TiN 涂层在模具上的应用

华中科技大学模具技术国家重点实验室 （湖北武汉 430074） 胡树兵
东风汽车公司 （湖北十堰 442001） 张 明 黎美恒 胡家斌

一、引言

离子镀 TiN 技术是近年来发展很快的 PVD 表面强化处理技术的一种，离子镀 TiN 是把金属蒸发源作为阴极与作为阳极的真空室产生弧光放电，使阴极金属靶材钛蒸发并离子化，再与室内的离子化氮结合成 TiN，沉积在加有负偏压的工作表面。离子镀沉积温度较低，因此离子镀成为 PVD 中发展最快、最有前途的技术之一。TiN 涂层首先成功地用于高速钢刀具，它引起了高速钢刀具的一场革命，国外在近 20 年来，TiN 涂层刀具至少占齿轮加工刀具市场的 70%。由于模具的工作条件和影响因素远比刀具复杂，致使 TiN 涂层在模具上的应用受到很大制约，特别是国内对 TiN 涂层模具的应用报道还很少。有些资料报道，TiN 涂层对静载荷有效，但对动载荷，特别是冲击载荷就没有那么有效，这无疑将阻碍 TiN 涂层在模具上的应用。作者在近几年内，选择以磨损失效为主的冷作模具和热作模具，进行了 TiN 涂层应用的工艺试验，取得了明显成效。本文以螺母冲孔冲头、活塞销冷挤模具和气阀热锻模为例，进行多弧离子镀 TiN 涂层处理，并对使用寿命、失效形式失效原因、经济效益等方面进行了分析。

二、试验材料及方法

1. 冷作模具的预处理工艺

本试验选用了两种冷作模具为应用对象。一种是 M16 六角螺母冲孔冲模（上模），冲模材料为 W6Mo5Cr4V2 钢，被冲螺母材料多采用铆螺钢 ML20、ML35、ML20Cr、ML40Cr 等。冲孔冲模主要是将预成形后的中间金属层（图 1a 中的阴影部分）冲掉。冲头形状及尺寸如图 1b 所示，冲头可两端使用。

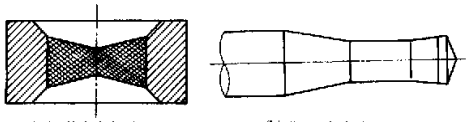

图 1

另一冷作模具为活塞销冷挤冲模，模具材料同为 W6Mo5Cr4V2，汽车发动机所用的各种活塞销材料主要为 20Cr、20CrMnTi 等低碳合金钢。活塞销采用的是复合挤压技术。试验所用的模具冲头（如图 2d 所示）主要任务是加工内孔（如图 2b 所示），并将变形后中间所留的金属层（俗称连皮）冲去（如图 2c 所示）。在加工过程中，模具（冲头）在高载荷的作用下，促使被加工材料金属流动形成内孔，这一过程必然导致模具表面承受相当大的摩擦力，这就要求模具（冲头）既具有高的强韧性（否则模具易产生脆断或塑性变形失效）又具备高的耐磨性（否则模具极易磨损，导致零件超差）。性能要求的矛盾与恶劣的服役条件，使得冲头在未采用

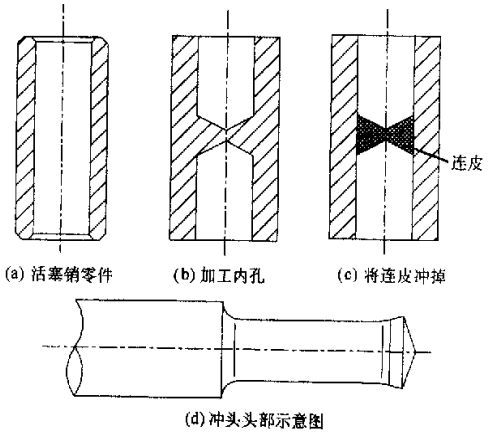

图 2

涂层处理前加工各种活塞销模具的寿命只有3000件左右。

两种模具加工工艺流程为：下料—退火—车削—热处理—预磨，退火在箱式炉中进行，830～850℃保温4～6h，然后在740～760℃等温3～4h，随炉冷至500℃后出炉空冷，硬度要求小于255HB。热处理工艺：850℃预热6min，在1220～1240℃奥氏体化3～3.5min，然后冷至500～600℃分级淬火，再经过580～600℃回火三次，每次1.5h，模具硬度为62～64HRC，组织为回火马氏体+粒状碳化物+少量残余奥氏体。

