

引文格式: 陈哲铭, 孙剑飞, 朱卫东, 等. 置氢对 TA15 钛合金的变形及切削机理影响 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(1/2): 106-112.  
 CHEN Zheming, SUN Jianfei, ZHU Weidong, et al. Effect of hydrogenation on deformation and cutting mechanism of TA15 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(1/2): 106-112.

## 置氢对 TA15 钛合金的变形及切削机理影响\*

陈哲铭<sup>1</sup>, 孙剑飞<sup>1</sup>, 朱卫东<sup>2</sup>, 梁培新<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

[摘要] 为研究置氢处理对 TA15 钛合金变形及切削机理的影响, 利用拉伸试验和车削测力试验对比不同置氢量下该合金的力学行为、切削力、锯齿切屑显微组织特征的差异。结果表明, 高置氢量合金的屈强比减小, 塑性提高, 加工硬化严重; 置氢促进了热软化效应的发生, 氢含量越高, 引起切削力下降的临界切削速度越低; 同时从未置氢和低置氢组的锯齿切屑内能够观察到不同区域内的塑性变形特征差异: 均匀塑性变形存在于锯齿单元内, 局部剧烈塑性变形存在于剪切带内, 这验证了绝热剪切的发生; 而高置氢组的锯齿切屑内的显微组织一致, 未发现局部剧烈塑性变形特征, 结合其较低频率锯齿化的切屑形貌, 可以推断氢提高合金的整体塑性, 并抑制了局部剧烈塑性变形, 这对合金的切削加工性有较大的改善。

关键词: 置氢处理; 热软化效应; 切削机理; 锯齿切屑; TA15 钛合金

### Effect of Hydrogenation on Deformation and Cutting Mechanism of TA15 Titanium Alloy

CHEN Zheming<sup>1</sup>, SUN Jianfei<sup>1</sup>, ZHU Weidong<sup>2</sup>, LIANG Peixin<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing 100083, China)

[ABSTRACT] To study the influence of hydrogenation on deformation and cutting mechanism of TA15 alloy, tensile test and cutting experiment with different hydrogen content are performed to obtain the mechanical properties, cutting force and the differences in microstructure characteristics of serrated chip. The results show that the yield strength ratio decreases, the plasticity enhances with high hydrogen content and its working hardening is serious. Hydrogen promotes the thermal softening effect, and the higher hydrogen content, the lower critical cutting speed which causes the decrease of cutting force. The difference of plastic deformation characteristics in different regions can be observed in the serrated chip of the as-received and low-hydrogenated groups, the uniform plastic deformation exists in the serrated unit, and the local severe plastic deformation exists in the shear band, which verifies the occurrence of adiabatic shear. However, the microstructure with high hydrogen content has high consistency without local severe plastic deformation. The serrated chip morphology shows the feature of decreasing serration, so it can be inferred that the hydrogen improves the plasticity of the alloy and inhibits the local severe plastic deformation, which significantly improves the cutting performance of TA15 alloy.

**Keywords:** Hydrogenation; Thermal softening effect; Cutting mechanism; Serrated chip; TA15 titanium alloy

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2022.01/02.106

钛合金的应用广泛, 但其属于典型的难加工材料。改善钛合金的切削加工性是降低制造成本、提高加工效

率的重要途径。除了探究合适的加工工艺和参数外, 通过控制钛合金显微组织特征以达到改善钛合金切削加

\* 基金项目: “高档数控机床与基础制造设备”科技重大专项(2019ZX04017001)。

工性的目的亦是研究焦点。常见的钛合金改性方法存在着各自缺点,如合金元素添加及加工处理均属于不可逆过程;而钛合金热处理也存在易氧化、尺寸稳定性差等问题<sup>[1]</sup>。由于氢元素在钛合金的可逆合金化、亲和力高等特点<sup>[2]</sup>,热氢处理(Thermo hydrogen processing, THP)技术可以被用来改善钛合金的加工性,其主要过程分为置氢处理、加工、脱氢处理3个步骤<sup>[3]</sup>。氢氛围下的热处理置氢有效地避免了钛合金的氧化问题;而置氢处理后的钛合金加工性能得到改善,随后的脱氢处理又使得钛合金恢复自身良好的综合力学性能。

