

磁流体及其应用

MagnetoFluid and Its Applications

张继松，何虹，杨仁富

西南应用磁学研究所 四川绵阳 621000

摘要：对新型特殊的功能材料—磁流体的发展历程、分类、理化特性、制备方法作了简单描述，对其应用领域进行了较详细地介绍。

关键词：磁流体，分类，理化特性，应用领域

中图分类号：TM27

文献标识码：A

文章编号：1606-7517(2015)03-6-133

1 前言

磁流体，又称磁性液体、铁磁流体或磁液，是一种新型特殊的功能材料，在静态时无磁性吸引力，当外加磁场作用时，表现出磁性。

磁流体由纳米磁性颗粒、基液和表面活性剂组成。它是把纳米数量级（10 纳米以下）（用过滤方法把粗颗粒去掉）的磁性固体颗粒包裹一层长链的表面活性剂，均匀地分散在基液（也叫媒体）中形成的一种均匀稳定的胶体溶液。一般常用 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、Ni、Co 等作为磁性颗粒，以水、有机溶剂（NaOH）、油等作为基液，以油酸（油酸钠溶液）等作为活性剂防止团聚，即可生成黑色的、分散质粒子的直径在 5.5~36nm 的磁流体。由于磁性颗粒很小，表面又有活性剂，故磁流体中每一颗粒都是分离的，而且能抵抗颗粒间的相互吸引力不使它们凝聚。它们在热布朗运动下，能稳定地悬浮在载体中，在正常情况下，它是稳定的，这表示，它在极强的磁场下，它内部的颗粒也不凝聚，也不会沉淀。

由于磁流体具有液体的流动性和固体磁性材料的磁性，使得磁流体呈现出许多特殊的磁、光、电现象，如法拉第效应、双折射效应和线二向色性等。这些性质在光调制、光开关、光隔离器和传感器等领域有着重要的应用前景。

2 发展历程

1832 年法拉第首次提出有关磁流体力学问题。他根据

海水切割地球磁场产生电动势的想法，测量泰晤士河两岸间的电位差，希望测出流速，但因河水电阻大、地球磁场弱和测量技术差，未达到目的。1937 年哈特曼根据法拉第的想法，对水银在磁场中的流动进行了定量实验，并成功地提出粘性不可压缩磁流体力学流动（即哈特曼流动）的理论计算方法。1940~1948 年阿尔文提出带电单粒子在磁场中运动轨道的“引导中心”理论、磁冻结定理、磁流体力学波（即阿尔文波）和太阳黑子理论，1949 年他在《宇宙动力学》一书中集中讨论了他的主要工作，推动了磁流体力学的发展。1950 年伦德奎斯特首次探讨了利用磁场来保存等离子体的所谓磁约束问题，即磁流体静力学问题。受控热核反应中的磁约束，就是利用这个原理来约束温度高达一亿度量级的等离子体。1951 年，伦德奎斯特给出一个稳定性判据，这个课题的研究至今仍很活跃。

美国是世界上研究磁流体发电最早的国家，1959 年，美国就研制成功了 11.5 千瓦磁流体发电的试验装置。60 年代中期以后，美国将它应用在军事上，建成了作为激光武器脉冲电源和风洞试验电源用的磁流体发电装置。

日本和前苏联都把磁流体发电列入国家重点能源攻关项目，并取得了引人注目的成果。前苏联已将磁流体发电用在地震预报和地质勘探等方面。前苏联在 1971 年建造了一座磁流体——蒸汽联合循环试验电站，装机容量为 7.5 万千瓦，其中磁流体电机容量为 2.5 万千瓦。1986 年，前苏联开始兴建世界上第一座 50 万千瓦的磁流体和蒸汽联合

电站，这座电站使用的燃料是天然气，它既可供电，又能供热，与一般的火力发电站相比，它可节省燃料 20%。

3 磁流体的分类

磁流体的分类有很多种，一般按照载液、磁性颗粒的性质分类。

3.1 按照磁流体的磁性颗粒性质分类

3.1.1 铁酸盐系列

铁酸盐系磁流体的磁性粒子一般是铁酸盐，如 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 $BaFe_{12}O_{19}$ 、 $CoFe_2O_4$ 和 $NiFe_2O_4$ 等。

