



# 轻质TiAl材料及加工技术研发

刘奎，马颖澈，李小兵，舒磊，张孟殊，邢炜伟

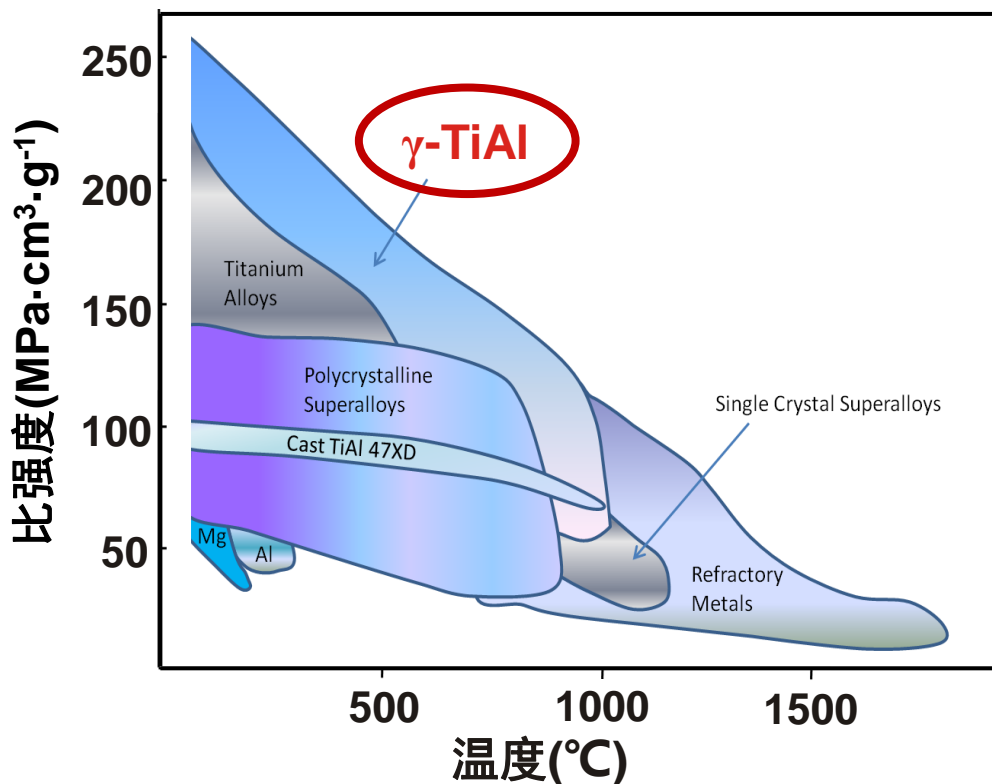
中国科学院金属研究所

2020年10月30日

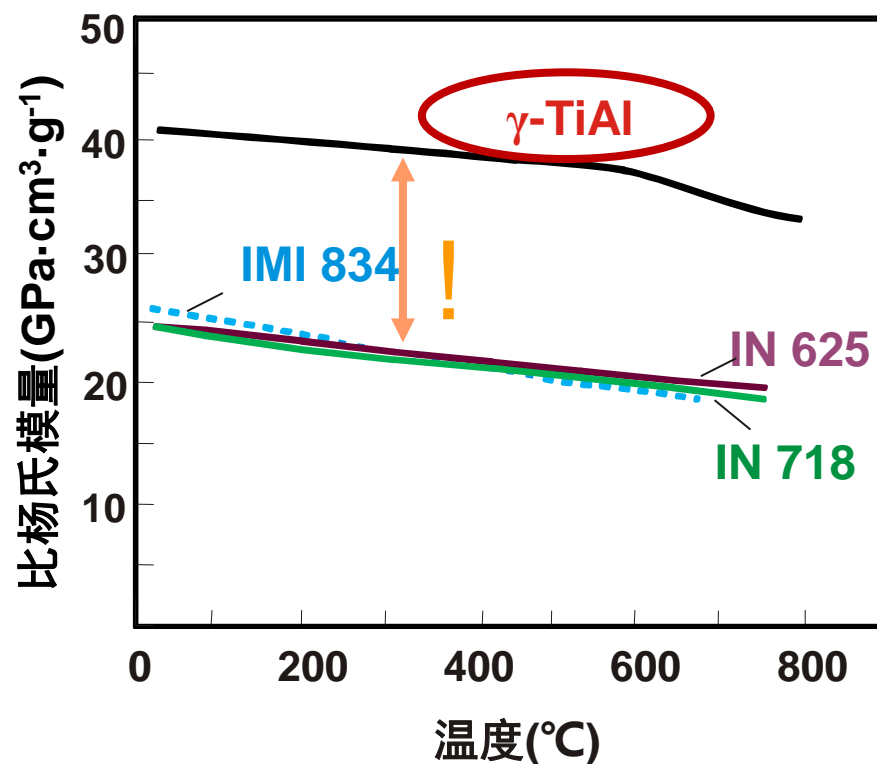
# 一、TiAl合金发展趋势及技术壁垒



轻质(密度 $\sim 4\text{g/cm}^3$ )、高比强 $\gamma$ -TiAl合金是先进航空、航天和汽车发动机领域极具竞争力的尖端战略结构材料，具有镍基高温合金无法比拟的技术优势，在国民经济和国防建设中发挥独特作用！



