doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.01.005

$CeO_2 - Y_2O_3 - ZrO_2$ 热障涂层的组织结构及隔热性能 *

王 娇^{1,2},邓畅光²,邓姝皓¹,杨 焜²

(1. 中南大学 材料科学与工程学院,长沙 410083; 2. 广州有色金属研究院 新材料研究所,广州 510650)

摘 要:为获得孔隙率高、隔热性能好的热障涂层 CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ (CYSZ),采用低温超音速火焰喷涂(LT-HVOF) 和大气等离子喷涂(APS)工艺在 K4169 镍基高温合金表面分别沉积 NiCoCrAlYTa 粘结层和 CeO₂、Y₂O₃ 共同稳定的 ZrO₂ 空心粉 CYSZ 陶瓷层。通过扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)对不同喷涂电流(500,600 和 700 A) 制备的 CYSZ 热障涂层和采用传统 Y₂O₃ 稳定的 ZrO₂ 团聚粉 7YSZ 为陶瓷面层的热障涂层的组织结构进行观察分析, 并测定其隔热性能。结果表明:与传统的 7YSZ 类似,CYSZ 涂层主要组成相为四方 t 相,涂层呈典型层状结构,但相对 于 7YSZ,空心粉 CYSZ 涂层存在更多孔隙和微裂纹;在 1 150 ℃时,随着喷涂电流的增大,隔热性能呈降低趋势,CYSZ 涂层隔热性能比传统 7YSZ 涂层隔热性能好。

关键词:空心粉末;CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂(CYSZ);热障涂层;等离子喷涂;隔热性能 中图分类号:TG174.442 **文献标志码:A 文章编号:**1007-9289(2015)01-0029-07

Microstructures and Thermal Insulation Capability of CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ Thermal Barrier Coatings

WANG Jiao^{1,2}, DENG Chang-guang², DENG Shu-hao¹, YANG Kun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083; 2. Institute of New Materials, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650)

Abstract: To obtain $CeO_2 - Y_2O_3 - ZrO_2$ thermal barrier coatings with more pores and better thermal insulation capability, this research prepared NiCoCrAlYTa alloy bonding coatings on the K4169 superalloy surface by low temperature high velocity oxygen fuel (LT-HVOF) and hollow powders ceria-yttria stabilized zirconia (CYSZ) top coatings by an atmospheric plasma spray (APS) process. The thermal barrier coatings with more pores and great thermal insulation capability were deposited by the APS process using hollow powders CYSZ. The morphology and microstructures of CYSZ coatings sprayed by different currents (500, 600, and 700 A) were characterized using SEM and XRD. Thermal insulation properties of the CYSZ coatings and traditional agglomerated powders yttria stabilized zirconia 7YSZ coatings sprayed by different currents were examined. The results show that similar to traditional 7YSZ coatings, a relatively stable t - phase (t - ZrO₂) formed in CYSZ coatings. The CYSZ coatings show a typical lamellar structure with more closed pores and microcracks. Moreover, at the temperature of 1 150 °C, the thermal insulation property performs worse with the sprayed current increasing, and accordingly, the thermal insulation property of CYSZ coatings are better than 7YSZ coatings. **Keywords:** hollow powders; CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ (CYSZ); thermal barrier coatings; plasma spray; thermal insulation capability

通讯作者: 王娇(1989-), 女(汉), 硕士生; 研究方向: 材料表面技术; Tel: (020) 3723 8263; E-mail: xiaojiao_0922@163.com

网络出版日期: 2015-01-09 16: 25; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150109.1625.002.html

引文格式: 王娇,邓畅光,邓姝皓,等. CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ 热障涂层的组织结构及隔热性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(1): 29-35.
 Wang J, Deng C G, Deng S H, et al. Microstructures and thermal insulation capability of CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ thermal barrier coatings [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1): 29-35.

