

氢对 TC4 合金物理力学性能的影响及其与切削性能的相关性

Relationship Between Effect of Hydrogen on Physical and Mechanical Properties and Its Machinability for TC4 Titanium Alloy

北京航空制造工程研究所 李红 侯红亮
大连理工大学材料科学与工程学院 孙中刚

[摘要] 分析研究了 TC4 合金经适当氢处理后的微观组织和物理力学性能变化规律,并通过切削试验研究了氢对切削加工性能和刀具磨损的影响,初步分析了二者的相关性。

关键词: 氢 TC4 合金 物理性能 力学性能

[ABSTRACT] The change law of microstructure, physical properties of hydrogenated TC4 titanium alloy is studied. Through cutting experiment, the effect of hydrogen on cutting mechanical properties and cutting tool wear is analyzed.

Keywords: Hydrogen TC4 titanium alloy Physical properties Mechanical properties

钛及钛合金具有重量轻、比强度高以及优良的耐低温和耐腐蚀性的特点,但因其弹性模量小,屈服比大,摩擦系数大,热传导率低(仅为铁的 1/4),导致工件在切削过程中易变形,切削热积聚于切削刃附近的小面积内不易散发,加剧刀具的磨损,切削效率低^[1]。利用氢的可逆合金化作用,通过适当的置氢处理,可改变合金的相成分和组织结构,从而改变钛合金微观组织、物理性能与力学性能,以达到改善钛合金的切削性能的目的。本课题研究了氢对 TC4 合金微观组织、物理性能与力学性能的影响规律,为置氢钛合金切削改性机制分析提供依据。

1 试验材料

试验材料采用 TC4 棒材,采用管式氢处理炉置氢,高真空下 800℃充氢,保温 6~10h,随炉冷却。

切削试验采用车削方法,刀具材料为 WC-Co 硬质合金。车削力及车削温度测量试样尺寸为 $\phi 20\text{mm} \times 100\text{mm}$,切削速度 v 为 30m/min,进给量 f 为 0.1mm/r,切削深度 a_p 为 1mm。车削力的测量采用三向压电式测力系统,南京航空航天大学自制的热电偶快速标定装置和 HP3562 动态信号分析仪组成测温系统,对车

削温度进行测量。采用显微摄像系统,结合南昌航空航天大学研发的图象测量分析软件,对刀具后刀面磨损进行拍摄测量,得到后刀面磨损值 VB 。

2 结果与讨论

2.1 置氢钛合金物理性能研究

(1) 热膨胀系数。

置氢与未置氢合金的热膨胀系数变化如图 1 所示。分析表明,低温时,置氢 TC4 合金的热膨胀系数变化不明显,随温度升高,热膨胀系数的变化较为显著。热膨胀系数随温度先升高后下降,其升降幅度随温度的增加而加大。氢质量分数超过 0.5%时,热膨胀系数下降,低于未置氢 TC4; 当氢质量分数达 0.64%时,25~300℃下降了 0.280×10^{-6} ,25℃~500℃下降了 0.238×10^{-6} ,25℃~800℃下降了 1.016×10^{-6} ,随着温度的提高,下降幅度增大。

(2) 热传导率和比热容。

TC4 钛合金置氢后热导率和比热容的变化如图 2、3 所示。结果表明,置氢前后 TC4 材料的比热容和

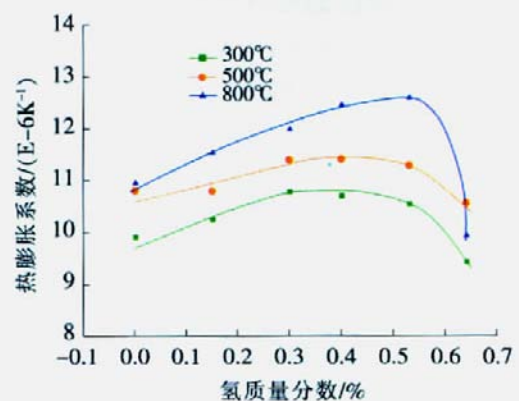


图 1 置氢 TC4 合金的热膨胀系数与氢质量分数关系曲线

Fig.1 Relation between thermal expansion coefficient and hydrogen weight content of hydrogenated TC4 titanium alloy

