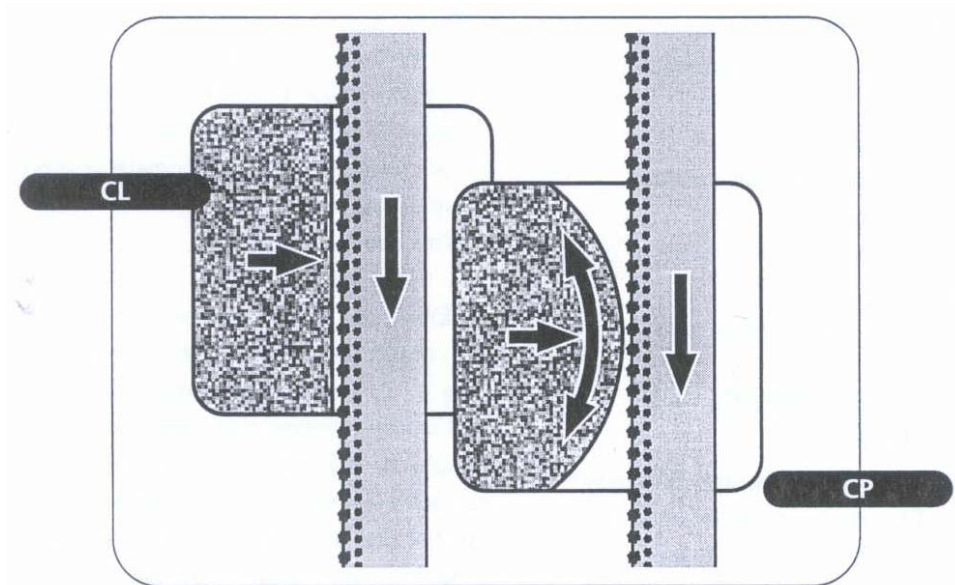


EXAKT 切割工艺技术



在过去的 15 年间，EXAKT 通过技术研究，开发出新一代切割设备。我们立足于医学研究仪器的开发，其应用已拓展到电子、冶金、生物材料和汽车产品等领域。这些设备的开发动力来自于各个行业在产品开发和生产过程中对特殊材料以及合成材料进行切割的需要。正是在这种研发环境下，切割技术必须与需要切割的材料的发展保持同步。EXAKT 已经开发了一系列设备，用于解决材料和产品开发行业遇到的具体应用问题。这些问题包括切割整合、表面质量、分子结构、

材料、材料压力和形变、减少切割损失以及水平切割表面等。所有这些都是导致当前切割方法中出现问题的原因。

由于这些问题都已得到解决，因此在我们的产品设计中融合了这些解决方案。我们的一系列产品能够解决许多难题。

挑战：

- 能够轻松地切割多种材料
 - 坚硬的单晶氧化铝
 - 柔软的物质，如整形填充物

- 非常坚硬易碎的物质，如单晶钨
- 柔软有弹性的物质，如 polyethylene
- 柔软且易化的物质，如 单晶铝，铜或钛（热处理前）
- 坚硬及柔软的组织（新鲜的或植入以后的组织）
- 或以上材料的混合
- 提高样品的表面质量
- 减小样品表面的张力
- 减小切割损失量
- 将平面偏差降低到最小
- 减少表面粗糙
- 显著减少切割复杂样本的所需的时间
- 减少切割工具成本

根据需求选择合适的设备

为了寻找解决以上问题的技术，EXACK 设计了一系列互补的设备。任何单一的设备都不能解决全部的问题。您需要按照自己的需要选择合适的设备。

本文将讨论几种切割技术，以及几种切割工具技术。我们要讨论的技术包括：

- 旋转切割系统
- 环形切割系统
- 带状切割系统
- 线状切割系统

切割技术

旋转切割系统

旋转切割系统的切割工具外围镶有研磨材料（如金刚石、金刚砂或 CBN 等）。现有的

用于切割较硬样本的系统通常需要切割工具安装的更加稳固。这样就限制了样本的大小。切割较硬材料所用切割工具的硬度也较大，因此切割时的材料损失也较大。切割工具硬度越大，加在样本表面的切割压力也越大。

对于标准的旋转切割系统，切割工具与样本之间有一条“接触线”。刀片切入样本时，这条线的长度增加，因此所需的切割力也越大。这种力量的增强对样本将造成以下负面影响：

- 弯曲或非水平表面
- 样本和刀片之间摩擦增大而产生的热量
- 切割表面材料堆积引起的表面品质不佳
- 金属的硬化处理

EXACK 开发了一项可以减小切割工具和样本之间接触线的技术。通过振荡切割工具下的样本，并以极其微小的幅度将切割工具穿过样本，将样本和工具之间的接触线减少至可确定的最小“接触点”。这种接触面的减小相应地也会显著减小切割力，同时减少以上负面影响的发生。