2. 热作模具的预处理工艺

选用进气阀热锻模作为考核对象，热锻模材料为3Cr2W8V，进气阀材料为45Mn2。模具形状如图3所示，底座外径为85.8mm，上平台外径为72.7mm，型腔直径为39.1mm，型腔内孔直径为8.8mm，模具高40.5mm，模具型腔表面粗糙度为 R_a0.6um。模具经800℃×7h退火，硬度为207～255HB。最终热处理工艺为：830℃预热28min，1100℃盐浴加热奥氏体化15min，然后油冷至150～200℃空冷，而后590℃回火2次，每次1h。组织为马氏体+粒状碳化物+少量残余奥氏体，硬度为50HRC。

图3 气门阀模具

图4 TiN涂层截面组织

3. TiN涂层工艺

镀前必须经超声波和氟里昂浸清洗，涂层处理设备为VAC—TEC公司制造的ATC－500型多弧离子镀设备，工艺如下：

抽真空→系统加热（充入氩气，辉光放电）→离子轰击→充入氮气、涂层（工作电流约100A）→降温出炉。

经红外线辐射仪测量偏压温度约450℃，涂完后的工件为亮金黄色，测得涂层厚度2.5～3μm（见图4），从截面图可见，涂层与基体结合很好，用划痕法测得临界载荷 L_c 为40～45N。

4. 应用试验

应用试验均在东风汽车公司内进行。螺母冲孔冲模在东风公司M16S2螺母冷锻机上使用，螺母加工过程为：棒料—切断—锻六方—冲孔，工作频率为120件/min。活塞销冲模的工作频率为40件/min。现场严格记录每个冲模的使用时间。

气门阀热锻模在锻造厂使用，每副热锻模由3个凹模和1个上模组成，3个凹模依次轮换工作，以便散热、冷却和润滑，并易于脱模。红热工件在凹模上停留34s，并记录每次换模的时间和锻锻的工件数量。

三、试验结果及分析

1. 在冷作模具上的应用寿命及效益分析

表1所示为TiN涂层和未经表面处理的两种冷却模具上的使用寿命对比。从表1看出螺母冲孔模，未涂层模具仅有5000件（次）的寿命，而经过TiN处理，使用寿命达到25000次，寿命提高了4倍，效果是非常显著的。

表1 TiN涂层冷作模具的使用寿命

涂层类型	未处理	TiN涂层
螺母冲孔模	5000	25000
活塞销冷挤模	3000	8000

对于活塞销冷挤模具，TiN涂层模具比未涂层模具寿命提高约1.7倍。

从失效形式看，螺母冲孔模关键在于冲头刃口部位在冲孔过程中被剧烈磨损，导致刃口尺寸变小，所冲螺母内孔径变小超限而报废。经过复合涂层处理，刃口抗磨能力显著增强。由图5比较可知，未涂层模具刃口（图5上）磨损带宽，痕迹十

分粗大。而 TiN 涂层模具刃口（图 5 下）失效时，磨损带较窄，特别是磨痕明显浅。这表明 TiN 涂层与基体结合力高，使表面显著强化，同时由于 TiN 涂层的硬度 1378HV0.1 远远高于基体的硬度，使其耐磨性大大提高，从而大大提高了模具的使用寿命。

