

8%氧化钇稳定氧化锆的分割热障涂层解决方案采用了级联式等离子弧喷枪技术

随着发动机热效率的提升, 针对燃气轮机高温部件的热保护也在持续的改进。与传统的TBCs相比, 我们的分割式热障涂层 (TBCs) 具有更优越的热循环性能以及优异的耐腐蚀性能。该涂层解决方案采用的是欧瑞康美科级联式等离子弧喷枪和具有高质量的等离子球化8%氧化钇稳定氧化锆材料, 不仅可以满足设计要求, 在涂层再现性、可重复性和应用成本上还具有杰出的效益。

由欧瑞康美科的Dieter Sporer, Jim Girgulis, Chris Dambra和Mitch Dorfman编写

介绍

燃气轮机使用的是卡诺循环热力发动机。这意味着他们的热效率和核心动力直接与进入发动机涡轮段的气体温度相关, 如图1所示。因此, 涡轮热段零部件的冷却和热保护系统的改进是保证气体涡轮发动机得以成功使用的重要因素。零部件的热保护通过所谓的热障涂层 (TBC) 系统来完成, 该系统主要由具有抗氧化的金属性中间层及低导热系数的陶瓷层组成, 陶瓷层主要为氧化锆基材料。现如今, TBCs是燃气轮机的关键设计元素, 由于现代设计的气体温度超出了基体金属件的熔点[图1], 所有TBC涂层的失效会导致整个发动机受到损害。

全球燃气涡轮发动机将在2016年[1] 产生78亿美元的工业产值, 其中70%的产值是来自航空应用 (涡轮风扇发动机、涡轮轴发动机、涡轮螺旋桨发动机和APU发动机), 30%的产值来自以地面为基础的应用 (机械传动和发电行业)。后者提供了大约全球26%的电力需求量, 而前者则几乎为大型商业和军用飞机提供全部推进动力。

增加燃气涡轮发动机的能源效率可以增加以地面为基础的发动机输出功率, 或喷气式发动机的推重比和持久性, 这些都取决于及将继续依赖于热障涂层的开发。

分割式热障涂层

TBCs初始是在静止发动机零部件上的。在二十世纪八十年代后期, TBCs才被初次用在旋转叶片上。该应用要求TBC具有更大化的应变公差, 主要是通过陶瓷面层的一种特殊结构来实现, 该结构概括来说就是涂层的垂直分割。总的说来, 垂直分割结构可以有不同的形式, 如图2所示。其中一种形式就是柱状晶分割结构, 该结构通过建立一种陶瓷TBC材料的柱状晶结构来完成, 要么通过EB-PVD或PS-PVD工艺的气相沉积, 要么通过团簇沉积来完成, 例

如, 通过所谓的悬浮液等离子喷涂 (SPS)。通过EB-PVD工艺制备的柱状晶分割结构是在喷气发动机旋转叶片上应用TBCs的优选方法。图2还显示了另一种分割形式, 也就是垂直裂纹分割 (同样称为致密垂直裂纹)。这种分割类型通过控制喷涂参数采用大气等离子喷涂陶瓷面层 (内在裂化) 来完成, 或通过在3D结构的表面沉积陶瓷材料来完成, 例如, 由铸造或焊接堆积的栅格结构 (表面结构诱发裂纹)。裂纹分割涂层是电力燃气轮机旋转叶片采用的标准之一。另一个标准是非分

