

## 基于扩散试验的热锻模具涂层性能模拟研究及应用

薛勇杰<sup>1</sup>, 赵中里<sup>1</sup>, 黄昌文<sup>2</sup>, 吴大鸣<sup>1</sup>, 汪 杰<sup>1</sup>, 张齐松<sup>1</sup>

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 安徽安簧机械股份有限公司, 安徽 安庆 246000)

**摘要:** 针对企业实际生产中遇到的热锻模具磨损严重的问题, 采用阴极电弧离子镀设备在热锻模具上制备了 CrAlN、TiAlZrN、CrTiAlSiN 和 ZrTiAlCrSiN 这 4 种梯度涂层。经过测试, ZrTiAlCrSiN 梯度涂层在硬度、摩擦因数、结合力方面均表现一般, 但搭载 ZrTiAlCrSiN 梯度涂层的热锻模具可将使用寿命提高 2 倍以上, 有着突出的性能表现。利用自制静态扩散装置, 借助扫描电子显微镜、显微维氏硬度仪、划痕仪及摩擦磨损试验机, 分析了经过高温处理及 Fe 元素扩散后的涂层硬度、摩擦因数和结合力的变化情况。研究结果表明: Fe 元素扩散会降低涂层的硬度、增加涂层的摩擦因数、弱化涂层的使用性能。最终试验结果与理论分析吻合较好, 研究结果为热锻模具涂层的设计和评价方法提供了参考。

**关键词:** 热锻模具; 模具磨损; PVD 涂层; 元素扩散; 模具寿命

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.033

**中图分类号:** TG174.445

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0236-07

## Simulation research and application on coating properties of hot forging die based on diffusion experiment

Xue Yongjie<sup>1</sup>, Zhao Zhongli<sup>1</sup>, Huang Changwen<sup>2</sup>, Wu Daming<sup>1</sup>, Wang Jie<sup>1</sup>, Zhang Qisong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Anhui An Huang Machinery Co., Ltd., Anqing 246000, China)

**Abstract:** For the problem of serious wear for hot forging die encountered in the actual production of enterprises, four gradient coatings of CrAlN, TiAlZrN, CrTiAlSiN and ZrTiAlCrSiN were prepared on the hot forging dies by cathodic arc ion plating equipment. After testing, the ZrTiAlCrSiN gradient coating showed average performance in terms of hardness, friction factor and bonding force, but the hot forging die with the ZrTiAlCrSiN gradient coating improved the service life by more than two times and had outstanding performance. Furthermore, the changes of hardness, friction factor and bonding force for coating after high temperature treatment and Fe element diffusion were analyzed with the help of scanning electron microscope, micro Vickers hardness tester, scratch tester and friction wear tester by a homemade static diffusion device. The results show that the diffusion of Fe elements decreases the hardness of coating, increases the friction factor of coating and weakens the performance of coating. The final experimental results are in good agreement with the theoretical analysis, and the research results provide a reference for the design and evaluation methods of hot forging die coatings.

**Key words:** hot forging die; die wear; PVD coating; element diffusion; die life

长寿命锻造模具制造技术是国内锻造行业的共性难题和“卡脖子”工程<sup>[1-3]</sup>。金属塑性成形过程中, 热锻模具由于长时间服役于应力场与冷热交替的温度场, 导致表面的合金元素重新分布、局部表面的合金元素含量严重降低, 使得相应部位的硬度、

耐磨性、热强性随之下降, 这是造成锻模磨损失效的主要原因之一<sup>[4]</sup>。通过表面处理技术制备硬质涂层, 可以延缓锻模表面与坯料间的元素扩散现象、减少由于坯料塑性流动导致的磨损或者拉毛现象, 同时可以提高抗磨粒磨损性能和抗腐蚀磨损性能, 有效地延缓锻模失效<sup>[5-8]</sup>。因此, 涂层材料的选用与评价对提高热锻模具寿命至关重要。此前有学者在 Cr 基涂层中加入一定量的 Al 元素, 形成一种双金属硬质薄膜结构, 将膜结构的热稳定性以及抗氧化能力提升至一个新的水平, 还能够提升整个涂层的热疲劳性能<sup>[9]</sup>。近年来, 人们在 TiAlN 薄膜的技术上掺杂 Zr、Cr、Si 等元素制备出多元硬

收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2022-01-19

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目 (202004a05020024);

安徽省 2020 年关键技术攻关计划项目 (JB20067)