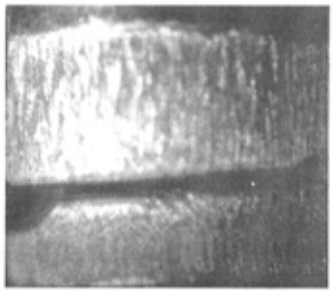

图 5　螺母冲孔模刃口部位磨损
（上）未涂层模层　（下）TiN 涂层模具

经济效益分析：以东风公司为例，原来螺母冲孔冲头每根平均冲孔 10000 次（两端寿命），制造成本按 2000 年价格每根 60 元，该厂全年消耗该种冲头 3000 根，共计 18 万元。如采用 TiN 复合涂层模具，每根寿命 50000，附加涂层价为 20 元，只需要 600 根冲头，共计 48000 元，即全年该冲头消耗费仅为原来的 26.7%，还可节省原材料和人力，具有显著的经济效益。对活塞销冲头也是如此。因而新工艺具有很好的应用前景。图 6 所示为我们近些年在现生产中应用的 TiN 涂层各种模具，年创造效益 100 万元以上。

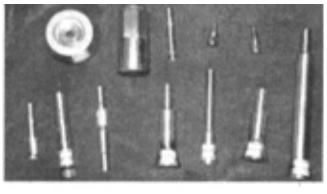

图 6　部分 TiN 涂层模具

2. 在热作模具上的应用寿命及效益分析

表 2 为 TiN 在进气阀热镦模上的使用寿命对比情况。这里寿命是指一副下模（3 个）的总寿命。

表 2　TiN 层热镦模和未处理模具的使用寿命

涂层类型	未涂层	TiN
应用寿命	4500	21000

从表 2 看出，TiN 涂层模具比原来提高寿命 3.67 倍；这表明这两种新型涂层在热作模具上也能显著提高寿命。

未涂层气门阀热镦模失效有 4 种形式：①热磨损失效，型腔圆角部位在工作中受红热工件的塑性流动和挤压而发生严重热磨损，经两次修模后，模具型腔圆角处尺寸磨损超差而失效。②粘模失效，模具型腔表面因热疲劳、氧化和磨损变得粗糙发生粘模，其实质是热疲劳和氧化。③型腔边缘局部剥落，致使气门阀平台边缘产生毛刺，在剪切飞边时因工件放不平，而使工件报废。④还有一种失效形式是胀裂。这后三种均属非正常失效，一旦出现，必须更换模具，故寿命常常不到 2500 件。经统计，非正常失效比例高达 52%。

而 TiN 涂层模具则消除了非正常的失效形式，均为正常热磨损失效。因而大大提高了使用寿命。试验中从未涂层模的截面组织图观察到，工作表面很宽的区域内出现了变形流线，表明工作时因热效应，基体严重软化而引起塑性流动，在模具次表层出现了一个软化层，而经过涂层处理，模具表面获得了一个很强的硬化层，组织细小，抗塑性变形能力提高，未见变形流线，同时消除了软化区，因而抗磨损抗变形能力增强，从而显著提高了使用寿命。在热态工作下，TiN 涂层的抗氧化性能也明显优于 3Cr2W8V 钢，一般 400℃下基体就出现了严重氧化，而 TiN 涂层在 700℃才开始明显氧化，这也是其高温磨损性能优越的一个原因。

从经济效益分析，按 2000 年的价格，每副热镦模 600 元，年消耗约 1500 副共 90 万元。采用 TiN 涂层处理，约需 320 副，年需 26 万元。费用仅为原来的 29%，经济效益是显著的。

四、结论

（1）TiN 涂层应用于螺母冲孔模，可提高寿命 4 倍；TiN 涂层应用于活塞销冷挤模，寿命可提 1.7 倍，表明 TiN 涂层在冷作模具上具有良好的应用前景。（2）TiN 涂层在气门阀热镦模上可提高寿命约 3.67 倍，总成本可降低为原来的 1/3。应用证明，TiN 涂层具有良好的抗磨能力和高温耐磨性能，可广泛应用于以磨损为主要失效形式的模具，能产生显著的经济效益。　（20030618）