无论任何构造的旋转切割系统中都存在一个至今无法解决的难题。那就是样本越大，切割越深，已切割表面与切割工具面之间的**铃动力摩擦就越大**。这个问题在制作薄片时尤为显著。

由于切割力减小，对固定切割工具的要求也随之降低，这就使切割更大的样本成为可能。这样就可以减小切割工具的硬度，从

而减少切割损失。这种接触的减少还可以减少切割时间，同时延长切割工具的使用寿命。

从工程的角度讲，理解切割工具与样品之间的接触长度怎样影响切割效率是非常重要的。

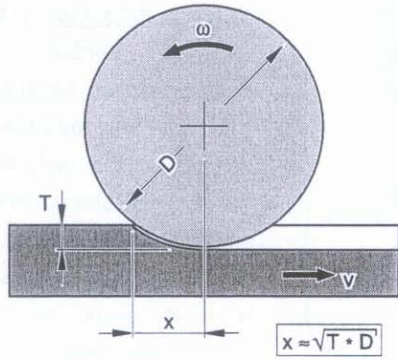


图 1、旋转切割系统上的接触长度

要的。图 1 至 7，说明了标准旋转切割系统的样本接触线与 EXAKT 技术中的接触点之间的三个主要区别。

第一套图（图 2 和 图 3）说明切割工具通过连续表面的样本时所需的力，以及当切割工具以较小的接触点接触样本时所需的力。

下一套图（图 4 和 图 5）说明切割碎片的产生。切割碎片对切割的表面品质、切割所需时间以及切割工具的效率有着重要的影响。在接触线系统中，切割碎片在切割工具进入样

Fig. 2: Forces at contact line systems

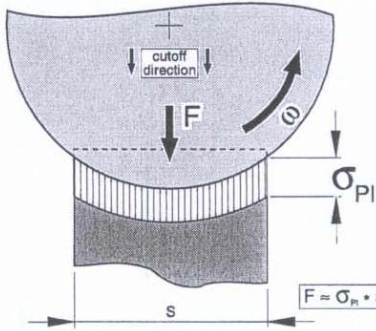


图 2、线接触系统的受力

Fig. 3: Forces at contact point systems

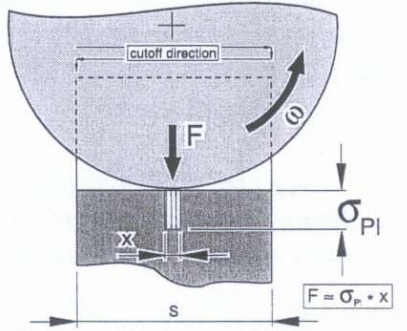


图 3、点接触系统的受力

本时开始产生，并与后面产生的碎片积攒在一起，直到从样本的出点排出。

这个问题在切割柔软和塑料材料，如聚乙烯、铝、或铜。通过减少碎片的积累，可以保持切割工具表面畅通，切割自如。

最后一套图（图 6 和 图 7）说明冷却效率是如何随切割工具与表面之间的接触减少提高的。这样碎片就能以加速的方式排出。从而使更多的冷却剂抵达实际的切割点，增加冷却效率。冷却剂的增加还可以增强切割工具上的碎片的冲洗，这对切割柔软、塑性的材料是至关重要的。