3.1.2 氮化铁系列

Fe_3N 、 Fe_4N 等，氮化铁作为磁性颗粒的氮化铁系磁流体其饱和磁化强度比铁氧体型约高 3 倍以上，而且化学稳定性也比金属及铁氧体强。

3.1.3 金属及其合金系列

Fe 、 Co 、 Ni 、稀土金属及金属合金等，近些年有关金属合金、稀土及其合金纳米磁流体的研究比较多。稀土金属系列磁流体在磁制冷方面的应用具备比较大的潜力，成为国内外研究的热门。

3.2 按照磁流体的载液分类

常见的有水基、烃基、有机化合物基、煤油基、硅碳氢化物基、合成酯基和水银基磁性液体等。

4 磁流体的理化特性

4.1 磁流体的物理性质

磁性液体的特性由纳米磁性颗粒、表面活性剂及载液共同作用表现出来的。磁流体不仅具备液体的流动性，而且还具有固体的磁性。作为一种特殊的胶体体系，稳定性是磁性液体最重要的特性。磁性液体同时具有软磁性和流动性，具有特殊的物理特性、化学特性及流体特性。这些不同于普通液体的特殊性质，为开发新型磁性元件、扩展其在工业方面的应用奠定了基础。

4.2 磁流体的磁化特性

当无磁场时，系统磁矩的和会变为零，显超顺磁性。温度也对磁流体的饱和磁化强度有很大的影响，表现为随温度升高而饱和磁化强度降低，温度降至居里点时磁性消失。磁性颗粒大小也影响磁流体的磁性，一般来说尺寸越

大磁性越弱。磁流体的密度也同样影响磁化特性，测试实验室制备的磁流体不同密度情况下的磁性，当载液较多即磁性颗粒密度小时其磁性较小，载液少而磁性颗粒密度很大时磁性也较小，只有在适当的密度下其磁化特性才最好。当磁流体表现为磁性时，会出现相应的磁特性、粘滞性、密封性、流变性、磁浮性、稳定性和双折射性等独特的性能，磁流体中的磁性颗粒在磁场的作用下可以自发磁化到饱和，由此使其具备不同一般磁介质的磁性性能。具体表现为：静态时，该流体无磁吸引力；当外加磁场作用时，才表现出有磁性，而且其磁性与其流动性表现出极强的相关性。

4.3 磁流体的粘度

磁流体的粘性包括两部分：(1) 普通流体力学下的粘性，温度和压力影响这种粘性；(2) 外加磁场造成的粘性即附加粘性。磁流体的粘度与磁流体的基液有关，磁流体粘度随基液粘度增加而增加。另外磁流体粘度还和其中的磁性颗粒的化学性质、尺寸、浓度等有关。磁场的有无和强弱对其粘度影响很大，无外加磁场且磁性胶体浓度较低时，呈牛顿流体特性；当施加静态强磁场时，粘度一般会增加，并呈现非牛顿流体的特性。

5 磁流体的制备方法

随着对磁流体的研究深入，磁流体的制备技术也日趋成熟，包括物理和化学方法。

5.1 化学共沉淀法（解胶法）

此方法是 1972 年 Reimers 等人开发的，是目前普遍使用的制备磁流体方法。此方法制备的产品一般是铁基磁流体。将一定比例的亚铁盐和三价铁盐在碱性环境下进行化学反应，产生 Fe_3O_4 或 $-Fe_2O_3$ ，之后加入表面活性剂并搅拌一段时间，最后加入载液并加以搅拌，使其磁性颗粒吸附其中，最后加热后将胶体和溶液分开，得到磁流体。在加入载液前磁性液体一般要进行干燥、洗涤。制备期间各个不同的环节要调节酸碱度、温度、搅拌时间、试剂的量等。其中载液选取、表面活性剂的选取、铁盐的选取、反应进行的程度、温度、酸碱度、包覆次数，以及各步骤的反应的时间对最后获得的磁性液体有很大的影响。其优点在于所需设备较简单，制备时间短可得到较小颗粒的磁流体，且成本不高等。但是在制备时存在氧化，需要随时调节 PH 等缺点等，这种方法只适用于非水系载体的磁流体的制作。

