DOI: 10.3901/JME.2014.01.178

硬质合金刀具切削 Ti6Al4V 的磨损机理及特征*

姜增辉 王琳琳 石 莉 吴月颖
(沈阳理工大学机械工程学院 沈阳 110159)

摘要: 为研究硬质合金刀具在不同切削速度下切削钛合金时, 刀具材料中的合金成分对刀具磨损机理及特征的影响, 采用 YG8、YT15 和 YW2 三种牌号的硬质合金刀具进行干切削 Ti6Al4V 试验。研究切削速度分别为 48 m/min、71 m/min、100 m/min 时, 三种硬质合金刀具的磨损形貌与磨损机理, 分析在低、中、高速切削时三种刀具的磨损机理对其磨损速度的影响。结果表明: 低速切削时三种刀具均以黏结磨损为主; 高速切削时 YG8 刀具仍以黏结磨损为主, YT15 刀具在发生黏结磨损的同时会产生一定程度的扩散磨损和氧化磨损, YW2 刀具的磨损中黏结磨损、扩散磨损和氧化磨损占据同样地位; 高速切削时选用 YW 类刀具更为适合。

关键词: 硬质合金刀具; 钛合金; 刀具磨损; 磨损机理; 切削速度

中图分类号: TG506

Study on Tool Wear Mechanism and Characteristics of Carbide Tools in Cutting Ti6Al4V

JIANG Zenghui WANG Linlin SHI Li WU Yueying
(School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159)

Abstract: To study the influence of the tool alloy composition on tool wear mechanism and characteristics under different cutting speed while cutting Ti6Al4V with the carbide tool, the dry cutting tests are done by YG8, YT15 and YW2 three carbide tools. The wear morphology and wear mechanism are studied at cutting speed of 48 m/min, 71 m/min and 100 m/min. It is analyzed that the wear mechanism influence on the rate of tool wear the under low, medium and high cutting speed. The results show that the adhesion wear is the main wear way of three tools at low-speed cutting, and at high-speed cutting the adhesion wear is dominant for YG8, and along with a certain extent of diffusion and oxidation wear the adhesion wear happens for YT15, and the adhesion, diffusion and oxidation wear are equally important wear way for YW2. It is suit to adopt YW carbide tool in high-speed cutting.

Key words: carbide tool; titanium alloy; tool wear; wear mechanism; cutting speed

0 前言

Ti6Al4V 是航空航天工业应用的一种重要钛合金材料, 由于其导热性差、化学活性高、弹性模量小, 在切削加工中会出现切削温度高、刀具磨损严重等现象, 而刀具的严重磨损已成为目前阻碍钛合金切削速度和切削效率提升的主要原因, 这导致钛合金零件的制造成本占其总成本的比例一直居高不下, 因此对钛合金切削刀具磨损机理及特征的研究具有重要意义。HARTUNG 等^[1]对钛合金加工中的钨钴类硬质合金和 PCD 刀具磨损机理进行了深入

研究, 得到两种刀具在切削时生成 TiC 界面层, 可以减缓刀具磨损。JAWAID 等^[2]使用不同晶粒尺寸的硬质合金刀具进行干车削钛合金的对比研究, 发现细晶粒刀具的切削性能比粗晶粒刀具稍好, 并认为溶解扩散磨损和黏结磨损是钛合金切削中刀具的主要磨损机理, 而磨粒磨损主要发生在刀具后刀面和刀尖位置。DEAMLEY 等^[3]和 NURULAMIN 等^[4]认为钛合金加工中不适合用 P 类(含 TiC 和 TaC 成分)硬质合金刀具, 因为这两种成分在高温下会与钛合金发生化学反应, 造成刀具剧烈磨损。山东大学王晓琴等^[5]针对 Ti6Al4V 高效切削加工过程中刀具摩擦磨损特性及其热-力耦合作用对刀具磨损与刀具寿命的影响规律展开研究, 得出硬质合金刀具前刀面磨损以扩散为主, 后刀面以黏结、扩散、磨粒