热传导率的变化规律在各个温度点不同,但随着测试温度的升高,不同氢含量的合金热导率和比热容普遍提高。置氢 TC4 在室温状态、300℃、500℃时,比热容随氢含量的增加快速升高;但在 800℃时,随氢含量的增加先升后降,当氢质量分数在 0.15%~0.55%时,比热容达最大值。

置氢 TC4 在室温状态和 300℃时,随氢含量的增加,热传导率先有微小下降后又升高;500℃时曲线接近直线,说明在此温度点热传导率随氢含量的增加快速升高;在 800℃时随氢含量的增加快速升高后又下降,当氢质量分数在 0.15%~0.55%时,热传导率达最大值。

综合分析表明,置氢 TC4 合金在 500℃时,其热传导率和比热容提高最为显著,根据置氢 TC4 的切削试验,切削温度范围在 450~520℃,说明置氢使得 TC4

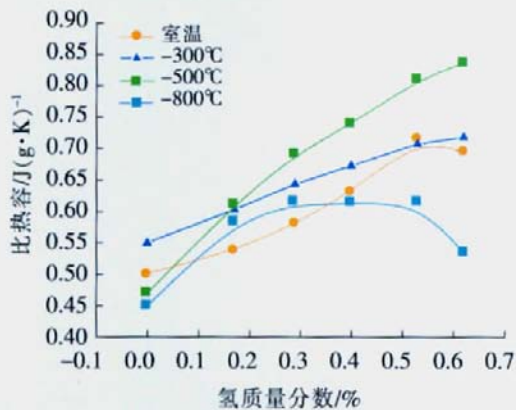


图2 置氢 TC4 比热容与氢含量的关系曲线
Fig.2 Relation between specific heat capacity and hydrogen weight

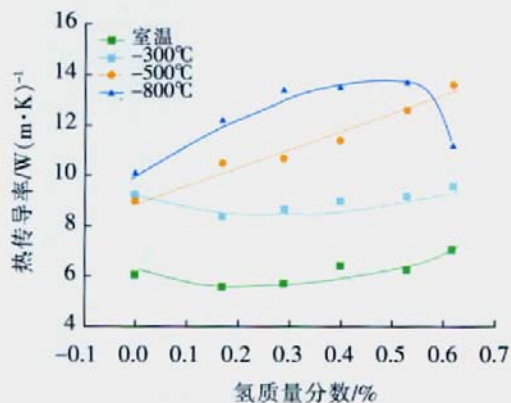


图3 置氢 TC4 热传导率与氢含量的关系曲线
Fig.3 Relation between thermal conductivity and hydrogen weight

的导热性能明显改善,有利于降低切削区温度,改善切削性能。

(3)密度。

金属密度取决于它们的原子质量、原子间的结合力、原子的排列形式等。合金的密度不仅取决于合金元素的密度,还取决于它们之间的相互作用以及合金的成分配比。TC4 置氢后, α 相与 β 相的比例发生变化,氢是 β 相稳定元素,氢以间隙元素形式存在于钛合金中。渗氢后 α 相的密排六方晶格和 β 相的体心立方晶格都发生了明显的应变,氢原子进入 β 相后,使得 β 相的点阵常数增大,晶格体积膨胀^[2]。置氢导致的钛合金晶格体积膨胀对密度有所影响。如图 4 所示,置氢后,随着氢含量的增加,密度稍有减小。

