# 高温电阻应变合金的研究及应用进展

万吉高, 武海军, 杨丽娟, 牛海东, 卢绍平, 郝玉洁\* (贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 电阻应变计是将被测构件的应变量转换为电阻变化的测试单元,是发动机涡轮叶片应力/应 变分析监测的有效手段,而电阻应变敏感栅材料是电阻应变计的关键材料。随着发动机推重比不断 增大,涡轮前温度越来越高,要求敏感栅材料的工作温度也越来越高。本文阐述了高温电阻应变材 料的发展现状,重点介绍贵金属钯基合金、铂基合金电阻应变材料的成分设计、组织与性能、使用 温度等特性。其中 PtWReNiCr(Y)合金已经成功应用到 1000 ℃动态应变测试; PtRhWZr(Y)可以用于 1138 ℃的动态应变测试; PtRhMoWZr(Y)可望用于 1150 ℃的动态应变测试,工作温度比传统的电阻 应变合金 Pt-8W 提高了近 350 ℃。最后介绍了使用温度更高的金属氧化物应变计的研究现状。 关键词: 高温电阻应变计; 电阻应变合金; 应变灵敏度系数; 电阻温度特性 中图分类号: TG146.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2023)04-0074-11

#### Progress on research and application of strain alloys resistant to high temperature

WAN Jigao, WU Haijun, YANG Lijuan, NIU Haidong, LU Shaoping, HAO Yujie<sup>\*</sup> (State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-Platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

**Abstract:** The resistance strain gauge, a testing unit that converts the strain of the tested component into a change in resistance, is an effective tool for the strain analysis in engine turbine blades. The grid sensing material is a key to the resistance strain gauge. With an increase in the thrust-to-weight ratio of engine, the temperature in front of the turbine is getting higher and higher, it is, therefore, necessary to increase the working temperature of grid sensing material as well. The current development status of strain material resistant to high temperature was reviewed in this paper with a focus on the composition design, microstructure and properties, working temperature and other characteristics of precious metal-based alloys such as palladium-based and platinum-based alloys. PtWReNiCr(Y) has been successfully applied to the dynamic strain testing at 1000 °C, PtRhWZr(Y) can be used at 1138 °C, PtRhMoWZr(Y) is expected to be suitable even at 1150 °C, a working temperature about 350 °C higher than that achived by the traditional Pt-8W. Finally, the research status of metal oxide strain gauges which can work at higher temperatures was introduced.

**Key words:** high temperature resistance strain gage; resistance strain alloy; strain sensitivity coefficient; resistance temperature characteristics

电阻应变计是将机械构件上的应变变化转换为 电阻变化的测试单元,具有测量范围广、结构简单、 能在恶劣条件下在线检测等特点,广泛应用于航空、 航天、原子能反应堆、发动机、机车车辆和轨道、 桥梁、大坝以及各种机械设备等领域。按照工作温 度范围不同,通常将应变计分为以下几种<sup>[1-3]</sup>:深低 温: -200 ℃以下; 低温: -200~-10 ℃; 常温: -10~50 ℃; 中温: 50~300 ℃; 准高温: 300~500 ℃;

收稿日期: 2023-05-29

第一作者:万吉高,男,硕士,正高级工程师;研究方向:贵金属合金材料; E-mail: jgwan@ipm.com.cn

<sup>\*</sup>通信作者:郝玉洁,女,助理工程师;研究方向:贵金属蒸发材料;E-mail: hyj@ipm.com.cn

高温: 500 ℃以上。

高温应变计广泛用于航空航天、原子能、冶金制造等领域,特别是在发动机领域,电阻应变计具有确保飞行器安全重要的作用:测量高速旋转的涡轮发动机叶片的应力分布和疲劳寿命、转舵装置和喷嘴的高温瞬态应变,还可用于新型飞机研究设计、失效分析等<sup>[4-6]</sup>。

电阻应变计主要由敏感栅、基片、覆盖层及引 线等部分组成,其中敏感栅材料是电阻应变计的核 心部件,其性能将直接决定了电阻应变计的特性及 应用范围,应变计的结构示意如图1所示。



图1 电阻应变计结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a resistance strain gauge

目前,用作电阻应变计敏感栅材料的主要有电 阻应变合金、半导体材料及金属氧化物等,其中电 阻应变合金型敏感栅材料应变计占主导地位。

根据电阻应变测试技术的要求,电阻应变合金 应满足以下技术要求<sup>[7]</sup>:

 物理、电学性能。具有高而稳定的电阻率
 (ρ),一般不小于 50 μΩ·cm。在工作温度范围内具有 低而稳定的电阻温度系数,且电阻-温度特性曲线成 线性关系;电阻漂移小,在特定温度下,电阻随时 间的变化尽量小;具有较大的应变灵敏度系数,且 灵敏度系数不随温度变化;线膨胀系数应等于或大 于被测零件的线膨胀系数。