5.2 热分解法

是将磁性材料的原料溶入有机溶剂，然后加热分解出游离金属，再在溶液中加入分散剂后分离，溶入载体就得到磁流体。

5.3 机械研磨法

此方法是由 S.S.Papell 在 1965 年提出的，是制备磁流体最早的一种方法。将粉碎的磁性粒子、表面活性剂和载体混合均匀，将混合物加入球磨机中进行球磨，时间为 1000-1100 小时左右。研磨后得到的混合物中有一部分微粒能稳定地分散于载液中。然后在高速离心机中离心处理以除去大直径颗粒，得最大粒径为 10-8nm 的磁流体。该法是最直接的简单方法，但材料利用率低，球磨罐及球的磨损严重，杂质较多，成本昂贵，很难得到 300nm 以下直径的磁流体颗粒。

5.4 放电法

其原理与电火花加工相仿，是在装满工作液（经常与载体相同）的容器中将磁性材料粗大颗粒放在 2 个电极之间，然后加上脉冲电压进行电火花放电腐蚀，在工作液中凝固成微小颗粒，把大颗粒滤去后加分散剂即可得到磁流体。

5.5 真空蒸镀法

在真空条件下把高纯度的磁性材料加热蒸发，蒸发出来的微粒遇到由分散剂和载体组成的下地液膜后凝固，当下地液膜和磁性微粒运动到下地液中，混合均匀就得到磁流体。这种方法得到的磁流体微粒很细，一般在 2-10nm 的粒子居多。

中国矿业大学科研小组将金属放入石墨坩埚中，在自制反应室（不可转动）加入烷烃等有机气体，通过加热来蒸发金属制得炭包覆纳米合金磁流体。这种方法适宜制备金属及其合金纳米磁流体，这种方法制备的磁流体粒度均匀、颗粒度小、性能优异。但是制备的设备比较复杂，制备过程难以控制，并且制备操作难度大。此方法制备的过程也因需要和制备条件的限制而各异，一般的方法是将掺有表面活性剂低挥发性溶剂装入可以转动的滚筒中，用真空泵对系统抽真空，利用热源加热蒸发金属，蒸气吸附挥发性溶剂，最后在滚筒表面吸附凝结成液膜，收集到的液膜将其分散于载液中，最后得到磁流体。

6 磁流体的应用

利用磁流体的磁响应性，它可以被控制、定位、定向和移动，也就是通过控制其流变性，来调节磁流体在具体应用中的磁力强度、浓度、磁性颗粒的排列、移动方向等，最终达到改善产品结构、制造工艺和使用性能等的目的。

6.1 磁流体密封

磁流体密封是利用在外加磁场作用下磁流体具有承受压力差的能力而实现的密封。磁性回路由永久磁铁、极靴和转轴组成。放置在导磁性良好的转轴与极靴顶部之间的制作精良的磁流体在高性能的永久磁铁产生的磁场作用下高度集中，形成一个液体 O 型密封圈，当磁流体受到压力差作用时，磁流体在非均匀磁场中略微移动，产生了对抗压力差的磁力，从而达到新的平衡，进而将转轴与极靴间的缝隙堵死而达到密封的目的。

磁流体密封中的转轴可以是磁性体，也可以是非磁性体。前者的磁束集中于转轴与极靴间的缝隙处，通过转轴构成磁性回路；后者的磁束并不通过转轴，而是通过缝隙中的磁流体构成磁性回路。在理想情况下，所有磁流体密封在每一级中充入的磁流体保证在转轴和极靴之间的每一级建立起一系列液体 O 型密封圈，每一级可以承受的压力差为 0.015~0.02MPa，整个区域的承压能力为各级密封圈承压能力的总和。

磁流体密封主要包括动态过程密封、隔绝密封、特殊机械密封和环境密封四个方面。典型的密封强度为 3-4PSI。在二磁性层间，加入磁流体，运动时，可使磁体表面的摩擦力大为减小。磁流体密封尤其是旋转轴动密封具有零泄漏、用量少、防振、无机械磨损、传递速度高、小摩擦、低功耗、无老化、无污染、自润滑、寿命长等优点。

