

超硬纳微米 PVD 涂层技术在模具领域的发展

张而耕, 朱州, 张体波

(上海应用技术学院 机械工程学院, 上海 201418)

摘要: 介绍了 PVD 涂层技术的分类, 综述了 PVD 涂层技术在冲压/成型、挤压、拉拔、塑料、铝合金等模具应用领域的研究进展。展望了随着 PVD 涂层技术的快速发展, 其在模具领域的应用将会更加广泛。

关键词: 物理气相沉积; 成型模具; 压铸模具; 注塑模具; 氮化; 渗碳; 电镀

中图分类号: TG174.444

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)05-0118-06

Development of Superhard Nano Micron PVD Coating Technology in the Field of Mold

ZHANG Er-geng, ZHU Zhou, ZHANG Ti-bo

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

ABSTRACT: This paper introduced the classification of PVD coating technology, reviewed the progress of research on application of PVD coating technology in the field of stamping/molding, extrusion, drawing, plastic, and aluminum alloy mold and prospected the future of rapid development of PVD coating technology which will be more widely applied in the field of molding.

KEY WORDS: physical vapor deposition; forming mold; casting mold; injection mold; nitriding; carburizing; electroplating

随着工业的发展,对模具的精度、寿命、硬度、耐磨损、防腐蚀以及抗高温性能等方面提出了更高的要求。实践证明,提高模具性能的有效方法除了正确的加工、合理的选材之外,关键在于科学合理的热处理和表面处理^[1]。

1 PVD 涂层技术的分类

物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)技术是一种在真空条件下采用物理方法,将固体或液体材料表面气化成气态原子、分子或离子状态,并通过低压气体(或等离子体)过程,在基体表面沉积具有

某种特殊功能薄膜的技术,主要包括真空蒸镀、阴极溅射、离子镀等。采用此技术制备的超硬薄膜不仅超硬、超薄、耐高温、无污染,能满足工具、零件和摩擦磨损件表面耐磨损、抗氧化、防腐蚀、自润滑等特殊性能要求,还能够有效解决传统模具表面处理的弊端^[2-3],是现代表面工程中最有发展前途和应用价值的一种技术^[4-6]。

1.1 真空蒸镀

真空蒸镀是一种把装有基片的真空室抽成真空,使得镀料的原子或分子从表面汽化逸出形成蒸气流,入射到基片表面凝结形成固态薄膜的技术。真空蒸

收稿日期: 2014-05-07; 修订日期: 2014-08-01

Received: 2014-05-07; Revised: 2014-08-01

基金项目: 上海市教委创新基金(12YZ160);上海市联盟计划(L201203, L201308)

Fund: Supported by Shanghai Municipal Education Commission Innovation Fund(12YZ160) and Shanghai Affiliate Programs(L201203, L201308)

作者简介: 张而耕(1973—),男,安徽人,博士后,副教授,主要研究方向为超硬纳微米 PVD 涂层、机械制造、材料失效分析。

Biography: ZHANG Er-geng(1973—), Male, from Anhui, Post doctor, Vice professor, Research focus: superhard nano-micron PVD coating, machinery manufacturing, failure analysis of materials.

镀设备主要由真空镀膜室和真空抽气系统组成。

真空蒸镀必须具备 3 个条件:热蒸发源,冷基片,真空环境。真空蒸镀过程中必须注意防止高温下对蒸发源的污染,防止蒸发源的分子在到达基片表面前化合和凝聚,防止空气分子作为杂质混入或在薄膜中形成化合物。

1.2 阴极溅射

溅射现象早就被人们所认识,它是用高能粒子(大多数为电场加速的气体正离子)撞击固体表面(靶),使固体原子(或分子)从表面溅出。溅射所需能量一般来自带有几十电子伏以上动能的粒子或粒子束。

磁控溅射中的阴极溅射技术将平面阴极改为旋转阴极,使得阴极溅射具有以下优势:靶材利用率高,达到 90% 以上;溅射效率高,沉积速度快;工艺稳定性好,能够消除打弧和靶面掉渣现象;换靶及操作都比较方便;工艺重复性非常好,制备的薄膜结合力等性能好,厚度均匀。旋转阴极溅射技术获得了广泛应用,同时也被其他制膜技术所采用。

