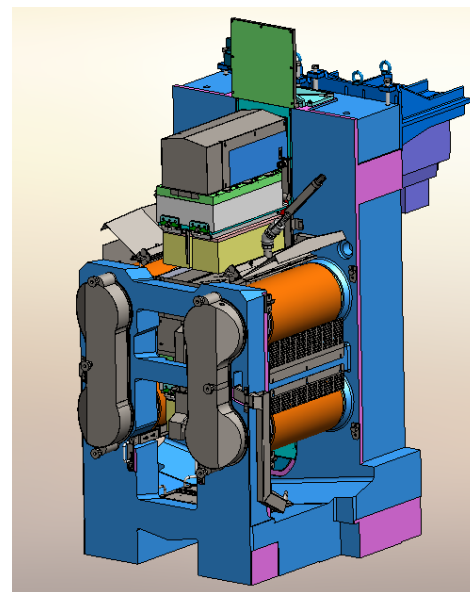
顾建明

常州贝斯塔德机械科技有限公司

北京 金刚线切割产业化应用研讨会 2014年4月22日

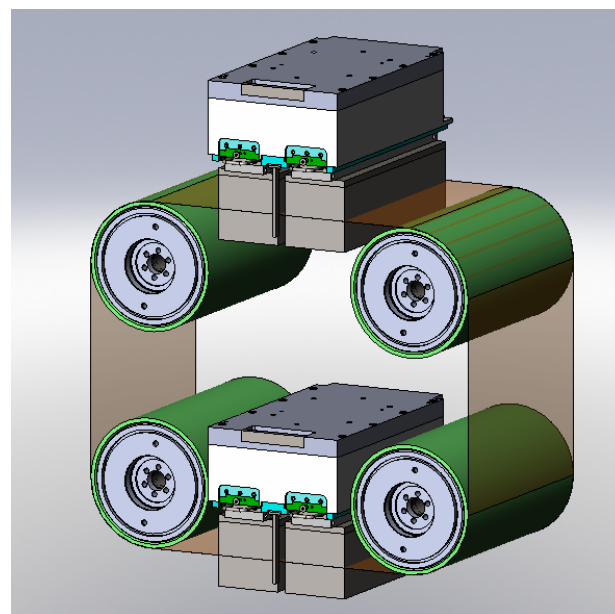
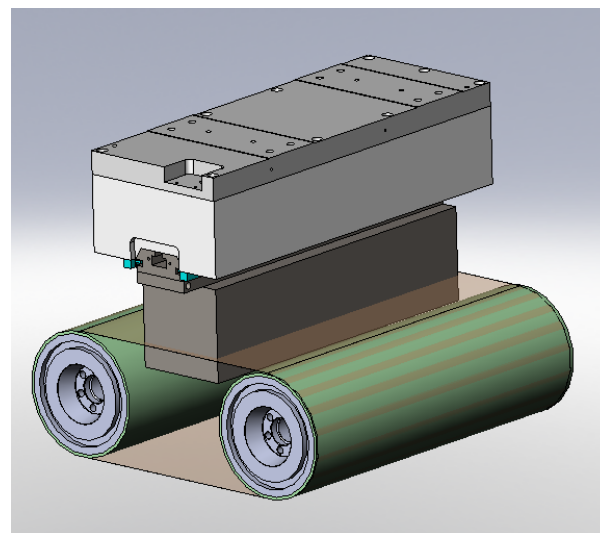
金刚线切割机主切割单元参数研究

- 一、金刚线切割原理
- 二、多线切割受力模型分析
- 三、切割主辊参数研究（直径、长度、中心距等）
- 四、切割线速度、加速度研究
- 五、BSMT金刚线切割机器介绍



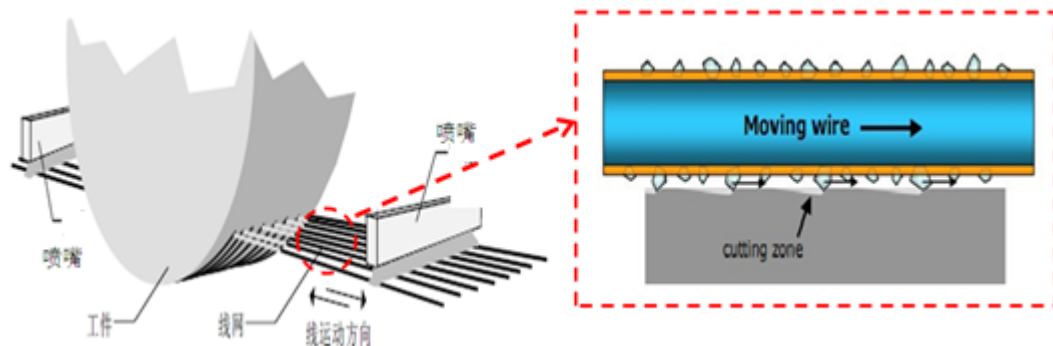
切割单元主参数

- 线速度 v ，加速度 a
- 进给速度 f
- 切削力 F ，切削功率 P
- 导轮直径 D ，导轮长度 L_0
- 导轮中心距 L
- 导轮数量 n

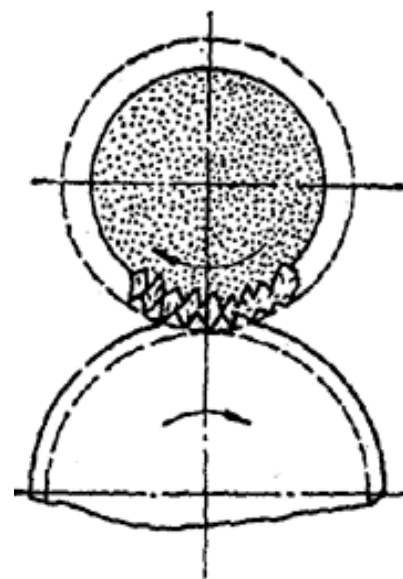
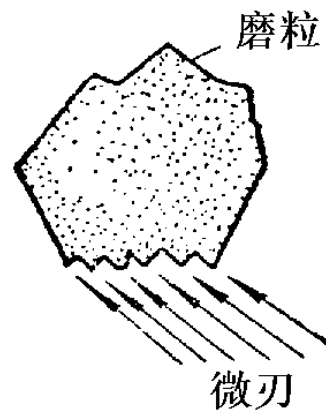


