

引文格式:李海斌,徐惠婷,闫岳涛,等. 碳钢表面碳原子偏聚对锡原子热扩散的影响[J]. 中国有色冶金,2025,54(1):96-104.
LI Haibin, XU Huiting, YAN Yuetao, et al. Effectsof carbon content in carbon steel on the surface diffusion of tin[J].
China Nonferrous Metallurgy, 2025,54(1):96-104.

碳钢表面碳原子偏聚对锡原子热扩散的影响

李海斌¹, 徐惠婷¹, 闫岳涛², 陈璇¹, 帅美荣¹, 王强¹

(1. 太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030000;

2. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030000)

[摘要] 巴氏合金与轴承(碳钢)的紧密结合对轴承运行效率至关重要,目前主要采用铁锡化合物作为中间材料来提高轴承寿命。目前相关文献关于碳钢中碳原子含量对锡原子向铁中的扩散影响还没有报道,本研究对25#和35#钢基体表面进行了一系列热镀锡试验,分析了310℃条件下,Fe-Sn反应平衡时间、锡原子扩散系数和扩散厚度等关键指标对锡原子向碳钢中扩散的影响。结果表明,锡原子扩散到碳钢表面的距离随着保温时间的增加而增大,在310℃时,锡原子进入25#钢的扩散系数为 6.6×10^{-9} ,约为35#钢的两倍;碳原子向25#和35#钢表面的扩散距离比与碳钢表面碳浓度商的平方根成反比。此外, Fe_3C 的键能为-133 eV/atom,而FeSn和 Fe_3Sn_2 的键能分别仅为-7.4和-6.9 eV/atom;可知碳原子易与铁原子结合,即碳钢表面碳含量高会阻碍锡原子向钢中扩散。因此,锡原子容易向25#钢表面扩散,25#钢为理想的巴氏合金轴承材料。

[关键词] 巴氏合金; 轴承; 铁锡化合物; 碳钢; 锡原子; 扩散距离; 扩散系数; 结合能

[中图分类号] TF125.1+2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)01-0096-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.01.011

0 引言

巴氏合金具有显著的抗冲击性和高承载能力,在轧钢机械和海洋工程设备汽轮机组中的大型油膜轴承中作为轴瓦材料广泛使用^[1-3]。然而,巴氏合金轴瓦的工作环境温度高、旋转过程中受力方向不断变化,依附在碳钢衬套上的巴氏合金轴瓦受到剪切力作用,易造成巴氏合金小块碎片脱落,小碎片金属附着在轴瓦其它部位粘接、脱落导致局部烧瓦^[7-8],以致其变形失效,严重影响了设备的正常运

行^[4-6]。因此,提高巴氏合金轴瓦与碳钢轴承基体的粘接质量对于提高轴承运行效率至关重要。在先前的研究中,Wang等^[9-10]使用有限差分法优化了轴承工况设计,计算了各种条件下轴承端部的油膜压力和油膜温度,结果表明初始负载阶段的油膜温度升高,降低了轴承端部承载能力,使其抗拉强度降低。Gao等^[11]研究锡-青铜复合涂层与铅-锡-青铜套管两种锡基材料,发现锡-青铜复合涂层的硬度、耐磨性和接触应力方面效果更好。Tavakoli等^[12-13]研究了新开发的含有Tribaloy合金添加剂的锡青铜基复合材料,该添加剂提高了青铜材料的耐磨性和机械性能。Zhang^[14]等通过热喷涂制备了满足轴承制造要求的巴氏合金丝。

巴氏合金和碳钢基体必须紧密结合,需要用锡作为中间层来提高轴承寿命。在基体上镀一层锡,可以形成FeSn和 Fe_3Sn_2 相互渗透的金属间化合物过渡区^[15-16],该铁锡化合物作为中间材料,可将碳钢轴承基体和巴氏合金紧密结合,从而提高巴氏合

[收稿日期] 2024-10-21

[第一作者] 李海斌(1974—),男,山西长子人,博士,副教授,硕士生导师,长期从事金属轧制方向的教学与科研工作,主要研究方向为复合材料轧制工艺与材料热加工工艺研究。

[通信作者] 国家自然科学基金资助项目(No. 51875382);山西省重点研发计划项目(202302150401003);太原市关键核心技术攻关“揭榜挂帅”项目(2024TYJB0114);忻州市重点研发计划(20240103);太原科技大学研究生创新项目(SY2023022)。

金轴瓦的结合强度。Giefers 等^[17] 计算结果表明, FeSn 和 Fe₃Sn₂ 的金属间化合物比 Fe 和 Sn 更致密; 此外, 于昕等^[18] 发现金属表面金属间化合物的致密层阻碍了原子向内部的扩散; 宋振亚等^[19] 将巴氏合金堆焊沉积在低碳钢表面制造的轴瓦, 比离心铸造的轴瓦性能更好。Xu 等^[20] 通过使用镀镍石墨 (Ni-Gr) 复合粉末和巴氏合金粉末的混合粉末进行激光熔覆, 在 20# 钢基体上制备锡基巴氏合金自润滑复合涂层, 提高了轴瓦的耐磨性。文献 [21-22] 重点分析了不同 Al 含量的 Cu-xAl/1010 钢双金属层复合材料的界面微观结构演变和结合机制, 结果发现 Fe 和 Al 组成的扩散层, 提高了 Cu 与钢界面之间的结合性能。