作者简介: 薛勇杰 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 937671581@qq.com

通信作者: 赵中里 (1965-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: zhongli5167@163.com

质涂层，在结构特性、力学性能、耐腐蚀以及抗氧化性能上具有较为明显的优势<sup>[10-12]</sup>。虽然热锻模具涂层已有一些研究报道<sup>[13-16]</sup>，但是在实际工程中的应用范围还比较窄，其原因是涂层的磨损评价指标不够完善。已有研究一般将显微硬度、摩擦因数、涂层与基体的结合强度作为涂层的磨损评价指标，但忽略了热锻模具涂层的磨损失效可能是由于高温坯料侧元素扩散致使热锻模具涂层表层的合金元素重新分布，进而降低了涂层的使用性能而引起的<sup>[17]</sup>。

考虑到热锻模具涂层与高温坯料的元素相互扩散的现象，本文通过自制静态扩散装置模拟了热锻模具的高温高压服役条件，研究了涂层 1（CrAlN）、涂层 2（TiAlZrN）、涂层 3（CrTiAlSiN）、涂层 4（ZrTiAlCrSiN）因高温及高温下元素扩散所导致的

涂层硬度、结合力和摩擦因数的变化情况，探索一种适合于热锻模具涂层性能表征的方法，以期为新型热锻模具涂层体系的研发与设计提供参考。

1 试样制备与试验

1.1 试验材料

锻件材料选取 42CrMo4 钢，其主要化学成分见表 1。采用线切割方式将其加工为尺寸为 20 mm×20 mm×5 mm 的试样，经喷砂处理后，采用不同粒度的金相砂纸进行打磨处理，并采用抛光机完成抛光，最终达到一种镜面状态。将试样先后放置在水乙醇、丙酮溶液中进行超声波清洗，完成后放入去离子水中进行超声清洗。所有操作完成后取出试样，吹干、静置，待下一步试验使用。

表 1 42CrMo4 钢的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of 42CrMo4 steel（%，mass fraction）

C	Mn	Cr	Mo	S	P	Si	Fe
0.38~0.45	0.60~0.90	0.90~1.20	0.15~0.30	≤0.035	≤0.025	≤0.40	余量

尽管锻模材料通常选用 4Cr5MoSiV1（H13）钢，但是考虑到其可能对试验结果产生干扰，因此，选择高温性能稳定、力学性能优异的镍基高温合金 GH4169 作为涂层基体材料，其主要化学成分见表 2。将 GH4169 合金采用与上述 42CrMo4 钢试样相同的处理方式，随后装进镀膜设备炉腔内，抽真空至

$5\times10^{-3}$  Pa，加热至 480 ℃，通入 Ar 气，在-400 V 直流偏压下对基体进行 10 min 等离子轰击，随后引燃电弧，控制气体分压沉积过渡层，最后沉积功能层。制备了 CrAlN、TiAlZrN、CrTiAlSiN、ZrTiAlCrSiN 这 4 种梯度涂层，分别记为涂层 1、涂层 2、涂层 3 和涂层 4，4 种涂层的沉积参数如表 3 所示。

表 2 GH4169 合金的化学成分（%，质量分数）  
Table 2 Chemical compositions of GH4169 alloy（%，mass fraction）

C	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	Al
≤0.08	17.0~21.0	50.0~55.5	2.80~3.30	0.75~1.15	4.7~5.5	0.2~0.6
Si	Mn	Cu	S	P	Co	Fe
≤0.35	≤0.35	≤0.3	≤0.015	≤0.015	≤1.0	余量

表 3 涂层沉积参数  
Table 3 Parameters of coating deposition

涂层类别	涂层 1	涂层 2	涂层 3	涂层 4
沉积温度/℃	480	480	480	480
沉积时间/min	160	160	160	160
靶材电流/A	80	160/120	110/110	120/110
偏压/V	-100	-100	-100	-100
气压/Pa	0.8	0.8	0.8	0.8
N <sub>2</sub> 分压/Pa	0→0.8	0→0.8	0→0.8	0→0.8

1.2 试验方法

为模拟热锻模具涂层的高温高压服役环境，将

涂层试样与 42CrMo4 钢试样紧密贴合，并将两端对齐，装夹在自制静态扩散装置上进行扩散试验，装置如图 1 所示。利用扭矩扳手统一控制螺栓的扭紧力矩，随后置入智能温控电阻炉中。为了排除其他干扰因素，在电阻炉中放入未经任何处理的涂层试样作为对照试验。通过对企业中失效的锻造模具进行硬度测试，发现其硬度已经显著下降至 36~38 HRC。根据图 2<sup>[18]</sup>所示的不同回火温度下 H13 钢的硬度随回火时间的变化曲线，以及对金属热成形过程中界面传热特性的已有研究<sup>[4,19]</sup>，设置智能温控电阻炉加热温度为 900 K、保温时间为 2 h，保温结束后随炉冷却。

