

# TiAl 金属间化合物合金的激光气体合金化表面改性研究\*

王华明 郭淑平 史岗

(北京航空航天大学材料科学与工程系 北京 100083)

**提要** 对 TiAl 金属间化合物合金进行激光气体合金化表面改性,在激光表面改性层中成功地制得了以高硬度氮化钛为增强相的新型快速凝固“原位”耐磨复合材料。激光表面改性层厚度及显微组织与显微硬度均受激光处理工艺参数的控制。初步试验结果表明,激光气体合金化是一种很有前途的提高 TiAl 金属间化合物合金耐磨性的表面改性新技术。

**关键词** TiAl 金属间化合物合金,激光表面改性层,激光气体合金化,耐磨性

## 1 引言

TiAl 金属间化合物合金具有比强度高、比刚度高、高温强度及蠕变抗力好等突出优点,被看作为在航空航天及工业燃汽轮机等领域中最有前途的新型高温结构材料之一<sup>[1]</sup>。但 TiAl 合金存在着耐磨性低的固有缺点<sup>[2]</sup>,而对许多 TiAl 关键高温部件(如燃汽轮机叶片、发动机排气阀等)来说,耐磨性正是决定其使用性能和寿命的关键因素之一<sup>[3]</sup>。采用先进的表面改性技术对 TiAl 合金进行表面处理是提高其耐磨性的有效办法,但令人遗憾的是,迄今在国内外均未见到有关提高 TiAl 合金耐磨性的表面处理研究及专利报道。为提高 TiAl 合金的抗氧化等环境性能,国内外近年来采用离子束增强沉积<sup>[4,5]</sup>、等离子氮化<sup>[6]</sup>、低氧分压高温氧化<sup>[7]</sup>等表面技术,但这些技术存在着涂层厚度薄、与基体结合强度低、涂层易于剥落等缺点,采用这些技术达不到有效地提高 TiAl 合金耐磨性的目的。因此,有必要寻求提高 TiAl 合金耐磨性的表面改性新技术。

值得庆幸的是,氮化钛等陶瓷化合物具有很高的硬度和优异的耐磨性,在快速凝固条件下它们往往具有树枝状、胞状等特殊生长形态<sup>[8,9]</sup>,TiAl 合金中又正好含有大量的合金元素钛,因此,若能通过表面快速凝固处理直接“原位”地在 TiAl 表面制得以氮化钛硬质耐磨化合物为增强相的复合材料的话,由于其中“原位”形成的高硬度高耐磨氮化钛被基体极其牢固地镶嵌而在磨损过程中能充分发挥其高耐磨作用,该表面改性层无疑会具有优异的抗磨性能,由此可望解决 TiAl 合金耐磨性低的问题。据此,本文通过“激光气体合金化”工艺,即在 TiAl 合金激光表面快速熔化过程中强行向激光高温熔池中引入高纯氮气反应气体,借助于氮气与熔池中高

\* 国家自然科学基金(59671050)、航空科学基金(95G51005)、航空高校自选课题资助项目。

收稿日期: 1996-09-09; 收到修改稿日期: 1996-12-16

温 TiAl 合金液之间的化学/冶金反应及随后的快速凝固,“原位”地在 TiAl 合金表面制得以高硬度高耐磨氮化钛为增强相的新型快速凝固“原位”陶瓷/金属耐磨复合材料表面改性层,为提高 TiAl 金属间化合物合金耐磨性寻求新的表面改性途径。

## 2 试验方法

TiAl 金属间化合物合金试验材料的化学成分(at.-%)为 Ti-48%Al。试样采用线切割取自等温锻造 TiAl 试验盘坯,试样尺寸为  $10 \times 10 \times 55$  (mm)。试样激光气体合金化表面改性处理在 1.5 kW CO<sub>2</sub> 激光加工系统上进行,激光表面处理工艺参数:激光功率为 500 W,束斑直径约为 1 mm,束斑扫描速度为 20~100 mm/min,氮气流量为 15 L/min。按常规金相试样制备方法制备金相试样,分别用 OM 及 SEM 分析显微组织,用 X 射线衍射方法结合能谱分析进行物相鉴定,在 100 g 载荷下测定表面改性层的显微硬度分布。

## 3 实验结果及讨论

典型的显微组织见图 1。在扫描速度较低时,表面改性层中含有大量呈规则胞状生长形态的组织组成相(图 1(a)),随着激光束扫描速度的增加,其生长形态向发达树枝状转化(图 1(b))。能谱分析结果表明这种相中的氮、钛含量均很高(见图 2),X 射线衍射分析结果表明激光表面改性层中明显存在 TiN 的衍射峰(见图 3,激光扫描速度为 100 mm/min),综合能谱