* 国家科技重大专项资助项目(2012ZX04003-061)。20130124 收到初稿, 20131114 收到修改稿

磨损为主。哈尔滨理工大学郑敏利等^[6]采用未涂层硬质合金刀具进行钛合金外圆车削加工试验, 得到刀具的磨损主要以黏结磨损、扩散磨损、氧化磨损为主, 且随着切削速度和进给量的增加, 黏结磨损和扩散磨损加剧。山东大学李友生等^[7]也对此进行了试验研究, 发现使用硬质合金刀具高速干车削 Ti6Al4V 时, 刀具的氧化磨损主要发生在前后刀面边界区。综上可知, 目前工业生产中钛合金切削加工主要应用的还是硬质合金刀具, 对钛合金切削刀具材料的研究也较多集中在硬质合金材料, 且涂层硬质合金和细晶硬质合金为钛合金高速切削刀具材料的主要研究方向。无论涂层硬质合金或细晶硬质合金, 其基体的合金成分对切削性能的影响都十分重要, 而对于不同牌号硬质合金的合金成分对其在切削钛合金中磨损机理及特征的影响还未见详细研究, 因此试验采用合金成分有显著区别的三种牌号硬质合金刀具(YG8、YT15、YW2)切削 Ti6Al4V 钛合金, 对不同切削速度下刀具的磨损机理与特征进行研究, 分析刀具材料及切削速度对刀具磨损的影响。

1 试验条件

1.1 工件材料

Ti6Al4V 钛合金的金相组织为 $\alpha+\beta$ 。主要力学性能: 抗拉强度 $\sigma_b > 980$ MPa、屈服强度 $\sigma_{0.2} > 830$ MPa、延长率 $\delta > 13\%$ 、弹性模量 $E > 115$ GPa、硬度 HRC 为 37。试验采用 Ti6Al4V 钛合金棒料, 工件长度 350 mm, 直径 140 mm。其化学成分如表 1 所示。

表 1 钛合金 Ti6Al4V 化学成分表

元素	C	Fe	N	O	Al	V	H	Ti
质量分数	0.1	0.3	0.05	0.02	5.5~6.8	3.5~4.5	0.015	余量

1.2 刀具材料及几何参数

传统观点认为含有 TiC 和 TaC 成分的 YT、YW 类硬质合金刀具不适用于切削钛合金^[3-4], 在实际加工中通常使用 YG 类硬质合金刀具来加工钛合金, 这主要是考虑刀具与工件中的 Ti 元素会产生亲和作用。在较高的切削速度下, 刀具的磨损形式与机理与传统的低速切削相比会有较大变化, 为了更好地研究硬质合金刀具在不同速度范围内切削钛合金时的磨损机理, 分别从 YT、YW 和 YG 三类硬质合金刀具材料中各选用一种典型牌号 YT15、YW2、YG8 进行对比研究, 三类牌号刀片的外形及刀具角度完全相同。表 2~4 分别列出了其合金成分、元素

质量分数以及力学性能。

表 2 刀片材料的合金成分

合金牌号	合金成分质量分数(%)				
	WC	TiC	TaC	Co	其他
YT15	79	15	—	6	—
YW2	82	6	4	8	—
YG8	92	—	—	8	—

表 3 刀片中各元素质量分数

刀具 牌号	元素质量分数(%)				
	Ti	W	Co	C	Ta
YT15	12	74	6.3	7.7	—
YW2	4.8	77	8	6.45	3.75
YG8	—	86	8	6	—

表 4 刀片材料的力学性能

力学性能	牌号		
	YT15	YW2	YG8
硬度 HRA	91	90.5	89
抗弯强度/MPa	1150	1350	1500
抗压强度/MPa	3900	—	4470
弹性模量/GPa	520~530	—	600~610
冲击韧度(J/cm ²)	—	—	2.5

