

# 微夹钳技术发展现状及应用研究\*

李路明 任延同 王立鼎 邵培革

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130025)

**摘要** 微夹钳是最典型的微执行器, 它可以充当机器人手爪, 配合各种多自由度驱动装置成为微机器人。微夹钳单元技术与微装配、微操作、微焊接、微封装等系统技术紧密地联系在一起。由于它的重要性和广泛的应用, 近年来已成为微机械领域研究的热点。本文首先介绍了微小领域中物体夹持的物理背景, 阐述了粘附力的规律和解决方法; 详细介绍了已有的微夹钳的研究进展状况, 结合作者的科研工作, 阐述了有代表性的几种微夹钳的工作原理及工艺制作方法; 指出了微夹钳的发展和功能优化方向, 以期对微夹钳的研究工作起到一定借鉴作用。

**关键词:** 微夹钳; 粘附力; 现状

## 1 引言

微机械技术是二十一世纪最具诱人前景的高技术领域之一。通过发展智能化、有传感器和执行机构的价格低廉的微型机械系统, 微机械技术将成为下一世纪最重要的产业之一, 革命性地变革人类的生活。近二十年来, 随着微电子技术的高速发展, 微型的智能技术和传感技术得到较快的发展, 而与之相对应的微型执行器技术, 发展相对缓慢, 成为限制微机械系统发展的瓶颈。这一状态引起了人们的关注, 国内外科技人员在微执行器领域投入了巨大的精力, 展开了广泛的研究工作并取得了令人瞩目的进展。但是, 在进一步小型化、集成化(与 IC 工艺兼容), 提高操作性能, 与微智能和传感元件相匹配方面还面临困难, 发展水平不尽人意。

微执行机构的典型之一是微夹钳, 它在微机械零件加工、微机械装配和生物工程等方面都有较好的应用前景, 近来发展十分迅速。目前, 科技人员已经研制出静电力驱动、电磁力驱动、功能材料驱动的种类众多的微小尺度操作和微小尺寸的夹钳, 其中一些已研究成功, 体现出现时和潜在的应用价值。

多种微型制造技术的发展,特别是半导体微细加工技术和 LIGA 加工技术,成为微机械支撑技术。硅平面工艺是首选的。半导体微细加工技术已成为微工程通用的工艺之一。欧美和日本等科学技术发达国家,曾先后研制过硅材料的静电力驱动和金属材料的压电陶瓷驱动的微尺寸夹钳和微尺度操作夹钳。静电力驱动夹钳的典型是以硅为材料,采用叉指式结构,与 IC 工艺兼容,可实现小型化和集成化。但是,由于静电场的特性,难以实现大的力和位移输出。压电材料驱动的夹钳,由于压电体的位移输出小,用来作驱动源往往须加位移放大装置。也有学者利用电磁力驱动夹钳,但由于电磁线圈结构较复杂,难以用 IC 加工。近年来,国内科技人员在国家自然科学基金委、中科院和国家科委的支持下,对微夹钳等执行机构进行了研究。长春光机所对静电力驱动的硅微夹钳、压电陶瓷驱动的具有放大机构的金属材料微尺寸夹钳和微尺度操作夹钳进行了研究;上海大学对压电陶瓷驱动和电磁力驱动的微夹钳进行了研究。这些工作对微机械理论研究和工程应用都有推动作用。

## 2 微夹钳的粘附物理现象

微夹钳的主要功能是用来夹持和操作微小物体。当被夹持物尺寸小到一定程度,在空气环境中,范德华力、表面张力和静电力就会成为粘附力,在夹钳爪表面和被夹持物之间起很大的作用。在进行实际的操作和夹持过程中,无法忽略这些粘附力。这些力的平衡、变化与环境的湿度、温度、表面材料性质和相对运动情况有关。微夹持操作和宏观夹持操作有很大的不同。由图 1 可以看出这种差别。研究这些粘附力及其微观物理现象,找到有效的消除粘附的方法,对提高微夹钳的夹持操作性能有很大帮助。