一、金刚线切割原理

金刚石作为刀具加工脆硬材料的应用比较广泛，金刚石砂轮磨削是典型的应用之一。金刚线切割微观切削机理与砂轮磨削类似。



- 磨粒在钢丝/砂轮工作表面上是相对均匀的随机分布
- 每一颗磨粒的形状和大小都是不规则的



一、金刚线切割原理

➤ 磨粒的特点

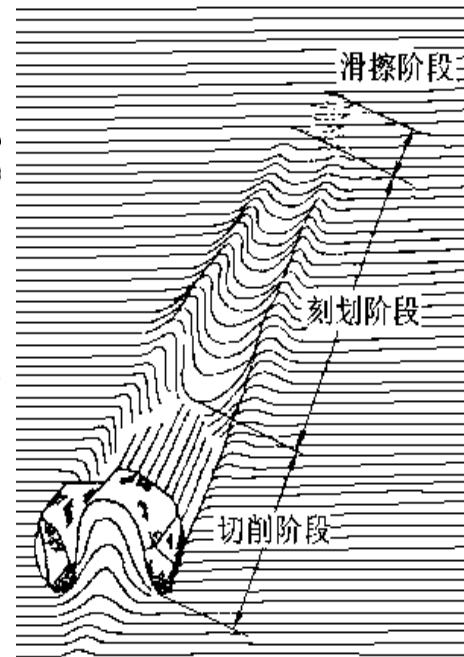
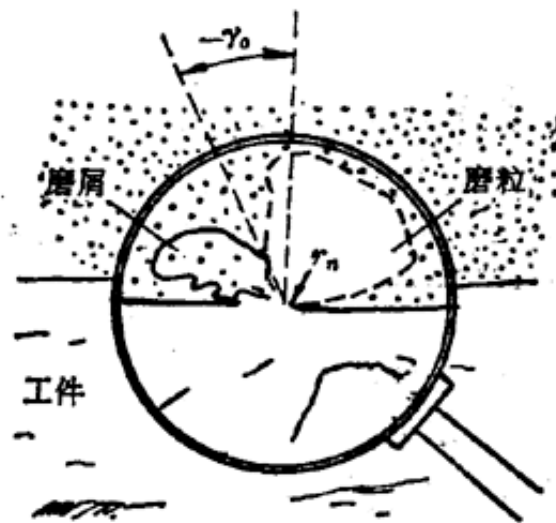
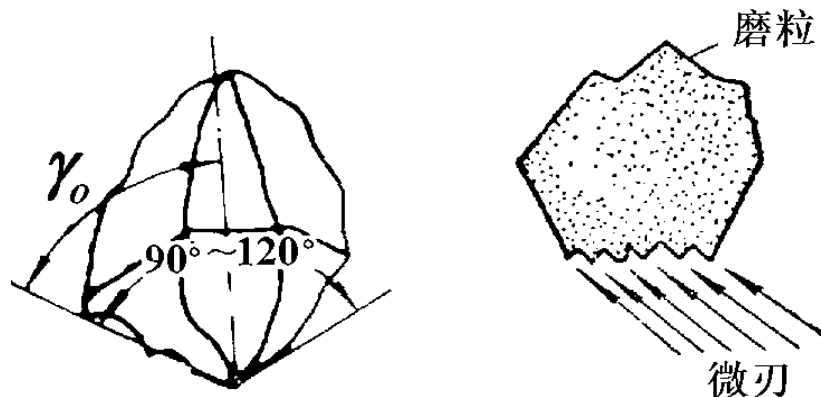
- ◆ 磨粒形状不规则，其刀尖角为 $90^\circ \sim 120^\circ$ 均为负前角。
- ◆ 磨粒的切削刃为空间曲线，前刀面为空间曲面且形状不规则。
- ◆ 磨粒的切削刃有几个至几十个微米的圆角，经过修正磨粒上会出现微刃（砂轮磨削）。

➤ 单颗磨粒的切削过程

滑擦—刻划—切削

磨削基本上为大的负前角切削

滑擦和刻划较其它切削方法严重得多

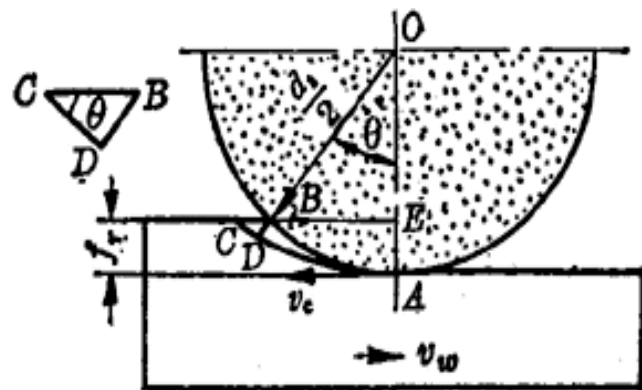


一、金刚线切割原理

➤ 单个磨粒的切削厚度 (砂轮磨削)

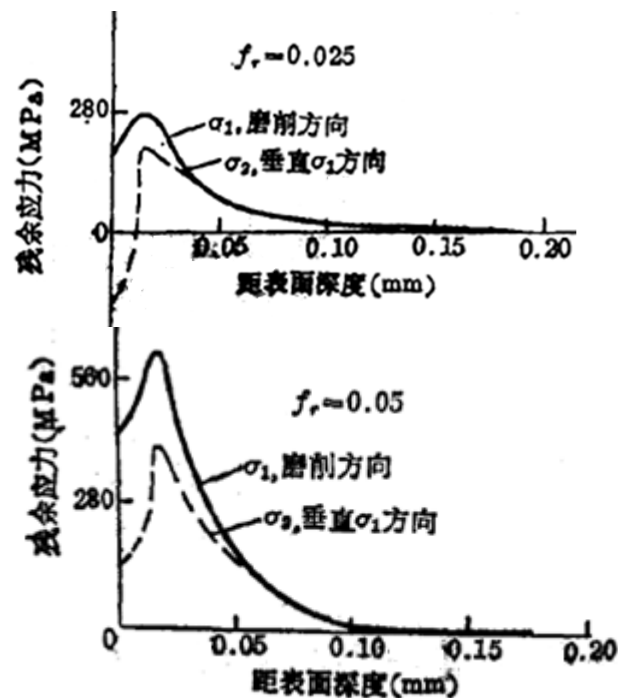
$$h_{Dg \max} = \frac{2v_w}{v_c} \sqrt{\frac{f_r}{d_0}}$$

◆ $v_w \uparrow, f_r \uparrow \Rightarrow h_{Dg \max} \uparrow$
◆ $v_c \uparrow, d_w \uparrow \Rightarrow h_{Dg \max} \downarrow$



➤ 磨削表面层的机械物理性能:

- ◆ 表面残余应力: 与进给速度密切相关, 可通过选择合适的进给速度降低表面残余应力。
- ◆ 磨削裂纹: 选择合适的冷却方式和冷却液, 有利于磨削热快速传出, 减小磨削裂纹。