温度-比强度对应关系



温度-比杨氏模量对应关系

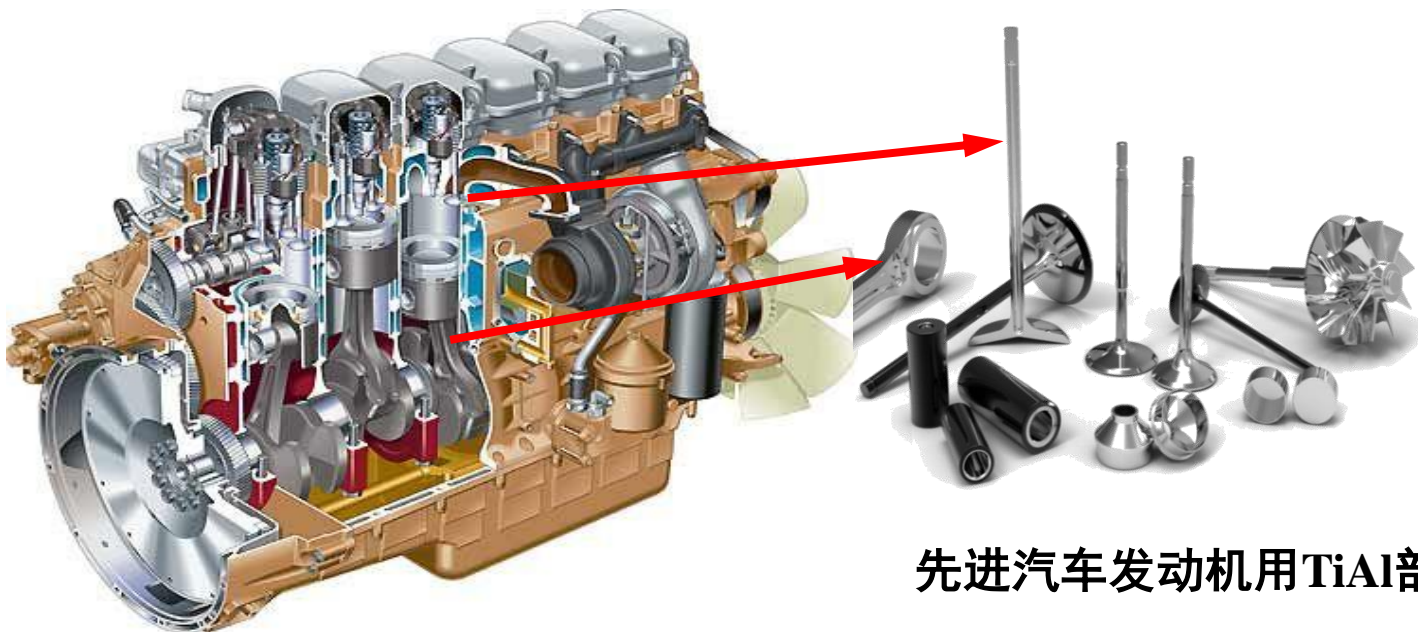
# ➤ TiAl合金在汽车发动机的应用



## 发动机关键部件轻量化

- ◆ 提高燃烧效率
- ◆ 减少气体排放
- ◆ 减小噪声

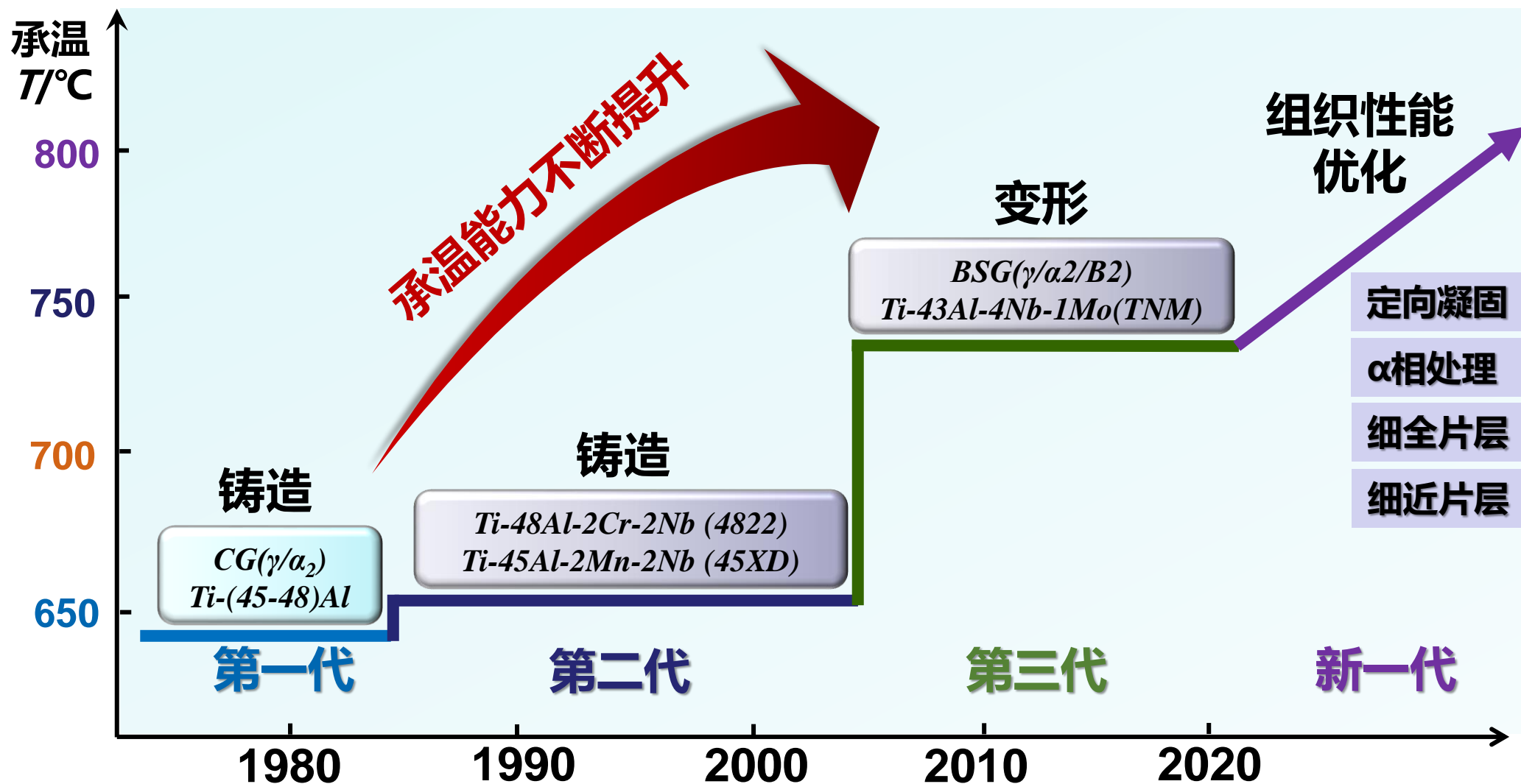
先进汽车发动机用TiAl部件



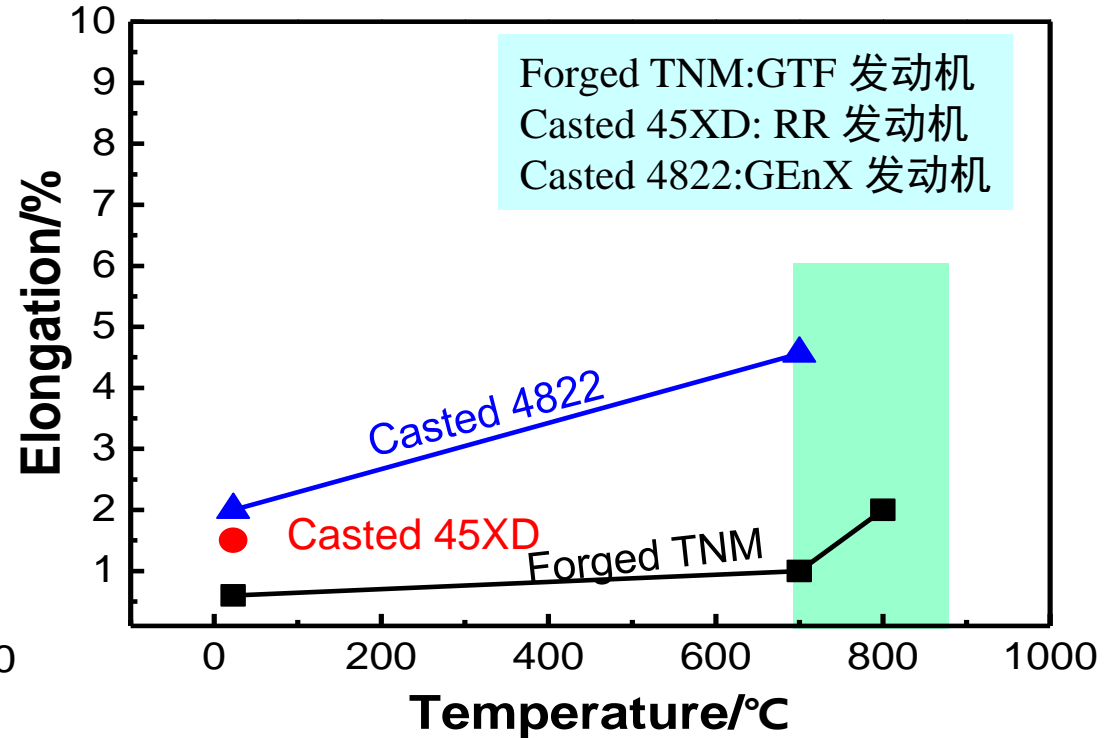
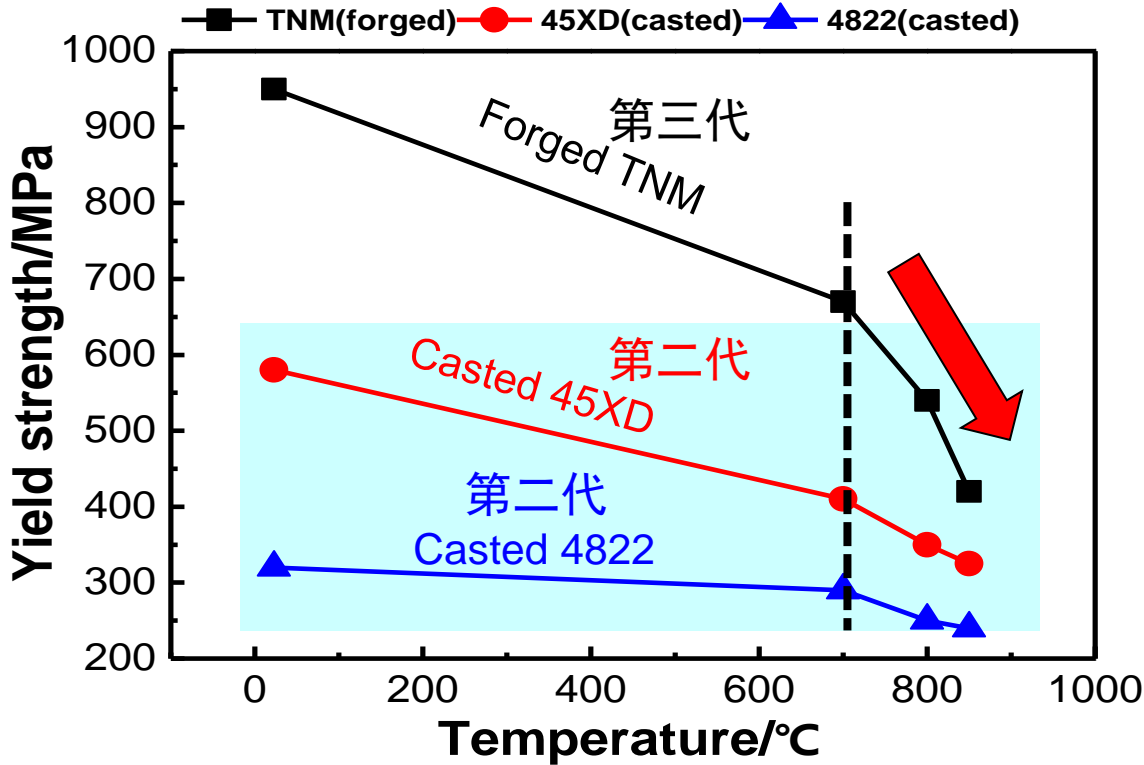
# ➤ TiAl合金发展趋势