2) 机械性能。弹性应变极限大,机械滞后小、 疲劳强度大,蠕变值小、抗氧化性好。

3) 工艺性能。塑性好,易拉制线径 0.03 mm 以下的细丝和绕制应变敏感栅;具有良好的焊接性。

电阻应变合金的使用要求非常严格,单一金属 很难满足上述要求,人们开发出了多种电阻应变合 金,按合金体系分类可分为:贱金属合金(包括铜基、 镍基、铁基)、贵金属合金(即金、银、铂、钯、铑、 铱、锇、钌)合金两大类。

# 1 贱金属电阻应变合金

贱金属电阻应变合金一般是指铜基合金、镍基

合金、铁基合金等精密电阻合金及其改良型合金。 其中铜基合金电阻应变敏感栅材料主要是指康铜合 金,即 Cu-40Ni或在此基础上添加少量的锰、硅、 铁等元素的铜基合金,具有低而稳定的电阻温度系 数、易于加工等特点,由于较高温度下易于氧化, 一般在 200 ℃以下使用。

镍基合金是指 Ni-20Cr 或在此基础上通过添加 钼、铝、铁、硅、铁等元素而成的镍铬改良型合金, 主要包括镍铬V(NichromeV)、卡玛(Kama)、伊文 (Evanohm)等,该类合金具有较高的电阻率(一般在 80~110 μΩ·cm),在470 ℃左右出现"K 状态"转变, 电阻温度特性曲线出现拐点,静态应变测试温度在 400 ℃以下,动态测试使用温度 600 ℃。

铁基合金主要是铁-铬-铝合金及其在此基础上添加少量硅、锰、钼、钒等元素而形成的改良型铁铬铝合金,依据成份不同分为Armour系列、BCL-3、BCL-5、4YC3、4YC4等几类。这类合金由于铝的加入在高温下表面氧化,该氧化物层具有保护合金内部继续被氧化的作用,因此,为了提高合金在高温下的热稳定性,使用前通常将丝材在400~850℃温度下作预氧化处理。该类合金在1000℃以上的温度烧结后丝材塑性变差,容易出现脆断现象,因此,铁铬铝合金一般用作800℃以下的动态、静态应变测试,静态应变测试最高使用温度在1000℃左右<sup>[3,79]</sup>。

# 2 贵金属电阻应变合金

随着航空发动机的发展,推重比不断提高,发 动机的涡轮前温度越来越高,如第四代发动机(如 F119)的涡轮进口温度达到1977K(1704°C),新型航 空发动机的高压涡轮叶片的壁面工作温度达到 1150°C<sup>[10-12]</sup>,验证发动机涡轮、喷管等热端部件是 否能够满足高温运行使用需求,需要相应温度的应 变计。

温度高于 1000 ℃以上时,上述铜基合金、镍基 合金、铁基合金由于高温下氧化、挥发、合金结构 变化等原因,难以满足高温应变测试的要求,而铂、 钯、铑等贵金属在这方面具有独特的优势,作为高 温电阻应变材料受到人们的极大关注。

#### 2.1 钯铬合金

Pd-Cr 合金作为高温应变材料由 Bertodo 于 1960 年代提出<sup>[13]</sup>, 1990 年代初开始实用化研究, Hulse 等<sup>[14-15]</sup>通过对 34 种不同成分 Pd-Cr 合金的研 究(如图 2), 发现 Cr 质量分数含量低于 13%的 PdCr

合金电阻温度系数(TCR)太高,而 Cr 含量高于 13% 的 PdCr 合金其抗氧化性不能有效保护其高温应用, 认为 Pd-13Cr 合金可作为高温应变合金。

该合金在 800 ℃以下的温度范围内合金组织结构稳定,无相变。在 600 ℃以上的温度处理后会在 表面形成一层致密的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层,抑制材料内部 的进一步氧化。Pd-13Cr 合金的这些特性,使得其电 阻温度特性的稳定性好、重复性好,并且在升温、 降温时电阻重现性较好。

Pd-Cr 合金铸锭容易出现穿晶组织, 塑性加工 比较困难。1987年昆明贵金属研究所(以下简称 KIPM)郭锦新<sup>[16]</sup>对 Pd-Cr 合金的加工工艺、性能、 结构进行了全面的研究。通过快冷成型工艺获得了 结晶状态和加工性能良好的合金铸锭,通过表面分 析技术,对合金的氧化机理进行了探讨。成功制备 出 \u00c000.025 mm 的 Pd-13Cr 合金丝材,提供美国 NASA Lewis Research Center 制备出高温电阻应变计。采用 火焰喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为底层,用 4%ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合物氧 化物形成覆盖层,以降低 Pd-13Cr 合金的氧化。在 800 ℃温度范围内试验,表明其性能优于铁铬铝合 金 Kanthal-1、BLC-3 等制备的高温应变计[17-20],温 度循环试验后其电阻具有很好的重现性。图 3 是 φ0.025 mm 的 Pd-13Cr 合金经过两次 0~600 ℃温度 循环试验的电阻变化,由图3可见,材料经反复升 温、降温的电阻变化重现性很好[17-18],在温度不超 过 800 ℃时,不同温度下 Pd-13Cr 薄膜应变计的电 阻值随应变呈良好的线性关系[21]。

