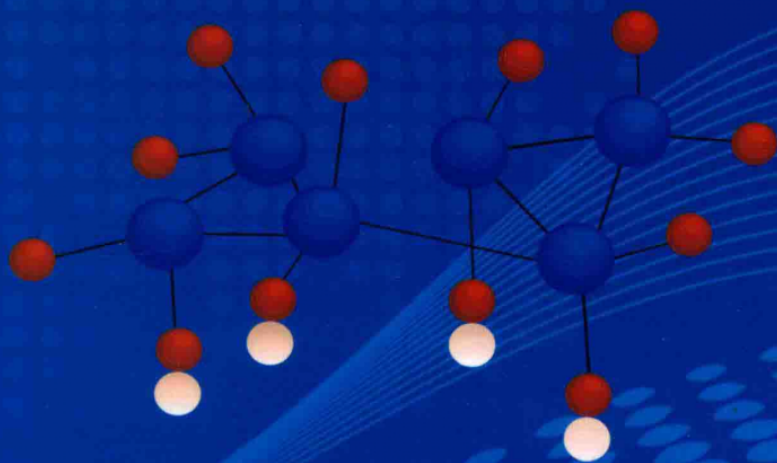


纳米热障涂层材料

Nano-sized Thermal Barrier Coating Materials

王春杰 王月 张志强 著



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn



Metallurgical Industry Press
冶金工业出版社



Nano-sized Thermal Barrier Coating Materials



体验更多精彩阅读
尽在冶金工业出版社微信平台



定价 49.00 元
销售分类建议：材料科学

纳米热障涂层材料

王春杰 王月 张志强 著

北京
冶金工业出版社
2017

内 容 提 要

本书所述的热障涂层是利用陶瓷的隔热和抗腐蚀的特点来保护金属基底材料的,可有效地提高热端部件的使用寿命,在航空、航天、军工、电力、交通等方面都有重要的应用价值。纳米热障涂层基于纳米材料的四大效应,在特定环境中有着广阔的应用前景。本书对纳米涂层及材料的制备方法、研究分析方法、传统涂层与纳米涂层的区别以及新型纳米热障涂层的制备及性能研究进行了讨论。侧重介绍纳米热障涂层材料的发展方向和前沿,基本反映了国内外在纳米热障涂层材料研究方面的热点。

本书内容新颖、深度适中,适合从事热障涂层材料工作的工程技术人员,以及大专院校的大学生、本科生和教师阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米热障涂层材料/王春杰,王月,张志强著. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5024-7532-1

I. ①纳… II. ①王… ②王… ③张… III. ①纳米材料—热障—涂层 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 110341 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7532-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版, 2017 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.75 印张; 246 千字; 191 页

49.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

本书所述的热障涂层是利用陶瓷粉末低热导率、耐高温等特性，将其喷涂或沉积在金属基体表面，形成具有优良隔热效果的涂层，能显著降低金属基底表面温度，缓解高温腐蚀、氧化，从而达到提高发动机工作效率、延长使用寿命的目的。热障涂层材料必须具有熔点高、热导率低、耐腐蚀、在室温至使用温度区间没有相变、与高温合金有相近的线膨胀系数、与金属基底较强的结合性以及较好的抗烧结性等性能。基于纳米材料的四大效应（量子尺寸效应、小尺寸效应、宏观量子隧道效应、表面与界面效应），相比于传统涂层，纳米尺寸的涂层具有线膨胀系数大、热扩散系数低、硬度大、断裂韧性高等特点，虽然在使用温度上要比传统涂层低 100°C ，但其服役寿命要远长于传统涂层，因此近年来对纳米热障涂层的研究已成为热障涂层领域的焦点。