1.3 离子镀

离子镀是一种基于等离子体技术的薄膜制备技术。该技术的基础是真空镀,借助于一种惰性气体(一般采用氩气)的辉光放电使金属或合金蒸汽离子化,离子经电场加速而沉积在带负电荷的基体上。在真空条件下,利用该技术不但可以制备金属、化合物、陶瓷薄膜,而且可以制备半导体和超导体等薄膜。

离子镀技术弥补了普通真空蒸镀的不足,解决了镀层黏性差和均匀度不足的问题。离子镀特点主要有:离子绕射性强、没有明显的方向性沉积,所制备的涂层与基体结合力强、均匀性好、具有较高致密度和非常细的晶粒度^[4,7]。当前采用电弧离子镀制备氮化物、氧化物等硬质薄膜的研究也越来越广泛^[8]。

20 世纪 90 年代以来,PVD 技术与其它表面强化技术的融合越来越紧密。将离子注入与气相沉积镀膜相结合的离子束辅助增强沉积(Ion Beam Assisted Deposition)兼有两种工艺的优点,大大改善了膜与基体的结合强度。离子镀和溅射技术相结合沉积 TiAlN/TiNbN 的工艺,激光技术与气相沉积结合的工艺均可增加涂层硬化层的深度。物理气相沉积与其它表面强化技术结合可以制备复合涂层,进一步发挥 PVD 涂层的优势,如气体氮化与 PVD 复合、离子氮化

与 PVD 复合、化学镀 Ni-P 与 PVD 复合。正是由于 PVD 技术的发展及与其它技术的融合,进一步促进了其在成型模具、注塑模具、剪切模具、压铸模具等方面的广泛应用,体现出 PVD 技术的卓越性能。

2 PVD 在模具领域内的应用

PVD 涂层技术的热处理温度低,模具在处理过程中不易发生变形、软化,可方便地控制工艺参数,结构设计性强,能制备不同的涂层以提升模具的表面性能和质量,延长模具的寿命。表 2 是常用 PVD 涂层的性能及使用范围。

表 1 各种模具对表面处理的要求

Tab.1 Requirements of various molds for surface treatment

	耐磨性	耐粘附性	耐热龟裂	耐蚀性	耐疲劳强度
冷冲模	优	优			一般
冷锻模	优	优			一般
热锻模	优	优	优		一般
压铸模	优	优	优		
注塑模	优	优	一般	优	

表 2 不同类型涂层的性能^[4]

Tab.2 The performance of different types of coating^[4]

涂层类型	硬度(HV)	涂层温度/℃	摩擦系数	工作温度/℃
TiN	2500	450~480	0.4	600
TiCN	3500	450~480	0.25	400
TiAlN	3500	450~480	0.4	800
CrN	1800	350~450	0.35	700
AlCrN	3500	450~480	0.35	1100
DLC	1200	150~250	0.25	200

2.1 在冲压/成型模具上的应用

冲压/成型模具表面失效形式有腐蚀、磨损、变形、开裂等。为避免模具过早失效,模具的处理过程中型腔及相对运动件表面必须具有高硬度及自润滑性,以达到耐磨、减磨、防蚀及抗疲劳的作用,PVD 表面处理技术能有效地解决上述难题^[3]。

SHI 等^[9]对 Cr12MoV 冷作模具钢表面非平衡磁控溅射 Ti/TiN 和低温离子渗碳+PVD Ti/TiN 复合处理后,PVD Ti/TiN 涂层显著增强了模具表面的负荷能力和耐磨性能,模具表面离子渗碳后再进行 PVD

Ti/TiN 复合处理则性能更强。先处理的离子渗碳得到的中间薄层,能为 Ti/TiN 提供非常强的支撑力,因此更能提高冷作模具的寿命。这也为某些表面硬度较低的模具钢进行 PVD 涂层前提供了一种预处理工艺,即先对这类模具进行离子渗碳,然后再进行表面 PVD 涂层,这样比单纯的 PVD 涂层寿命更长。