**第一代:** 停留实验室研究阶段; **第二代:** 铸造合金已应用于GEnx-2B发动机  
**第三代:** 变形合金已应用于PW1000G发动机; 亟待发展承温更高的新一代...



# 已应用TiAl合金材料的力学性能

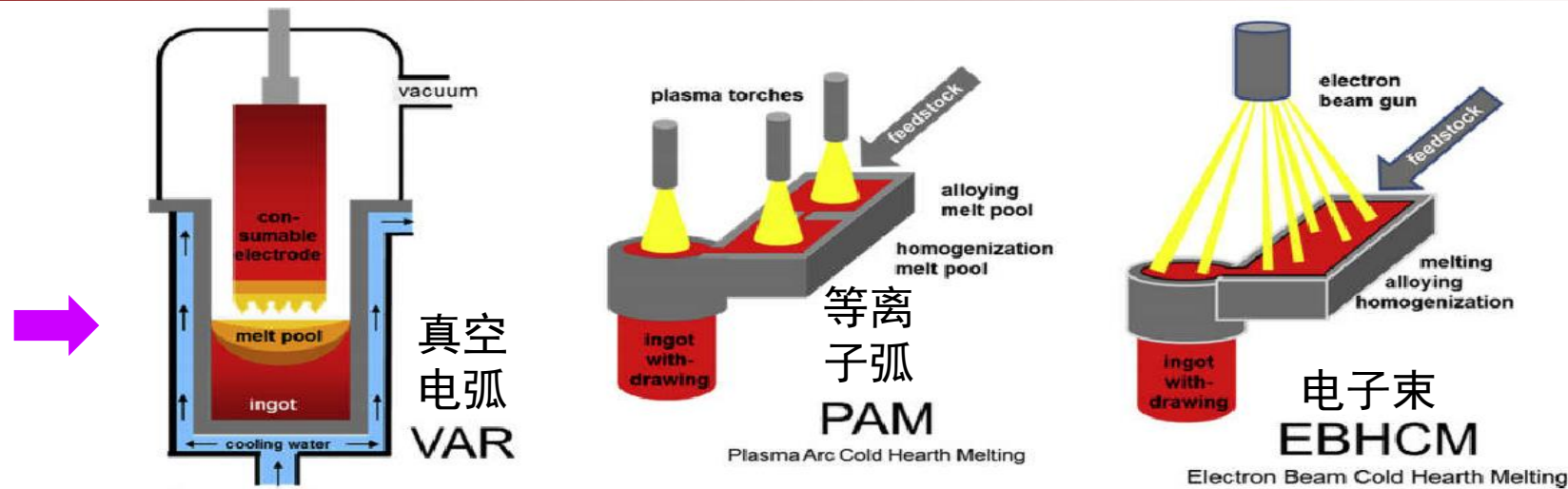


现役航空发动机已应用的铸造TiAl合金的强度低，变形TiAl的高强度、但700°C以上强度较铸造合金下降更为明显，**亟待开发承温能力更高的变形TiAl合金体系。**

# ➤ TiAl合金应用的技术壁垒

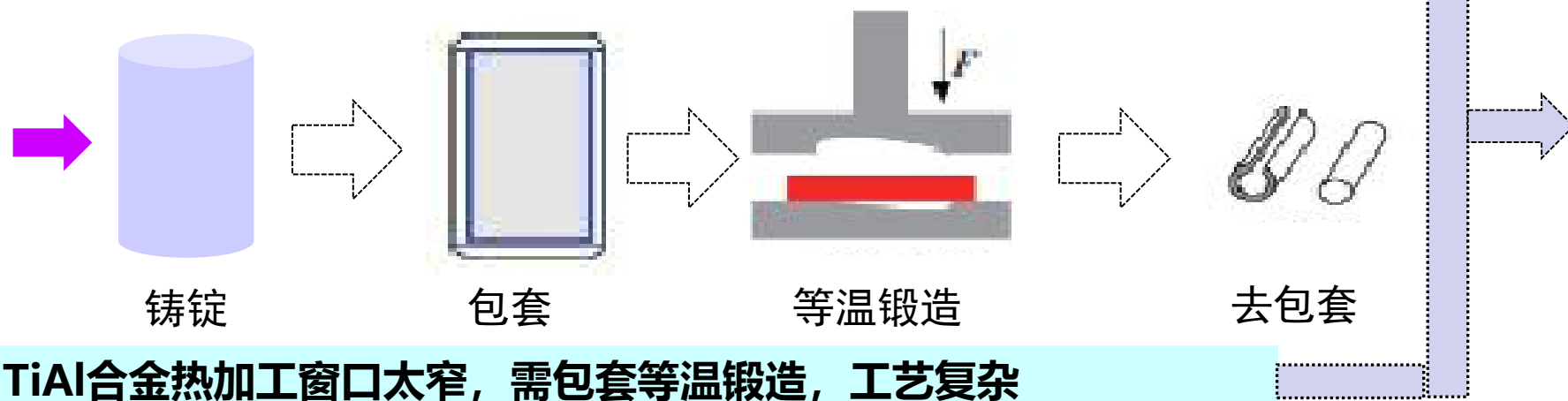


熔炼



VAR: 易于存在未熔金属夹杂, 成分均匀性、精确性差, 需多道次重熔  
 PAM: 炉子造价高, 耗能大, 铸锭易于开裂, 熔炼重量有限  
 EBM: 炉子造价高, 耗能大, Al、Mn等挥发严重, 成分难以准确控制

锻造



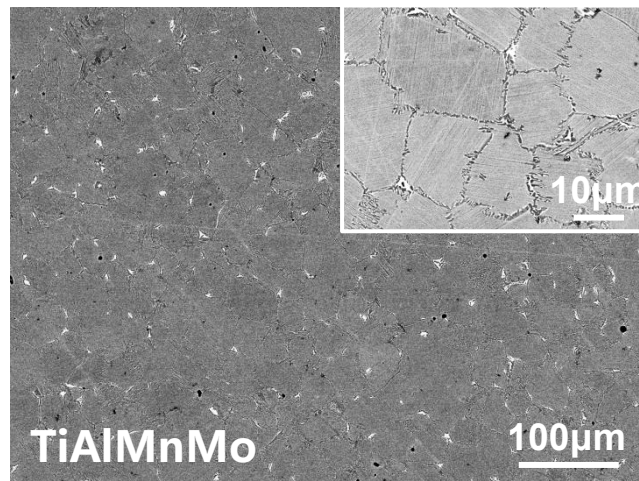
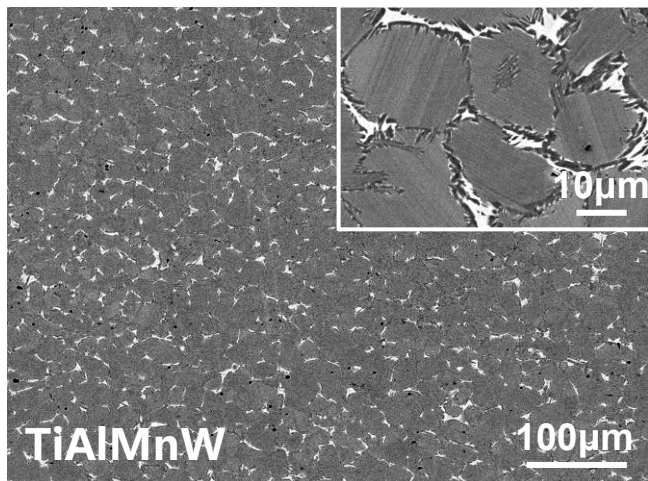
TiAl合金热加工窗口太窄, 需包套等温锻造, 工艺复杂