目前相关文献关于碳钢中碳原子含量对锡原子

向铁中的扩散影响还没有报道, 而碳含量是控制锡原子向碳钢中扩散的重要参数。本研究深入探讨了锡原子向碳钢表面热扩散以及碳含量对锡原子扩散的影响, 为研究巴氏合金轴承结合机理提供了一个有益探索。

1 试验介绍

1.1 试验原料及试剂

从市场上采购直径为 10 mm 的 25# 钢和 35# 钢棒进行实验, 35# 钢棒在企业出售前, 已在 840 °C 下淬火, 560 °C 下回火进行过调制处理。碳钢中非铁成分含量见表 1。浓度为 1 mol/L 的 ZnCl₂ 溶液由太原某公司检定中心合作伙伴提供。

表 1 碳钢材料组成 (质量分数)

Table 1 Material composition of carbon steel (mass fraction)

钢材	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
25# 钢	0.22% ~ 0.29%	0.17% ~ 0.37%	0.50% ~ 0.80%	≤ 0.25%	≤ 0.30%	≤ 0.25%
35# 钢	0.32% ~ 0.40%	0.17% ~ 0.37%	0.50% ~ 0.80%	≤ 0.25%	≤ 0.25%	≤ 0.25%

1.2 试验设备

试验中用到的设备包括中走丝线切割机 (DK7780 型, 泰州市江洲数控机床制造有限公司)、箱式电阻炉 (TJX-30-13KGP, 绍兴市上虞区尚欣仪器公司)、场发射扫描电镜 (S4800, 日本日立公司)、X 射线能谱分析仪 (EDS, 牛津仪器)。

1.3 试验方法

金属锡高温熔化, 向碳钢表面内部扩散, 随扩散时间增加, 扩散厚度增大; 当扩散时间达到一定值时, 扩散反应达到平衡, 锡原子向碳钢表面的扩散厚度不再变化。此外, 锡原子高温熔化后易氧化, 需将碳钢棒扩散表面与锡块在 ZnCl₂ 助焊溶液中浸湿后, 再置于电阻炉中加热, 使熔化后的锡原子能够顺利向碳钢表面扩散形成铁锡化合物。具体实验过程如下: 将碳钢切割成 25 mm 的短棒, 棒的一端抛光, 以获得光滑的平面。随后, 并将其光面朝上, 用饱和 ZnCl₂ 溶液涂覆抛光的表面, 放置在电阻炉中。将足量的小纯锡块在 ZnCl₂ 溶液中浸湿后, 放置在碳钢棒的光滑平面上, 确保熔化后将其完全覆盖 (图 1)。电阻炉加热至 310 °C, 锡块熔化在碳钢中扩散 5、10、15、20 和 25 min 后, 分别从加热炉中取出样品空

冷。将样品沿扩散方向切割, 之后进行磨抛。使用 4% 硝酸酒精腐蚀试样, 在场发射扫描电子显微镜下观察并用 EDS 进行成分分析, 分析锡原子在碳钢表面的扩散过程。

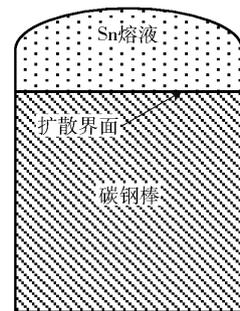


图 1 锡原子向碳钢表面的扩散

Fig. 1 Diffusion of tin atoms to the surface of carbon steel

1.4 分析及计算方法

本研究通过一定温度下, 不同时间液态锡原子向碳钢表面的扩散, 测量出锡原子在碳钢表面的扩散厚度, 由此得到单位面积锡原子的扩散量, 计算出其扩散系数。钢中碳元素是活跃原子, 高温状态下容易填补碳钢表面产生的热缺陷, 通过理论分析碳

钢内部碳原子向表面的扩散距离,并且测量出碳钢表面碳原子浓度。利用 Castep 软件包计算出钢中渗碳体与铁锡化合物的晶胞结合能,对比铁与碳原子和锡原子的结合能力,分析碳钢表面不同的碳原子含量对锡原子扩散的影响。

2 结果分析

2.1 界面微观结构

图 2 为锡原子在 25# 钢表面不同扩散时间的界面微观组织。较光滑的区域代表碳钢基体,而不平

整的部分代表纯锡区域。

图 2(a) 为扩散 5 min 的微观组织,锡原子扩散时间短,锡原子扩散进入到灰色铁素体内部,其边缘形成白亮色的凸起条状带,界面处珠光体中的渗碳体边缘软化,与熔化的锡结合,导致渗碳体片层膨胀、增厚,甚至聚集成颗粒状物质。图 2(b) 为锡原子扩散 10 min 后的微观结构,碳钢基体中铁素体晶粒的晶界清晰可见,界面处的铁素体软化,锡原子扩散到基体中,形成宽度约为 3 μm 的扩散薄层,扩散层与基体边缘软熔的铁素体明显不同。