一、金刚线切割原理

- 分析磨削原理，主要目的为金刚线切割机切割单元的2个主参数提供参考：切割速度 v 和进给速度 f 。
- 普通砂轮磨削速度30-35m/s，高速磨削 $>45\text{m/s}$
- 现有金刚线切割机线速度：
 - 蓝宝石切割：6-15m/s
 - 硅片切割：12-25m/s
- 金刚线切割机未来发展过程中在主切削速度方面还有很多研究空间。

二、金刚线切割受力模型

金刚线多线切割机两主辊数量居多，以两主辊机型A为例创建切割受力模型，分析切割过程中线弓对线网附加张力以及进给力影响。

线网附加张力：

$$\Delta T = E \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) A$$

总进给力：

$$F = \frac{2}{1 + 1/3 \sin \alpha} \left(\frac{1}{1.1} \sigma_b - E \frac{2r}{D} - \frac{\gamma v^2}{g} \right) A \sin \alpha$$

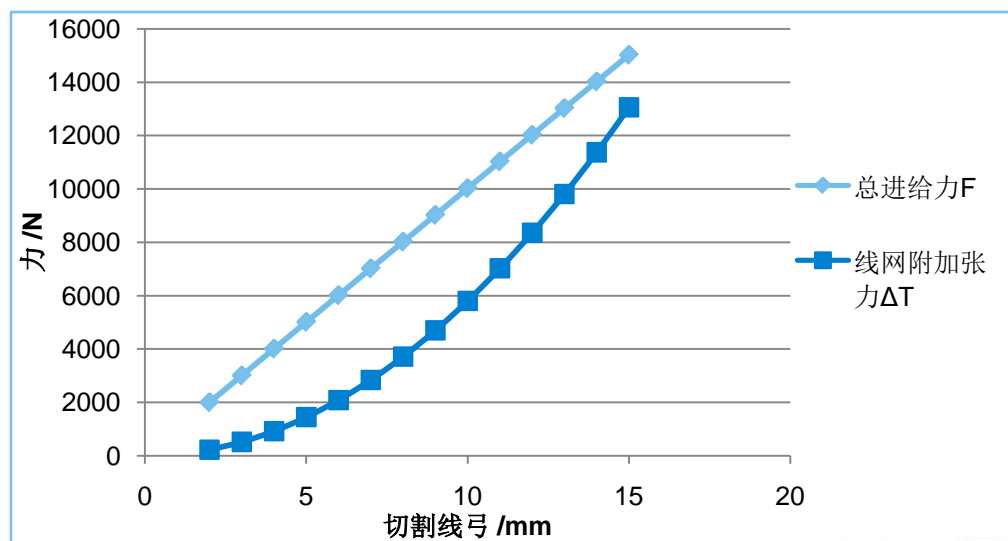
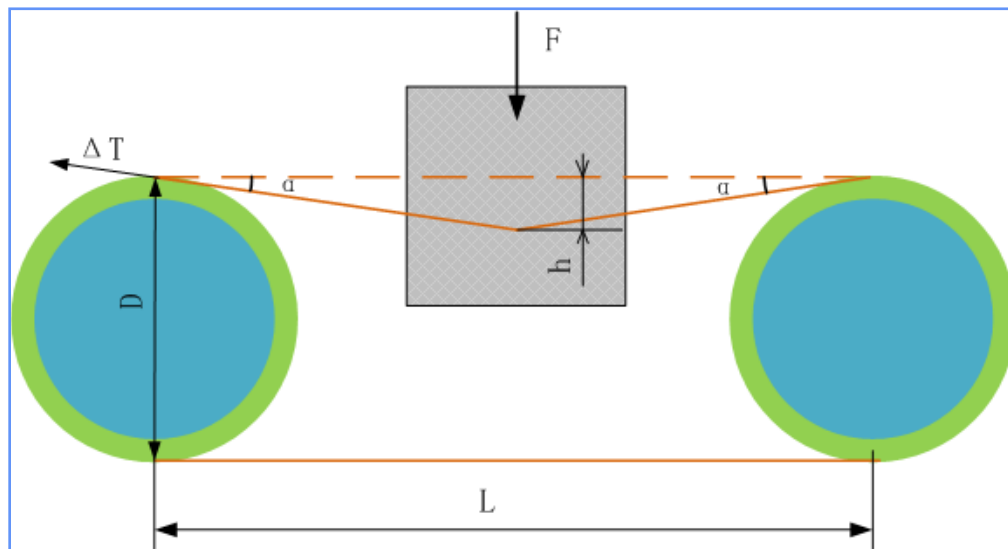
σ_b 金刚线抗拉强度(Mpa)

r 金刚线半径(mm)

v 切割线速度(m/s)

γ 金刚线单位体积重量(N/mm³)

A 金刚线截面积(mm²)



二、金刚线切割受力模型

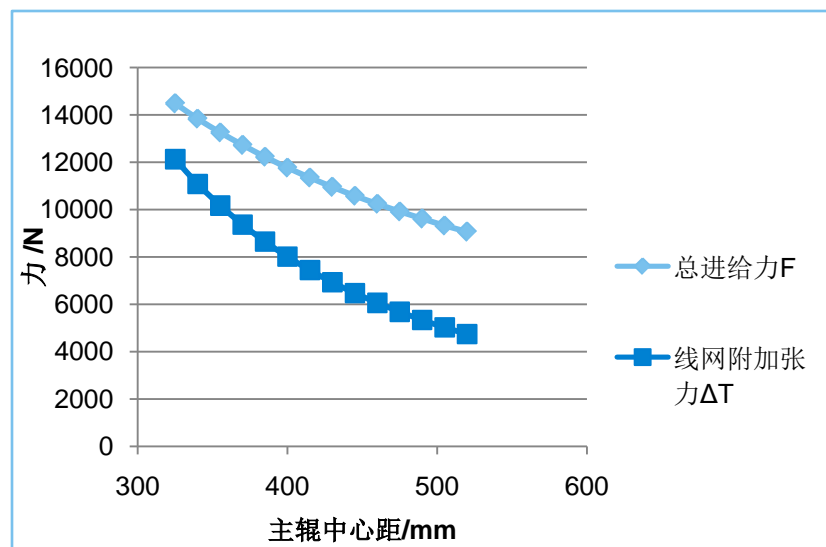
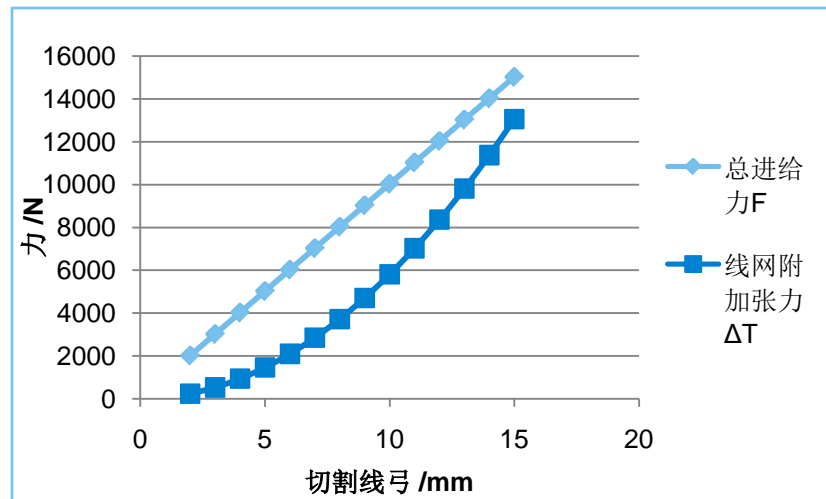
I. 以主辊直径270mm，主辊长度640mm，中心距470mm，槽距0.325mm，线网张力23N为例，计算得单个主辊受力为42500N，线弓引起的线网附加张力及相应进给力如右图。