刀杆型号为 90W25-3K13。刀片几何参数为: 前角 $\gamma_0 = 6^\circ$, 后角 $\alpha_0 = 6^\circ$, 副后角 $\alpha'_0 = 7^\circ$, 过渡棱宽度 0.2 mm, 排屑槽宽度 5 mm, 刀尖圆弧半径 0.5 mm, 安装刀片后刀具主偏角 $k_r = 90^\circ$ 。图 1 为试验所选用的刀杆和刀片。

(a) 刀杆

(b) 刀片

图 1 试验用刀杆与刀片

1.3 切削试验方案

切削试验在数控车床(CAK6150)上进行, 通过改变主轴转速来调整切削速度。试验过程中刀具每切削一定路程后, 取下刀片, 在 VHX-1000 超景深三维显微系统下观察刀具的前、后刀面磨损形貌及后刀面的磨损量, 并在 SM-6360LA 扫描电镜进一步观察刀具磨损的微观形貌, 采用能谱仪对磨损刀片进行能谱分析。

试验采用单一因素法研究切削速度对刀具磨

损的影响。分别采用低速、中高速和高速三种切削速度进行干切削试验。切削参数为: 切削速度 $v = 48$ m/min、71 m/min、100 m/min, 切削深度 $a_p = 0.3$ mm, 进给量 $f = 0.2$ mm/r。

2 试验结果及分析

2.1 刀具磨损形态

刀具的磨损形态主要表现为前刀面磨损、后刀面磨损及边界磨损, 由于切削过程比较复杂, 多种磨损形态可能同时出现。钛合金是一种难加工材料, 在切削过程中, 刀具前刀面与切屑、主后刀面与加工表面发生剧烈的摩擦, 产生很高的接触压力和温度, 在刀具的前、主后刀面及边界都会产生磨损^[8-10]。同时, 钛合金材料的弹性模量小, 切削时已加工表面回弹大, 副后刀面与工件已加工表面的实际接触面积会有较大增加, 从而导致刀具的副后刀面磨损通常比主后刀面磨损更为严重。图 2 为采用硬质刀具切削 Ti6Al4V 时前刀面、主后刀面、副后刀面的磨损形貌。

图 2 超景深三维显微系统下观察的刀面磨损形貌及特征

刀具前刀面以月牙洼磨损为主(图 2a), 这是由于切屑流出时产生摩擦和高温高压作用形成的。主后刀面不断与加工表面接触, 在接触区发生摩擦, 产生较高的接触压力和温度, 从而造成主后刀面磨损(图 2b)。因已加工表面产生较大回弹, 副后刀面会与已加工表面产生强烈摩擦, 导致副后刀面磨损(图 2c)。同时, 刀尖附近及副后刀面有时会粘有切屑黏结物(图 2d)。对比图 2b 和图 2c 可以发现, 刀具副后刀面的磨损范围较主后刀面要大, 磨损量也比较大, 这主要是由已加工表面产生较大回弹以及副后刀面切屑的黏结物增大了副后刀面所受的挤压

与摩擦造成的。

2.2 低速切削刀具磨损机理

图 3~6 为低速切削硬质合金刀具副后刀面磨损的 SEM 形貌图及 EDS 能谱分析图。从刀具磨损的形貌图上可以看出刀具上粘有黏结物(图 3)。Ti6Al4V 化学活性高、与刀具的亲合力强, 在切削过程中刀具上会粘有钛合金切屑, 随着切削的进行, 切屑黏结颗粒被带走, 导致刀具的黏结磨损。

图 3 刀具黏结磨损的 SEM 形貌

图 4 YG8 刀具黏结磨损 SEM 形貌及 EDS 能谱图 ($v = 48$ m/min, $a_p = 0.3$ mm, $f = 0.2$ mm/r)

