

# 用 $^{14}\text{N}^+$ 注入提高钢材耐磨性的研究

张永恩 夏日源 丛培杰 韩景明 张建华

(山东大学物理系)

1982年3月8日收到

## 一、引言

七十年代初, Hartley 等人发现了金属表面处理离子注入法<sup>[1,2]</sup>. 他们用  $\text{N}^+$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{B}^+$  等离子轰击各种钢材, 发现经离子轰击后, 钢材表面耐磨性有较大的提高. Hirvonen 用  $\text{N}^+$  轰击不锈钢和 AISI 轴承钢, 其耐磨性提高 20—50 倍<sup>[3,4]</sup>. 由于材料的磨损程度受温度、滑动速度、润滑剂种类、注入离子品种和剂量等因素的影响, 因而在试验中, 可根据需要, 获得材料注入前后的相对抗磨度随上述各参数的变化关系.

## 二、样品的制备和实验装置

我们将 CrWMn, 40Cr 和 T<sub>8</sub> 三种圆形钢

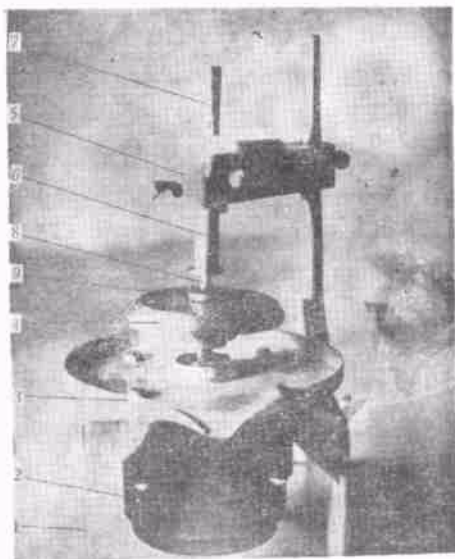


图1 磨损试验装置

1. 磨台支架;
2. 马达;
3. 排水盘;
4. 可转动的样品台;
5. 磨轴支架;
6. 可上下移动的轴;
7. 负载;
8. 钢磨球;
9. 样品

物理

材, 机械抛光成“镜面”光洁度. 然后, 用能量为 50keV 的  $^{14}\text{N}^+$  分别在剂量  $1 \times 10^{17}$ ,  $1.8 \times 10^{17}$ ,  $4.15 \times 10^{17}$ ,  $6 \times 10^{17}$ , 和  $8 \times 10^{17}$  离子/ $\text{cm}^2$  下进行注入. 注入后的样品, 未经退火处理, 直接进行抗磨试验.

我们用于磨损试验的机械装置如图 1 所示. 在磨损试验的过程中, 用自来水连续冲洗, 其作用: 1. 冷却, 使磨损的接触点的温度不致太高, 否则可改变抗磨性能; 2. 可及时地冲走磨掉的碎片; 3. 用作润滑剂.

## 三、试验步骤和结果

将 CrWMn, 40Cr 和 T<sub>8</sub> 等钢样品, 每一种各取两片, 其中一片注入离子. 把注入和未注入的同种钢样品, 先后固定在样品台上, 在相同的半径下, 摩擦相等的时间. 使二者有相等的

