

- 851.
- [10] R. V. Gentry, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 11.
- [11] R. V. Gentry, *Science*, **169**(1970), 670.
- [12] C. Stéphen, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 1534.
- [13] F. Bosch, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 1515. **38**(1977), 479.
- [14] Search & Discovery, *Phys. Today*, **30**(1977), 17.
- [15] C. J. Sparks, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 205. **40** (1978), 507.
- [16] P. Möller & J. R. Nix, *Phys. Rev. Lett.*, **37** (1976), 1461.
- [17] U. von Wimmersperg, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 886.
- [18] K. S. Pitzer, *J. Chem. Phys.*, **63**(1975), 1032.
- [19] R. J. Holt et al., *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 183.

磁性液体和它的应用

孙克 黄锡成 罗河烈

(中国科学院物理研究所)

一、引言

磁性液体 (Magnetic fluids), 有时也称为磁流体, 是指具有磁性的, 可以流动的液体. 确切地讲, 磁性液体是一种将强磁性微粉 (100 Å 左右) 分散在液相中所得到的非常稳定的胶态溶液. 我们在这里着重介绍具有铁磁性的磁性液体.

我们知道, 有一些固体是铁磁性材料, 有着较强的磁性. 所以, 将很细小的固体铁磁性颗粒分散到如水等溶液中, 它们仍然是可以被磁化的. 这样便可获得均匀的液体态磁性材料, 它象固体一样具有磁性, 却又保留了液体的性质.

磁性液体首先在 1965 年由美国国家航空和宇宙航行局 (NASA) 试制成功. 近年来, 由于它的奇特的性质, 引起了人们极大的兴趣和越来越广泛的注意, 在国外已有市售商品. 磁性液体的用途十分广泛. 例如: 性能优良的密封; 几乎没有磨擦的轴承; 分选矿物; 快速印刷; 清洗油珠; 转动涡轮; 以及在仪表、医学上的用途等. 许多新用途还在发展中. 目前, 我国一些单位也在研制并在某些方面已达到实际应用.

二、磁性液体的性质

磁性液体是稳定的磁性悬浮胶体, 例如, 将极细小的磁性粒子 (Fe_3O_4) 分散、悬浮在载体溶液中即可得到. 这些粒子大小为 100 Å (即 10^{-8}m) 左右, 具有超顺磁性的尺寸.

微小的铁磁单畴颗粒的集合体显示超顺磁 (Super paramagnetism); 在外磁场作用下其总的磁化强度 I 达到一个热平衡值. 热力学平衡状态, 是铁磁颗粒在液体中悬浮时, 由磁化向量反转的布朗运动来达到. 在这种情况下, 达到平衡的弛豫时间由液体的粘滞系数决定. 埃尔莫尔 (Elmore) 首先研究了铁的氧化物在胶体悬浮液中的超顺磁性.

超顺磁性铁磁颗粒的磁化曲线是这样的: 具有磁矩 $\mu = \nu I_s$ 的铁磁单畴颗粒在磁场 H 中的位能 $E_H = -\nu I_s H \cos \varphi$, 其中 ν 为颗粒的体积; I_s 为饱和磁化强度, φ 为磁化强度和磁场之间的角度.

当各向异性小 ($K\nu \ll kT$, K 为各向异性常数, k 为波耳兹曼常数, T 为绝对温度.), 一组小颗粒平衡时 φ 角按波耳兹曼分布. 颗粒组合的磁化曲线由朗芝万函数表达,

$$\tilde{I}/\tilde{I}_s = \text{ctgh } \alpha - 1/\alpha = L(\alpha); \quad (1)$$

$$\alpha = \mu H/kT = \nu I_s H/kT.$$

当 $\alpha \ll 1$ (弱磁场) 可近似表示为:

$$\tilde{I}/\tilde{I}_s \approx \nu I_s H/3kT, \quad (1a)$$

当 $\alpha \gg 1$ (强磁场) 近似表示为:

$$\tilde{I}/\tilde{I}_s \approx 1 - kT/\nu I_s H. \quad (1b)$$

各向异性对磁化曲线的影响与 $K\nu/kT$ 的比例值有关。大的各向异性 ($K\nu \gg kT$) 时 φ 角的分布和小的各向异性 ($K\nu \ll kT$) 时的分布不同。强的单轴各向异性 ($K\nu \gg kT, K > 0$) 而且 H 平行于颗粒的轴: $\alpha \ll 1$ 时, (1a) 变为 $\nu I_s H/kT$ 。 $\alpha \gg 1$, (1b) 变为 $K\nu/kT$ 。