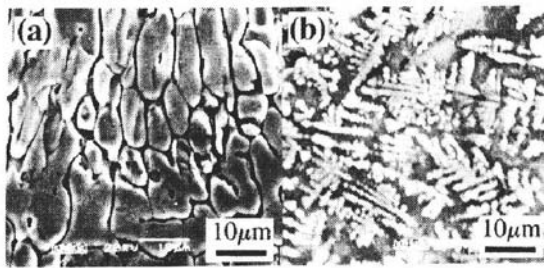


图 1 T 表面改性层典型的显微组织 SEM 照片  
(a) 以胞状氮化钛为增强相的复合材料,激光束扫描速度 25 mm/min; (b) 以树枝状氮化钛为增强相的复合材料,激光束扫描速度 75 mm/min

Fig. 1 SEM micrographs of the laser modified surface

(a) composite structure reinforced by dense cellular titanium nitride and (b) composite structure reinforced by dendritic titanium nitride

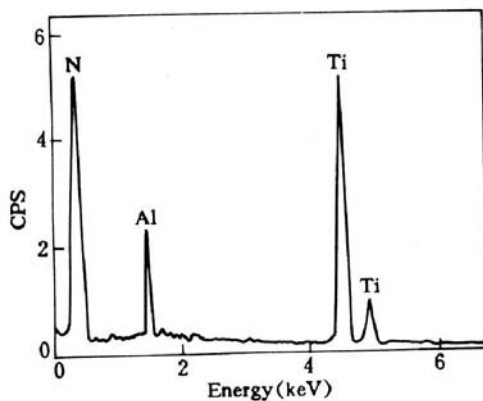


图 2 表面改性层中氮化钛相的能谱分析结果

Fig. 2 EDX analysis result for the titanium nitride phase in the laser modified surface

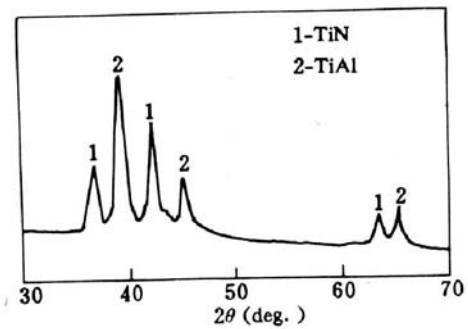


图 3 表面改性层的 X 射线衍射谱

Fig. 3 XRD spectrum for the laser gas alloyed surface

及 X 射线衍射分析结果可以断定组织中呈胞状及发达树枝状生长形态的新相为氮化钛相。这说明由于激光气体合金化过程中氮气与表面熔池中高温 TiAl 合金液之间的强烈化学及冶金交互作用的结果,快速凝固后在 TiAl 合金激光表面改性层中形成了大量胞状及树枝状氮化钛硬质耐磨相,从而制得了预期的以硬质耐磨氮化钛化合物为增强相的快速凝固“原位”耐磨复合材料。该快速凝固“原位”耐磨复合材料显微组织及显微硬度均强烈地受激光工艺参数的影响,在其它工艺参数保持不变的条件下,激光束扫描速度越低,熔池中液态金属与氮气的交互作用时间越长,快速凝固前熔入合金液的氮原子及直接化学反应形成的氮化钛越多,因而,最终快速凝固后表面改性层显微组织中氮化钛体积分数及表面改性层显微硬度均越高;此外,激光束扫描速度越高,熔池金属快速凝固时的局部温度梯度  $G$  越高而凝固生长速度  $R$  越低,即凝固界面稳定性因子  $G/R$  越小,因而表面改性层中氮化钛生长形态树枝状越加发达。