最经典的热障涂层材料是氧化钇部分稳定化的氧化锆（8YSZ），具有韧性高、高强度、抗冲击性好、线膨胀系数大、耐腐蚀、稳定性好等优点。但是 8YSZ 在 1443K 温度以上容易发生相变，不能满足未来发展的需求。科学家正在努力研究能在更高温度下使用的新型热障涂层材料。迄今为止，人们对稀土锆酸盐（ $\text{Re}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ）、稀土铈酸盐（ $\text{Re}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ ）、钙钛矿、稀土六铝酸盐等材料进行了大量的研究。稀土锆酸镧 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 材料由于其优异的性能被认为是新一代的热障涂层材料，但是其主要缺点是线膨胀系数和断裂韧性较低。针对该材料的优缺点，可以采用线膨胀系数较大的材料进行掺杂，来改性材料的弱势性能。实验证明， $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 具有优良的热物理性能，是未来

热障涂层主要的候选材料之一。

热障涂层是一个复杂的体系，涉及化学、物理、机械、数学和工程等方面的知识。本书着重讨论的是纳米热障涂层材料的物理、化学问题，而且很多现象还有待深入探讨、研究。由于作者学识有限，书中难免有疏漏及不妥之处，敬请广大同行批评指正。

作 者
2017年3月

目 录

1 热障涂层概述	1
1.1 热障涂层原理	1
1.1.1 无机涂层	2
1.1.2 热障涂层	3
1.2 热障涂层结构设计	6
1.2.1 双层结构涂层	6
1.2.2 多层结构涂层	6
1.2.3 功能梯度涂层	8
1.2.4 厚涂层	9
1.3 热障涂层陶瓷层材料的性能要求	10
1.3.1 高熔点	10
1.3.2 良好的高温相稳定性	10
1.3.3 低热导率	10
1.3.4 高线膨胀系数	10
1.3.5 与 TGO 层之间良好的化学稳定性和黏结性	11
1.3.6 良好的耐腐蚀性	11
1.3.7 低弹性模量以及较高的硬度和韧性	11
1.3.8 低烧结率	12
1.4 热障涂层的失效机理	12
1.4.1 TGO 的生长	13
1.4.2 陶瓷层的烧结作用	14
1.4.3 陶瓷层中的相变	15
参考文献	15
2 热障涂层材料的合成	20
2.1 概述	20
2.1.1 粉末密度的表征方法	21
2.1.2 粉末的制备方法	21
2.2 多元陶瓷粉末的制备方法	22

2.2.1 液相法	22
2.2.2 固相法	23
2.2.3 感应等离子体合成法	27
2.3 团聚体粉末的制备方法	28
2.3.1 球磨法	28
2.3.2 喷雾干燥法	29
参考文献	30
3 热障涂层的制备	33
3.1 热喷涂	33
3.1.1 火焰喷涂	33
3.1.2 爆炸喷涂	33
3.2 等离子喷涂	34
3.2.1 等离子喷涂原理和设备	34
3.2.2 PS 法涂层的形成过程	39
3.3 电子束-物理气相沉积法 (EB-PVD 法)	43
3.3.1 电子束-物理气相沉积原理和设备	43
3.3.2 叶片 EB-PVD 涂层的生产过程	44
3.3.3 热障涂层的其他制备方法	48
参考文献	48
4 陶瓷粉末及涂层微观组织结构分析方法	50
4.1 X 射线衍射技术	50
4.1.1 X 射线衍射技术简介	50
4.1.2 X 射线粉末衍射技术	51
4.1.3 X 射线双晶衍射技术	52
4.1.4 X 射线三晶衍射技术	53
4.2 扫描电子显微镜	53
4.2.1 扫描电子显微镜的工作原理	54
4.2.2 扫描电镜的仪器结构	56
4.2.3 配套设备及其用途	58
4.3 透射电子显微镜	59
4.3.1 电子的波长与加速电压	60
4.3.2 透射电镜的构造	61

