

热障涂层隔热性能测试方法分析^{*}

陈 东, 褚作明, 张 强, 郑慧超

(机械科学研究总院先进制造技术研究中心 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 分别利用 4 种不同的隔热性能测试方法, 对氧乙炔火焰喷涂工艺制备的 ZrO_2 陶瓷热障涂层的隔热性能进行了测试, 通过红外测温仪和热电偶连接温度记录仪两种不同方式, 测试试样金属基体温度, 获得 4 组不同涂层厚度试样金属基体的温度变化曲线, 并结合陶瓷涂层的服役工况对测试结果进行了分析, 结果表明, 测试方法不同, 隔热性能测试所得数据也有所差异, 但这 4 种测试方法均可不同程度的反映热障涂层的隔热效果及变化趋势, 在接近实际服役工况条件下, 可定性评估涂层隔热性能。

关键词: 热障涂层; 隔热效果; 陶瓷涂层

中图分类号: TG174.453

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)02-0072-04

Analysis of Test Methods about Heat Insulation Capabilities of Thermal Barrier Coating

CHEN Dong, CHU Zuo-ming, ZHANG Qiang, ZHENG Hui-chao

(State Key Laboratory for Advanced Forming Technology, Equipment Advanced Manufacture Technology Center, China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract: The insulation performance of the ZrO_2 ceramic thermal barrier coatings prepared by the oxyacetylene flame spraying process is tested by four methods. Temperature variation curves of the specimen substrate in four different sets of coating thickness are required by testing the temperature of specimen substrate through infrared thermometer and thermocouple connected to a temperature recorder, and the test results are analyzed with service conditions of ceramic coatings. The results show that, the data obtained by insulation performance vary with different test methods. The four test methods can reflect thermal barrier coating insulation effect and trends in different levels and qualitatively assess the performance of the coating insulation in conditions close to the actual service.

Key words: thermal barrier coatings (TBCs); thermal insulation effect; ceramic coatings

0 引 言

对于航空发动机、燃气涡轮机等高温工况下服役的零部件, 通常会利用热障涂层(TBCs)优异的隔热性能来充分降低金属基体的实际工作温度, 进而达到显著提高使用性能和寿命的目的。陶瓷材料具有优异的隔热性能(如 ZrO_2 热导率为 $2.12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ($1\ 273 \text{ K}$)^[1], 被大量用于热障涂层材料。由于热障涂层具有广泛的应用前景, 为了进一步提高其隔热性能, 近年来国内外开展了大量的研究工作^[2-13]。通过试验模拟热障涂

层服役工况条件来研究热障涂层隔热性能是一种非常有效的途径。为更好评估涂层隔热效果, 合理设计热障涂层隔热性能测试方法非常重要。文中主要利用 4 种不同的测试方法对陶瓷涂层的隔热效果进行了试验测试, 并对几种测试方法进行了对比分析, 旨在研究不同热障涂层隔热性能测试方法的差异和应用。

1 试验材料及测试方法

所用试样金属基体材料为 H13 钢, 热障涂层

收稿日期: 2012-11-07; 修回日期: 2013-03-11; 基金项目: *“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2011ZX04001-071-4)
作者简介: 陈东(1979-), 男(汉), 辽宁阜新人, 工程师, 硕士; 研究方向: 模具技术和材料加工工程

网络出版日期: 2013-03-22 17:35; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130322.1735.004.html>

引文格式: 陈东, 褚作明, 张强, 等. 热障涂层隔热性能测试方法分析 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 72-75.