Fig. 4: Chips at contact line systems

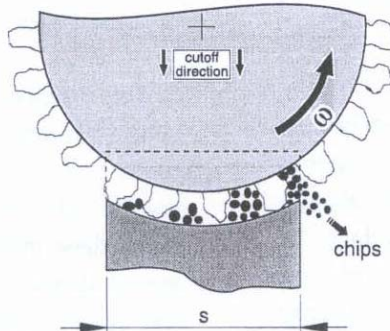


图 4、线接触系统的碎片

Fig. 5: Chips at contact point systems

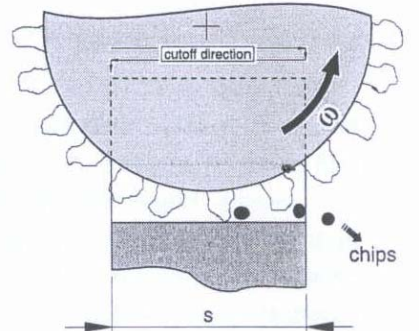


图 5、点接触系统的碎片

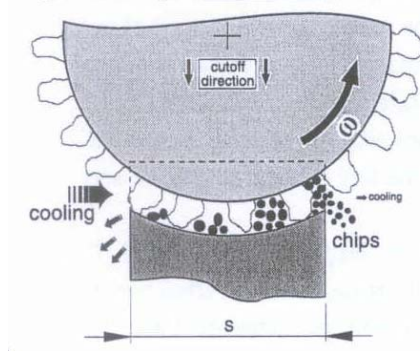


图 6、线接触系统的冷却

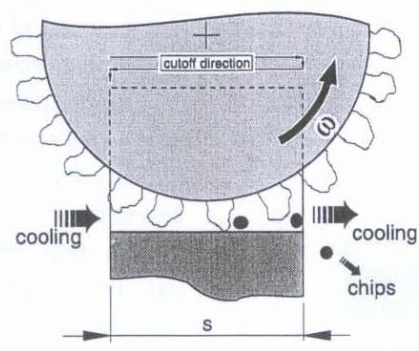


图 7、点接触系统的冷却

切割工具技术

旋转切割工具使用的磨料有许多种，在这里我们只讨论金刚石和 CBN。而在这其中我们只探讨镀镍多层和单层磨料。

单层磨料旋转切割工具是为切割软性和塑性材料设计的。这里的塑性材料是指具有塑性形变特征的一切材料。这类材料容易卡在磨料粒子中间，并且阻碍切割表面。通过在每个磨料粒子上均匀地镀上 40 - 45 % 的镍，粒子之间缝隙将取决于磨料粒子的大小。(图 8)

了解了需切割材料的形变特征，用户就可以根据磨料型号来选择工具。例如，当切割聚乙烯（如 UHMWPE）时，磨料粒子的缝隙越大越难切割。

多层磨料旋转切割工具适用于切割较硬且有韧性的材料。由于工具上具有多层磨料，单个工具具有多个切割面。(图 9) 当第一层磨料磨损后，马上有第二层磨料露出来。但由于第二层磨料完全嵌在镍中，因此切割的材料一定要足够坚硬能够磨去镍露出第二层的磨料。(磨去镍所需的切割力要比单层刀片切割时的力大几倍。)

有一个例外的情况是当样本包含韧性材料和柔软塑性材料时。通过嵌入技术和最小接触点设计，这些材料也可以使用多层磨料进行切割。较软材料可能卡在夹缝中，但较硬材料的碎片可以清除它们，冷却剂的加速流动也会将它们从切割表面清除掉。

