

## 铝合金隔热涂层研究\*

张虹 斯永敏 刘庆国

(国防科技大学材料工程与应用化学系 长沙 410073)

**摘要** 本工作研究了在 LY12 表面用等离子喷涂氧化锆隔热涂层的热传导性能和抗热震性能及气孔率对这些性能的影响。结果表明,在所选择的最佳工艺参数和厚度下,涂层具有良好的绝热性和抗热震性。

**关键词** 热障; 等离子喷涂; 涂层; 氧化锆

**分类号** TB39

隔热涂层是对处于高热环境下工作的构件表面覆盖一层具有一定强度和结合力的隔热物质,以保持工件的工作强度和增强高温腐蚀性能,提高构件的使用寿命和工作效率。隔热涂层已在航空发动机燃烧室和叶片上应用<sup>[1]</sup>,取得了良好的效果。

内燃机活塞一般用铝合金制成,活塞顶部通常采用深阳极化处理以提高其高温耐蚀性。由于在工作过程中气缸和活塞处于 350℃ 以上高温,一方面使活塞产生较大形变,另一方面由于导热使气缸内外温度趋于一致造成了能量损失,且活塞端部微薄的深阳极化氧化层不能很好抵御化学介质的侵蚀,因而影响活塞的工作寿命。如果在活塞端部敷设隔热涂层,可有效地改变上述缺点,提高使用寿命。隔热涂层应该具有以下性能:优良的抗高温腐蚀性能,涂层和被保护的基体有相近的热膨胀性能、较好的耐热冲击性能,涂层和基体有良好的结合力,尤其应有低的热传导性能。

可以采用的涂层材料有多种选择,如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和用氧化镁和氧化钙稳定的氧化锆。结构型  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{ZrO}_2$  的有关性能见表 1<sup>[2~4]</sup>。

由表 1 可见,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的热膨胀性能与被保护基体相差较大,而且导热性比  $\text{ZrO}_2$  高,所以  $\text{ZrO}_2$  是较  $\text{Al}_2\text{O}_3$  更理想的涂层隔热材料。采用等离子热喷涂技术,在 LY12 基材上喷涂  $\text{ZrO}_2$  粉末,得到隔热涂层。内燃机活塞材料通常是铸铝合金,本研究中考虑到试样制作的方便,被保护的基体采用 LY12。从热喷涂工艺上考虑,LY12 的各项性能与铸铝合金没有显著差别,用它来研究涂层的性能和用铸铝合金将是一致的。

表 1 几种材料的热膨胀性能和导热性能

	$\text{ZrO}_2$ (稳定)	$\text{Al}_2\text{O}_3$	LY12
线膨胀系数( $\alpha$ ) $10^{-6}/\text{k}$	10.0	8.8	24.7
导热系数( $\lambda$ ) $\text{w}/(\text{m}\cdot\text{k})$	2.09	25.1	117.2
体积密度( $\rho$ ) $\text{g}/\text{cm}^3$	5.7	3.85~3.98	2.78

\* 1994年5月6日收稿

# 1 实验

在 LY12 基材上喷涂  $ZrO_2$  前,先喷涂一层过渡层,过渡层选用的是 NiCrAl 复合粉。在 NiCrAl 层喷到一定厚度后,喷涂  $ZrO_2$  (6%~8% $Y_2O_3$  稳定的  $ZrO_2$ ),得到最终涂层。

对涂层进行了显微结构观察和孔隙度、导热系数抗拉强度及抗热震性能的测定。

为了研究涂层气孔率对导热性能的影响,改变工艺参数得到不同气孔率的涂层试样,分别测定了其导热率,数据见表 2、3。考虑到内燃机活塞的工作过程中可能存在温度波动,因此还测定了涂层在不同温度下的热导率。

表 2 不同气孔率涂层导热率(350 C, 0.2mm)

气孔率(%)	29.77	25.44	18.99
导热率(w/(m·k))	1.625	1.710	1.744

表 3 不同温度下涂层的导热系数(涂层厚 0.2mm,气孔率~30%)

温度(k)	379	489	597
导热系数(w/(m·k))	0.897	1.079	1.387

# 2 结果分析与讨论

采用等离子喷涂方法获得的涂层结构见图 1,它包括过渡层和绝热层,其中含有孔隙、氧化物和未熔粒子。与同样物质组成的结构陶瓷相比较,涂层是比较疏松的。

对隔热涂层来说,导热系数( $\lambda$ )是其最重要的性能数据。导热系数越低则涂层的隔热效果越好。固体的热传导是通过各类载子进行的,计算公式如下<sup>[5]</sup>:

$$\lambda = 1/3 \sum C_i V_i L_i \quad (1)$$

式中  $i$  代表各类载子, $C$  为载子热容, $V$  为载子平均速度, $L$  为载子运动平均自由程。固体材料

中的载子主要为声子和自由电子,陶瓷材料晶体的晶格中,自由电子极少,声子是其热传导的主要载子。由  $\lambda$  的表达式可以看出, $C$ 、 $V$ 、 $L$  决定了材料的热传导性能。 $C$ 、 $V$ 、 $L$  越小,热传导系数越小,则材料的隔热性越好。 $C$ 、 $V$ 、 $L$  与温度有关,而载子与载子之间以及载子与缺陷(或杂质)之间相互作用所给的平均自由程  $L$  则对涂层中的缺陷和杂质敏感。