4.4	拉曼光谱分析	72
4.4.1	基本原理	73
4.4.2	基本构成及其工作原理	74
4.4.3	拉曼光谱的特点	76
4.4.4	拉曼光谱的应用	77
4.5	X射线光电子能谱分析	77
4.5.1	方法原理	77
4.5.2	仪器结构和工作原理	79
4.6	红外光谱仪	87
4.6.1	基本原理	87
4.6.2	红外光谱仪的特点及应用	88
4.7	弹性系数	90
4.8	差热分析	90
4.8.1	差热分析的基本原理	90
4.8.2	差热曲线的峰面积及过程热效应	94
4.8.3	差热分析的影响因素	96
4.9	陶瓷涂层的热物理性能的测量	100
4.9.1	陶瓷涂层的热物理性能的理论基础	100
4.9.2	热扩散系数的测量	103
4.10	密度测定及孔隙率测定	104
4.11	涂层断裂韧性的测定	104
4.11.1	临界应力强度因子 K_{IC}	105
4.11.2	临界裂纹扩展能量释放率 G_{IC}	105
4.11.3	裂纹密度 β	107
4.12	涂层隔热性能测试	108
4.13	热震试验	110
4.13.1	热应力断裂理论	110
4.13.2	热冲击损伤理论	111
4.14	抗高温氧化性	112
4.15	耐磨损性	113
4.16	涂层结合强度	113
4.16.1	黏结拉伸法	113
4.16.2	界面压入法	114
4.16.3	断裂力学法	114

4.16.4 动态结合强度测试法	114
参考文献	115
5 传统热障涂层	118
5.1 ZrO ₂ 的物理化学性质	118
5.2 ZrO ₂ 的晶体结构及相变特点	118
5.2.1 ZrO ₂ 的晶体结构	118
5.2.2 ZrO ₂ 的相变特点	120
5.2.3 ZrO ₂ 的相变稳定	120
5.3 氧化锆陶瓷的增韧机制	122
5.3.1 应力诱发相变增韧机理	122
5.3.2 表面强化增韧	123
5.3.3 微裂纹的增韧机理	123
5.3.4 弥散增韧机理	123
5.4 ZrO ₂ 粉体的制备	124
5.4.1 化学共沉淀法	124
5.4.2 水解沉淀法	125
5.4.3 溶胶-凝胶法	126
5.4.4 水热法	127
5.5 氧化锆陶瓷的成型方法	127
5.5.1 干法成型	127
5.5.2 湿法成型	128
5.6 传统的热障涂层	131
5.6.1 经典的 8YSZ 型热障涂层	131
5.6.2 8YSZ 材料的掺杂修饰	133
5.7 新型热障涂层材料	136
5.7.1 稀土锆酸盐	136
5.7.2 缺陷型萤石结构	141
5.7.3 钙钛矿	142
5.7.4 稀土六铝酸盐	143
5.7.5 钇铝石榴石 (YAG)	145
5.7.6 钇酸盐	145
5.7.7 YSH	146
5.7.8 独居石	146

5.7.9 金属玻璃复合材料	147
5.8 其他热障涂层材料	147
参考文献	149
6 纳米结构热障涂层	154
6.1 纳米材料及特点	154
6.1.1 纳米材料的定义	154
6.1.2 纳米材料的特点	154
6.2 纳米材料制备方法	155
6.2.1 共沉淀法	155
6.2.2 溶胶-凝胶法	155
6.2.3 水热合成法	156
6.2.4 溶剂热法	156
6.3 纳米热障涂层材料	156
6.3.1 纳米热障涂层材料发展现状	156
6.3.2 8YSZ 纳米热障涂层材料研究现状	158
6.4 La_2O_3 改性 8YSZ 纳米涂层材料的制备和表征	159
6.4.1 样品合成工艺	159
6.4.2 XRD 以及相稳定性分析	160
6.4.3 热重/差热 (TG/DSC) 分析	162
6.4.4 SEM、TEM、HRTEM 分析	163
6.4.5 FT-IR 分析	164
6.4.6 晶体生长活化能的分析	165
6.5 CeO_2 改性 8YSZ 纳米涂层材料的制备和表征	167
6.5.1 样品合成工艺	167
6.5.2 XRD 分析	167
6.5.3 TG/DSC 分析	169
6.5.4 晶格常数和比表面积分析	169
6.5.5 FT-IR 分析	172
6.5.6 Raman 光谱分析	173
6.5.7 TEM 和 HRTEM 分析	173
6.5.8 晶体生长活化能的研究	175
6.6 $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ 的材料粉体的制备和表征	177
6.6.1 样品合成工艺	177
6.6.2 XRD 以及电子衍射能谱分析 (EDS) 分析	177

