

# 钢基 NiMoCrFeCo-WC 涂层螺杆承载 应力-扭矩的有限元分析

巴雅尔, 沈承金, 吉 喆, 陆柯龙

(中国矿业大学 材料与物理学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 为研究高强度塑料注射成型过程中碳化钨陶瓷涂层螺杆的承载规律, 采用 ANSYS 有限元模拟计算不同螺棱结构的碳化钨涂层螺杆承载特征, 分析钢基材对三段式碳化钨涂层螺杆承载的影响规律, 模拟碳化钨涂层螺杆在扭矩载荷作用下的应力/应变变化规律, 讨论碳化钨涂层螺杆的承载扭矩与最大应力和最大应变的对应关系, 建立碳化钨涂层螺杆临界扭矩的判定方法。结果表明: 螺杆底径最小位置的基材和碳化钨涂层均承载最大应力和最大应变, 在相同加载扭矩条件下, 螺杆底径越小, 其承载应力和承载应变越大; 分别建立由碳化钨涂层断裂强度/延伸率模拟计算碳化钨涂层螺杆临界扭矩的方法、由材料弹性模量和屈服强度模拟计算未知钢基材碳化钨涂层螺杆临界扭矩的方法, 经验证 2 种方法计算结果基本一致; 在此基础上模拟计算 Cr12Mo1V1、9Cr18MoV、CPM420V 钢基材/NiMoCrFeCo-WC 涂层螺杆的临界扭矩分别为 330.34、346.87、363.59 N·m。

**关键词:** 碳化钨陶瓷涂层螺杆; NiMoCrFeCo-WC 涂层; 有限元模拟

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)01-0166-08

高品质塑料元器件需要在塑料中添加高含量玻璃纤维、金属粉末等以增加其强度和韧性, 添加环保性阻燃剂增加其阻燃性能, 这使得塑料零件在成型过程中对螺杆和机筒造成严重的磨损和腐蚀<sup>[1-3]</sup>, 在螺杆表面构建碳化钨涂层被证明是防止螺杆在这类严酷环境下产生磨损和腐蚀的有效方法<sup>[4-15]</sup>。

碳化钨涂层螺杆在注塑机中的作用, 如图 1 所示。螺杆驱动完成固态塑料输送、熔化压缩、计量射出粘流态塑料、注入模具内形成零件的过程, 碳化钨金属陶瓷涂层螺杆在这类高强度和高环保阻燃塑料零件的成型过程中具有较好的使用效果<sup>[16-20]</sup>。为了提高碳化钨涂层螺杆使用寿命, 便于掌握碳化钨涂层螺杆的使用性能, 本研究采用有限元法<sup>[21]</sup>模拟涂层螺杆在扭矩载荷作用下, 涂层承载的应力/应变的分布状态, 探究涂层螺纹的最大受力点, 实验和计算涂层螺杆可承受的临界载荷, 该研究对碳化钨涂层螺杆的选择和应用具有重要意义。

## 1 钢基/碳化钨涂层螺杆的有限元建模和条件设计

### 1.1 螺杆及涂层模型的构建

渐变型螺杆由恒直径进料段、渐变直径混炼压缩段和恒直径计量段三段式结构构成。以直径为 26 mm 三段式结构螺杆为例, 其几何参数如表 1 所示, 螺杆的螺纹形状选用矩形截面, 如图 2 所示。采用 UG 建模软件进行建模, 抽取表面几何特征视为碳化钨涂层, 并赋予涂层厚度 0.15 mm。螺杆与涂层的界面采用 ansys workbench 中 fracture 模块的内聚力模型(CZM)来定义<sup>[22-25]</sup>。

### 1.2 网格划分

打开 UG 建模软件静态结构中的 Model 对螺杆模型进行网格的划分。螺杆的网格划分方法为四面体法, 设置网格单元为 2 mm, 考虑螺杆螺纹处有突变, 此位置存在网格畸变, 会影响计算结果准确性, 故选择螺杆螺纹处的推料面和背料面网格单元为 1.5 mm 的细网格, 整个螺杆划分 202 493 个网格, 301 439 个节点。同理对螺杆表面碳化钨涂层进行网格划分, 涂层网格的单元类型选用 Triangles, 这类三角网格没有厚度方向的尺寸, 能更直观地表现出螺杆这类突变表面上涂层的变化。网格单元为 1 mm, 螺纹处网格单元为 0.8 mm 细网格, 涂层网格为 89 555 个, 节点数为 44 843 个。螺杆网格及涂层网格如图 3 所示。

收稿日期: 2021-01-31

基金项目: 江苏省重点研发计划(BE2018061)

作者简介: 巴雅尔, 男, 1996 年生, 硕士, 中国矿业大学材料与物理学院, 江苏 徐州 221116, E-mail: ts19180045p31@cumt.edu.cn