图 5 YT15 刀具黏结磨损 SEM 形貌及 EDS 能谱图 ($v = 48$ m/min, $a_p = 0.3$ mm, $f = 0.2$ mm/r)

图 6 YW2 刀具黏结磨损 SEM 形貌及 EDS 能谱图
($v=48$ m/min, $a_p=0.3$ mm, $f=0.2$ mm/r)

三种刀具合金成分的质量分数如表 2 所示, 通过计算得出不同元素的质量分数(表 3)。表 5 为低速切削磨损后能谱图中(图 4~6)刀具主要元素的质量分数。

表 5 低速切削后刀具中主要元素质量分数 ($v=48$ m/min)

刀具 牌号	元素质量分数(%)							
	Ti	Al	V	W	O	Co	C	Ta
YT15	43.00	2.69	3.50	33.73	2.65	0.20	14.01	—
YW2	87.68	0.68	10.34	—	0.12	—	1.17	—
YG8	56.17	3.26	4.33	—	—	—	14.8	—

对比表 3、表 5 分析发现, 低速切削时在三种刀具表面均检测出大量的 Ti 元素和一定量的 Al、V 元素, 而 W 元素大幅减少, 特别是在 YG8 和 YW2 刀具表面的检测点上未能检测到 W 和 Co 元素, 证明此处已被黏结的工件材料覆盖。由于能谱仪探针的最大探测深度为 $1\ \mu\text{m}$, 因此此处钛合金黏结物的厚度应不小于 $1\ \mu\text{m}$ 。通过上述分析可以得到: 由于钛合金亲和力大, 低速切削 Ti6Al4V 时三类刀具都出现了不同程度的黏结现象, 其中 YW2 和 YG8 刀具黏结较重, YT15 刀具的黏结较轻, 黏结磨损为此三类刀具的主要磨损形式。

2.3 高速切削刀具磨损机理

在高速切削钛合金时, 切削温度很高, 硬质合金材料中的 WC、TiC 和 Co 会与空气中氧起化合作用, 形成硬度和强度较低的氧化膜。由于空气不易进入切削区, 所以容易在刀具磨损边缘位置形成氧化膜。在切削时受工件表面中氧化皮、冷硬层和硬杂质点对氧化膜连续摩擦, 会造成后刀面的氧化磨损。当磨损量大时, 就会形成氧化磨损沟槽(图 7)。从能谱图(图 8~10)及对比表 3、表 6 分析发现: 在

刀具后刀面上均发现了 O 元素, 且 O 元素质量分数最高可达 29.32%, 这说明高温作用下, 刀具发生了氧化磨损。

图 7 超景深三维显微系统下观察的刀具的氧化磨损

图 8 YG8 刀具黏结磨损 SEM 形貌及 EDS 能谱图
($v=100$ m/min, $a_p=0.3$ mm, $f=0.2$ mm/r)

图 9 YT15 刀具黏结磨损 SEM 形貌及 EDS 能谱图
($v=100$ m/min, $a_p=0.3$ mm, $f=0.2$ mm/r)

图 10 YW2 刀具黏结磨损 SEM 形貌及 EDS 能谱图
($v=100$ m/min, $a_p=0.3$ mm, $f=0.2$ mm/r)

表 6 高速切削后刀具中主要元素质量分数($v=100$ m/min)

刀具 牌号	元素质量分数(%)							
	Ti	Al	V	W	O	Co	C	Ta
YT15	20.99	0.32	—	56.01	8.33	2.09	12.26	—
YW2	23.21	1.22	0.96	3.48	29.32	—	38.91	2.89
YG8	62.88	3.02	4.55	17.01	7.69	—	4.85	—