被夹持物的尺寸缩小到 100 Lm 左右时,粘附力主要是表面力,即范德华力、表面张力和静电力。当空气干燥,被夹持物与钳爪表面接触面积小,无微液滴生成时,表面张力会大幅减小。以  $\text{SiO}_2$  球与 Si 平面作粘附实验,比较几种粘附力与重力随球径变化的尺寸效应,见图 2。可见当球径小于 100 Lm 时,几种粘附力的大小关系为

$$F_{\text{tens}} > F_{\text{vdw}} > F_{\text{el}} \quad (1)$$

式中,  $F_{\text{tens}}$  为表面张力,  $F_{\text{vdw}}$  为范德华力,  $F_{\text{el}}$  为静电力。当空气相对湿度大于 60%,主要的粘附力是接触表面间液面的毛细收缩张力;当相对湿度较低时,主要粘附力是接触面吸附的水分子中氢键合力;当接触表面经 200 °C 热处理或氢处理后,表面力会大为降低,此时主要的粘附力是范德华力。

减小范德华力的途径有二条:(1) 在钳爪上加表面涂层,改善表面性质。(2) 增加钳爪表面粗糙度。两种方法相比较,增加表面粗糙度的方法对范德华力影响更显著。设理想状态的球、平面之间的范德华力为  $F_{\text{vdw}}$ ,而实际的范德华力为

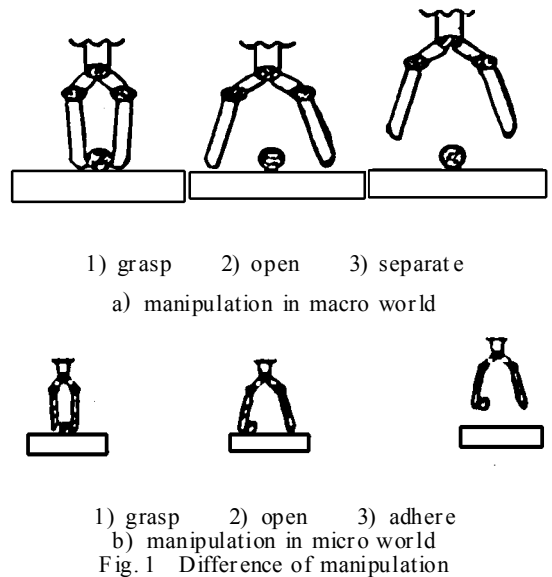


Fig. 1 Difference of manipulation

$$F_{vdwb} = \left(\frac{Z}{Z + b/2}\right)^2 F_{vdw} \quad (2)$$

式中,  $Z$ ——球和平面之间的实际间隙;

$b$ ——平面的表面粗糙度;

当  $Z = 0.4 \text{ nm}$ ,  $b = 0.1 \text{ Lm}$  时,  $F_{vdwb}$  约为  $F_{vdw}$  的  $1/1600$ 。可见, 增加钳爪表面粗糙度可显著降低范德华力。

静电力的产生是正、负电荷的相互作用, 是静电场对电荷的作用。静电荷产生途径有三种:

- (1) 外加电压产生;
- (2) 自放电产生;
- (3) 辐射电离产生。

这三种产生途径相应地对应对应着三种消除方法, 即

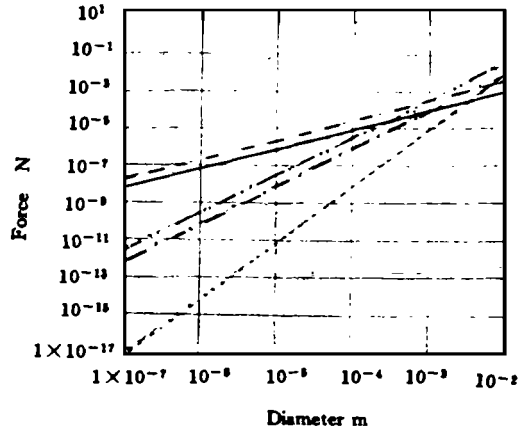
- (1) 外加电压消除;
- (2) 自放电消除;
- (3) 辐射消除。

其中, 以自放电方法消除电荷最简单, 也适合于微夹钳操作。在钳爪表面制做大量密布尖锐突起呈四棱锥体状, 使锥体尖端电荷集聚, 电场升高, 可通过自放电来排泄静电。表 1 给出了各种可控制因素对降低粘附力的作用。

Table 1 The effect of several factors on reduction of adhesive force

controllable factors	adhesive force		
	$F_{vdw}$	$F_{tens}$	$F_{el}$
roughness	—	—	—
relative humidity		—	
thermal treatment		—	
hydro phobic treatment		—	

Note: “—” mean the reduction on this kind of adhesive force.