高成本  
 严重制约了该轻质先进高温结构材料的大批量推广应用

## 二、团队研究成果



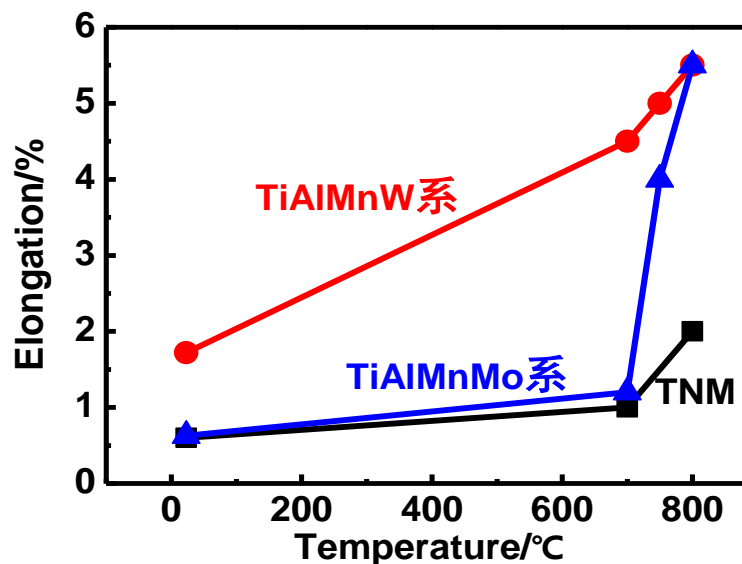
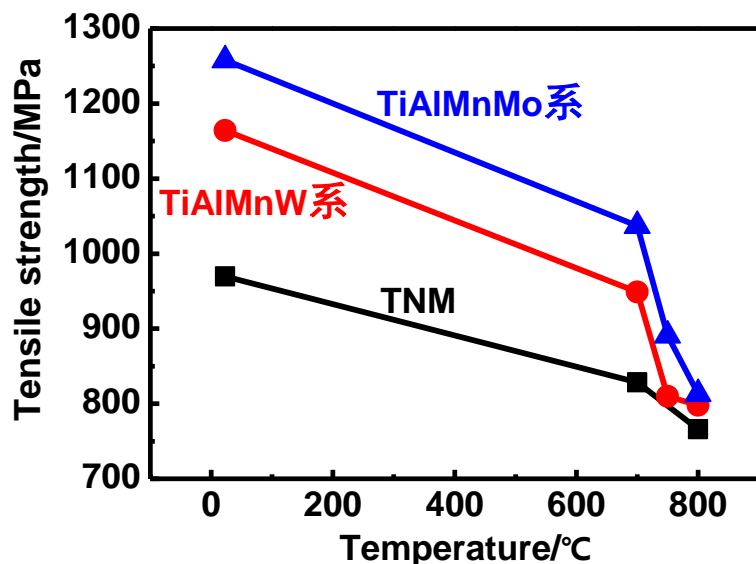
➤ 自主研发出组织性能优异的TiAlMnMo、TiAlMnW系合金



细化近片层组织

晶粒尺寸 $<50\mu\text{m}$

极少有害相

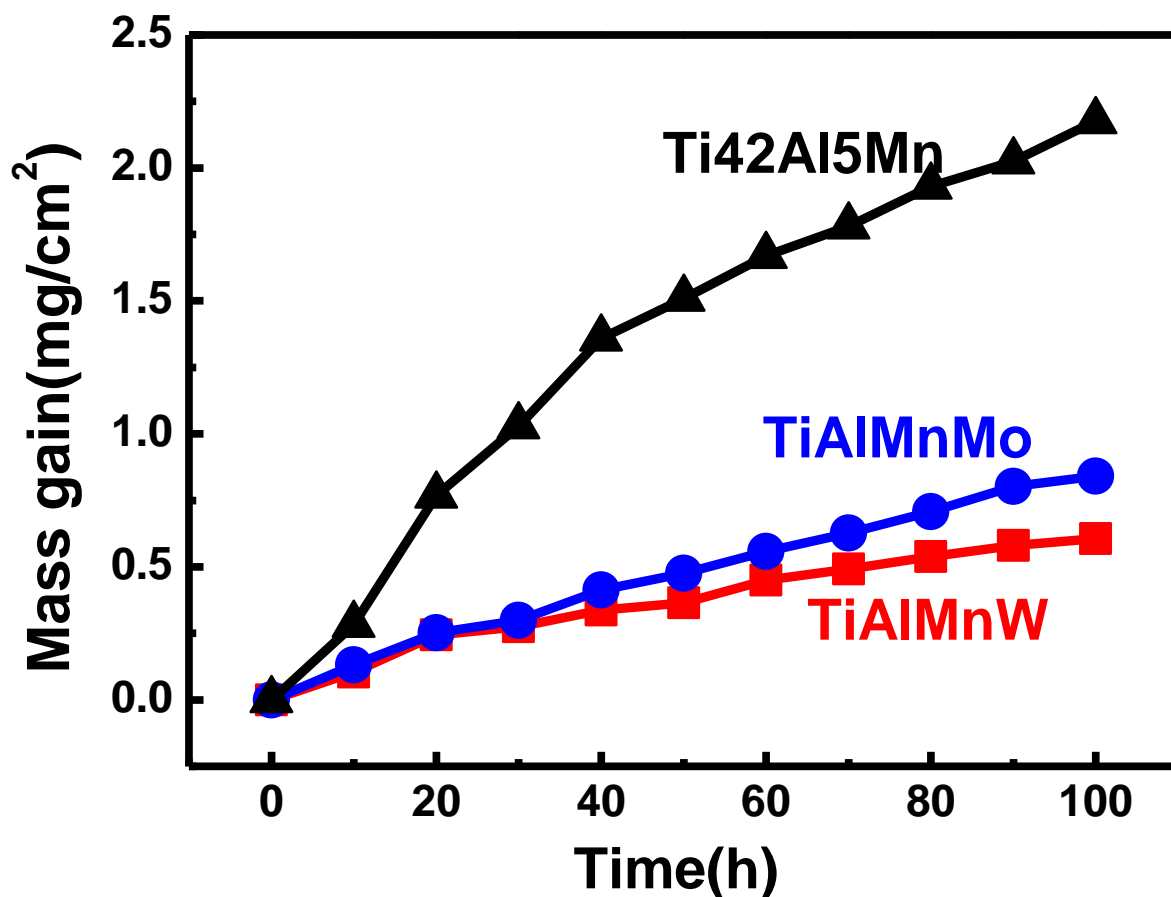


优异的强度和塑性指标

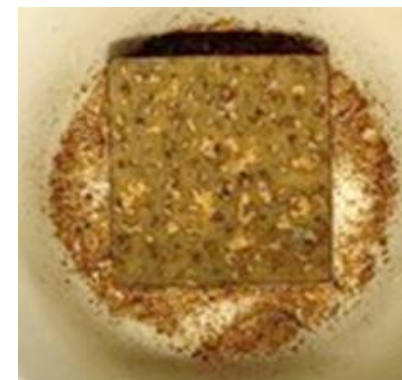
低成本材料体系!

良好的高温抗氧化性：

$\text{TiAlMnW} > \text{TiAlMnMo} > \text{Ti42Al5Mn}$

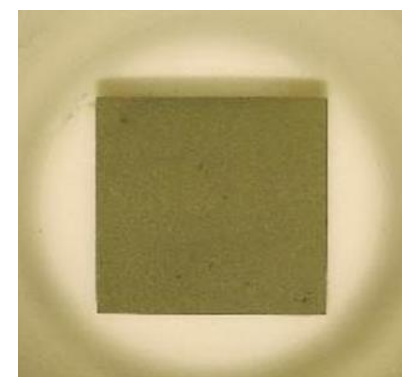


800°C循环氧化增重



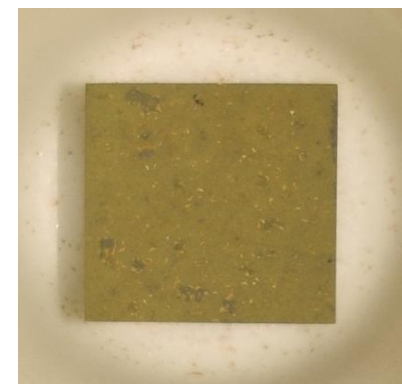
Ti42Al5Mn

日本  
体系



TiAlMnW系

自主  
研发

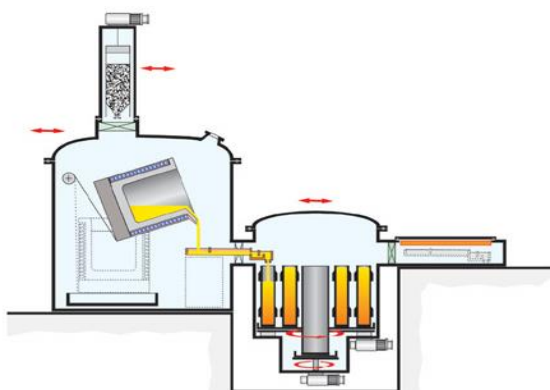


TiAlMnMo系

自主  
研发



# 发明了TiAl合金颠覆性熔炼技术



真空感应熔炼炉示意图



不同容量的成型CaO坩埚

国际首创出CaO坩埚一次真空感应熔炼TiAl合金的技术， $O \leq 700\text{ppm}$ ，Ti、Al、Mn、W、Mo、Nb等主成分偏差 $\leq \pm 0.2\text{wt.}\%$ ，突破了合金熔炼存在的**金属夹杂、成分波动大和成本高的关键技术瓶颈。**

TiAlMn系合金杂质含量(wt.%)

	主成分	坩埚	O	N	H
金属所	TiAlMnW	CaO	0.031	0.0055	0.0025
	TiAlMn	CaO	0.060	0.0042	0.0026
日本NIMS	TiAlMn	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.160	0.0060	0.0031

Ti45Al10Nb合金 (wt.%)

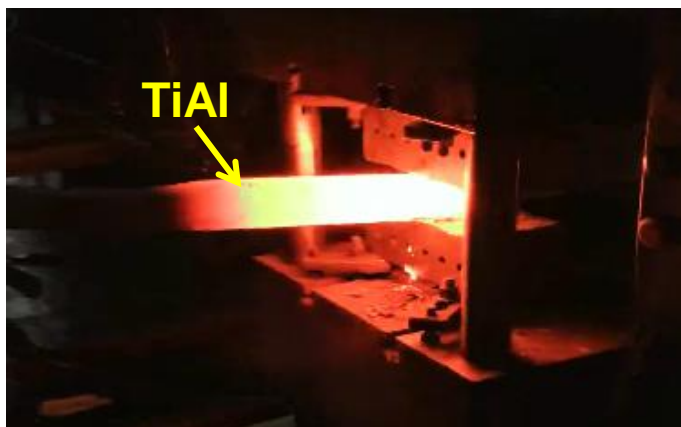
Heat No.	Ingot weight	O	Al	Nb	Ti
45-10-1	25kg	0.065	28.40	21.20	Bal.
45-10-2	25kg	0.068	28.30	21.10	Bal.