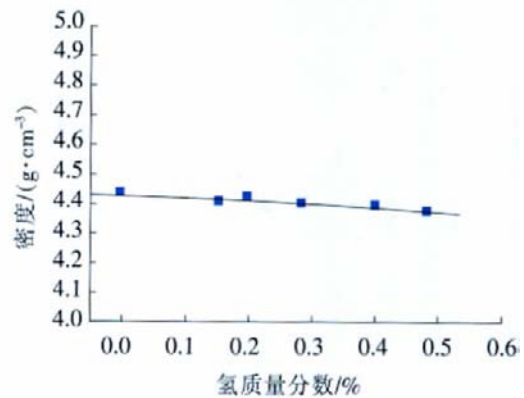


图4 氢质量分数对 TC4 密度的影响
Fig.4 Effect of hydrogen weight content on TC4 density

(4)摩擦系数。

置氢 TC4 合金摩擦系数随氢含量的变化如图 5 所示。室温下置氢钛合金的摩擦系数变化不大,变化范围在 0.59~0.62,且随氢含量的增加有微小的减小趋势;500℃条件下,摩擦系数较室温下大大降低,平均值约为 0.174。置氢后摩擦系数减小,当氢质量分数为 0.2%时,摩擦系数最小,下降了约 14%,当氢含量继续增加时,摩擦系数有所增大,但仍低于未置氢 TC4。根据切削试验,切削温度范围在 450~520℃,说明置氢有利于减少钛合金切削时的摩擦磨损,降低切削热,提高刀具寿命。

2.2 置氢钛合金力学性能研究

(1)弹性模量。

氢含量对 TC4 弹性模量的影响如图 6 所示。结果表明,随氢含量的增加,弹性模量略有下降,并逐渐趋于稳定。理论分析表明,弹性模量提高,有利于改善钛

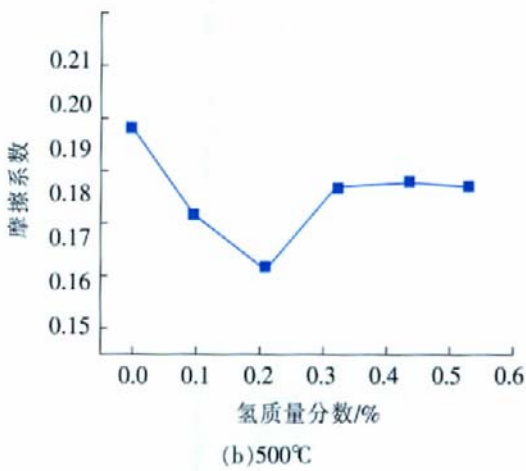
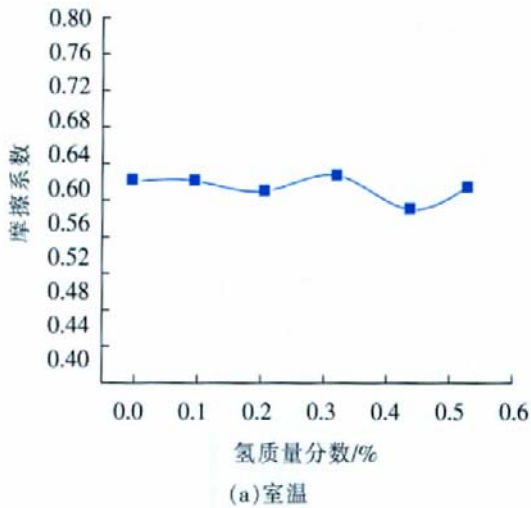


图5 氢质量分数对TC4摩擦系数的影响
Fig.5 Effect of hydrogen weight content on TC4 friction coefficient

合金的切削性能,但置氢后钛合金的弹性模量略有减小,不能起到改善钛合金切削性能的作用。

(2)室温力学性能。

氢对钛合金室温力学性能的影响见图7~10所示。结果表明,随着氢含量的增加,置氢TC4的抗拉强度先升后降,当氢质量分数在0.1%~0.3%时,抗拉强度最大,0.4%左右迅速下降;置氢后屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 急速下降,当氢质量分数为0.5%左右时,屈服强度较未置氢试件下降了约50%;断面收缩率和延伸率随氢含量的变化趋势一致,总体呈现下降状态,但氢质量分数在0.2%~0.4%时,出现了急剧下降的现象。由此说明,置氢改变了钛合金的塑性,对钛合金的切削加工将产生重要影响。