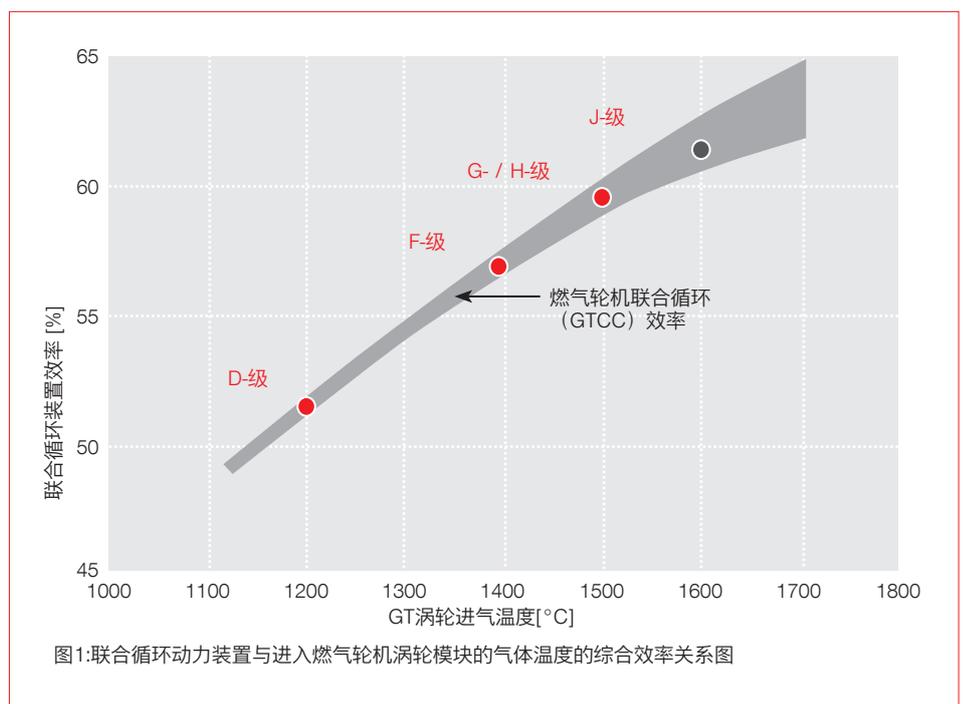
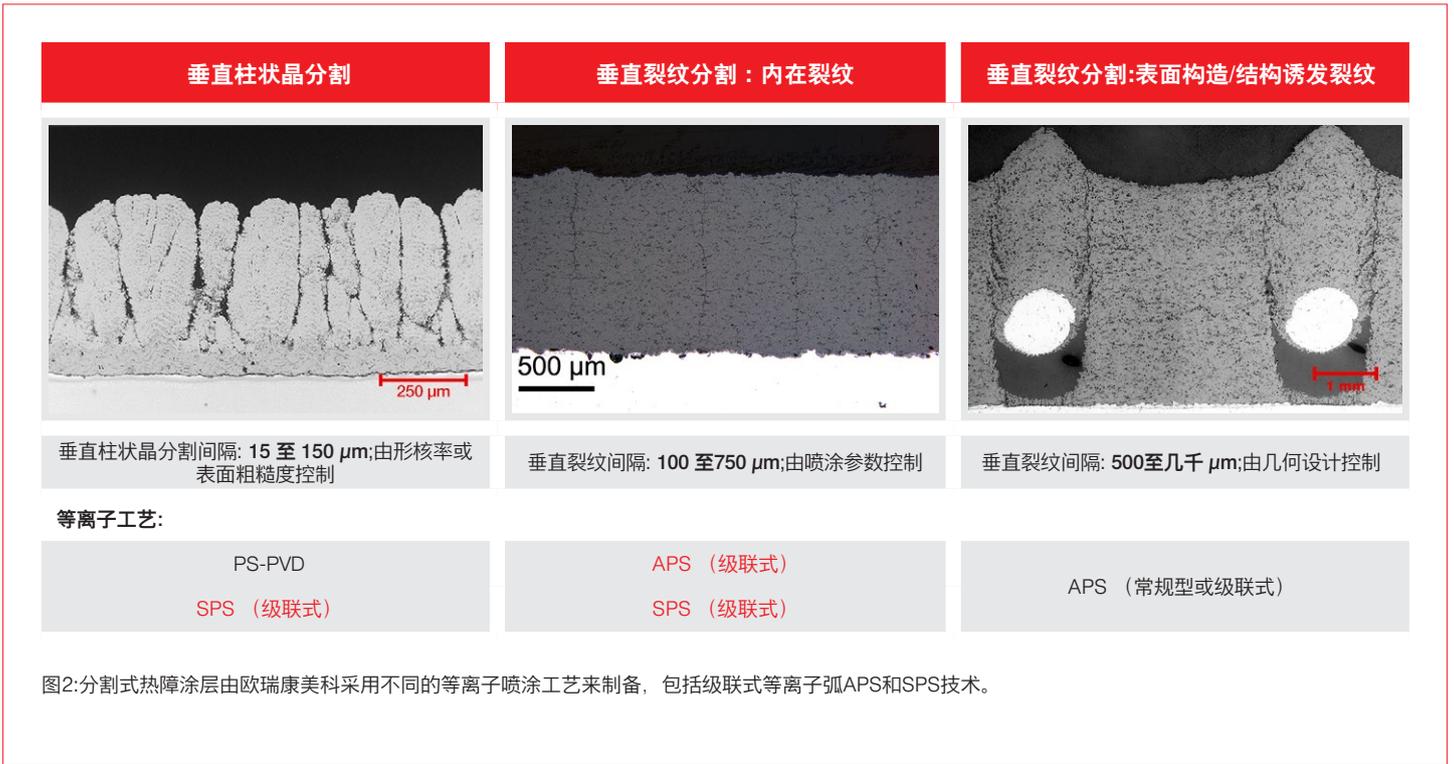