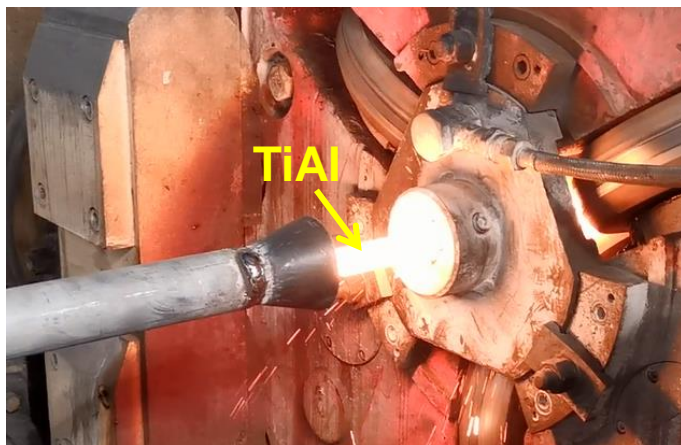
真空感应熔炼的TiAl铸锭，材料利用率达到90%以上！

# ➤ 新体系TiAl合金实现了常规锻造、热轧变形

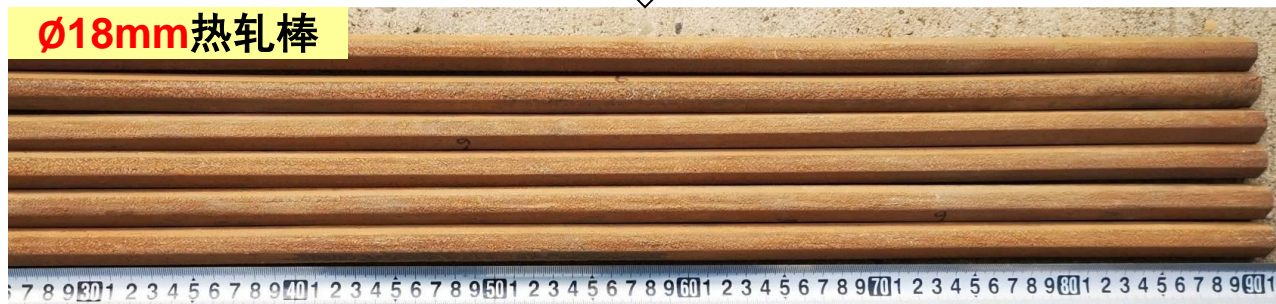
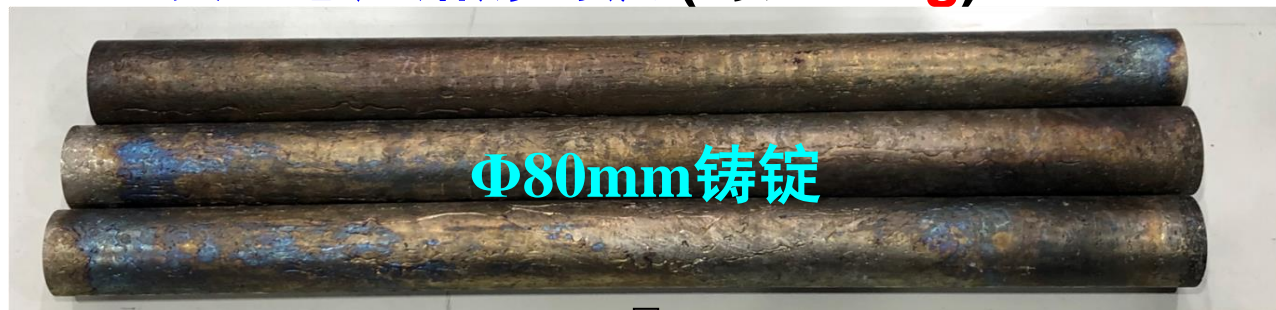
### 非等温、无包套锻造



### 常规轧制



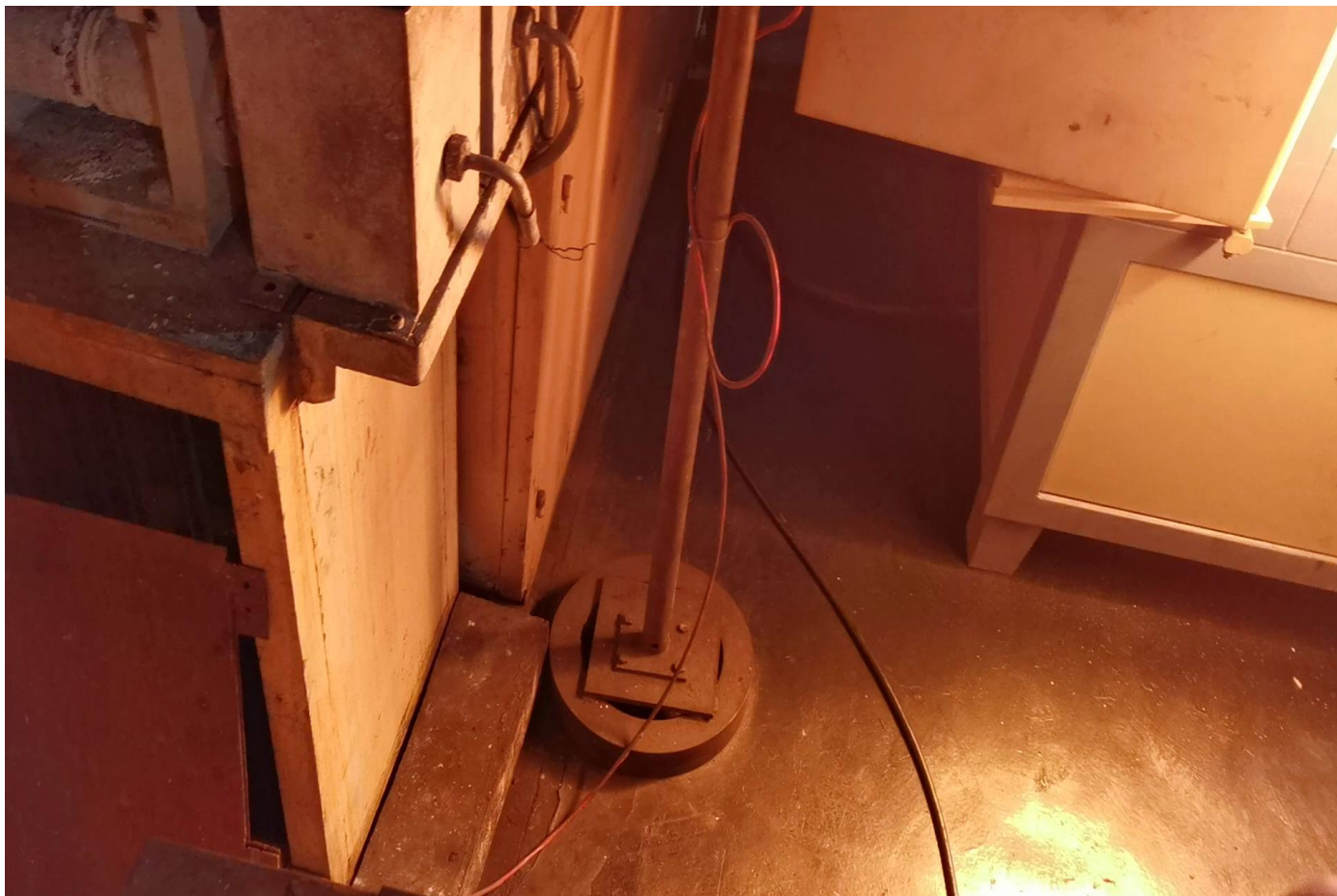
### 真空感应熔炼铸锭 (每支20kg)