- 线弓增大，线网附加张力呈非线性增加趋势，10mm线弓对应线网附加张力约6000N。
- 线弓增大，相应进给力呈线性增加趋势，10mm线弓对应进给附加张力约9000N。

II. 以主辊直径270mm，主辊长度640mm，槽距0.325mm，线网张力23N，线弓10mm为例，研究中心距对线网附加张力及进给力的影响。

- 随着主辊中心距的变大，线弓引起的线网附加张力及对应的切割力呈非线性减小趋势，且线网附加张力减小速率更大。

因此，主辊中心距及切割线弓引起的线网附加力及相应的进给力是金刚线切割机主切割单元的关键设计参数。

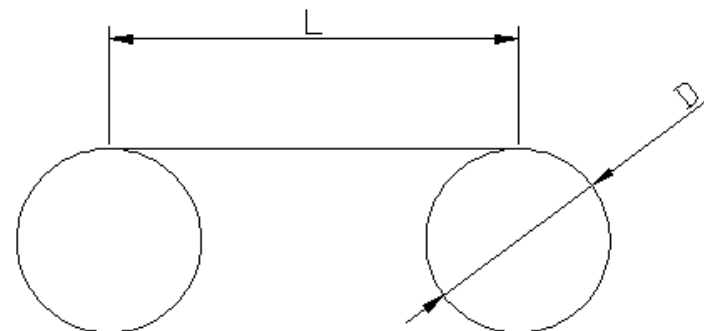


三、切割主辊参数研究

➤ 多线切割机主辊的主要参数

多线切割机中，主辊是其核心部件之一。金刚线多线切割机与砂浆线多线切割机相比，最大的区别之一是主辊的设计不同。不同的主辊参数，对金刚线的切割效率影响较大。影响金刚线切割质量和成本的主要主辊参数有：

1. 主辊直径（涂覆后主辊外径尺寸）
2. 主辊中心距（两个主辊间的中心距离）
3. 主辊长度（主辊总长度）
4. 主辊数量（确定装载晶棒的数量）
5. 主辊质量（主辊涂覆后的总重量）
6. 涂层耐用度



➤ 金刚线切割机主辊参数分析

与传统砂浆线切割相比，金刚线切割线速度及加速度均大幅提高，以增加金刚线的切割能力，目前主流切割速度在18~25m/s范围，加速度在3~5m/s²。高线速度、高加速度及高进给速度下线网的运转稳定性是影响切割质量的关键因素，示意图中尺寸L，即金刚线跨距对线网运转稳定性起着关键作用。

三、切割主辊参数研究

➤ 砂浆线和金刚线切割机的主辊参数

据统计，传统砂浆线多线切割机的
主辊中心距一般在500~660mm之间，主
辊的直径在200~350mm之间，跨度比较
大。主辊的长度范围在320~1040mm，
其中用于蓝宝石切割的主辊长度一般不
大于320mm。

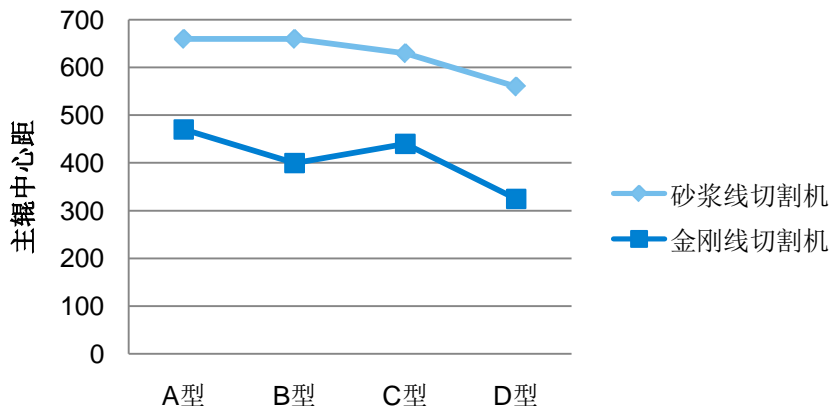
对比传统砂浆线多线切割机的主
辊，右表列举了几款目前市场主流的
金刚线多线切割机的主辊参数。这几
款机型主辊中心距在325~470mm之
间，主辊的直径在200~270mm之间。

传统砂浆线切割机主辊参数				
型号	A型	B型	C型	D型
直径/mm	300	350	250	330
长度/mm	520	1040	320	880
数量	4	2	2	2
中心距/mm	660	660	630	560

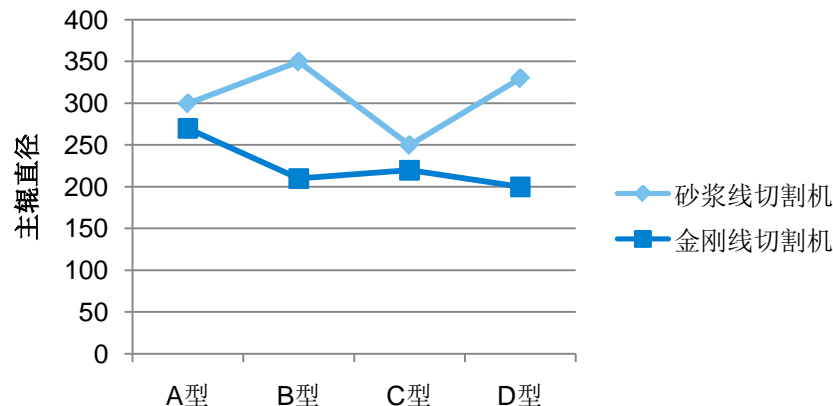
市场主流金刚线切割机主辊参数				
型号	A型	B型	C型	D型
直径/mm	270	210	220	200-210
长度/mm	640	620	520	320
数量	2	2	4	3
中心距/mm	470	400	440	325