邵丽健等^[10]在银币压印模(ASSAB 635 冷作模具钢)表面分别沉积 PVD CrTiN 涂层和 PECVD DLC 涂层,并采用传统的镀铬工艺进行压印试验。结果表明 CrTiN 涂层模具压印的银币表面质量与镀铬的模具最为接近,而 DLC 涂层模具压印的银币表面有发黑现象,涂层转移到了银币表面上,这说明 DLC 涂层硬度较高、韧性较差。镀铬模具在压印 300 枚银币后,印模失效;CrTiN 涂层在压印 1000 枚银币后仍没有出现涂层剥裂的痕迹,与镀铬模具相比其寿命提高了 2 倍以上。另外,也有研究人员利用离子镀法在银币表面镀覆 TiN,试验发现与未涂层印模相比,寿命提高了 3 倍多^[11]。

DLC 涂层因极低的摩擦系数、自润滑性能、极高的硬度、耐磨性、耐蚀性等已经用于复合管成型模具,其使用寿命可提高 3 倍以上。此外,用于半导体封装模具,寿命提高了近 10 倍;用于光盘模具,寿命已达到 400 万次;用于空调器翻边凸模,寿命延长了 3 倍以上,冲压件数达 800 万次以上^[12-15]。

电池外壳成形凸模利用多弧离子镀膜法制备的 (Ti,Cr)N 复合涂层显微硬度比 TiN 更高,而且耐磨性与 ZrN 相当。在凸膜的寿命研究中,(Ti,Cr)N 复合涂层模具比未镀膜时的使用寿命提高了 4 倍多^[16]。

对于冲压、冲裁类模具涂层,Chen 等^[17]采用新型的斜冲击滑动试验,模拟了汽车冲压件冲压模具材料承受循环冲击和滑动力合成状态下,TiN 涂层模具的磨损。苑俊峰等^[18]利用有限元软件分析了高强钢板的冲裁过程,并从抗磨减摩角度模拟了 PVD 涂覆 MoST,GLC(Graphit-iC 类石墨涂层)及 CrMoN 减摩涂层对冷作模具钢寿命的影响,结果表明减摩涂层不同程度地减小了模具的等效应力,提高了高强度钢冲裁模具寿命。

精冲是一种高效率、高质量和高附加值的精密塑性成形工艺,可以一次冲裁获得高质量的零件,精冲模具的主要失效形式为模具的过量磨损、断裂和塑性变形。TiN 和 TiAlN 涂层因良好的耐磨、耐腐蚀热稳定性广泛应用于精冲行业。精冲模具表面镀 TiN 涂

层后会在模具基体表面产生一定的压应力以抑制裂纹的产生,从而减缓模具的失效速度。与 TiN 相比,TiAlN 涂层更适用于精冲模具的表面保护^[19]。

2.2 在挤压模具上的应用

高温下挤压热坯料和模具表面的接触会产生非常强的粘附现象从而导致高摩擦力^[20]。在 X40CrMoV5-1 热作工具钢基体上沉积的超硬、耐磨性强的 CrAlSiN 和 CrN 涂层均能提高挤压模具寿命,试验中 CrN 涂层模具的磨损量最低^[21]。正挤压凹模由于工作条件恶劣,常出现开裂、拉伤、磨损等早期失效的情况,大大缩短了模具的使用寿命,而通过 PVD 技术在凹模镶件上分别沉积 TiN,CrN,TiAlN 涂层后,其寿命提高了 3~5 倍,且 TiAlN 涂层最为理想。涂层后镶件挤出的制件表面质量很高,粗糙度为 0.4 μm ^[22]。

2.3 在拉拔模具上的应用

钢丝拉拔模具的主要磨损机理是粘着和磨料磨损。表面失效可能会因循环往复接触和载荷波动而随时发生。Maria Nilsson 等^[23]采用气相沉积涂层以替代硬质合金应用到钢丝拉拔模具中,试验在轴承钢基体上制备了 CVD TiC 和 PVD (Ti,Al)N,CrN,CrC/C 涂层。经磨损试验得出 PVD CrC/C 涂层的摩擦系数最低,能大幅提升钢丝拉拔模具的表面摩擦性能。

2.4 在塑料模具上的应用

塑料模具在使用过程中寿命往往较短,特别是模具表面的尺寸精度和表面粗糙度破坏较快,此时最好的解决办法就是进行表面涂层。对注塑类模具来说,加工没有腐蚀性的塑料,模具表面可以选择 TiN 等涂层,有腐蚀性的塑料时只能选择 CrN 涂层^[24]。