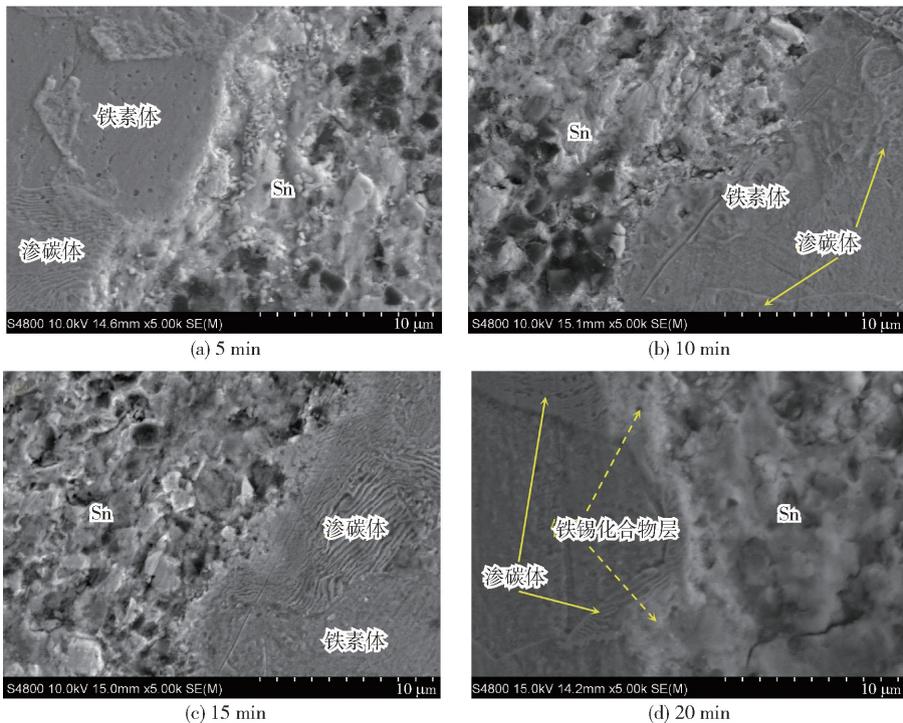


图 2 25# 钢和锡的界面微观组织

Fig. 2 Interface microstructure of 25 steel and tin

当扩散时间达到 15 min 时,界面处的渗碳体层片软化后弯曲,甚至熔融为一体,形成宽度约为 4 μm 的含锡薄层(图 2(c));锡原子渗入碳钢表面,形成明亮的条状扩散层,20 min 后,扩散层的厚度增加,形成厚度均匀的铁锡化合物层(图 2(d))。锡在界面处扩散到渗碳体中,导致边缘渗碳体片层消失,形成条状团絮区。然而,没有与锡原子反应的内部渗碳体,层片清晰可见。扩散 25 min 后,碳钢表面锡原子的扩散层与 20 min 的厚度基本相同,在此省略。

图 3 为 Sn 原子扩散进入 35# 钢的界面微观组织。调质后的 35# 钢在铁素体基体上表现出均匀细

小的回火索氏体颗粒。在图 3(a) 中,扩散 5 min 的试样界面出现厚度约为 1 μm 的界面层,扩散层凸起但不连续。35# 钢界面微观组织与 25# 钢不同,并且在相同的扩散时间下,扩散层的厚度小于 25# 钢。扩散 10 min 后,界面处的含锡化合物层为连续的条带状,与深灰色碳钢基体明显不同(图 3(b))。扩散 15 min 时,碳钢表面上的锡原子扩散层的厚度略有增加,扩散层更亮,与基体对比度更强(图 3(c))。在图 3(d) 中,扩散 20 min 的样品界面,铁-锡化合物层的厚度没有明显变化,且 35# 钢表面组织没有软化现象。扩散 25 min 的 35# 碳钢表面扩散

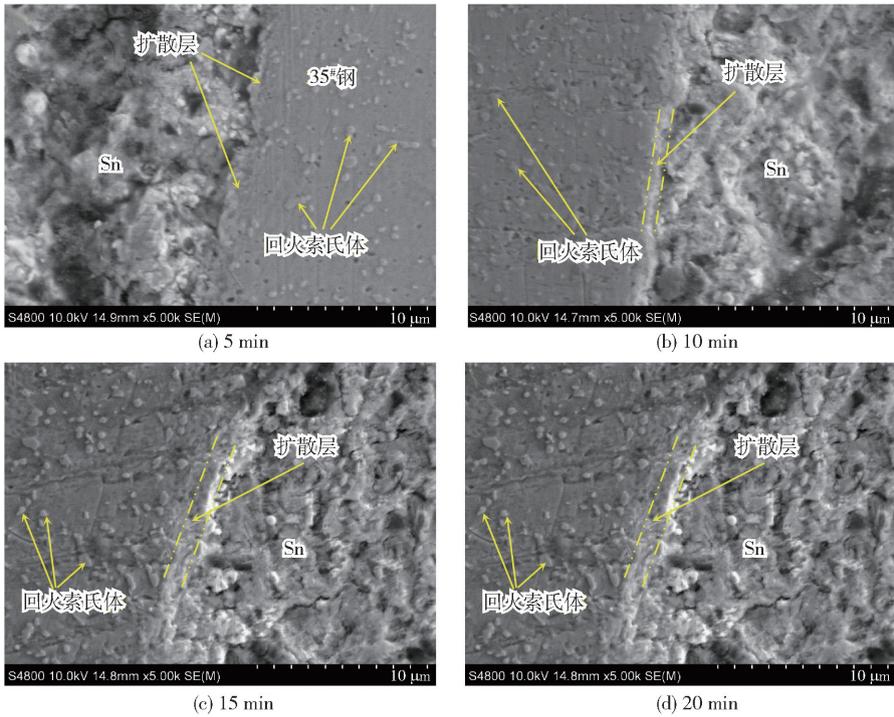


图 3 35#钢和锡的界面微观组织

Fig. 3 Interface microstructure of 25 steel and tin

层与 20 min 的厚度基本一致,同样省略。

2.2 锡原子扩散层厚度

碳钢熔点高,稳定性好,铁原子难以向外扩散;只有锡原子能够向碳钢表面扩散,形成铁-锡化合物。此外,25#钢中含有较高硬度的片状渗碳体和较软的铁素体,由图 2 可知锡原子向碳钢表面铁素体和渗碳体区域的扩散距离基本相同;由此假设锡原子向 35#碳钢内部索氏体和铁素体区域的扩散距离也相同。根据 EDS 对界面成分的测试结果,纯锡侧 Fe 含量接近于零,成分曲线虽然波动,但基本接近