三、切割主辊参数研究

不同机型的主辊中心距



不同机型的主辊直径



通过对比不难发现：金刚线切割机的主辊设计更加紧凑，缩小中心距和减小主辊直径，以缩短金刚线跨距，提高线网运转稳定性。

三、切割主辊参数研究

➤ 金刚线切割主辊中心距实验分析

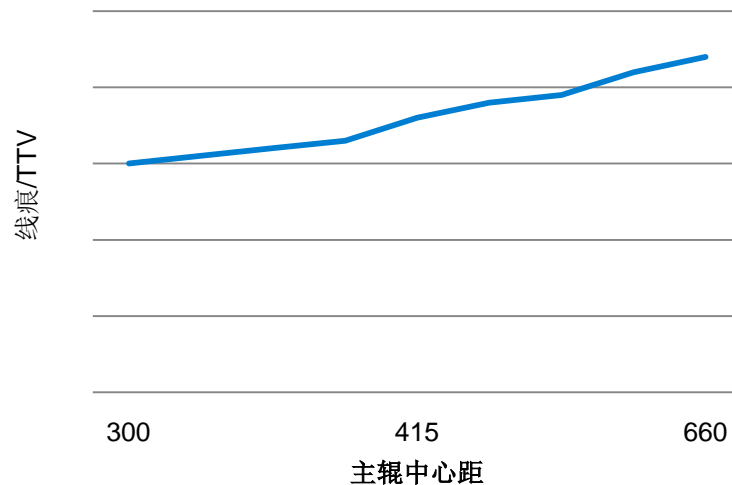
主辊中心距越小，切割的稳定性就越好，BSMT通过大量切割实验分析了主辊中心距对切割质量的影响。通过对主辊中心距在300mm~660mm内的主辊实际切割的硅晶片及蓝宝石片数据进行了统计分析。

右图中可以看出，相同的工艺条件下，主辊中心距越大，线痕、TTV越大，成品率越低。

通过实验可知：缩小主辊中心距，是改善金刚线切割质量的关键因素之一。

导轮中心距尺寸L越大，金刚线越长，线网运转越不稳定，切割质量越差。

不同主辊中心距对TTV线痕的影响

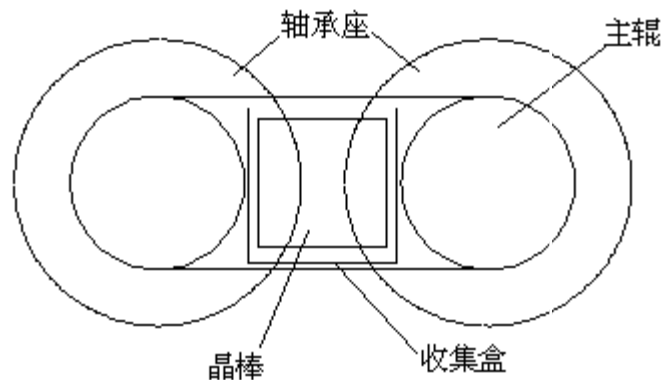


三、切割主辊参数研究

➤ 主辊中心距设计的影响因素

缩短主辊中心距是改善切割质量的关键因素，而中心距的减小受很多因素的影响。

- 1.晶棒尺寸规格的影响（156x156mm、Φ6-8”）
- 2.碎片收集盒影响（方便取出碎片）
- 3.轴承座尺寸的影响
- 4.主辊直径的影响
- 5.主辊长度的影响（轴承承载力不同）



➤ 主辊直径变小的负面影响

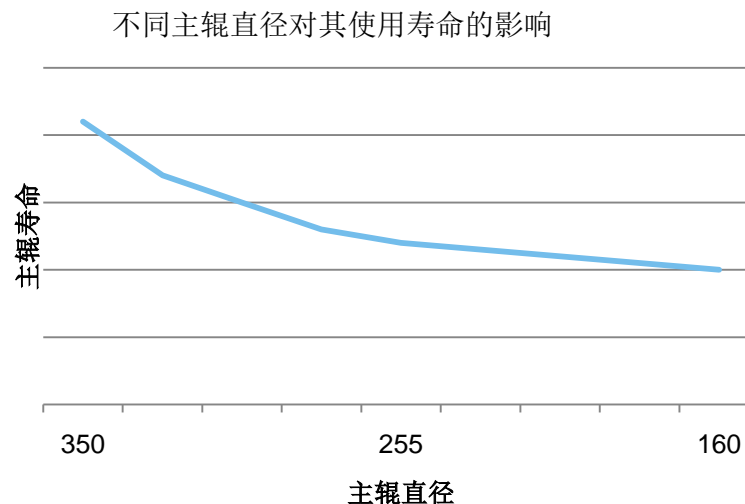
1. 转速过高：线速度不变，直径变小，主辊转速就会变大，对动平衡要求高，速度过快，对主辊表面涂层寿命等都会带来负面影响；
2. 主辊变形大：主辊直径变小，对受力影响较大，主辊变形量变大，影响切割精度。
3. 主辊应力大：主辊受力不变，直径变小，会导致主辊的应力变大，主辊设计难度加大。
4. 潜在不确定因素：中心距缩小后在切割过程中钢丝扭转受限对切割效率的影响。