随着研究的深入,研究者们对氢致钛合金改性的机理主要分为氢增塑作用、氢致相变作用等,但当置氢量过饱和时,置氢钛合金又呈现出“氢脆”现象<sup>[4]</sup>。Zong等<sup>[5]</sup>对置氢处理后钛合金TC21的高温变形行为进行研究发现,TC21合金的流动应力随置氢量(H的质量分数)的增加先减小再增加,从而得到最佳置氢量为0.3%,此时的流动应力下降了26%。Li等<sup>[6]</sup>发现Ti-55合金在加入0.1% H后,其最佳超塑性温度降低了约125℃,该团队将这个原因归结于氢致使 $\beta$ 相的相变温度降低并促进位错运动,从而增加了 $\beta$ 相的体积分数。Losertová等<sup>[7]</sup>的研究表明,置氢后的Ti-6Al-4V合金在700~750℃时变形阻力降低,与未置氢组的微观组织相比,同一温度下置氢组出现了更多 $\beta$ 相。上述研究表明适量置氢对钛合金具有改性增益的特点,因此THP也被引入到改善钛合金切削加工性的研究中。Kolachev等<sup>[8]</sup>在钛合金TC6置氢后的毛坯粗车加工过程中发现,随着置氢量的提升,工件表面粗糙度降低,并有效地降低了刀具的磨损。危卫华等<sup>[9]</sup>对比了未置氢和置氢量0.5%的TC4合金车削后的刀具磨损差异,发现置氢处理后对应的刀具出现了明显的沟槽磨损形貌,其原因为氢致使钛合金弹性模量降低、锯齿化程度增大等。Fu等<sup>[10]</sup>针对置氢对TC4切屑成型的影响进行了研究,置氢处理后的切屑相较于原始试件切屑为更薄的片状结构,而置氢并水中淬火处理后的试件切屑则表现出锋利的锯齿边缘,这表明置氢对于大塑性变形导致的热塑性失稳产生了影响。

目前置氢处理改善钛合金切削加工性的研究主要聚焦于 $\alpha+\beta$ 型钛合金,且大部分研究是以切削加工性作为置氢工艺的评判指标,关于置氢对切削机理影响的研究较少。钛合金TA15(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)是一种高Al当量的近 $\alpha$ 型钛合金,兼具 $\alpha$ 型合金和 $\alpha+\beta$ 型合金的优点,被广泛地应用于飞机结构件制造,但也存在着难加工的特点,且其性能对热处理不敏感<sup>[11]</sup>。本文主要研究了置氢对合金力学性能、可切削加工性的影响,并从切屑的显微组织特点分析置氢对切削机理的影响规律。

## 1 试验及方法

本次试验试件为TA15棒料,其金相如图1所示,其显微组织特点:主要分布为片状 $\alpha$ 相交错成的网篮组织,同时魏氏组织特征并未完全消除,局部还留有清晰且完整的粗大原始 $\beta$ 晶粒晶界,在 $\beta$ 晶粒内有细长平直、互相平行的片状 $\alpha$ 相。这一特点使得该TA15合金强度、硬度高,塑性有所降低。TA15合金的主要化学成分及力学性能如表1和2所示。这些试件经置氢处理,对应的置氢工艺和置氢量如表3所示。

为得到置氢前后TA15合金的力学性能变化,选取3组不同置氢量(未置氢、0.219%、0.627%)试件进行准静态下的拉伸试验,在室温下用CMT4305电子万能试验机对3组试件分别进行准静态拉伸试验,获取准静态下的拉伸力学行为,并将所得的载荷-位移曲线转换为真应力-应变曲线。

切削测力试验所用刀具为肯纳公司硬质合金刀片

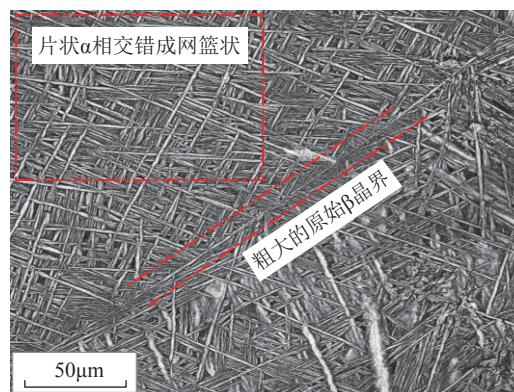


图1 TA15合金基体显微组织

Fig.1 Microstructure of TA15 alloy matrix

表1 TA15合金主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of TA15 alloy (mass fraction) %

化学成分		含量
合金元素	Al	5.5~7.0
	Zr	1.5~2.5
	Mo	0.5~2.0
	V	0.8~2.5
	Ti	余量
杂质	Fe	≤0.25
	Si	≤0.15
	C	≤0.10
	H	≤0.015
	O	≤0.15

表 2 TA15 合金主要物理力学性能

Table 2 Main mechanical properties of TA15 alloy

物理力学性能	数值
屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	855~959
密度 $\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	4.45
热导率 $K$ /(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	8
弹性模量 $E$ /GPa	123
抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	1040