平行的水平坐标轴(图 4)。图 4 中铁含量高的部分是碳钢基体,即左侧铁含量较高的部分曲线。以 10 min 扩散实验结果线扫描曲线为例,找到左侧曲线碳钢中铁含量的最低值(C_{min})和最高值(C_{max}),得到平均值(C_{avg}),碳钢基体中 C_{avg} 最接近锡熔液的点 A,定义为碳钢表面边界。使用相同的方法,找到 Sn 熔液中锡含量的最高及最低值,得到锡的平均含量。锡熔液中锡平均含量最靠近碳钢表面的点,为锡熔液的边界(B)。AB 之间距离,为锡原子在 25#钢表面扩散 10 min 的扩散层厚度(图 4(a))。由此可以

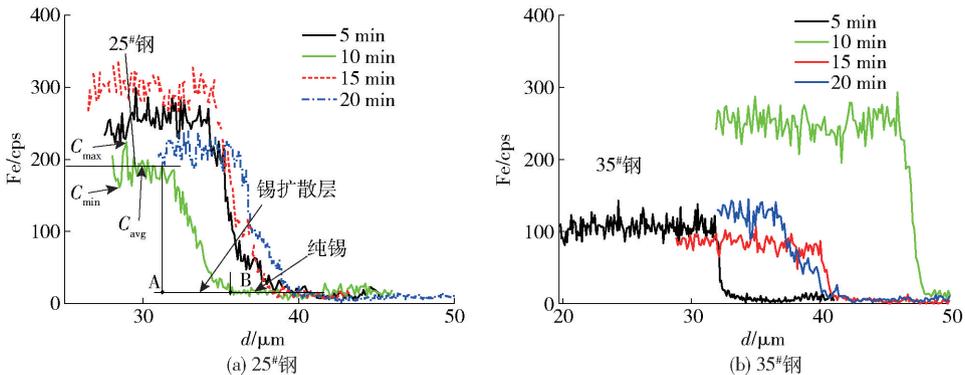


图 4 扩散层中 Fe 元素含量曲线

Fig. 4 Fe element content curves in diffusion layer

确定不同扩散时间,锡原子向碳钢表面扩散的距离。

图5为不同时间锡原子扩散到碳钢表面的距离。25#钢在扩散5 min后,厚度在约为4 μm;扩散20 min后约为7 μm(图5)。然而,35#钢的扩散5 min后,界面层厚度约为2.2 μm;扩散20 min后,约为4.2 μm。由此可知,液态锡原子在碳钢表面的扩散距离随着时间的增加而增大。扩散时间超过20 min,锡扩散层厚度变化不大,由此断定20 min为扩散反应达到平衡的时间。

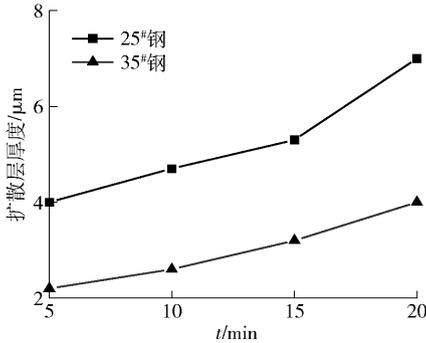


图5 扩散层的厚度与时间的关系

Fig. 5 Thickness of diffusion layer versus time

2.3 锡原子的扩散系数

锡对碳钢表面的扩散系数可以根据 Fick 第二定律计算^[23],见式(1)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} \quad (1)$$

表2 锡原子扩散到碳钢表面单位面积的扩散量和扩散系数

Table 2 The diffusion quantity and diffusion coefficient of tin atoms diffusion into carbon steel surface

钢材	不同扩散时间下单位面积扩散量/mol				D
	5 min	10 min	15 min	20 min	
25#钢	0.1237×10^{-3}	0.1608×10^{-3}	0.1917×10^{-3}	0.216×10^{-3}	6.6×10^{-9}
35#钢	0.0680×10^{-3}	0.0866×10^{-3}	0.1113×10^{-3}	0.1299×10^{-3}	3.446×10^{-9}

2.4 碳原子在碳钢表面的扩散

根据资料^[25],随着温度升高,表面金属的膨胀系数和原子间距逐渐增大。当碳钢被加热到给定的实验温度时,表面膨胀会产生缺陷。Ahmedabadi等^[26]研究发现活跃的碳原子容易迁移填充碳钢表面的热缺陷;在相同的温度下,碳原子的扩散能力高于其他原子。Kang 和 Rivera^[27-28]指出,晶粒内的碳原子很容易扩散到晶界,有效填充位错区的缺陷。本实验中碳钢表面为晶粒的晶界,加热后容易吸引