6.6.3 拉曼光谱分析	180
6.6.4 热重/差热分析	180
6.6.5 晶格常数分析	181
6.6.6 傅里叶红外光谱 (FT-IR) 分析	181
6.6.7 致密度与体积收缩分析	183
6.6.8 LZ7C3 的微观组织形貌	184
6.6.9 LZ7C3、LZ 以及 8YSZ 材料的力学性能研究	184
6.6.10 LZ7C3 材料的热膨胀系数	187
6.6.11 LZ7C3 材料的热导率	188
参考文献	189

1 热障涂层概述

在全球能源危机与建立绿色环境地球的国际背景下，航空涡轮发动机和陆用燃气轮机正在向着高流量比、高推重比和高涡轮进口温度方向发展。目前，在役的燃气涡轮发动机涡轮前进口温度已达到 1500℃ 以上，推重比为 10 的航空发动机设计进口温度会达到 1550~1750℃，推重比为 15~20 的航空发动机设计进口温度将超过 1800~2100℃。同时，发动机的平均级压比也提高到 1.85。这意味着发动机要在更高的温度和压力环境下工作，这样恶劣的腐蚀环境大大超过了最先进的定向凝固单晶高温合金材料（≤1150℃）的极限使用温度，必须采用先进的叶片冷却气膜技术和热障涂层技术。美国宇航局（NASA）研究表明，为了提高燃气轮机叶片、火箭发动机的抗高温氧化和耐腐蚀性能，提出在高温工况条件下工作的零部件表面沉积具有隔热能力的陶瓷涂层，首次提出了 TBCs 的概念。通过采用热障涂层技术可以明显提高发动机推力（工作温度每提高 14~15K，总推力增加 1%~2%）；同时可以大幅度提高发动机寿命（表面温度每降低 14K，相当于提高零部件寿命 1 倍）；此外采用该技术还可以降低航空发动机的耗油量^[1-3]。因此，热障涂层技术在航空航天、兵器、船舶等领域具有广泛的应用前景。

热障涂层材料系统（Thermal Barrier Coatings，简称 TBCs）通常是指沉积在金属表面、具有良好隔热效果的陶瓷涂层。其主要作用是用来降低在高温环境下工作的零部件基体温度，使其免受高温氧化、腐蚀或者磨损。其基本原理是基于陶瓷涂层具有高的熔点和低的热导率，因而使陶瓷热障涂层成为很好的高温绝热材料，它能把喷气发动机和燃气轮机的高温部件与高温燃气隔绝开来，并保护涡轮发动机叶片或其他热端部件免受高温燃气腐蚀与冲蚀。由于 TBCs 的应用使得航空发动机的功率和热效率得到了大幅度的提高。据报道，应用现有的冷却技术，涡轮机叶片背面涂覆 250μm 厚的 TBCs，可以使基体温度降低 111~167℃，减少燃油消耗近 20%，因而可以减少发动机叶片采用强制冷却而产生的能耗，亦相当于降低了高温合金的受热程度，从而可以进一步提高涡轮机的进气温度，提高发动机的功率和热效率。

1.1 热障涂层原理

涂层的定义：用物理的、化学的，或者其他方法，在金属或非金属基体表面形成的一层具有一定厚度（一般大于 10μm）、不同于基体材料且具有一定的强

化、防护或特殊功能的覆盖层。按涂层的材料可以分为金属涂层、非金属涂层、复合材料；按照涂层功能分为防腐涂层、耐磨涂层及特殊功能涂层等。

1.1.1 无机涂层

无机涂层是将陶瓷或金属粉末喷涂或沉积在金属或陶瓷表面，以达到耐磨、隔热、防腐和延长寿命等目的的薄膜，如航空和航天方面应用的 TBCs、抗氧化涂层、卫星上应用的温控涂层、机械工业应用上的耐磨涂层、人工机体上应用的生物涂层等。