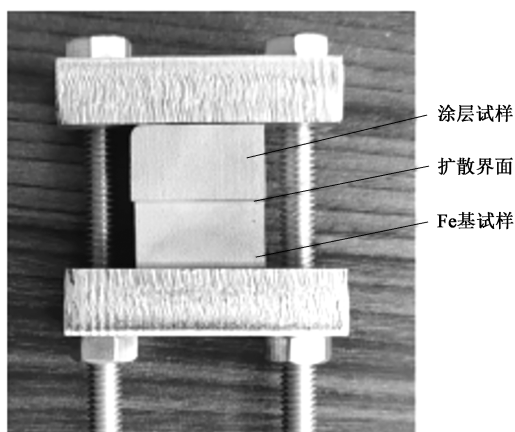


图 1 自制静态扩散装置

Fig. 1 Homemade static diffusion device

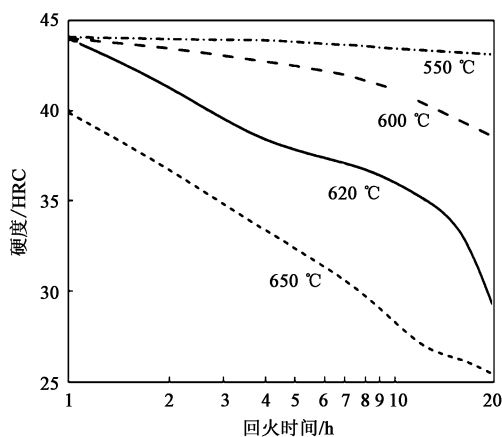


图 2 不同回火温度下 H13 钢的硬度随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation curves for hardness of H13 steel with time at different tempering temperatures

## 2 测试方法

### 2.1 元素扩散测试

Fe 元素在 42CrMo4 钢中的分布非常广泛, 并且 Fe 元素本身具有较高的化学活性, 扩散情况较其他元素更为剧烈, 并且更为广泛, 所以分析试验结果过程中, 重点考虑 Fe 元素的扩散情况。对 4 种涂层试样进行垂直于扩散界面的 EDS 线扫描, 对 Fe 元素位置分布变化的具体趋势进行观察, 并对结果进行相关分析。

### 2.2 涂层性能测试

采用 SSX-550 扫描电镜观察涂层表面和断口的微观形貌, 并用其附带的能谱仪测定涂层的成分; 采用的声发射划痕仪型号为 WS-2005, 主要对膜基结合力进行测定, 最大试验载荷为 200 N, 划痕长

度为 4 mm, 划痕速率为  $4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用 HM200 型显微维氏硬度仪测定涂层硬度, 加载载荷为 25 g, 每个样品测试 6 个点, 取平均值; 采用 HT-500 型摩擦磨损试验机分析涂层的摩擦因数曲线, 摩擦形式为球-盘式圆周摩擦, 设定摩擦副主轴转速为  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 摩擦半径为 3 mm, 对磨材料为直径为  $\Phi 4 \text{ mm}$  的 GCr15 钢球, 加载载荷为 500 g, 加载时间为 20 min。

为了验证涂层的实际使用效果, 选择与图 3 同批次热处理的热锻活塞模具, 分别搭载涂层 1、涂层 2、涂层 3 和涂层 4, 在自动化锻造生产线上进行锻打测试。为了提高涂层的承载能力, 模具均进行了表面预硬化处理。锻件材料为 42CrMo4 钢, 当发现锻件出现缺肉、探伤凹槽区有折叠并且通过钳修不能改善的情况时, 立即停止锻打测试。



图 3 热锻活塞模具

Fig. 3 Hot forging piston die

## 3 结果与讨论

### 3.1 Fe 元素扩散测试结果与分析

图 4 为元素扩散试验后, 各涂层的截面形貌及沿截面处 Fe 元素的扫描结果。可以看出: 扩散试验后, 涂层 1 的结构紧密, 无孔隙, 与基体之间具有平整光滑的界面, 附着情况非常好, 但未观察到具体的多层结构; 涂层 2 和涂层 4 存在明显的纳米多层结构, 结构清晰致密, 层间界面清晰平整; 涂层 3 的层间结合界面清晰平整, 但膜基结合处有裂纹产生, 这与涂层 3 的内应力密切相关。扩散试验后, 在涂层侧比较靠近扩散界面的位置能够检测出一部分的 Fe 元素, 出现这种情况的原因是涂层与 42CrMo4 钢之间发生了元素的扩散现象。