因此, 超顺磁性的本征判据是: (A) 没有磁滞 ($\tilde{I}_R = 0; H_c = 0$); (B) 一定 I_s 时, 考虑到温度效应, 总的磁化强度 \tilde{I} 只与 H/T 比值有关 (如图 1 所示)。

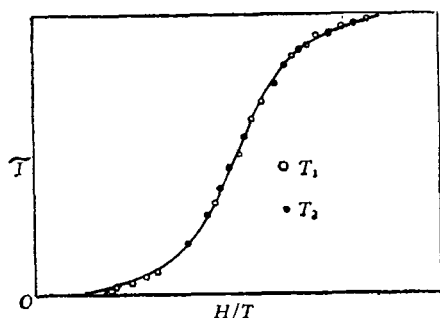


图 1 超顺磁性颗粒集体磁化强度 \tilde{I} 和磁场与温度的比值 H/T 的相互关系, 不随 T_1, T_2 的不同而变化

具有超顺磁尺寸粒子的磁性液体, 不加磁场时不呈现磁性。当加一小磁场并增至约 $500O_e$ 时, 则以恒定磁化率磁化, 在高场时磁性很强, 比一般顺磁性物质强的多, 例如, 饱和磁化强度可达数百高斯。磁性粒子一般在液体中数量约为 10^{17} 个/ $(cm)^3$, 浓度仅为 3—10% (重量比)。载体溶液分为水基和油基二类, 包括水, 碳氢化合物, 碳氟化合物, 酯, 双酯等。

如前所述, 磁性液体就是磁性粒子在载体溶液中悬浮而形成的胶体溶液。那么, 磁性颗粒为什么会悬浮起来呢? 主要原因有两个: (A) 因为磁性粒子很小, 分子的热骚动——布朗运动使它们不会静止或聚合。如果颗粒较大 (如铁屑), 那么磁性粒子在磁场中就会跑到一起

物理

去。这是由于磁性液体中磁化的颗粒之间的相互作用力与磁化强度的平方和球粒半径的三次方成正比。这样, 颗粒愈小, 放在一起的磁性颗粒间的吸力愈小。只要磁能小于热能 kT , 热运动 (布朗分子运动) 即可以防碍它们聚合。计算表明, 颗粒的直径为 25—150 Å 时, 至今所知的磁性材料都可以满足这个前提条件。 (B) 磁性颗粒, 经过表面活性剂, 如油酸等处理后, 有如粒子外面穿上一层油酸单分子层的外衣。这样, 可以进一步避免磁性吸引力和范德瓦尔斯吸引力。我们知道两个粒子之间的范德瓦尔斯吸引力与其距离的六次方成反比。当球 (指粒子) 表面距离为球的半径时, 它们的吸引能等于热能, 这种关系式对每个尺寸的球都适合。当球的距离小于球的半径时, 吸引力增大, 接触的瞬间可以变得很大。但是, 当这些颗粒的每一个粒子表面上都包覆上一层单分子膜的时候, 便使颗粒不能跑得太近。这样, 两个粒子像弹性体一样, 弹性碰撞, 并弹性拉开。因此, 可以克服颗粒之间的范德瓦尔斯吸引力, 也可以进一步克服它们之间的磁吸引力。这样, 经过表面活性剂处理的磁性颗粒可以进一步避免聚合或凝聚 (见图 2)。

这样制成的磁性液体, 不会因重力或磁场而凝聚, 不会由于沉降而产生固液分离, 外观上好像液体一样, 而本身具有铁磁性。磁性液体

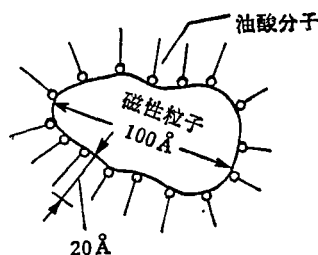


图 2 粒子表面包覆一层单分子膜示意图

的性质可以通过选择不同的载体溶液来改变。

从前面的介绍可以看到, 磁性液体在所有的场合下都象均匀的液体并可以高度磁化。它的定量表示是这样的: 一定磁场下, 当不考虑粒子间的相互作用时, 磁性液体的磁化强度 (这