对比分析表 5、6 中的数据,可以发现与低速切削相比,高速切削时 YT15 和 YW2 刀具上 Ti 元素的质量分数大幅降低, W 元素的质量分数较低速切削时有较大的升高,证明此时这两类刀具的黏结磨损都有所减轻。YW2 刀具中 C 元素质量分数较低速切削时大幅增加,这是由于高温作用下,刀具中的 WC 和 TaC 开始分解^[11],其中 W 元素、Ta 元素与工件材料中的 Ti 元素等相互置换,滞留在刀具中 C 元素使其质量分数增加。另外, O 元素大幅增加,这是高温下刀具材料与空气中的氧发生氧化反应的结果。YT15 刀具中 O 元素较低速切削时也增加较多,而 C 元素变化不大,说明此类刀具高速切削 Ti6Al4V 时会产生一定的氧化磨损,但扩散磨损相对较小。YG8 刀具上 Ti 元素的质量分数仍达 62.88%, Al 和 V 元素的质量分数也比较高, W 元素质量分数比低速切削时有所增加,但仍远低于刀具原始成分中的质量分数,这些说明 YG8 刀具高速切削时黏结现象还比较严重,刀具仍然以黏结磨损为主,扩散和氧化磨损较轻微。

综上,高速切削 Ti6Al4V 时 YG8 刀具仍以黏结磨损为主, YT15 和 YW2 刀具的主要磨损形式由黏结磨损向扩散和氧化磨损转化,且 YW2 刀具的氧化磨损和扩散磨损更加明显。

2.4 切削速度对刀具磨损的分析

在 Ti6Al4V 的切削过程中,切削速度对刀具磨损的影响最大。图 11 显示了三类刀具在低、中、高

速切削时副后刀面的磨损量。

(a) YT15 刀具

(b) YW2 刀具

(c) YG8 刀具

图 11 切削速度对三类刀具磨损的影响
($a_p=0.3$ mm, $f=0.2$ mm/r)

由图 11 可以看出:随切削速度增大,三类刀具副后刀面磨损加快,刀具使用寿命降低。

切削速度为 48 m/min 时, YT15 刀具磨损速度最快, YG8 和 YW2 刀具抗磨损性能相近,均好于 YT15 刀具。一般认为是此类刀具中 Ti 质量分数较高,易于钛合金工件材料发生亲合作用,产生黏结磨损造成的。通过对图 3、图 6 及表 5 的分析可知, YW2、YG8 刀具也会发生黏结磨损,甚至比 YT15 更加严重。由此可知,亲合作用不是导致此时 YT15 刀具快速磨损的根本原因,而黏结相 Co 质量分数相对较低,导致刀具材料相对较脆、强度较低,与工件材料发生黏接后刀具材料易于脱落是 YT15 刀具快速磨损的主要原因。

切削速度为 100 m/min 时, YG8 刀具的磨损速度最快, YT15 刀具次之, YW2 刀具的磨损速度最慢。通过对高速切削时三类刀具的磨损机理分析可知, 在切削速度为 100 m/min 时三类刀具的磨损形式以黏结磨损、扩散磨损和氧化磨损为主, 但在三类刀具中三种磨损方式所占地位有所差别。YG8 刀具主要以黏结磨损为主; YT15 刀具仍以黏结磨损为主, 但扩散磨损和氧化磨损有所增加; YW2 刀具中黏结磨损、扩散磨损和氧化磨损占据同样的地位。在高速切削中刀具温度明显升高, 由于刀具材料中 Co 黏结相熔点较低, 高温下会导致刀具强度和韧性的快速下降, 这使得此时仍以黏结磨损为主的 YG8 刀具快速磨损。YT15 和 YW2 刀具此时由于黏结磨损程度小于 YG8 刀具, 刀具磨损速度有所降低。同时, 由于 YW2 刀具中的 TaC 成分能够增加刀具材料在高温时的强度, 其抗磨损性能又大大高于 YT15 刀具。