(3)冲击韧性。

氢对TC4合金冲击韧性的影响曲线如图11所

示。结果表明,置氢后钛合金的冲击韧性降低,且下降速度比较快,当氢质量分数达0.465%时,其冲击韧性

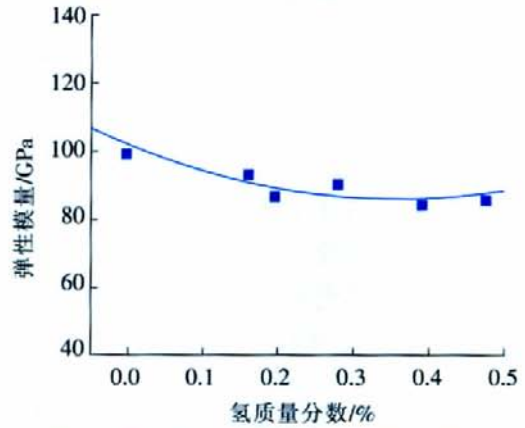


图6 氢含量对TC4弹性模量的影响
Fig.6 Effect of hydrogen weight content on modulus of elasticity of TC4

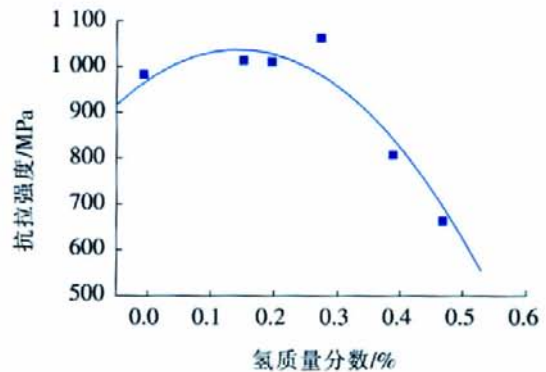


图7 氢质量分数对TC4抗拉强度的影响
Fig.7 Effect of hydrogen weight content on TC4 tensile strength

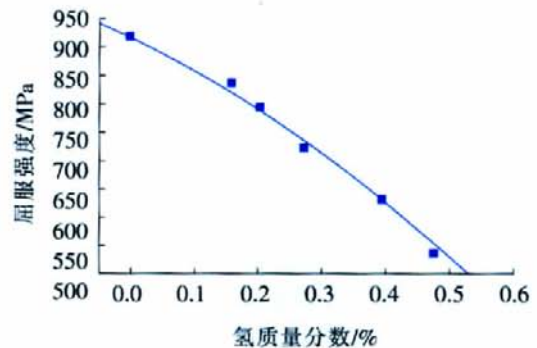


图8 氢质量分数对TC4屈服强度的影响
Fig.8 Effect of hydrogen weight content on TC4 yield strength

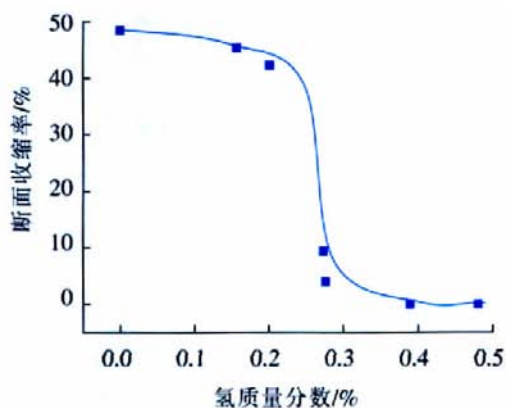


图9 氢质量分数对TC4断面收缩率的影响
Fig.9 Effect of hydrogen weight content on contraction of area of TC4