#### 2.2 铂钨合金

贵金属 Pt 具有其它金属无法比拟的耐腐蚀、高 温抗氧化、高温力学性能,在高温电阻应变测试中 发挥着重要作用。1960年代 Bertodo<sup>[13]</sup>对铂基电阻 应变合金进行系统研究,通过比较几十种铂基合金 性能,最终认为 Pt-W 是最好的高温电阻应变合金。 图 4 是 W 含量对 Pt-W 合金电阻率(ρ)、电阻温度系 数(*TCR*)、应变灵敏度系数(*K*)、抗拉强度(*R<sub>m</sub>*)等性能 的影响。图 5显示了 W 含量对 Pt-W 合金在 1000℃ 静止空气中氧化速率的影响:随着 W 含量的增加, 合金的应变灵敏度有所降低,但仍保持较高值(大于 3);同时合金的氧化速率也逐渐减小并在 8.0%~9.5%W 达到最小值<sup>[22-24]</sup>。

随后 Pt-W 合金作为电阻应变材料引起人们的 高度重视并开展大量的研究,相关内容汇总列于表 1。1970年代初,KIPM 的何华春、童立珍等<sup>[25-26]</sup>对 Pt-W 合金进行了深入的研究,发现热处理工艺对



图 2 Pd-Cr 合金的电阻率和电阻[14]





#### 图 3 Pd-13Cr 合金的电阻温度特性[18]











#### 表1 Pt-8W 合金性能[24]

Tab.1 Properties of Pt-8W alloy

报告年份及	TCR		K
研究机构	/(10 <sup>-6</sup> /°C)	$\Delta R/R$	
1963-1966, Bertodo	246	0	3.7
1963, Easterling	216	0	4.45
1963-1964, Redfern	300	1%	/
1964, Maddocks	300	/	
1965, Sidhu	324	0.5%	~4
1966, McCalvery	325	/	~4
1967, Grindrod	248	0	3.4
1973, KIPM	220	0~700℃,线性	3.7
1975, KIPM	190	0~700℃,线性	4.2

Pt-W 合金的性能影响很大:经过常规的热处理工艺 后 Pt-W 合金的电阻温度系数为(300~500)×10<sup>-6</sup>/°C, 而经过特殊热处理工艺后,电阻温度系数由加工态 的 267×10<sup>-6</sup>/°C降低至退火态的 190×10<sup>-6</sup>/°C,电阻应 变灵敏度系数 4.2(如表 1),同时该特殊工艺还可以 提高 Pt-W 合金的机械性能和结构稳定性。

美国 HITEC 公司报道的 PtW 合金焊接丝式应 变计的最高使用温度达到 1900°F(1038 ℃),但敏感 栅具体合金成份、应变计的制作工艺没有公开报道。 实际测试结果表明:除非采用特殊的覆盖层或改变 应变计的结构,否则 PtW 合金裸丝的电阻温度特性 曲线的线性范围在 800 ℃以下,温度超过 800 ℃合 金丝氧化/挥发严重、疲劳强度降低,电阻温度特性 曲线出现拐点,不能满足 800 ℃以上高温静态或动 态应变测量的要求,为此开发出了多种改良型 Pt-W 多元合金。

#### 2.3 铂钨铼镍系列

1970年代后期, KIPM 童立珍、何华春等<sup>[24-27]</sup> 对铂钨合金的改型进行了大量的研究。在铂钨合金 中添加适量的合金化元素可提高合金的综合性能, 如提高高温强度、电阻率、降低电阻温度系数、拓 宽电阻温度特性曲线的线性区间等。依据 Hume-Rothery 定律,选择原子半径、化合价、电负性相近 的合金化元素以便形成稳定的单相固溶体[27]。通过 比较、筛选了VIB~VIII中的元素,发现添加周期表 中接近 Pt 的元素 Re、Ni、Cr 等元素比较合适。其 中 Re 作为合金化元素,可以提高合金的抗拉强度、 提高电阻率、降低电阻温度系数; Ni 可以增加固溶 强化的效果; Cr 和稀土元素 Y 可以细化晶粒、提高 强度,而且Cr、Y还可以优先氧化而在基体表面形 成致密的氧化膜,抑制基体内部的进一步氧化。研 制出应变敏感栅材料 PtWRe、PtWReNi、PtWReCr、 PtWReCrY 和补偿线 PtNiCr、PtNiCrY 和 PtIrNiCrY, 性能见表2。