切削速度为 71 m/min 时, 三类刀具的磨损性能又与 48 m/min 和 100 m/min 时有所不同, 此时 YT15 刀具的磨损速度最快, YG8 刀具抗磨损性能好于 YT15, YW2 刀具的磨损速度最慢。综合分析不难得到, 此时切削温度较 100 m/min 时低得多, Co 黏结相的作用损失较少, 含 Co 较少而相对脆弱的 YT15 磨损最快。另外, 与 48 m/min 时相比, 同样由于 Co 黏结相作用的部分损失, 导致以黏结磨损为主的 YG8 刀具比黏结磨损程度减少、扩散和氧化磨损程度增加的 YW2 刀具的磨损速度明显加快。

3 结论

(1) 低速切削时三类刀具均以黏结磨损为主, 黏结相 Co 的质量分数较低会导致刀具快速磨损。

(2) 高速切削时 YG8 刀具仍以黏结磨损为主; YT15 刀具在主要发生黏结磨损的同时会产生一定程度的扩散磨损、氧化磨损; 黏结磨损、扩散磨损和氧化磨损在 YW2 刀具的磨损中占据同样地位。高温导致的 Co 黏结相失效是三类刀具磨损的主要原因。

(3) 进一步研发用于高速切削钛合金的涂层硬质合金、细晶硬质合金刀具时, 基体宜选用 YW 类硬质合金。

(4) 从经济性出发, 在低速切削钛合金时可优先选用 YG 类硬质合金刀具, 高速切削时选用 YW 类硬质合金刀具比较适合。

参 考 文 献

- [1] HARTUNG P D, KRAMER B M. Tool wear in titanium machining [J]. Annual CIRP, 1982, 31(1): 75-80
- [2] JAWAID A, SHARIF S, KOKSAL S. Evolution of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99: 266-274.
- [3] DEAMLEY P A, DAHM K L, CIMENOGLU H. The corrosion-wear behavior of thermally oxidized CP-Ti and Ti6Al4V [J]. Wear, 2004, 256(5): 469-479.
- [4] NURULAMIN A M, AHMADE I, KHAIRUSSHIMA M K. Effectiveness of uncoated WC-Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192: 147-158.
- [5] 王晓琴, 艾兴, 赵军, 等. 硬质合金刀具高速干车削 Ti6Al4V 切削力及刀具寿命研究[J]. 制造技术与机床, 2008(4): 36-39.
WANG Xiaoqin, AI Xing, ZHAO Jun, et al. Study on cutting force and tool life in Ti6Al4V high speed dry turning with carbide tool [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(4): 36-39.
- [6] 郑敏利, 范依航. 高效切削典型难加工材料刀具摩擦与磨损机理研究现状[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011(6): 22-30.
ZHENG Minli, FAN Yihang. An overview of tool friction and wear behavior in high-speed machining-typical difficult-to-cut material [J]. Journal of Haerbin University of Science and Technology, 2011(6): 22-30.
- [7] 李友生, 邓建新, 张辉. 高速车削钛合金的硬质合金刀具磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2008(5): 443-447.
LI Yousheng, DENG Jianxin, ZHANG Hui. Wear mechanism of cemented carbide tool in high speed machining titanium alloy [J]. Tribology, 2008(5): 443-447.
- [8] SU Honghua, LIU Peng, FU Yucan, et al. Tool life and surface integrity in high-speed milling of Titanium alloy TA15 with PCD/PCBN tools[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(5): 784-790.
- [9] YANG Fazhan, MENG Guangyao, ZHAO Jun, et al. Fabrication of WC matrix composite tool material and its cutting performance in machining Titanium alloys[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14: 75-78.
- [10] ARRAZOLA P J, GARAY A, IRIARTEA L M, et al. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,

209(5): 2223-2230.

- [11] SUN J, WONG Y. S, RAHMAN M, et al. Effects of coolants supply methods and cutting conditions on tool life in end milling Titanium alloy [J]. *Machining Science and Technology*, 2006, 10: 355-370.

