DOI: 10.3901/JME.2014.06.001

# 镍基粉末高温合金切削加工表面白层形 成热-力耦合作用机理<sup>\*</sup>

刘战强<sup>1,2</sup> 吕绍瑜<sup>1,2</sup>

(1. 山东大学机械工程学院 济南 250061;2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室 济南 250061)

**摘要:** 对镍基粉末高温合金 FGH95 进行高速铣削加工试验,研究切削速度对 FGH95 切削表面白层厚度的影响规律,利用有限元对 FGH95 高速铣削过程进行二维仿真,获得已加工表面的温度场、应变场和应变率场。研究结果表明: FGH95 已加工表面白层厚度随着切削速度的提高呈现先增大后减少的趋势;已加工表面温度、应变和应变率的综合作用使表面材料发生相变和晶粒细化,相变和晶粒细化的耦合作用促进白层的产生;切削过程中 FGH95 塑性变形导致白层形成的临界温度降低,促进白层的产生;切削表面的高应变率导致 FGH95 白层形成的临界温度升高,阻碍白层的产生。 关键词:粉末镍基高温合金;高速切削;白层;相变;塑性变形 中图分类号: TG54

## Thermo-Mechanical Coupling Mechanisms for White Layer Formation on Machined Surface of Powder Metallurgical Nickel-based Superalloy

LIU Zhanqiang<sup>1,2</sup> LÜ Shaoyu<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, 250061;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong

University, Jinan, 250061)

**Abstract:** Through investigations of high-speed milling experiments of PM nickel-based superalloy FGH95, the influence of the cutting speed on white layer formation is investigated. 2D finite element simulation of high-speed milling process is carried out. The distribution of temperature field, strain field and strain-rate field at different cutting speeds are obtained. Research results show that the white layer thickness increases with the cutting speed. However, the thickness of white layer decreases while the cutting speed increases a step further. The combined influences of temperature, strain and strain-rate at machined subsurface layer results to the onsets of phase transformation and grain refinement, which in turn promote the formation of white layer. Severe plastic deformation decreases the critical temperature for white layer formation, while high strain-rate increases the critical temperature of white layer formation.

Key words: power metallurgical nickel-based superalloys; high-speed cutting; white layer; phase transformation; plastic deformation

0 前言

航空发动机热端部件材料必须具有高的屈服 强度、拉伸强度和良好的热稳定性,以满足其在高 温下具有可靠的工作性能。FGH95 是"八五"期间 为配合我国某新型高推重比航空发动机的研制而开 发出的镍基粉末高温合金,它的化学成分和微观组 织与 René95 粉末镍基高温合金近似<sup>[1]</sup>,是一种高合 金化的 γ'相沉淀强化型镍基粉末高温合金,由于其 具 有 优 良 的 综 合 力 学 性 能 , 可 代 替 Inconel718(GH4169)合金用于制造先进航空发动机 的压气机盘、涡轮盘、涡轮轴以及涡轮盘挡板等高 温承力转动部件,目前还将其推广应用于制造地面 燃气涡轮发动机的涡轮盘等重要部件。与其他高温 合金类似,FGH95 在高速干切削时容易产生白层。 白层是影响工件表面完整性并制约其服役性能的重 要因素<sup>[2-3]</sup>。

很多学者虽已经对磨削、冲击磨损、滚压、微

<sup>\*</sup>国家重点基础研究发展计划 (973 计划, 2009CB724401)和国家自然科 学基金(51375272, U1201245)资助项目。20130621 收到初稿, 20140530 收到修改稿

