

超声耦合用磁性液体的研究*

向丹 包叶青 黄涛

(清华大学机械工程系 北京 100084)

1994年8月11日收到

摘要 磁性液体可作为一种新型超声耦合剂。作者通过合理选择磁性液体的组分、改进其制备工艺,研制出吸附性强、流失损耗小、透声性好的两种磁性液体,它们在超声检测中具有独特的优点。

关键词 磁性液体, 超声检测, 耦合

Investigation of the magnetic fluids for ultrasonic coupling

Xiang Dan, Bao Yeqing, Huang Tao

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Magnetic fluids can be used as a new type of ultrasonic coupling. Two kinds of magnetic fluids, which have stronger adsorption, less flow loss and greater sonic penetrating ability, are developed by rationally selecting the ingredients and improving the manufacturing technology. They have peculiar advantages in ultrasonic testing.

Key words Magnetic fluid, Ultrasonic testing, Coupling

1 前言

磁性液体是强磁性固体微粒高度弥散于基液中所构成的稳定的胶体溶液,即使在重力、电、磁等力作用下亦能长期稳定地存在,不产生沉淀与分离。因此磁性液体既具有液体的性质,又具有一定的磁性,能被外磁场所吸附^[1]。

将磁性液体用于超声检测,则可望得到一种新型耦合剂,它会被磁性换能器所吸附,在检测过程中可随换能器移动,从而减少了耦合剂的流失损耗。而且磁性液体含有较多细小磁颗粒,增大了液体的密度与声阻抗,有利于增加耦合剂的透声性,提高检测灵敏度。

磁性液体自问世以来在印刷、润滑、密封等方面得到了较好的应用^[2],但作为超声检测用耦合剂,国内外还很少有人研究。常规的磁性液体用作超声耦合剂还存在一定的不足,主

要是流失损耗较大以及透声性改善不多。为此,本文在磁性液体的基础上,着重研制流失损耗小、透声性好的磁性液体用于超声耦合。

2 超声耦合用磁性液体的配制

磁性液体通常由磁性颗粒、分散剂、载体三部分组成,要获得适合于超声耦合的磁性液体,就需要对其组分进行合理选择,并对制备工艺进行改进。

2.1 载体溶液

载体溶液是磁性液体的主要组成部分,它直接决定了磁性液体的性能。虽然通常希望超声耦合剂尽可能地与工件浸润,但从减少磁性耦合剂的流失考虑,却希望提高磁性耦合剂与工件的不浸润性,因此选用表面张力大的溶液

* 国家自然科学基金资助项目

作载体。经查阅,几种常温下表面张力较大的液体如表1所示^[3]。

表1 几种液体常温下的表面张力

液体名称	表面张力 (dyn/cm)
水	72.88
过氧化氢	75.87
汞	486.5
甘油 (50%)	69.9

一般的液体表面张力都在 20—30dyn/cm 左右,以上几种液体是少有的几种表面张力较大者。考虑到液体对工件的腐蚀性及对人体的安全性,选取其中的水和甘油作为载体溶液。

2.2 磁性颗粒

磁性颗粒可由各种磁性材料,如稀土磁性材料、磁铁矿(Fe_3O_4)、赤铁矿($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、氧化铬(CrO_2)等加工制成。颗粒直径应小于 300 Å,形状以球形为最好。小直径的球形微粒有利于增加磁性液体的稳定性和寿命。

通过对几种磁性颗粒的制作工艺、加工成本、磁饱和和感应强度以及生成胶体的稳定性等进行综合比较,最终选取以 Fe_3O_4 作为磁性微粒制备磁性耦合剂。

2.3 分散剂

分散剂是形成稳定的磁性液体的关键组分,对其总的要求是其分子的一端能吸附于强磁性颗粒表面,另一端能与载体胶溶,此外为防止微粒的聚结,还要求分子有一定的链长,通常缓冲层的厚度约为 30—10³ Å。

常用的分散剂有:聚全氟环氧丙烯衍生物、琥珀酸衍生物,12 碳原子以上的有机酸、苯磺酸衍生物等。根据前面选用水及甘油作载体、 Fe_3O_4 作磁性颗粒,所以选用油酸钠和十二烷基苯磺酸钠作为分散剂。

2.4 制作工艺

采用水、甘油作载体制备胶体磁流体,由于载体表面张力较大,形成磁性液体相对来讲更困难,因此对其制作工艺需进行改进。除在制备 Fe_3O_4 颗粒中通过对温度、浓度、pH 值等进行严格控制使生成细小颗粒外,在钝化反

应中也需控制分散剂的加入量及反应时 pH 值,使颗粒更好为分散剂分子所包裹;在颗粒从反应混合液中分离并转入载体溶液中时采用特殊工艺使之与载体充分混合,以形成稳定的胶体,最后得到了水基和甘油基的磁性液体。