Gallo 等^[25]在铝注塑模具表面离子渗氮后进行 PVD CrN 涂层处理,在使用浸硫研磨石抛光后,硫夹杂物渗入到 CrN 涂层导致模具涂层剥落、基体材料的暴露和生成裂纹。硬玻璃纤维强化的聚丙烯注塑模具材料通常会遭受严重的磨损。也有研究人员采用非平衡磁控溅射技术制备纳米结构的 TiB₂ 单层涂层,提高了注塑模具的耐磨损性能^[26]。

Kirsten Bobzin 等^[27]在注塑模具镶件经激光烧蚀以获得不同尺寸的微结构后,进行磁控溅射离子镀 CrAlN 富铝和低铝含量的涂层,发现涂层能降低粗糙度,且与未涂层模具镶件相比,PVD 涂层能降低表面

粘着。特别是低铝涂层 $\text{Cr}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{N}$ 在没有外部感应加热的情况下,每一个镶件模具在成功制造 200 多个零件后没有任何脱模和粘着问题。

由 Cr12MoV 冷作模具钢制作的经热处理后的 PVC 塑料注射成型模具上,进行 PVD Ti/TiN 涂层后,模具的耐磨性、耐盐雾腐蚀性能提高了,在脱模时不粘模,塑件表面光滑、质量好,使用寿命比原来提高 2~4 倍^[28-29]。医学用塑管的聚乙烯帽盖注入模具采用耐磨性高的 Cr_xN_y 涂层,涂层后模具不发生内燃影响,使清理工作可在每六百万次注塑后进行,由于模具涂层与塑料之间的化学亲和性小,每件作业平均耗时由 17 s 减至 10 s^[30]。

2.5 在铝合金压铸模具上的应用

铝合金压铸模具易出现铝合金对模具材料产生熔融腐蚀,进而造成模具表面龟裂。高温下 Al 原子会渗透到模具表层,改变模具钢的元素构成,使钢的耐疲劳性能大大降低;采用 PVD 涂层后,不仅能耐 700 °C 的高温,而且化学惰性高可在模具表面形成非常致密的保护层,很好地防止 Al 原子渗透到基体^[24]。

某公司研制的 PVD 涂层 TiBN,在 750 °C 下将其用于压铸执行机构件、转向器构件的铝合金热压铸模具,涂层因耐高温、耐磨损和低粘结特性使模具寿命提高了 3 倍^[30]。为提高铝合金压铸模具的寿命,Tanaka 等^[31]使用离子镀技术制备了 CrN 多层膜和 TiAlN 多层膜。经腐蚀试验发现,CrN 和 TiAlN 涂层能显著抑制模具材料的腐蚀。汽车零件中心销压铸试验也表明涂覆 CrN 或 TiAlN 多层膜后,去除工件表面铝合金残留量的维护操作的次数比经盐浴扩散法后需维护的次数要少得多。除多层膜外,也有纳米复合涂层的研究,如在 H13 钢表面制备了 TiSiCN, TiSiCON, TiAlSiCN, TiAlSiCON 4 种纳米复合涂层,研究发现 TiAl 基纳米复合涂层高温下表面没有明显的氧化皮,特别是 TiAlSiCON 涂层最佳。TiAl 基纳米复合涂层具有很好的耐高温性能和低的表面能,有助于铸铝模具的脱模,可提高模具的热疲劳抗力,延长服役寿命^[32-33]。

2.6 在锻造模具上的应用

热锻模需要有高的热稳定性,高温硬度、强度和耐磨性等。锻模的失效形式主要是机械负荷和热负荷作用,长期使用导致缓慢塑性变形、磨损和疲劳裂

纹生成。在热锻造模具表面沉积 PVD (Ti, Al) N/ γ - Al_2O_3 涂层后,亚稳相的 Al 和 γ 相具有高强度和韧性能确保模具有持久的寿命,成型试验发现涂层模具相比未涂层模具在经 1000 次成型周期后依然具有很好的耐磨损性能^[34]。此外,在锻造模具上沉积 PVD DLC, AlCrN, TiAlN 和 TiCN 涂层后相比未涂层模具具有更高的寿命和表面抗刮伤性能^[35]。