动磨损、电火花加工等过程中的白层进行了研究, 但对白层产生机理和形成规律的研究仍存在较大分 歧,争论的焦点集中在白层的组织结构、形成机制 和对零件服役性能的影响等方面<sup>[4-6]</sup>。对于白层的形 成机制,主要有三种观点:①热作用机制:STEAD<sup>[7]</sup> 提出了白层形成的热作用机制,认为白层是局部区 域摩擦热导致高温,从而使表面发生奥氏体化,随 之表面快速淬火形成的马氏体组织。CHOU 和 EVANS<sup>[8]</sup> 采用后刀面磨损量为 0.21 mm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 陶瓷刀具切削加工 AISI52100 钢,对其加 工表面白层的金相成分进行分析,发现白层中奥氏 体的体积分数占33%,而基体中只含有11%的奥氏 体,因此认为白层的形成是热作用机制导致的金属 相变。SAUVAGE 等<sup>[9]</sup>通过涂层硬质合金刀具切削 加工不同含碳量的两种钢,在加工表面白层中均出 现了残留奥氏体和马氏体,表明加工过程中温度的 快速升降导致奥氏体向马氏体的转变。②塑性变形 机制: 该机制认为白层形成和亚表面接触时产生的 热作用无关,表面层并未奥氏体化,白层是由接触 产生的强烈塑性变形造成的。HAN<sup>[10]</sup>等利用硬质合 金刀具切削 AISI1045 退火钢时发现在低于相变温 度下也形成白层,说明白层是由于加工过程中的强 烈塑性变形造成的。戴素江等<sup>[11]</sup>使用 CBN250 立方 氮化硼刀具加工GCr15轴承钢的研究证明塑性变形 导致晶粒细化进而促进了白层的形成。③热-塑性变 形综合作用机制: XU 等<sup>[12-13]</sup>认为白层的形成主要 是摩擦过程中局部区域温度达到或超过了奥氏体转 化相变温度,同时强烈塑性变形对白层晶粒起到细 化作用,白层是温度和塑性变形耦合作用的结果。

综上所述,目前大多研究只针对白层形成的机 理展开讨论,尚缺少关于白层形成条件的定量表征。 因此,本文以镍基粉末高温合金 FGH95 为研究对 象,利用有限元仿真对镍基粉末高温合金 FGH95 高速铣削过程进行二维仿真,获得加工表面温度场、 应变场和应变率场,将仿真结果与切削试验结果相 结合,揭示 FGH95 切削表面白层形成的热-力耦合 作用机制,建立白层形成条件的定量表征模型,以 期对镍基粉末高温合金切削表面白层的控制提供理 论指导。

1 切削加工试验及结果

### 1.1 工件材料

工件材料为镍基粉末高温合金 FGH95, 其主要 化学成分如表 1 所示。FGH95 合金由基体相 γ、强 化相 γ'和碳化物组成,强化相 γ'的体积分数为 50%~ 55%<sup>[14]</sup>。为实现二维直角切削,将工件切割成 62 mm×42 mm×2.5 mm 的薄片(如图 1 所示)。

		表 1 FGH95 的化学成分						
元素	Cr	Co	W	Мо	Al	Ti	Nb	Ni
质量 分数	14.0	8.00	3.40	3.40	3.48	2.55	3.50	Bal



图1 直角铣削示意图

### 1.2 机床、刀具与切削用量

切削试验在 ACE-500 立式数控加工中心上进 行,机床主轴最高转速为 10 000 r/min。刀具采用 80A08RF84SN 盘铣刀,TiN/TiCN 涂层硬质合金可 转位刀片(图 2),刀具参数如表 2 所示。在盘铣刀上 安装两个刀片进行顺铣加工。为消除刀具磨损对试 验结果的影响,每次切削均采用新切削刃。切削速 度依次选择 100,200,300,400,500,1000,1500, 2 000,2 500,3 000,3 500 m/min,固定轴向切削 深度为 2.5 mm,径向切削深度为 0.1 mm,进给量 为 0.005 mm/齿。



图 2 试验用刀具

#### 表 2 刀具参数

刀具参数	数值
刀盘直径/mm	160
刀具齿数	2
刀具前角/(°)	5
刀具后角/(°)	10
刀尖圆弧半径/mm	0.02

### 1.3 白层试样的制备与观察

每组切削试验结束后,采用线切割截取被加工 试件的横截面,获得大小为 5.0 mm×5.0 mm×2.5 mm 的试样。对试样进行研磨和抛光处理直至获得镜像 表面,然后将镜像表面浸入腐蚀剂(腐蚀剂配比为盐 酸 100 mL,酒精 100 mL,氯化铜 5 g)中腐蚀 30~50 s,随后用流动水和酒精溶液对腐蚀表面进行清洗。 将清洗后的试样利用超景深光学显微镜和扫描电镜 (SEM)进行微观组织观察,并测量白层厚度。

