

微夹钳研究的进展与展望

张培玉, 武国英, 郝一龙, 李志军
(北京大学微电子所, 北京 100871)

摘要:微夹钳技术是微机械技术的重要内容之一。本文首先论述了微夹钳的应用背景,回顾了微夹钳技术研究的历史及现状;对目前国内外所研究的微夹钳进行了分类,并对其结构工艺与工作原理进行了分析;最后,对微夹钳技术的发展进行了展望。

关键词:微夹钳; 微机电系统; 综述
中图分类号:TN305.7 **文献标识码:**A

1 引言

20世纪60年代发展起来的微电子技术和集成电路,已构成人类文明的重要基础。大规模集成电路的出现在许多领域引发了一场微小型化革命。微电子技术的巨大成功使微米/纳米技术(Micro/Nano Technology)应运而生^[1~5]。微纳米技术是一个新兴的多学科交叉的高技术领域,涉及电子、机械、材料、物理、化学等学科。它研究和控制物质结构的功能尺寸或分辨能力,达到微米至纳米尺度。虽然微米量级的器件基本上仍遵循宏观世界的规律,但在不同程度上显示微小事件的特征;而纳米尺度的现象和器件的特性与宏观世界的规律有很大的差异。人类的目的是要实现原子分子层次上的制造技术,形成新的物质结构和机器。实现此目的的途径有两种:一种是由微观向宏观,即直接操作单个原子或分子,为此要求一种机械系统能象一只机械手那样捕捉一个原子或分子并把它们组装在适当位置(这种获得精确地把分子夹持到适当位置的能力称之为分子制造技术)。这样,一种操作尺度十分细微的微动系统构成微机械研究的又一个重要方向和内容。另一途径则由宏观向微观即用传统的方法由大机器制造出小机器^[6~8]。为此,要求相应的工艺装备的定位精度进入亚微米甚至纳米精度。实际上,无论哪种途径加工出的微机械零件都需要一种操作尺寸十分细微的微动系统装配成微机械。

由以上分析可以看出,微夹持或微操作系统的重要性,而微夹钳技术是此微系统的关键。微夹钳作为一种典型的微执行机构,不仅可成为微机

器人的手爪,而且在微机械零件的加工、装配、生物工程和光学等领域均有很好的应用前景^[9~18]。因此,微夹钳及与其相关的研究已成为国内外微机械研究领域的一个前沿课题。

2 夹持的实现方式

抓取和搬运微机械构件或组件的技术通常有两种:一是用真空或静电吸附方式抓取,另一种是夹钳夹取方式。吸附方式对抓取构件形状要求严格,而夹钳可夹持除边缘太薄之外的几乎所有形状,且抓取灵活。微夹钳的夹持力可通过以下方式实现:

(1)通过结构单元的动力啮合夹持;(2)通过结构单元的形状配合夹持;(3)利用真空夹持;(4)利用粘附材料夹持;(5)利用功能材料夹持。

还可通过利用物理效应和原理辅助上述夹持方式的实现。如静电学、压电效应、形状记忆效应和状态变化(冻结)等。

3 微夹钳的分类

目前,国内外正在研究的微夹钳多种多样,根据能量供给和驱动方式、装置、结构、执行机构、材料和工艺等方式的不同有着不同的分类方法。由于动力源及驱动装置直接决定了夹钳主体的结构尺寸和性能,因此能量供给和驱动方式在微夹钳设计中占有重要的地位,决定夹钳加紧力和夹持范围的大小,是能否实用化的关键。所以,以下按能量供给和驱动方式对微夹钳进行划分。

3.1 静电式微夹钳^[19-20]

图1静电驱动微夹钳是由梳齿状或叉指状平行电容器产生的侧向静电吸引力作为夹持力。当微夹钳通直流电时,平板电容器的侧向吸引力使钳口夹持物体;当微电容器放电夹持力消失后,夹钳靠侧壁的弹性恢复到原来的位置,从而使钳口张开,松开被夹持的物体。