收稿日期: 2014-08-28; 修回日期: 2015-01-08; 基金项目: *国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB625100); 广东省引进创 新科研团队项目(2011C007)

0 引 言

随着航空燃气轮机向高流量比、高推重比、 高进气口温度方向发展,燃烧室中的工作温度已 经远远超过了 Ni 基高温合金的使用温度极 限^[1]。在高温合金基体表面制备热障涂层 (Thermal barrier coatings, TBCs),对提高基体 承温能力有非常直接的效果,从而有效提高零件 的工作温度,延长使用寿命^[2]。

典型的 TBCs 由高温合金基体、MCrAlY 粘 结层(M 为 Ni、Co 或它们的合金)和顶部隔热陶 瓷涂层组成。其中,高温合金基体主要承受机械 载荷;粘结层主要起改善基体与陶瓷涂层物理相 容性和抗氧化腐蚀的作用;顶部陶瓷层主要作用 是隔绝热量并产生温度梯度,其微观组织结构对 TBCs 的隔热性能和使用寿命起关键作用。 Y_2O_3 部分稳定(质量分数 6%~8%)的 ZrO₂ (YSZ)由于具有高的热膨胀系数和低的热导率, 是目前应用最广泛的热障涂层陶瓷层隔热材 料^[3]。但当 TBCs 应用于日益增高的工作温度 时,将面临更苛刻的工作环境,目前使用的7YSZ 涂层易发生相变、产生高温腐蚀,已难以满足涡 轮进口温度进一步提高的需要[4]。因此,寻找更 好的隔热性能以及在高温条件下更好的相稳定 性和抗高温腐蚀性能、更可靠的新型 TBCs 材料 和涂层体系成为近年来 TBCs 领域研究的热 点^[5-6]。众多研究表明, CeO2 和 Y2O3 共同稳定 的 ZrO_2 (CYSZ) 涂层是一种应用前景很大的 TBCs 材料。CYSZ 涂层具有好的高温相稳定 性^[7-9]、较好的抗熔盐腐蚀性能^[10-11],CeO₂的掺杂 能降低 ZrO2 材料的热导率,提高涂层的隔热性 能、热膨胀系数和热震性能^[7,12]。

涂层中的裂纹、空隙等对 TBCs 的隔热性能 有重要的影响,而涂层的组织结构主要由制备工 艺决定^[13];目前关于等离子喷涂工艺对 CYSZ 涂 层显微组织结构以及隔热性能的影响研究报道, 特别是涂层的孔隙以及微裂纹对涂层隔热性能 的深入分析很少。为获得孔隙率较高的 TBCs 结 构,文中采用大气等离子喷涂方法,用不同喷涂 电流制备空心粉 CYSZ 涂层,分析涂层的显微组 织结构,并测定 CYSZ 涂层的隔热性能。以传统 的 7YSZ 涂层作为对比研究对象,探讨涂层显微 结构及材料本征特性对涂层隔热性能的影响。

1 材料及方法

1.1 样品制备

试验以 Φ 25.4 mm×5 mm 的高温合金 K4169为基体,喷涂前经过超声除油、喷砂前处 理。采用低温超音速火焰喷涂(LT-HVOF, K2, GTV, Germany)在基体上沉积厚度为100 μ m 的 NiCoCrAlYTa(Amdry 997, Sulzer-Metco, 5~ 35 μ m)粘结层,喷涂工艺参数见表1。以空心粉 ZrO₂ - 24% CeO₂ - 2.4% Y₂O₃ (CYSZ, Metco 205NS, Sulzer-Metco, 11~125 μ m)和团聚粉 ZrO₂-7%Y₂O₃(7YSZ, AMPERITTM 827, H. C. Starck, 10~45 μ m)为陶瓷面层材料,采用大气等 离子喷涂(APS, MF-P1000,GTV, Germany)在粘 结层上制备厚度为300 μ m 陶瓷面层。制备 CYSZ 涂层时,分别采用500、600 和700 A 的喷涂电流制 备出3种不同涂层。具体的喷涂工艺参数见表2。 图 1 为 CYSZ 和 7CYSZ 粉末的表面形貌。