应用磁流体密封技术最早、最多、最成功的设备是各种真空设备。其中转轴或摆动杆的真空动密封目前已经达到标准化、通用化的程度。因为将旋转运动从大气侧传递到真空室时，采用这种液体 O 型密封圈式动密封装置不但可以克服固体密封中易磨损、功耗大、寿命低、易污染等弊病，而且由于液态的磁流体可以充满整个被密封的空间，从而堵塞了一切可以漏气的通道，实现了运转和停车两个过程中的零泄漏。另外，节能效果明显，不受轴偏心振动的影响，密封结构简单不需维修。

磁流体密封技术作为真空容器抽空后充入工作气体或

防止容器内有毒气体或贵重气体的泄漏时还可以用于密封气体。这种密封不但可以有效地防止杂质对真空室的侵入，还可以保护工作气体的纯度，而且也不存在磁流体对密封介质的侵蚀。

磁流体应用于密封液体目前虽然尚未达到实用化的阶段，但是由于这种密封所具有的零泄漏特性，在防止固体和液体的阻隔密封中，有极大的应用价值。这类密封存在被密封的液体介质易与磁流体接触而引起乳化、变质从而导致密封失效的缺点。在磁流体材料品种少、稳定性差的初期，研究较早较多的是采用辅助手段将密封液体与磁流体分隔开来，阻止二者直接接触以避免对磁流体的侵害，从而将问题转化为各种各样的组合密封结构，例如磁流体密封与螺旋密封组合，利用螺旋密封有效地将被密封液体与磁流体隔开，保证磁流体密封正常工作，防止向内泄漏和停车泄漏，另外还有磁流体密封与离心密封、端面密封等多种组合形式，一般都是为了充分利用磁流体密封的零泄漏、低摩擦、低功耗等特性，但密封结构偏于复杂。另一条有效的技术途径是选用能与被密封液体接触但不受侵害的磁流体，这依赖于开发出专门针对某种特定被密封液体的高稳定性的磁流体。最早应用的报道是使用油基磁流体密封深水泵内部电机的旋转轴，取得了令人满意的效果；将磁流体密封用于舰船螺旋推进器的主轴密封，代替传统的盘根密封，可使主轴功率损耗降低 10~40%，明显提高了船的航行速度。

磁流体密封应用于防尘密封的一个典型例子是计算机硬盘防尘密封。磁流体密封圈应用于具有高密度记忆性能的计算机硬盘时，能将小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的超微细尘埃挡住，并实现防静电的功能，从而保护磁盘、磁头不受损伤，避免机内珍贵数据资料丢失。由于计算机硬盘在读写时，主轴在高速旋转，电机里面轴承会产生灰尘，灰尘侵入到磁盘和读写头之间的空间去，会造成磁盘数据丢失或读写头的工作失效；同时主轴在高速旋转时会产生静电，对硬盘的性能和寿命也有很大的影响。而磁流体密封圈通过磁场的作用，使其独特的磁性流体与旋转轴实现软接触，从而不仅可以成功防止灰尘侵入，还可以通过磁性流体的导电性形成电流的回路，及时释放静电，对硬盘起到了很好的保护作用。此外，磁流体密封圈还被广泛地应用于存储 IC 的制造工程、彩色打印机步进马达等多项领域的防尘密封。

在许多自由控制进给的装置上，磁流体密封也得到了

广泛的应用，例如在硅单晶炉、真空热处理炉、离子溅射、化学气相沉淀、离子镀膜、液晶再生、电子指示器等真空设备的密封以及机器人、军工产品等对环境要求较高的设备的环境密封。

6.2 物质分选

磁流体分选原理是建立在重介质分选基础上的，磁流体就相当于重介质，但是不同于重介选矿，磁流体做为分选介质是通过磁场调节表观密度梯度，从而实现多密度级分选的，其密度调节更为简单便捷。磁流体静力分选中均要求被分选颗粒一般为非磁性颗粒。另外，由于磁性物仍为微细颗粒，对于体积相似的颗粒会产生静电吸引作用而影响感应磁场的分布，进而影响分选，故不适宜过细物料的分离。