由于多层工具使用寿命长，其磨损情况也比单层工具复杂。新的多层工具边缘角度非常锐利。

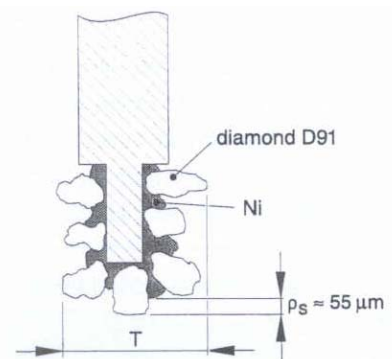


图 8、单层磨料系统

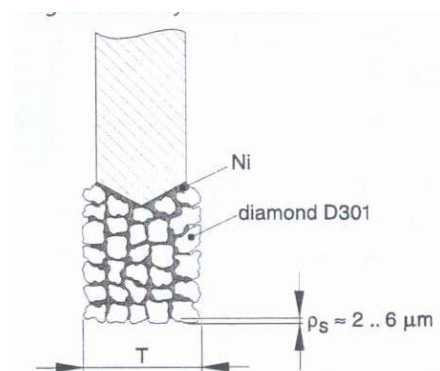
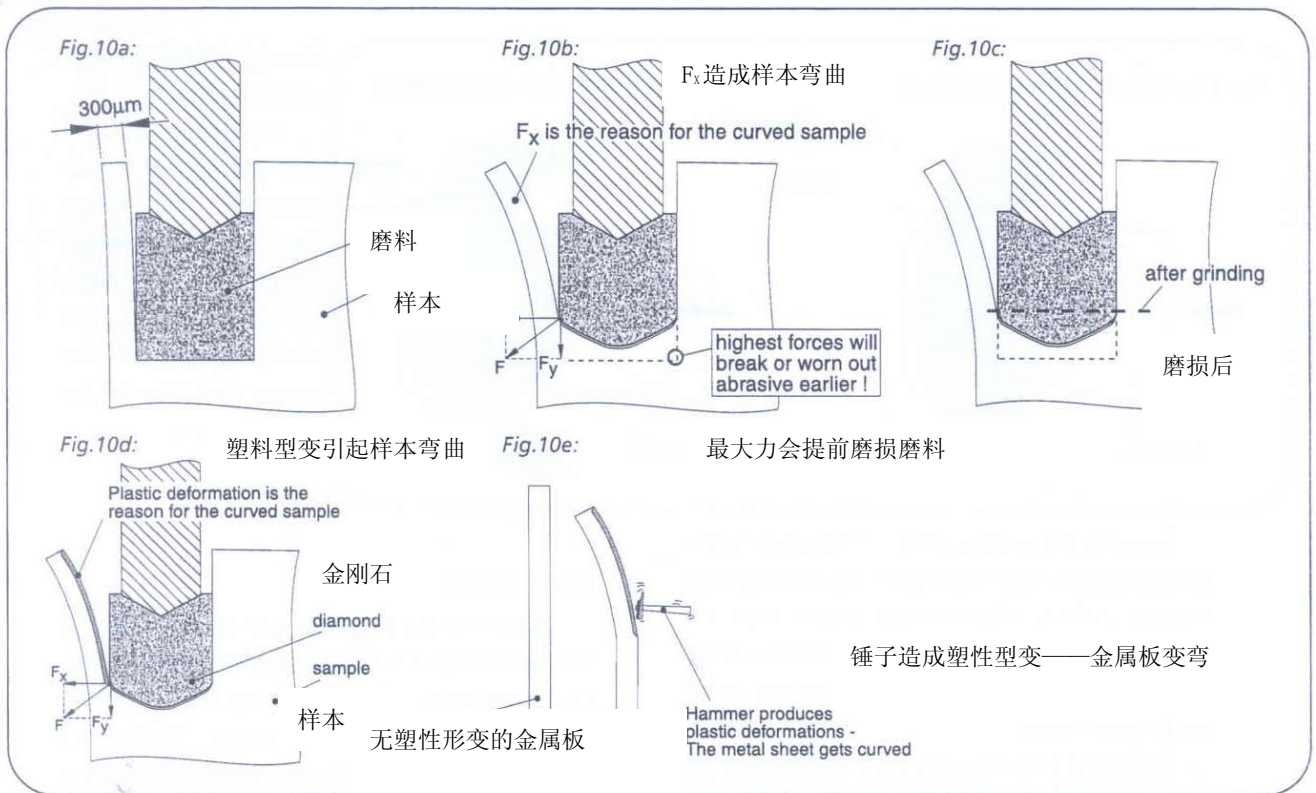


图 9、多层磨料系统



(图 10a) 由于切割力对于这些角的影响较大，这些地方的磨料颗粒比磨料表面中央部分更易磨损。(图 10b) 这种磨损对切割部分的影响很大。角的磨损越严重，切割部分最终形成的压力和弯曲也越大。与单层工具不同的是，多层工具可以再磨光，恢复正确的角度。(图 10c)

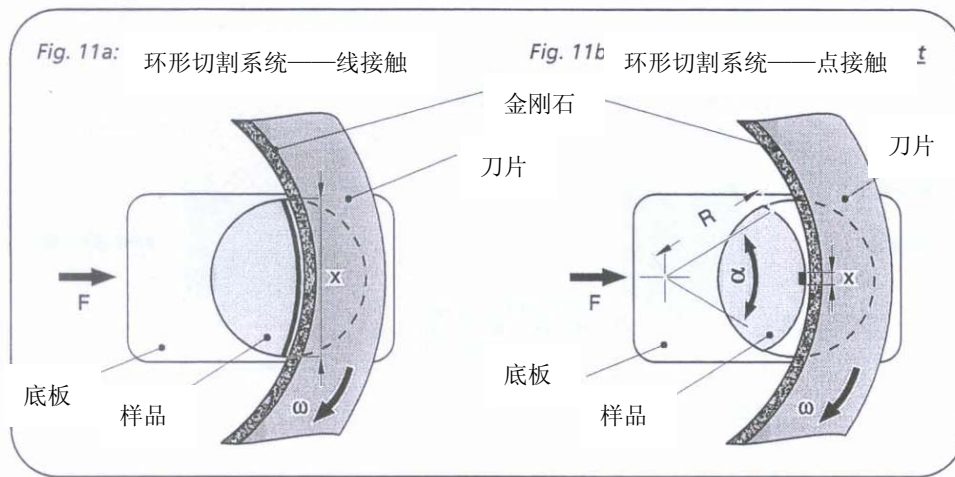
环形切割系统

此项技术中，切割面处于切割工具的内部。刀片中央切出一个孔径，并覆盖有磨料颗粒。这些颗粒嵌在镍或类似镍的物质中。然后刀片在一个孔穴中旋转。样本被固定在偏离切割面的位置，并以恒定的给进力或恒定的速度向该平面挤压。此类设备能为切割工具提供很好的稳定性。但旋转刀片本身的位置必须非常合适，以防止切割过程中多个