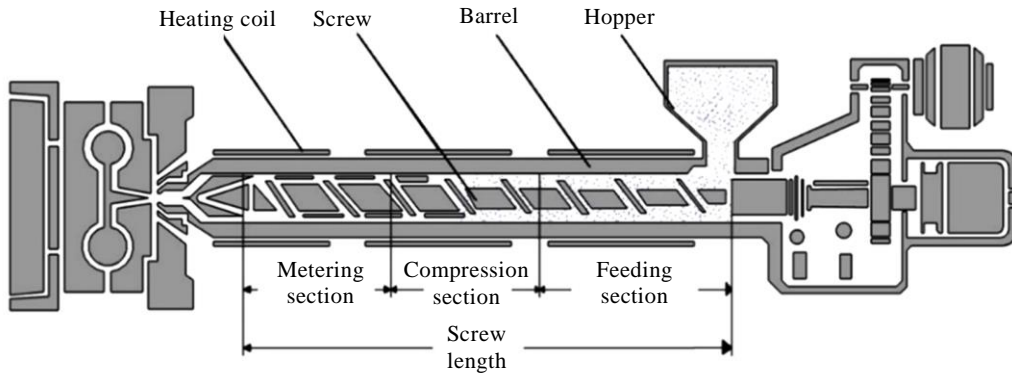


图 1 螺杆式塑化装置及塑化过程示意图

Fig.1 Schematic diagrams of screw plasticizing device and plasticizing process

表 1 直径 26 mm 三段式螺杆几何参数

Table 1 Geometric parameters of three-section screw with diameter of 26 mm (mm)

<i>S</i>	<i>L</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>e</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>
26.0	520.0	10.4	15.6	3.0	3.9	7.8

Note: *S*-screw pitch; *L*-screw length; *D1*-bottom diameter of feed section; *D2*-bottom diameter of metering section; *e*-thread width; *R1*-pushing surface tooth root radius; *R2*-backing surface tooth root radius

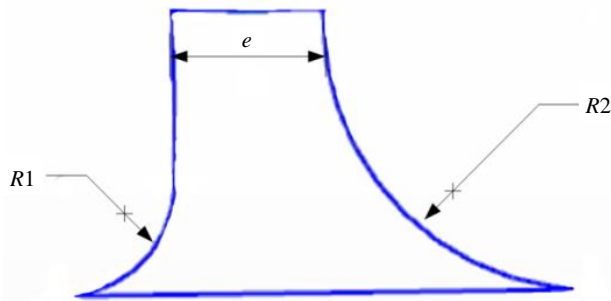


图 2 螺杆的螺纹形状

Fig.2 Screw thread shape

1.3 载荷边界条件

在注塑机的实际工况下, 螺杆的工作条件以及工况相当复杂, 因此需要对模型进行简化。先假设螺杆是处在稳定工作状态, 对于旋转类的问题一般都是将转子一端固定而另一端可自由伸缩不加以约束。由于螺杆在转动过程中受到熔融状态塑料流体的阻力作用, 因此需要对螺杆添加扭矩。理论上螺杆的螺棱面应该和机筒内壁相切, 不存在间隙, 而在实际生产中, 加工的精度并不能做到理想情况, 该间隙称为螺顶间隙, 在涂层最外侧的表面添加圆柱面约束, 仅固定轴

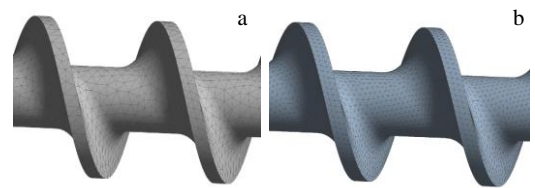


图 3 螺杆网格和涂层网格示意图

Fig.3 Schematic diagrams of screw grid (a) and coated grid (b)

向尺寸, 而不对径向切向进行约束。

2 实验结果

2.1 加载条件下涂层螺杆的应力分布

螺杆采用钢基体+表面碳化钨金属陶瓷涂层的结构, 钢基材料分别为 9Cr18MoV、Cr12Mo1V1、17-4PH 和 CPM420V 4 种, 将基体材料的拉伸曲线进行分析得到的力学性能, 如表 2 所示, 碳化钨涂层的成分为 NiMoCrFeCo-WC, 将 NiMoCrFeCo-WC 粉末喷涂制成 WC 板材, 线切割后进行拉伸试验, 测得该 WC 涂层的弹性模量为 2429 MPa, 断裂强度为 28.4 MPa, 极限延伸率为 2.26%。

9Cr18MoV 钢螺杆外径为 26 mm, 对比模拟研究如下 3 种结构螺杆及其碳化钨涂层的受力状况, 分别为等底径 10.4 mm 螺杆 A、等底径 15.6 mm 螺杆 B 和进料段底径 10.4 mm、计量段底径 15.6 mm 的三段式螺杆 C。设置螺杆出料端约束, 并对进料端施加 100 N m 的扭矩, 用 Ansys 有限元模拟螺杆基材和涂层的应力变化, 如图 4 所示。

螺杆 A 和 B 为等底径螺杆, 螺杆固定约束处的应力最大, 螺杆本体沿轴线方向的应力大小不存在较大的偏差。在渐变式螺杆 C 组应力变化云图中, 螺杆所受最大应力为 527.13 MPa, 涂层所受最大应力为

表 2 螺杆基体钢材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of screw base steels