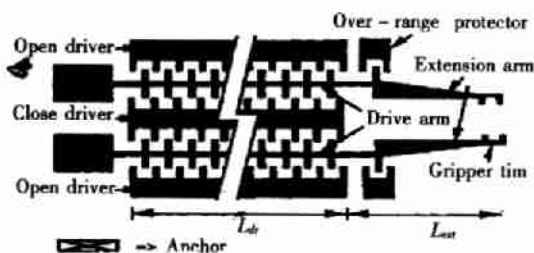


Fig. 1 Electrostatic microgripper

静电驱动微夹钳的优点是制作工艺与IC工艺兼容,较易实现小型化和微型化;其缺点是难以实现大的力和位移输出。

3.2 电磁式微夹钳

图2为电磁式微小夹持器及夹持原理示意图^[21]。该夹持器是以电磁力作为驱动源,带动斜楔推动夹爪完成夹持动作。能获得较大范围的开口张合量,夹持动作响应快、无磨损、控制简单、精度高、承载能力大,但其电磁线圈结构难于用IC工艺加工。而且体积大,无法作得很小,还称不上是微夹钳。

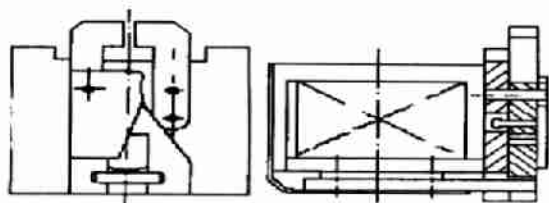


Fig. 2 Electromagnetic microgripper

3.3 压电式微夹钳^[21-23]

图3是压电式微夹钳。其驱动源是压电变换器。通过施加电压,压电变换器产生长度变化,使钳口张合。此微夹钳具有可控输出、无摩擦、无间隙、易制作等优点;但其总体尺寸受压电元件的限制,难以作得很小。且压电元件的逆压电效应产生的变形量很小,一般采用机械增幅机构。

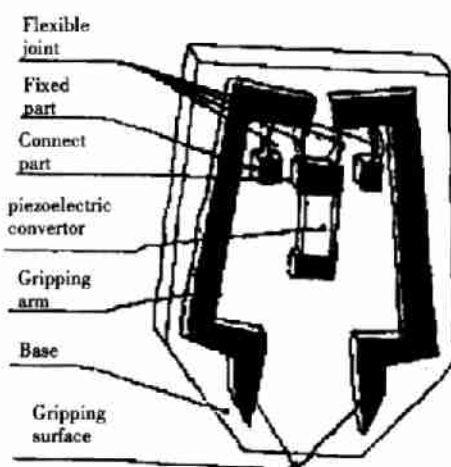
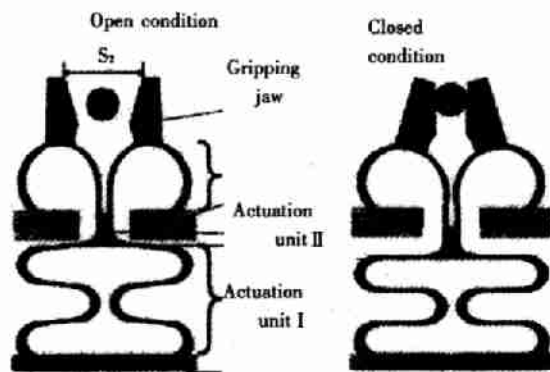


Fig. 3 Piezoelectric microgripper

3.4 形状记忆合金微夹钳

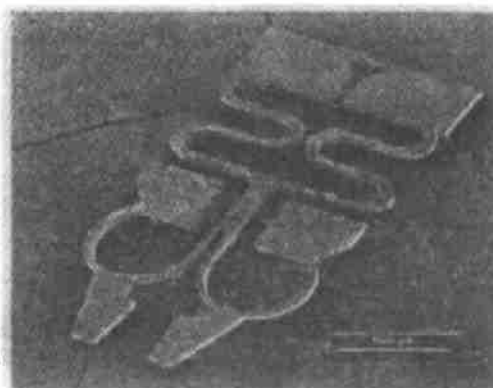
形状记忆合金是一种功能材料,经过一定的热处理和记忆训练后,对原有的形状具有记忆能力。利用此记忆效应来夹持、释放物体。图4是一种形状记忆合金微夹钳,图4(a)、(b)分别为夹钳的开、合状态。其原理是:通过加热由形状记忆合金组成的驱动单元I,使其产生变形,引起驱动单元II变形,从而使钳爪闭合;反之,温度下降,变形恢复,钳爪张开。

形状记忆合金具有较高的机械性能,抗腐蚀性好,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。



(a)

(b)



(c)