作者简介: 姜增辉, 男, 1971 年出生, 博士, 教授。主要从事高速、高

效切削技术方面的研究。

E-mail: jzh1022@163.com

王琳琳, 女, 1986 年出生。主要从事高速切削技术方面的研究。

E-mail: wanglin678h2006@126.com

石莉, 女, 1977 年出生, 博士研究生, 副教授。主要从事高速切削, 信号测量与处理方面的研究。

E-mail: 811029556@qq.com

吴月颖, 女, 1984 年出生。主要从事高速切削技术方面的研究。

E-mail: wuyueying392160138@163.com

第 3 届上银优秀机械博士论文奖——铜奖

浮动式微剪应力传感器及其在气动测量中的应用

作者: 吕海峰

毕业学校: 西北工业大学

指导教师: 苑伟政

壁面剪应力的测量是试验空气动力学领域中的一项重要测试任务。精确的测量剪应力能够判断边界层内的流体运动状态, 为主动流动控制、摩擦阻力的计算提供依据。采用 MEMS 工艺制作的微剪应力传感器具有尺寸小、频响高、功耗低等特点, 为壁面剪应力的测量提供了一种新的方法。

本文以基于电容检测的浮动式微剪应力传感器为研究对象, 重点解决该器件在设计、加工、测试以及应用等方面的关键技术问题。在测试器件基本性能的基础上进行了低速、高速以及流动控制试验。主要研究工作如下。

在建立微剪应力传感器数学模型的基础上, 分析了弹性梁结构对传感器性能的影响, 确定了弹性梁的长度和宽度以及弹性梁的形状; 为了保证传感器工作在线性范围内, 弹性梁的宽度应小于浮动单元最大位移的 20%; 为了提高电容检测的灵敏度, 采用定齿偏置结构布置动、静梳齿的空间分布; 采用限位结构防止剪应力传感器发生过载而损坏结构; 在确定传感器基本结构参数的前提下, 利用有限元法对剪应力传感器分别进行结构静力和动力学分析, 得到了传感器的灵敏度、固有频率等指标。

研究了微剪应力传感器的几种加工工艺的特点, 采用 SOI 技术对所设计的微剪应力传感器进行加工。采用等离子刻蚀工艺、湿法释放工艺形成传感器的浮动结构。对加工过程中出现的各种失效形式进行了分析, 提出了改进措施, 得到了微型剪切应力传感器的样件。提出了一种具有三层结构的微剪应力传感器的封装方式, 易于实现传感器与被测壁面的平齐安装, 以减少对所测流场产生的干扰。

设计了微型剪应力传感器的检测电路, 对检测电路中的放大、调制解调、滤波等环节进行了详细分析与测试, 测试表明所设计的剪应力测试系统的噪声功率谱密度为 0.21。

通过试验的方法对所研制的微型剪应力传感器及其测试系统进行相关参数的测试。分析了温度、压力、横向载荷等因素对传感器的输出特性造成的影响。提出了一种将浮动结构自身重力等效成所加载的剪应力的传感器的标定方法, 通过重力场 1g 翻滚试验对所研制的剪应力传感器进行了初步测试, 得到传感器的参数指标如下: 灵敏度为 29.3 mV/Pa, 非线性误差为 2.2%, 重复性误差为 5.3%, 稳定性为 3 mV/9h。在研究剪应力传感器各种标定原理的基础上对所研制的微剪应力传感器进行了标定, 结果表明传感器的灵敏度为 27 mV/Pa, 说明前述提出的等效标定方法的实用性。

分别进行了低速、高速以流动分离检测试验, 结果表明所研制的微剪应力传感器能够用于壁面剪应力的测量。同时提出了一种壁面剪应力的动态测量方法, 将微剪应力传感器与加速度传感器集成在一起, 采用信号处理的方法将剪应力传感器输出信号中的振动信号去除, 克服了含有浮动结构的剪应力传感器无法应用于壁面剪应力动态测量的弊端, 为剪应力的测量提供了一种新的方法。