图1: 联合循环动力装置与进入燃气轮机涡轮模块的气体温度的综合效率关系图



割TBCs具有（高）可控性的孔隙率和微裂纹结构。

分割陶瓷热障涂层是改善涂层应变公差的最佳手段。分割在零部件表面拉伸荷载期间打开，而在压缩荷载期间关闭，这类似于六角手风琴波纹管的打开和关闭方式。

本文将回顾所采用的级联式电弧等离子喷枪技术在制备裂纹分割式热障涂层上的一些生产及其性能方面的特征。

级联式电弧喷枪技术

级联式等离子方法由美科开发以便控制和稳定电弧电压。级联式电弧腔室的特点是通过一系列的电绝缘中性环产生固定长度的电弧，也就是电弧腔室内的绝缘块 [图3]。经延伸和固定的电弧长度具有稳定等离子体和消除高振幅功率振荡的优势。这可以带来很多重要好处，如高电压、低电流运行、降低电压波动和消除气体流量及类别对电弧行为的影响。

图3所示为单阴极等离子喷枪设计的级联弧室 (SimplexPro等离子喷枪)。相比之下，三阴极TriplexPro等离子喷枪将整个电流分配到三个阴极。通过对等离子气体及喷涂材料的更加均匀有效的加热，减少了电弧附着点的阳极侵蚀和更好的定义电弧附着位置来进一步改善涂层工艺。三个电弧在较高总电压下运行，喷枪在较长时间内具有特别稳定的操作优势。图4展示了我们在本研究中使用的两级级联式电弧喷枪。

分割裂纹涂层-利用级联式等离子弧APS制备

作为此研究的一个方面，我们制备的TBCs使用了欧瑞康美科生产的Amdry 995C打底层和不同系列的等离子球化7~8 wt% 的氧化钪稳定的氧化锆 (8%YSZ) 粉末。涂层制备过程采用了不同的喷涂设置，如等离子焰、送粉量和喷涂距离。

对于利用SimplexPro喷涂的涂层，将喷枪的功率一直保持在45KW，喷涂距离不变，在本研究中我们使用“D_s”来表示。只改变喷涂材料。表1列出的是我们使用的三种标准的8% YSZ材料。



图5所示为涂层可以获得的裂纹密度。涂层的裂纹密度在1.2到3.4条垂直裂纹 /mm中变动，粉末粒径分布更细的Metco 204F粉末获得的裂纹密度更高。显然，就算是具有更粗粒径分布的Metco 204C-NS粉末，在喷涂距离为DS和40 g/min的送粉量条件下，进行喷涂也能够获得2.7条裂纹 /mm及64%沉积效率的涂层。与Guo, Murakami和Kuroda^[2]描述的情形类似，在功率为41 kW，喷涂距离为60mm且送粉量仅为20 g/min时，可获得裂纹密度大约4条裂纹 /mm的涂层。

产品	D50 [μm]	公称尺寸 [μm]
Metco 204F	20 至 30	-45 +15
Metco 204NS-G	50 至 57	-140 +45
Metco 204C-NS	68 至 77	-140 +45