2.7 在合成橡胶模具上的应用

橡胶模具表面易变形,采用 45 钢制成的模具表面更容易被划伤,大批量生产时模具的使用寿命会明显下降,为此需增加模具表面的硬度和耐磨性。O 型橡皮圈模具采用 Cr_xN_y 涂层后,取代电镀硬铬后清理工作可在每十万件后进行,停滞工时减少了 5 倍^[30]。

2.8 在精密玻璃透镜模具上的应用

在精密玻璃透镜成型模具中,为防止热玻璃和模具间的粘着或发生化学反应并导致模具的磨损,采用 PVD 制备的以 Cr 为中间结合层代替工业生产用的 Ni 层以提高膜基结合力的贵金属 PtIr 涂层后,涂层即使在高冲击载荷下也展示出优异的耐久性。高温测试也发现 20 nm 的 Cr 层和 300 nm Pt40Ir60 涂层既保证了良好的复合结合,又对玻璃行为影响最小^[36-37]。

3 结语

PVD 技术以其良好的性能广泛应用于各类模具中,模具的耐磨性、寿命和产品质量等得到了大幅提升,取得了巨大的经济效益。为了应对全球模具高品质、低价格、长寿命的竞争要求,需要将 PVD 涂层技术在模具上的应用向多元化、复合化、纳米化发展,深入研究涂层的性能、结合力、新工艺和新材料。

参考文献

- [1] 张清辉. 模具材料及表面处理[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
ZHANG Qing-hui. Mold Materials and Surface Treatment [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [2] 王彦峰, 李争显, 杜继红, 等. PVD 技术在镁合金表面防护领域的应用及研究进展[J]. 表面技术, 2010, 39 (4): 94—98.
WANG Yan-feng, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Appli-