### 3.2 涂层硬度分析

由 HM200 型显微维氏硬度仪测试得到 4 种涂层的硬

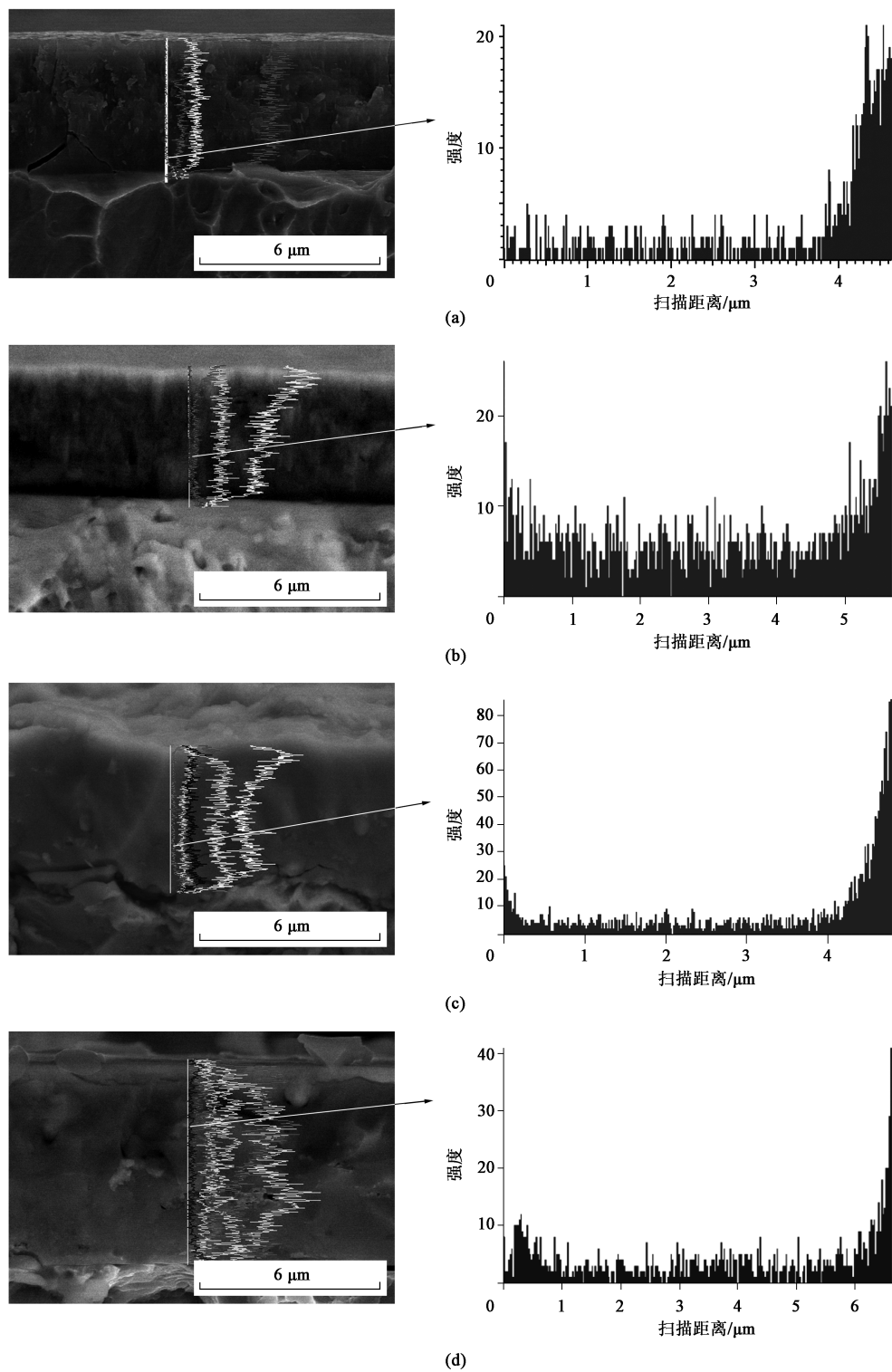


图 4 扩散试验后涂层截面形貌及沿截面处 Fe 元素扫描结果  
(a) 涂层 1 (b) 涂层 2 (c) 涂层 3 (d) 涂层 4

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of coating after diffusion experiments and scanning results of Fe element along cross-section  
(a) Coating 1 (b) Coating 2 (c) Coating 3 (d) Coating 4