依据用途和使用环境的不同，无机涂层的制备工艺不同。涂覆法是将无机金属化合物调成浆料，用涂刷、喷涂、丝网印刷等方法涂覆在陶瓷或者金属基底的表面，然后在低温或者室温下固化或高温下灼烧而成。热喷涂法是直接用无机化合物粉料，经过高温火焰快速加热、熔化喷涂到基底表面而形成涂层的方法。物理气相沉积法是一类用某种热源将材料蒸发，然后将蒸发的材料沉积在器件表面上的制备技术，涂层的厚度仅仅为毫米至微米级，一般可以用作光电器件的制备。目前无机涂层已广泛用于各个领域。各种型号的人造卫星罩均成功地应用温控涂层。等离子喷涂多层复合涂层，已用作大型火箭发动机喷管的隔热防热涂层，以及广泛应用于化工、机械领域的密封环和轴承等耐磨部件。阳光吸收率很高的不烧涂层和黑色搪瓷已在太阳能热水器上作为光热转换涂层获得应用。在金属基体上喷涂氧化物的人工骨和金属陶瓷牙已在临床获得成功的应用。

热机上使用的无机涂层有很多种，而这些无机涂层必须包含以下的功能，如图 1-1 所示。

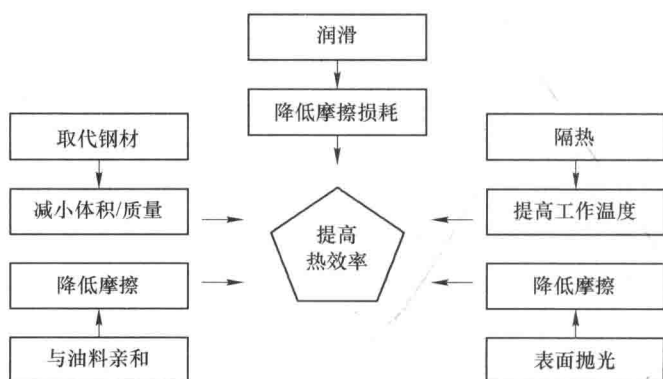


图 1-1 热机上使用的涂层必须具有的功能

(1) 润滑。涂层的摩擦系数越小越好。摩擦系数越大，涂层的磨损越严重，机器的寿命越短。另外，机械摩擦会降低燃料效率。内燃机的摩擦主要来源于气门机构，汽缸系统、曲柄机构和轴承，消耗内燃机做功的 10%~15%。总摩擦损

失中，汽缸系统占 65%，气门机构占 10%~20%，其他损失是曲柄机构产生的。提高内燃机燃料效率的一个重要手段是降低摩擦系数，常用的无机涂层材料有 Ni-Mo-MoS₂，Ni-BN 以及 Ni-石墨。

(2) 抗腐蚀。内燃机的有些部件所处的环境非常恶劣，如汽缸系统，恶劣的因素包括高温、强氧化性气氛、热冲击及油燃料所产生的强腐蚀性化合物（如硫酸盐、钒酸盐和甲酸等）。目前发现 Mo/Cr 系列材料是最抗腐蚀的涂层材料。

(3) 耐磨。在涂层表面制备一层精细的耐磨陶瓷如 Al₂O₃ 和 SiC，可以提高涂层的硬度、抗压强度、耐磨性及抗擦伤性。涂层还必须具有很好的机械强度和抗冲击性能，与金属结合强度大及热膨胀匹配等。

(4) 隔热。有计算表明，如果内燃机的汽缸壁制备一层 2mm 的 TBCs，热量损失可以降低 6%。

(5) 与润滑油的相容性。为了提高润滑性，降低摩擦损耗，机械摩擦必须是流体力学的。摩擦面的油膜破裂将导致边界摩擦的发生（即金属与金属直接接触），此时的摩擦系数比流体力学运转时候高很多。因此，涂层必须与润滑油有良好的相容性。