具有图 1 所示结构的涂层,由于气孔、氧化物质点的存在,使声子在传热振动过程中受到偏转并使散射加大,气孔率越高, $\lambda$  越小,比结构陶瓷低得多。另一方面,气孔、氧化物和未熔质点将降低涂层的力学性能。因此,应在综合考虑涂层的隔热效果和力学性能的前提下合理控制它们的含量。

热导率与温度的关系较复杂,在本实验范围内,随温度升高导热率升高。

活塞在工作过程中经受温度变化引起热冲击,因此活塞的隔热涂层还应具有高的抗热震性,即在温度急剧变化下抵抗破坏的能力。本实验采用反复将试样加温后迅速投入

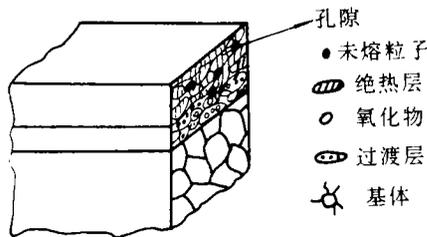


图 1 涂层结构

冷水中的方法来考察涂层的热震性能。具体做法是,将试样加热到 500℃后,迅速投入冷水中,冷却三分钟,再加热到 500℃……循环下去,每次循环后观察和记录试样表面状态。实验表明,试样经受 100 次循环后,涂层与基体结合完好,没有发生翘曲、裂纹和脱落,说明本种涂层的抗热震性良好。

涂层在热冲击下发生破坏的最主要的原因是涂层与基体的热膨胀性能不同,在迅速冷却过程中,膨胀系数的差别会在基体、涂层和界面中产生很大的内应力。如果界面结合强度低,一旦内应力超过了结合强度则可产生涂层脱落。用常规的检测方法检测,强度比国内任何粘接剂强度都高,因而没有发生脱落破坏,隔热层与被保护基体的膨胀系数虽然差别较大,但由于在两者之间喷涂了过渡层,过渡层的膨胀系数介于两者之间,因而缓解了涂层开裂的趋势。如果调整涂层的成分,使其膨胀性能沿厚度逐渐变化,形成完全没有膨胀性能突变的涂层结构,这样的涂层性能当然会更优良。这就是当前材料科学领域的研究热点,即梯度功能材料的概念,它也是本工作所要进一步深入开展的内容。

另外,由于涂层中未熔粒子、过渡层中氧化物粒子与周围材料在性能上有很大的区别,在温度变化和载荷作用下可能发生应力高度集中而与周围脱开成为裂纹源,特别在靠近基体处,涂层与基体、涂层与缺陷颗粒界面上。但是只要严格控制原料成分和适当调整喷涂工艺,可将这些缺陷限制在较低水平,对整个涂层的性能将不会造成重大影响。

如果选用 NiCrAlY 作过渡层,在喷涂中 Y 和 Al 可氧化成  $Y_2O_3$  和  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  渗透到过渡层表面,得到致密的底层,抗腐蚀能力将更好。

(1) 在所选择的最佳工艺参数下,等离子喷涂氧化锆涂层与基体有较好的结合强度、软低的热导率及良好的抗热震性能。(2) 当涂层厚度为  $\sim 200\mu\text{m}$ ,气孔率为  $\sim 30\%$  时,实验测得涂层热导率和抗热震性能达到较好配合。

## 参 考 文 献

- 1 冯宜生. 涡轮风扇发动机燃烧室用热障涂层. 航空制造工程, 1990, (8)
- 2 W O 金格瑞等. 陶瓷导论. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982
- 3 华南工学院. 陶瓷材料物理性能. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980
- 4 《轻金属材料加工手册》编写组. 轻金属材料加工手册. 北京: 冶金工业出版社, 1979

## Thermal Barrier Coating on Aluminum Alloy

Zhang Hong Siyong Min Liu Qingguo

(Department of Materials Engineering and Applied Chemistry,  
NUDT, Changsha, 410073)

### Abstract

This paper describes the behavior of thermal conductivity and thermal shock, and the effect of porosity of plasma-sprayed zirconia coating on LY12. It shows that good heat-isolation property and resistance to thermal shock can be obtained in best process parameter and thickness of coating.

**Key words** thermal barrier; plasma-spray; coating zirconia