式中: D 是扩散系数(在相同扩散时间沿扩散方向的浓度梯度), m^2/s 。

当初始条件 $t=0$ 时,表面锡浓度 $c_0=1$;当边界条件 $t=t_1$ 时,浓度 $c_t=0$ 。方程(1)的解见式(2)。

$$c = c_2 [1 - \text{erf}(\beta)] \quad (2)$$

式中: $\beta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$; $c_2 = \frac{c_0 + c_t}{2} = 0.5$ 。

当扩散系数(D)为常数时,式(2)的两边导出 X 并取对数,可以表示为式(3)。

$$\ln(-c') = \ln \Delta c = \ln \frac{c_0}{\sqrt{\pi Dt}} - \frac{x^2}{4Dt} = \ln \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} - \frac{x^2}{4Dt} \quad (3)$$

因为 Δc 和 D 的值足够小,因此式(3)可以简化为式(4)。

$$-\Delta c = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} - \frac{x^2}{4Dt} \quad (4)$$

当碳钢表面扩散层的锡含量线性下降时(图4),可以计算出单位面积锡的扩散量(Δc)。在式(4)中代入锡原子扩散到碳钢表面的摩尔量和扩散厚度,可以计算出25#钢和35#钢表面的锡原子扩散系数(表2)。扩散系数与文献中获得的结果一致^[24]。

25#钢的扩散系数较大,锡与碳钢的扩散距离较长,而35#钢的扩散率较小,扩散距离较短。

晶粒内部的碳原子向表面扩散,即碳钢表面成为碳原子容易偏聚的区域,可近似视为碳原子在热扩散反应中的移动距离。

碳原子的扩散距离可以用式(5)计算^[29]。

$$\exp[-\pi^2(Dt/l^2)] = \frac{C_M - C_m}{C_{0M} - C_{0m}} \quad (5)$$

式中: C_{0m} 和 C_{0M} 分别是室温下晶粒内部及晶界处的初始碳含量,%; C_m 和 C_M 分别是经过一定时间(t)高温(T)保温后,晶粒中的碳浓度和晶界处的碳浓

度, %; D 是在一定温度下的扩散系数; l 是扩散距离, m。

将式(5)变形, 得到碳原子的扩散距离和其他参数之间的关系, 见式(6)。

$$l = \sqrt{Dt / \left\{ \pi^2 \ln \left[\frac{C_M - C_m}{C_{0M} - C_{0m}} \right] \right\}} \quad (6)$$

25[#]钢和35[#]钢基体的初始碳浓度几乎相同, 并假设晶粒中的初始碳含量同为 C_{0m} ; 在室温下时, 假设25[#]钢和35[#]钢晶界处的碳浓度 (C_{0M}) 相同。在310^oC下扩散反应完成后, 假设25[#]碳钢和35[#]碳钢晶粒内部的最小碳浓度 (C_m) 相同; 只有25[#]钢和35[#]钢表面晶界碳浓度 (C_{M1} 、 C_{M2}) 不同。

碳原子从晶粒内部到25[#]钢和35[#]钢表面的晶界的扩散距离表示为式(7)~(8)。

$$l_1 = \sqrt{D_1 t / \left\{ \pi^2 \ln \left[\frac{C_{M1} - C_m}{C_{0M} - C_{0m}} \right] \right\}} \quad (7)$$

$$l_2 = \sqrt{D_2 t / \left\{ \pi^2 \ln \left[\frac{C_{M2} - C_m}{C_{0M} - C_{0m}} \right] \right\}} \quad (8)$$

C_{0m} 和 C_{0M} 的初始碳浓度足够小, 而 C_m 的碳浓度在一定温度下热扩散后足够小。在920^oC下, 碳原子在钢中的扩散系数 (D) 仅为 $1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。因

此, 在本实验中, 假设 D_1 相当于310^oC下的 D_2 。将式(7)和(8)组合得到式(9)。根据EDS界面成分检测结果(图6), 25[#]钢和35[#]钢界面处的碳含量远高于内部, $C_M \gg C_m$ 。将式(9)简化发现, 碳原子在25[#]和35[#]钢表面的扩散距离比与碳浓度商的平方根成反比。

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{D_1 / \ln \left[\frac{C_{M1} - C_m}{C_{0M} - C_{0m}} \right]}{\sqrt{D_2 / \ln \left[\frac{C_{M2} - C_m}{C_{0M} - C_{0m}} \right]}} \approx \sqrt{\frac{(C_{M2} - C_m)}{(C_{M1} - C_m)}}} \propto \sqrt{\frac{C_{M2}}{C_{M1}}} \quad (9)$$

根据不同时间、不同试样碳钢界面的碳含量检测结果, 可知碳钢表面扩散层的碳含量及含碳量高的范围。由图6可以看出, 20 min时25[#]钢及35[#]钢表面的碳含量及其移动距离, 由此得到了 l_1/l_2 与 $\sqrt{C_{M2}/C_{M1}}$ 的关系(图7)。 l_1/l_2 的比值随时间略有减小, 表明碳原子向碳钢表面的扩散距离开始减速, 扩散速率随时间减小; $\sqrt{C_{M2}/C_{M1}}$ 随时间增加, 表明35[#]钢扩散层上的碳原子浓度高于25[#]钢。此外, l_1/l_2 随着 $\sqrt{C_{M2}/C_{M1}}$ 的增加而略有下降, 与式(9)一致。