表 3 置氢处理工艺参数

Table 3 Process parameters of THP

试样编号	温度 /°C	氢分压 /MPa	置氢量 (质量分数) /%
0#	800	0.2	0
1#	800	0.2	0.130
2#	800	0.4	0.219
3#	800	0.4	0.283
4#	850	0.4	0.510
5#	850	0.4	0.627

(牌号为:KC5010;IOS 编码:TPGN160304K)、刀柄 (IOS 编码:CTGPR2525M16),其中工作前角为 3°,工作后角为 6°,刃倾角为 0°,主偏角为 90°。在切削过程中利用 BSY-(X)FX 应变式四维测力仪对三向切削力进行测量,试验系统如图 2 所示,同时每组试验结束后均收集对应切削参数下的切屑,在后期制样并利用 3D 测量激光显微镜 (LEXT OLS4100) 观测所得切屑截面的显微组织形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 置氢对准静态拉伸变形行为的影响

通过对典型置氢量的钛合金试件进行室温拉伸试验可得到在准静态加载下合金的力学行为,通过相应公式可将载荷-位移曲线转换为真应力-应变曲线,如图

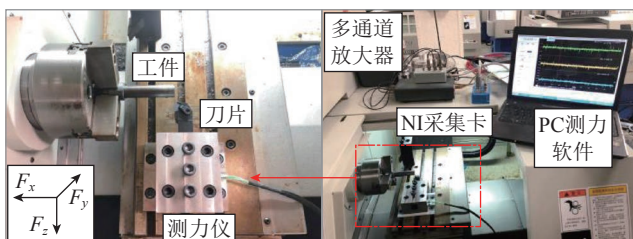


图 2 切削试验系统

Fig.2 Experimental setup

3 所示。由于合金在变形过程中没有明显的屈服点,故以质量分数为 0.2% 残留变形时的应力作为屈服强度,以置氢量为 0.627% 的试件为例描述获取屈服强度的方法。首先,通过图 3 可以得到,在材料未变形至应变约为 0.025 时该合金的应力-应变曲线呈现线性。需要注意的是,尽管应变在 0.025~0.075 阶段时应力-应变关系也近似线性,但两者存在明显的拐点(应变约为 0.025 时),故此认为材料发生弹性变形的阶段为应变在 0~0.025 时,通过此阶段的应力-应变数据进行线性拟合可以得到拟合直线  $l_1$ ,拟合优度为 98.65%,如图 4 (a) 所示。以点(0.0002,0)作平行于  $l_1$  的直线  $l_2$ ,记录  $l_2$  与对应试件的真应力-应变曲线交点  $A$ 。截取  $A$  点之后的真应力-应变数据,采用相应的流动应力模型进行非线性拟合即可得到塑性阶段下的应力-应变公式,优化算法为 Levenberg-Marquardt 算法。本文采用的拟合模型为 Ludwik 流动应力模型<sup>[12]</sup>,见式(1)。它是一种针对塑性应变段的典型定初值非饱和外推模型,该模型形式简便,且形式与 Johnson-Cook 本构模型的因式第一项近似,便于确定屈服强度值及后续研究。基于该模型可得到塑性段的试验数据与拟合曲线对比,如图 4 (b) 所示,所得拟合优度为 96.08%,屈服强度为 521MPa。

$$\sigma = \sigma_s + A \cdot \varepsilon^B \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为应力;  $\sigma_s$  为初始屈服强度;  $\varepsilon$  为应变;  $A$ 、 $B$  均为  $>0$  的系数。

断面收缩率  $\Psi$  可分别通过缩颈处截面积与原始试件直径对比获得,抗拉强度由工程应力-应变曲线可得,则置氢前后 TA15 合金的主要力学性能指标见表 4。结合图 3 和表 4 可得,适量氢元素的加入使得 TA15 合金的整体流动应力降低,这是氢致钛合金软化的一个重要表现,尤其当置氢量为 0.627% 时,屈服强度仅为未置氢试件的 57.82%,这表明此时合金的塑性变形更容

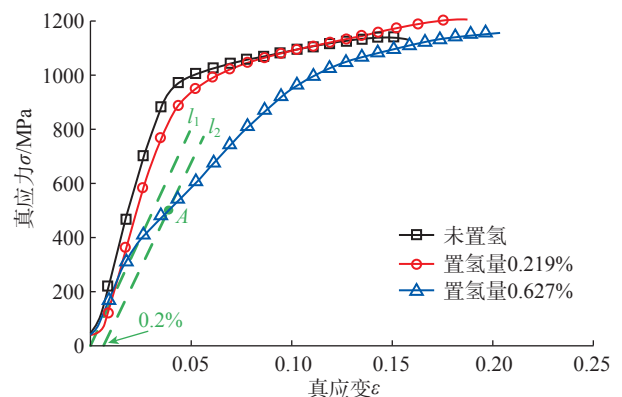


图 3 准静态拉伸下的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve on quasi-static tension test