### 1.4 试验结果

图 3 为 FGH95 切削加工后的表面白层形貌。 从图 3a 中可以看出, 白层位于已加工表面的最上 部,在光学显微镜下具有光亮的特征,在紧挨着白 层的下方出现黑色过渡区(即暗层)<sup>[15]</sup>。图 3b 为用扫 描电镜观察到的加工表面微观组织,由图 3b 可以看 出: 基体材料经过腐蚀之后,显示出加工表面的白 层区域具有致密化特点,已观察不到原始基体组织。 在白层区域和基体材料的过渡区域中,γ'相的数量 低于基体材料。



(a) 光学显微镜下的微观组织

图 3 FGH95 的白层显微形貌

如图 3 所示,用 SEM 测量 FGH95 已加工表面 白层的厚度,测量结果如图4所示。由图4可以看 出:在100~500 m/min 的切削条件下, 白层厚度随 着切削速度的提高而增加。切削速度较低(v=100 m/min)时,白层厚度为 0.76 µm,当切削速度提高 到 500 m/min 时, 白层厚度增大到 3.23 µm; 在 500~ 3 500 m/min 的切削条件下, 白层厚度随切削速度提 高先增加后减少,最大白层厚度出现在切削速度为 2000 m/min 时,约为6.9 µm。



### 2 FGH95 切削加工有限元仿真

### 2.1 几何模型

采用 AdvantEdge<sup>TM</sup> 有限元软件对镍基粉末高 温合金 FGH95 的切削加工过程进行仿真分析。仿真 模型如图 2 所示,刀盘直径为 160 mm,进给量为 0.005 mm/齿。在 2 mm 的切削长度范围内,可以将

### 此铣削过程简化为二维直角切削,如图5所示。



图 5 直角铣削几何模型

#### 2.2 材料本构模型

工件材料采用 Power Law 本构模型(幂指数材 料模型), 如式(1)

$$\sigma(\varepsilon^{p}, \dot{\varepsilon}, T) = G(\varepsilon^{p}) * \Gamma(\dot{\varepsilon}) * \Theta(T)$$
(1)

式中,  $\sigma$  是材料的应力,  $\varepsilon^p$  为塑性应变, T 为 材料的温度,  $G(\varepsilon^{p})$  是材料的应变强化系数,  $\Gamma(\dot{\varepsilon})$ 是应变率系数,  $\Theta(T)$ 是材料温度软化系数。

材料的应变强化系数

当 $\varepsilon^{p} < \varepsilon_{cut}^{p}$ ,有

$$g(\varepsilon^p) = \sigma_0 (1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p})^{1/n}$$
<sup>(2)</sup>

当
$$\varepsilon^{p} \ge \varepsilon_{cut}^{p}$$
,有

$$g(\varepsilon^p) = \sigma_0 (1 + \frac{\varepsilon_{cut}^p}{\varepsilon_0^p})^{1/n}$$
(3)

式中, $\sigma_0$ 为初始屈服应力, $\varepsilon_0^{\prime}$ 为参考塑性应 变,  $\varepsilon_{cu}^{p}$  为截止应变, n 为应变硬化指数。

应变率系数 当 $\dot{\varepsilon}^{p} \ge \dot{\varepsilon}_{t}$ ,有

$$\Gamma(\dot{\varepsilon}) = \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p}\right)^{1/m_1} \tag{4}$$

当
$$\dot{\varepsilon}^{p} > \dot{\varepsilon}_{t}$$
,有  

$$\Gamma(\dot{\varepsilon}) = \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}^{p}}{\dot{\varepsilon}_{0}^{p}}\right)^{1/m_{2}} \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}_{t}}{\dot{\varepsilon}_{0}^{p}}\right)^{(1/m_{1}-1/m_{2})}$$
(5)