表1 LT-HVOF喷涂工艺参数

Table 1 Parameters of LT-HVOF spray

Parameters	Value
Spray distance/mm	150
Combustion chamber pressure/MPa	1.5
Rate of oxygen/($L \cdot min^{-1}$)	800
Rate of kerosene/(L \cdot h ⁻¹)	13
Power feed rate/(g • min ⁻¹)	50

表 2 APS 喷涂工艺参数

Table 2 Param	eters of	APS	spray
---------------	----------	-----	-------

Parameters	Voltage/V	Current/A	Primary gas, Ar/(L•min ⁻¹)	Secondary gas, $H_2/(L \cdot min^{-1})$	Powder feed rate/ (g•min ⁻¹)	Spray distance/mm
CYSZ	72	500,600,700	45	9	67	110
7YSZ	72	650	45	9	52	110



(a) CYSZ powders

(b) 7YSZ powders

图 1 CYSZ 粉末和 7YSZ 粉末的表面形貌 Fig. 1 Surface morphologies of the CYSZ and 7YSZ powders

1.2 性能测试与表征

1.2.1 显微结构

采用金相显微镜(Leica, DMIRM, Germany) 对陶瓷层的孔隙率进行测量,随机截取 5 个断面; 采用金相分析系统进行孔隙率分析,并取其平均值 为孔隙率。采用场发射扫描电子显微镜(SEM, Nova-Nano-430, FEI, Holland)观察喷涂粉末及 涂层的显微组织结构。采用线切割方法沿涂层试 样纵向切开,涂层截面形貌测试之前进行镶样、打 磨及抛光,断面测试直接采用切开的小样品。

1.2.2 XRD 物相分析

采用X射线衍射仪(D8 ADVANCE, Germany)分析涂层的物相组成。衍射仪采用铜靶, 入射线波长为 0.154 18 nm, Ni 滤波片,管压为 40 kV,管流 40 mA,扫描步长 0.02°,扫描速度 0.1°/s;狭缝 DS=1°, RS=8 mm。

1.2.3 隔热试验

涂层的隔热性能用热喷涂涂层热性能动态 模拟试验机(JLKTKYSY-11)测量。样品固定 在样品台上,选用氧丙烷火焰加热方式对样品前 表面快速加热(40 s)至1 150 ℃,保温5 min。样 品前面和背面的温度分别用红外测温仪和热电 偶测量。红外测温仪和热电偶的测温数据通过 计算机收集并输出。最后,通过计算样品表面和 背部温度差即可得出涂层的隔热性能。

1.2.4 热震试验

热震试验参照 HB7269-96 标准进行。采用 箱式电阻炉加热,加热到1000 ℃保温10 min,然 后迅速取出在室温水中水淬冷却,晾干观察,再 重复这一过程至样品失效(涂层 20%以上面积剥 落),统计样品失效的热震次数。

2 结果与讨论

2.1 涂层形貌和结构

金相显微镜测得喷涂电流分别为 500、600 和 700 A 时制备的 CYSZ 涂层孔隙率为 19.1%、 17.3%和 15.2%,制备的 YSZ 陶瓷涂层的孔隙 率为 13.5%。随着喷涂电流的增大,CYSZ 涂层 孔隙率呈减小趋势;相对于传统的 7YSZ,CYSZ 粉末更容易获得孔隙率大的涂层结构。