磁流体分选技术根据分选原理及分选介质的不同可以分为磁流体动力分选和磁流体静力分选两大类。在不均匀的磁场中，以铁磁性的胶粒悬浮液或顺磁性流体作为分选介质，根据颗粒之间密度和比磁化系数的差异而使不同性质颗粒分离的方法，就是磁流体静力分选。在磁场和电场的联合作用下，以强电介质溶液作为分选介质，根据颗粒之间密度、比磁化系数以及导电率的差异而使不同性质颗粒分离的方法，称为磁流体动力分选。磁流体动力分选的优点是分选介质来源广泛，价格便宜，粘度低，分选设备简单，处理能力大。

磁流体分选主要用于有色、稀有和贵金属（锡、锆、金等）矿石，黑色金属矿石（铁、锰）煤和非金属（金刚石、钾盐等）矿石，以及从工厂废料中回收有色金属（铜、铅、锌、铝等）和在岩矿鉴定中代替重液分离，还可以用于浮选厂精矿和尾矿的快速分析等。

磁流体分选法在固体废物的处理和利用中占有特殊的地位，它不仅可分选各种工业废渣，而且可从城市垃圾中分选铝、铜、锌、铅等金属。

6.3 环境治理

磁流体在环保领域的应用正在不断地被开拓，主要应用在清除水体油污染、去除废水中染料以及重金属元素或放射性元素的吸附和富集等方面。磁流体作为一种新型的吸附剂，与传统的方法相比有着比表面积大、高效、易于实现磁液分离等优点。

当前海洋漏油事故的频发给海洋生态环境带来巨大的

挑战。含聚合物的污水越来越多，含聚合物的污水中含油量高、油珠平均粒径小、悬浮物含量高、处理难度很大。有报道用化学共沉淀法制备 Fe_3O_4 纳米粒子，并用阳离子表面活性剂 901 进行表面改性，制备具有核-壳结构的复合磁性纳米颗粒 ($\text{Fe}_3\text{O}_4/901$)，将其与常规水处理剂复配处理油田含聚合物污水。由于 $\text{Fe}_3\text{O}_4/901$ 纳米颗粒具有磁性，同时具有纳米材料的表面高吸附活性，能快速捕捉污水中的油污及悬浮颗粒，再结合絮凝剂的传统化学絮凝作用，使油滴、悬浮物等絮凝物与磁性颗粒形成磁嵌合沉淀。这种磁嵌合沉淀物结实且密度大，因此沉降速度快，去油去浊效果很好。同时由于纳米颗粒具有超顺磁性，可用磁分离装置回收再利用，在解决油田含聚合物污水的处理方面具有很好的应用前景。

在对印染废水的处理方面，可以用磁流体改性花生壳作为吸附剂处理染料废水，对吖啶橙、结晶紫和番红的吸附，最大吸附容量分别可达 71.4、80.9 和 $86\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。另有报道利用超顺磁性氧化石墨烯- Fe_3O_4 复合物作为吸附剂，也可用于从水中去除染料成分，在对亚甲基蓝和中性红的吸附测试中，分别在 30min 和 90min 达到吸附平衡，吸附容量分别为 167.2 和 $171.3\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

6.4 扬声器

通过注射磁流体到扬声器音圈，作扬声器的散热剂，由于磁流体在温度升高时，磁性变弱；扬声器内的磁铁更易吸引相比对冷些的磁流体，使缝隙内的磁流体流动，散去音圈所发的热，避免妨碍音圈的运动，从而改善扬声器的频率特性，减小高调波的失真、提高扬声器的功率。磁流体在磁场的作用下可以自动定位，而不会四处流动。且磁流体的热导率较大，其粘度会随磁场强度的增大而增大，从而加大阻尼。扬声器专用磁流体主要性能指标为饱和磁化强度（单位高斯）和粘度（单位为厘泊）。

2013 年 6 月 13 日，索尼（中国）有限公司推出磁流体无线蓝牙扬声器 SRS-X9，让原本波澜不惊的音频市场为之一振。SRS-X9 的上市，进一步丰富了 Hi-Res Audio 系列产品线，为热爱音乐的粉丝提供了更充沛的高解析度音频解决方案，使居家音频体验再升级。与传统扬声器不同的是，SRS-X9 采用了全新的磁流体扬声器系统，以取代传统的阻尼器设计。相较于传统扬声器，磁流体扬声器系统拥有得天独厚的体积优势：纤巧紧凑的体积更利于产