- $F_{vdw}$ : Vander Waals force
- - -  $F_{tens}$ : surface tension force
- · - ·  $F_{el}$ : electro static force between charged body and uncharged body
- · - ·  $F_e$ : electrostatic force between the charged bodies
- · ·  $F_g$ : gravitational force

Fig. 2 Comparison of gravitational force and adhesive forces

### 3 微夹钳的设计原理及应用发展研究

#### 3.1 微夹钳的现有种类

目前, 国内外已列入科研计划并且正在研究的微夹钳有十多种。其中, 绝大多数都已取得

阶段性研究成果, 有几种微夹钳已显示了实际的应用前景。从原理、设计到材料、工艺、种类和形式非常繁多, 根据划分微夹钳的标准不同, 对微夹钳也就有不同的分类方法。表 2 依据不同的分类标准列出了相应的微夹钳。

Table 2 Different sorting method for microgripper

standard of sorting	contents of microgripper
construct ure	microsize gripper, micromanipulation gripper
bionic structure	crab gripper
driving force	electrostatic force, electromagnetic force, mechanical force
material	single crystal Si, Au, Ni, stainless steel, permalloy
fabrication	LIGA, IC, deep etching, laser cutting, wire cutting, EDM
functional material	SMA, PZT, Nafion, bimetal film, bidirectional driving PZT

### 3.2 微夹钳的原理和研究进展

微夹钳由于其自身在微观领域的重要操作作用, 近年来已成为国内外研究的热点。伴随着该单元技术, 微装配、微操作、微焊接、微封装等系统技术也得以发展。目前, 以压电元件驱动的微夹钳受压电元件尺寸的限制, 难以做得很小。压电元件的逆压电效应产生的变形量很小, 通常为几~十几微米, 不能满足微尺度操作的要求。现在采用机械增幅机构, 利用杠杆原理, 来放大位移。经过二、三级的放大, 可以将压电元件的变形量放大到几百微米。机械增幅机构中多采用柔性铰链, 柔性铰链适合于实现小范围偏转的支承, 可以作为杠杆支点和构件间的铰接点, 体积容易做得很小, 无机机械摩擦、无间隙。柔性铰链绕轴作复杂运动的有限弹性角位移时, 储存了一定的弹性势能, 当机械增幅机械去掉驱动力之后, 机构可以靠柔性铰链的弹性能恢复原状。形状记忆合金是一种功能材料, 经过一定的热处理和记忆训练后, 它对原有的形状具有记忆能力。利用这种记忆效应来夹持、释放物体, 这就是形状记忆合金夹钳的基本原理。形状记忆合金具有较高机械性能, 抗蚀性能好, 可恢复应变量大, 恢复力大, 本身既是驱动材料, 又是结构材料, 便于实现机构的简化和小型化。微尺寸的形状记忆合金夹钳多采用片状形状记忆合金, 在薄片表面采用 IC 工艺制作一层  $p_t$  丝的微加热单元。片状形状记忆合金的散热效果和记忆性能都较其它形状的记忆合金(杆状、丝状)好。表面层中的微加热单元能耗低, 温升迅速并且容易控制。形状记忆合金可以做成各种合适的记忆形状, 也可以在其钳爪表面涂敷各种有机材料, 以适应于对柔软物体的抓取。形状记忆合金工作变形的过程就是一种热弹性马氏体相变过程, 温度滞后小, 并且  $M_s$  点可以通过工艺调整, 这些优点使形状记忆合金成为微执行器中的一种重要功能材料。硅微夹钳多采用深刻蚀工艺进行加工。驱动力分为静电力和 PZT 变形力两种。开发微夹持钳系统的一个重点是实现传感器性能的集成化。要在微技术中开发研究出微夹钳, 通过它的各种性能(如传感能力的集成、尺寸、材料特性以及无损耗无间隙的运动传递)表现出全新的解决微操作夹持的方法, 硅是最适合的材料。在硅表面可以制作集成电路, 硅也是制作各种传感器的主要材料。硅与钢的弹性模量之间几乎没有多大区别, 在导热性、热负载、耐腐蚀性方面, 硅却优于大多数金属, 并且无磁滞, 抗老化, 适合于作为机械材料。硅静电微夹钳利用平板电容器产生侧向吸引力的原理, 产生微夹钳的夹持力。夹持力的大小与施加的