不同喷涂电流制备的 CYSZ 涂层截面形貌 如图 2 所示。由图可知,涂层呈典型的层状结 构,并且分布着一定量的孔隙和微裂纹等缺陷。 在 500 A 的喷涂电流下(如图 2(a)),涂层有较多的 闭合孔隙和垂直微裂纹。随着喷涂电流的逐渐增 大(图 2(b)(c)),涂层的孔隙和垂直微裂纹逐渐减 少。从图 2(c)看到,在电流为 700 A 时 CYSZ 空心 粉涂层为较致密的层状结构,层状之间孔隙很小, 相较于图 2(a)(b),闭合孔隙明显减少,这种致密 的涂层结构可能会影响涂层的隔热性能。

结合不同喷涂电流制备的涂层孔隙率及涂 层的显微组织可知,喷涂电流对 CYSZ 涂层的组 织结构的影响较大,喷涂电流 500 A 时制备的涂 层孔隙率较大,分布着较多的孔隙和微裂纹,为 具备更高的隔热温度提供了较好的涂层结构。

等离子喷涂的电流主要控制着喷涂功率,喷 涂功率影响等离子弧热焓值,高温高速等离子焰 流将粉末加热熔化并加速撞击于基体表面形成 涂层。随着喷涂电流增加,功率增大,喷涂过程 中 CYSZ 粉末熔化情况好,熔融的液滴表面张力 减小,冲击力增大,熔融液滴以高速撞击基体并 充分铺展变形,形成较致密的涂层。而当喷涂电 流减小,等离子弧的焓值降低,部分粒子在等离 子射流中熔化不充分,在撞击基体的时候变形程 度稍弱,容易形成搭接在一起的多孔结构。因 此,随着喷涂电流的减小,喷涂过程中熔化不完 全的粉末颗粒会增多,涂层孔隙率增加,分布着 较多的孔隙和裂纹,涂层呈多孔结构。

图 3 为喷涂电流 500 A 时制备的 CYSZ 涂 层和常规 YSZ 涂层截面形貌。图 3(a)(c)为涂层 截面断面图,从图 3(c)中看出 CYSZ 涂层内闭合 孔隙较多,还均匀分布着较多微裂纹;另外, CYSZ 涂层内的层间间隙更明显。从图 3(d)可 以看到, CYSZ 陶瓷涂层为典型的层片状结构, 同传统 7YSZ 涂层类似(图 3(b));对比图 3(b) (d)还可以看出,CYSZ 涂层的层片结构之中也存 在较多的横向微裂纹,层内还存在分层现象。由 于 CYSZ 粉末粒径分布范围较大,在喷涂过程 中,不同粒径的粉末熔化程度不同,不同熔化程 度的粉末堆积容易产生较多的孔隙及裂纹。



(a) 500 A

(b) 600 A

(c) 700 A

图 2 不同喷涂电流制备的 CYSZ 涂层的截面背散射电子形貌 Fig. 2 Cross section backscattered electron morphologies of the CYSZ coatings with different spraying currents





(a) Fractured cross section of 7YSZ

(b) Cross section of 7YSZ



(c) Fractured cross section of CYSZ

(d) Cross section of CYSZ

图 3 7YSZ 和 CYSZ 热障涂层的截面形貌 Fig. 3 Cross section morphologies of the 7YSZ and CYSZ thermal barrier coatings 图 4 为 CYSZ 粉末及常规 7YSZ 粉末制备的 涂层的 XRD 图谱。CYSZ 涂层和 YSZ 涂层都由 相对较稳定的四方相 t[']组成。喷涂过程中熔融粉 末撞击基体表面后快速凝固,发生马氏体相变, 产生 t[']相。熔融颗粒的快速冷却、凝固阻止了 ZrO₂ 由四方 t 相向单斜 m 相转变。