式中, $\dot{\epsilon}^p$ 为累计塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0^p$ 为参考塑性 应变率, *ɛ*, 为高低应变率之间发生转变的临界应变 值, m<sub>1</sub>和 m<sub>2</sub>分别为低、高应变率敏感指数。

材料温度软化系数  
当
$$T < T_{cut}$$
,有  
 $\Theta(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5$  (6)  
当 $T \ge T_{cut}$ ,有

$$\Theta(T) = \Theta(T_{cut})(1 - \frac{T - T_{cut}}{T_{melt} - T_{cut}})$$
(7)

式中, $c_0 \sim c_5$ 为多项式拟合系数,T为温度, $T_{cut}$ 

为线性截止温度, T<sub>melt</sub>为工件材料熔点。

### 2.3 仿真参数

有限元仿真中输入参数与铣削试验切削参数 相同,仿真模型采用自适应网格技术。仿真时假设 工件固定,在工件两侧和底部设置位移约束限制工 件在*X*和*Y*方向上的位移,初始温度设为20℃。

### 3 仿真结果分析

由于白层的形成主要与加工表面的切削热和 塑性变形有关。因此,主要对加工表面的温度 *T*、 应变 *ε* 和应变率 *έ* 进行研究。

### 3.1 切削加工表面温度

图 6 为镍基粉末高温合金 FGH95 在切削速度 为 2 000 m/min 时仿真获得的温度分布。从图 6 中 可看出:切削表面的最高温度出现在己加工表面与 刀具的接触区域,随着距离切削表面深度的增加, 温度逐渐降低。图 6 为距离加工表面不同深度处的 温度随切削时间的变化规律。从图 6 中可知:切削 加工表面在刀具切削作用下发生塑性变形,温度逐 渐升高,随着加工表面远离刀具,加工表面热量逐 渐传递到工件内部和空气中,因而温度呈现缓慢递 减的变化趋势,距离加工表面 10 µm 和 20 µm 的亚 表面温度变化过程与加工表面类似。从图 6 中可以 看出,加工表面处的温度值最高(941 ℃),随着距离 加工表面深度值的增加,温度降低。





图 6 加工表面温度

### 3.2 切削表面应变

图 7 为镍基粉末高温合金 FGH95 在切削速度 是 2 000 m/min 时仿真获得的切削区应变分布。从 图 7 中可以看出:已加工表面的最大应变值出现在 刀具与已加工表面的接触区域,随着距离已加工表 面深度值的增加,应变逐渐降低。图 7 中距离加工 表面不同深度处应变随切削时间的变化规律。切削 时加工表面在刀具作用下发生塑性变形,应变在塑 性变形的初始阶段递增,随着刀具脱离加工表面, 刀具对加工表面切削作用消失,应变急剧降低。图 7 加工表面不同深度处的应变峰值分布显示随着距 离加工表面深度值的增加,应变递减。



#### 3.3 切削表面应变率

图 8 为镍基粉末高温合金 FGH95 在切削速度 为 2 000 m/min 时应用仿真获得的应变率分布。从 图中可以看出:加工表面的最高应变率出现在已加 工表面与刀具的接触区域,随着距离加工表面深度 值的增加,应变率逐渐降低。图 8 中加工表面不同 深度处的应变率峰值分布可以看出随着距离加工表 面深度值的增加,应变率递减。



### 4 表面白层形成机制

图 9 为镍基粉末高温合金 FGH95 在不同切削 速度下白层边界及相邻亚表面的温度分布。从图 9 可以看出:在 100~500 m/min 的切削速度下,白层 边界温度范围为 724~788 ℃;在 500~3 500 m/min 的切削速度下,白层边界温度范围为 685~842 ℃。 而 FGH95 的相变温度为 980~1 050 ℃<sup>[14]</sup>。这说明 FGH95 没有达到相变温度时也产生了白层,因此仅