易发生。同时断面收缩率验证了氢致增塑效应在 TA15 合金中的存在：一定范围内，钛合金塑性随着置氢量增加而增大；而在抗拉强度上，置氢前后的差距并不大(置氢量为 0.627% 的试件为未置氢的 94.06%)，计算可得高置氢组的屈服强度比较低，这进一步反映其塑性好、加工硬化能力高的特点。相关研究表明，适量的氢可以降低  $\alpha \rightarrow \beta$  的相变温度，且氢是  $\beta$  相的稳定元素，合金内滑移系较多、塑性较好的  $\beta$  相体积分数增大，位错滑移阻力降低，呈现较好的增塑效果<sup>[13]</sup>；同时，氢可以促进  $\alpha$  相内的位错运动<sup>[14]</sup>，而合金的塑性变形是位错滑

移的宏观体现，氢促进更多位错产生滑移进而有利于塑性变形的进行。

### 2.2 置氢对切削力的影响

为便于描述，将 6 组不同置氢量分为 3 组：未置氢组、低置氢量组(置氢量  $\leq 0.3\%$ )以及高置氢量组(置氢量  $> 0.3\%$ )，各组在正交车削测力试验中得到的切削力如图 5 所示。可知，低置氢量组与未置氢组在切削力曲线的趋势和取值上较为接近，其切削力随切削速度的增加呈现出明显的先增加后下降的趋势，主切削力的取值范围在 150~200N，进给抗力的取值范围在 40~100N。而高置氢量组的切削力则显著大于其他两组，主切削力的取值范围在 200~280N，进给抗力的取值范围在 150~260N。

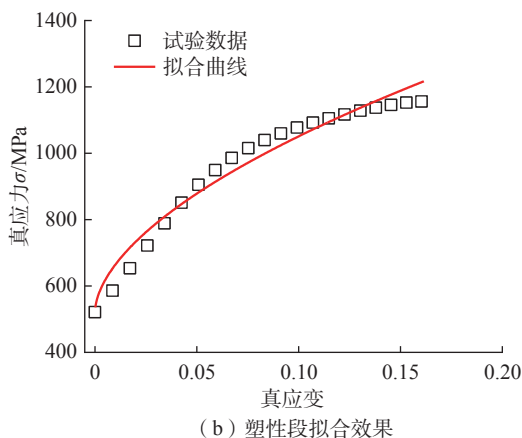
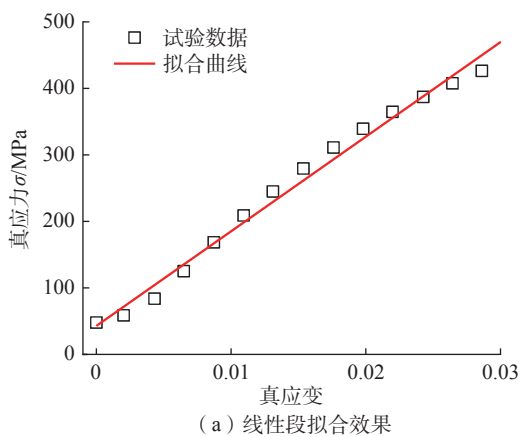
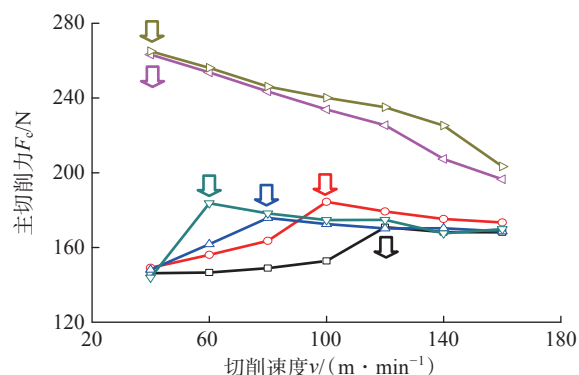


图 4 试验数据与拟合曲线的对比(置氢量 0.627%)  
Fig.4 Comparison of experimental data and fitting curve (hydrogen content 0.627%)