图 4 7YSZ 和 CYSZ 热障涂层的 XRD 图谱 Fig. 4 XRD patterns of the 7YSZ and CYSZ coatings

2.2 涂层的隔热性能

TBCs 的主要作用是对高温部件起热隔绝作用,因此,隔热性能是评价 TBCs 最重要的性能。 本文通过测量涂层表面和样品背面的温度差来 计算涂层的隔热性能。

涂层制备过程中,喷涂一定次数后即对涂层 厚度进行测量以保证所制备的涂层厚度相同。其 中,粘结层厚度为100 μm,陶瓷层厚度为300 μm。 首先,测试不同喷涂电流制备的CYSZ 空心粉涂 层的隔热性能,分析喷涂电流对隔热性能的影响 (见图 5)。结果表明,喷涂电流分别为500、600 和700 A 时的最高隔热温度分别为161、131 和 119 ℃。可见,随着喷涂电流的减小,涂层的隔热 性能提高。对比 CYSZ 涂层(500 A)与传统 7YSZ 涂层的隔热性能,其最高隔热温度分别为161 ℃和 106 ℃。结果表明,相对于传统 7YSZ 涂层,在文中 试验范围内所制得的 CYSZ 涂层隔热性能最多提 高了约 52%,即使在 700 A 高电流下所制备涂层 的隔热性能也优于 7YSZ 涂层。

由于 TBCs 在高温热冲击环境中工作,必须 保证涂层的热震寿命。本文测试了不同喷涂电 流对 CYSZ 热震性能的影响,涂层的热震失效次 数如表 3 所示。不同喷涂电流制备的 CYSZ 涂 层热震失效形式都是沿着陶瓷层和金属粘结层 的界面发生剥落,热震寿命相差不大。由结果可 知,不同喷涂电流(500、600 和 700 A)对 CYSZ 的抗热震性能影响不大。



图 5 样品前面和背面的温度曲线

Fig. 5 Heating temperature curves of the right-side and back-side samples

表 3 1 000 ℃ 不同喷涂电流 CYSZ 涂层热震失效次数

Table 3Thermal shock test results at 1 000 °C for theCYSZ coatings sprayed by different spraying currents

Current/A	500	600	700
Failure cycles	107	112	105

2.3 讨论与分析

影响 TBCs 隔热效果的主要因素为环境温度 差、冷却气流的换热系数、涂层厚度及热导率^[14]。 测试条件完全相同,并保证涂层厚度一致,因而 影响 7YSZ 和 CYSZ 涂层隔热性能的因素主要是 涂层的热导率。

对于陶瓷涂层材料,涂层的热传递方式有两种,即声子传热和热辐射(光子)。在温度较低时 以声子传热为主,而当温度升高时,辐射传热所 占比重逐渐增加^[15]。材料的成分、晶格形状、显 微组织结构等都能对声子和光子的平均自由程 产生一定的影响,从而最终影响材料的热 导率^[16]。

陶瓷涂层热导率会随其成分的变化而变化。 首先,在 ZrO₂ 晶格中加入稳定剂时,Y³⁺、Ce⁴⁺取 代 Zr⁴⁺,产生了氧空位和局部的应力场,增加了 晶格中的声子散射,从而使得材料的热导率降 低。其次,导致 CYSZ 比 7YSZ 热导率更低的另 外一个因素是置换阳离子产生的声子散射。材 料溶质原子和溶剂原子的原子量差异对声子平 均自由程有一定影响,声子的平均自由程 λ 与固 溶原子的原子量与主原子量的差的平方成反 比^[17]。CYSZ中固溶原子 Ce 的原子量(140)远 远大于 7YSZ中Y的原子量(89),因此 CYSZ中 的声子的散射增强,从而导致 CYSZ的热导率小 于 7YSZ。由隔热实验结果可知,不同工艺条件 下制备的 CYSZ 涂层隔热性能均优于 7YSZ,说 明 CeO₂ 在 YSZ 中的掺杂对材料热导率有一定 的影响,可以有效提高涂层的隔热性能。