里的磁化强度 σ 是指单位质量的磁化强度) 可以近似地用下式表示:

$$\sigma = \frac{\sigma_s \cdot \rho - \rho_1}{\rho} \cdot \rho_2$$

式中 σ ——磁性液体的磁化强度;
 σ_s ——分散粒子的磁化强度;
 ρ ——磁性液体的比重;
 ρ_1 ——溶剂的比重;
 ρ_2 ——分散粒子的比重。

实践说明, 这个公式和实测数值能很好地符合。在磁场中, 颗粒沿磁力线取向, 如果磁场有梯度, 磁力线疏密程度不一样, 磁性液体将在梯度场的影响下, 受到一个力, 它将被推向磁场强的方向。例如, 一束磁性液体由上面流下来, 本来是会垂直下落的, 但是在它旁边放上一块磁铁的话, 那么这束磁性液体将会变成弯曲的液体而运动。罗森威格 (Rosensweig) 对均匀磁场的情况作了物理过程的描述, 提出了磁性液体的伯努利 (Bernoulli) 方程。寻常的伯努利方程为:

$$p + \frac{Q}{2} v^2 + Qgh = \text{常数},$$

(Q 是密度, p 是压强)。

考虑到磁场的作用, 伯努利方程改为

$$p + \frac{Q}{2} v^2 + Qgh - \frac{1}{4\pi} \int_0^H IdH = \text{常数}.$$

式中 I 表示磁化强度, H 为磁场, 上式取 CGS 制, 量纲为压力。因此可以得出, 磁性液体的一个明显性质是, 它在磁场中, 出现了一项附加的磁性液体静力压, 而使压力增大, 增大程度与磁场和磁化强度有关。换句话讲, 就是磁场的能量, 变成了磁性液体压强的增大, 即压力变大了。把一个比重大于磁性液体的非磁性物体放在磁性液体内, 将它们放进磁场时, 原先沉在底部的物体将“漂浮”到表面上来 (见图 3)。在磁性液体中, 磁性的物体也会出现这样的漂浮现象。所不同的是这时不一定需要加磁场, 因为被漂浮的磁性物体本身会产生磁场, 只要磁场足够强就可以出现漂浮现象。当然, 实际计算起来, 磁性物体的漂浮情况要比非磁性物体的漂浮情况复杂一些。

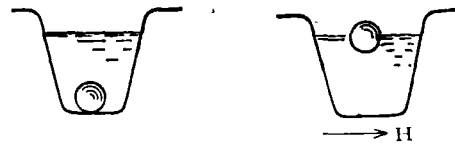


图 3 加磁场时, 磁性液体中的非磁性物体将“漂浮”到表面上来

磁性液体的粘滞性与磁性液体的比重有关, 当分散微粒的浓度达到一定值后, 再增加时, 粘度显著增加, 最终成为凝胶状。

三、应用举例

鉴于上述特性, 磁性液体可以有广泛的应用, 这里着重介绍密封和选矿, 其它则略加叙述。

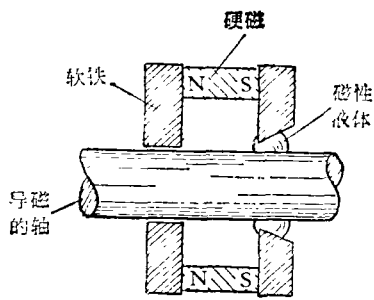
1. 密封和轴承

磁性液体已应用于密封旋转轴。其密封压力可超过 20 大气压, 转速可高于 10,000 转, 且密封尺寸可以任意大小。磁性液体用来做动态密封是它的最好的代表应用, 密封程度高, 并且摩擦力很小。这些方面都比老的密封方法优越。