Fig. 4 SMA microgripper

3.5 液体(真空)吸附式微夹钳

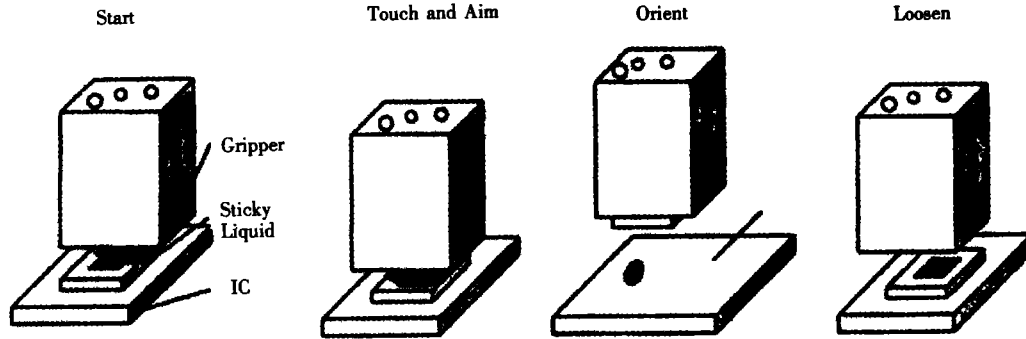


Fig. 5 Microgripper of liquid conglutination

此类微夹钳利用低粘度液体对易损元件进行夹持抓取的。图 5 是一种液体吸附微夹钳^[31],粘附液为酒精。工作时,夹钳向下移动,钳臂端的粘附液与微器件接触,粘附力起作用,将微器件吸起。

此类夹持钳特别适于易损元件,但夹持体积大,不易小型化,且易引起微器件间的粘附。

3.6 光捕获微夹钳(光钳)

光钳是利用光捕获技术来移动微小物体的。

所谓光捕获技术就是利用光的力学作用、用激光束夹持不足微米大小的物体,并使之移动的技术。即使激光发挥夹钳的作用,以捕捉移动微小物体的技术。目前,光钳主要用于与生物学相关的领域。此处不详述。

此外,还可将上述几种类型的微夹钳相结合形成新的微夹钳。如图 6 是一种复合式微夹钳。该微夹钳把电力和压电驱动结合起来,完成夹钳开合动作。

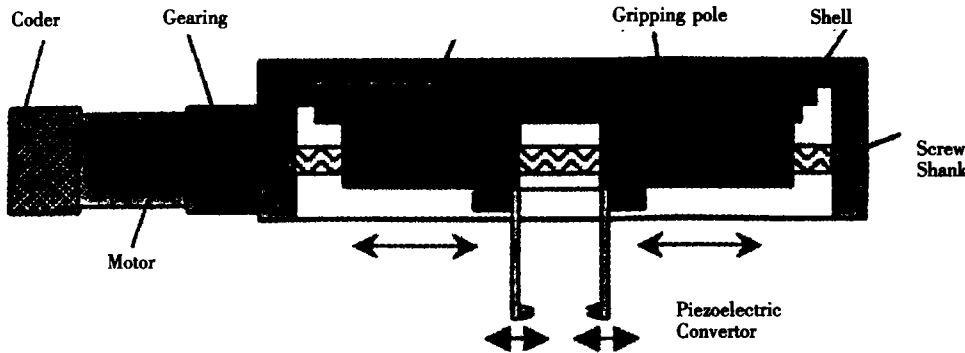


Fig. 6 Complex microgripper

4 微夹钳技术的研究

微夹钳的功能主要用于抓取或夹持细物体和微型构件。轻、小、薄、软是一般微细物体和微型构件的显著特征。夹持力大小的控制,使被夹持物不至于有太大的变形或损坏,微夹钳与被夹持物的粘着等问题。夹持原理的探索、夹持机构的研究在

使 MEMS 走入实用起着关键作用。

从宏观上看,夹钳爪表面和被夹持物之间的摩擦力和被夹持物体自重在实际操作和夹持过程是必须考虑的。而当被夹持物的尺寸缩小到一定程度时,这些力的影响相对减小,自重甚至可以忽略。而范德瓦尔斯力、表面张力和静电力的影响就会成为主要影响因素,成为粘附力。这些力的平衡变化与环境的温度、湿度表面材料性质和相对运