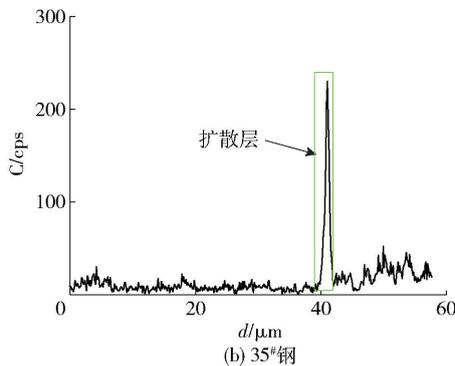
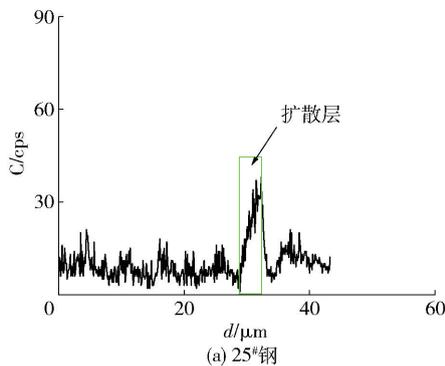


图6 扩散层中C的含量变化

Fig. 6 Content change of C in the diffusion layer

35[#]钢表面的碳含量远高于25[#]钢, 并且35[#]钢具有高硬度和高熔点。因此, 35[#]钢的原子扩散更加困难。根据式(9), 碳含量高的35[#]钢中碳原子的扩散距离 (l_2) 短于25[#]钢 (l_1), 与实际测试结果一致(图7)。

2.5 碳含量对锡原子扩散的影响

Tersoff等^[30]证明了晶胞系统的总能量是原子之间键能的总和。利用Hubertus^[31]提供的结构参

数和平衡晶格常数, 基于密度泛函理论和结合能公式, 利用Castep软件包可以计算出碳钢中渗碳体的晶胞结合能。Fe₃C的键能为-133 eV/atom, 而FeSn和Fe₃Sn₂的键能分别仅为-7.4和-6.9 eV/atom。碳原子和铁原子的结合能力远远超过了锡原子, 前人研究表明^[32]碳原子和铁原子的结合能力优于其他原子, 因此, 锡原子难以取代碳原子形成铁锡化合物。

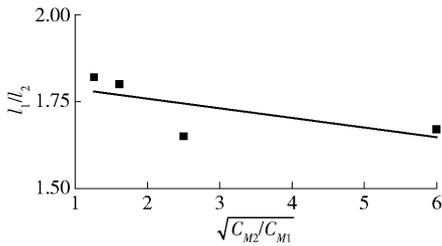


图7 l_1/l_2 和 $\sqrt{C_{M2}/C_{M1}}$ 关系

Fig. 7 Relationship of l_1/l_2 and $\sqrt{C_{M2}/C_{M1}}$

25#钢和35#钢的成分相同,只是碳含量略有不同。根据实验结果,35#钢表面含锡原子的扩散层比25#钢表面的扩散层薄。然而,35#钢表面扩散层内的碳含量高于25#钢。碳钢表面碳含量的增加,与铁原子结合形成铁碳化物薄层,阻碍了锡原子向碳钢中的扩散,即碳钢中较高的碳含量阻碍锡原子向其内部扩散。因此,25#钢的扩散系数高于35#钢(表2)。锡原子在25#钢表面的扩散量超过了35#钢,使25#钢表面形成较厚的扩散层,提高了轴承基体和锡基巴氏合金套筒之间的结合强度,有助于提高滑动轴承的承载能力和延长使用寿命。因此,25#钢被认为是一种理想的轴承材料。锡原子在25#钢表面的扩散20 min左右达到平衡,为生产锡基巴氏合金轴瓦的合理扩散时间。

3 结论

针对巴氏合金与轴承的结合问题,本研究深入探讨了锡原子向碳钢表面热扩散以及碳含量对锡原子扩散的影响,得到以下主要结论。

1) 在310℃下,锡原子扩散到碳钢表面的距离随着保温时间的增加而增加。当保温时间增加到20 min时,25#钢表面出现厚度均匀的铁锡化合物层,界面的渗碳体组织与锡原子结合,由层片状变成团絮状。然而,在35#钢表面形成的铁锡化合物的厚度层很薄,界面不存在软融化现象。

2) EDS测试结果表明,25#钢和35#钢表面存在碳原子聚集现象。在相同的保温时间下,碳原子向25#和35#钢表面的扩散距离比与其界面碳浓度高的平方根成反比。 Fe_3C 的键能为-133 eV/atom,而FeSn和 Fe_3Sn_2 的键能分别仅为-7.4和-6.9 eV/atom。铁-碳原子的结合能大于铁-锡原子的结合能。因此,碳钢表面上的铁原子与锡原子的结合数

量随着碳含量的增加而减少。碳含量的增加阻碍了锡原子向碳钢中的扩散。因此,25#钢的扩散系数高于35#钢。

3) 锡原子向25#钢表面热扩散,形成的扩散层更厚,是制备巴氏合金轴承的理想材料。锡原子向25#钢表面的扩散约20 min平衡,为生产巴氏合金轴瓦的合理时间。

[参考文献]