粘结层为 Ni-Cr 合金(厚度 0.05 mm),热障涂层表层陶瓷涂层材料为含质量分数 5%CaO 稳定的 ZrO_2 。采用 SX-5000 型超音速火焰喷涂设备利用氧-乙炔燃烧为热源,将连续均匀送入火焰中的热障涂层原料棒材端部加热到熔化状态,借助于高压气体将熔化状态的棒材雾化成微粒,喷射到工件表面形成涂层的工艺方法制备表面陶瓷涂层,然后利用金刚石砂轮抛光涂层表面,获得所需厚度的试样。文中采用以下 4 种测试方法对陶瓷热障涂层的隔热效果进行测试。

方法 1: 将 100 mm×50 mm×6 mm 试样的涂层面分别置于 800 W 电炉子(炉丝温度 1 000 ℃)上,通过电阻丝热辐射加热涂层面,同时利用红外测温仪测量试样背面金属基材温度。

方法 2: 将 100 mm×50 mm×6 mm 试样的涂层面分别置于氧气乙炔火焰(火焰温度>2 000 ℃)正上方,试样涂层面与火焰枪喷嘴距离固定为 85 mm,火焰气流强度始终不变,以避免加热源因素带来的测试误差,通过氧气乙炔火焰直接加热涂层面,并同时用红外测温仪 ST677 测量试样位于火焰加热区背面中心部分的金属表面温度。

方法 3: 以 150 mm×150 mm×6 mm 试样作为马弗炉顶部盖子,涂层面与炉腔同侧,受热腔热辐射作用加热试样涂层,同时测试该加热区背面金属表面中部温度,试验中炉温恒为 1 400 ℃。

方法 4: 将 $\Phi 20 \times 100$ (一侧有 $\Phi 8 \times 70$ 盲孔)试样表面完全喷涂陶瓷热障层,并分别置于管式加热炉(炉温 1 600 ℃)内加热 60 s 后移出风冷,将热电偶插入试样盲孔测温,利用与 K 型热电偶连接的温度记录仪 YBJL-809-2 全程记录试样基体温度变化。

2 结果与讨论

2.1 涂层隔热性能测试结果及分析

采用方法 1 获得了加热过程中涂层厚度分别为无涂层、0.4 mm 和 1.1 mm 试样金属基体背面的温度变化曲线(图 1)。从试验结果看,150 s 内,3 种涂层厚度获得的隔热效果无明显差别;随试样加热时间延长,无涂层试样金属基体温度在 250~300 s 时间段明显高于有涂层试样金属基体温度;金属基体达到 600 ℃时 3 组试样所需时间分别为 300、390 和 490 s,有涂层试样比无涂层试样升温速度明显降低,说明陶瓷涂层有一定的隔热效

果,但因设备简陋,该试验方法只能在一定范围内定性描述陶瓷涂层对电阻丝热辐射有一定的隔热效果,但随加热时间延长,陶瓷层加热和基体背面散热(对流、辐射)逐渐增大,达到平衡,涂层和无涂层试样背面温度趋于一致,难以获得定量的、涂层长期稳定的隔热效果。

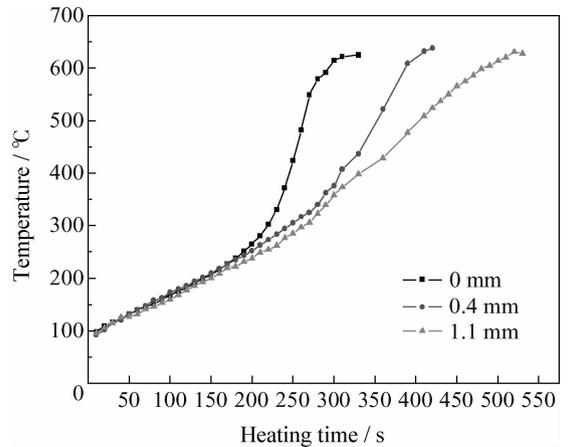


图 1 不同厚度热障涂层金属基体温度变化(方法 1)

Fig. 1 Substrate temperature curve of different thickness of the thermal barrier coated metal (method 1)