三、切割主辊参数研究

➤ 直径变小对主辊寿命的影响

通过对几种不同直径的主辊测试分析，直径越小，主辊的寿命越短。

直径250mm长度320mm的主辊涂层寿命一般在210h左右，当其直径缩小到210mm时，寿命大约缩短20%左右。

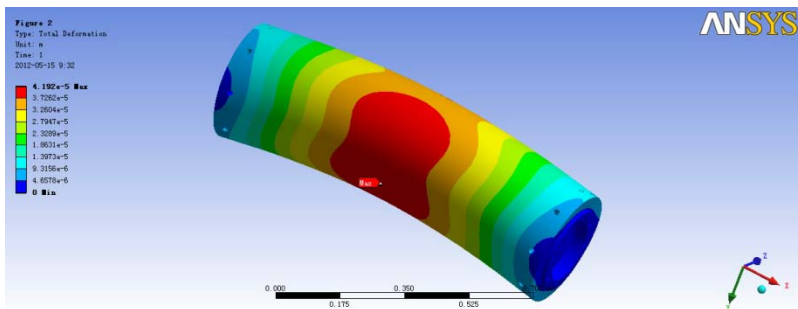


➤ 主辊长度对切割效果的影响

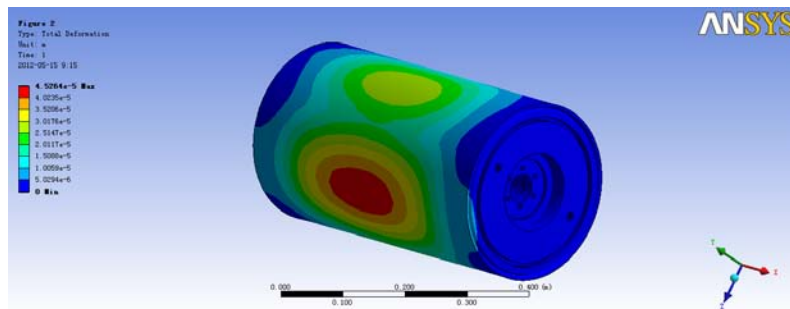
1. 主辊受力变大，其变形量也相应增大，影响切割精度。
2. 轴承座受力变大，对轴承的承载能力提出更高要求。需要选用较大型号的轴承，轴承座的尺寸大小会直接影响主辊的中心距。

三、切割主辊参数研究

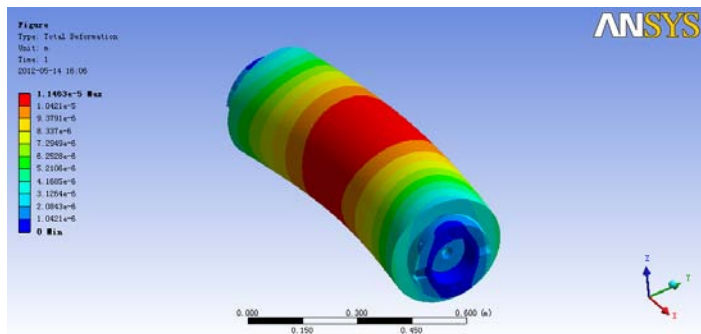
主辊长度对变形的影响



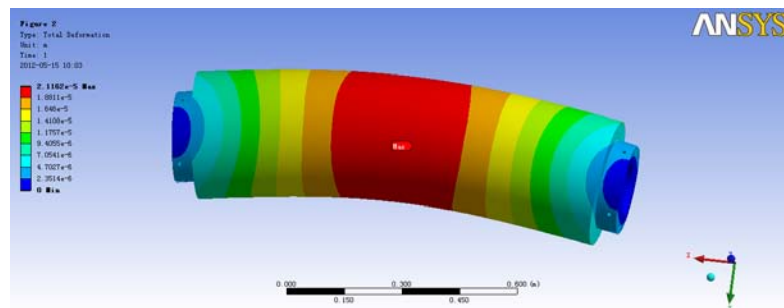
长度1040mm空心主辊的变形分析图



长度520mm空心主辊的变形分析图



长度840mm实心主辊的变形分析图



长度1040mm实心主辊的变形分析图

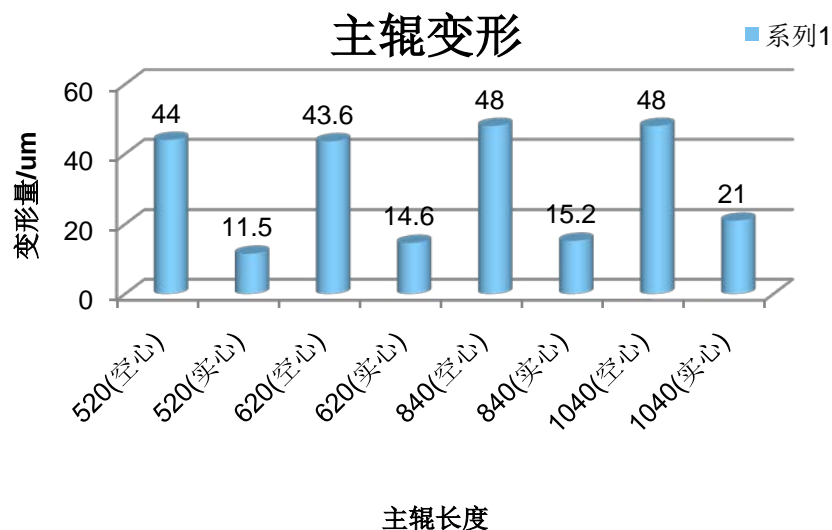
主辊的变形除了跟长度关系很大外，还跟主辊的结构（空心或者实心）有很大关系。

三、切割主辊参数研究

主辊变形分析

下面对市场上一一些常见的主辊进行了变形分析，长度从520mm~1040mm。

包括实心 and 空心的变形也进行了对比。



通过分析可以看出，主辊越长，其变形量相对增大；实心的主辊比空心的主辊变形有大幅降低。但实心主辊的大惯量对频繁加减速是个不利因素。轻量化、高刚度的主辊是未来发展的趋势。

三、切割主辊参数研究

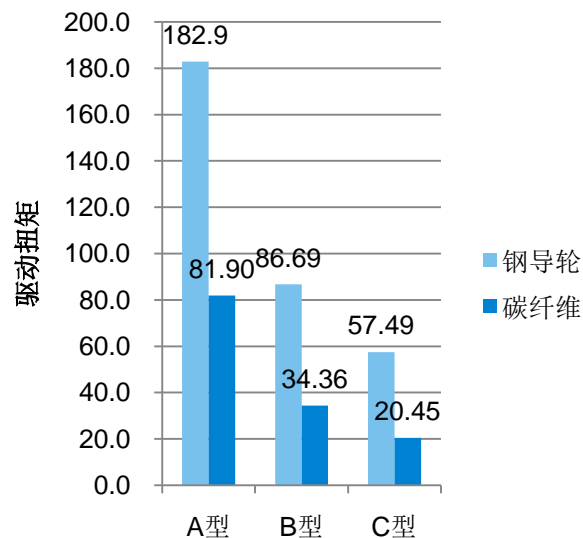
主辊质量的影响分析

主辊的质量直接影响到其惯量，主辊的惯量越大，对其驱动扭矩要求越大。不同材质的主辊驱动扭矩差距较大。目前碳纤维是主辊筒体材质发展的一个趋势。

下面列举市场上常见几款机型主辊的参数，并对其加减速时需求的扭矩进行对比分析。

	A型		B型		C型	
	钢	碳纤维	钢	碳纤维	钢	碳纤维
主辊筒体材料	钢	碳纤维	钢	碳纤维	钢	碳纤维
质量/kg	105.61	58.41	64.025	31.9	142.3	30.5
转动惯量/ kgm^2	1.7142	0.7678	0.6773	0.2684	0.7546	0.2684
线加速度/ m/s^2	4	4	4	4	4	4
导轮直径mm	300	300	250	250	210	210
线速度/m/s	20	20	25	25	25	25
需求扭矩/Nm	182.9	81.90	86.69	34.36	57.49	20.45