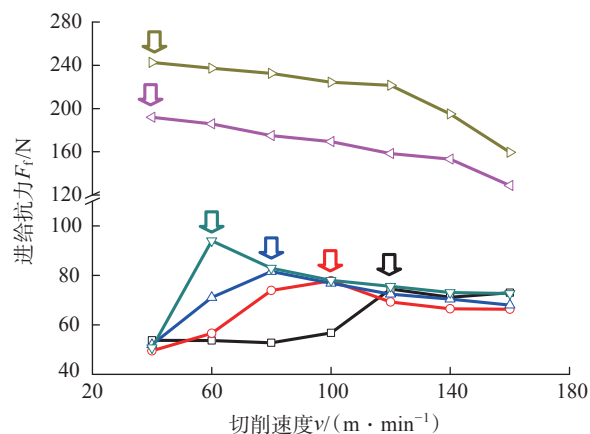
表 4 置氢 TA15 合金准静态拉伸下的主要力学性能指标

Table 4 Main mechanical properties of hydrogen TA15 alloy under quasi-static tension

试件	断面收缩率 $\Psi/\%$	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_s/\text{MPa}$	屈强比 $\sigma_{0.2}/\sigma_s$
未置氢	27.91	901	1010	0.89
置氢量 0.219%	28.85	720	988	0.73
置氢量 0.627%	31.86	521	950	0.55



(a) 不同置氢量下主切削力随切削速度变化趋势



(b) 不同置氢量下进给抗力随切削速度变化趋势

图 5 主切削力和进给抗力随切削速度变化曲线

Fig.5 Cutting force and feed resistance against cutting speed

通过拉伸试验可知,尽管准静态下变形时该组材料的应力相较其他两组较小,但是该组试件塑性大,切削变形中材料的应变硬化和应变率强化效应十分显著,故而使得切削力较大;随着速度继续增加,切削温度急剧增加,热软化效应占据主导地位,主切削力、进给力均随切削速度的增加而显著下降。切削速度不仅影响切削温度,同样也影响着材料切削变形过程中的应变率。只有在某一临界速度时,高速切削的剧烈高温使得热软化效应占据绝对主导地位时,切削力才会随着切削速度的增大而下降。

为研究置氢对该临界速度的影响,需要对图 5 (a) 和 (b) 各组置氢量的切削力曲线下降拐点出现的位置 (图中箭头) 进行标注分析。结果表明置氢量对 TA15 合金切削力下降拐点的影响也较为显著,随着置氢量的增加,切削力曲线中下降拐点对应的切削速度越小,如图 6 所示。TA15 合金的切削过程可以认为是塑性材料复合加载下的变形行为,应变硬化效应、应变率强化效应使得材料应力增大,而温度升高导致的热软化效应使得应力降低,材料在变形过程中受这 3 种效应耦合作用,承载力的变化、流动应力曲线特征等均可以认为是这 3 种效应相互竞争的结果。上述分析表明,氢元素的引入一方面改变了材料的显微组织结构特征及分布,使得材料塑性增大,加工硬化严重,导致低速段的切削力显著增大;另一方面氢的引入又诱使钛合金的  $\alpha$  相和  $\beta$  相更容易发生高温软化效应<sup>[15]</sup>,这促进了 TA15 合金的热软化进程,提前改变了之前以应变率强化主导的竞争关系,转而以热软化效应主导,宏观表现为切削力随速度增大而下降,而临界速度也随置氢量增加而降低。