角度的力同时作用于样本上。良好的稳定性的能产生具有良好表面的高质量片断。与其他技术一样，这种技术也有几个值得注意的方面：

- 样本尺寸有限制
- 顶端加载设备中的离心力会妨碍足量的冷却介质到达切割表面，影响对样本的冷却。
- 冷却剂流量的减少也会影响对切割表面碎片的冲洗。这就降低了这项技术在切割软性塑性材料方面的效率。
- 间接固定技术不如其他种类的切割技术发达。

尽管此项技术自身有一些固有问题，尤其是对样本尺寸方面的限制，EXAKT 仍相信将有新方法解决其中的许多缺陷，并在一定的物理条件下达到与其他技术平等的水平。



通过在环形系统中应用接触点（CP）概念（图 11），EXAKT 将环形系统的工具稳定性和改善的冷却效果、减小的切割力、最小的样本扭曲和直接样本固定结合在了一起。

为了提高冷却效果并能频繁地清除切割工具的碎片，切割工具被安装在垂直的平面上。由于重力对冷却剂的作用，冷却剂将克服部分离心力的作用，更容易到达有效切割面。最终形成的冷却剂流将有效防止热生成，提高对工具的冲洗效果。这些将提高切割软性塑性材料的效率。

最终要的一部分大概是接触点系统的样本直接定位系统。由于工具表面已经是弯曲的，要达到这一效果只需振荡样本。由于样本被限制在有限的区域内，其活动范围很有限。定位臂将在切割过程中可以沿着可调的弧度移动样本。其效果与旋转系统中的接触点是一样的。通过固定装置，可以直接安装样本进行薄片的切割或抛光。

这些改进也将减少切割力和样本表面的形变（弯曲）。新的定位系统还可以以正负 2 μm 为单位对样本进行精确定位。样本表面质

量的提高允许技师可以选择直接分析切割表面或者根据分析要求对表面进行进一步的研磨和抛光。

这里使用的切割工具是“旋转系统”一节中讨论的多层工具。此类工具较长的使用寿命降低了使用这种环状系统进行小型样本切割的成本。

带锯切割系统

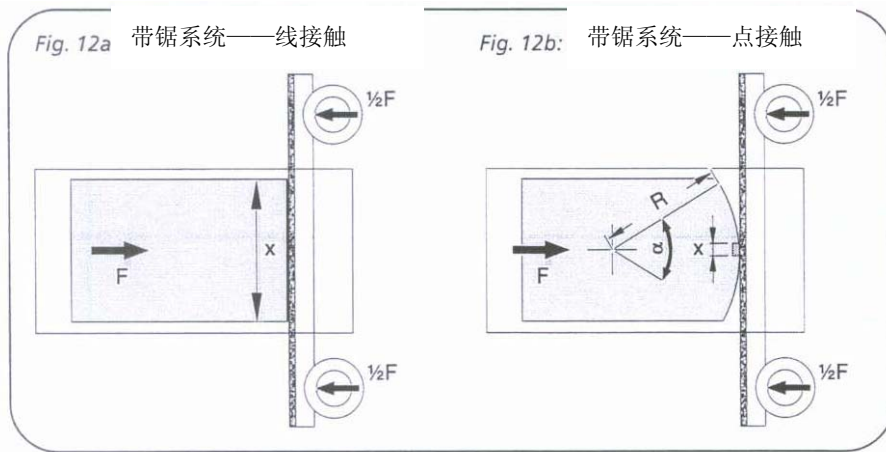
带锯切割系统的最主要优点是样本不受物理尺寸的限制。但切割特殊材料所需的给进力却有限。第二个优势是刀片深度比旋转刀片小得多。刀片与样本之间的磨擦非常低。

给进力是样本对刀片的压力的大小。对每种材料都需要施加一个最小的力才能实现切割。如果样本含有多种材料，将很难确定一种合适于每种材料的给进力。如果给进力对于给定的材料来说过高，那么切割带将偏离平面切割表面。如果该给进力对切割带造成的压力持续高于其所能承受的力，切割带可能断裂。

给进力会影响样本向切割带移动的速度。如果速度恒定，给进力在遇到不同材料

时会发生改变。我们无法计算出给进力随每种材料尺寸和样本特点变化而发生的改变。为了解决这个重要的问题，EXACK 开发出了一种系统，使用恒定的给进力，而不让它随

着速度或材料的不同而改变。通过开发一种依靠恒定的重量提供恒定的给进力来运动的无磨擦装置，EXACK 排出了速度对整体的影响。



但这种设计与标准的旋转切割系统具有同样的缺点。由于样本与刀片之间的接触线较长，因此产生了以下问题：

- 为了提供足够的给进力用于切割较硬物体，必须增加刀片深度以增大切割力。这样就增大了刀片与样本表面的磨擦。
- 由于没有尺寸的限制，更大的样本会对磨料表面造成更大的磨损。这样就会增加切割较硬材料的切割成本。
- 由于在任意给定时间磨料颗粒会接触较多的样本，因此更容易造成切割刀片的阻隔，尤其在切割较软材料时。