Base steel	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Tangent modulus/MPa
9Cr18MoV	1533	1973	210	13800
17-4PH	1000	1070	190	2700
Cr12Mo1V1	1670	3265	200	61350
CPM420V	1778	2443	220	25580

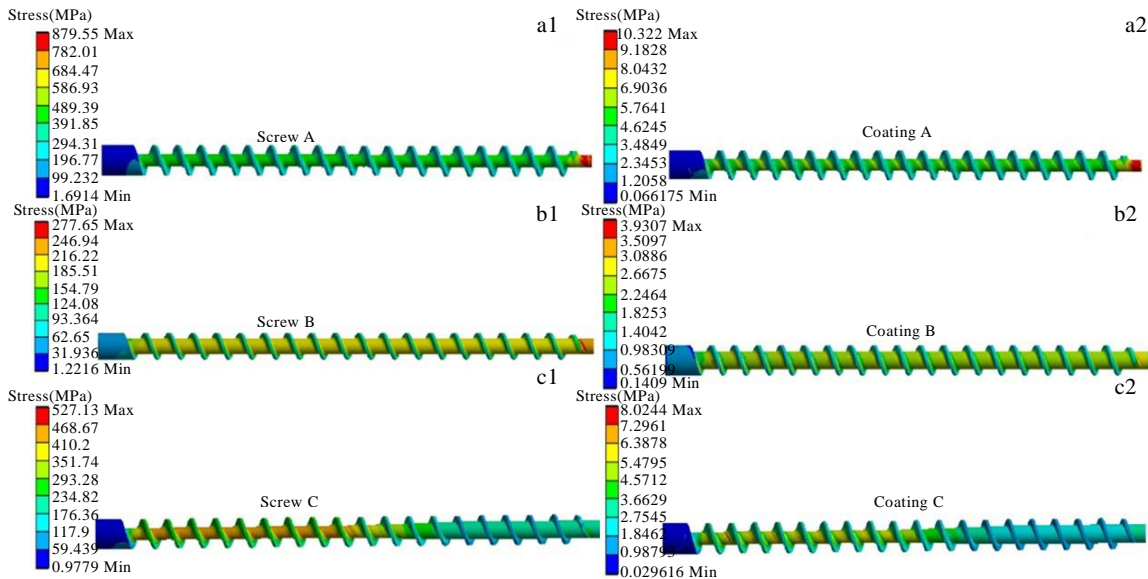


图 4 恒定扭矩下不同结构螺杆及涂层的应力云图

Fig.4 Stress nephograms of screw and coating of different structures under constant torque: screw stress (a1, b1) and coating stress of screw (a2, b2) with equal bottom diameter of 10.4 mm (a1, a2) and 15.6 mm (b1, b2); three-section screw stress (c1) and coating stress (c2)

8.20 MPa，均分布在底径最小的进料段。这说明螺杆底径越小，所受的应力值越大，越容易屈服变形，涂层也最容易开裂和脱落。

图 5a 是三段式螺杆相邻螺纹间的应力变化云图。螺杆螺槽处所受应力明显大于螺纹顶处，螺杆底径中部应力 450 MPa、逐渐减小至螺纹顶部应力 240 MPa。从图 5b~5d 可以看出，在推料面与螺槽交界处的应力为 7.6 MPa 左右，大于背料面与螺槽交界处的应力（5.8 MPa），推料面与螺槽交界处是碳化钨涂层薄弱的地方。

### 2.2 加载扭矩对涂层螺杆应力/应变的影响

对于 9Cr18MoV 钢的渐变式直径 26 mm 碳化钨涂层螺杆，在 100 N·m 扭矩的工作载荷下完全处于安全状态，继续施加扭矩到 600 N·m 时，该螺杆的应力和应变如图 6 所示。其中螺杆基材最大应力和应变分别达到 1786.1 MPa 和 0.85%，碳化钨涂层的最大应力和应变也达到 93.687 MPa 和 4.0%，这已经超过螺杆基材 9Cr18MoV 钢的屈服强度 1533 MPa、NiMoCrFeCo-WC 涂层强度 28.4 MPa 和延伸率 2.26%。此时的涂层螺杆

已经失效、碳化钨涂层出现开裂现象。

为确定螺杆和涂层在不失效的条件下可承受的最大扭矩，在有限元模拟中控制时间步来施加载荷，可得到扭矩载荷在不断增加过程中的应力/应变的变化情况。同样设置扭矩载荷为 600 N·m。

为了获得 9Cr18MoV 钢碳化钨金属陶瓷涂层螺杆的极限加载扭矩，按照上面的方法模拟计算螺杆最小底径位置的最大承载应力与对应加载扭矩的关系（如图 7a）、涂层最小底径位置最大承载应力与对应扭矩的关系（如图 7b），基于 NiMoCrFeCo-WC 碳化钨涂层的断裂强度为 28.4 MPa，从图 7 的曲线可以获得 NiMoCrFeCo-WC 涂层的最大承载扭矩为 346.08 N·m，因此 9Cr18MoV 钢的渐变式直径 26 mm 碳化钨涂层螺杆的安全加载扭矩应该在 346.08 N·m 以下。