度值，结果见表 4。根据试验结果，4 种涂层试样的硬度在高温处理及元素扩散后均出现了一定程度的降低，相比较而言，元素扩散对涂层硬度的影响较大。其中，涂层 4 在扩散处理后的硬度变化最小，仅降低 10.72%。



表 4 4 种涂层的硬度测试结果统计表  
Table 4 Statistics of hardness test results for four kinds of coatings

涂层编号	处理方式	硬度值/HV <sub>0.025</sub>	硬度降低百分比/%
涂层 1	未处理	2114	—
	高温处理	1713	18.97
	Fe 元素扩散	1210	42.76
涂层 2	未处理	2554	—
	高温处理	2074	18.79
	Fe 元素扩散	1332	47.85
涂层 3	未处理	3446	—
	高温处理	3214	6.73
	Fe 元素扩散	2978	13.58
涂层 4	未处理	3245	—
	高温处理	3139	3.27
	Fe 元素扩散	2897	10.72

3.3 涂层摩擦因数分析

图 5 为经高温试验并且 Fe 元素扩散后, 4 种涂层与 GCr15 钢球的对摩摩擦因数曲线。可以看出, 4 种涂层的磨损过程中, 有些直接进入了稳定的磨损阶段, 有些则经过磨合磨损阶段后才能进入稳定的磨损阶段。在磨合阶段, 4 种涂层的摩擦因数均较低, 随着磨损的进行, 摩擦因数急剧增加, 这与涂层表面的液滴污染缺陷及氧化物密切相关<sup>[20]</sup>。

高温试验及元素扩散试验后, 涂层的摩擦因数均出现了不同程度的增加, 相比较高温处理后摩擦因数曲线的波动情况, 元素扩散对涂层的摩擦因数的影响较大。根据试验结果分析: 元素扩散试验后, 涂层 1 和涂层 2 的摩擦因数曲线的波动较大, 这可能是由于在摩擦磨损过程中, Fe 元素的扩散使得涂层的致密性降低, 产生大量磨屑且不能及时排除所致; 涂层 3 和涂层 4 的耐磨性较为稳定, 摩擦过程