主辊材质与驱动扭矩分析



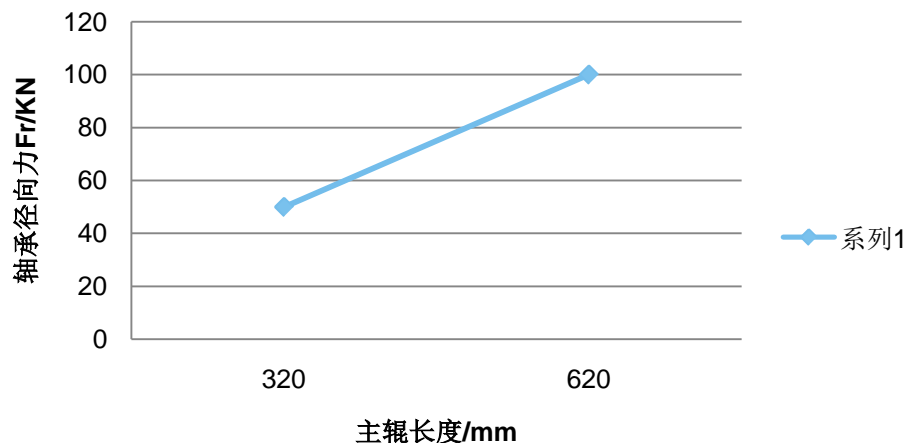
经过对比可以明显看出碳纤维主辊质量轻、惯量小，加减速时驱动扭矩需求较小，是未来金刚线切割主辊发展的必然趋势。

三、切割主辊参数研究

主辊长度对轴承的影响

主辊越长，金刚线缠绕的圈数就相对越多，主辊受力越大。因此对轴承箱的要求也越高。通过对300mm和600mm长度的主辊受力分析可以看出，轴承的空载静态径向力变大近一倍，对轴承箱承载能力要求更高。

轴承座受力分析



因此主辊长度受限条件下，部分机型采用2根晶棒分层装载的方式来降低主辊长度太长的风险。

四、切割线速度与加速度

➤ 线速度与加速度的研究

传统砂浆线切割大部分采用的是单向切割，而金刚线切割普遍采用的是双向切割。金刚线切割的线磨损小，双向切割充分提高了金刚线的利用率。

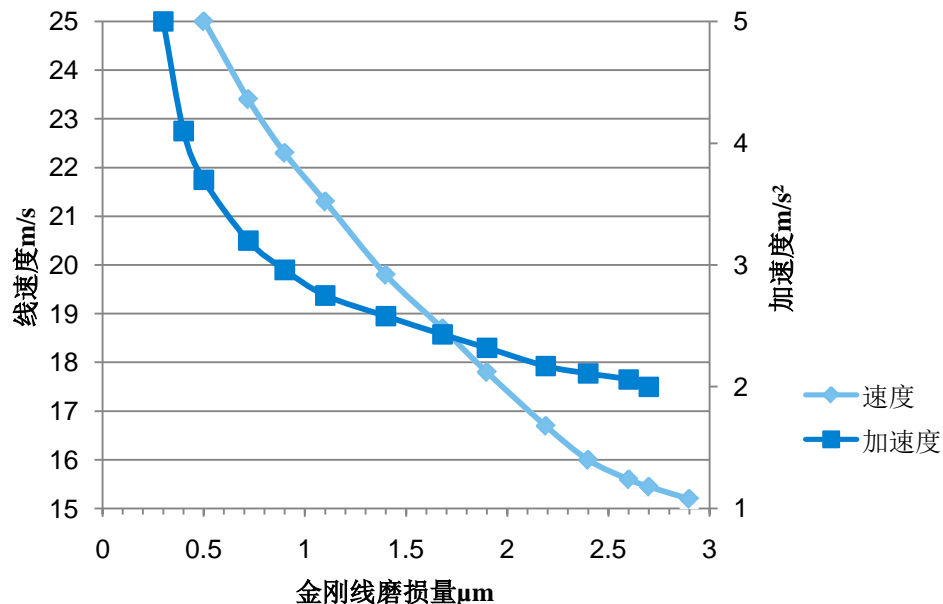
传统砂浆线切割的线速度为12-15m/s，加速度为2m/s²；金刚线切割线速度为18-25m/s，加速度为3-5m/s²，金刚线切割大幅减少了切割时间，提高了切割效率。

如图所示，描述了在切割相同体积晶棒材料的条件下，加速度和线速度大小对金刚线磨损的影响，以评估加速度及线速度对切割能力的影响。

结论：

1. 加速度 a 越大，金刚线磨损越小，切割能力越强。
2. 线速度 v 越大，金刚线磨损越小，切割能力越强。
3. 金刚线切割需要较大的加速度 a 和较大的线速度 v

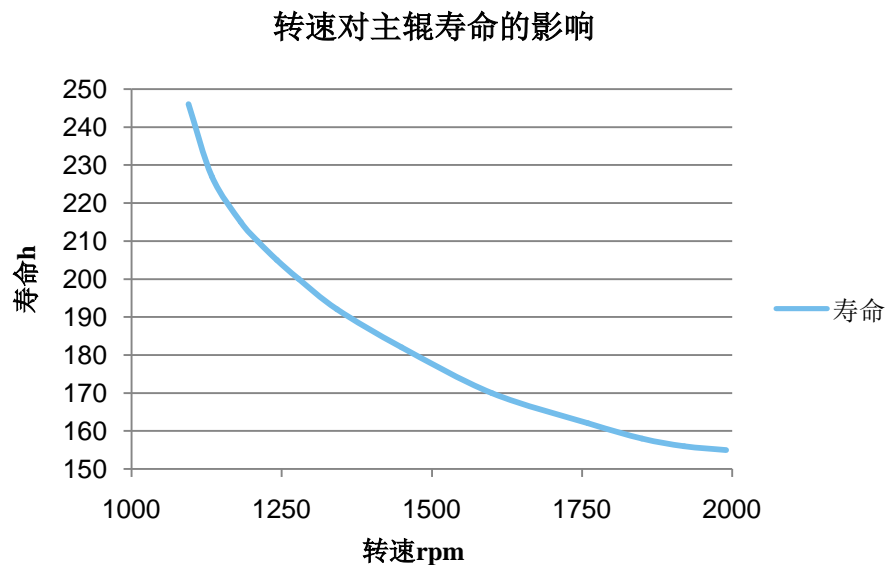
线速度和加速度对金刚线磨损的影响



四、切割线速度与加速度

➤ 线速度增大带来的影响

1. 线速度增大，导辊的涂层寿命会减小。例如：槽距0.77、直径250、长度300的主辊，在最大线速度15m/s的情况下，分析了其转速与涂层寿命的关系，如图所示：
2. 线速度增大，对主辊和轴承座有更高的动平衡要求。
3. 线速度增大带来振动和噪音问题。轴承座和驱动电机，一般采用直连和齿形带传动两种方式。线速度增大，如采用直连方式，电机和主辊及轴承箱的振动相互影响，一定程度上影响切割质量；如采用齿形带传动的方式，高速时空气的挤压亦会带来噪音问题。