3 超声耦合用磁性液体的性能

磁性液体属于一种软磁性材料,虽然本身并不具备磁性,但在外加磁场作用下能够被磁化,表现为能被外加磁场所吸附。因此采用磁性换能器就可以吸附这种磁性液体进行检测。

3.1 吸附性能

磁性液体能被外磁场所吸附,这种被吸附的性能取决于:

3.1.1 浓度的影响:实验表明,磁性液体的浓度越高,其磁化强度越高,吸附能力也越强。这是因为浓度越高,单位体积内磁性颗粒越多,总体磁化强度也越高。

3.1.2 温度的影响:对某一磁性液体而言,温度越高,吸附性越弱。这是因为随着温度升高,磁畴在磁场中的有序排列逐渐被破坏,磁化强度随之减弱。

3.1.3 载体的影响:通过测试同浓度的水基和甘油基磁性液体的吸附性,结果表明,甘油基磁性液体的磁性要大于水基磁性液体。这可能是因为载体溶液对磁性颗粒外面的双电层结构的影响结果。

3.2 流失性能

比之常规耦合剂,磁性液体的特点之一是它不能被磁性换能器吸附,在检测过程中可减少流失损耗。考虑到理想情况,磁性液体的磁性足够强,且磁性液体与工件完全不浸润,则流失损耗为零。但完全不浸润对声波传导又最为不利,而且目前还没有这种载体溶液。

超声检测时换能器、耦合剂和工件如图 1 所示。对整体耦合剂而言,受两个力 F_{12} 和 F_{23} 。 F_{12} 为耦合剂与换能器之间的摩擦力,带动耦合剂向前移动。 F_{23} 为耦合剂与工件间的粘滞摩擦力,阻碍耦合剂移动,造成耦合剂的流失。 F_{12} 的大小与磁吸引力的大小有关,而 F_{23} 则与

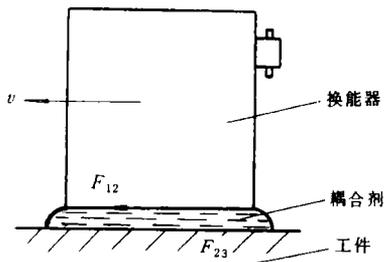


图1 耦合剂主要受力示意图

固液界面性质、工件表面粗糙度以及换能器移动速度等因素有关。要减小流失损耗，就应该使 F_{12} 尽可能大， F_{23} 尽可能小。

测试耦合剂的流失性时，保证磁性换能器与工件的间隙一定，并置同样体积的磁性液体于换能器中央，匀速移动换能器，则在工件上留下一道耦合剂的痕迹，继续移动换能器直至痕迹消失。量取耦合剂痕迹的总长度，痕迹越长，说明耦合剂的流失损耗越小。

3.2.1 浓度的影响：以水基磁性液体为例，流失损耗实验曲线如图2所示。可见随着浓度的增加，流失损耗减小。这是由于磁性液体的浓度增加，其磁化强度增加，磁吸力增大，故流失损耗减小。

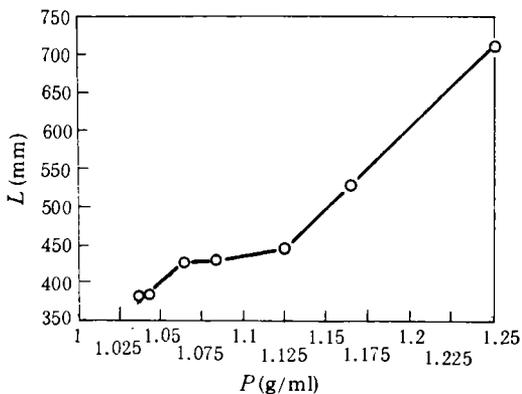


图2 浓度对流失性能的影响

3.2.2 载体的影响：比较相同浓度条件下，水基和甘油基磁性液体的流失性如表2所示。可见水基比甘油基磁性液体的流失性大。其原因是相同浓度下，后者的磁性较大，而且后者的粘度也大于前者。

3.2.3 外加磁场的影响：改变磁性换能器中磁

表2 两种磁性液体的流失性

耦合剂	浓度 (g/ml)	流失性 (mm)
水基磁性液体	1.12	440
甘油基磁性液体	1.12	630

极的磁场强度，测试磁性液体的流失性，实验结果见图3。

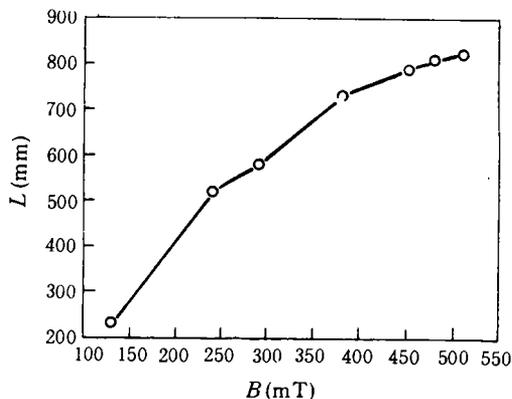


图3 外加磁场对流失性能的影响

可见，随着外加磁场的增加，磁性液体的流失损耗减少。这是因为外加磁场增大以后，换能器与磁性液体之间的磁吸力增大的缘故。

3.3 声学性能

作为超声耦合剂，通常希望它具有较大的声阻抗和较好的透声性^[9]。由于磁性液体中含有比重较大的磁性微粒，可增大其密度与声阻抗，从而使磁性液体作为超声耦合剂时具有更好的声学性能。