常规设备锻造、热轧的TiAlMnMo系棒材，极大降低了制造成本！



**TiAl常规条件锻造**



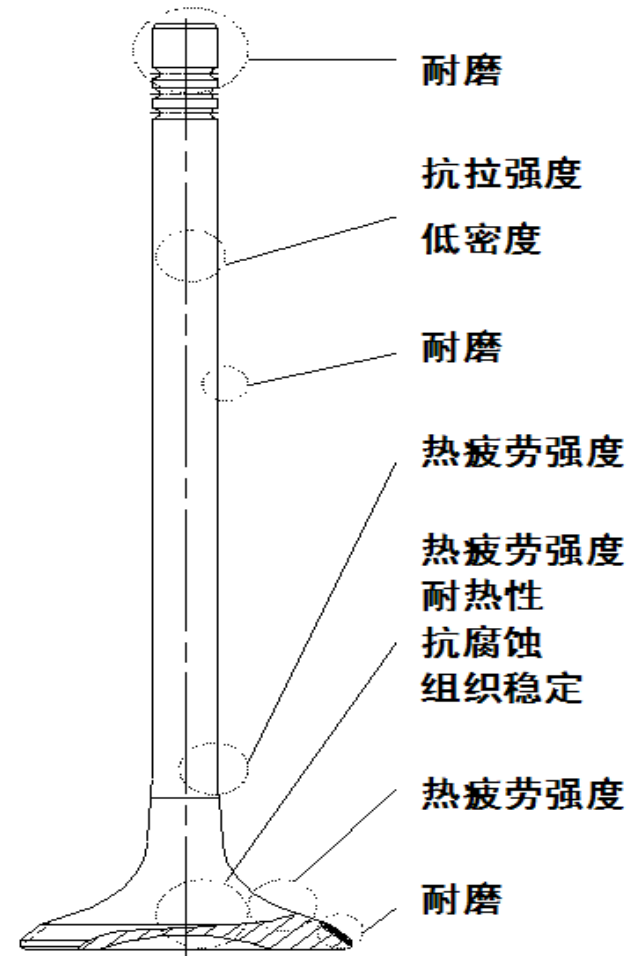
**TiAl常规条件轧制**

## TiAl基合金的优点

- ◆ 低密度，高硬度
- ◆ 良好耐磨性
- ◆ 较好抗氧化性能。

## TiAl基合金气阀的作用

- ◆ 燃烧效率提高15%
- ◆ 减少有害气体排放
- ◆ 降低噪声



**TiAl基合金气阀是传统材料气阀的最佳替代品!**

# 一次真空感应熔炼 + 常规热变形制造的气阀



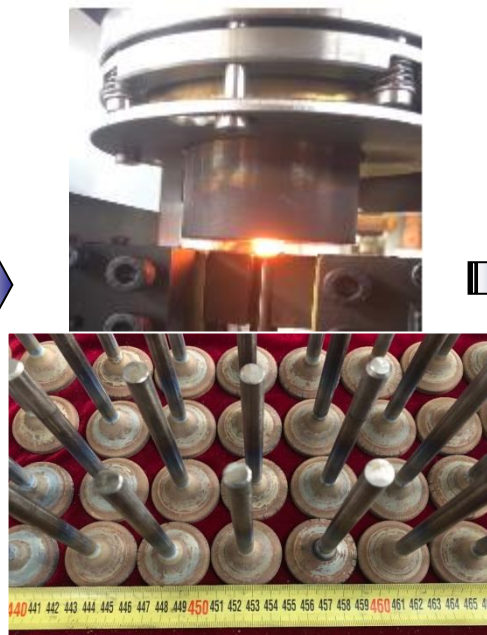
铸锭



轧制



镦头

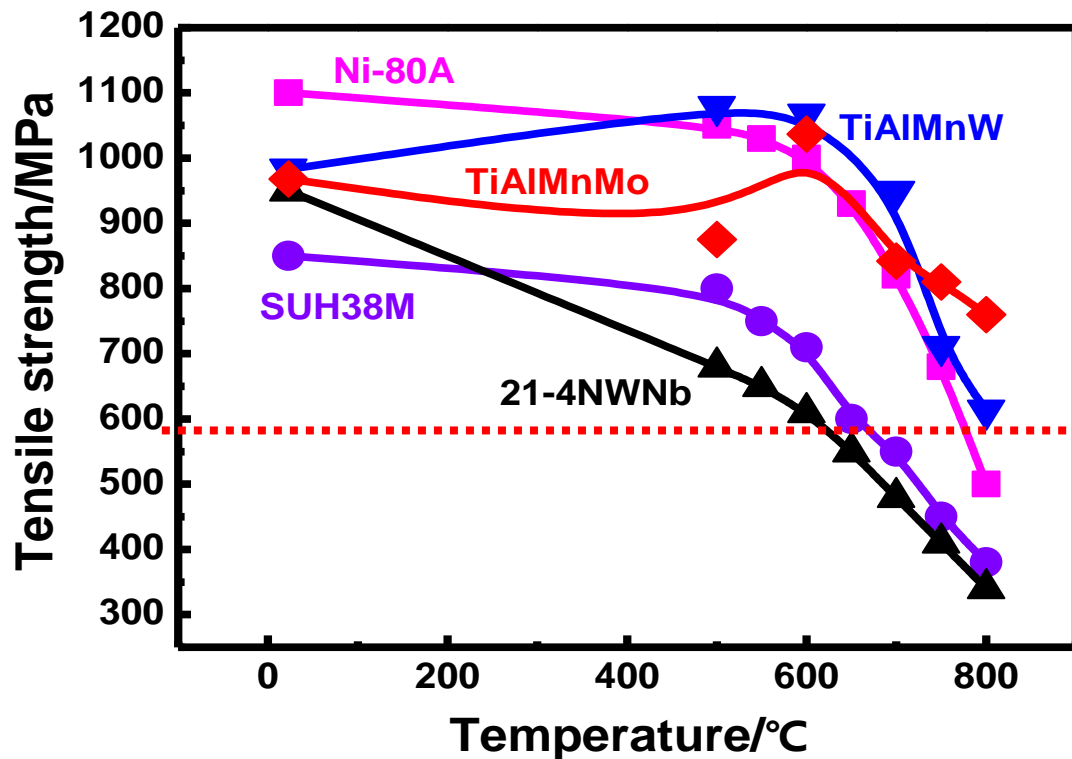


气阀