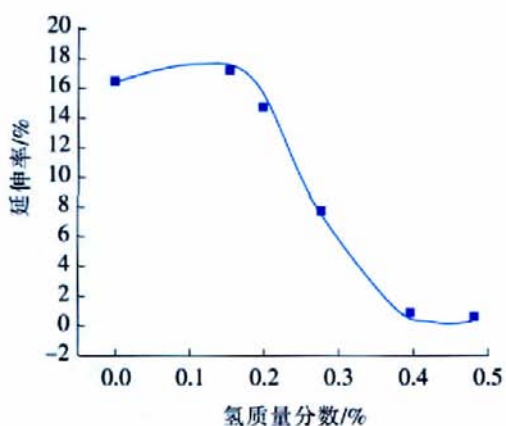


图10 氢质量分数和对TC4延伸率的影响
Fig.10 Effect of hydrogen weight content on TC4 elongation

已经接近零点。

2.3 置氢钛合金切削性能研究

(1) 氢对切削性能的影响。

切削力、切削温度与氢含量关系分别如图12和图13所示。分析表明,800℃置氢后切削力略有下降,切削温度下降显著,置氢质量分数为0.2%~0.3%时,切削力降幅达8%,切削区温度降低50~70℃,降幅达13.2%,此后,随着置氢量的增加,切削力和切削温度升高。

结合前述的置氢钛合金物理力学性能的变化规律,分析表明,TC4合金置氢后比热容和热传导率提高,有利于切削区的散热,从而使切削区温度明显降低;同时,由于TC4合金置氢后,钛合金的拉伸强度、

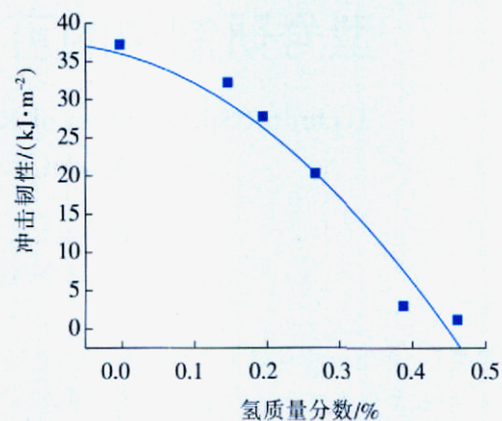


图11 氢质量分数对TC4冲击韧性的影响
Fig.11 Effect of hydrogen weight content on TC4 impact toughness

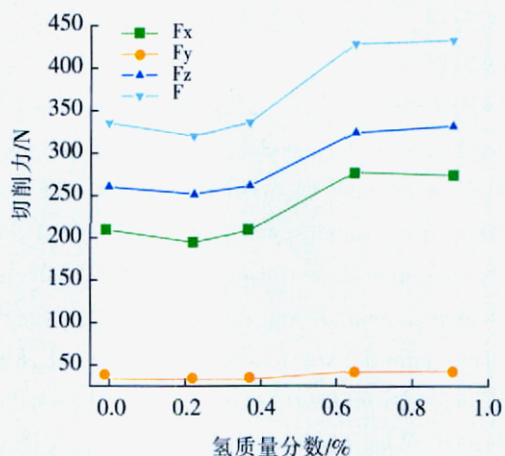


图12 切削力与氢质量分数的关系
Fig.12 Relation between cutting force and hydrogen weight content

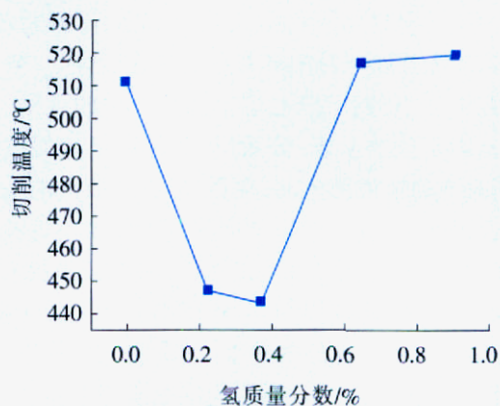


图13 切削温度与氢质量分数关系
Fig.13 Relation between cutting temperature and hydrogen weight content

(下转第88页)