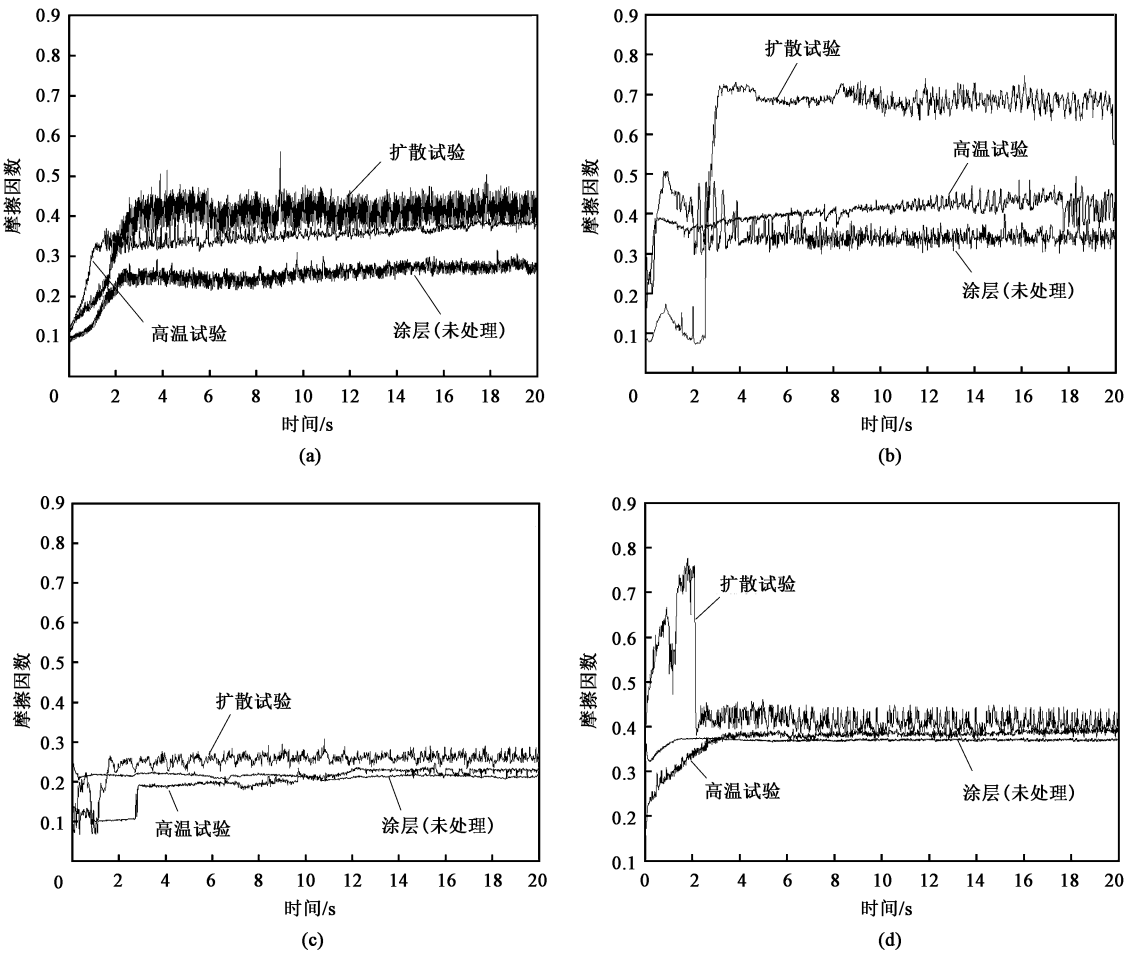


图 5 Fe 元素扩散前后 4 种涂层的摩擦因数曲线  
(a) 涂层 1 (b) 涂层 2 (c) 涂层 3 (d) 涂层 4

Fig. 5 Friction coefficient curves for four kinds of coatings before and after Fe element diffusion  
(a) Coating 1 (b) Coating 2 (c) Coating 3 (d) Coating 4

中没有多余的磨屑产生，这可能是由于 Al 元素和 Si 元素的掺杂细化了涂层的晶粒度，提高了涂层的硬度，提高了涂层整体的耐磨性能<sup>[21-24]</sup>。综上所述，涂层 3 与涂层 4 在元素扩散对于摩擦因数的影响方面表现得最好。

3.4 膜基结合力分析

利用声发射划痕仪测试 4 种涂层的膜基具结合力。加载过程中，当测试声信号发生突变时判定为涂层破裂。元素扩散前后基体与涂层的结合力的具体测试结果如表 5 所示。可以看出：900 K 高温试验及元素扩散试验对涂层膜基结合力的影响均比较小。

表 5 4 种涂层的膜基结合力测试结果  
Table 5 Test results of adhesion strength for four kinds of coatings

涂层编号	处理	膜基结合力/N
涂层 1	未处理	122
	高温处理	115
	Fe 元素扩散	114
涂层 2	未处理	102
	高温处理后	95
	Fe 元素扩散	98
涂层 3	未处理	82
	高温处理	84
	Fe 元素扩散后	80
涂层 4	未处理	84
	高温处理	78
	Fe 元素扩散	75

3.5 试验验证

对热锻模具涂层的模具寿命进行跟踪统计，结果如图 6 所示。可以发现，相比于未涂层模具，涂层模具的寿命均有所提高。经过氮化后的模具在生产 2993 件后模具磨损失效。搭载涂层 1 的模具寿命为 3012 件，寿命未提高，分析原因主要与涂层的纳米结构有关：在单层涂层结构中，冷热交替产生的热疲劳微裂纹会迅速扩展、加深，沿深度方向延伸至基体，这可能导致涂层直接失效<sup>[25]</sup>。搭载涂层 2 的模具的产量为 3708 件，使用寿命提高了约 30%，主要原因与涂层的抗高温氧化能力有关：涂层 2 表面的大液滴成分主要为金属 Zr 和 Ti，在 900 K 温度下 Ti 和 Zr 极易被氧化，从而萌生裂纹源；另外，由于液滴与涂层的密度差异较大，结合强度不是很好，因此，液滴的热应力不能被及时转移，极易导