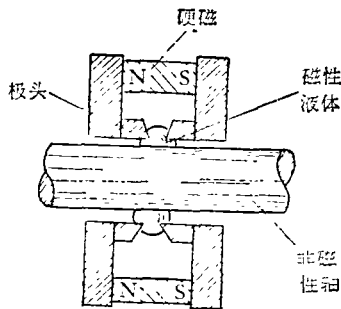
磁性液体密封大致分为两种, 如图 4 中 (a)、(b) 所示。

磁性液体密封的关键之一是选择强的磁铁和进行合理的磁路设计; 磁铁的磁能积越高越好, 这样可使密封承受的压力增大。除了密封转动的轴之外, 还可以进行“O”型 (即圆型) 密封和边缘密封。根据不同的需要, 可以采用灵活的设计方法。用磁性液体作动态密封, 在国内已取得初步良好的结果。例如, 密封化学反应罐中搅拌器的转轴 (转速为数十转/分), 在连续转动的情况下, 密封压力可达 10 个大气压以上。图 5 是它的密封原理。表 1 给出这种磁性液体初步的磁性能数值。

磁性液体密封简便而经济, 效果良好, 对密封组件不需要严格地加工, 一般的公差即可满意。当密封的磁性液体有一部分消耗掉时, 只要重新加进去一些, 即可恢复到原来的状况。



(a)



(b)

图4 铁磁性液体密封轴的两基本类型

(a) 导磁的轴 (b) 非磁性的轴

磁性液体在轴承方面应用的发展虽比密封慢一些,但也很值得注意。它的原理和密封相似,只是要承载一定的重量。原则上,只要磁性

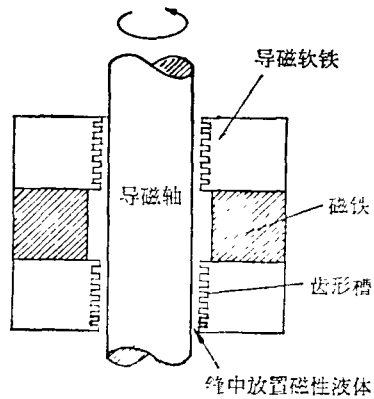


图5 密封装置的示意图

表1 磁性液体的磁性

磁场 $H(Oe)$	0	70	840	6200
单位质量的磁化强度 $\sigma(\text{emu})$	0.825	6.27	30.36	46.86

液体性能良好,磁路设计合理,是可以承载较高压力的。像密封一样,磁性液体也可以做成长寿命,低损耗,少振动,低噪音的轴承。并且可以改变它的硬度,从而实现“最软”的轴承。目前,磁性液体轴承的载重能力是中等的,预期还可以提高。在制作罗盘,显微镜,长寿命和高速纺织机器,以及磁带记录仪器等方面都开始采用这种新的磁性液体轴承。

2. 分选矿物和测量密度

磁性液体用于分选矿物。比如铅和铝的混合物,是非常有趣的,原理已在图3示出。当磁场增加时,由磁性液体的伯努利方程可以看到,将会使磁性液体的静磁压力增加,增加的大小与磁场成正比。人们看上去,似乎是磁性液体的比重发生了变化,本来浮不起来的东西漂浮起来了,并随着磁场变大,比重更重的东西也漂浮了起来。实际上,液体的压力和比重有一定的等效性,从分子物理学的角度是容易理解的。在分子物理看来,比重(重量)是和液体的压强(压力)有关系的,是液体有压强(压力)的间接原因,当液体比重(即重量)大时,液体分子间的排斥力就大,因而液体的压强就大。这样,随着磁场的增加不同,磁性液体的比重似乎逐渐变大,于是铝球将比铅球漂浮起来早一些。根据这个道理,通过控制磁场的大小,可以使各种比重的物体依次漂浮在磁性液体上,从而在选矿业中实现一次操作可以分选出矿物中的各种成分,因而大大地简化了选矿手续。这种磁性液体的漂浮重物的现象,有人称做“磁悬浮”。目前所知,任何已知的致密的材料,都可以被磁性液体悬浮起来。在原则上讲,由于磁性液体悬浮重物的能力变化得很巧妙,就可以分选任何数目的不同的非磁性材料。以上所讲的这几点,使选矿业对磁性液体很感兴趣,中心问题是如何进行具体设计,使它适合于具体情况。

根据同样的道理,磁性液体也提供了一个巧妙地测量物体密度的方法。我们先将标准样品放到磁性液体中,测出一条所加磁场和标准样品密度(或比重)关系的曲线。然后将任何未

知密度的材料,放到磁性液体中去,再加磁场并选定一个磁场数值,使未知密度的材料正好悬浮在磁性液体中.那么,由磁场和标准样品密度的曲线关系是很容易地查找出该种材料的比重或密度的.