#### 表 2 Pt-W 系列高温电阻应变材料[24]

Tab.2 High-temperature resistance strain of Pt-W series

合全牌号	ho/	TCR/	K	<i>R<sub>m</sub></i> /MPa
日 亚州 フ	$(\mu\Omega{\cdot}cm)$	(10 <sup>-6</sup> /°C)		
Pt-8W	58	190	3.7~4.2	930
Pt-8.5W	62	185	3.7~4.2	980
Pt-9.5W	76	170	3.5	1330
Pt-45Pd-10Mo	86	130	2.5	820
Pt-7.5W-5.5Re	82	113	3.2	1340
Pt-8.5W-5Re-2Ni	77	171	3.2	1320
Pt-8W-4Re-2Ni-0.5Cr	80.3	142	3.2	1410
Pt-8W-4Re-2Ni-1Cr-0.2Y	73	160	3.2	1030
Pt-10W-3Re-2Ni-1Cr-	0.2	150	3.2	890
0.2Y	83			
Pt-2Ni-1Cr	29	1000	/	420
Pt-2Ni-1Cr-0.2Y	29	977	/	420
Pt-20Ir-1Ni-1Cr-0.2Y	42	508	/	/

## 2.3.1 电学性能

图 6 是线径为 0.025 mm 的几种铂基应变合金 裸丝在 800 ℃的电阻漂移<sup>[24]</sup>,作为对比,图中还给 出了 Pt-8.5W 在 700 ℃电阻漂移数值。可看出 Pt-8.5W 在 700 ℃、120 min 内电阻漂移(*R*-*R*<sub>0</sub>)/*R* 保持 在 0.05 以内,但在 800 ℃温度下,随着烧结时间增 加,电阻漂移呈线性急剧增大,120 min 时的电阻漂 移达到 0.62,如此大的电阻漂移显然不适合电阻应 变测试的要求,因此 Pt-8.5W 裸丝作为电阻应变合 金的最高使用温度为 800 ℃以下。添加 Re、Ni 而 形成的 Pt-W-Re、Pt-W-Re-Ni 虽然可以提高抗拉强 度、降低电阻温度系数,但在 800 ℃的电阻漂移都 比较大;添加 Cr、Y 而形成的 PtWReNiCr、PtWReNi-CrY 合金具有较好的综合性能: 800 ℃、120 min 的 电阻温度漂移最小。

图 7 是几种铂基合金的电阻温度系数与温度的 关系,图7中的几种合金在800℃以下的电阻温度 系数都基本恒定,表明合金的电阻温度特性曲线的 线性度较好。当温度超过 800 ℃时, Pt-W、Pt-W-Re、 Pt-W-Re-Ni 合金的电阻温度系数急剧降低,表明电 阻温度特性曲线出现了拐点。而添加 Cr、Y 的 PtWReNiCr 和 PtWReNiCrY 的电阻温度系数在 800℃时没有明显降低,室温到1000℃的电阻温度 系数保持在(155~160)×10<sup>-6</sup>/℃,说明 Cr、Y 加入后, 由于 Cr、Y 可以优先氧化而在基体表面形成致密的 氧化膜,抑制基体内部的进一步氧化,拓宽了合金 的电阻温度特性的线性区间,改善了合金在 800~1000 ℃的电阻-温度线性关系,在室温至 1000 ℃ 的温度区间内,电阻温度特性曲线基本上呈现线性。 PtWReNiCr和 PtWReNiCrY 合金已经成功应用到测 量 800~900 ℃静态应变,也应用到 1000 ℃动态应 变测试中。

## 2.3.2 组织结构

线径 0.5 mm 的 PtWReNiCr 和 PtWReNiCrY 两 种合金丝材经过 900 ℃氧化处理后,用扫描电镜观 察形貌及元素分布,发现氧化后 PtWReNiCr 合金仍 保持着合金内部被覆盖的结构,随着氧化时间延长, 氧化膜厚度增加,表面变得不规则,10h氧化处理 后,表面由于氧化物颗粒脱落而出现空洞,因氧化 而形成了更多的晶界,且在晶界上形成很多腐蚀斑 点,晶粒长大,氧化膜厚度为 20 µm 左右。而 PtW-ReNiCrY 合金氧化 5~10 h 后,表面层还连续而致 密,厚度为 7~10 µm,几乎未观察到内部氧化现象, 晶粒尺寸基本上没有变化。

图 8 是 900 ℃氧化 30 h 后 PtWReNiCr 样品的 SEM 分析元素 Ni、Cr、W 的面、线扫描结果。由 图 8 可见氧化处理 30 h 后,表面组织不同于内部组 织,表面氧化了很厚一层,元素的面扫描表明,在 所有元素中 Ni 在表面含量最高,有近 10 μm 的连 续分布(图 8-Ni), Cr 也在表面聚集,但其含量比 Ni 低,与 Ni、Cr 相比,W 的分布更均匀,在表面稍有



Fig.6 Resistance drift of several Pt based alloys



聚集。PtWReNiCrY的元素分布特征与PtWReNiCr 相似。PtWReNiCr和PtWReNiCrY合金已经成功应 用到测量800℃、900℃静态应变,也应用到1000℃ 动态应变<sup>[27]</sup>。

#### 2.4 铂铑钨系列合金

当温度超过 1000 ℃时,由于 Re、Ni、W 等元 素的氧化、挥发加剧,PtWReNiCr 合金的电阻温度 特性曲线出现拐点,因此该类合金难以满足 1000 ℃ 以上的动态应变测试的要求,需进一步提高合金的 高温强度、抗氧化性、拓宽合金的电阻-温度特性曲 线的线性度区间等性能。