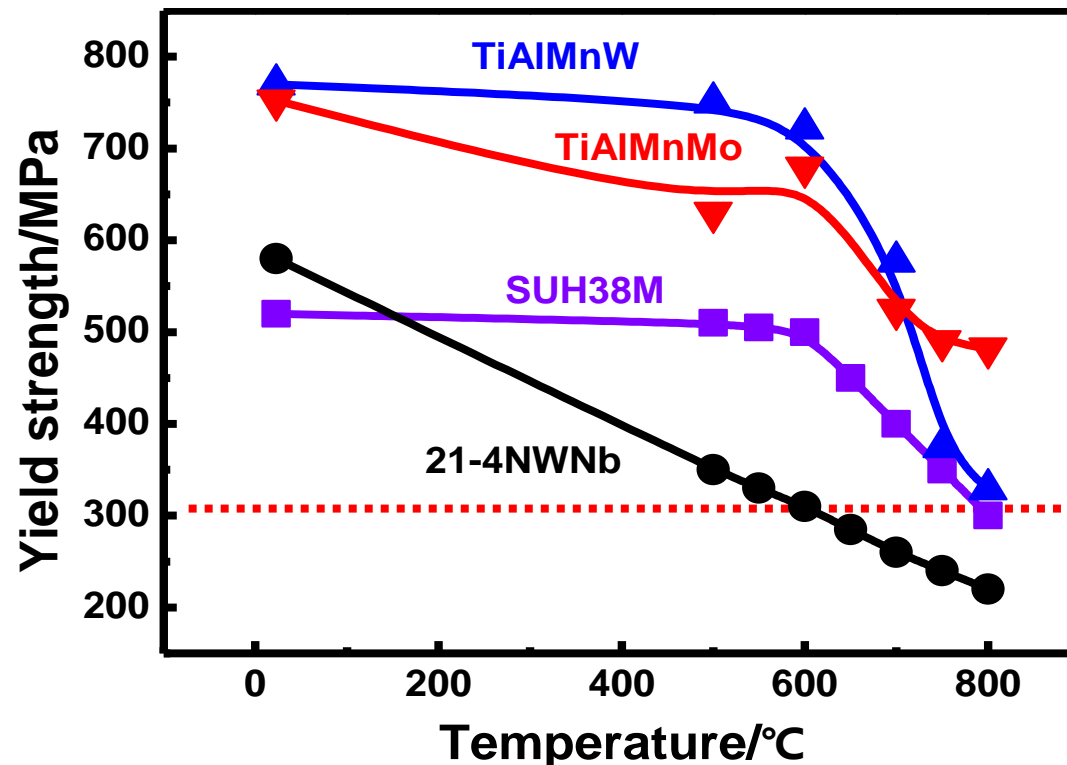


可低成本制造TiAl气阀，实现其大批量工程应用！

# 研制TiAl气阀成品强度优于现应用的气阀



温度-抗拉强度关系对比

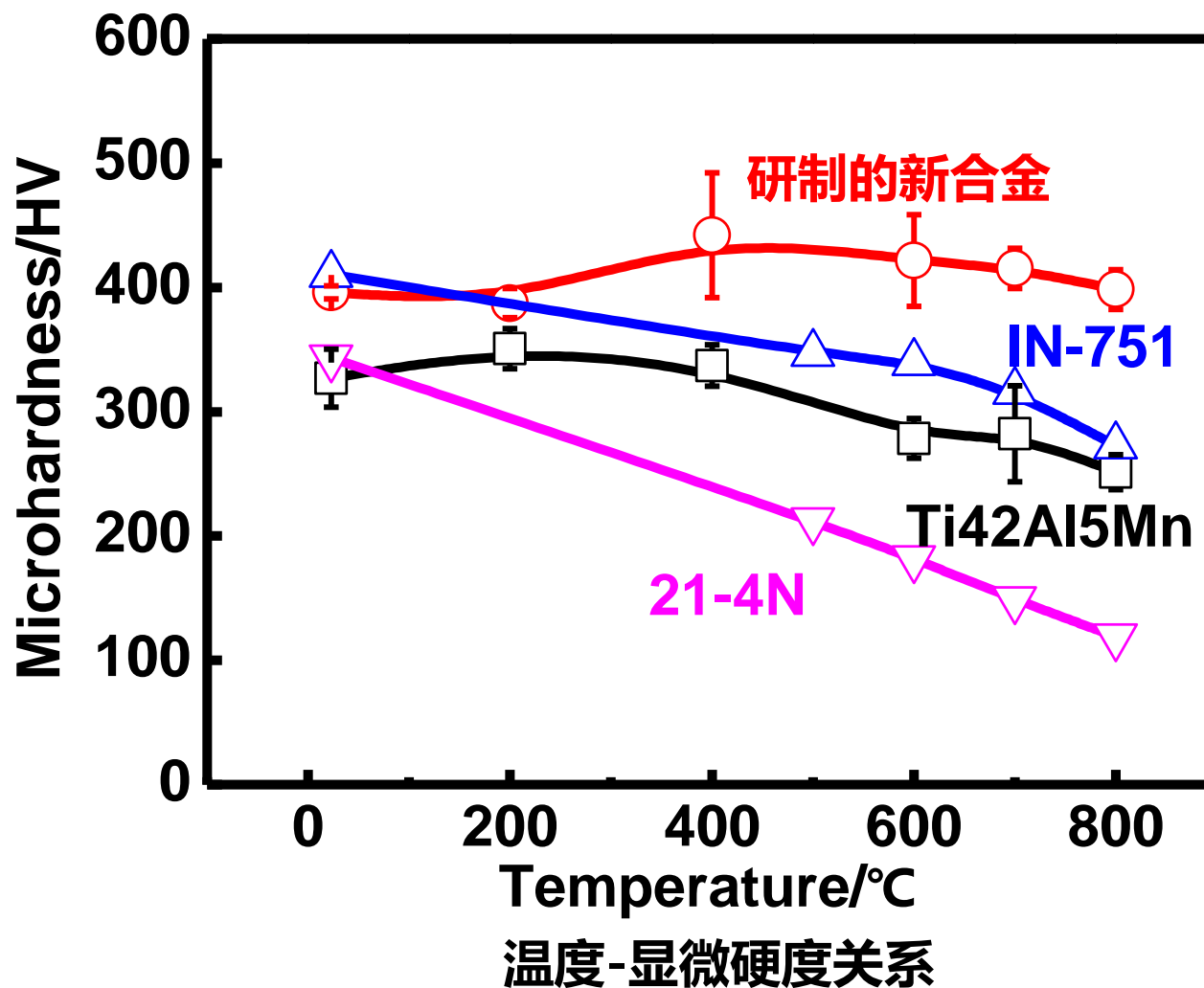


温度-屈服强度关系对比

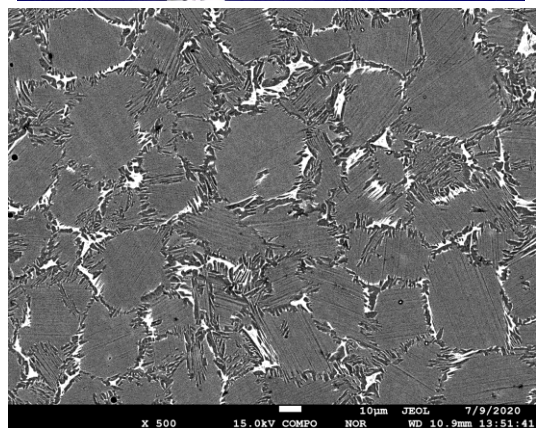
注：21-4NWNb、SUH38M、Ni-80A为现应用的气阀材料（某阀门生产商提供的数据）

TiAlMnW、TiAlMnMo系合金为研制的TiAl气阀材料

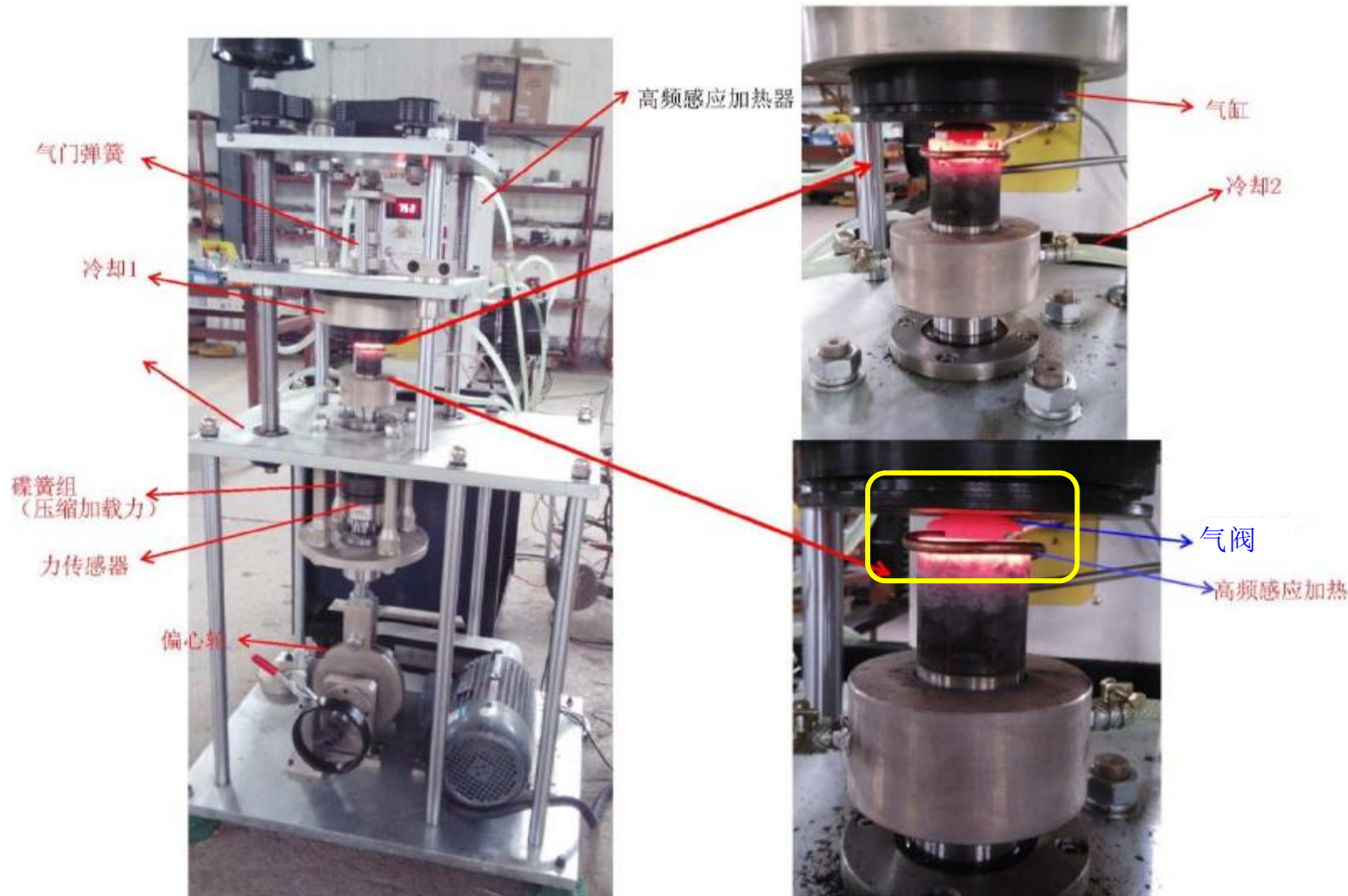
- ✓ 室/高温硬度均**优于**现役气阀材料 (IN-751,21-4N耐热钢)
- ✓ 高温时硬度**降低**幅度较小