EXACK 将用于解决旋转切割系统中这些问题的技术拿来解决带锯系统中的同类问题。不同的是在旋转系统中旋转的是切割表面，而在本系统中旋转的是样本。这样做的目的同样是为了将切割工具与样本之间接触

减少到最小的点（最佳状态为 100 - 300 微米）。（图 12）

旋转系统中用于减少接触长度的技术在带状技术也得到了良好的效果。（见图 4、5、6、7）

为了开发此项技术在带锯系统中的应用，EXACK 重点研究给进力（恒定重量带来的恒定力）以及具体给进力（以毫米为单位的切割长度定义的累计给进力）。在切割工具与样本之间的接触为一条线且这条线随着样本直径增加而增加的系统中，具体给进力的大小在切割过程中会有很大的波动。

例：假设样本为条状材料，直径为 40 mm。切割这种材料的最小具体给进力为 f_{specific} 。在接触线系统中最小给进力为：

$$f_{\text{specific}} * 40\text{mm} = F_{\text{CL}}$$

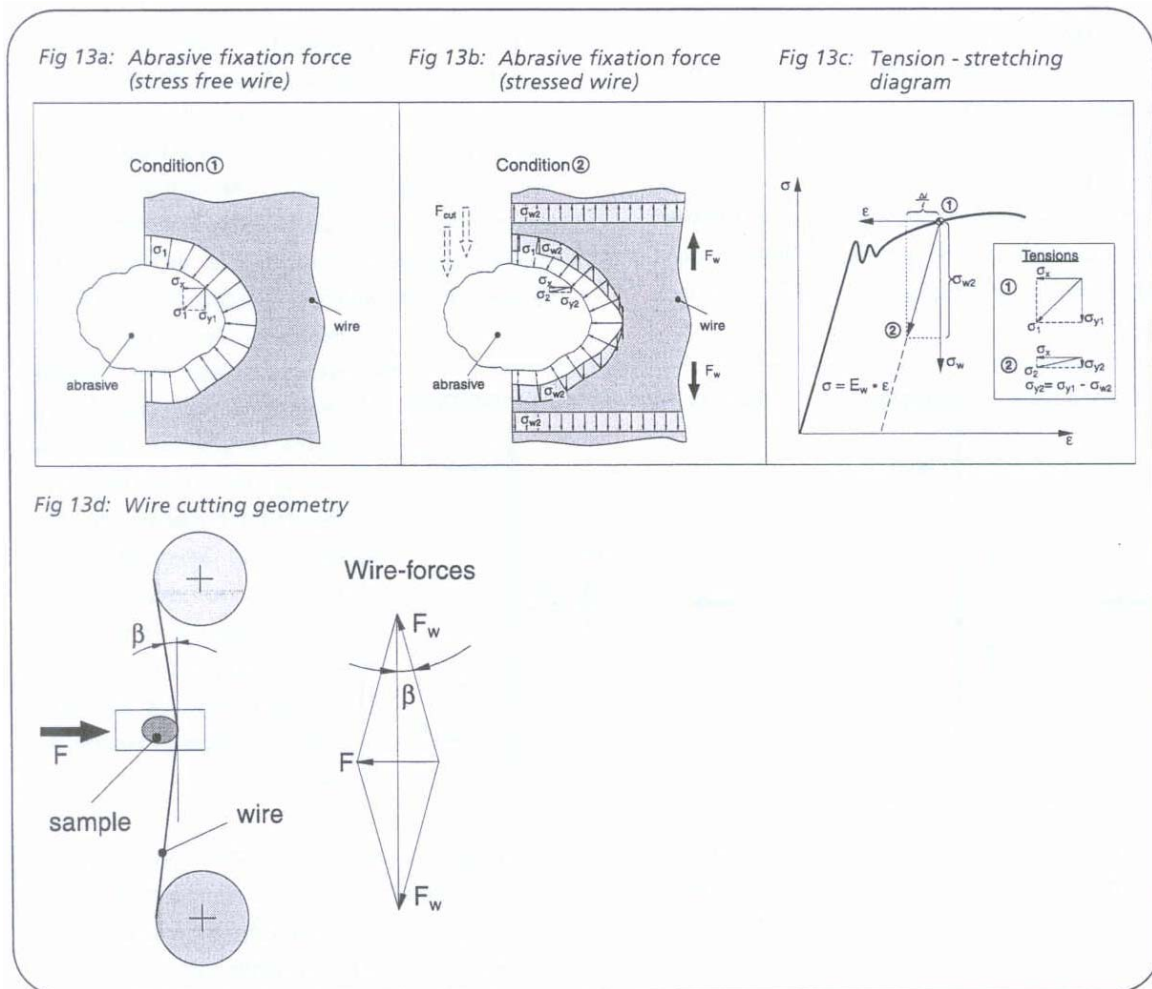
在接触点系统中最小给进力：

$$f_{\text{specific}} * 0.4\text{mm} = F_{\text{CP}} = F_{\text{CL}}/100$$

基于这些公式，接触点系统需要的切割力仅为接触线系统的 1%。但实际上没有一种系统能够在这样小的给进力下工作，也不可能这样大幅度地减小给进力，因此给进力的减小幅度一般是 50 - 70%。减小的幅度依具体设备不同而不同。滑板的平行移动摩擦

力是决定最小给进力的一个因素。给进力的减小对样本表面的品质、切割工具的使用寿命以及切割时间也有积极的影响。但最重要的一点是切割力减小以后，带锯切割系统可以经济地切割材料了。

例：EXACK 系统可以切割单晶铝和铜，以及聚乙烯和 CoCr 等材料。



切割工具

切割刀片只能使用单层嵌入磨料。由于其运转时以弧形路径运动，因此无法生产多

层磨料刀片。可供选择的切割工具有各种不同的厚度、不同等级的磨料、以及连续和断续切割表面等等。

线锯切割系统

与前面讨论的技术不同的是，线锯中使用的磨料不需要嵌入到切割工具材料以外的另外一种材料中。在这种系统中，实际上是通过将铁丝拉伸到表面塑性形变的临界点，将磨料嵌入到工具上的。然后将金刚石以一定的压力压入这个表面中，并通过铁丝材料的弹性张力将其固定住。（图 13a）金刚石通过弹性张力和磨擦力被固定在铁丝中。