除了陶瓷材料成分对热导率有影响外,另一 个重要的影响因素就是材料的微观组织结构。 陶瓷涂层中分布着不同数量及形态的孔隙及裂 纹等,这些组织缺陷会造成声子和光子的传播路 径紊乱,降低声子和光子的平均自由程,从而降 低热导率,影响涂层的隔热性能[15-16]。不同喷涂 电流制备的 CYSZ 涂层组织结构差异明显。当 使用较大的喷涂电流时,CYSZ涂层孔隙率较小, 涂层变得相对致密;随着电流的逐渐减小,制备 出来的涂层孔隙率增大,涂层显微结构中存在大 量闭合孔隙和较大的层间间隙,纵向微裂纹也较 多,这种多孔结构使涂层的隔热性能有明显的提 高。由 XRD 图谱分析可知, CYSZ 与 7YSZ 陶瓷 涂层的相组成基本一致,所以,影响这两种涂层 隔热性能的重要因素是涂层组织结构的差异。 相较于 7YSZ, CYSZ 更易得到孔隙率高的涂层结 构,涂层内存在较多的闭合孔隙和微裂纹,因而 CYSZ 涂层的隔热性能优于 7YSZ 涂层。

3 结 论

(1) 大气等离子喷涂制备的 CYSZ 热障涂层 的主要相为四方相 t-ZrO₂,涂层呈典型的层状结 构,相对于传统的 7YSZ, CYSZ 空心粉更容易获 得孔隙率高的涂层。

(2)喷涂电流(500、600 和 700A)对空心粉 CYSZ涂层隔热性能影响较大,随着喷涂电流的 逐渐增加,孔隙率变小,涂层中孔隙及裂纹减少, CYSZ涂层的隔热性能呈下降趋势;喷涂电流对 CYSZ涂层热震寿命的影响不大。

(3)相较于传统的7YSZ涂层,CYSZ热障涂 层的隔热性能有了很大的提高,在500 A的喷涂 电流下,提高幅度最高达到了约52%。

参考文献

[1] Marino K A, Hinnemann B, Carter E A. Atomic-scale in-

sight and design principles for turbine engine. thermal barrier coatings from theory [J]. Chemistry, 2011, 108(14): 5480-7.

- [2] Padture N P, Gell M G, Jordan E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications [J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [3] 刘纯波,林锋,蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势
 [J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 1-13.
 Liu C B, Lin F, Jiang X L. The recent research progress and development trend of thermal barrier coatings [J].
 Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(1): 1-13 (in Chinese).
- [4] Manap A, Nakano A, Ogawa K. The protectiveness of thermally grown oxides on cold sprayed CoNiCrAlY bond coat in thermal barrier coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(3/4): 586-596.
- [5] 郭洪波,宫声凯,徐惠彬.先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J].中国材料进展,2009,28(9/10):18-26.
 Guo H B, Gong S K, Xu H B. The research progress of advanced aircraft engine thermal barrier coatings technology [J]. Material China, 2009, 28(9/10): 18-26 (in Chinese).
- [6] 宫文彪,白晶,刘威,等. 掺杂纳米 CeO₂ 对 ZrO₂-Y₂O₃
 热障涂层隔热性能的影响 [J]. 复合材料学报,2009,26
 (1):96-102.
 Gong W B, Bai J, Liu W, et al. The influence of doping

nano – ceria into yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings on thermal insulation capability [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(1): 96–102 (in Chinese).

- [7] Lee C H, Kim H K, Choi H S, et al. Phase transformation and bond oxidation behavior of plasma - sprayed zirconia thermal barrier coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 124: 1-12.
- [8] Ma B , Li Y , Su K . Characterization of ceria-yttria stabilized zirconia plasma-sprayed coatings [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(16): 7234-7.
- [9] Chio H, Kim H, Lee C. Phase evolutions of plasma sprayed ceria and yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21: 1359-61.
- [10] Park S Y, Kim J H, Song H S, et al. Microscopic observation of degration behavior in in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 190: 357-365.
- [11] Ahmadi-Pidani R, Shoja-Razavi R, Mozafarinia R, et al. Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed ceria and yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings in the presence of Na₂SO₄ + V₂O₅ molten salt [J]. Ceramics International, 2012, 38: 6613-20.
- [12] 邓世均. 热障陶瓷涂层的最新进展 [J]. 材料保护, 2000, 36(3): 5-7.
 - Deng S J. The latest development of thermal barrier coat-

ings [J]. Journal of Materials Protection, 2000, 36(3): 5-7 (in Chinese).