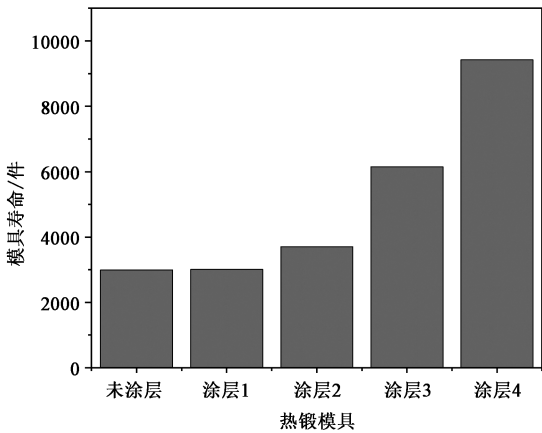


图 6 涂层模具与未涂层模具的锻打寿命对比

Fig. 6 Comparison of forging life between coated die and uncoated die

致应力集中，从而造成涂层快速失效<sup>[26]</sup>。搭载涂层 3 的模具寿命为 6150 件，工作寿命提高了约 1.1 倍。搭载涂层 4 的模具寿命为 9421 件，工作寿命提高了约 2.15 倍。

4 结论

- (1) 热力耦合作用下，元素扩散是影响热锻涂层模具磨损失效的主要因素之一。
- (2) 涂层的扩散阻挡性能可以作为选择热锻模具涂层的一项重要技术指标，对新型热锻模具涂层的开发具有指导作用。
- (3) 采用显微硬度计测试了高温处理及元素扩散后几种涂层的硬度降低程度，硬度值降低量从大到小依次为：涂层 2>涂层 1>涂层 3>涂层 4。
- (4) 通过摩擦磨损仪对高温处理及元素扩散后的几种涂层进行摩擦磨损实验，抗磨性从大到小依次为：涂层 4>涂层 3>涂层 1>涂层 2。

参考文献：

[1] 金占明, 邵荷生. 三种典型磨粒磨损磨屑形成过程的研究 [J]. 固体润滑, 1991, 11 (3): 151-160.  
Jin Z M, Shao H S. The study on formation process of three kinds of the typical abrasive debris [J]. Journal of Solid Lubrication, 1991, 11 (3): 151-160.

[2] 崔向红, 姜启川, 王树奇. 新型精铸热锻模具钢高温磨损性能同其显微组织的相关性 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25 (3): 211-215.  
Cui X H, Jiang Q C, Wang S Q. Correlation between microstructures and high-temperature wear-resistance of a new type hot-forged precisely cast die steel [J]. Tribology, 2005, 25 (3): 211-215.