表1：本次研究中使用的欧瑞康美科8% YSZ材料。

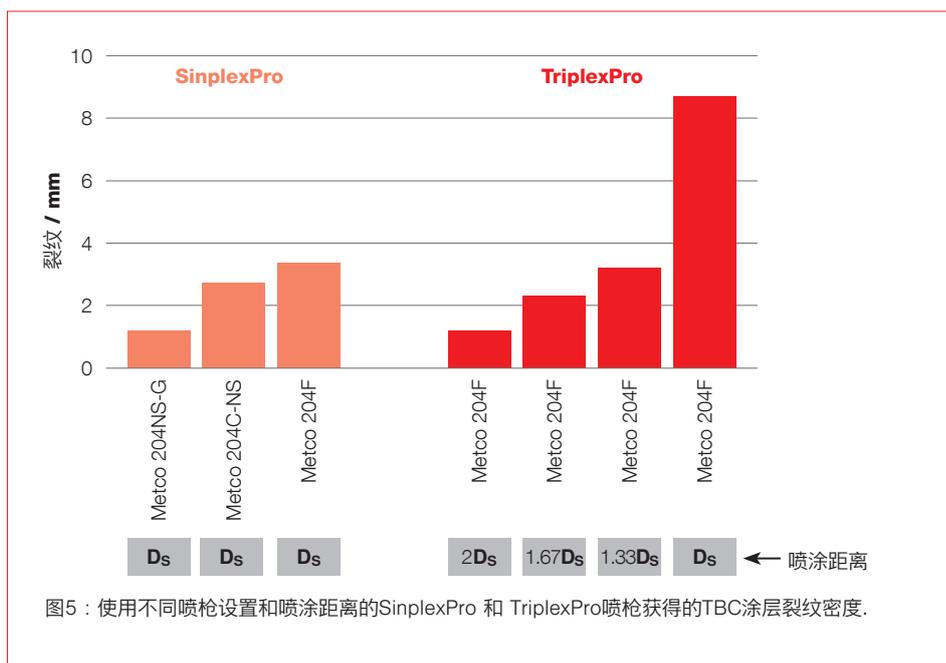
对于使用TriplexPro-210喷枪喷涂的涂层来说，使用Metco 204F 粉末[图5]，通过改变等离子焰和喷涂距离来制备500 μm到1000μm厚度的涂层。图4表明更短的喷涂距离可以获得更高的裂纹密度。可以确认的是^[2]，喷涂参数固定，被喷涂涂层的金属基体温度对形成分割裂纹具有决定性作用，每个单位长度的更高裂纹数与更高基体温度相对应。这与更短喷涂距离产生更高裂纹密度的结论一致。

除了喷涂距离，等离子焰同样对分割TBCs微观结构的演变起着重要作用。在喷涂距离和送粉量的一定的条件下，高焰喷涂会产生一个更致密的涂层，且具有高裂纹密度[图6]。降低等离子焰可以减少裂纹密度，但是可以增加涂层的孔隙率。即使是对具有裂纹分割的TBC涂层来说，增加的孔隙率是令人满意的，因为增加的孔隙率会减少涂层热导率。增加送粉量会进一步减少裂纹密度，但是却可以显著改进喷涂具有裂纹分割的厚TBC的经济效益[图6]。使用Triplex- Pro喷枪喷涂Metco 204F粉末，送粉量可达150 g/min。

具有分割裂纹的涂层-涂层性能

为了评估级联式等离子弧喷枪在大气环境下制备的分割TBC涂层的性能，以大气等离子制备的多孔涂层为标准，对不同密度的分割裂纹和不同水平的孔隙率涂层进行了侵蚀和热循环测试。

通过改变喷涂距离及等离子焰值，使用TriplexPro-210级联式喷枪制备了高（3.3/mm），中（2.3/mm）和低（1.5/mm）水平的裂纹密度的涂层和低裂纹密度（2.2/mm）但孔隙率增加的涂层。



根据表2显示的热循环测试结果，很明显，分割式涂层优于高孔隙率涂层，在分割式TBCs涂层中，具有更高裂纹密度的涂层性能更强。同时，分割TBC涂层与多孔APS涂层相比，具有更高的耐侵蚀性能[图7]。总而言之，与多孔涂层相比，裂纹分割涂层在性能上有很大提升。此外，级联式等离子弧喷枪技术制备分割式涂层具有特别好的经济性。