图 2 为采用方法 2 获得的涂层厚度分别为无涂层、0.40、0.50、0.80 和 1.00 mm 试样金属基体温度变化曲线。

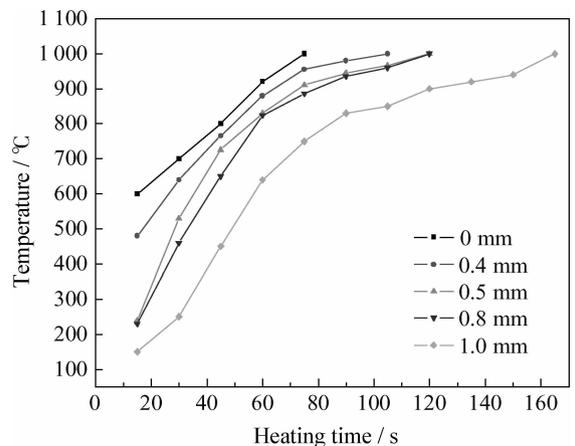
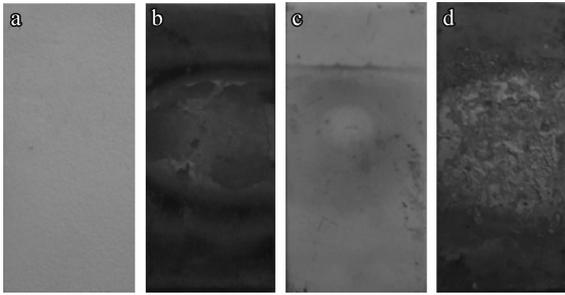


图 2 不同厚度试样金属基体温度变化曲线(方法 2)

Fig. 2 Substrate of the specimen temperature curves of different thickness of metal (method 2)

从试验结果看,涂层越厚,试样加热区背面金属基体的温度越高,达到 1 000 ℃所需时间也越长,无涂层的试样经 75 s 达到 1 000 ℃,0.40 mm 涂层试样则需 105 s,1 mm 涂层试样达到 165 s。

图3为方法2试验前后试样表面形貌照片。加热前,试样陶瓷涂层表面呈均匀的淡白色,试样金属基体表面平整且颜色均匀;加热后,试样陶瓷涂层表面加热区域呈红白相间的颜色,由于加热时试样金属基体达到的温度已高于1 000 ℃,试样金属基体表面出现大量氧化皮。



(a) Coating surface before heating (b) Substrate surface before heating (c) Coating surface after heating (d) Substrate surface after heating

图3 试验前后试样表面形貌(方法2)

Fig. 3 Surface morphologies of the sample before and after test (method 2)

方法3中,热障涂层将试样金属基体与马弗炉的高温炉腔分隔开,由于热导率非常低,热障涂层有效阻碍了热量传递给试样金属基体。加热时间达到5 min时,试样温度仍不到200 ℃(图4),而加热相同时间的无涂层试样,温度已达到770 ℃。有涂层试样的温度变化较为平缓,涂层越厚则金属基体温度升高越慢,这充分说明 ZrO_2 陶瓷涂层具有优异的隔热性能。

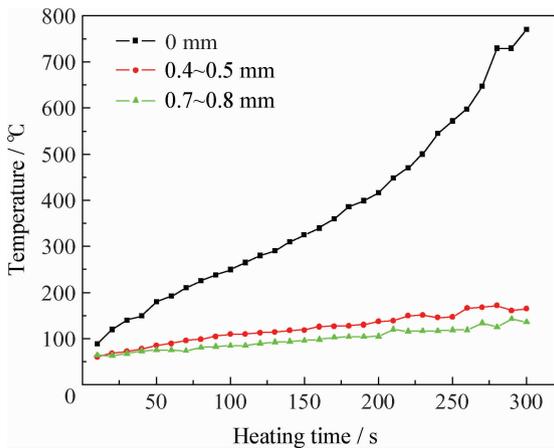


图4 涂层试样基体1 400 ℃恒温热辐射时的温度变化曲线(方法3)