### 用温度判据不能充分解释白层的形成机理。



图 10 为 FGH95 在不同切削速度下加工表面白 层边界及相邻亚表面的应变分布。由图 10 中可看 出,在 100~500 m/min 的切削速度下,白层内的最 低应变是 3.73,而非白层区域内的最高应变是 3.90。 与温度值的特征相似,对于应变为 3.73-3.90 的亚表 面而言,只有在特定条件下才可以形成白层。在 500~3 500 m/min 的切削速度下,白层内的最低应 变是 3.20,而非白层区域内的最高应变是 4.28。因 此仅用应变判据也不能完整解释白层的形成机理。



变值分布。传统的白层形成理论认为高的温度和剧 烈塑性变形促进白层的产生。但是图中具有高应变 和高温度的区域并没有形成白层,具有低应变和低 温度的区域反而形成了白层。这说明,仅以"热作 用机制"、"塑性变形机制"或者"热-塑性变形综合 作用机制"不能充分解释白层的形成机理。



图 11 白层化区域与非白层区域的温度值和应变分布

图 12 为 FGH95 在不同切削速度下获得加工表 面白层边界及相邻亚表面的应变率分布。从图 12 中可以看出,白层边界处的应变率随着切削速度的 增加单调递增。其中,白层内的最低应变率是 7.41×10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>,而非白层区域内的最高应变率是 1.34×10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>。与温度和应变的特征相似,白层和非 白层区域承受的应变率也有交叉,因此仅用应变率 判据也不能充分解释白层的形成。





图 13 为 FGH95 粉末高温合金在 100~500 m/min 和 500~3 500 m/min 的切削速度下获得的 11 个试样中随机选取的 33 个材料形变参数分布情况。 从图 13 中可以看出,白层内的形变参数值分布于空 间的上方,而非白层区域的形变参数值分布于空间 的下方,白层边界处的参数位于二者之间。鉴于上 述三个区域参数的分布特征,可以构建一个通过白 层边界参数点的三维曲面将白层区域和非白层区域 分开,分别形成白层区域和非白层区域。白层和非 白层区域的形变参数分布特征说明只有同时使用温 度、应变和应变率才可以进行白层区域和非白层区 域的界定,这证明白层的形成受到温度、应变和应 变率的耦合作用。杜劲等[14,16]使用涂层刀具对 FGH95 进行高速铣削加工,研究结果表明 FGH95 的白层中出现晶粒细化现象并伴随着 y'相的弥散析 出。SALDANA 等<sup>[17]</sup>和 BROWN 等<sup>[18]</sup>对铜在切削加 工过程的微观组织特征进行研究,研究结果同样显 示材料的微观组织状态,包括材料的晶粒细化和组 成相的变化,受到温度、应变和应变率的综合影响。 综上所述, FGH95 的白层形成机制可以表述为已加工 表面的温度、应变和应变率的热-力耦合作用导致表面 层材料相变和晶粒细化的发生,促进了白层的形成。

由于白层和非白层的分界处同时具有白层和 非白层的形变参数特征,因此可以认为白层和非白 层分界处的形变参数特征是白层形成的临界条件。 图 13 中的三维曲面表达的即为白层形成边界的参 数特征。从图 13 中可以看出随着应变值的增加, FGH95 形成白层的临界温度降低。这说明材料的塑 性变形使材料形成白层的临界温度降低,促进白层 的产生, 这与 HANS 等<sup>[10-11]</sup>的结论一致。从图 10 中可以发现,FGH95中白层形成的最低应变为3.20, 即当材料的塑性应变值低于 3.20 时, FGH95 中不会 产生白层。与此相反的是,随着应变率的增大, FGH95 形成白层的临界温度值升高,这说明高的应 变率有利于抑制白层的产生。图 13 中显示白层中的 应变率随着切削速度的增加而增加,其形成白层的 最低应变率出现在最低的切削速度条件下,因而白 层的发生对于应变率的最低值没有明确的限制。