3.3.1 声阻抗：测量水基、甘油基磁性液体的声阻抗，并与常规的烃基磁性液体以及水、机油、甘油耦合剂进行比较，结果如表3所示。

表3 磁性液体与常用耦合剂的声阻抗

耦合剂	密度 (10^3 kg/m^3)	声速 (m/s)	声阻抗 ($10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
水	1.00	1480	1.48
30 [#] 机油	0.812	1355	1.10
甘油 (100 [#])	1.27	1880	2.38
常规磁性液体	1.122	1770	1.99
水基磁性液体	1.307	1625	2.13
甘油基磁性液体	1.314	1650	2.17

3.3.2 透声性：透声性测试是将换能器置于一个固定试块上，中间加耦合剂，调节仪器增益大

小,使底波为某一波高,读取该增益值.增益越小,耦合剂透声性越好.比较上述几种液体的透声性如表4所示.

表4 磁性液体与常用耦合剂的透声性

耦合剂	增益 (dB 数)
水	31.8
30 [#] 机油	33.4
甘油 (100 \div)	26.7
常规磁性液体	29.2
水基磁性液体	27.9
甘油基磁性液体	26.0

可见,经过实验改进制备的磁性液体,其透声性优于常规的水、机油等耦合剂,与常规磁性液体相比也提高较多,其中甘油基磁性耦合剂的透声性甚至优于纯甘油.

4 磁性液体在超声耦合中的应用

根据以上对磁性液体的改进及性能研究,获得了透声性好、吸附性强和流失损耗小的磁性液体.这些独特的性能为超声检测带来了一定的便利.

例如,在带有弯曲表面的工件上进行超声检测,由于常规的水、机油等耦合剂粘度小,容易流失,给工件和环境造成污染.而采用黄油等粘度较大的脂类耦合剂,不仅使用不方便,而且耦合亦不容易保证均匀一致.若采用磁性液体作耦合剂,可直接由磁性换能器吸取于检测部位,同时在换能器内置磁极的作用下,磁性液体向换能器中心部位磁场强度最大处聚集,可保证耦合良好,而且磁性液体本身具有较好的透声性,可保证较高的检测灵敏度.

采用厚壁管试件进行对比实验,比较从外壁

(上接第36页)

流体测量、含沙量的超声波液位测量系统.本系统测量精度高(静水液位在150mm范围内误差1mm),结构简单,并利用光电隔离技术实现了远距离数据传输.

致谢 本系统研制中,庄咏璆提供了复合压电片,杨玉瑞组装了换能器,谨致谢意.

处测量内壁的反射脉冲,记录相同波高时仪器的增益读数.厚壁管外径180mm,壁厚50mm,测量不同耦合剂所对应的增益大小见表5.

表5 不同耦合剂用于厚壁管测量的增益

耦合剂	增益 (dB)
30 [#] 机油	55.5
黄油	54.4
水基磁性液体	50.8
甘油基磁性液体	49.1

可见,采用磁性液体作耦合剂,其检测灵敏度可提高4dB以上.且磁性液体的流动性好,耦合容易,同时磁性液体流失损耗小,利用率高,使用更方便.

5 结束语

磁性液体作为一种新型超声耦合剂,既具有一般液体的流动性,又具有一定的软磁性,能被磁性换能器所吸附,大大减少了检测过程中耦合剂的流失损耗,同时它还具有更大的声阻抗和更好的透声性,因此这种新型耦合剂在超声检测中具有广阔的应用前景.

参 考 文 献

- [1] Rosenweig R E., *Magnetic Fluids*, First Ed. London: Cambridge University Press, 1985. 21—89
- [2] Fertman V E., Luckov A V., *Magnetic Fluids Guide Book: Properties and Applications*, Second Ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. 167—211
- [3] 姚允斌,解涛,高英敏编.物理化学手册,第二版.上海:上海科学技术出版社,1985.121—140
- [4] 中国机械工程学会无损检测学会编.无损检测概论,第三版.北京:机械工业出版社,1993.218

参 考 文 献

- [1] 方建纯编.8098单片机原理及应用技术,第一版.天津:天津科学技术出版社,1990.
- [2] 应崇福主编.超声学,第一版.北京:科学技术出版社,1993.87—253.
- [3] 林性梓,胡书红,蒋定生,张学栋.“混水泥沙含量对矩型槽水位流量关系影响的实验研究”,水土保持研究,1994,(1).