3. 其它方面

(1) 磁性墨水和快速印刷

在印刷上使用磁性墨水有两个好处:其一是墨水磁化后,印刷的符号可以自动被检读出来(利用磁的感应效应);其二是墨水磁化后,它的印刷可以用电磁装置来控制,如非接触方式的计算机图线的印刷.磁性液体墨水比普通的磁性墨水更好,它在快速印刷时,由于具有超稳定性,离心力可以超过 17,000g,因此可以容易地经受圆筒印刷的离心力,而保持墨水质量.普通磁性墨水常因产生沉淀或不均匀性,而使印刷质量受到影响.

(2) 润滑和阻尼

磁性液体可以成为很好的润滑剂.由于磁性液体中的磁性颗粒很小,比一般金属表面的磨蚀小坑还小,又由于磁性颗粒受到有机分子的包复,所以磁性液体对于物体的磨损极小.另外,由于磁性液体中有固体颗粒存在,所以它又是耐磨的.在润滑过程中,可以抵御万有引力、加速度和向心力等.磁性液体可以用磁力阻塞住,作为磁性润滑剂就不会产生泄漏,这样也就防止了外界的污染,因而可以装置在沾污较大的环境中.用磁性液体也可以实现液体阻尼,如仪表中,磁性液体在磁极作用下充满空隙,对转动部分形成阻尼,它既不会流出来,也不会产生偏心.用了磁性液体阻尼之后,许多元件的加工就不用表面抛磨了,因而减少了加工量.

(3) 清洗油珠

清洗水中飘浮的油污,对工业和环境保护来说都是非常重要的.当磁性液体加入到水和油的乳状混合物中之后,由于磁性液体容易均匀地分散到油中间,因而油珠将得到磁性,而水则没有.这样油便可以吸到任何一个强磁场的极头上.最终油将被分离出来.这样的工作是有发展前途的,实验性的工作已经开展,但在工业中真正实用还有待进一步研究,主要是需要一个强的,而且均匀的磁场.

(4) 去除肿瘤

在医学上,试验用磁性液体治疗肿瘤.方法是把磁性液体注入血管,磁场加到瘤子上,使磁性液体将血管和瘤子隔开.然后用激光照射,很有希望用足够强的激光射线将癌细胞杀死.

(5) 推动涡轮机

磁性液体最令人感兴趣的应用问题是把热能变成机械能.如图 6 所示,当磁性液体靠近一个磁体,它的静磁压力就增加.加热处于磁场中的磁性液体,可以引起它的磁性变小,这部分磁性液体的磁静水压将减小,与靠近磁体的那部分磁性液体相比,就会存在一个压力差.这个压力差使磁性液体不断地流过磁体.磁性液体连续不断地流动,将推动涡轮机或发电机.在这个过程中,热能将变成机械能,而磁性液体充当了传递能量的媒介.这样的系统单独看起来效率是较低的,但是它是完全可以使用工厂里的余热或废热,并且可以循环使用多次,所以总的热量利用效率可高达卡诺极限的 80% 以上.在这个问题里,重要的方面是需要提供质量

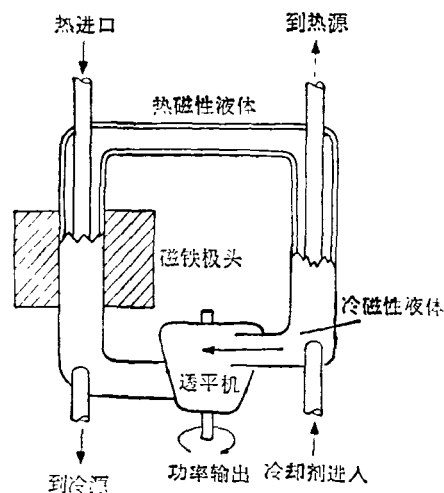


图 6 磁性液体把热能转换为机械能

好的磁性液体.

磁性液体还可以有许多用处,比如,可以导

磁,在化学反应中携带催化剂,做教学模具的地球模型等。许多应用仍处在发展和设计阶段。随着进一步的研究和应用,必然会给一些领域带来新的启示。

参 考 文 献

[1] Reinald Schumann, *Antriebstechnik*, 14-4 (1975),

172.