图 13 白层化区域与非白层区域的形变参数分布

### 5 切削表面白层形成条件

切削速度	र्टन गों।	应亦变/a <sup>−1</sup>	迎庄/℃	计算温度/℃	
/(m/min)	应交	应文平/8	)))()())()()()()()()()()()()()()()()()		
100	3.90	$7.41 \times 10^{4}$	788	789	
200	3.88	1.47×10 <sup>5</sup>	780	771	
300	3.85	1.74×10 <sup>5</sup>	759	759	
400	3.82	1.94×10 <sup>5</sup>	742	750	
500	3.73	3.12×10 <sup>5</sup>	724	716	
1 000	3.54	2.91×10 <sup>5</sup>	705	702	
1 500	3.42	4.09×10 <sup>5</sup>	685	689	
2 000	3.20	6.57×10 <sup>5</sup>	739	739	
2 500	3.33	8.49×10 <sup>5</sup>	783	782	
3 000	3.73	8.60×10 <sup>5</sup>	800	800	
3 500	4.28	1.34×10 <sup>6</sup>	842	842	

### 表 3 白层边界处的形变参数分布

图 13 中的三维曲面表示白层形成的临界条件, 即当材料的形变参数值位于曲面之上时,可确定材 料在该形变参数条件下会产生白层;而当材料的形 变参数位于曲面之下时,则在该条件下不会产生白 层。因而,可利用白层形成临界温度(在特定的应变 和应变率条件下形成白层所需要的最低温度)来确 定白层产生条件。图 13 中的三维曲面表征的即为白 层形成的临界温度和应变、应变率的对应关系。为 获得三维曲面的定量表征关系,对 100~500 m/min 和 1 000~3 500 m/min 条件下获得的白层边界处的 形变参数进行曲线拟合。表 3 给出不同切削速度下 获得的白层边界处的形变参数,经过回归处理可得 到白层形成的临界温度与应变、应变率之间的定量 关系,如式(8)

 $T_{c} = -80549.2258 - 13033.0964\varepsilon + 2714.1982\varepsilon^{2} + 8.3955\varepsilon^{3} - 36.2936\varepsilon^{4} + 24551.5493\ln\dot{\varepsilon} - 2027.0673(\ln\dot{\varepsilon})^{2} + 55.5757(\ln\dot{\varepsilon})^{3}$ 



对数据拟合获得参数与预测形变参数之间的 相关性进行评估,可验证拟合结果的准确性。相关 系数的计算方法如式(9)所示。计算得出回归模型预 测值与仿真值间的相关系数为 0.997。这表明式(8) 的数据拟合相关性好,可用来描述镍基粉末高温合 金 FGH95 切削加工表面白层边界处的形变参数对 应关系。



图 14 白层化临界温度回归模型的有效性检验

以FGH95 在 100~3 500 m/min 切削速度下获得的 11 个试样中随机选取 33 个亚表面为分析对象, 用式(8)计算各亚表面在各形变参数条件下所需的 白层形成临界温度,并以其作为图 14 中的横坐标, 以仿真获得的亚表面温度为图 14 的纵坐标。从图 14 中可以发现白层内部区域中仿真获得的温度值 高于其参数条件下所需的白层形成的临界温度,因 而该区域会形成白层;在非白层区域中仿真获得的 温度值低于其参数条件下所需的白层形成的临界温 度,该区域不会形成白层。白层区域和非白层区域 温度值的对比验证了式(8)白层形成临界温度模型 的准确性。

白层形成临界温度预测模型的建立有助于实现白层厚度的预测,其预测方法为:①给出加工参数的范围;②应用有限元分析计算获得某加工参数组合条件下已加工表面层温度 *T、*应变*E*和应变率 *ċ*值;③应用式(8)计算获得白层形成临界温度 *T<sub>c</sub>*, 当仿真获得的温度值 *T*高于白层形成临界温度 *T<sub>c</sub>*, 时,即可预测该区域产生白层,当仿真获得的温度 值 *T*低于白层形成临界温度 *T<sub>c</sub>*时,表明该区域属于 非白层区域。白层区域的厚度值即为该加工参数下 的白层厚度值。

### 6 结论

(8)

本文对比分析了镍基粉末高温合金 FGH95 直 角铣削试验和有限元二维仿真结果,揭示了 FGH95 已加工表面白层形成的热-力耦合作用机制,建立了 白层形成的材料形变参数定量表征回归模型。具体 研究结论如下。