### 2.3 置氢对锯齿切屑显微组织演变的影响

在钛合金的高速切削加工过程中,变形区的变形成程

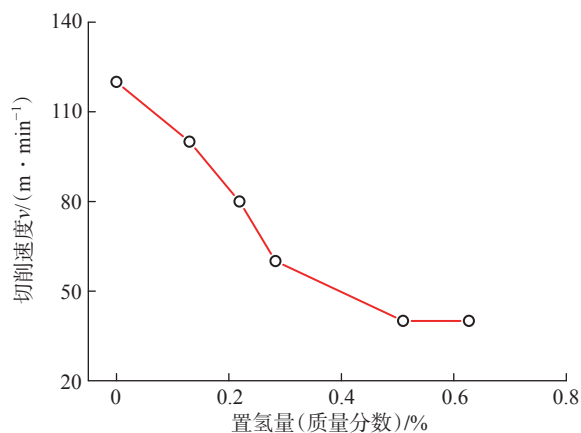


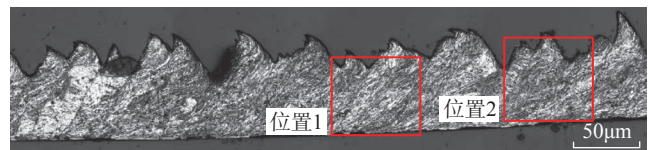
图 6 置氢量与拐点速度的关系

Fig.6 Hydrogen content against cutting speed of turning point

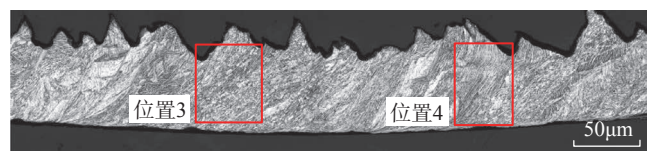
度、变形速率、温度场和冷却速率将综合影响金相中各相组织含量、初生  $\alpha$  相的形态和分布,进而决定了材料的切削性能,切屑的形态及其内部显微组织也因此各异。

为探究置氢对 TA15 合金切削性能的影响,本文对高速切削下的典型置氢量组钛合金的切屑进行金相观测,结合切屑锯齿形态及其内部显微组织结构特征两方面进行研究。3 组不同置氢量的 TA15 合金经过切削后的切屑形貌及显微组织如图 7 和 8 所示。图 8 中的位置 1~6 对应图 7 所注位置的显微组织特点,3 组试件的切屑均在切削参数  $v=140m/min, f=0.05mm/r, a_p=1.5mm$  下获得。

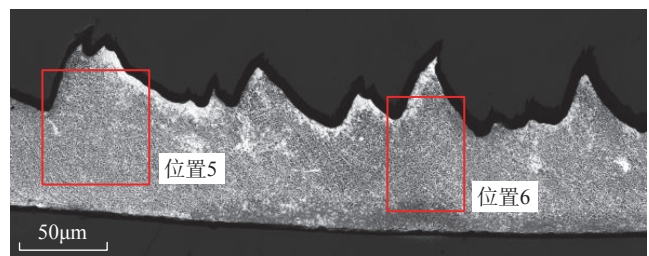
通过切屑形态的对比 (图 7) 可以发现,相比于未置氢组和低置氢量组 (0.219%),高置氢量组 (0.627%) 的切屑锯齿化程度和锯齿化频率显著低于其他两组。由于切削动作凿碎了魏氏组织原来的大  $\beta$  晶粒晶界,这个过程中伴随着大量的变形热,原始晶界的破碎必将引发晶粒的重新分布,  $\alpha$  相形态的形状和位向不同。从图 8 (a) 和 (b) 可知,未置氢组切屑内部的显微组织差异较大 (位置 1),锯齿单元内和剪切带内的形态存在明显差异,前者为变形后的网篮组织,后者为沿着变形方向拉伸后的等轴  $\alpha$  相;相较于基体的显微组织 (图 1),部分切屑内部单元仍然保留着和基体一样的网篮组织特征 (位置 2),说明此处的塑性变形仅使得晶粒发生细化,网篮组织受拉伸等作用发生了形变和转向。这表明高速