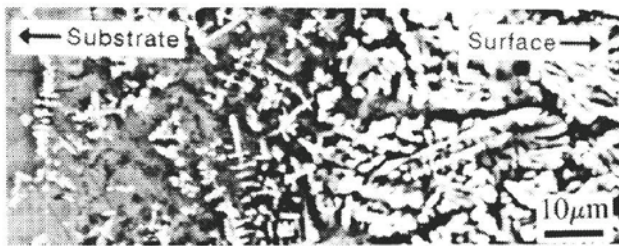


图 4 表面改性层显微组织的低倍 SEM 照片

Fig. 4 Low magnification SEM micrograph of the laser gas alloyed surface

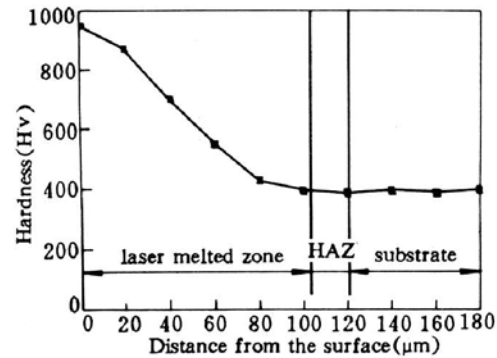


图 5 表面改性层显微硬度分布曲线

Fig. 5 Hardness profile across the laser modified surface layer

值得一提的是, TiAl 合金激光气体合金化表面改性层与基材间的结合为完全的冶金结合,特别是其显微组织从熔池底部向表面方向具有明显的梯度渐变特征,即愈接近自由表面,组织中氮化钛所占体积分数愈高,如图 4 所示(激光束扫描速度同图 3)。由于表面改性层显微组织的这种梯度渐变特征,其显微硬度从熔池底部向自由表面方向也梯度渐变增加,如图 5 所示(激光束扫描速度同图 3)。TiAl 合金激光气体合金化表面改性层显微组织及其硬度等性能的梯度渐变特点,是由激光气体合金化及其快速凝固过程所决定的。这是因为表面熔池金属液凝固时,凝固界面是从熔池底部逐渐向熔池表面方向推进的,越接近熔池表面的合金液,与氮气的交互作用时间越长,溶入合金液的氮原子量及在熔池中直接化学反应形成的氮化钛量就越多,因而快速凝固后组织中氮化钛的体积分数越高。

TiAl 合金激光气体合金化处理后,由于形成了大量的硬质耐磨相氮化钛,表面改性层显微硬度大大提高(表面改性层表面显微硬度在 HV900-1100,扫描速度越低,硬度越高),特别是由于硬质耐磨的氮化钛相呈胞状及发达树枝状这样的特殊生长形态,被基体牢固地镶嵌住,在摩擦磨损过程中不易脱落,故这种快速凝固“原位”耐磨复合材料可望具有优异的耐磨性能。

## 4 结 论

通过对 TiAl 金属间化合物合金进行激光气体合金化表面改性处理,成功地制得了以硬质

耐磨氮化钛为增强相的新型快速凝固“原位”耐磨复合材料表面改性层,表面改性层厚度、组织及硬度均可通过调节激光处理工艺参数而得到灵活的控制,试验结果表明激光气体合金化对提高 TiAl 金属间化合物合金耐磨性是一种很有前途的表面改性新技术。

致谢 TiAl 合金试验材料由北京航空航天大学张永刚教授提供,谨此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 Chesnutt J. C. . Titanium aluminides for aerospace application. in: Antolovich S. D. , Stusrud R. W. , Khan T. eds. , Superalloys 1992. TMS. 1992. 381~388
- 2 Larsen J. M. , Worth B. D. , Balsone S. J. et al. . Reliability issues affecting the implementation of gamma titanium aluminides in turbine engine applications, a paper presented at the 8th World Conference on Titanium, 22~26 October 1995. Birmingham. U. K.
- 3 Hurt S. , Clemens H. , Frommeyer G. et al. . Valves of intermetallic  $\gamma$ -TiAl base alloys: processing and properties, a paper presented at the 8th World Conference on Titanium, 22~26 October 1995. Birmingham. U. K.
- 4 Xu D. , Zhang Z. , Liu X. et al. . Improvement of oxidation resistance of TiAl by ion-beam-enhanced deposition coatings. *Surface & Coatings Technology*, 1994, **66** : 486~492
- 5 Laniguchi S. , Shibata T. , Toshio Y. et al. . High temperature oxidation of TiAl improved by IBED  $\text{Si}_3\text{N}_4$  coating. *ISIJ International*, 1993, **33** : 869~875
- 6 Gredic I. , Latanovic M. , Munz W. D. . Plasma nitriding of Ti and TiAl coatings. *Surface & Coatings Technology*, 1993, **61** : 338~343
- 7 Yoshihara M. , Suzuki T. , Tanaka R. . Improvement of oxidation resistance for TiAl by surface treatment under a low partial pressure oxygen atmosphere and Al diffusion coatings. *ISIJ International*, 1991, **31** : 1201~1207
- 8 Wang H. M. , Tang Y. J. , Zhang J. H. et al. . Rapidly solidified MC carbide morphologies of a laser glazed single-crystal nickel-base superalloy. *Mat. Sci. Eng. A*, 1992, **A156** : 109~116
- 9 Ayers J. D. , Schaefer R. J. , Robey W. P. . A laser processing technique for improving the wear resistance of metals. *Journal of Metals*, 1981, (8) : 19~23

## Surface Modification of TiAl Intermetallic Alloys by Laser Gas Alloying

Wang Huaming Guo Shuping Shi Gang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**Abstract** Laser gas alloying with nitrogen was employed to improve the wear resistance of TiAl intermetallic alloys. The rapidly solidified in-situ wear resistant composite materials reinforced by hard titanium nitride were successfully fabricated in the laser modified surface layer. The microstructure and hardness of the laser modified surface are governed by the laser processing parameters. Results demonstrate preliminarily that laser gas alloying with nitrogen is a potential promising new surface modification technique for improving the wear resistance of TiAl intermetallic alloys.

**Key words** TiAl intermetallic alloy, laser surface modification, laser gas alloying, wear resistance