图 9 是对 Pt 固溶强化效果明显的几种元素对 比,贵金属 Ru、Ir、Rh 抗高温氧化性比其他元素 好,虽然 Ru、Ir 的熔点高、对 Pt 的强化效果明显, 但从图 10 的几种铂族金属氧化物在 1 atm 氧气中的 蒸汽压曲线对比可以看出,Ru、Ir 在高温下形成氧



上图(Above): 面扫描(Area scan); 下图(Below): 线扫描(Line scan)

图 8 Pt-W-Re-Ni-Cr 合金的元素分布<sup>[27]</sup>

Fig.8 Element distribution of Pt-W-Re-Ni-Cr alloys

化物的蒸汽压比 PtO<sub>2</sub> 高两个数量级以上<sup>[28-29]</sup>, 这表 明高温下 Ru、Ir 的挥发比 Pt、Rh 快很多, 虽然 Rh 的强化效果比 Ru、Ir 稍差, 但 Rh 与 Pt 氧化物蒸汽 压相近, 是 Pt 最好的高温固溶强化元素, Pt-Rh 合 金能在 1400 ℃高温长时间工作<sup>[30-31]</sup>, 基于上述考 虑,贵研铂业研制了 Pt-Rh-W 合金<sup>[32]</sup>。

图 11 是直径 0.03 mm 的 PtRhW 与 Pt-8W、 PtWReNiCr 几种铂基合金裸丝的电阻温度特性对 比。Pt-8W 在 800 ℃以下的电阻-温度特性曲线成线 性关系,800~1000 ℃出现平台,温度升高到 1000 ℃ 以上时电阻逐渐降低,因此,Pt-8W 裸丝的应变测 试最佳使用温度是 800 ℃以下,通过采用适当的覆 盖层可以适当提高工作温度;PtWReNiCr 的电阻温 度特性的线性区间为室温到 1000 ℃,表明 PtWReNiCr 合金的最高使用温度可以达到 1000 ℃。

以 Pt-W 为基体,添加适量 Rh 可提高结构稳定 性和高温强度、少量 Re 可提高电阻率, PtRhWRe 合金的电阻-温度特性曲线的线性区间拓宽到室温 至 1100 ℃,满足 1100 ℃动态应变测试要求。

参照铂铑合金弥散强化方法<sup>[33-34]</sup>,在铂铑合金 中添加 Zr、Y等元素,通过内氧化等方法形成微细 颗粒 ZrO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等弥散分布于基体中,起到提高高 温结构稳定性和高温强度的目的,用于铂基高温电 阻应变合金这种弥散强化方法未见文献报道。

通过在 PtRhWRe 基体中再添加少量的 Zr、Y,制备了 PtRhWReZrY 合金细线材,采用内氧化方法 使 Zr、Y 转变为 ZrO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化物颗粒并弥散分



图 9 Pt 的固溶强化元素

Fig.9 Solid solution of Pt strengthened by other metals





布于基体中,从而达到弥散强化的作用。在内氧化 处理时需要严格控制内氧化温度、氧分压、时间等 工艺参数,防止在内氧化过程中合金晶粒长大和 W、Re 的氧化。PtRhWReZrY 的电阻温度特性曲线 的线性区间,由PtRhWRe 的1100℃提高到1138℃。

进一步考察 PtRhW 与 PtRhWReZrY 的金相组 织,将直径 1.0 mm 的两种合金丝材经过不同温度、 30 min 处理,观察其金相组织,如图 12 所示。图中 上方(即(a)、(b)、(c)图)为 PtRhW 的金相组织,下方 (即(d)、(e)、(f)图)为 PtRhWReZrY 内氧化后的金相 组织,可看出 PtRhW 在 1050 ℃晶粒开始长大, 1150 ℃晶粒粗大;而添加 Zr、Y 并经过内氧化处理 后的 PtRhWReZrY,由于细晶强化、弥散强化的联 合作用,在 1150 ℃没出现晶粒明显长大的现象,再 结合图 11 所示的电阻-温度特性曲线的线性区间的 上限为 1138 ℃,表明 PtRhWReZrY 有望用于 1138 ℃的动态应变。



Fig.11 Resistance of Pt-based alloys at different temperatures



图 12 PtRhW (a~c)与 PtRhWReZrY (d~f)的金相组织 Fig.12 Metallographic structure of PtRhW(a~c) and PtRhWReZrY (d~f)

# 2.5 铂铑钼钨合金

钨的熔点 3422 ℃、钼的熔点 2623 ℃,两者都 是高熔点金属,可用作铂基高温应变合金的合金化 元素<sup>[35-36]</sup>,图 13 为 W 和 Mo 的差热分析曲线。由 图 13 可以看出,W 从 600 ℃开始增重,表明 W 从 600 ℃开始氧化,而 Mo 没有出现增重现象;在 1000 ℃以上减重明显,说明 Mo 的抗氧化性能优于 W,但在 1000 ℃以上挥发加快。因此可以预期以 Pt-Rh 为基体,通过优化 W、Mo 的含量,开发出 Pt-Rh-Mo-W 合金,可望在较高温度下保持较小的质量 变化、拓宽温度特性曲线的线性区间。