品设计，并能大幅节省空间，为用户提供陈设上的便利。此外，在相同输入功率的情况下，磁流体扬声器较传统扬声器能有成倍的声压输出，拥有更好的低音表现。而轻量化的玻璃纤维震膜可带来更精准灵敏的声音，并拥有更持久的耐用性。最重要的是，磁流体扬声器系统可有效减少信号流失及声音干扰，让其更清晰纯净，忠实还原高保真声音。

6.5 磁流体发电

磁流体发电技术是世界正在研究的新兴技术，它可以把气体内能直接转化为电能。磁流体发电就是应用磁流体发电技术，用燃料（石油、天然气、燃煤、核能等）直接加热成易于电离的气体，使之在 2000 的高温下电离成导电的离子流，然后让其在磁场中高速流动时，切割磁力线，产生感应电动势，即由热能直接转换成电流，由于无需经过机械转换环节，所以称之为“直接发电”，其燃料利用率得到显著提高。磁流体发电具有很多优点，首先磁流体发电机的功率易于控制，另外产生的环境污染少。磁流体发电机制造中的也存在很多问题，如发电通道效率低，通道和电极的材料都要求耐高温、耐碱腐蚀、耐化学烧蚀等。

磁流体发电为高效率利用煤炭资源提供了一条新途径，所以世界各国都在积极研究燃煤磁流体发电。目前，世界上有 17 个国家在研究磁流体发电，而其中有 13 个国家研究的是燃煤磁流体发电，包括中国、印度、美国、波兰、法国、澳大利亚、前苏联等。磁流体发电的研究始于 20 世纪 50 年代末，被认为是最现实可行、最有竞争力的直接发电方式。它涉及到磁流体动力学、等离子物理、高温技术及材料、低温超导技术和热物理等领域，是一项大型工程性课题。许多先进国家都把它列为国家重点科研项目，有的建立国际间协作关系，以期早日突破。

我国于本世纪 60 年代初期开始研究磁流体发电，先后在北京、上海、南京等地建成了试验基地。根据我国煤炭资源丰富的特点，我国重点研究燃煤磁流体发电，并将它作为“863”计划中能源领域的两个研究主题之一。

磁流体发电按循环方式分为开式循环系统、闭式循环系统和液态金属循环系统。最简单的开式磁流发电机由燃烧室、发电通道和磁体组成。工作过程是：在燃料燃烧后产生的高温燃气中，加入易电离的钾盐或钠盐，使其部分电离，经喷管加速，产生温度达 3000 、速度达 1000 米/

秒的高温高速导电气体（部分等离子体），导电气体穿越置于强磁场中的发电通道，作切割磁力线的运动，感生出电流。磁流体发电机没有运动部件，结构紧凑，起动迅速，环境污染小，有很多优点。特别是它的排气温度高达 2000 ℃，可通入锅炉产生蒸汽，推动汽轮发电机组发电。这种磁流体-蒸汽动力联合循环电站，一次燃烧两级发电，比现有火力发电站的热效率高 10%—20%，节省燃料 30%，是火力发电技术改造的重要方向。

6.6 磁流体推进技术

磁流体推进，顾名思义，就是通过磁场能对导电的海水产生电磁力作用，使海水发生运动，从而推动船艇前进。使用机械动力的常规潜艇，因机械转动产生噪音以及振动，容易被声呐探测到；同时功率越大，产生的噪音也愈大，更易被反潜工具发现。而磁流体推进器无须配备螺旋桨桨叶、齿轮传动机构和轴泵等，是一个完全静止的设备；由于没有功率的制约，也大大提高了速度，潜艇便能在几乎绝对安静的状态下以极高的航速航行。随着潜水深度的增加，依据当前的反潜技术，被探测到的几率几乎为零。据理论计算，采用磁流体推进器的新潜艇航速可达 150 节，这是任何机械转动类推进器不可能实现的，现役的绝大多数鱼雷都会对其失去作用。