分割裂纹涂层-使用级联式等离子弧悬浮液等离子喷涂工艺制备

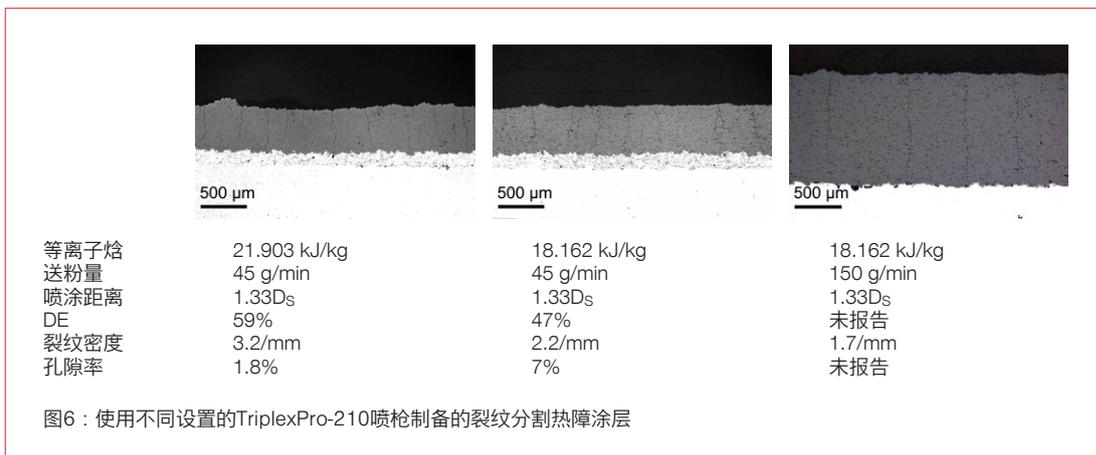
除了传统的大气等离子喷涂（APS），悬浮液等离子喷涂（SPS）同样可以用于制备分割式TBCs。悬浮液等离子喷涂通过将细小的亚微米细粉末颗粒以悬浮液的形式输送到喷枪（溶剂通常为乙醇）。在使用SPS的条件下，如图8所示，可以是裂纹分割涂层或者柱状晶分割涂层，该图表明了使用SPS工艺和TriplexPro-210喷枪可能出现的组织结构。

总结和结论

级联式等离子喷枪技术其优势是可以为氧化锆粉末材料提供更为均匀的加热和熔化效果，该材料用于燃气轮机热段部件的热障涂层（TBCs）制备。与传统的多孔TBCs涂层相比，这一技术可以用于制造分割式TBCs，能够改善涂层的循环寿命和耐腐蚀性能。

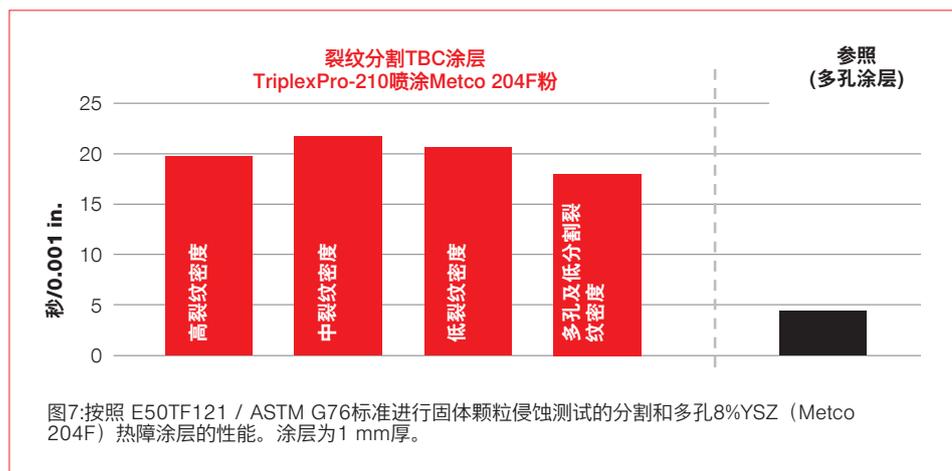
与传统的APS相结合，级联式等离子喷枪技术在制备分割式TBCs上占有很大的优势。在用SimplexPro和TriplexPro喷涂热障涂层时可以使用高送粉量。此外，利用这些喷枪还可以获得高沉积效率。结合这些特征，就可以特别经济、快速和高效地制备分割式TBCs。另外，级联等离子弧工艺特别稳定，可以保证涂层的可重复性和质量的一致性。

在本文中，研究了较远的喷涂距离和氧化锆粉末的不同尺寸对涂层结构的影响，特



YSZ 面层	面层 特征	T ₁ 温度2000个循环	T ₁ 温度7000个循环	T ₁ 温度以上7000个循环 高于T ₁ 200 °C时1000个循环
Metco 204F	高密度裂纹分割	✓	✓	✓
	中密度裂纹	✓	✓	✗
	低裂纹密度	✓	✓	✗
	多孔及裂纹分割	✓	✓	✗
参照 YSZ	多孔的	✗		

表 2: 8 YSZ分割式TBC涂层的热振循环测试结果. 涂层的厚度为1 mm. ✓ = 通过; ✗ = 失败.