动情况有关。图7显示出微夹持操作和宏观夹持操作的过程。而且,微机械在运动过程中各部件有时也会出现粘附现象。此外,在表面微机械加工过程中,对结构进行释放时,微结构常会粘附到衬底上。所以,研究微操作就必须研究上述粘附力及其物理现象,寻找有效的消除粘附的方法。又出现了多种表面处理方法来减少和消除粘附现象。

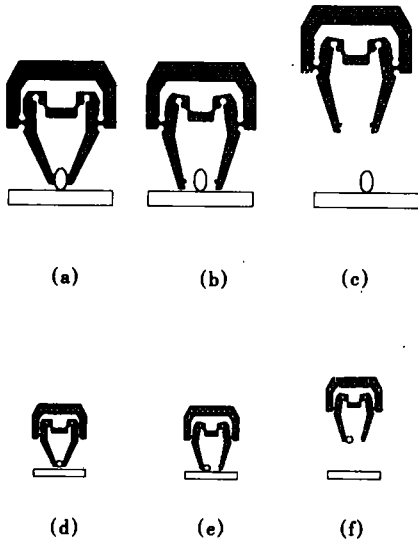


Fig. 7 Macro and micro operation of gripping

研究表明^[33],被夹持物的尺寸小到 $100\mu\text{m}$ 左右时,粘附力主要是表面力,即范德瓦尔斯力、表面张力和静电力。当被夹持物与夹钳表面接触面积小,空气干燥、无微液滴生成时,表面张力会大幅减小。当球径小于到 $100\mu\text{m}$ 时,几种粘附力的大小关系为

$$F_{\text{ens}} > F_{\text{vdw}} > F_{\text{el}}$$

式中 F_{ens} 为表面张力, F_{vdw} 为范德瓦尔斯力, F_{el} 为静电力。

当空气湿度大于60%时,主要的粘附力是接触表面间的毛细收缩张力;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,当硅接触面经 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瓦尔斯力。

减小范德瓦尔斯力的途径有二:一是在钳爪上加表面涂层,改善表面性质;二是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瓦尔斯力影响更显著。静电力的产生是正、负电荷的相互作用。静电荷一般是外加电压、自放电产生或辐射电离产生。通常是根据产生的原因用外加电压、自放电或辐射去消除。其中,以自放电方法消除电荷最简单,也适合微夹钳操作。

5 微夹钳技术研究难点及展望

微夹钳是微世界研究和探索的工具,所以在微观领域的应用十分广泛。由于目前制作的微夹钳大多是用硅材料制作的,而硅材料部件间有相对运动时的摩擦、磨损较严重。解决此问题的途径可通过增大批量,使其价格低廉,使用一次或几次即可更换。微夹钳构件间的联接也可采用柔性铰链,这样结构具有高精度、高稳定性、无间隙和无摩擦等特点,体积也易作得很小。且柔性铰链绕轴作有限性角位移时,储存了一定的弹性势能,当驱动力去除后,机构可以靠柔性铰链的弹性恢复原状。微夹钳技术另一难点是能源供给问题。尽管微夹钳钳体可以作得很小,但驱动装置(动力源)的尺寸尚无法与钳体相适应或驱动源的尺寸虽与钳体相适应,但力矩较小。此问题若能解决,将使微夹钳的应用更广泛。已有研究采用放大机构来增大扭矩,但效果并不理想。目前,虽然不同的应用场合和工作目的决定着微夹钳的类型及制作工艺,但微型化、集成化和智能化一直是微夹钳技术研究的发展方向。

参考文献:

- [1] 李志坚. 微电子技术的又一次革命——微电子机械系统(MEMS)发展展望[J]. 科技导报, 1997, (9): 3-5.
- [2] 温诗铸, 李坤. 微型机械与纳米机械学研究[J]. 中国机械工程, 1996, 7(2): 17-21.
- [3] 周兆英, 叶雄英, 等. 微米纳米技术及微型机电系统[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(1): 1-7.
- [4] 刘秉强. 纳米技术——超微型化的曙光[J]. 中国仪器仪表, 1996, (4): 29-31.
- [5] 刘兴占. 微米技术发展近况[J]. 中国仪器仪表, 1997, (3): 7-9.
- [6] Mehregan Mehran, Gabriel Kaigham J, Trimmer William S N. Integrated fabrication of polysilicon mechanisms [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1988, 35(6): 719-723.
- [7] Fan L-Sh, Tai Y-Ch, Muller R S. Integrated movable micromechanical structures for sensors and actuators [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1988, 35(6): 719-723.
- [8] 王跃林, 苏以徽, 王文. 微电子机械系统[J]. 电子学报, 1995, 23(10): 37-42.