一旦现代潜艇使用了这种推进器，便从根本上消除了因机械转动而产生的振动、噪音以及功率限制，而能在几乎绝对安静的状态下以极高的航速航行。“磁流体推进器”全新的推进方式将使潜艇在战术、技术性能上发生质的飞跃。只要艇员的身体素质和艇内的生活用品允许，磁流体潜艇将拥有无限的续航力和自持力；只要艇体强度承受得住，又可在任意深度航行；更为重要的是，这种潜艇具有空前的安静性和水下高速航行、高速机动能力，成为真正意义上的潜艇，只要目标在攻击范围之内，那么任何猎物都难逃脱它的手掌。

现役水下速度最快 44 节的是俄罗斯“神父”级潜艇，水面速度最快 27 节的是美国“海神”号潜艇；普通鱼雷的速度为 40~60 英里 / 小时（34~52 节）对付它们也绰绰有余，但对于航速达 150 节的新潜艇则是望尘莫及。军事专家认为，磁流体喷水推进技术将彻底改变以声呐探测为主的反潜方式，并推进新一代反潜武器的革命。

据国外媒体报道，拥有潜艇制造先进技术的法国和德

国正开发一种新潜艇，将采用“喷水磁流体”动力，使潜艇推进器的噪音降为零，声纳无法探测到其踪影。磁流体推进器将会引发反潜革命。

欧洲国际海军潜艇联盟协会声称，目前正在实验磁流体喷水推进技术，并进入初期应用范围。采用该技术的最新潜艇，将具有“难以被探测的能力”。

我国中科院电工所与船舶研究院 702 所合作研制成功了“HEMS-1”号螺旋式超导磁流体推进试验船。于 1998 年 11 月 28 日试航成功。它的研制成功标志着我国已跻身于该项高技术的国际先进行列。该试验船长 3.2 米，宽 0.85 米，排水量约 1 吨；船上装备有磁场强度为 5 万高斯的超导磁体系统，螺旋通道推进器，电池组和测控系统，由一人操作。在实验室的盐水池中对试验船的特性参数进行了综合性试验和试航行，船速达 0.65 米 / 秒。试验表明，超导电磁流体船舶推进具有安静无噪声，操作简便等特点。2006 年我国代号为“洛神”的“超导磁流体推进器”潜艇研制取得了重大突破，并进入了试车定型阶段。

6.7 医学领域

在医学领域中，磁流体广泛应用于酶的固定化、细胞生物学、免疫测定、亲和层析及临床诊断和治疗等领域，主要涉及的有磁流体热疗、定向给药、基因治疗等。例如其可作为磁共振成像的造影剂，由于磁流体在交流磁场作用下会发热，将磁流体与抗体结合可用于生物分离，磁流体与外部磁场相结合还可用作肿瘤热疗等。

磁流体热疗是近年来新兴的一种热疗方法。它是将磁流体通过一定方法到达肿瘤区域，纳米级磁性颗粒在交变磁场的作用下产生热量到有效的温度，从而杀死肿瘤细胞。

具有磁导向性的药物载体微球可以靶向定位于作用对象，从而增强疗效、减少副作用。通常靶向药物载体微球是运用了载体对机体各组织或病变部位亲和力的不同，或将单克隆抗体与载体结合，使药物能够转运到特定的治疗部位。在外加磁场的作用下，磁靶向性的药物载体微球可以更方便地把载体定向到靶部位。Wid-der 等首先提出了磁靶向药物传递系统的概念，并开展了载药磁性微粒的研究。研究表明载药磁性微粒具有高效、低毒、高滞留性的优点。但由于制备的微粒为 1~3 μm ，可引起血栓样血管栓塞，甚至导致实验动物死亡，但是纳米级磁流体可以解决这个问题。磁流体靶向药物传递主要表现为磁场力与血

液流动剪切力之间的竞争，采用包括恒定磁场和梯度磁场的组合磁场来降低最大磁场强度，磁流体传递过程中需考虑磁流体磁粘特性，以最终降低磁场强度，减少对人体危害，推动临床应用的发展。

研究表明纳米级 Fe_3O_4 磁流体对血细胞的免疫功能不

但没有不良影响，而且可以提高血液免疫反应中白细胞的免疫功能，为红细胞包载磁流体和抗癌药物治疗肿瘤提供实验依据，为抗癌药红细胞载体靶向抗肿瘤免疫提供新的治疗途径。（参考文献略）