- [13] Jamali H, Mozafarinia R, Shoja-Razavi R, et al. Comparison of thermal shock resistance of plasma - sprayed nanostructured and conventional yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings [J]. Ceramics International, 2012, 38: 6705-12.
- [14] 宫声凯,邓亮,毕晓方,等. 陶瓷热障涂层的隔热效果研究[J]. 航空学报,2000,21(S1):75-79.
 Gong S K, Deng L, Bi X F, et al. The research on the insulation capibility of ceramic thermal barrier coatings thermal [J]. Acta Aaronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(S1):75-79 (in Chinese).
- [15] 曹学强. 热障涂层材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2007:

158 - 163.

Cao X Q. Thermal barrier coatings materials [M]. Beijing: Science Press, 2007: 158-163 (in Chinese).

[16] 王东生,田宗军,杨斌,等.等离子喷涂常规和纳米 ZrO₂-7%Y₂O₃ 热障涂层隔热性能 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (14):141-144.
Wang D S, Tian Z J, Yang B, et al. Thermal insulation capability of plasma sprayed conventional and nanostruc-

capability of plasma sprayed conventional and nanostructured $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ thermal barrier coatings [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(14): 141 - 144 (in Chinese).

[17] Xu Q, Pan W, Wang J D, et al. Preparation and therophysical properties of Dy₂ZrO₇ ceramic for thermal barrier coatings [J]. Materials Letters, 2005, 59: 2804-7.

(责任编辑:常青)

•本刊理事长单位介绍•

国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心

国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心于 2007 年 11 月 16 日经科技部批准依托兰州交通大 学和兰州大成科技股份有限公司组建,是我国镀膜行业第一个也是唯一一个国家工程中心。

中心坚持"自主创造核心技术,引领行业技术进步"的创新理念,提出了"绿色镀膜"、"绿色镀膜新 材料"、"绿色镀膜新能源(聚光太阳能)"等新技术理念,以绿色镀膜技术、绿色镀膜新材料、绿色镀膜新 能源的自主创新为主要研究方向,以绿色镀膜关键技术创新为核心,不断拓展绿色镀膜工艺技术应用 新领域,集中攻关绿色制造、清洁生产关键共性基础技术和系统集成问题,形成一批具有自主知识产权 的绿色镀膜工艺技术和成套装备,实现了"出一流人才、创一流技术、造一流装备"的创新目标,形成了 "以关键技术创新支撑工程技术研发,以工程技术研发促进成果产业化,以成果产业化收益再支持关键 技术创新"的独具特色的技术创新体系。

中心研发了 8 类 20 种型号的产品并全部实现了产业化推广;获得 1 项国家科技进步二等奖、4 项 甘肃省科技进步一等奖,其它省部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 5 项;申请专利 40 件,其中发明专利 23 件;获得授权专利 29 件,其中发明专利 15 件;获得 11 项软件著作权;获得 5 项国家重点新产品和 14 项软件产品;制定并实施了 8 项国内首部企业技术标准。

中心聚集了一批优秀创新人才,形成了一支专业结构、年龄结构、学历结构合理,多学科交叉,具有 可持续创新能力的创新团队,被信息产业部评为"全国信息产业科技创新先进集体",2009年被中央四 部委联合授予"全国专业技术人才先进集体"荣誉称号

中心已成为技术先进、特色鲜明的绿色镀膜技术研究开发和技术创新基地、工程技术咨询与信息 服务中心、绿色镀膜装备产业化示范基地、绿色镀膜技术检验与测试基地。