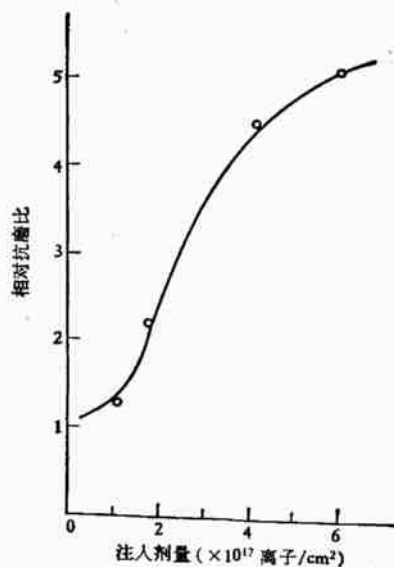


图2 CrWMn 钢的抗磨比与注入剂量的关系

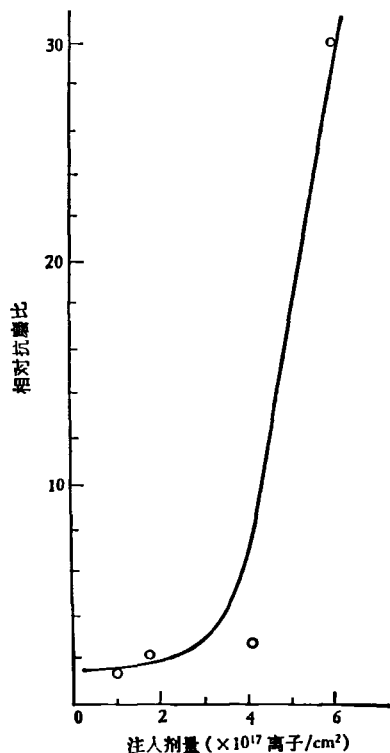


图3 40Cr的抗磨比与注入剂量的关系

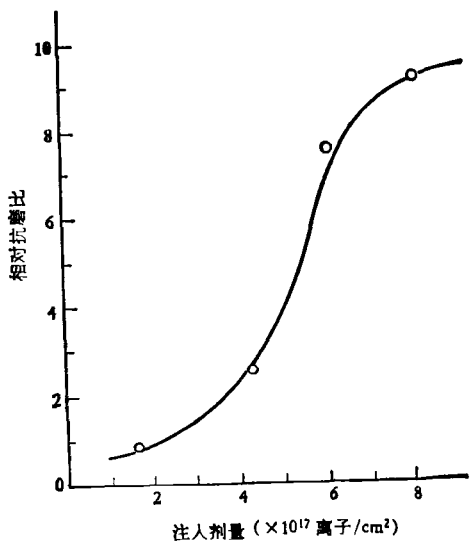


图4 T₈钢的抗磨比与注入剂量的关系

摩擦行程，便于比较。再用半微量天平分别称出二者磨损前后的重量，从而得到一个实验点。

图2，图3，图4分别是三种钢材的相对抗磨度随注入剂量的变化曲线。从图上看，不同的钢材经离子注入后，抗磨度提高的程度不

同。如CrWMn钢的抗磨度提高5倍；40Cr钢提高30倍以上；T₈钢提高9倍。而且，不同钢材的最大抗磨度对应的注入剂量不同。

图5为 $8 \times 10^{17}$ 离子/cm<sup>2</sup>的注入剂量下，T₈钢相对抗磨度随负载变化的实验曲线。可以看出，在约1200g的负载下，相对抗磨度最大。

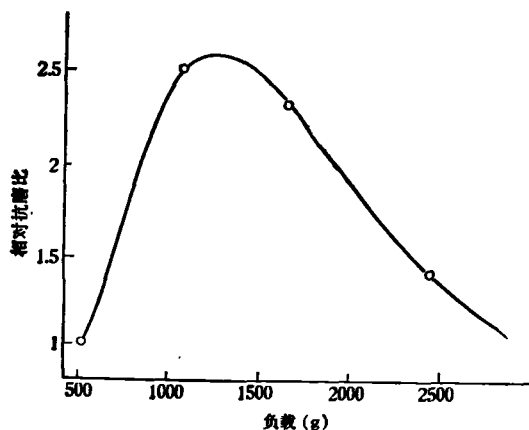


图5 T₈钢的相对抗磨度随负载的变化

#### 四、讨论

1. 离子注入钢材后，将与靶原子碰撞而损失能量。每次碰撞传输的能量超过20eV时，一般靶的原子就要离开平衡位置产生位移，材料中就出现空位和间隙原子等点缺陷。反冲原子又往往引起级联碰撞。点缺陷又通常聚结成团，缺陷的扩展为衬底或杂质原子所阻止，产生较强形变的应力，形成位错或位错环。因此，钢经氮离子注入后，提高耐磨性的机理可能是<sup>[2]</sup>：  
 (1) 注入的氮产生位错环，并局部出现氮化物；  
 (2) 由于间隙原子的可移动性，在磨损时其接触点的温升引起环的缩瘪；  
 (3) 缩瘪过程中逐渐释放的氮，溶解形成马氏体固溶体；  
 (4) 磨损过程产生新的位错，吸收已释放和可移动的氮间隙。这种缀饰位错不易运动，使材料变硬而且抗磨，直到局部的热效应再引起迁移过程为止。

A. K. Suri等人测量了各种材料经各种离子注入后的表面硬度<sup>[3]</sup>。例如，注入<sup>14</sup>N<sup>+</sup>前后的不锈钢硬度的平均值分别为296kg/mm<sup>2</sup>和632kg/mm<sup>2</sup>，增大了两倍以上。