- [1] CUI Y, HUANG Y, YANG G, et al. Cusp modelling of oil-film instability for a rotor-bearing system based on dynamic response [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 212: 111289.
- [2] 王建梅, 薛亚文, 张艳娟, 等. 巴氏合金 SnSb11Cu6 蠕变力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(6): 1432 - 1438.
WANG Jianmei, XUE Yawen, ZHANG Yanjuan, et al. Creep mechanical properties of Babbitt Sn Sb11Cu6 [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(6): 1432 - 1438.
- [3] WANG J, LI Y, BAO M, et al. An accurate measurement method for center oil film thickness in high-speed roller bearing using ultrasound [J]. Tribology International, 2024, 196: 109726.
- [4] WITHERS R L, WELBERRY T R, PRING A, et al. 'Soft' phonon modes, structured diffuse scattering and the crystal chemistry of Fe-bearing sphalerites [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2005, 178(3): 655 - 660.
- [5] 杜波, 孙转平, 杨新岐, 等. 异种铝合金摩擦塞补焊接头微观组织及性能[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 43 - 48.
DU Bo, SUN Zhuanping, YANG Xinqi, et al. Microstructure and properties of dissimilar aluminum alloy friction plug Joint [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 43 - 48.
- [6] 尹雪梅, 张一魁, 姬帅城, 等. GMA 椭圆油膜轴承性能实验[J]. 航空动力学报, 2021, 36(10): 2072 - 2079.
YIN Xuemei, ZHANG Yikui, JI Shuaicheng, et al. Performance experiment of GMA elliptical oil film bearing [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(10): 2072 - 2079.
- [7] MAREY N A, EL MAGHLANY W M, FAYED M, et al. Experimental study on hydro-thermal behavior of journal bearing oil film profile in a slow speed diesel engine [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 81: 532 - 547.
- [8] 曾旭焱, 侍玉青, 刘军, 等. 碰摩转子-油膜轴承系统的全局动力学研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(2): 494 - 501.
ZENG Xuyan, FU Yuqing, LIU Jun, et al. Global dynamics study on friction rotor-oil film bearing system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 494 - 501.
- [9] WANG J, MENG F, ZHANG X, et al. Mathematical model and algorithm of interface singular stress field of oil-film bearing [J]. Tribology International, 2017, 116: 351 - 361.

- [10] 王建梅, 夏全志, 侯定邦, 等. 复合结构衬套合金界面结合性能[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 36-42.
WANG Jianmei, XIA Quanzhi, HOU Dingbang, et al. Interfacial bonding properties of composite structure bushing alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 36-42.
- [11] GAO F, LIU R, WU X J, et al. Tribological behavior of T-401/tin-bronze composite coating deposited by HVOF on the bushing of planet journals[J]. Wear, 2010, 269(11-12): 724-732.
- [12] MARINKOVIC A, STOJANOVIC B, GACHOT C, et al. Analysis of Lubrication Regimes for porous sliding bearing[J]. Lubricants, 2024, 12(6): 184.
- [13] TAVAKOLI A, LIU R, WU X J, et al. Improved mechanical and tribological properties of tin-bronze journal bearing materials with newly developed tribology alloy additive [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 489(1-2): 389-402.
- [14] ZHANG B, YANG Z Y, FU D X, et al. Preparation of the wire of ZChSnSb11-6 used for remanufacturing thermal spraying[J]. Physics Procedia, 2013, 50: 231-237.
- [15] CHEN J J, SONG X P, WANG H, et al. Effect of temperature on corrosion behavior of 304 stainless steel in liquid Sn[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(9): 2642-2646.
- [16] WU B, YU W, SUN X, et al. Effect of ultrasonic vibrations on wetting of Fe, FeSn₂/Fe and Quartz in Sn[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107246.
- [17] GIEFERS H, NICOL M, et al. High pressure X-ray diffraction study of all Fe-Sn intermetallic compounds and one Fe-Sn solid solution[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 422(1-2): 132-144.
- [18] 于昕, 刘德义, 陈汝淑, 等. 钢/铜/钛扩散复合界面显微组织和力学性能[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(6): 30-34.
YU Xin, LIU Deyi, CHEN Rushu, et al. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints between carbon steel and titanium with copper interlayer [J]. Journal of Dalian Jiaotong University. 2009, 30(6): 30-34.
- [19] 宋振亚, 彭孜, 闫鸣, 等. 制备方法对锡基巴氏合金轴瓦组织及性能的影响[J]. 稀有金属, 2021, 45(3): 378-384.
SONG Zhenya, PENG Zi, YAN Ming, et al. Microstructures and mechanical properties of tin-based babbitt bearings with different fabrication methods. [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(3): 378-384.
- [20] XU T Z, ZHANG S, WANG Z Y, et al. Wear behavior of graphite self-lubricating Babbitt alloy composite coating on 20 steel prepared by laser cladding [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141: 106698.
- [21] PENG B, HANG Z, JIE J, et al. Evolution of interface and mechanical performance of Cu-xAl/1010 steel bimetal laminated composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 935: 168121.
- [22] LIU Z, BI Q, GUO J, et al. Failure analysis of eccentric bushings in large gyratory crusher [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 153: 107630.
- [23] 刘菲, 苏运星, 王仲民, 等. 菲克定律在氢扩散系数研究中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(5): 841-846.
LIU Fei, SU Yunxing, WANG Zhongmin, et al. Application of Fick's law in measurement of hydrogen diffusion coefficient by electrochemical method [J]. Journal of Guangxi University: NatSciEd, 2010, 35(5): 841-846.
- [24] 程宏涛, 杨建国, 刘雪松, 等. 铜/锡界面间扩散行为分子动力学模拟[J]. 焊接学报, 2009(5): 49-52.
CHENG Hongtao, YANG Jianguo, LIU Xuesong, et al. Molecular dynamics simulation of diffusion behavior between the interface of Cu/ Sn [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009(30)5: 49-52.
- [25] 安阁英. 铸件形成理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版, 1990: 9-11.
An Geying. Theory of the castings formation[J]. Harbin Institute of Technology press, Harbin, 1990: 9-11.
- [26] AHMEDABADI P, KAIN V, ARORA K, et al. Radiation-induced segregation in desensitized type 304 austenitic stainless steel[J]. Journal of nuclear materials, 2011, 416(3): 335-344.
- [27] KANG J H, RIVERA-DIAZ-I-DEL-CASTILLO P E J. Carbide dissolution in bearing steels [J]. Computational Materials Science, 2013, 67: 364-372.
- [28] 付洁, 郑欣, 李中奎, 等. 铋基金属高温强化的研究[J]. 稀有金属, 2008(5): 548-551.
FU Jie, ZHENG Xin, LI Zhongkui, et al. Study on high-temperature strengthening of Nb-based alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(5): 548-551.
- [29] 徐盛, 刘雅政, 周乐育, 等. 45CrNiMoV 钢合金元素偏析和均匀化[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(1): 146-150.
XU Sheng, LIU Yazheng, ZHOU Leyu, et al. Microsegregation and homogenization of 45CrNiMoV steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(1): 146-150.
- [30] TERSOFF J. Modeling solid-state chemistry: Interatomic potentials for multicomponent systems [J]. Physical review B, 1990, 39(8): 5566.
- [31] GIEFERS H, NICOL M. High pressure X-ray diffraction study of all Fe-Sn intermetallic compounds and one Fe-Sn solid solution [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 422(1): 132-144.
- [32] 戴玉梅, 王逊, 刘艳侠, 等. 原子间相互作用对势计算合金奥氏体结合能[J]. 大连海事大学学报, 2006, 32(2): 96-100.
DAI Yumei, WANG Xun, LIU Yanxia. Calculation of cohesive energy of alloyed Austenite by interatomic pair potential [J]. J. Dalian Maritime Univ, 2006, 32(2): 96-100.