另一方面，模拟计算螺杆最小底径位置的最大承载应变与对应加载扭矩的关系（如图 8a）、最小底径位置涂层最大承载应变与对应扭矩的关系（如图 8b），基于 NiMoCrFeCo-WC 碳化钨涂层的极限延伸率为 2.26%，可以获得涂层极限扭矩为 531.4 N·m。综合

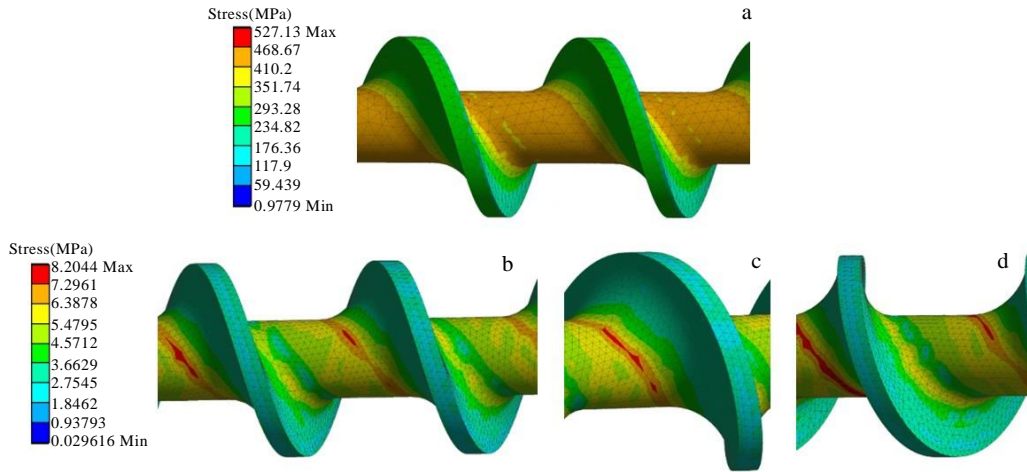


图 5 三段式螺杆螺纹间应力云图

Fig.5 Three-section screw thread stress nephograms: (a) screw adjacent thread, (b) coated adjacent thread, (c) coated pushing surface, and (d) coated backing surface

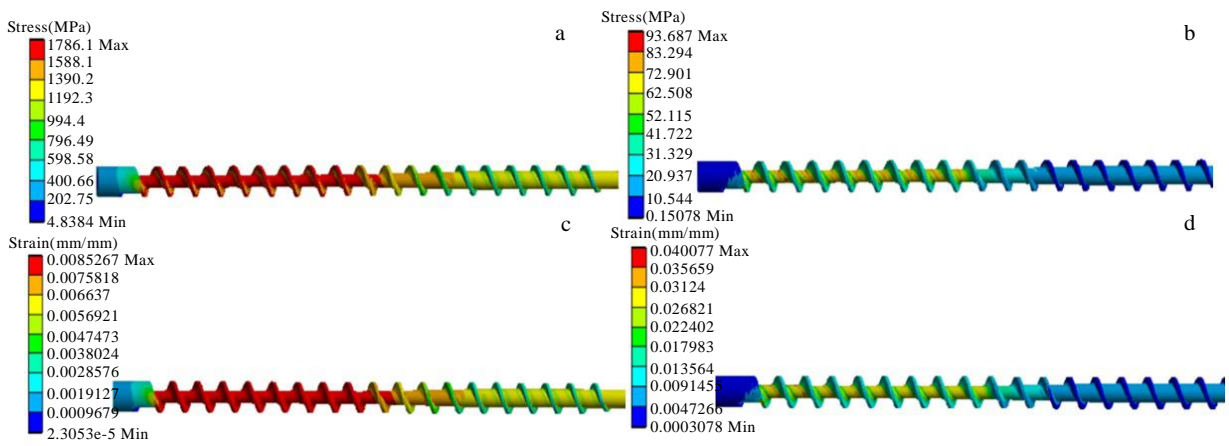


图 6 600 N m 扭矩作用下螺杆基材及碳化钨涂层的应力和应变云图

Fig.6 Stress (a, b) and strain (c, d) nephograms of screw base material (a, c) and WC coating (b, d) under torque of 600 N m

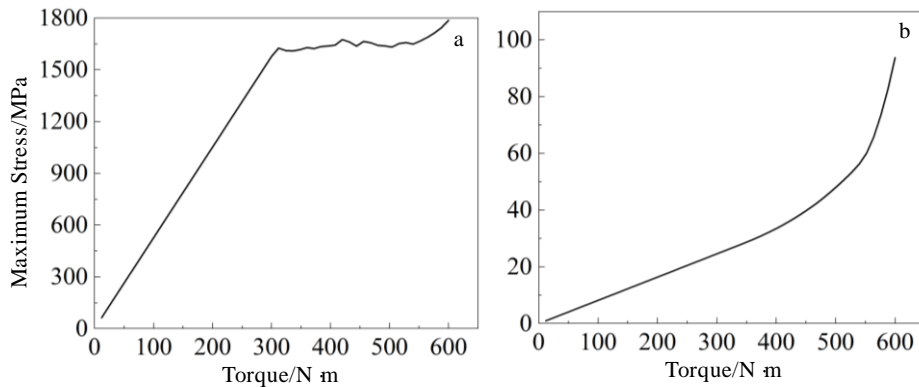


图 7 碳化钨涂层螺杆最大承载应力与扭矩的关系

Fig.7 Relationship between the maximum bearing stress and the torque of screw base material (a) and WC coating (b)

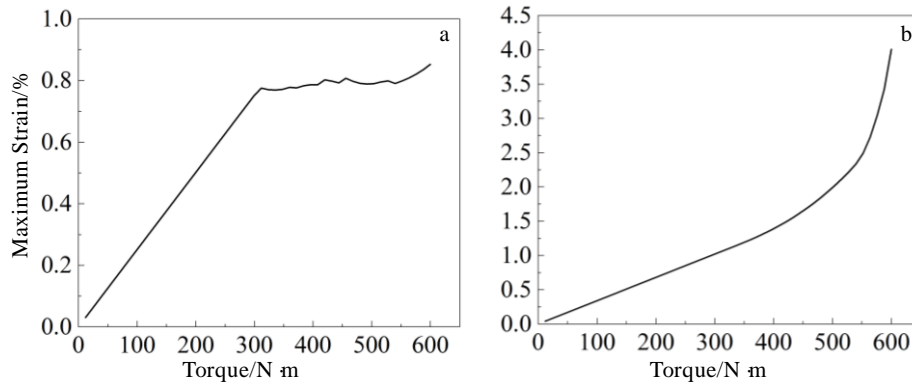


图 8 碳化钨涂层螺杆最大承载应变与扭矩的关系

Fig.8 Relationship between the maximum bearing strain and the torque of screw base material (a) and WC coating (b)

螺杆及其碳化钨涂层的承载应力和承载应变与加载扭矩的关系，直径为 26 mm、基材为 9Cr18MoV、表面喷涂 NiMoCrFeCo-WC 碳化钨涂层的螺杆在同时满足承载应力、应变条件下可允许的临界扭矩载荷为 346.1 N·m。

### 2.3 钢基材对涂层螺杆应力/应变的影响规律

#### 2.3.1 在 100 N·m 扭矩载荷作用下钢基材对涂层螺杆的影响

为了考察螺杆基材对碳化钨涂层螺杆使用性能的影响，在渐进式螺杆进料端施加 100 N·m 扭矩，模拟计算基材分别为 9Cr18MoV、Cr12Mo1V1、17-4PH 和 CPM420V 4 种 NiMoCrFeCo-WC 涂层螺杆应力、应变，相应的螺杆最小底径位置最大承载应力和应变如表 3。

在低扭矩（100 N·m）加载条件下，17-4PH、Cr12Mo1V1、9Cr18MoV 和 CPM420V 4 种 NiMoCrFeCo-WC 涂层螺杆应力、应变均处于安全工作状态下，基材钢最大承载应力均在 527 MPa 左右，完全处于线弹性阶段，但其 NiMoCrFeCo-WC 涂层承载应力分别为 9.1、8.6、8.2 和 7.8 MPa，表现为涂层的承载应力随基材弹性模量的增加而降低。

#### 2.3.2 在 600 N·m 的扭矩载荷作用下钢基材对涂层螺杆的影响

为探究在大扭矩载荷作用下螺杆基材对碳化钨涂层螺杆使用性能产生的影响，在渐进式螺杆进料端施

加 600 N·m 扭矩，模拟计算基材分别为 9Cr18MoV、17-4PH、Cr12Mo1V1 和 CPM420V 4 种 NiMoCrFeCo-WC 涂层螺杆的应力、应变，相应的螺杆最小底径位置最大承载应力和应变如表 4。

在施加 600 N·m 扭转载荷工作条件下，9Cr18MoV、Cr12Mo1V1、17-4PH 和 CPM420V 4 种 NiMoCrFeCo-WC 涂层螺杆的最小底径位置承载应力全部超过其材料自身屈服强度，螺杆基材已经产生塑性变形，同时螺杆涂层承载应力也全部大于 NiMoCrFeCo-WC 涂层的断裂强度，因此在 600 N·m 扭转载荷下的 4 种涂层螺杆均处于失效状态。接下来讨论在 4 种钢基材涂层螺杆正常工作状态下的临界加载扭矩，这对涂层螺杆安全工作具有重要意义。

#### 2.3.3 钢基碳化钨涂层螺杆临界扭矩

9Cr18MoV、Cr12Mo1V1、17-4PH 和 CPM420V 4 种螺杆基材的承载应力/应变与加载扭矩关系如图 9 所示。螺杆所承载应力在不超过其基材屈服强度时，螺杆钢基材的变化对螺杆所受应力影响甚微，图 9a 中扭矩-应力曲线几乎重叠在一起；在相同扭矩下，随着钢基材弹性模量的增大，螺杆的应变逐渐减小，随着扭矩增大，其承载应变减小幅度加大，如图 9b 扭矩-应变曲线。

9Cr18MoV、Cr12Mo1V1、17-4PH 和 CPM420V 4 种钢螺杆碳化钨涂层的承载应力和承载应变与加载扭

表 3 在 100 N·m 扭矩下螺杆基材和碳化钨涂层的最大承载应力和应变

Table 3 Maximum bearing stress and strain of the screw base materials and WC coatings under torque of 100 N·m

Base steel	Screw stress/MPa	Screw strain/%	Coating stress/MPa	Coating strain/%
17-4PH	526.29	0.277	9.06	0.376
Cr12Mo1V1	526.72	0.264	8.61	0.357
9Cr18MoV	527.13	0.252	8.20	0.339
CPM420V	527.5	0.240	7.83	0.325

表 4 在 600 N m 扭矩下螺杆基材和碳化钨涂层的最大承载应力和应变

Base steel	Screw stress/MPa	Screw strain/%	Coating stress/MPa	Coating strain/%
17-4PH	1056.5	0.565	48.035	1.99
Cr12Mo1V1	2116.9	1.06	59.288	2.46
9Cr18MoV	1786.1	0.85	93.687	4.00
CPM420V	1951.6	0.889	55.515	2.30

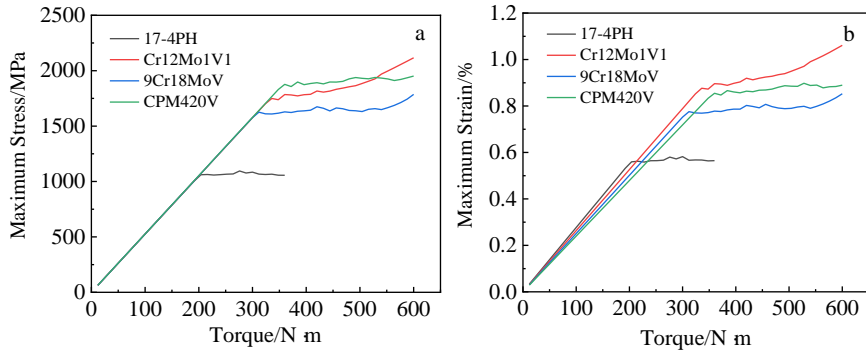


图 9 螺杆钢基材承载应力/应变与扭矩的关系

Fig.9 Relationship between the maximum bearing stress (a), strain (b) and the torque of screw base materials

矩的关系如图 10 所示, 螺杆涂层的承载应力/应变与加载扭矩的关系曲线可分为 2 个阶段, 第 1 阶段为应力/应变随扭矩的增大而线性增加, 在相同加载扭矩下, 随着材料弹性模量的增大, 涂层的应力/应变逐渐减小; 第 2 阶段为当加载扭矩增大到一定程度后, 应力/应变与扭矩关系曲线的斜率逐渐增大, 小的加载扭矩变化可引起应力/应变较大的变化, 由第 1 阶段向第 2 阶段过渡定义为分界点。

第 1 阶段中涂层应力/应变随扭矩的增加而线性增长, 在此阶段涂层的力学性能较为稳定 (表 5), 不同基材碳化钨涂层应力/应变-扭矩曲线的斜率值与其基材的弹性模量近似成反比关系, 建立应力/应变-扭矩关系曲线第 1 阶段的方程:

$$\beta_{\sigma} = \frac{k_1}{E} \tag{1}$$

$$\beta_{\epsilon} = \frac{k_2}{E} \tag{2}$$

式中,  $\beta_{\sigma}$ ,  $\beta_{\epsilon}$  分别为应力-扭矩、应变-扭矩曲线的斜率,  $E$  为基材的弹性模量,  $k_1$ 、 $k_2$  分别为对应的反比例系数。由表 5 的平均数值计算可得  $k_1$  为 17.17,  $k_2$  为 0.7139。

对比研究图 10a 和 10b, 相同钢基材螺杆承载应力、应变的分界点对应的扭矩相同。不同钢基材螺杆分界点对应的加载扭矩不同的, 各基材屈服强度与分界点对应的加载扭矩的比值近似相同, 可假设:

$$\delta_s = k_3 T \tag{3}$$

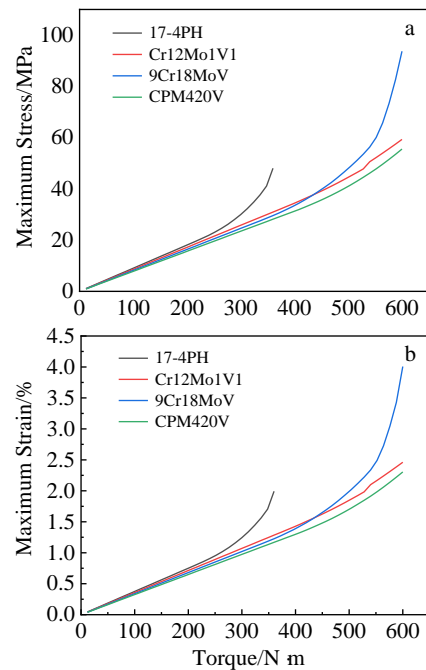


图 10 4 种钢基材的 WC 涂层承载应力/应变与扭矩的关系  
Fig.10 Relationship between the maximum bearing stress (a), strain (b) and the torque of WC coatings for four kinds of base materials

式中,  $\delta_s$  为基材屈服强度,  $T$  为分界点对应的扭矩,  $k_3$  为比例常数、取表 6 中数据的平均值 4.375。

由此式可计算出未知材料的涂层承载应力/应变

表 5 图 10 中碳化钨涂层线性段的力学性能

**Table 5 Corresponding Fig.10 mechanical properties of linear segment of tungsten carbide coatings**

Base steel	$E/\text{GPa}$	$\beta_\sigma$	$\beta_\epsilon$
17-4PH	190	0.090	0.003 75
Cr12Mo1V1	200	0.086	0.003 57
9Cr18MoV	210	0.082	0.003 40
CPM420V	2200	0.078	0.003 25

Note:  $E$ -elastic modulus;  $\beta_\sigma$ -slope of stress-torque curve;  $\beta_\epsilon$ -slope of strain-torque curve

与扭矩关系曲线的分界点对应的扭矩值。发现基材的屈服强度越大，分界点对应的扭矩载荷越大。

依据式 (1) 和 (2)，由基材的弹性模量求得应力/应变-扭矩曲线的斜率，依据式 (3) 由基材的屈服强度得到分界点对应的扭矩值。依据 2 个参数可近似确定应力/应变-扭矩曲线第 1 阶段的方程。根据基材的弹性模量和屈服强度来计算、Cr12Mo1V1、9Cr18MoV、CPM420V 钢基材螺杆涂层的应力-扭矩曲线分界点对应的应力均大于涂层的断裂强度，故断裂强度对应的临界扭矩位于曲线的第 1 阶段，计算得到的临界扭矩分别为 330.34、346.87、363.59 N·m。

另一方面，基于涂层断裂强度为 28.4 MPa，涂层断裂时的极限应变为 2.26%，根据模拟计算图 10 分别可获得涂层螺杆最大承载扭矩，如表 7。二者计算结果基本一致。

对于上述之外的基体材料，通过其弹性模量和屈服强度，也可尝试由式(1)~(3)计算得到应力/应变-扭

表 6 螺杆基材的力学性能

**Table 6 Mechanical properties of screw base materials**

Base steel	$\delta_s/\text{MPa}$	$T/\text{N}\cdot\text{m}$	$k_3$
17-4PH	1000	228	4.386
9Cr18MoV	1533	348	4.405
Cr12Mo1V1	1670	384	4.349
CPM420V	1778	408	4.358

Note:  $\delta_s$ -yield strength;  $T$ -torque load corresponding to the dividing point;  $k_3$ -ratio of  $\delta_s$  to  $T$

表 7 涂层强度法判定临界扭矩

**Table 7 Coating strength method to determine the critical torque**

Base steel	Elastic modulus/GPa	Yield strength/MPa	$T_1/\text{N}\cdot\text{m}$	$T_2/\text{N}\cdot\text{m}$
17-4PH	190	1000	289.10	371.07
Cr12Mo1V1	200	1670	329.86	566.64
9Cr18MoV	210	1533	346.08	531.35
CPM420V	220	1778	362.61	592.90

Note:  $T_1$ -critical torque to achieve coating fracture strength;

$T_2$ -critical torque to achieve coating elongation

矩曲线第 1 阶段的方程，若涂层的断裂强度在曲线第 1 阶段的范围内，则可以依据涂层的断裂强度得到对应的临界扭矩。

本研究对注塑机螺杆承受扭转载荷的模拟方法参考目前较为成熟的旋转输送机机械模拟方法，与实际生产中的规律相符，模拟计算结果与实际生产中螺杆表面应力/应变分布的趋势相同。

为验证计算结果，选用基材材料 CPM9V 的涂层螺杆进行模拟，其弹性模量为 221 GPa，屈服强度为 1700 MPa，由式(1)和式(3)计算临界扭矩结果为 365.03 MPa，同时模拟后由实际应力-扭矩曲线得到涂层螺杆可承载临界扭矩为 364.52 MPa，计算结果与模拟结果基本相同。

### 3 结 论

1) 螺杆底径最小位置的基材和碳化钨涂层均承载最大应力和最大应变；在相同加载扭矩条件下，螺杆底径越小，其承载应力和承载应变越大。

2) 通过有限元模拟计算，可建立碳化钨涂层螺杆基材、螺杆碳化钨涂层最大承载应力、最大承载应变与螺杆加载扭矩之间的关系。

3) 分别建立由碳化钨涂层断裂强度或涂层延伸率求解碳化钨涂层螺杆临界扭矩方法，和由材料已知弹性模量和屈服强度求解未知钢基材碳化钨涂层螺杆临界扭矩方法，2 种方法计算结果基本一致。在此基础上模拟计算 Cr12Mo1V1、9Cr18MoV、CPM420V 钢基材 NiMoCrFeCo-WC 涂层螺杆的临界扭矩分别为 330.34、346.87、363.59 N·m。

### 参考文献 References

[1] Li Jinzhao(李金钊). *China Plastics*(中国塑料)[J], 1999(9): 3

[2] Wang Jue(王 珏), Du Jianshi(杜鑑时), Yao Jianhua(姚建华). *Applied Laser*(应用激光)[J], 2007(6): 470

[3] Dai Xiaojing(戴晓静). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004

[4] Ma Ning, Guo Lei, Cheng Zhenxiang *et al. Appl Surf Sci*[J], 2014, 320: 364

[5] Wang Qun, Zhang Shiyang, Cheng Yingliang *et al. Surf Coat Technol*[J], 2013, 218: 127

[6] Fu Dingfa, Xiong Haoqi, Wang Qun. *J Mater Eng Perform*[J], 2016, 25(10): 4352

[7] Liu Jiandi(刘建弟), Zhang Shuquan(张述泉), Wang Huaming(王 华明). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(9): 2600

[8] Fu Yingqing(傅迎庆), Zhou Feng(周 锋), Gao Yang(高 阳)

- et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(S2): 731
- [9] Picas Josep A, Rup érez Elisa, Punset Miquel *et al. Surf Coat Technol*[J], 2013, 225: 47
- [10] Zhou Kesong(周克崧), Deng Chunming(邓春明), Liu Min(刘敏) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(4): 671
- [11] Wang Qun(王群), Qu Bangrong(屈帮荣), Tang Zhaoxi(唐墨胙) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(7): 1920
- [12] Venter Andrew M, Oladijo O Philip, Luzin Vladimir *et al. Thin Solid Films*[J], 2013, 549: 330
- [13] Roy Manish. *Tribol Trans*[J], 2014, 57(6): 1028
- [14] Zhu Zhen(朱振), Zhang Hong(张宏), Zhang Jian(张箭) *et al. Surface Technology*(表面技术)[J], 2012, 41(3): 12
- [15] Yuan Jianhui, Ma Chunwei, Yang Shanglei *et al. Surf Coat Technol*[J], 2016, 285: 17
- [16] Yang Jiaoxi(杨胶溪), Zhang Jianquan(张健全), Chang Wanqing(常万庆) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2016, 44(6): 110
- [17] Li Songlin(李松林), Xiang Jintao(向锦涛), Zhou Wuxi(周伍喜) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(5): 1371
- [18] Mi Pengbo, Wang Teng, Ye Fuxing. *Int J Refract Met Hard Mat*[J], 2017, 69: 158
- [19] Zhang Yu(张煜), Lou Liyan(娄丽艳), Xu Qinglong(徐庆龙) *et al. Acta Metall Sin*(金属学报)[J], 2020, 56(11): 1530
- [20] Wu Ping(吴萍), Zhou Changchi(周昌炽), Tang Xinan(唐西南). *Acta Metall Sin*(金属学报)[J], 2002, 38(12): 1257
- [21] Zhang Zhenran(张振然). *Dissertation for Master*(硕士学位论文)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014
- [22] Chen X, Deng X M, Sutton M A. *Finite Elem Anal Des*[J], 2014, 81: 32
- [23] L édias G, Paroissien E, Lachaud F *et al. Int J Solids Struct*[J], 2019, 158: 90
- [24] Ni Juan(倪娟). *Dissertation for Master*(硕士学位论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018
- [25] Hu J, Chou Y K, Thompson R G. *Surf Coat Technol*[J], 2008, 203(5): 730

## Finite Element Analysis of Bearing Stress-Torque of Steel-Base NiMoCrFeCo-WC Coated Screw

Ba Yaer, Shen Chengjin, Ji Zhe, Lu Kelong

(School of Materials and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the load-bearing law of tungsten carbide ceramic-coated screws in the process of high-strength plastic injection molding, ANSYS finite element simulation was used to calculate the load-bearing characteristics of tungsten carbide-coated screws with different screw ridge structures, and the influence law of steel base material on load of the three-section tungsten carbide coating screw was analyzed. The stress/strain change law of tungsten carbide coated screw under torque load was simulated. The corresponding relationship between the load torque of tungsten carbide coated screw and the maximum stress and maximum strain was discussed. The method for determining the critical torque of tungsten carbide coated screw was established. The results show that the base material and the tungsten carbide coating at the smallest position of the screw bottom diameter bear the maximum stress and the maximum strain. Under the same loading torque condition, the smaller the screw bottom diameter, the greater the bearing stress and strain. Based on tungsten carbide coating fracture strength/elongation, the simulation calculation method of critical torque of tungsten carbide coating screw, and simulation calculation method of critical torque of tungsten carbide coating screw of unknown steel substrate based on material elastic modulus and yield strength were established. The calculation results of the two methods are basically verified consistent. On this basis, the critical torques of the Cr12Mo1V1, 9Cr18MoV, and CPM420V steel base/NiMoCrFeCo-WC coated screws are simulated to be 330.34, 346.87, and 363.59 N·m, respectively.

**Key words:** tungsten carbide ceramic coated screw; NiMoCrFeCo-WC coating; finite element simulation

Corresponding author: Ba Yaer, Master, School of Materials and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, P. R. China, E-mail: ts19180045p31@cumt.edu.cn