(6) 与金属结合强度大。等离子喷涂、高速火焰喷涂以及磁控溅射制备的涂层，结合强度一般都很高。涂层的厚度取决于涂层材料的性质以及与金属基底的热膨胀匹配情况。TBCs 黏结层的功能是提高陶瓷涂层与金属结合强度并提高金属的抗氧化能力。

(7) 合适的性价比。汽缸的直径在 70~100mm 之间，因此在汽缸壁喷涂陶瓷层时，喷涂距离必须很小。与其他制备涂层的方法相比，等离子喷涂有很多优越性，如设备相对简单、快速、器件的形状要求不是很严及合适的性价比。

汽缸表面常常电镀一层 Cr。柴油内燃机使用的铝合金表面也常常喷涂含有 C、Si、Sn、Ni、Cr、Mo、Cu、Ti、V 和 B 的铁系合金。因为柴油机所产生的硫酸盐有强烈的腐蚀性，涂层必须能抵抗硫酸盐的高温腐蚀。常用的 TBCs 材料在燃气轮机和内燃机方面都合适。粒径小于 50nm 的 YSZ 粉末通过等离子喷涂后其特性可以保留。与非纳米涂层相比，纳米涂层的线膨胀系数大，热扩散系数低，硬度大，断裂韧性高。热扩散系数低是由纳米材料丰富的晶界面对声子散射所造成的。高硬度和断裂韧性是由纳米材料的小尺寸效应所产生的，而且纳米涂层还能具有晶界滑移所产生的超塑性。因此，近年来人们对纳米涂层的研究越来越广泛。

1.1.2 热障涂层

1.1.2.1 热障涂层简介

热绝缘涂层，使高温燃气和部件基体金属之间产生较大的温降，以降低金属

基体的受热，保证金属部件的强度和耐腐蚀性能，从而利于工作温度以及热机效率的进一步提高。这种热绝缘涂层即称为热障涂层（Thermal Barrier Coatings，简称为 TBCs）^[2-4]。

热障涂层是在全合金材料和全陶瓷材料之间的一个折中。它的主要作用是在高温燃气与合金部件基体之间提供一个低热导率的热导屏蔽层。它的厚度通常只有 100~500 μm ，但却能够在超合金表面带来 100~300 $^{\circ}\text{C}$ 的温降。这使得热能发动机的设计者能够在不提高合金表面温度的前提下提高燃气温度，从而提高发动机的热效率；其次，它还能对火焰喷射造成的瞬间局部热冲击提供防护，缓和局部过高的温度梯度；此外，热障涂层有时还能通过减小燃气轮机叶片的热变形来简化叶片的外形设计^[5]。图 1-2 形象地描绘了在过去六十多年中材料、铸造技术、冷却技术以及热障涂层的发展带来的燃气轮机燃气温度的提高。由图中可以看出，热障涂层的应用使得燃气轮机的燃气温度有了显著的提高，而且其提高幅度超过了铸造技术。由此可见，相对于其他技术开发，热障涂层材料的研制具有更重要的现实意义。