(a) 未置氢的原始试件



(b) 置氢量为0.219%的TA15合金



(c) 置氢量为0.627%的TA15合金

图 7 不同置氢量下的切屑形貌

Fig.7 Morphology of chip with different hydrogen contents

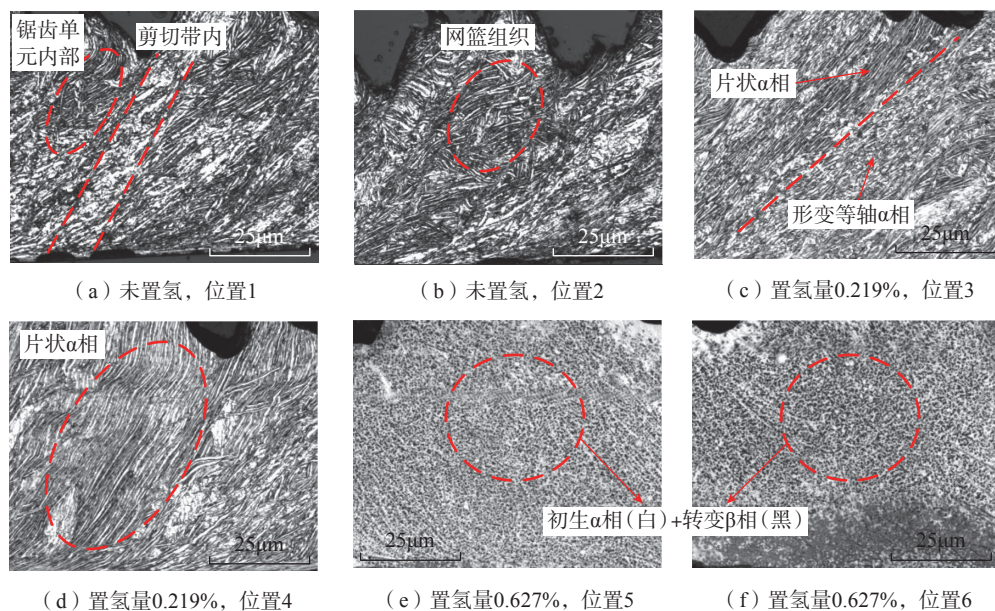


图8 不同置氢量下TA15合金的切屑内显微组织特征

Fig.8 Microstructure characteristics of TA15 alloy chip with different hydrogen contents

切削使得切屑内部同时发生了均匀塑性变形与局部剧烈塑性变形。均匀的塑性变形的呈现方式以网篮组织受到变形、晶粒细化为主,主要分布在锯齿单元内;而局部剧烈塑性变形主要分布在剪切带内及其附近,由于钛合金热导率较低,塑性做功产生的大量热量来不及传导,导致了剪切带内绝热剪切的发生,剪切带内出现转变,导致了等轴初生 $\alpha$ 相的产生。

与未置氢的原始试件不同的是,适量置氢(0.219%)后的切屑单元内部的显微组织则呈现出细长平直、相互平行的片状 $\alpha$ 相,见图8(c)和(d)。这说明置氢使得材料内显微组织的排列分布更为有序,使得位错的滑移更加容易,进而塑性变形更加容易。但与未置氢组相似的是,该组切屑的内部同样存在塑性变形不均匀的特点,位置3中的分离线左上方为平行的片状 $\alpha$ 相,而右下方同样存在由于局部剧烈塑性变形产生的形变等轴 $\alpha$ 相。两组切屑内部各自的显微组织差异均表明锯齿单元间的剪切带都存在局部剧烈塑性变形,结合其锯齿形貌和剪切带的分布特点,可以推断锯齿切屑的成因为局部剧烈塑性变形导致的绝热剪切,剪切带为转变带。

当置氢量提高至0.627%时,切屑内部晶粒更为细碎,显微组织分布十分均匀,切屑内各位置的组织特征差异小,其主要特点为细小的等轴初生 $\alpha$ 相(白色)环绕着转变 $\beta$ 相(黑色),见图8(e)和(f)。这些组织的产生主要由于片状 $\alpha$ 相的晶粒碎化以及氢促进了 $\alpha \rightarrow \beta$ 相的转变,而转变 $\beta$ 相则为 $\beta$ 相在冷却过程中

的分解产物。等轴晶粒的产生、滑移系更多的 $\beta$ 相组织含量增大也解释了上述拉伸试验中该组试件塑性较好的原因。同时,该组切屑内部未见明显的剪切带,且各区域显微组织差异较小,这说明氢含量的增加可能抑制了局部剧烈塑性变形的发生,从而使得锯齿切屑的成形受阻。这从该组的切屑形貌表现出锯齿化程度小、频率低亦可得到验证,见图7(c)。锯齿切屑的产生显著影响切削力的波动,引起刀具系统的振动,对刀具磨损和表面质量造成影响,可见置氢量为0.62%后使得合金的锯齿切屑特征减少,对提高合金的可切削加工性是有益的。

### 3 结论

本文通过准静态拉伸试验、正交车削测力试验及金相观测研究了不同置氢量对TA15合金的力学性能、可切削加工性及切削过程中的塑性变形行为的影响,主要得到以下结论。

(1) 试验条件下,适量的置氢可软化TA15合金,置氢后整体流动应力较未置氢组减小,特别是在屈服强度上,高置氢组(0.627%)仅为未置氢组的57.82%,而抗拉强度受氢元素影响不大;同时材料的塑性随置氢量增加而提高,结合屈服强度比可得,高置氢组塑性好且加工硬化严重。

(2) 置氢量增大时切削力显著增加,这主要归因于材料置氢后塑性增强,加工硬化现象明显。但同时置氢量的提高也促使了 $\alpha$ 相、 $\beta$ 相的高温软化进程,使得热

软化效应在切削变形过程中更快占据主导地位,宏观表现为切削力下降拐点对应的临界速度随置氢量提高而下降,这指导了加工中高置氢组应采用较高切削速度进行加工。

(3) 对比切削前后的 TA15 合金显微组织特征可得,切削过程使得粗大的  $\beta$  晶界破碎,均匀塑性变形区(锯齿切屑单元内)发生网篮组织的碎化和形变特点,主要组织特征不变;而剪切带内及其附近区域观测到显著的相变特征:有等轴  $\alpha$  相晶粒产生,同时其又受塑性变形沿切削方向发生拉伸变形。