- [9] Ku S, Salcudean S E. Design and control of a teleoperated microgripper for microsurgery[C]. Proc. of the 1996 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota Apr. , 1996. 889—894.
- [10] 高晓萍摘译. 微型机器人[J]. 光机电信息, 1995, 12(12): 14—16.
- [11] 路敦武, 沈蓓军, 等. 微机械构件组件技术研究[J]. 光学 精密工程, 1995, 3(3): 56—59.
- [12] 李云平, 龙志峰, 等. 微器件装配系统与关键技术[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(3): 1—6.
- [13] 孙家鼎, 曾周末, 杨明. 国外微型机械及微执行器的研究[J]. 光学 精密工程, 1995, 3(3): 8—13.
- [14] 大周编译. 微型部件的柔性装配[J]. 光机电信息, 1997, 14(12): 12—13.
- [15] 郑巍, 微毓炯, 李庆祥. 微器件装配系统总体方案研究[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(4): 60—64.
- [16] 孙麟治. 微机械研究新进展[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(20): 1—6.
- [17] Ashley Steven. Getting a microgripper in the operating room[J]. Mechanical Engineering. 1996, 91—93.
- [18] 毕树生, 宗光华, 等. 生物工程中的微操作机器人系统[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(3): 62—68.
- [19] Kim Chang-lin, Pisano Albert P, Muller Richard S, Lim Martin G. Polysilicon Microgripper[C]. IEEE, 1990. 48—51.
- [20] Li Luming, Wang Liding. Micromanipulator system in MEMS[C]. Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Industrial Technology, 1996. 665—668.
- [21] 孙萍, 孙麟治, 等. 微小机械的研究[J]. 上海大学学报, 1998, 14(6): 344—348.
- [22] 大周编译. 微型装配用的硅夹钳[J]. 光机电信息, 1997, 14(9): 31—33.
- [23] 周新宇, 徐锡林. 微型机械鱼的研究与特性分析[J]. 光学 精密工程, 1995, 3(2): 54—57.
- [24] Just E, Kohl M, Pfleging W. SMA microgripper with integrated antagonism[A]. The 10th International Conference in Solid-state Sensors and Actuators[C]. Sendai, Japan, June 7—10, 1999.
- [25] Suzuli Yohihiko. Fabrication and evaluation of flexible microgripper[J]. Jpn, J. Appl. Phys. 1994, 33, Part1 (4A): 2107—2112.
- [26] Irita Takeshi, Suzuli Yohihiko. A drying method using naphthalene for flexible microgripper fabrication[J]. Jpn. J. Appl. Phys. 1996, 35, part2(11A): L1468—L1471.
- [27] 徐锡林, 张艺. 形状记忆驱动型微机械手的设计研究[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 64—68.
- [28] 李路明, 王立鼎. SMA 微夹钳的研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(2): 37—42.
- [29] 李路明, 王立鼎. 环状 SMA 微夹钳工作原理的研究[J]. 功能材料与器件学报, 1998, 4(2): 89—94.
- [30] 徐锡林, 周新宇. 微型可控镊子[J]. 光学 精密工程, 1995, 3(2): 51—53.
- [31] 大周编译. 微技术中使用的液体夹钳[J]. 光机电信息, 1997, 14(6): 32—33.
- [32] 千东英. 微电子机械系统研究的新动向[J]. 机械设计与研究, 1997, (1): 46—47.
- [33] 李路明, 任延同, 王立鼎, 邵培根. 微夹钳技术发展现状及应用研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(4): 8—13.

Development of microgripper technology

ZHANG Pei-yu, WU GUO-ying, HAO Yi-long, LI Zhi-jun

(*Microelectronics Institute, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: Microgripper technique was one of important parts in micromachine techniques. Firstly, the application background was recounted in the paper. The development and actualities of research in microgripper technique were reviewed. Secondly, microgrippers were classified. The structural arts and work principle were analyzed. Finally, the development of microgripper techniques was prospected.

Key words: microgripper; MEMS; review

作者简介: 张培玉(1964—), 男, 河南省开封市人。1999年于清华大学获博士学位, 现为北京大学微电子所博士后, 发表学术论文十余篇, 研究方向为微电子机械系统。