- [2] J. Lavoie, *Machinc Design*, June 1(1973), 78.
 [3] Ronld Moskowitz, ASME Design Engineering Conference and Show, (1974), 74-DE-5.
 [4] 下飯坂潤三等,《粉体および粉末冶金》,22-1(75.1), 22.
 [5] 可知祐次,《固体物理》,8-8(1973), 449.

气体激光激励过程与新激光器的研究

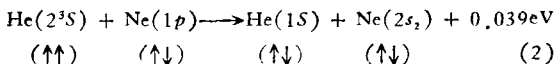
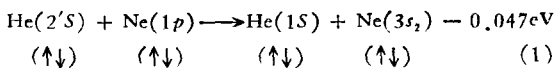
邱 明 新

(上海市激光技术研究所)

一、气体激光的微观过程

1. 能量共振转移碰撞过程

氦氖激光是由氦亚稳态原子与氖基态原子能量共振转移碰撞,引起对激光上能级的泵浦,形成集居数反转状态。



前一过程产生 6328 埃($3s_2-2p_4$)和 3.39 微米($3s_2-3p_4$)激光,后一过程产生 1.15 微米($2s_2-2p_4$)激光。这两过程相应的能级差小于 0.1 电子伏特,都满足能量共振条件。式下的箭头表示电子自旋趋向,过程(1)满足维格勒自旋守恒定则(WSR),不引起电子自旋趋向的变化。过程(2)引起电子自旋趋向的变化,不满足 WSR。因此,过程(1)的截面大于过程(2)。有人用脉冲余辉法测量了氦亚稳态消激发过程的总截面,但不能测量这两过程的截面,而我们于 1964 年用新的方法测量了这两个过程的转移截面。我们是利用关系式

$$\frac{n}{\tau} = \sigma n_m n_0 \bar{v}, \quad (3)$$

式中 n 分别为 $3s_2$ 或 $2s_2$ 态氖原子集居数浓度, τ 为 $3s_2$ 或 $2s_2$ 态的寿命, n_m 为 2^1S 态或 2^3S 态氦亚稳态浓度, n_0 为基态氖原子浓度。用测量线宽、吸收系数、谱线强度从而求得截面 σ 。过程(1)的截面为 3.40×10^{-16} 厘米²,过程(2)的截面为 2.31×10^{-17} 厘米²。

类似于氦氖激光的有氦氧 8446 埃(3^3P-3^3S), 氦

亚稳态将能量交给氧分子,使后者引起分解激发。类似于氦氧的氧原子有碳、氮、硫和溴等激光。

2. 电子直接碰撞激发过程

与基态有光学联系的激发态电子碰撞引起的激发截面一般大于亚稳态的激发截面,例如铜蒸气激光 5106 埃($^2P_{3/2}^0-^2D_{3/2}$)和 5782 埃($^2P_{1/2}^0-^2D_{3/2}$)属于这一类激光器。由于下能级是亚稳态,激光是自终止的。对上能级的电子碰撞引起的激发截面为 9.7×10^{-16} 厘米²,增益很高可引起超辐射。用铜的卤化物代替纯铜可使工作温度从 1500 度降至 400 至 600 度,用双脉冲或高重复频率激励,前一放电脉冲提供铜的卤化物分解,后一放电脉冲使分解出来的铜原子激发,两个脉冲要求有一定的时间间隔。在一万多次重复脉冲放电运用下,平均功率十瓦,效率百分之一^[1]。类似于铜蒸气的激光有铊(5353 埃)、铅(7229 埃)、金(6278 埃)、镉(5311 埃)、铊(1.36、1.22 和 1.017 微米)和钡蒸气。自终止的激光还有氦(5401 埃)、氮(3371 埃)和氢等。

一氧化碳激光也是以电子激励为主的,波长为 5 至 5.9 微米^[2]。放电等离子体中的电子温度远高过一氧化碳的振动温度,因此电子碰撞引起一氧化碳集居数反转。轴向放电一氧化碳激光充以氮、氦、一氧化碳、氧、氙和汞,用液氮冷却,效率可达 40%。加氮为了提高电子温度和对下能级的弛豫碰撞,加氮可引起部分能量转移激励。

3. 潘宁过程与转荷过程

高电离电位元素的激发态在碰撞过程中将激发能交给低电离电位元素,使后者电离激发的现象称为潘宁效应: