

# 不同加载方式下硬质合金应力状态的有限元模拟研究

杨雨露, 陈静洪, 吕皓, 刘雪梅, 宋晓艳

(北京工业大学 材料与制造学部/新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 硬质合金中存在分布不均匀的残余热应力, 在承载过程中残余热应力与外加载荷产生复杂的交互作用, 影响材料的力学性能。现有的实验和模拟方法均为统计性分析方法, 难以在微观组织尺度分析应力分布的细节和特征。本工作利用有限元模拟的方法研究了硬质合金的残余热应力分布特征, 分析了不同载荷方式下硬质合金内的应力状态, 研究了残余热应力和外加载荷之间的相互作用。基于应力分析, 提出了提高硬质合金承载能力的组织结构设计和理论依据。该方法也可应用于其他多种多相复合材料的应力分析和微观组织优化。

**关键词:** 硬质合金; 有限元模拟; 应力分析; 微观组织优化

**中图分类号:** TG135+.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)05-1774-09

硬质合金是由难熔金属碳化物 (WC、TiC、TaC、NbC 等) 和过渡金属粘结相 (Co、Ni、Fe 等) 构成、通常采用粉末冶金方法制备的金属-陶瓷复合材料<sup>[1-2]</sup>。在各类硬质合金中, 以硬质相 WC 和粘结相 Co 构成的 WC-Co 类硬质合金具有最优的综合力学性能, 呈现出高的强度和较好的断裂韧性<sup>[3-4]</sup>, 被广泛应用于各种加工工具材料<sup>[5]</sup>。当硬质合金从烧结温度冷却至室温时, 由于 WC 相和 Co 相的热膨胀系数差异较大, 会产生数值较高且分布复杂的残余热应力<sup>[6-8]</sup>。烧结后的硬质合金基本为制备终态, 在其服役过程中会承受各种形式的外加载荷, 在承载过程中残余热应力必将与外加载荷产生复杂的交互作用<sup>[9]</sup>, 从而对材料的力学性能产生影响<sup>[10-11]</sup>。所以, 对制备态残余热应力在微观组织尺度上进行描述, 并对承载过程中内部残余热应力与外加应力之间的交互作用进行研究, 对于分析硬质合金的力学行为、失效原因和强韧化机制具有非常重要的意义<sup>[11]</sup>。

在实验研究方面, 主要采用中子衍射法, 通过比较晶格参数的测量值与无应力状态下的参考值, 获得残余热应力的大小和方向。研究表明, 硬质合金中硬质陶瓷相 WC 的平均残余热应力为压应力状态, 粘结相 Co 为拉应力状态, 且随着 Co 含量的增加、WC 平均晶粒尺寸的减小, 残余热应力逐渐增大<sup>[6-7]</sup>。但是中子衍射法只能获得残余热应力的平均状态, 无法获得其在合金中的具体分布情况。关于外加载荷与残余热应力的交互作用,

同样可以采用中子衍射法进行研究。美国密苏里大学哥伦比亚分校 Krawitz<sup>[12]</sup>等人研究了 WC-Ni 硬质合金压缩过程中 Ni 相的轴向和横向弹性应变响应规律, 结果表明在承受单轴压缩应力并卸载后, Ni 相中残余热应力的轴向和横向分应力均降低, 横向分应力的降低程度更大。由于泊松效应, Ni 相中横向弹性应变降低而轴向弹性应变升高。中子衍射峰宽度的演变规律揭示了硬质合金在承载过程中各相的应变响应是不均匀的, 但难以实现硬质合金复杂微观组态中应力-应变分布的预测。

鉴于硬质合金中硬质相和金属粘结相的复杂空间组态, 有限元模拟是解决以上问题的有效方式。该方法通过建立包含硬质陶瓷相和金属粘结相的微观组织形貌特征以及两相材料参数的模型<sup>[11,13]</sup>, 不仅可以模拟平均应力分布和宏观力学行为, 还可以在微观组织尺度描述应力分布特征和应变响应规律。瑞典查尔姆斯理工大学 Öhman<sup>[13]</sup>等人利用 Python 编程语言开发了 CCBUILDER 软件生成虚拟的硬质合金微观组织, 进行残余热应力的模拟, 但生成的微观组织与实际微观组织有较大的差别。中南大学 Zhu<sup>[14]</sup>等人详细介绍了一种将扫描电子显微镜图像转换为有限元几何模型的图像处理技术, 对 WC-Co 合金的残余热应力进行了评估, 讨论了硬质合金的强化增韧机理, 但是未考虑 WC 晶粒的各向异性属性, 且未对残余热应力与外加载荷的交互作用进行深入研究。瑞士洛桑联邦理工学院 Mari<sup>[15]</sup>等人设计了 3 种理想化的

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 北京市自然科学基金 (2222046); 国家自然科学基金 (52101003, 92163107)

作者简介: 杨雨露, 男, 1998 年生, 硕士生, 北京工业大学材料与制造学部/新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124, E-mail: YangYulu@emails.bjut.edu.cn

WC-Co 合金三维有限元模型用于研究合金压缩过程中的应变响应规律,并与中子衍射法的实验结果进行对比。该模型虽然能够较好地重现合金内应变响应规律,但仍属于统计性分析,无法分析微观组织尺度的应变响应细节。考虑到载荷的多样性以及复杂性,挪威科技大学 Tkalic<sup>[9]</sup>等人,进行了双轴压缩、剪切和单轴拉伸载荷下的模拟,并将加载前的残余热应力以及加载后的应力进行了统计分析,结果表明加载前的单峰应力分布在加载后会变为双峰应力分布,但是在单轴拉伸载荷状态下的粘结相中应力分布不存在双峰分布的特征。

以上基于有限元模拟方法的研究虽然获得了硬质合金中残余热应力分布和应变响应的规律,但是依然主要为统计性的分析结果,缺乏对于真实微观组织的局部应力和应变分析。因此,本课题组开发了基于真实微观组织构建有限元模型的方法,利用此方法研究了不同晶粒尺寸硬质合金的残余热应力和残余热应力与外加载荷的相互作用<sup>[11]</sup>,发现 WC 中压缩残余热应力和 Co 中拉伸残余热应力的数值均随着 WC 晶粒尺寸的减小而增大;在压缩载荷下,残余热应力提高了硬质合金整体的有效弹性模量,但提高的幅度随着 WC 晶粒尺寸的增大而减小。本研究在课题组前期开发的方法的基础上,基于 WC-Co 硬质合金的真实微观组织建立具有各向异性力学参数的有限元模拟模型,对烧结残余热应力进行模拟,并在微观组织尺度系统分析残余热应力与外加压缩和拉伸载荷之间的交互作用,从而为强韧化硬质合金等金属陶瓷材料提供指导和理论依据。

## 1 实验和模拟方法

### 1.1 模拟实验的设计

本研究采用 WC-12%Co (质量分数)硬质合金为分析对象,对试样进行了多步研磨和抛光,利用电子背散射衍射技术 (EBSD) 获取微观组织和晶粒取向信息,并进行有限元模型的建立。如图 1a 所示浅灰色多边

形区域对应 WC 晶粒,黑色区域表示金属粘结相 Co。利用体视学截线法获得了分析样品的微观组织参数,包括 WC 相的平均晶粒尺寸 ( $d$ ) 为  $1.45 \mu\text{m}$ 、Co 相的平均自由程 ( $L_{\text{Co}}$ ) 为  $0.33 \mu\text{m}$ 、WC 相的邻接度 ( $C_{\text{WC-WC}}$ ) 为 0.61。利用建立的模型,对硬质合金进行烧结残余热应力的模拟,再以此为初始应力状态进行不同大小的单轴压缩以及拉伸模拟。

### 1.2 有限元模型的构建

如图 1 所示,首先对试样的微观组织照片进行降噪,利用自动计算机辅助设计软件 (CAD) 在降噪后的照片上绘制出 WC 晶粒的几何边界。然后,在有限元软件 (Abaqus) 中识别 WC 晶界和 WC/Co 相界,生成 WC 相及 Co 相对应的区域,赋予相应的材料属性,并进行网格划分,完成有限元几何模型的构建。平面应力和平面应变是二维有限元分析中常用的两种分析状态。平面应力是指假设所有应力都在同一分析平面内的状态;而平面应变是指假设所有应变都在同一分析平面内的状态<sup>[16]</sup>。由于 WC-Co 硬质合金的内部沿平面外方向的形变受到限制,所以在二维有限元研究中通常假设为广义平面应变情况来对三维试样进行分析<sup>[9,11,14]</sup>。大量研究表明自由边界的模拟结果与实验结果更为吻合<sup>[7,9,11,14,17]</sup>,所以本研究采用自由边界条件,将几何模型相邻的两条边设置为对称边界条件,在另外两条边设置为自由边界条件。中子衍射实验表征残余热应力的研究表明 WC-Co 硬质合金中 WC 相和 Co 相的残余热应力均随着温度的升高而降低,在  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  时应力值接近于 0<sup>[7]</sup>。因此本研究假设  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  时残余应力为 0,设置模型初始温度为  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,终止温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冷却结束后,分别进行压缩和拉伸模拟,载荷施加于模型的右边界。

烧结硬质合金中,碳化钨 (WC) 呈截断的三棱柱形状,具有六方 (hcp) 晶体结构,表现出各向异性的力学行为<sup>[18-19]</sup>。WC 晶体的弹性张量可以由 5 个弹性常数定义,由以下矩阵表示,其中 ‘ $\cdot$ ’ 代表对称分量。表 1

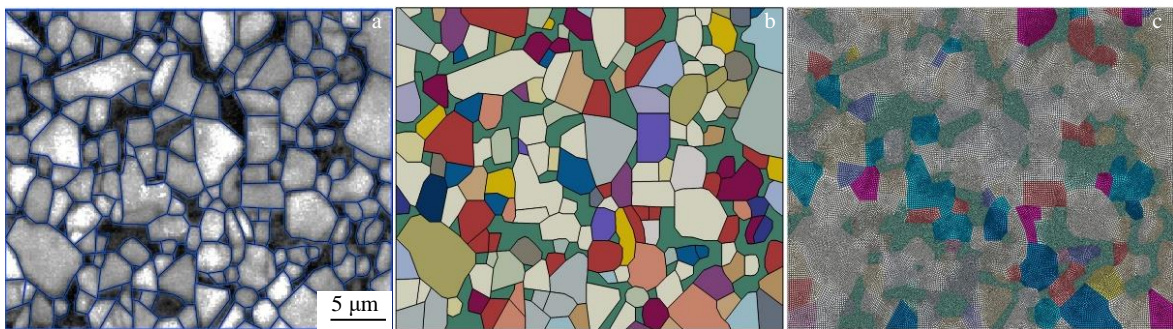


图1 有限元几何模型的创建

Fig.1 Construction process of the finite element geometric model: (a) original microstructure image, (b) finite element geometric model, and (c) meshing for the model

表 1 有限元模型中使用的 WC 相以及 Co 相的材料性能参数  
Table 1 Physical properties of WC phase and Co phase used in the finite element model

Property parameter		Value
Elastic constants of anisotropic WC/GPa	$C_{11}$	720.0
	$C_{12}$	254.0
	$C_{13}$	150.0
	$C_{33}$	972.0
	$C_{44}$	328.0
Young's modulus, $E_{WC}/GPa$		725-965
Thermal expansion coefficient, $\alpha_{WC}/^{\circ}C^{-1}$	20 $^{\circ}C$	$3.2 \times 10^{-6}$
	400 $^{\circ}C$	$4.0 \times 10^{-6}$
	800 $^{\circ}C$	$6 \times 10^{-6}$
Poisson's ratio, $\nu_{WC}$		0.197
Young's modulus, $E_{Co}/GPa$		213.5
Thermal expansion coefficient, $\alpha_{Co}/^{\circ}C^{-1}$	20 $^{\circ}C$	$8.0 \times 10^{-6}$
	400 $^{\circ}C$	$14.0 \times 10^{-6}$
	800 $^{\circ}C$	$16.0 \times 10^{-6}$
Poisson's ratio, $\nu_{Co}$		0.31
Yield stress, $\sigma_y/MPa$		683.0

列出了由美国通用电气公司 Lee<sup>[19]</sup>等人测量并由乌克兰国家科学院 Golovchan 和 Litoshenko<sup>[20]</sup>改进的 WC 弹性张量的各分量数值:

$$C_{WC} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & C_{44} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & C_{44} & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & (C_{11}-C_{22})/2 \end{pmatrix}$$

根据 EBSD 获得的 WC 晶粒取向信息和表 1 列出的弹性常数, 可以计算出不同取向 WC 晶粒的弹性模量, 结果显示最小值为 720 MPa, 最大为 972 MPa, 且多数 WC 晶粒的弹性模量在 720 到 800 MPa 之间。为了减小模型的复杂度以及便于统计分析, 将所得的结果分为 25 组, 例如弹性模量在 730 到 740 GPa 时取为 735 GPa, 以此类推。由于 Co 相的晶粒尺寸远大于 WC 的晶粒尺寸, 在硬质合金中大片 Co 相的区域是连通的<sup>[14]</sup>, 其晶粒取向相差很小, 因此本研究没有考虑 Co 的不同取向。

Co 相的弹塑性数据取自文献[21]。需要说明的是, 在 WC-Co 硬质合金中 Co 相通常有 2 种结构共存, 即

hcp 和 fcc 结构<sup>[22]</sup>, 相比于 Co 和 WC 的物性参数差别, hcp Co 和 fcc Co 的物性参数差别很小。因此, 本研究只选取一种结构(hcp 结构, 即室温下纯 Co 的结构<sup>[23]</sup>)的 Co 相弹塑性参数作为本模型的材料参数。WC 相和 Co 的热物性参数取自文献[24-25]。以上数据作为有限元模型中 WC 相和 Co 相的性能参数, 如表 1 所示。不同取向的 WC 相采用具有不同弹性模量的弹性本构模型, Co 相采用弹塑性本构模型。

### 1.3 实验验证方法

为了验证模拟结果的正确性, 利用电子背散射衍射 (electron back-scattered diffraction, EBSD)技术的 kernel averaged misorientation (KAM) 参数对试样进行分析表征。对 20 mm×6 mm×5 mm 的硬质合金抗弯条试样进行三点抗弯实验, 试样断裂后, 抗弯条上部断口附近区域将主要承受压缩载荷, 而下部断口附近区域将主要承受拉伸载荷。分别选取上下部分接近断口的表面区域进行 KAM 数值分析。KAM 定义为所研究的点与其周围邻近并且同属一个晶粒的点之间的平均取向差, 衡量的是局部的取向梯度情况。其定义式如下, 其中,  $\theta$  为取向差:

$$KAM(i, j) = \frac{1}{4} (\theta_{(i,j)}^{(i-1,j)} + \theta_{(i,j)}^{(i+1,j)} + \theta_{(i,j)}^{(i,j-1)} + \theta_{(i,j)}^{(i,j+1)}) \quad (1)$$

KAM 可以用来定性反映塑性变形的均匀化程度, KAM 数值较高的区域表示塑性变形程度较大或者位错密度较高, 代表局部具有较高的应力分布状态。一般而言, 位错密度  $\rho$  与 KAM 值有如下关系, 其中  $\mu$  为扫描步长,  $b$  是 Burgers 矢量的长度:

$$\rho = \frac{2KAM}{\mu b} \quad (2)$$

因此可以利用 KAM 分析对模拟结果进行对比验证。

## 2 结果与分析

### 2.1 残余热应力的分析

图 2 为 Co 相和 WC 相残余热应力的分布云图。其中拉应力用正值表示, 压应力用负值表示, 所以最大主应力可以观察最大拉应力或最小压应力的分布, 最小主应力代表最大压应力或最小拉应力。由于 Co 相的热膨胀系数大于 WC 相, 所以烧结完成并冷却后 Co 相中的应力状态以拉应力为主, 而 WC 中以压应力为主<sup>[8]</sup>。因此本研究主要分析 Co 相中的最大主应力和 WC 相中的最小主应力。从图中可知硬质合金中的微观应力分布并不均匀。WC/Co 界面附近的 Co 相中的拉应力高于 Co 相内部的应力。近圆形 Co 相中的拉应力高于条状 Co 相中的拉应力。同时在一些条状 Co 相中部分区域含有压应力。在 WC/Co、WC/WC、WC/Co 三叉界面附近的 WC 中压应力更大, 而在 Co 相附近的 WC 晶粒边缘处

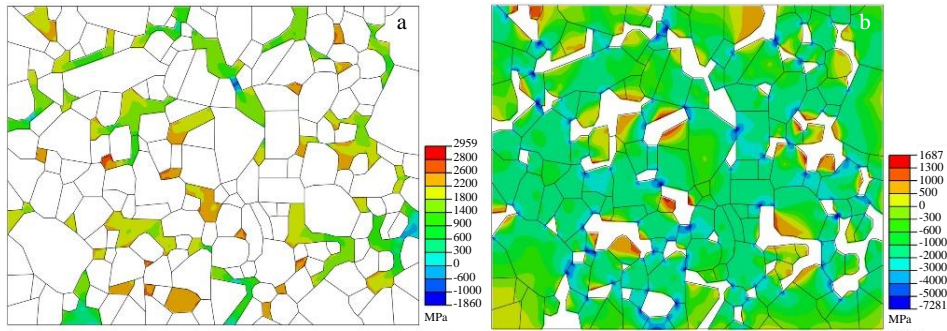


图 2 硬质合金中的残余热应力分布

Fig.2 Residual thermal stress distribution in the cemented carbide: (a) maximum principal stress distribution in the Co phase and (b) minimum principal stress distribution in the WC phase

有着较小的拉应力。

为了评估有限元模型的有效性,对 WC 相和 Co 相每个单元的平均残余热应力进行了统计。计算出 Co 相平均残余热应力为 1434 MPa (拉伸),WC 相平均残余热应力为 180 MPa (压缩),与文献中的数值接近<sup>[9]</sup>,验证了模拟方法的合理性。图 3a 为 Co 相各单元平均残余热应力的频率分布,其中为拉应力状态的单元约占 10%。图 3b 为不同弹性模量 WC 相的平均残余热应力,多数为压应力状态,残余热应力的大小和弹性模量之间不存在明显的直接关联关系。

### 2.2 承载时的应力分析

以上一节模拟的残余热应力为初始应力条件,进一步对 WC-12%Co 硬质合金分别进行了单轴压缩和拉伸模拟。首先对 Co 相中的应力分布进行了分析,如图 4 所示,承受压缩载荷时 Co 相中压应力值持续增大,且条状 Co 相中压应力值较近圆形 Co 相压应力值更大;承受拉伸载荷 1000 MPa 时几乎已经观察不到压应力,继续增大载荷,拉应力数值持续增大,且近圆形形貌 Co 相中的拉应力值大于条状形貌 Co 相中的拉应力值。

为了进一步对比分析不同形貌特征的 Co 相的承载能力,如图 5 所示统计对比了近圆形以及条状 Co 相在载荷值为 500 MPa 至 3000 MPa 时的 Mises 应力。Mises 应力可视为一种等效应力,若局部 Mises 应力超过材料的屈服强度,则可判定该区域发生了塑性形变。可以发现,承受压缩载荷时,近圆形 Co 相中的 Mises 应力在 500 MPa 加载时存在明显的转折,这是因为近圆形 Co 相中存在较大的拉伸残余热应力,在压缩加载初期需要克服初始残余热应力。而在条状 Co 相中的 Mises 应力转折现象并不明显,这与图 2 所展示的近圆形 Co 相中的拉应力高于条状 Co 相中的拉应力的现象相一致。在施加压缩载荷的过程中,近圆形 Co 相中的 Mises 应力始终低于条状 Co 相的应力,且近圆形 Co 相中的应力增长速率较慢,说明近圆形 Co 相的承载能力更强,在更高的载荷下开始发生塑性变形。

当施加拉伸载荷时,垂直于加载方向的 Co 相在加载至 1000 MPa 时存在明显的 Mises 应力转折,平行于加载方向的 Co 相中这种现象并不明显,而近圆形状 Co 相中不存在这种转折现象。这是因为条状 Co 相部分区

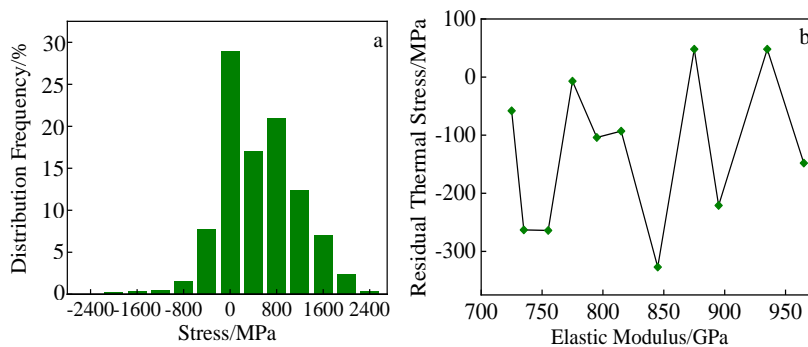


图 3 WC 相和 Co 相中的平均残余热应力统计

Fig.3 Statistical analysis for the mean residual thermal stress in the WC and Co phases: (a) distribution frequency of the average residual thermal stress in each element of the Co phase and (b) average residual thermal stress of the WC grains with different elastic moduli

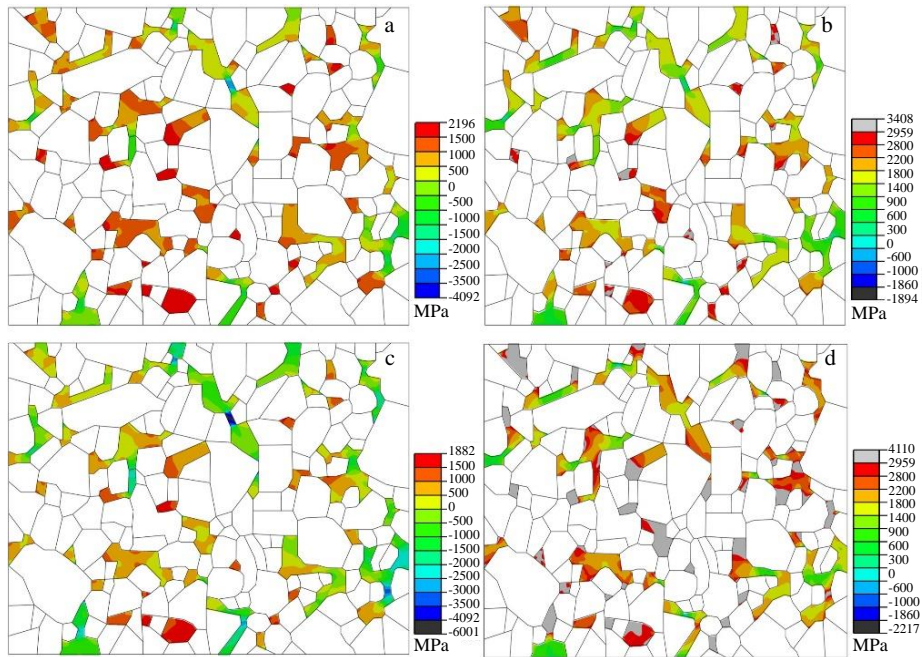


图 4 承受外加载荷时 Co 相中的应力分布

Fig.4 Stress distribution in the Co phase under applied loads: minimum principal stress distribution under compressive load of 1000 MPa (a) and 2000 MPa (c); maximum principal stress distribution under tensile load of 1000 MPa (b) and 2000 MPa (d)

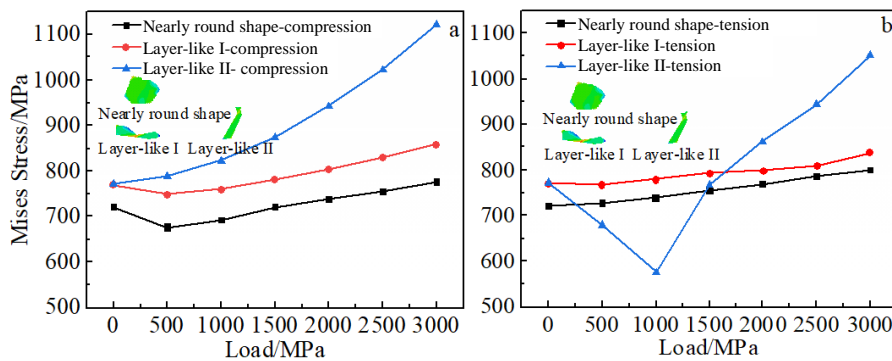


图 5 不同形貌特征的 Co 相在不同外加载荷状态下的 Mises 应力

Fig.5 Mises stress of Co phases with different morphologies under applied loads: (a) compressive load and (b) tensile load

域存在压应力状态，当施加拉伸载荷的初期需要克服初始的压缩残余热应力后才开始表现出应力的累积。因此，可以发现在拉伸加载初期，垂直加载方向的 Co 相中的 Mises 应力最小，但是当载荷不断增大后，这种形貌特征的 Co 相中的应力依然会表现出与压缩载荷条件下相同的快速增加现象，而近圆形 Co 相中的应力增长速率较慢。这说明在拉伸载荷初期，垂直于加载方向的条状 Co 相的承载能力更强；而当载荷较大时，近圆形 Co 相的承载能力更强。

另一方面对 WC 相中的应力分布进行了分析，如图 6 所示。当承受压缩载荷时，随着载荷的增加 WC 相中的压应力数值增大，在 WC/Co、WC/WC 和 WC/Co 三

叉界面处可以观察到明显的应力增大，并且具有较大压应力的区域明显增多。同时可以观察到靠近 Co 相的 WC 压应力值明显小于远离 Co 相的 WC 压应力值，这是因为，由图 2 残余热应力的分析可知靠近 Co 相的 WC 中有较小的残余拉应力为初始应力状态。因此，提高 WC 相和 Co 相的邻接度可以降低硬质合金承受压缩载荷时的局部应力集中，提高材料的承载能力。而当承受拉伸载荷时，当外加载荷较小时在 WC/Co、WC/WC 和 WC/Co 三叉界面处依然有压应力存在。随着载荷的增大，压应力区域逐渐减少。同时可以观察到靠近 Co 相的 WC 拉应力值明显大于远离 Co 相的 WC 拉应力值。由于压应力的存在对裂纹的扩展能够起到一定的抑制作用，所以

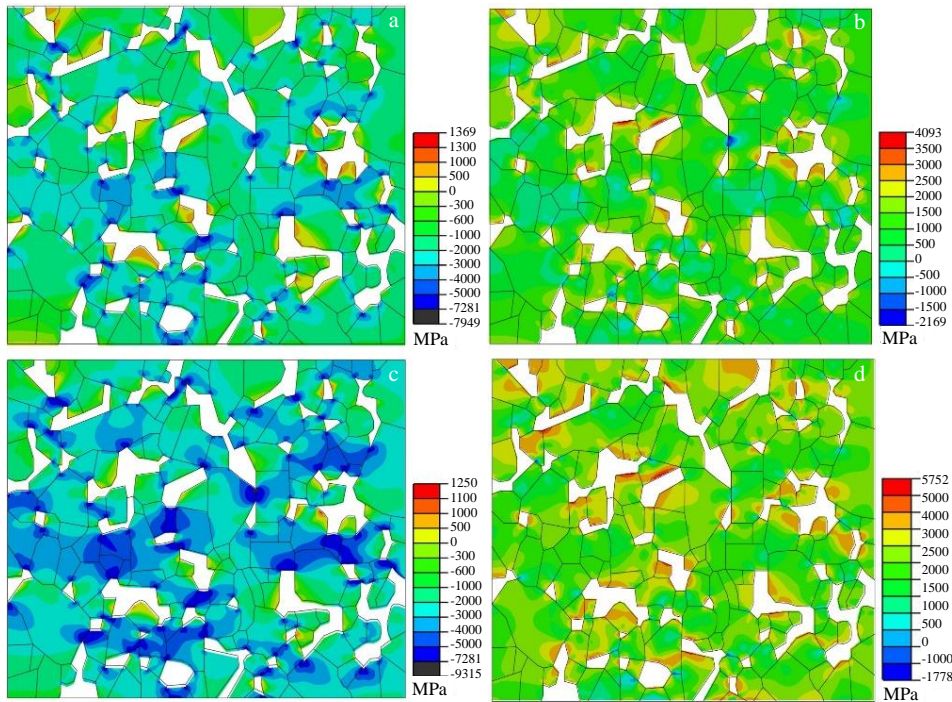


图 6 承受外加载荷时 WC 相中的应力分布

Fig.6 Stress distribution in WC phase under applied load: minimum principal stress distribution under compressive load of 1000 MPa (a) and 2000 MPa (c); maximum principal stress distribution under tensile load of 1000 MPa (b) and 2000 MPa (d)

提高三叉界面的比例能够提高硬质合金对拉伸载荷的承载能力, 延缓断裂失效。

为了对不同形貌特征的 WC 的承载能力进行分析, 统计了等轴状 WC 和板条状 WC (同一弹性模量) 在载荷值为 500 MPa 至 3000 MPa 时的 Mises 应力, 如图 7 所示。两者在承受压缩载荷时, Mises 应力均持续增大, 而在承受拉伸载荷时, 则都表现出先减小后增大的趋势, 这主要是由于 WC 相中含有压缩状态的残余热应力。承受压缩载荷时, 板条状 WC 中 Mises 应力值始终大于等轴状 WC 中的应力值, 且板条状 WC 中 Mises 应力随载荷的变化速率更快, 说明在压缩加载时等轴状 WC 相更有利于承担外加载荷。而当承受拉伸载荷时, 平行于载荷方向的板条状 WC 中应力在加载初期下降较大, 且在增大载荷时始终表现出比等轴状 WC 和垂直载荷方向的板条状 WC 中的应力数值小的现象。这说明当外加拉伸应力时, 平行于加载方向的板条状 WC 更有利于提高硬质合金的承载能力。

为了研究不同取向 WC 所具有的不同弹性模量对 WC 承载能力的影响, 计算了不同弹性模量 WC (即不同取向 WC) 在不同载荷作用下的平均应力数值, 如图 8a 所示。可以看出残余热应力对 WC 承受载荷后的应力分布影响较大, 不同弹性模量的 WC 在加载后的平均应力变化趋势一致, 均与初始残余应力的变化相同。为了

避免 WC 相形貌特征带来的不同残余热应力干扰研究弹性模量对于 WC 相承载能力的影响, 选取具有不同弹性模量的等轴状 WC 相作为研究对象分析 WC 取向对应力的影响。如图 8b, 8c 所示, 弹性模量分别为 725 和 965 GPa 的 2 种晶粒的 Mises 应力具有相同的变化趋势。当承受压缩载荷时, 二者的 Mises 应力均随着载荷的增大而不断增大, 且应力增长的速率相似。而当承受拉伸载荷时, 二者的 Mises 应力均表现出先下降再上升的趋势, 这是因为 WC 相中存在压缩状态的初始残余热应力。由于高弹性模量的 WC 相具有较大的初始残余压缩热应力, 当硬质合金承受拉伸载荷时, 具有高弹性模量取向的 WC 相会在较大外加载荷范围内表现出 Mises 应力下降的趋势。同时, 由于其具有较高的弹性模量, 在加载后期 Mises 应力上升的速率也相对较慢。根据以上的分析可知, 当承受压缩载荷时具有不同弹性模量取向的 WC 相承载能力差别不大, 而当承受拉伸载荷时具有高弹性模量取向的 WC 相会表现出更好的承载能力。相比于承受压缩载荷, 承受部分拉伸载荷的工具更需要利用具有较高弹性模量取向特征的 WC 相制备的硬质合金材料。本研究中的模型对于不同取向的 WC 只利用弹性模量来加以区分, 在未来的研究中可以增加更多与取向相关的物性参数来体现 WC 晶粒取向对残余应力和承载能力的影响规律。

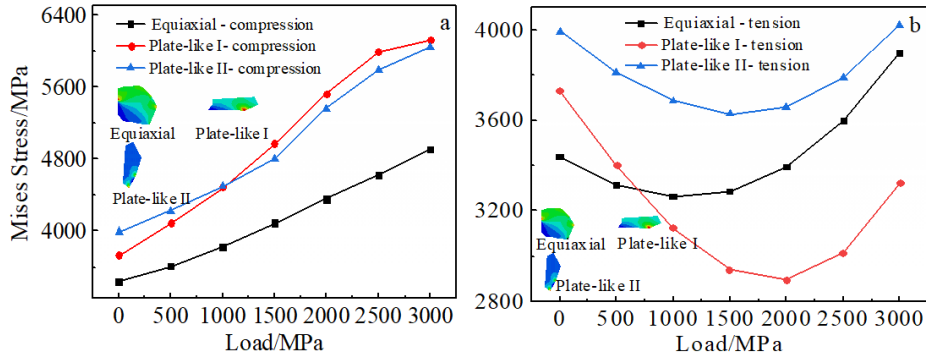


图 7 不同形貌特征的 WC 相在不同外加载荷状态下的 Mises 应力

Fig.7 Mises stress of WC phases with different morphologies under applied loads: (a) compressive load and (b) tensile load

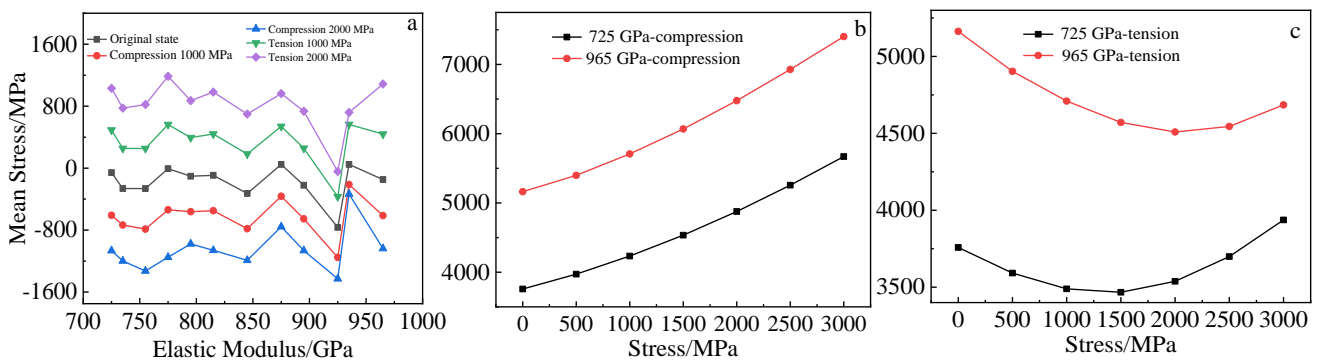


图 8 弹性模量对加载后 WC 相中应力状态的影响

Fig.8 Effect of elastic modulus on the stress state in the WC phase after loading: (a) the average stress after loading in the WC phase with different elastic moduli, (b) the stress state in the WC phase under compressive loads, and (c) the stress state in the WC phase under tensile loads

### 3 实验验证

为了验证以上模拟结果的正确性，利用电子背散射衍射 (electron back-scattered Diffraction, EBSD) 技术的 kernel averaged misorientation (KAM) 参数对试样进行分析表征。如图 9 所示为 Co 相承受压缩和拉伸载荷时的

KAM 图，受力方向为水平向左。不难看出，无论承受压缩载荷还是拉伸载荷的区域，在近圆形 Co 相中 (如图中黑色框所示)，其 KAM 值明显低于条状 Co 相 (如图中红色框所示) 的 KAM 值，说明条状 Co 相中应力值更大，这与图 5 所示的模拟结果是相吻合的。

图 10 所示为 WC 相承受压缩和拉伸载荷时的 KAM

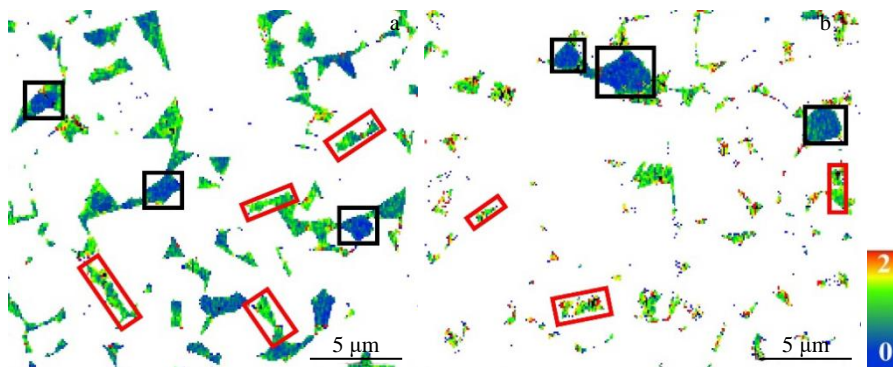


图 9 试样断裂后 Co 相的 KAM 图

Fig.9 KAM distribution diagram of the Co phase in the cemented carbide sample after the three-point bending test: (a) the distribution in the compressive load region and (b) the distribution in the tensile load region

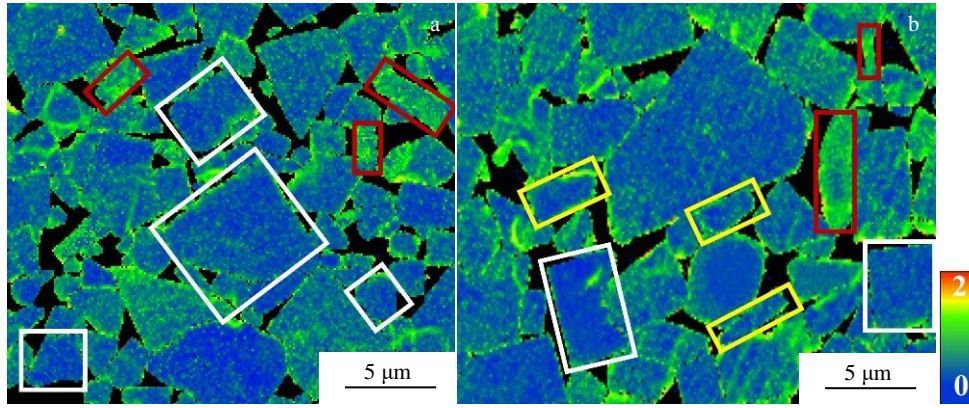


图 10 试样断裂后 WC 相的 KAM 图

Fig.10 KAM distribution diagram of the WC phase in the cemented carbide sample after the three-point bending test: (a) the distribution in the compressive load region and (b) the distribution in the tensile load region

图, 受力方向为水平向左。如图 10a 所示, 承受压缩载荷时, 条状 WC 晶粒 (红色框所示) 的 KAM 值要显著高于等轴形貌的 WC 晶粒 (白色框所示); 对于图 10b 所示的承受拉伸载荷的情况, 垂直于加载方向的条状 WC 晶粒的 KAM 值高于接近平行于加载方向的条状 WC 晶粒 (黄色框所示) 或者等轴晶粒 (白色框所示) 的 KAM 值。这与图 7 所示的模拟结果是基本一致的。另外, 不难看出, 在 WC/WC 晶界处以及 WC/Co、WC/WC、WC/Co 三岔界面处、靠近 Co 相的 WC 晶粒区域, 它们的 KAM 值要显著高于 WC 晶粒内部的 KAM 值, 这也与模拟结果相一致。

## 4 结 论

1) 硬质合金的微观组织中存在残余热应力分布不均匀的现象, Co 相中的残余热应力以拉应力为主, 而 WC 相中则以压应力为主。近圆形 Co 相中的拉应力高于条状 Co 相中的拉应力, 条状 Co 相中的部分区域存在压应力状态。WC/Co、WC/WC、WC/Co 三岔界面附近的 WC 中压应力更大, 而在 Co 相附近的 WC 晶粒边缘处有较小的拉应力。

2) 当硬质合金承受压缩载荷时, 近圆形 Co 相和等轴状 WC 相中的应力值较低, 在 WC/Co、WC/WC、WC/Co 三岔界面附近的 WC 中存在应力集中的现象。因此提高 WC 相和 Co 相的邻接度、提高等轴状 WC 相和近圆形 Co 相的比例有利于提高硬质合金承受压缩载荷的能力。

3) 当硬质合金承受拉伸载荷时, 平行于加载方向的板条状 WC 相中的应力值较低, 且在 WC/Co、WC/WC、WC/Co 三岔界面处部分区域保留了压应力状态, 利于抑制裂纹扩展。在加载初期条状 Co 相应力较低, 而在加

载后期近圆形 Co 相的应力较低。因此提高三岔晶界和板条状 WC 相的比例, 根据载荷大小调控 Co 相形貌有利于提高硬质合金承受拉伸载荷的能力。

4) 硬质合金承载过程中 WC 相中的应力状态受到初始残余热应力和 WC 弹性模量的共同影响。承受压缩载荷时具有不同弹性模量的 WC 相承载能力差别不大, 而承受拉伸载荷时具有高弹性模量的 WC 相会表现出更好的承载能力。相比于承受压缩载荷, 承受部分拉伸载荷的工具更需要利用包含具有较高弹性模量取向特征的 WC 相的硬质合金材料。

## 参考文献 References

- [1] Upadhyaya, Gopal S. *Materials & Design*[J], 2001, 22(6): 483
- [2] Montgomery R S. *Wear*[J], 1968, 12(5): 309
- [3] Acchar W, Gomes U U, Kaysser W A *et al. Materials Characterization*[J], 1999, 43(1): 27
- [4] Cao Shunhua(曹顺华), Li Jiongyi(李炯义), Lin Xinping(林信平) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(11): 1703
- [5] Fang Z Zak. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2009, 27(2): 288
- [6] Coats D L, Krawitz A D. *Materials Science and Engineering: A* [J], 2003, 359(1-2): 338
- [7] Mari D, Clausen B, Bourke M A M *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2009, 27(2): 282
- [8] Wang Shuming(王书明), Zhang Hua(张 华), Cao Ruijun(曹瑞军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(7): 2464
- [9] Tklich D, Cailletaud G, Yastrebov V A *et al. Mechanics of Materials*[J], 2017, 105: 166



- [10] Krawitz A D, Drake E F, Clausen B. *Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527(15): 3595
- [11] Chen Jinghong, Zhao Chong, Lu Hao *et al.* *Acta Materialia*[J], 2021, 221: 117 428
- [12] Paggett J W, Krawitz A D, Drake E F *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2006, 24(1-2): 122
- [13] Öhman M, Ekh M, Larsson F *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2019, 85: 105 065
- [14] Zhu Jifei, Zhang Li, Zhang Huadong *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2018, 71: 239
- [15] Mari D, Campitelli E N, Drake E F *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2015, 49: 256
- [16] Daryl L Logan. *A First Course in the Finite Element Method, Fifth Edition*[M]. Stamford: Cengage Learning, 2011
- [17] Kayser W, Bezold A, Broeckmann C. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2017, 63: 55
- [18] French D N. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 1969, 52(5): 271
- [19] Lee M, Gilmore R S. *Journal of Materials Science*[J], 1982, 17(9): 2657
- [20] Golovchan V T, Litoshenko N V. *Computational Materials Science*[J], 2010, 49(3): 593
- [21] Park S, Kapoor S G, DeVor R E. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2006, 128(3): 739
- [22] Adjam S, Mari D, LaGrange T. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2020, 87: 105 161
- [23] Karimpoor A A, Erb U, Aust K T *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2003, 49(7): 651
- [24] Golovchan V T. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2007, 25(4): 341
- [25] Huang Ziqian, He Yuehui, Cai Haitao *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2008, 18(3): 66

## Stress Analysis for Cemented Carbides Under Different Loading Conditions Based on the Finite Element Method

Yang Yulu, Chen Jinghong, Lu Hao, Liu Xuemei, Song Xiaoyan

(Faculty of Materials and Manufacturing, Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The residual thermal stress (RTS) is distributed heterogeneously and has complex interactions with the applied loadings, which significantly influences the mechanical properties of cemented carbides. The traditional experimental and simulation methods can only analyze the stress distribution statistically, and they cannot be applied in the study on the microstructure scale to get the detailed stress distribution. Using the finite element method, this study investigated the RTS in cemented carbides and the stress distribution under different loading conditions. Based on the stress analysis, it proposed a method to strengthen cemented carbides by tailoring their microstructures. The new approach presented in this study can be applied to stress analysis and microstructure tailoring for a broad range of multiphase composites.

**Key words:** cemented carbide; finite element method; stress analysis; microstructure tailoring

---

Corresponding author: Song Xiaoyan, Ph. D., Professor, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, E-mail: xysong@bjut.edu.cn