- cation and Development Trend of PVD on the Field of Magnesium Alloy Surface Protection [J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 94—98.
- [3] 曹美蓉, 魏仕勇, 蒋雷, 等. PVD 涂层技术在冲压/成型模具中的应用及实例 [J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(3): 34—38.
- CAO Mei-rong, WEI Shi-yong, JIANG Lei, et al. Applications and Examples of PVD Coating Technology in the Stamping/Forming Dies [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(3): 34—38.
- [4] 张而耕, 吴雁. 现代 PVD 表面工程技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- ZHANG Er-geng, WU Yan. Modern PVD Surface Engineering Technology and Application [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [5] PANJAN P, CEKADA M, PANJAN M, et al. Growth Defects in PVD Hard Coatings [J]. Vacuum, 2009, 84(1): 209—214.
- [6] PANJAN P, GSELMAN P, KEK-MERL D, et al. Growth Defect Density in PVD Hard Coatings Prepared by Different Deposition Techniques [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 237: 349—356.
- [7] 李鹏, 黄美东, 佟莉娜, 等. 磁控溅射与电弧离子镀制备 TiN 薄膜的比较 [J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 32—37.
- LI Peng, HUANG Mei-dong, TONG Li-na, et al. Comparison of TiN Films Prepared by Magnetron Sputtering and Arc Ion Plating [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2011, 31(2): 32—37.
- [8] 邱家稳, 赵栋才. 电弧离子镀技术及其在硬质薄膜方面的应用 [J]. 表面技术, 2012, 41(2): 93—100.
- QIU Jia-wen, ZHAO Dong-cai. A Review of Vacuum Arc Deposition and Its Application in Hardness Films [J]. Surface Technology, 2012, 41(2): 93—100.
- [9] WEN S, JUN W, ZHEN W, et al. Surface Treatment of Cr12MoV Steel Towards Long-life Cold-work Dies [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2004, 25(5): 837—840.
- [10] 邵丽健, 张敏, 吴晓春. 磁控溅射 CrTiN 涂层和 PECVD DLC 涂层在银币压印模上的应用 [J]. 热处理, 2008, 23(5): 45—50.
- SHAO Li-jian, ZHANG Min, WU Xiao-chun. Application of Magnetron Sputtered PVD CrTiN Coating and PECVD DLC Coating to Coining Die for Silver Proof Coin [J]. Heat Treatment, 2008, 23(5): 45—50.
- [11] 邓三. 硬币纪念章压印模具的研究与设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- DENG San. Research and Design In The Stamping Mould of Coin and Medal [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [12] 侯惠君, 代明江, 林松盛, 等. 表面处理技术在模具上的应用 [J]. 材料研究与应用, 2013, 6(4): 219—223.
- HOU Hui-jun, DAI Ming-jiang, LIN Song-sheng, et al. Application of Surface Treatment Technology in the Mold [J]. Materials Research and Application, 2013, 6(4): 219—223.
- [13] 李庆生. DLC 表面涂覆在模具中的应用 [J]. 模具工业, 2010, 35(4): 74—76.
- LI Qing-sheng. Application of DLC Coating in the Forming Parts of Mould [J]. Mould Industry, 2010, 35(4): 74—76.
- [14] 代明江, 林松盛, 侯惠君, 等. 类金刚石膜的性能及其在模具上的应用 [J]. 模具制造, 2005(9): 54—56.
- DAI Ming-jiang, LIN Song-sheng, HOU Hui-jun, et al. The Properties of Diamond-like Carbon Membrane and Its Application in Die & Mold [J]. Mold Manufacture, 2005(9): 54—56.
- [15] 张碧云, 曲燕青, 谢红梅, 等. 类金刚石膜的制备技术及应用领域概况 [J]. 表面技术, 2007, 36(3): 70—73.
- ZHANG Bi-yun, QU Yan-qing, XIE Hong-mei, et al. Review of Preparation and Application of Diamond-like Carbon Films [J]. Surface Technology, 2007, 36(3): 70—73.
- [16] 谢光荣, 曾鹏. 多弧离子镀 (Ti, Cr) N 薄膜在电池外壳成形模具中的应用 [J]. 模具工业, 2010, 36(10): 69—71.
- XIE Guang-rong, ZENG Peng. Deposition of (Ti, Cr) N Film Through Multi-arc Ion Plating on the Forming Punch For Battery Shell [J]. Mould Industry, 2010, 36(10): 69—71.
- [17] Chen Y, Nie X. Study on Fatigue and Wear Behaviors of a TiN Coating using an Inclined Impact-sliding Test [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(7): 1977—1982.
- [18] 苑俊峰, 施雯, 朱志勇, 等. 减摩涂层对高强度钢板冷冲裁过程影响的有限元模拟 [J]. 上海金属, 2013(1): 50—53.
- YUAN Jun-feng, SHI Wen, ZHU Zhi-yong, et al. Simulation to the Effect of Lubrication Coatings on Blanking Processes in High Strength Steel [J]. Shanghai Metals, 2013(1): 50—53.
- [19] 王海洋. 模具材料及表面涂层对精冲模具寿命的影响研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- WANG Hai-yang. Study of Fine Blanking Die Life under the Influence of Tool Steel and Surface Coatings [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [20] PELLIZZARI M. High Temperature Wear and Friction Behaviour of Nitrided, PVD-duplex and CVD Coated Tool Steel against 6082 Al alloy [J]. Wear, 2011, 271(9): 2089—2099.