Fig. 4 Temperature variation curves of the coated specimen substrate when thermostat at 1 400 ℃ (method 3)

图5为采用方法4所得的试验结果。与其他测试方法不同,此试验过程同时记录了试样加热和冷却过程的金属基体温度变化,几种不同厚度涂层试样的温度变化趋势一致。在相同时间内,无涂层试样温度升高和降低的速率明显高于有涂层试样。加热时间为66 s时,不同厚度涂层试样金属基体所达到的温度对比见表1。

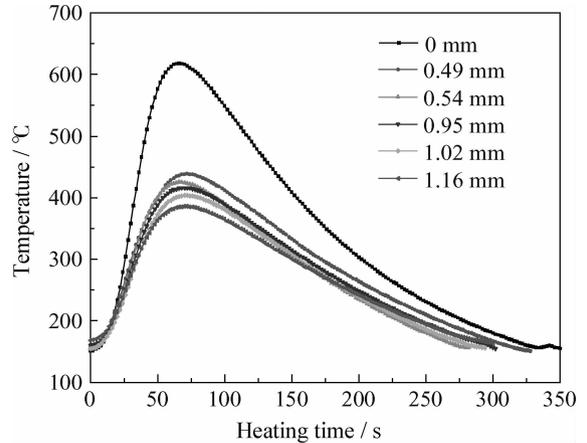


图5 不同厚度涂层试样基体温度变化曲线(方法4)

Fig. 5 Substrate temperature curves of different thickness of coated specimen (method 4)

表1 不同厚度涂层试样金属基体达到的最高温度(测试方法4)

Table 1 Maximum temperature reached by the different thickness of coating specimen metal matrix(test method 4)

Thickness/mm	0	0.49	0.54	0.95	1.02	1.16
Temperature/℃	618	436	425	416	402	385

从4种热障涂层隔热性能测试结果可以看出,有热障涂层的试样金属基体的升温速率明显低于无涂层试样的升温速率,且有涂层试样的升温速率趋于一致。4组试验中,在0.4~1.16 mm涂层厚度范围,涂层越厚则隔热性能越好。

2.2 测试方法对比分析

4种测试方法获得的热障涂层隔热性能趋势一致,说明这4种测试方法均能在一定程度上反映热障涂层隔热性能,但由于采用热源或加热方式的不同,使热障涂层处于不同状态的环境温度场中,导致4种测试方法存在明显差异。

方法1中,试样处于一个与周围环境全开放(热交换)的空间,电阻丝辐射热流向试样传递热量的同时,试样也通过对流、辐射向外散热,最终可达

到一热平衡温度(流入的热量等于流出的热量),此时热障涂层两侧温度一致,无法测出平衡时的涂层隔热效果;另一方面,电炉功率有限,辐射热流对表面涂层加热速率相对慢,例如厚 0.40 mm 的热障涂层试样加热 7 min 时,试样背面的基体温度刚接近 600 ℃。该测试方法简陋,只能定性描述加热过程中一段时间内不同热障涂层体系(如不同热导率、不同厚度和结构)的区别,应用的科学价值低。

方法 2 本质上同方法 1 是一样的,只是火焰流直接接触试样涂层表面,热流传递效率大幅提高,试样升温迅速,最终的平衡温度也大幅提高。由于温度高,对基体材料氧化现象严重,影响红外测量的准确性。同样,由于测试方法简陋,应用价值较低。