(1) 白层厚度随切削速度升高呈先增大后减少的变化趋势。切削表面的最高温度、最高应变和最高应变率出现在工件已加工表面与刀具的接触区域,温度、应变和应变率随着距离加工表面深度的

增加而降低。

(2) 工件材料温度、应变和应变率等形变参数的热-力耦合作用导致已加工表面相变和晶粒细化的发生,促进了白层的形成。

(3) 工件材料的塑性变形使白层形成临界温度 降低,促进白层的产生;应变率使白层形成临界温 度升高,对白层的产生具有抑制作用。

### 参考文献

- 张义文,上官永恒. 粉末高温合金的研究与发展 [J]. 粉末冶金工业,2004,14(6): 30-42.
   ZhANG yiwen, SHANGGUAN yongheng. Resear and development of P/M superalloy [J]. Powder Metallurgy Industry, 2004, 14(6): 30-42.
- [2] ARAMCHAROEN A, MATIVENGA P T. White layer formation and hardening effects in hard turning of H13 tool steel with CrTiAlN and CrTiAlN/Most-coated carbide tools [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(7): 650-657.
- [3] POULACHON G, ALBERT A, SCHLURAFF M, et al. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 42(2): 211-218.
- [4] BARBACKI A, KAWALEC M, HAMROL A. Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(1): 21-25.
- [5] VYAS A, SHAW M C. The significance of the white layer in a hard turned steel chip [J]. Journal of Machining Science and Technology, 2000, 4(1): 169-175.
- [6] ATTANASIO A, UMBBRELLO D, CAPPELLINI C, et al. Tool wear effects on white and dark layer formation in hard turning of AISI 52100 steel [J].Wear, 2012, 286-287: 98-107.
- [7] STEAD J E, Micro-metallography and its practical application [J].West of Scotland Iron and Steel Institute. 1912, 19: 169-204.
- [8] CHOU Y K, EVANS C J. White layers and thermal modeling of hard turned surface [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(12): 1863-1881.
- [9] SAUVAGE X, LE B J M, GUILLET A, et al. Phase transformations in surface layers of machined steels investigated by X-ray diffraction and Mossbauer

spectrometry [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 362(1): 181-186.

- [10] HAN S, MELKOTE S N, HALUSKA M S, et al. White layer formation due to phase transformation in orthogonal machining of AISI1045 annealed steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 488(1): 195-204.
- [11] 戴素江, 邢彤, 文东辉. 等. 精密硬态切削表面白层组 织形态的研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(10): 1007-1009.
   DAI Sujing, XING Tong, WEN Donghui, et al. Study on

the microstructure of white layer during precision hard part machining [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(10): 1007-1009.

- [12] XU L Q, KENNON N F. Formation of white layer during laboratory abrasive wear testing of ferrous alloys [J]. Material Forum (Australia), 1992, 16(1): 43-49.
- [13] BULPETT R , EYRE T S , RALPH B. The Characterization of white layers formed on digger teeth [J]. Wear, 1993, 162-164(2): 1059-1065.
- [14] 杜劲. 粉末高温合金 FGH95 高速切削加工表面完整性研究 [D]. 济南:山东大学,2012.
  DU Jing. surface integrity for high speed machining of powder metallurgy superalloy FGH95 [D]. Jinan Shandong University, 2012.
- [15] GUO Y B, SAHNI J. A comparative study of hard turned and cylindrically ground white layers [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(2): 135-146.
- [16] DU J, LIU Z Q, WAN Y, et al. Influence of cutting speed on surface integrity for powder metallurgy nickel-based superalloy FGH95 [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(5-8): 553-559.
- [17] SALDANA C, SWAMINATHAN S, BROWN T L, et al. Unusual applications of machining: controlled nanostructuring of materials and surfaces [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(3): 030908-030908.
- [18] BROWN T L, SALDANA C, MURTHY T G, et al. A study of the interactive of strain, strain rate and temperature in severe plastic deformation of copper [J]. Acta Materialia, 2009, 57(18): 5491-5500.

作者简介:刘战强,男,1969年出生,教授,博士研究生导师。主要研 究方向为切削加工。

E-mail: melius@sdu.edu.cn