固定一块金刚石的力的最小值（公式 1）必须大于要将金刚石推出铁丝的力（公式 2）。 μ_0 是铁丝与金刚石之间的摩擦系数， A 是铁丝覆盖的金刚石的表面面积。张力 σ 在图 13b 中表示。

然而，为了使铁丝在工作时足够牢固，能够有效地切割较硬材料，铁丝必须进一步延伸（力 F_w ）。铁丝上的这种重复张力将弹性力 F_{F1} 增加到固定磨料粒子所用的力 F_{F2} （图 13b）。但弹性压力 F_s 是恒定的。即使固定力比弹性压力大，所用的切割力 F_{cut} 仍可以更加容易地将金刚石移动到铁丝以外。简单地说，为了进行切割而拉紧铁丝会降低其固定金刚石的能力。这个物理原理表现在压力—张力图中（图 13c）。

线状锯的另一个特点是切割过程缺乏稳定性。为了增加铁丝的稳定性，避免出现不匀或波纹切割，必须将铁丝拉得更紧，以维持较小角度的恒定给进力（图 13d）。铁丝张力的这种增加将加速磨料的磨损和缺损，尤

其是切割较硬的韧性材料时。切割力 F_{cut} 产生的磨料碎片将在样本表面形成难以去除的痕迹。

与旋转、环形和带锯系统相比，线锯系统中不适合应用接触点技术。恰恰相反，应用接触点技术会使铁丝上的磨料受力将增大，磨料更易磨损或者完全损坏。

设备特点和应用

EXACK 在切割多种材料和材料合成物方面有着非常广泛的经验。下列表格将为您提供适合各种 EXACK 设备的材料的具体信息。这种简要介绍将为您说明 EXACK 经验的广泛性，以及各种设备适合不同材料的情况。除此之外，我们还为您提供一个将每种设备的特点和运行效率进行对比的表格。

操作 特点	切磨 系统	带式锯	带式锯	带式锯	带式锯	带式锯	带式锯	旋转锯
		300CL 310CL 环形锯 360CL	300CLV 310CLV 环形锯 360CLV	300CP 310CP 环形锯 360CP	300CPV 310CPV 环形锯 360CPV	310CLVS	310CPVS	340CP
线接触 恒定给进力		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
线接触 进刀恒速 (防止多余的给进力)			✓		✓	✓	✓	
点接触 恒定给进力				✓	✓		✓	
点接触 进刀恒速 (防止多余的给进力)					✓		✓	
点接触 切割步骤不变								✓
连续批量的切割能力						✓	✓	