2. 用 100keV 的  $^{14}\text{N}^+$  注入钢材的平均投影射程  $\bar{R}_p = 1200 \text{ \AA}$ ; 约在  $R = 2500 \text{ \AA}$  处注入离子的浓度已下降近于零<sup>[1]</sup>。而磨损划痕往往大大超过此深度, 抗磨度还会改善。这是因为在磨损过程中, 注入的一部分离子被赶得愈来愈深, 改变了原来的射程分布。Lo Russo<sup>[6]</sup>用核反应  $^{14}\text{N}(d, \alpha)^{12}\text{C}$  发现, 由于磨损, 在  $5 \mu\text{m}$  深的表面下, 仍有原来剂量的 20% 的离子存在。

3. 在磨损过程中, 注入片磨掉的碎片非常细小, 相反未注入片磨掉的碎片则较粗大。虽然用自来水连续冲洗, 也不可能完全冲掉。这样一方面粗大的碎片要比细小的碎片加速样品的磨损。另一方面, 细小而坚硬的碎片会不断地重新嵌入注入片表面, 进一步提高注入片的抗磨能力。所以, 在干磨时抗磨度会提高的更大。

4. 我们本来预计相对抗磨度会随负载的加重逐渐地下降。但几次试验都给出了图 5 的曲线形式。对这个结果可试做如下解释:

根据 Lindhard 等人建立的 LSS 理论<sup>[7,8]</sup>及大量的实验证实, 在无定形材料中, 注入离子的射程分布近似于 Gauss 分布。一般用平均投影射程  $\bar{R}_p$  和平均投影射程偏差  $\Delta R_p$  来描述其分布特性,

$$N(x) = \frac{N_d}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \exp\left[-\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2}\right].$$

其中  $N_d$  为注入离子的剂量,  $x$  是距表面的垂直深度,  $N(x)$  为深度  $x$  处的离子体密度。所以, 在  $x = \bar{R}_p$  处, 有最大的注入离子体密度

$$N_{\max} = N(\bar{R}_p) = N_d / \sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p.$$

在理论上, 通常用 Gauss 分布加一个指数衰减的拖尾来与实验曲线拟合。可以想象, 各种金属材料经离子注入后其抗磨性与注入离子的浓度分布有密切的关系。已经证明<sup>[9]</sup>, 在抗腐蚀

情况中, 存在一个最佳抗腐蚀体密度。类似, 也必然会存在一个最佳抗磨体密度  $N_0$ 。当注入剂量和能量合适时, 可使  $N_{\max} > N_0$ 。这样, 在  $N(x) = N_0$  附近有一个最佳抗磨浓度层。当负载较轻时, 只能磨损金属的表面层, 那里注入离子的浓度很低, 抗磨度小。随着负载的加重, 磨损层愈来愈深, 也就愈接近最佳抗磨浓度层, 所以曲线逐渐上升。当负载加重到正好使磨损深度达到最佳抗磨层的情况时, 曲线达到最高点。负载再继续增大时, 磨损深度超过了最佳抗磨层, 抗磨度又下降, 曲线也随之逐渐下降。

5. 图 4 与图 5 比较,  $T_8$  钢的最大相对抗磨度一个是 9.2, 一个是 2.5, 这似乎矛盾。在图 4 的情况, 我们选十个不同的半径, 在每个半径下磨损 20 分钟。因此, 每次的划痕都不太深, 约为  $1300 \text{ \AA}$  左右。但在图 5 的试验中, 只在一个半径下进行, 使之划痕较深。这是造成两个抗磨度不同的原因。

对刘怀增、安庆媛、刘大梁、姚昆、张秀兰、李金华、王宜华、李淑琴、谭春雨、窦昭全等的协助, 深表感谢。

### 参 考 文 献

- [1] G. Dearnaley and N. E. W. Hartley, *Thin Solid Films*, **54**(1978), 215.
- [2] N. E. W. Hartley, *Thin Solid Films*, **64**(1979), 177.
- [3] J. K. Hirvonen, *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**(1978), 1662.
- [4] J. K. Hirvonen et al., *Thin Solid Films*, **63**(1979), 5.
- [5] A. K. Suri et al., *Thin Solid Films*, **64**(1979), 191.
- [6] S. Lo Russo et al., *Appl. Phys. Lett.*, **34**(1979), 629.
- [7] J. Lindhard et al., *Phys. Rev.*, **124**(1961), 128.
- [8] J. Lindhard et al., *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, **33-14** (1963).
- [9] 李金华等, 山东大学学报 (自然科学版), **4** (1981), 48.

## 勘 误

本刊去年第 12 期自 745 页右栏 18 行起至 746 页左栏倒数第 10 行止的文字, 即“在远场条件 … 中心到

场点的光程。”应排在 746 页右栏倒数第 2 行之前。