Fig.13 TG/DSC of W and Mo

结合高温应变计的制备工艺,敏感栅材料能否 满足高温应变测量的要求,应考察应变丝经过大气 环境、工作温度下至少烧结 30 min 后的抗拉强度、 电阻变化情况。烧结后的敏感栅丝材不能出现严重 氧化、脆断的情况。比较了五种典型的高温电阻应 变合金(FeCrAl、Pt-8W、PtWReNiCr、PtRhWReZrY、 PtRhMoW)丝材的高温烧结性能: 直径 0.03 mm 的 丝材分别绕在刚玉棒,在大气中 1150℃烧结 30 min,烧结后的状态对比见表 3。

从表 3 结果可以看出,作为动态应变测试, FeCrAl、PtWReNiCr 适宜在 1000 ℃以下温度使用, PtW8 烧结后的强度很低,PtRhWZrY、PtRhMoW 烧 结后抗拉强度大于 650MPa,可望用于 1150 ℃的动 态应变测试。

## 表 3 几种电阻应变合金高温烧结性能比较

Tab.3 Comparison in the high temperature sinterability among several resistance strain alloys

	2
合金名称	烧结后的状态
FeCrAl	灰色,丝材完整,弯折易断
Pt-8W	灰色,抗拉强度≤250 MPa
PtWReNiCr	深灰色,丝己断
PtRhWReZrY	灰色, 抗拉强度 650~690 MPa
PtRhMoW	灰色, 抗拉强度 705~732 MPa

图 14 是 PtRhMoW 在 1150 ℃、大气中烧结 30 min 前后的拉伸曲线,图 14(a)为烧结前的拉伸曲线, 抗拉强度为 1657~1667 MPa;图 14(b)为烧结后的拉 伸曲线,抗拉强度下降到 705~732 MPa,延伸率从 3%增加到 10%,有望用于 1150 ℃的动态应变测试。







# 3 结语与展望

随着航空发动机的发展,发动机推重比越来越 大,通常情况下,发动机推力增大10%,涡前温度 就会升高100℃左右,目前国内外服役的发动机涡 前温度已达1500℃以上,涡轮叶片的工作温度已 超过1150℃,希望测量涡轮叶片应力应变的电阻 应变计的工作温度越来越高,但是,在1150℃以上 再提高金属合金型应变计的工作温度十分困难,需 要开发其它类型的高温应变计。

Gregory<sup>[37-38]</sup>报道了一种陶瓷应变计,将氧化铟 锡溅射到基底上制备成薄膜应变计,氧化铟锡薄膜 型应变计使用温度可达 1100 ℃以上,掺杂铝的氧 化铟锡薄膜可以使用到 1280 ℃<sup>[39]</sup>,近年来氧化物 (如 ITO、Al-ITO)、氮化物(如 AlN、TaN 等)陶瓷应 变计受到人们的关注<sup>[40]</sup>,随着材料科学和工艺技术 的发展,高温应变材料必将取得更大的发展。

# 参考文献:

 沈观林. 应变电测与传感器技术的新发展及应用[J]. 中 国测试, 2011, 37(2): 87-96.

SHEN G L. New developments of strain gauge measurement and transducer technique and applications in all kinds of engineers and domains[J]. China Measurement & Test, 2011, 37(2): 87-96.

[2] 尹福炎. 电阻应变计技术六十年(1)电阻应变计的由来、 发展及展望[J]. 传感器世界, 1998(8): 27-32.

YIN F Y. Sixty years of electric resistance strain gage technique(1) origin, development and prospect of resistance strain gauge[J]. Sensor World, 1998(8): 27-32.

- [3] 尹福炎,王文瑞,闫晓强. 高温/低温电阻应变片及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2014:12-38.
  YIN F Y, WANG W R, YAN X Q. High/low temperature resistance strain gauge research and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 12-38.
- [4] 杨宪峰,陈新,许巍,等. 涡轮叶片高温振动疲劳试验 技术研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(4): 30-34. YANG X F, CHEN X, XU W, et al. Vibration fatigue test technology of turbine blade at high temperature[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2022, 35(4), 30-34.
- [5] 王崇武, 艾延廷, 李成刚, 等. 电阻应变计敏感栅结构 参数对其测量精度的影响[J]. 航空发动机, 2022, 48(5): 167-172.
  WANG C W, AI Y T, LI C G, et al. Influences of sensitive grid structural parameters of resistance strain gauge on its measurement accuracy[J]. Aero Engine, 2022, 48(5): 167-172.
- [6] 王成亮,曹志伟,武小峰,等.高温环境下电阻应变测 试技术研究[J].强度与环境,2020,47(3):51-56.
  WANG C L, CAO Z W, WU X F, et al. Research on resistance strain measuring technology in high temperature environment[J]. Structure & Environment Engineering, 2020,47(3):51-56.
- [7] 功能材料及其应用手册编写组.功能材料及其应用手册[M].北京:机械工业出版社,1991:181-189.
- [8] 尹福炎. 电阻应变计技术六十年(2)电阻应变计敏感材料的发展(上)[J]. 传感器世界, 1998(9): 1-9.
  YIN F Y. Sixty years of electric resistance strain gage technique(2) development of grid sensing materials for electric resistance strain gage(I)[J]. Sensor World, 1998(9): 1-9.
- [9] 尹福炎. 电阻应变计技术六十年(2)电阻应变计敏感材料的发展(下)[J]. 传感器世界, 1998(10): 9-13.