# ➤ TiAl气阀疲劳测试

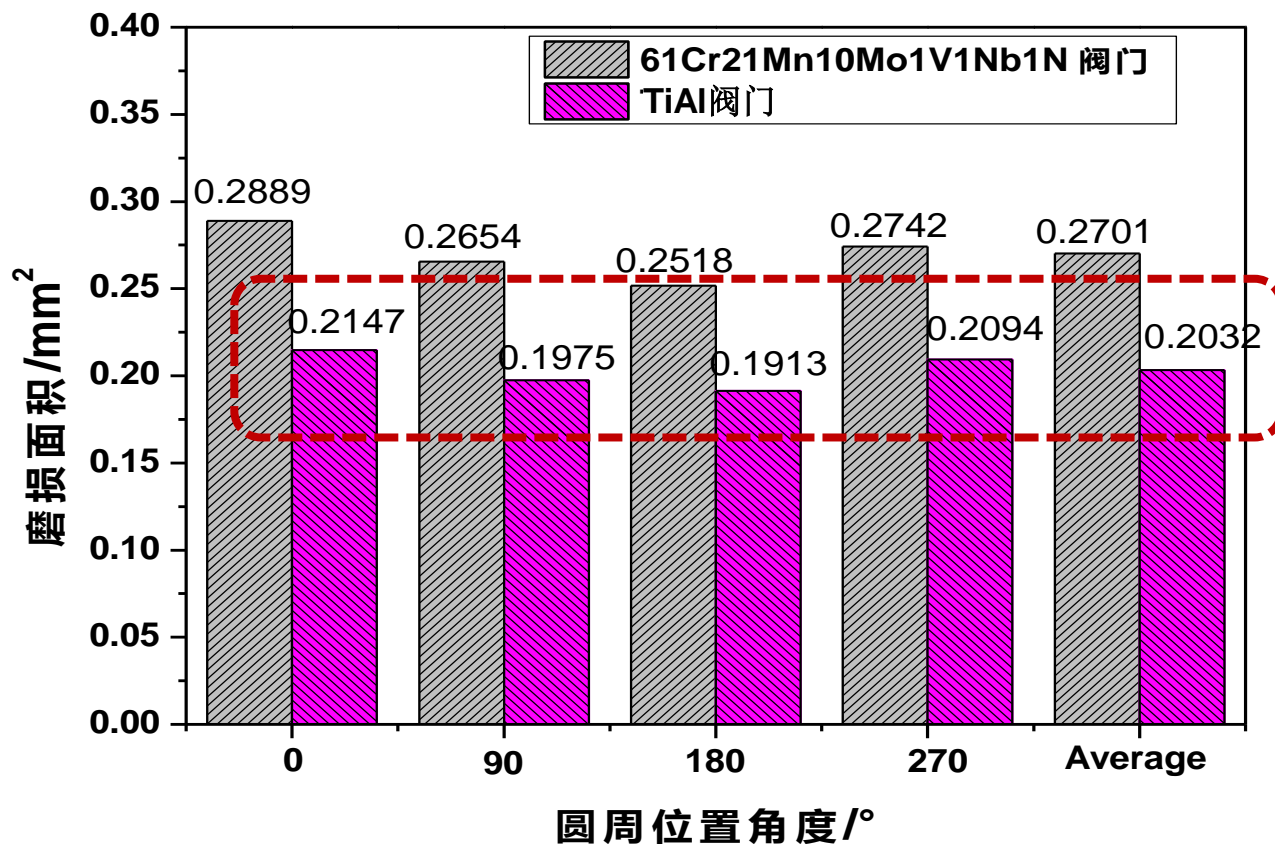


变形TiAl气阀及其显微组织形貌



委托华南理工大学测试气门-座圈疲劳磨损性能





## 华南理工大学测试结果

- **TiAl气阀在不同位置磨损量均比常规材料气阀小!**
- **用户认为, 变形TiAl气阀可大批量应用!**

# 三、国际合作



## (1) 欧盟框架5项目-轻质TiAl气阀

1999年底，英国伯明翰大学Loretto 和 Xinhua Wu教授就项目**寻求金属所帮助**，金属所与明翰大学、欧洲最大气阀制造公司 (TRW) 开展联合攻关。



## ➤ TiAl气阀通过TRW公司发动机试车



金属所研制、伯明翰大学涂层的铸造TiAl基合金气阀通过试车。



试车前



试车后

**TRW公司对服役温度更高的排气阀进行了200小时台架和400小时苛刻条件下发动机试车，评价结论是，金属所制备的排气阀试车后几乎没有任何磨损和其它缺陷产生！**

经过中英双方共同研究的TiAl气阀取得了喜人的成绩，国外多个网站相继进行了报道：  
欧盟<http://europa.eu.int/> 美国工程师学会<http://www.sme.org/> 英国汽车工业<http://www.autoindustry.co.uk/> 英国Birmingham大学<http://www.bham.ac.uk/>等网站。

The screenshot shows a news article titled "'LIVALVES' - European and Chinese collaboration leads to possible breakthrough". The article discusses the development of new valve technologies for car engines to reduce fuel consumption and CO2 emissions. It mentions that the project is part of the European Commission's Fifth R&D Framework Programme and is funded by the EU. The article also includes a photograph of a red sports car and a sidebar with navigation links.

[Road transport](#) | [Environment](#) | 10-06-2004

### 'LIVALVES' - European and Chinese collaboration leads to possible breakthrough

*New valve technologies for car engines could make a real difference in terms of fuel consumption and carbon dioxide emissions. With some expert help from Chinese friends, researchers have breathed new life into an EU-funded project that looked ready to fail.*



The voluntary commitment by the European automotive industry to reduce carbon dioxide emissions by 20% from new car fleets by 2008 is driving a variety of research and development projects. Progressive technical modifications to engines and drive chains are already reducing greenhouse gas emissions every year, but experts say reaching the 20% target is going to demand more than modifications. Instead, truly radical advances in vehicle technology are needed.

#### Lightening the load

The LIVALVES project (Light-weight valves for high-efficiency engines), funded under the European Commission's Fifth R&D Framework Programme, is improving the way car engines work by reducing the weight of the valves that open and close to admit fuel and remove exhaust gases from engine cylinders.

Project coordinator Klaus Gebauer of TRW Deutschland, an automotive systems company,

*Image : Peter Gutierrez*

**Surface Transport Research**

- Site Mission
- Transport White Paper
- ERA
- Framework Programmes

**Transport Modes**

- Road -->
- Rail -->
- Maritime -->
- Public Transport -->

**Research Challenges**

- Safety -->
- Environment -->
- Competitiveness -->
- Integration
- Intermodality -->

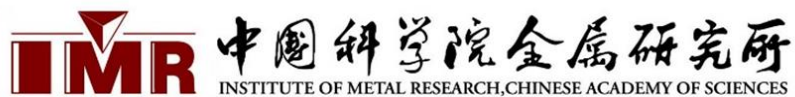
**News & Info**

- Highlights
  - Success for low-weight auto parts project
  - European Railway Agency launched
- Events
- Press Releases
- Multimedia

新的气阀技术可让发动机在燃料消耗和CO<sub>2</sub>排放方面产生实质性的变化。由于来自中国专家的帮助，使得一个濒临失败的欧洲框架项目充满了新的生机。

(2) 2019年，与奥地利莱奥本大学Helmut Clemens 教授团队就新一代变形TiAl材料签订战略合作协议，联合攻关。

## 中奥国际合作项目



- ◆ 研制出组织、力学性能、抗氧化性能优异的TiAlMnW、TiAlMnMo系新材料。
- ◆ 创新出国际顶尖强活性TiAl合金的颠覆性熔炼技术。
- ◆ 突破了低成本TiAl合金变形的卡脖子问题，实现了铸锭常规锻造、热轧变形，显著降低了该系列材料部件的制造成本。
- ◆ 开发的低成本TiAl气阀制造技术可大批量产业化生产，正在开发柴油发动机连杆、活塞等系列部件集成制造技术。

# 特别致谢:



- 内燃机可靠性国家重点实验室开放课题重点项目: 柴油机零部件用轻质钛铝基合金材料研究
- 国家自然科学基金面上项目: 含锰 $\beta$ - $\gamma$ 型TiAl合金B2相中二次 $\gamma$ 相和Laves相析出行为与调控机制
- 辽宁省自然科学基金面上项目、中国博士后科学基金面上项目等项目支持



THE UNIVERSITY OF  
BIRMINGHAM





# 谢谢!



地址：辽宁省沈阳市沈河区文化路72号，110016

联系人：刘奎

办公电话：024-83973550

移动电话：18809895545

邮箱地址：[kliu@imr.ac.cn](mailto:kliu@imr.ac.cn)