(4) 从低置氢组(0.219%)的切屑显微组织可得,少量的氢元素使得合金原先交错的片状  $\alpha$  相重新排列为互相平行的有序分布,这使得位错的滑移攀升更为容易,可能是氢致增塑的原因之一。低置氢组的切屑内部显微组织分布和未置氢组类似,同时存在着均匀塑性变形和局部剧烈塑性变形。通过其锯齿形貌及其内部的相变特点,推测两者的锯齿切屑成因主要归功于绝热剪切的发生。

(5) 高置氢量组的切屑内部显微组织均匀分布,一致性较高,主要为初生等轴  $\alpha$  相和  $\beta$  相冷却产物转变  $\beta$  相组成,同时切屑内未见明显剪切带,这表明其内部主要发生的是均匀塑性变形。其切屑形貌相较于另外两组表现出更低的锯齿化程度和锯齿化频率,可以推测置氢量的增加提高了合金整体的塑性,抑制了局部的剧烈塑性变形,使得锯齿特征不明显。这有助于降低切削力的波动和刀具系统的振动,保护刀具和已加工表面。

### 参考文献

[1] 张利军,李时威,袁抒,等. 钛合金材料切削加工的真空热处理技术[J]. 金属加工(热加工),2012(15): 66-68.

ZHANG Lijun, LI Shiwei, YUAN Shu, et al. Vacuum heat treatment technology for cutting titanium alloy[J]. Metal Working (Hot Working), 2012(15): 66-68.

[2] SENKOV O. Thermohydrogen processing of titanium alloys[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24(6): 565-576.

[3] 温道胜. 置氢 Ti-46Al-2V-1Cr-0.3Ni 合金高温变形规律及改性机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

WEN Daosheng. Research on the deformation behavior and modification mechanism of hydrogenated Ti-46Al-2V-1Cr-0.3Ni alloy at high temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[4] KOLACHEV B A, TALALAEV V D, EGOROVA Y B, et al. Effect of hydrogen on the machinability of VT5-1 alloy by cutting[J]. Materials Science, 1996, 32(6): 753-759.

[5] ZONG Y Y, LIANG Y C, YIN Z W, et al. Effects of hydrogen addition on the high temperature deformation behavior of TC21 titanium

alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(18): 13631-13637.

[6] LI X F, JIANG J, WANG S, et al. Effect of hydrogen on the microstructure and superplasticity of Ti-55 alloy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(9): 6338-6349.

[7] LOSERTO V A M, HARTMANN M, SCHINDLER I, et al. Hydrogen treatment of titanium based alloys[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 266: 012007.

[8] KOLACHEV B A, EGOROVA Y B. Mechano-hydrogen treatment of titanium alloys with rough turning[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2008, 50(5-6): 265-268.

[9] 危卫华,徐九华,傅玉灿. 置氢处理对钛合金切削时刀具磨损形态的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(20): 128-130, 134.

WEI Weihua, XU Jiuhua, FU Yucan. Influence of hydrogenating treatment of titanium alloy on tool wear morphology in cutting[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(20): 128-130, 134.

[10] FU X S, CHEN G Q, YANG Q, et al. The influence of hydrogen on chip formation in cutting Ti-6Al-4V alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 371-375.

[11] 姚彭彭. TA15 钛合金高温变形机制及热处理工艺研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

YAO Pengpeng. Research on high temperature deformation mechanism and heat treatment process of TA15 titanium alloy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.

[12] KOC P, ŠTOK B. Computer-aided identification of the yield curve of a sheet metal after onset of necking[J]. Computational Materials Science, 2004, 31(1-2): 155-168.

[13] 宗影影. 钛合金置氢增塑机理及其高温变形规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

ZONG Yingying. Study on the hydrogen enhanced plasticity mechanism and deformation behaviors of titanium alloys at high temperatures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[14] ZHANG H L, KOU H C, YANG J R, et al. Microstructure evolution and tensile properties of Ti-6.5Al-2Zr-Mo-V alloy processed with thermo hydrogen treatment[J]. Materials Science and Engineering, 2014, 619: 274-280.

[15] 黄树晖. 置氢钛合金与纯锆高温软化行为及其对锻造变形的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

HUANG Shuhui. High temperature softening behavior of hydrogenated titanium alloys and pure zirconium and its effect on forging deformation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

通讯作者: 孙剑飞, 副教授, 博士生导师, 研究方向为难加工材料切削加工。

(责编 阳光)