表3 修正后的某型飞机 RSE 技术规范清单

项目	规范名称	规范类别
提出和确定技术要求	系统可靠性要求(补)	系统规范
	系统维修性要求(补)	系统规范
	系统测试性诊断方案和测试性要求(补)	系统规范
	系统保障性要求(补)	系统规范
	系统安全性要求(补)	系统规范
	系统可靠性设计准则	系统规范
	系统维修性设计准则	系统规范
	系统测试性设计准则(补)	系统规范
	系统保障性设计准则(补)	系统规范
	系统安全性设计准则(补)	系统规范
	试飞阶段质量保证要求	系统规范
	首飞前研制质量保障要求	系统规范
	新成品设计定型可靠性鉴定试验故障报告、分析和纠正措施系统实施要求	研制规范
	二级定型产品设计定型可靠性鉴定试验通用技术要求	研制规范
	电子设备基本可靠性预计方法与要求	研制规范
个体防护设备可靠性设计准则	产品规范	
元器件筛选规范	材料规范	
验证程序和方法	系统可靠性验证程序和方法(补)	系统规范
	系统维修性(含测试性)验证程序和方法	系统规范
	系统测试性验证(评价)方法	系统规范
	系统保障性验证程序和方法(补)	系统规范

术要求,保证性能专业和专门专业的有机融合。

参 考 文 献

[1] 张锡纯. 标准化系统工程. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992.

[2] 阮镰, 章国栋. 工程系统的规划与设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.

[3] Yang W M, Ruan L, Tu Q C. Reliability system engineering-theory and practice // Proceedings of the second international conference on reliability, maintainability and safety (ICRMS94). Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 1994.7-10.

[4] 杨为民. 可靠性·维修性·保障性总论. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[5] [美]国防系统管理学院. 系统工程管理指南. 北京: 国防工业出版社, 1991.

[6] Benjamin S Blanchard, Wolter J. Fabrycky. Systems Engineering and Analysis. 北京: 清华大学出版社, 2006.

(责编 淡蓝)

(上接第 83 页)

屈服强度和冲击韧性的明显下降,致使合金的切削力有所降低。

(2)氢对刀具磨损的影响。

通过对不同置氢量试样进行切削试验,以后刀面磨损值为刀具磨损评价基准,结合刀具磨损测量分析软件进行分析,刀具后刀面磨损值 VB 值见表 1。

分析表明:随着切削路程的增加,未置氢试件切削刀具的后刀面磨损较快,切削路程为 797m 时,后刀面磨损值 VB 已经达磨钝标准;而其它置氢试件对应的刀具后刀面磨损尚处于初期磨损状态,说明置氢有效减少了钛合金切削时的摩擦磨损现象。分析其原因,一方面置氢后钛合金摩擦系数降低,另一方面置氢后钛合金比热容、热传导率增加,降低了切削区温度,从而减轻了刀具磨损,对提高刀具寿命起到了积极的作用。

3 结 论

(1)TC4 合金经 800℃置氢炉冷,适量的氢含量可以提高比热容和热传导率,减小摩擦系数,有利于降低切削温度,有效减少钛合金切削时的摩擦磨损,提高刀具寿命。

(2)置氢 TC4 合金的室温抗拉强度、屈服强度和冲击韧性下降,有利于降低切削力,减轻刀具磨损。

表 1 后刀面磨损 VB 测试结果

切削路程/m	131	377	598	797	974	1 200	1 434	
VB/ mm	H:0%	0.022	0.074	0.200	0.315	0.405	无	无
	H:0.08%	0.015	0.035	0.055	0.057	0.06	0.080	0.106
	H:0.24%	0.026	0.034	0.035	0.040	0.045	0.046	0.049
	H:0.48%	0.032	0.035	0.038	0.040	0.042	0.050	0.050

参 考 文 献

[1] 科里沃霍夫 B A. 耐热合金和钛合金的切削加工性. 北京:国防工业出版社,1973.13-16.

[2] Gu J, Hardie D. Effect of Hydrogen on Structure and slow strain rate Embrittlement of mill annealed Ti6Al4V. Mater Sci Technol, 1996, 12: 802-807.

[3] 谭美田.金属切削微观研究.上海:科学技术出版社, 1988.36-37.

[4] Barry J, Byrne G. Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy. Machine Tools & Manufacture, 2001(41): 1 055-1 070. (责编 依然)