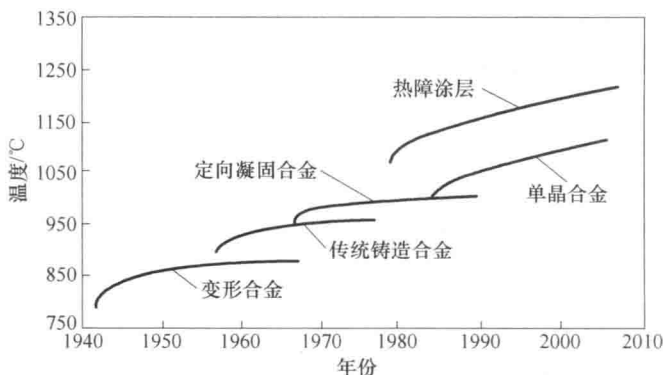


图 1-2 各种技术发展对燃气轮机燃气温度的影响

1.1.2.2 热障涂层体系的结构

图 1-3 为现代热障涂层结构原理示意图^[6]，整个体系可以分为三个部分：(1) 陶瓷表面隔热层（Ceramic Top Coat），厚度为 90~300 μm ，通常采用大气等离子喷涂或电子束物理气相沉积技术制备；(2) 合金黏结层（Bond Coat），厚度为 25~150 μm ，一般用低压等离子喷涂、化学气相沉积等技术制备，主要用于改善金属基体与陶瓷涂层之间的物理相容性并有提高基体合金抗氧化以及抗腐蚀性的作用；(3) 热生成氧化物；(4) 合金基体（Substrate），通常选用镍基或钴基高温合金。

A 陶瓷表层（Top Coat）

陶瓷表层一般由热导率低、抗热蚀性能好的陶瓷材料制成，是热障涂层体系

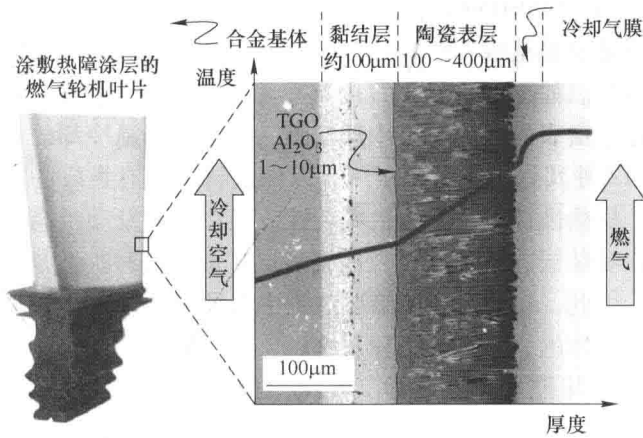


图 1-3 现代热障涂层结构原理示意图^[8]

中起到热绝缘作用的最主要部分。由图 1-3 中代表各处温度变化的粗线可知，在热障涂层正常工作条件下，大部分温度梯度是落在陶瓷表层上的。由此可看出，陶瓷层材料的研究，特别是具有更低热导率的材料探索研究，对热障涂层的发展具有十分重要的意义。此外，陶瓷表层是直接和高温燃气相接触的，它还要承受燃气中外来粒子的高速冲击、磨损以及高温化学环境的热腐蚀、热冲击。同时陶瓷表层又与黏结层、TGO 层相接触，使其还应当具备与黏结层 TGO 层之间良好的热匹配和化学相容性。

B 黏结层 (Bond Coat)

黏结层是合金基体与陶瓷层之间的一个 $75\sim 150\mu\text{m}$ 厚的合金层，它的存在起到了缓解基体与陶瓷层之间热不匹配的作用，同时也提高了基体的抗氧化能力，极大程度上决定着热障涂层的脱落失效速度。黏结层通常由 Ni、Cr、Al、Y 或者 Ni、Co、Cr、Al、Y 合金通过大气等离子喷涂 (APS) 或者电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 等喷涂工艺制成。

C 热生成氧化物层 (TGO)

在峰值工作条件下，燃气轮机的黏结层温度通常会超过 700°C 。而陶瓷表层通常又具有较高空隙率或者较高的离子传导率，这就使燃气中的氧很容易地进入到黏结层，从而造成黏结层的氧化，在黏结层和陶瓷表层间形成一个第三层—TGO 层。理想的黏结层在氧化形成 TGO 的过程中是缓慢、均匀、无缺陷的，形成的 TGO 层通常只有 $1\sim 10\mu\text{m}$ 厚，其主要物相为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。这样的 TGO 层氧离子传导率很低，也就相当于为黏结层提供了一个良好的抗氧化屏障，延缓了黏结层的进一步氧化^[6-8]。但是同时大多数热障涂层的失效都与 TGO 层的进一步生长以及内部热应力有关^[9]。