[3] Xu W J, Li W H, Wang Y S. Experimental and theoretical analy-

- sis of wear mechanism in hot-forging die and optimal design of die geometry [J]. *Wear*, 2014, 318 (1-2): 78-88.
- [4] 陆宝山, 王雷刚, 季业益, 等. 金属成形热力耦合模拟与模具失效机制研究 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (3): 33-40.
- Lu B S, Wang L G, Ji Y Y, et al. Study on thermal coupling simulation and mold failure mechanism of metal forming [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (3): 33-40.
- [5] Gronostajski Z, Kaszuba M, Widomski P, et al. Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition [J]. *Wear*, 2019, 420-421: 269-280.
- [6] Podgrajšek M, Glodež S, Ren Z. Failure analysis of forging die insert protected with diffusion layer and PVD coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 276: 521-528.
- [7] 洪小英, 肖贵乾. 基于关节机器人的电弧熔丝焊锻复合增材再制造热锻模修复 [J]. *塑性工程学报*, 2022, 29 (1): 119-125.
- Hong X Y, Xiao G Q. Joint robot-based arc fusion wire welding forging composite additive remanufactured hot forging die repair [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29 (1): 119-125.
- [8] 王华君, 彭毅, 王华昌, 等. 功能梯度表面涂层热锻模的仿真设计与分析 [J]. *精密成形工程*, 2010, 2 (3): 32-35.
- Wang H J, Peng Y, Wang H C, et al. Simulation design and analysis of hot forging die based on FGM surface coating [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2010, 2 (3): 32-35.
- [9] Paldey I S, Deevi S C. Single layer and multilayer wear resistant films of (Ti, Al)N: A review [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 342: 58-79.
- [10] Chen L, Li W, Liu P, et al. Microstructure and mechanical properties of (AlCrTiZrV) $N_x$  high-entropy alloy nitride films by reactive magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2020, 181: 109706.
- [11] Braic V, Zoita C N, Balaceanu M, et al. TiAlN/TiAlZrN multilayered hard coatings for enhanced performance of HSS drilling tools [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 204 (12-13): 1925-1928.
- [12] 陈炜, 孙培鑫, 曹鹏, 等. 金属表面涂层高温摩擦磨损性能研究 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (6): 1-7.
- Chen W, Sun P X, Cao P, et al. Research on high-temperature friction and wear properties for coatings on metal surface [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (6): 1-7.
- [13] Widomski Paweł, Kaszuba Marcin, Dobras Daniel, et al. Development of a method of increasing the wear resistance of forging dies in the aspect of tool material, thermo-chemical treatment and PVD coatings applied in a selected hot forging process [J]. *Wear*, 2021, 477: 203828.
- [14] Yilkiran T, Behrens B A, Paschke H, et al. The potential of plasma deposition techniques in the application field of forging processes [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2012, 12 (3): 284-291.
- [15] 卞正文. AlCrN 涂层在热锻模中的应用 [J]. *模具工业*, 2015, 41 (2): 48-51.
- Bian Z W. Application of AlCrN coating in hot forging dies [J]. *Die & Mould Industry*, 2015, 41 (2): 48-51.
- [16] 张雪, 唐芳. 锥齿轮模具表面 PVD 技术的应用 [J]. *模具制造*, 2018, 18 (4): 87-90.
- Zhang X, Tang F. Application of PVD technology in the bevel gear die [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2018, 18 (4): 87-90.
- [17] 赵中里, 薛勇杰, 吴大鸣, 等. 热锻模高温摩擦磨损探讨及对策 [J]. *模具工业*, 2021, 47 (5): 1-5.
- Zhao Z L, Xue Y J, Wu D M, et al. High temperature friction and wear behavior of hot forging die and its countermeasures [J]. *Die & Mould Industry*, 2021, 47 (5): 1-5.
- [18] 施渊吉, 黎军顽, 吴晓春, 等. 汽车法兰盘热锻模具磨损失效的实验分析和数值研究 [J]. *摩擦学学报*, 2016, 36 (2): 215-225.
- Shi Y J, Li J W, Wu X C, et al. Experimental and numerical study on the wear failure of hot forging die of automobile flange [J]. *Tribology*, 2016, 36 (2): 215-225.
- [19] 陆宝山. 金属热成形过程界面传热特性与模具失效机制跨尺度热-力耦合研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- Lu B S. Trans-scale and Thermo-mechanical Coupling Study on Interfacial Heat Transfer Properties and Die Failure Mechanisms During Metal Hot Forming [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [20] 赵晓晓. 多弧离子镀制备多层 TiAlCrN 涂层的性能研究 [J]. *工具技术*, 2021, 55 (4): 38-41.
- Zhao X X. Study on properties of TiAlCrN nano-multilayer coating by cathodic arc method [J]. *Tool Engineering*, 2021, 55 (4): 38-41.
- [21] 赵时璐. 多弧离子镀 Ti-Al-Zr-Cr-N 系复合硬质膜的制备、微结构与性能 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- Zhao S L. Preparation, Microstructure and Properties of Ti-Al-Zr-Cr-N Composite Hard Films Deposited by Multi-arc Ion Plating [D]. Shenyang: Northeast University, 2010.
- [22] Kuo Y C, Wang C J, Lee J W. The microstructure and mechanical properties evaluation of CrTiAlSiN coatings: Effects of silicon content [J]. *Thin Solid Films*, 2017, 638: 220-229.
- [23] Wu J F, He N R, Li H X, et al. Deposition and characterization of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD coating system [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2015, 47 (2): 184-191.
- [24] 吴炳乾, 饶湖常, 张冲, 等. Si 含量对 FeCoCr<sub>0.5</sub>NiBSi<sub>x</sub> 高熵合金涂层组织结构和耐磨性的影响 [J]. *表面技术*, 2015, 44 (12): 85-91.
- Wu B Q, Rao H C, Zhang C, et al. Effect of silicon content on the microstructure and wear resistance of FeCoCr<sub>0.5</sub>NiBSi<sub>x</sub> high-entropy alloy coatings [J]. *Surface Technology*, 2015, 44 (12): 85-91.
- [25] 肖继明. 梯度涂层高速钢刀具切削性能及磨损失效机理研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- Xiao J M. Research on Cutting Performance and Wear Failure Mechanism of Graded Coating HSS Tools [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [26] 郎清凯. (TiAlZr)N 涂层高速钢刀具沉积工艺及切削性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2016.
- Lang Q K. Investigation of Deposition Processes and Cutting Properties of (TiAlZr)N-coated HSS Tools [D]. Shenyang: Shenyang University, 2016.