电压成线性关系。电压去除后,硅钳臂靠自身的弹性势能恢复到原位,钳口张开;施加电压后,硅钳臂在静电力作用下弯曲变形,钳口闭合。表 3 给出了国内外已研制的微夹钳的工作原理、尺寸和研究单位。

Table 3 Microgripper research condition

type	researcher	working principle	size(mm)
silicon gripper	CIOM, CAS	plane capacity electrostatic force	1.5×0.35×0.05
PZT gripper	shanghai University	PZT driving force with magnifying structure	15×7.2×3.5
crab microhand	Shanghai University	step motor	0.838×0.848
elastic microgripper	Japan	PZT driving force with magnifying structure	1×0.2×0.0007
polymerglue microhand	Japan	electric field induced force	finger: 60 wrist: 6×7
optical gripper	Japan	PZT and photoelectric element	40×35
SMA gripper	CIOM, CAS	thermotransform force	5.2~5.10
6D microhand	Japan	6 P&T driving force	30×30×30
silicon gripper	Germany	PZT	30×20×0.24
SMA microhand	Japan	thermotransform force	
pneumatic micro-hand	Japan	different pressure in the tube cavity	end: 5.9 finger: 5.2

## 4 微夹钳的未来发展

微夹钳单元技术的重要性是无须置疑的。不同的应用和工作目的,决定了微夹钳的种类、大小、型式也会多种多样,并且还要相应地将这种单元技术发展成为一种系统技术,即将各种测试、处理、接口电路集成在钳体,将各种传感器与钳身集成在一起,实现对力、温度、电、物理量在夹持操作中的测量。实现功能集成及夹持操作系统化是微夹钳及其相关技术的发展方向。

### 参 考 文 献

- [1] Fumihito ARAI, Daisuke ANDOU, Yukio NONODA, Toshio FUKUDA. Micro Manipulation Based on Microphysics. 1996, DSC- 59: MEMS, ASME
- [2] Wolter O. et al. Micro Machined Silicon Sensors for Scanning Force Microscopy. J Vac Sci Technol, 1991, B9(2): 1352~1357
- [3] Paolo Dario, Maria Chiara Carrozza. Interfacing Micro Systems and Biological Systems. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, 1995: 57~66
- [4] 安藤泰久等. 机械技术研究所所报, 1996, 50(2): 7~12
- [5] Okuyama K, Masuda H, et al. Interaction between Two Particles. Journal of the Society of Power Technology, Japan, 1985, 22(7): 452~475
- [6] Tsuchitani S, Suzuki S, et al. Theoretical Study on the Surface Force in Microstructures. Transaction of

the Society of Instrument and Control Engineers, 1996, 32(5): 637~645

[7] 孙 萍, 孙麟治. 电磁驱动式微小夹持器的研制, 光学 精密工程, 1996, 4(4): 40~47

[8] 周兆英等. 微型机电系统进展. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 20~25

## Development of Microgripper Technique

Li Luming, Ren Yantong, Wang Liding, Shao Peige  
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

Microgripper is the most typical microeffector. It can be used as robot's hand, which is connected with any multiple DOF driving apparatus to realize real robot. The success of the microgripper technique is closely concerned with the system technique, such as microassembly, micromanipulation, microweld and microenvelop. Because of the importance and wide usage of the microgripper, the microgripper has become the most vital area in MEMS field recently. First this article introduces the physics phenomenon about clamping microobjects with microgrippers. Second the article explains the discipline of the adhesive forces between the object and the gripper paws, and the reduction methods for them. At the end of the article, we introduce several different work principles based on our research work, and point out the future of the microgripper.

**Keywords:** Microgripper, Adherence, Situation

**李路明** 男, 1969 年出生。1991 年毕业于哈尔滨工程大学机械系, 获学士学位。1993 年考入中国科学院长春光学精密机械研究所读硕士学位, 曾从事过二维微位移工作台的研究。1995 年 1 月推荐直接攻读博士学位, 研究领域为微电子机械系统。博士研究课题是研制“微操作系统”。