YIN F Y. Sixty years of electric resistance strain gage technique(2) development of grid sensing materials for electric resistance strain gage(II)[J]. 1998(10): 9-13.

- [10] 许艳芝, 雷晓波, 文敏, 等. 某发动机喷管构件高温载 荷测量[J]. 机械强度, 2019, 41(3): 696-701.
  XU Y Z, LEI X B, WEN M, et al. High temperature load measurement for nozzle component of a certain aeroengine[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(3): 696-701.
- [11] 王崇武. 高温应变计敏感栅结构及涂层工艺参数优化 研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020: 2-5.
  WANG C W. Research on optimization of sensitive grid structure and coating process parameters of high temperature strain gauge[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2020: 2-5.
- [12] 左渝钰. 航空发动机高温应变测量系统[J]. 计算机测量 与控制, 2008, 16(11): 1528-1529.
  ZUO Y Y. Strain gauge measuring system depending on high temperature of aero-engine[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(11): 1528-1529.
- [13] BERTODO R. High temperature strain gauges for turbo- jet components[J]. Platinum Metals Review, 1964, 8(4): 128-130.
- [14] HULSE C O, BAILEY R S, GRANT H P. High temperature static strain gage development[R]. 1990, NASA CR-189044.
- [15] HULSE C O, BAILLEY R S, LEMKEY F D. High temperature static strain gage alloy development program[R]. 1985, NASA CR-174833.
- [16] 郭锦新. Pd-Cr 合金高温应变材料[J]. 贵金属, 1999, 20(1): 10-13.
  GUO J X. Palladium-chromium high temperature strain gauge material[J]. Precious Metals, 1999, 20(1): 10-13.
- [17] LEI J F. Development and characterization of PdCr temperature-compensated wire resistance strain gage[R]. 1989, NASA CR-185153.
- [18] LEI J F. Palladium-Chromium strain gauges-static strain measurable at high temperatures[J]. Platinum Metals Review, 1991, 35(2): 65-69.
- [19] MARTIN L, WRBANEK J, FRALICK G. Thin film sensors for surface measurements. 2001, NASA/TM-2001-211149.
- [20] WNUK S, WNUK V. The development of a PdCr integral wieldable strain measurement system based on NASA Lewis PdCr/Pt strain sensor for user-friendly elevated temperature strain measurements. 1997, NASA Contractor Report 202316.

[21] 刘豪, 蒋书文, 赵晓辉, 等. PdCr 薄膜电阻应变计研制 及其高温应变敏感性能研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(3): 348-352.

LIU H, JIANG S W, ZHAO X H, et al. Fabrication of PdCr thin film strain gauge and investigation on its sensitive properties at high temperature[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(3): 348-352.

- [22] 宁远涛,杨正芬. 铂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 208-212.
   NING Y T, YANG Z F. Platinum[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 208-212.
- [23] KNAPTON A G. Alloys of platinum and tungsten[J]. Platinum Metals Review, 1980, 24(21): 64-69.
- [24] TONG L Z, GUO J X. Noble metal alloys as strain gauge materials their development for high temperature applications[J]. Platinum Metals Review, 1994, 38(3): 98-108.
- [25] 张萃初,何华春. 铂合金高温应变计[J]. 仪表材料, 1974: 9-23.
  ZHANG C C, HE H C. Platinum alloy for high temperature strain gauge[J]. Instrument Materials, 1974: 9-23.
- [26] 何华春, 童立珍. 新型高温应变电阻合金[J]. 物理, 1990, 19(3): 189-190.
  HE H C, TONG L Z. New high-temperature strain resistance alloy[J]. Physics, 1990, 19(3): 189-190.
- [27] GUO J X, TONG L Z, CHEN L. Platinum alloy strain gauge materials noble metal alloys for static measurement at 900 °C[J]. Platinum Metals Review, 1997, 41(1): 23-32.
- [28] 宁远涛. Pt 和 PtRh 合金的高温强化[J]. 贵金属, 1984, 5(2): 39-45.
  NING Y T. High temperature strengthening of Pt and PtRh alloys[J]. Precious Metals, 1984, 5(2): 39-45.
- [29] 宁远涛. 铂族金属高温固溶强化型合金[J]. 贵金属, 2009, 30(2): 51-56.
  NING Y T. High-temperature solid solution strengthening alloys based on platinum group metals[J]. Precious Metals, 2009, 30(2): 51-56.
- [30] GRIGORY R. Platinum alloys: A selective review of the available literature[J]. Platinum Metals Review, 2013, 57(3): 202-213.
- [31] FISCHER B, BEHRENDS A, FREUND D, et al. High temperature mechanical properties of the platinum group metals stress-rupture strength and creep behavior at extremely high temperature[J]. Platinum Metals Review, 1999, 43(1): 18-27.