方法 3 和 4 与上述两种方法相比,最大的区别在于试样背面处于一个半开放的散热环境中,散热量可控,而涂层表面热源传递的热流均匀稳定,可以设定一稳态的热流条件,控制试样表面、背面存在一定的温度差,保证涂层试样处于一定的梯度温度场中,可通过有涂层/无涂层温差法测得涂层的隔热效果,并可通过检测涂层热导率^[14],结合理论计算和数值模拟建立平面或曲面平板导热模型,获得涂层隔热的计算值,与实际测得的涂层隔热效果进行分析对比。此外,试验过程中可通过热电偶和温度记录仪全程监测和记录试样两侧温度变化。方法 3 和方法 4 受加热炉功率(最高工作温度)限制,试样很难达到火焰枪那种高温受热状态。因此,这两种测试方法通常情况可用于模拟受热温度不超过 2 000 ℃ 的工况环境(如超高温成形模具的热作件^[15])。

而方法 3 与方法 4 的主要区别在于前者试样背面金属侧暴露在环境空气中,通过界面处与环境气体的对流与热交换形成动态稳定的梯度温度场。方法 4 加热时试样全部置于管式炉中,属于一种准绝热状态,试样加热时金属基体基本处于吸热状态;当试样从管式炉中取出进行冷却,试样则处于全散热状态。可定量分析热障涂层的热传递和预测基体将达到的温度,这对优选热障涂层制备方法及零部件基体材料都有重要参考价值。

3 结 论

(1) 给出 4 种隔热性能测试方法,由于热源

强弱及试样所处温度场的不同,所得试验结果存在一定差异,后两种测试方法热源传递的热流均匀稳定且测温相对准确,通过理论计算和数值模拟与试验结果结合分析,具有一定科学应用价值。

(2) 4 种测试方法均可不同程度地反映热障涂层的隔热效果及变化趋势,在接近实际服役工况条件下,可定性评估涂层隔热性能。

参考文献

- [1] Cao X Q, Vassen R, Stoeber D. Ceramic materials for thermal barrier coatings [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24: 1-10.
- [2] 王东生, 田宗军, 张少伍, 等. 等离子喷涂和激光熔覆热障涂层隔热性能比较 [J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 5-8.
- [3] 周国栋, 陈树海, 黄继华, 等. 热传导对双陶瓷热障涂层隔热效果影响研究 [J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(2): 1-6.
- [4] 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(Z1): 25-29.
- [5] 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.
- [6] 牟仁德. 热障涂层隔热性能研究 [D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2007.
- [7] Matsumoto M, Yamaguchi N, Matsubara H. Low thermal conductivity and high temperature stability of Zr₂-Y₂O₃-LaO₃ coatings by EB-PVD [J]. Scripta Materialia, 2004, 50: 867-871.
- [8] 吕艳红, 吴子健, 唐建新, 等. 纳米 YSZ 热障涂层隔热行为研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(1): 24-27.
- [9] 陈虹, 胡利明, 任卫, 等. ZrO₂ 陶瓷热障涂层的研究 [J]. 中国表面工程, 2000, 13(4): 12-18.
- [10] 王千文, 毛卫国, 喻明. 等离子喷涂热障涂层隔热性能分析方法 [J]. 材料导报, 2011, 25(18): 125-138.
- [11] 吕涛, 陈飞, 丁华东. 耐热钢表面等离子喷涂 NiCrAlY+(ZrO₂+Y₂O₃)热障涂层性能研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(4): 47-49.
- [12] 杨树森, 陈晓鸽. 提高等离子喷涂热障涂层隔热性能的方法 [J]. 铸造技术, 2012, 33(6): 677-679.
- [13] 何箐, 吕玉芬, 汪瑞军, 等. 等离子喷涂常规和纳米 8YSZ 热障涂层的性能 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(6): 18-22.
- [14] 邱琳, 郑兴华, 李谦, 等. 陶瓷热障涂层的热导率和热扩散率测量 [J]. 功能材料, 2010, 41(Z2): 264-267.
- [15] 褚作明, 范广宏, 陈东, 等. 一种超高温成形模具 [P]. ZL201120479967. 4, 2011.

作者地址: 北京市海淀区学清路 18 号 307 室 100083
先进成形技术与装备国家重点实验室
Tel: (010) 6295 6874
E-mail: 15001008519@139.com