特点 \ 设备	带式锯系统 CL				带式锯系统 CP				旋转锯系统	环形锯系统			
	300		310		300		310		340	360			
	CL	CLV	CL	CLV	CP	CPV	CP	CPV	CP	CL	CLV	CP	CPV
切割步骤	--	--	--	--	--	--	--	--	yes	--	--	--	--
进刀力=恒定	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	--	yes	yes	yes	yes
进刀速率=恒定	--	yes	--	yes	--	yes	--	yes	--	--	yes	--	yes
进刀力比值=恒定	--	--	--	--	yes	yes	yes	yes	--	--	--	yes	yes
切割面积 (最大值) 长×高 [mm] 直径 [mm]			270×190 ¹⁾		100×80		120×120		100×40	25 _φ			
切割损失 [μm]	280-450		280-700		280-450		280-700		150-800				
薄片的自由断面	0/+		0/+		+	++	+	++	0	-	-	0	0
释本固定 • 真空 • 夹钳装置数量	Yes 1× (2×) ²⁾		Yes 2× (4×) ²⁾		Yes 1×		Yes 2×		Yes 2×	yes (sample glued at an adapter)			
金刚石工具 • 单层 • 多层	Yes --		Yes --		Yes --		Yes --		Yes yes	-- yes			
冷却和工具清洗 液体: • 水 • 油 • 干洗	++ 0 +		++ 0 +		++ 0 +		++ 0 +		++ ++ --	++ ++ --			

++ = 理想
+ = 推荐

0 = 一般
- = 不推荐

¹⁾ 500×190 有转接器
²⁾ 特殊转接器

材料合成物 举例		设备		带式锯系统 CL				带式锯系统 CP				旋转锯系统	环形锯系统			
		300		310		300		310		340	360					
		CL	CLV	CL	CLV	CP	CPV	CP	CPV	CP	CL	CLV	CP	CPV		
牙科	Titanium PMMA	+		+		++		+/++		+	0	0	+	+		
	COCRMO PMMA	0		+		++		+/++		+	-	0	+	+		
	Al203 Titanium PMMA	-		0		+		++		+	-	-	0	+		
	Titanium HA PMMA	+		+		++		++		+	0	0	+	+		
臀部	Titanium PMMA	0		+		0/+		++		++*	尺寸问题					
	COCRMO PMMA	-		0		-		+		++*						
	Al203 Titanium PMMA	-		-/0		-		+		++*						
	Al203 Titanium HA PMMA	-		-		-		+		++*						
膝盖盖	C	Titanium PMMA	-		0/+		0	++		+*	尺寸问题					
	U	COCRMO PMMA	-		0		-	++		+*						
	P	UHMWPE PMMA	-		0		-	++		+*						
	S	Titanium UHMWPE PMMA	-		-/0		-	++		+*						
		COCRMO UHMWPE PMMA	-		-		-	+		+*						

++ = 理想

0 = 一般

* = 尺寸限制

+ = 推荐

- = 不推荐

材 料 \ 设 备		带式锯系统 CL				带式锯系统 CL				旋转锯系统	环形锯系统			
		300		310		300		310		340	360			
		CL	CLV	CL	CLV	CP	CPV	CP	CPV	CP	CL	CLV	CP	CPV
矿 石 陶	单晶 AL203	-		-		0		0		+	0*	+*		
	多晶 AL203	0		0		+		+		++				
	蓝宝石	-		0		0		+		++				
	花岗岩	-		0		+		++		++				
	SiO2	0		0		+		++		++				
	盐 (干)	0		0		++		++		++				
碳	石墨	+		+		++		++		+	0*	+*		
	整形合成物	0		0		+		++		++				
金 属	硬且脆	钨 单晶	-		-		++		++	+	-	-		
	硬且软	整形和牙科	-		0		+		+	++	0*	0*		
	中等 硬度	Titanium alloy (orthopaedic & dental)	0		+		++		++	++	+	+		
	软	Al/Cu (mono-crystal)	-		-		++		++	+	-	-		
		++ = 理想				0 = 一般				* = 尺寸限制				
		+ = 推荐				- = 不推荐								

应用

设备 材料		带式锯系统 CL		带式锯系统 CL		旋转锯系统		环形锯系统							
		300		310		300		310		340					
		CL	CLV	CL	CLV	CP	CPV	CP	CPV	CP	CL	CLV	CP	CPV	
软塑料	PMMA	-		0		0		++		+		+*	+*	++*	++*
	UHMWPE	-		0		0		++		+		-*	-*	+*	++*
嵌入组织	骨骼/不带软组织	+		+		++		++		+				-	
	骨骼/少量软组织	+		++		+		+		0				-	
	骨骼/大量软组织 (骨骼)	+		++		+		+		-				-	
组织嵌入塑料	骨骼/with & without soft tissue	0		+		++		++		+		+	+	+	+

++ = 理想

0 = 一般

* = 尺寸限制

+ = 推荐

- = 不推荐

主要优势 (cp 与 cL 对比)

优势	C L	C P
样本形变小	基准	++
表面品质佳		++
切割时间短		+++
碎片排除好		+++
冷却效率高		++
单次切割工具成本低		+++