- [32] 万吉高, 尹俊美. 铂铑钨高温电阻应变合金及其制备方法: 201318006223.5[P]. 2016-04-06.
  WAN J G, YIN J M. High-temperature resistance strain alloy of platinum rhodium tungsten and its preparation method: 201318006223.5[P]. 2016-04-06.
- [33] 冶金工业部贵金属研究所玻纤漏板材料组. 合金元素 对铂合金力学性能的影响[J]. 玻璃纤维, 1977(2): 8-16.
- [34] ZHANG Q X, SHONG W L. Microstructure and properties of some dispersion strengthened platinum alloys-the influence of yttrium and zirconium additions[J]. Platinum Metals Review, 1995, 39 (4): 167-171.
- [35] 尹俊美, 万吉高, 刘毅, 等. 一种新型铂基高温电阻应 变合金及其制备方法: 201711331663.1[P]. 2018-06-19.
  YIN J M, WAN J G, LIU Y, et al. A new platinum based high-temperature resistance strain alloy and its preparation method: 201711331663.1[P]. 2018-06-19.
- [36] 尹俊美, 万吉高, 刘毅, 等. PtRhMoReCr 高温电阻应变

合金性能研究[J]. 贵金属, 2019, 40(4): 54-58.

YIN J M, WAN J G, LIU Y, et al. Study on properties of PtRhMoReCr high-temperature resistance strain alloys[J]. Precious Metals, 2019, 40(4): 54-58.

- [37] GREGORY O J, YOU T. High temperature strain gages: 20090173162A1[P]. 2009-07-09.
- [38] GREGORY O J, CHEN X M. Strain and temperature effects in indium-tin-oxide sensors[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(19): 5622-5625.
- [39] WRBANEK J, FRALICK G. Thin film ceramic strain sensor development for high temperature environments[C]. 11th Joint NASA/FAA/DOD Conference On Aging Aircraft, Phoenix, Arizona, 2008.
- [40] GREGORY O J, YOU T, CRISMAN E E, et al. Effect of aluminum doping on the high-temperature stability and piezoresistive response of indium tin oxide strain sensors[J]. Thin Solid Films, 2005, 476(4): 344-351.

#### 

#### 【上接第 73 页】

[3] 刘永红,李海清,李德超,等.不锈钢镀 Ag 涂层的制备
 及对变形链球菌的抗菌性研究[J]. 口腔医学研究, 2014, 30(9): 834-837.

LIU Y H, LI H Q, LI D C, et al. Surface modification of stainless steel with Ag coating and the antibacterial effect against streptococcus mutans in vitro[J]. Journal of Oral Science Research, 2014, 30(9): 834-837.

- [4] 胡宇, 高峰, 万伟伟, 等. 等离子喷涂银基涂层性能研究[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(3): 10-13.
  HU Y, GAO F, WAN W W, et al. Study on the process of silver based coating by plasma spraying[J]. Thermal Spray Technology, 2018, 10(3): 10-13.
- [5] YANG M, XU J F, CHEN D G, et al. Understanding interface evolution during explosive welding of silver foil and Q235 substrate through experimental observation coupled with simulation[J]. Applied Surface Science, 2021, 566: 1-10.
- [6] 田广民,李选明,赵永庆,等. 层状金属复合材料加工 技术研究现状[J]. 中国材料进展, 2013, 32(11): 696-701.
  TIAN G M, LI X M, ZHAO Y Q, et al. Research status of processing technology of laminated metal composite[J].
  Materials China, 2013, 32(11): 696-701.

- [7] 赵峰,李选明,王虎年. 爆炸-轧制钛/钢复合板界面结 合性能研究[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(1): 30-34.
  ZHAO F, LI X M, WANG H N. The bonding propriety of the explode-rolled Ti/steel clad metal[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(1): 30-34.
- [8] CHEN Z Q, WANG D Y, CAO X Q, et al. Influence of multi-pass rolling and subsequent annealing on the interface microstructure and mechanical properties of the explosive welding Mg/Al composite plates[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 723: 97-108.
- [9] 曾翔宇,李晓杰,王小红,等. 爆炸焊接波状界面的形成和发展[J]. 稀有金属材料与工程,2020,49(6):1977-1983.
  ZENG X Y, LI X J, WANG X H, et al. Formation and

development of explosive welding wave interface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6): 1977-1983.

- [10] LYSAK V I, KUZMIN S V. Energy balance during explosive welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 356-364.
- [11] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 155-160.