- [21] LUKASZKOWICZ K, DOBRZANSKI L A, KOKOT G, et al. Characterization and Properties of PVD Coatings Applied to Extrusion Dies[J]. *Vacuum*, 2012, 86(12): 2082—2088.
- [22] 赵正光. 利用涂层处理提高冷挤压凹模的使用寿命[J]. *模具制造*, 2013(10): 91—93.
- ZHAO Zheng-guang. Using the Coating Processing to Improve the Service Life of Cold Extruding Matrix[J]. *Mold Manufacture*, 2013(10): 91—93.
- [23] NILSSON M, OLSSON M. Tribological Testing of Some Potential PVD and CVD Coatings for Steel Wire Drawing Dies[J]. *Wear*, 2011, 273(1): 55—59.
- [24] 张而耕, 孔令超. 模具 PVD 涂层值得关注的几个问题[J]. *表面技术*, 2010, 39(4): 110—112.
- ZHANG Er-geng, KONG Ling-chao. Several Notable Problems from Mould with PVD Coating[J]. *Surface Technology*, 2010, 39(4): 110—112.
- [25] CORUJEIRA G S, FIGUEROA C A, BAUMVOL J R. Premature Thermal Fatigue Failure of Aluminium Injection Dies with Duplex Surface Treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(29): 7764—7769.
- [26] MARTINHO R P, SILVA F J G, ALEXANDRE R J D, et al. TiB₂ Nanostructured Coating for GFRP Injection Moulds[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2011, 11(6): 5374—5382.
- [27] BOBZIN K, BAGCIVAN N, GILLNER A, et al. Injection Molding of Products with Functional Surfaces by Microstructured, PVD Coated Injection Molds[J]. *Production Engineering*, 2011, 5(4): 415—422.
- [28] 曾霞文, 谭彦显, 陈超, 等. 纳米 TiN 涂层改性技术在塑料模具中的研究与应用[J]. *机电工程技术*, 2009(10): 94—96.
- ZENG Xia-wen, TAN Yan-xian, CHEN Chao, et al. Research and Application of Nano TiN Coating in the Plastic Mould[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2009(10): 94—96.
- [29] JACQUET P, GOŁBCZAK M, LOURDIN P. Experimental Characterizations of Non-seizing Solutions for Plastic Moulding Tools[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 261: 824—829.
- [30] 高军. PVD/PECVD 技术在模具工业上的应用[J]. *模具工程*, 2005(4): 55—58.
- GAO Jun. Application of PVD/PECVD Technology in the Die & Mould Industry[J]. *Mould & Die Project*, 2005(4): 55—58.
- [31] TANAKA S, TAKAGI M, MANO T. Development of Advanced Coating Techniques for Highly-durable Casting Dies[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 417(1): 12—32.
- [32] 李灿民, 魏荣华. 等离子增强磁控溅射沉积 Ti(Al) 基纳米复合涂层在铸铝模具上的应用[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(1): 1—7.
- LI Can-min, WEI Rong-hua. Ti(Al) Based Nanocomposite Coating Produced by Plasma Enhanced Magnetron Sputtering Applied in Aluminum Die Casting[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(1): 1—7.
- [33] GAUTIER G, FAGA M, TEBALDO V, et al. Study of Wear Phenomena of Coatings for Die-casting[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 302: 520—524.
- [34] BOBZIN K, HIRT G, SPRINGORUM F, et al. Hot Forging of C45 Using PVD (Ti, Al) N/γ-Al₂O₃ Coated Dies[J]. *Steel Research International*, 2010, 81(7): 603—609.
- [35] LAWANWONG K. An Investigation of Thin Film Coating for Evaluation Friction Coefficient Using Ring Compression Test[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 152: 1281—1286.
- [36] BOBZIN K, KLOCKE F, BAGCIVAN N, et al. Impact Behaviour of PtIr-based Coatings with Different Interlayers for Glass Lens Moulding[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 438: 57—64.
- [37] BOBZIN K, BAGCIVAN N, EWERING M, et al. Influence of Interlayer Thickness of a Thin Noble Metal MSIP-PVD Coating on Compound and System Properties for Glass Lens Moulding[J]. *Production Engineering*, 2012, 6(3): 311—318.

(上接第 108 页)

- [15] 张进, 程小伟, 薛屹. Ti(CN)/TiC/Al₂O₃/TiN 多层涂层的结构和界面结合力研究[J]. *真空*, 2011, 48(6): 25—28.
- ZHANG Jin, CHENG Xiao-wei, XUE Qi. Microstructure and Interfacial Adhesion of Ti(CN)/TiC/Al₂O₃/TiN Multilayer Ceramic Coatings[J]. *Vacuum*, 2011, 48(6): 25—28.
- [16] 罗建军, 孙志国, 马麟, 等. 等离子体基离子注入沉积 DLC 膜的划擦行为[J]. *金属热处理*, 2010(8): 27—30.
- LUO Jian-jun, SUN Zhi-guo, MA Lin, et al. Scratch Behavior of DLC Film Deposited by Plasma Based Ion Implantation & Deposition[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2010(8): 27—30.
- [17] 单军勇, 宋晓燕. ESS 试验温度循环次数确定方法研究[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(4): 13—15.
- SHAN Jun-yong, SONG Xiao-yan. Determination Method of ESS Test Temperature Cycle Index[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(4): 13—15.