四、切割线速度与加速度

➤ 加速度增大带来的影响

1. 根据公式

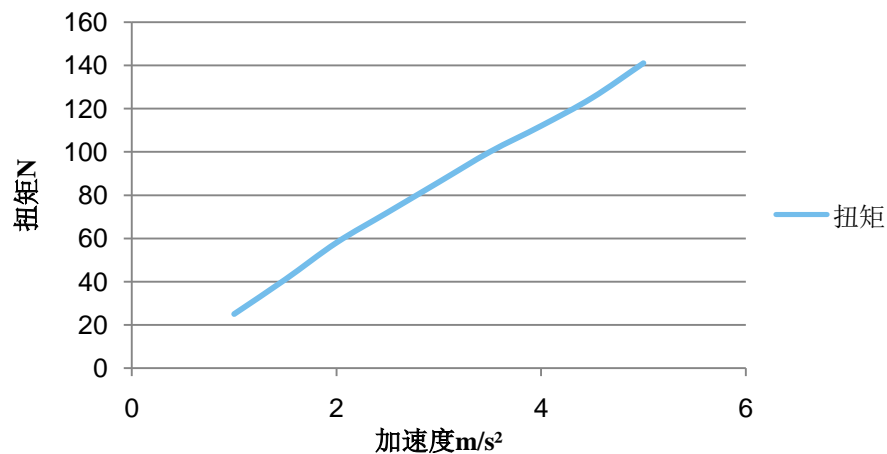
$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{J} * \boldsymbol{\alpha} \text{ —— 扭矩} = \text{惯量} * \text{角加速度} \\ &= \mathbf{J} * (\mathbf{a}/r) \text{ —— } = \text{惯量} * (\text{加速度}/\text{半径}) \end{aligned}$$

如右图所示，描述了扭矩和加速度的关系。

结论：在惯量不变的情况下，加速度增大，电机的额定扭矩要做相应的提高。

2. 加速度增大，传动机构的设计应考虑更大的负载能力。
3. 频繁的加减速，大扭矩输出，结合较高的线速度，轴承箱发热功率增大，对冷却提出了更高的要求。

加速度对扭矩的影响



五、BSMT金刚线多线切割机

S600DS多线切割机



S600DS，通用型金刚线切割机，可适用电镀金刚线和树脂金刚线切割。

S600DS主要参数：

机器型号 Wire Saw model	S600DS
切割能力 working capacity	156x156x600mm
导轮直径 wire guides diameter	210 mm
导轮中心距 distance	400 mm
导轮宽度 wire guides length	620 mm
线网速度 wire speed	Max. 25 m/s

五、BSMT金刚线多线切割机

S1000DS多线切割机

S1000DS金刚线切割机，4导轮，双工作台，主要适用于树脂金刚线切割。

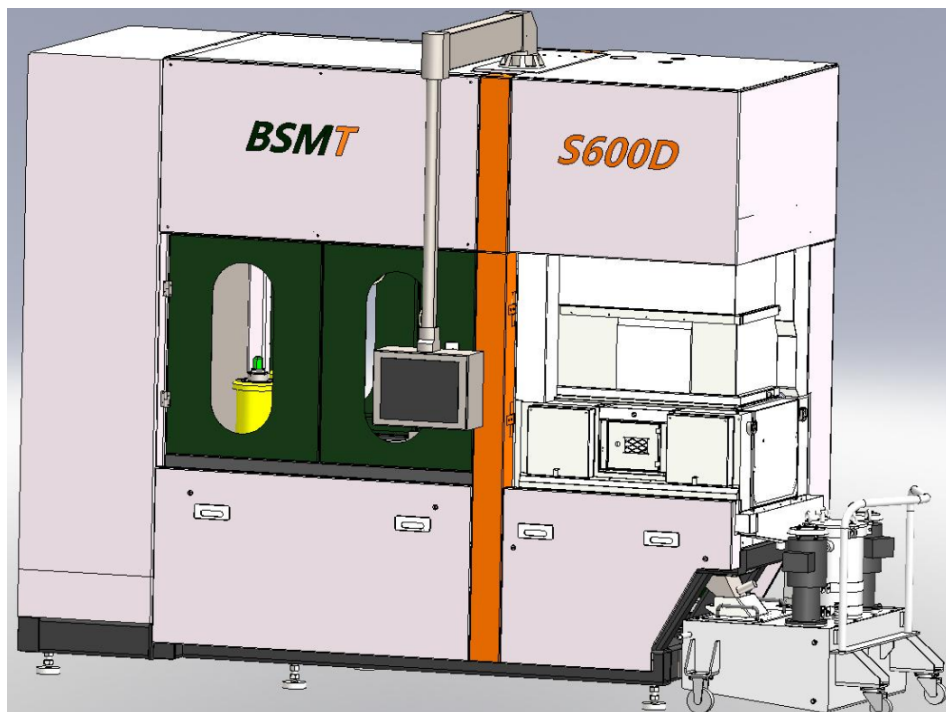


机器型号 Wire Saw model	S1000DS
切割能力 working capacity	156x156x500mm x2
导轮直径 wire guides diameter	250 mm
导轮中心距 distance	440 mm
导轮宽度 wire guides length	520 mm
线网速度 wire speed	Max. 25 m/s

五、BSMT金刚线多线切割机

S600D多线切割机

S600D，切割长度300mm，主要用于蓝宝石晶棒的切割。



机器型号 Wire Saw model	S600D
切割能力 working capacity	max.6"(1x)x300mm
导轮直径 wire guides diameter	250 mm
导轮中心距 distance	630 mm
导轮宽度 wire guides length	320 mm
线网速度 wire speed	Max. 15 m/s

祝您工作愉快!

常州贝斯塔德机械科技有限公司
Email: sales@czbsmt.com
www.czbsmt.com