Effects of carbon content in carbon steel on the surface diffusion of tin

LI Haibin¹, XU Huiting¹, YAN Yuetao², CHEN Xuan¹, SHUAI Meirong¹, WANG Qiang¹

(1. Heavy Machinery Engineering Research Center of Education Ministry, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The close combination of Babbitt alloy and bearings (carbon steel) is crucial for the efficiency of bearing operation, and currently iron-tin compounds are mainly used as intermediate materials to improve bearing life. At present, there is no report in relevant literature on the effect of carbon atom content in carbon steel on the diffusion of tin atoms into iron. A series of experiments concerning hot-tin plating on the surfaces of 25 and 35 steel matrix have been carried in this paper. The key indicators involving Fe-Sn equilibrium time diffusion coefficient of Sn atoms and diffusion thickness have also been analyzed, which could be used to estimate the binding quality during the reaction process at 310 °C. The results indicate that the distance from tin atoms diffused into the surface of carbon steel increases with the increasing of holding time, and the diffusion coefficient of tin atoms entering 25 steel is 6.6×10^{-9} , which is about twice that of 35 steel at 310 °C. The diffusion distance ratio of carbon atoms is inversely proportional to the square root of the carbon concentration quotient in the surfaces of 25 and 35 steel. In addition, the calculated bonding energy of Fe_3C is -133 eV/atom, while the bonding energies of FeSn and Fe_3Sn_2 are only -7.4 and -6.9 eV/atom, respectively. It is obvious that carbon atoms are easily combined with iron atoms, that is, the high carbon content would hinder tin atoms to diffuse into the steel. This is the fundamental reason why tin atoms are easily diffused towards the surface of 25 steel. As a result, the matrix material of 25 steel is identified as an ideal babbitt alloy bearing material.

Key words: Babbitt alloy; bearing; Iron-tin compounds; carbon steel; tin atom; diffusion distance; diffusion coefficient; bonding energy

我国铜矿找矿取得重大突破

近日,据自然资源部网站发布消息,新一轮找矿突破战略行动实施以来,自然资源部中国地质调查局不断加大铜矿找矿力度,通过公益引领、科技创新,推动央地企协同,在青藏高原、黑龙江等地区取得一系列重大找矿成果,新增铜资源量为“十三五”新增资源量的2倍。

目前,我国在青藏高原形成了玉龙、多龙、巨龙-甲玛和雄村-朱诺四个千万吨级的铜矿资源基地。“十四五”以来,累计新增资源量2000余万吨,预测资源潜力达1.5亿吨,青藏高原将成为世界级铜资源基地,有力改变我国铜矿勘查开发格局。此外,黑龙江多宝山铜矿深部找矿实现重大突破,新增铜资源量365万吨,巩固了我国东部铜资源基地的资源基础。该轮铜矿找矿成果将显著提升我国铜资源保障能力。

下一步,自然资源部中国地质调查局将持续加大矿产基础地质调查工作力度,增强科技创新引领作用,摸清铜矿资源家底,积极引导和拉动地方、企业和社会资本投入,大力推进绿色勘查开发,着力打造一批新的铜矿大型资源基地,为保障国家能源资源安全、促进区域经济高质量发展贡献力量。

(资料来源:中国有色金属报)