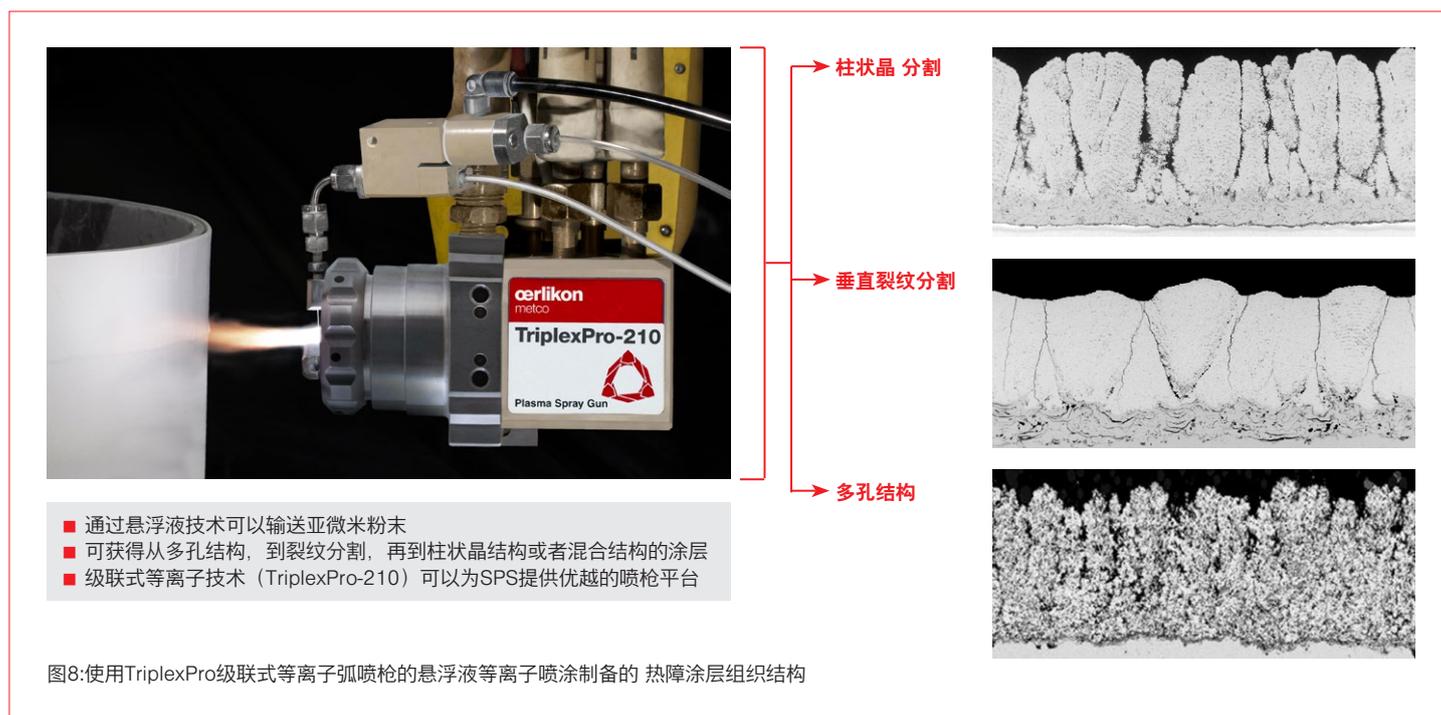
别是对涂层中分割裂纹密度的影响。我们的研究表明，使用TriplexPro喷枪在2倍D_s喷涂距离时还是可以制备分割式结构。远的喷涂距离有助于喷枪操作和机器人程序设计来完成复杂零件的喷涂，如涡轮的动叶和静叶。

经证明，针对SimplexPro喷枪，不同的粉末粒度分布，甚至包括粗粒度分布的粉末

(Metco 204C-NS)，均可以在中等功率设置条件下制备分割式TBCs。实验数据显示制备分割式TBCs可以使用一些喷枪和粉末的组合。

另外，经证实，级联等离子弧技术可以为悬浮液等离子喷涂（SPS）工艺制备分割式TBCs提供优越的平台。

欧瑞康美科可以提供热喷涂系统设计，定制标准喷涂单元，包括制备分割式热障涂层的所有必须元件。



参考

1. Forecast International.; www.forecastinternational.com.
2. Hongbo Guo, Hideyuki Murakami 和 Seiji Kuroda: 等离子喷涂薄热障涂层的分割裂纹; 先进陶瓷涂层与界面; D. Zhu 和 U. Schulz (eds) ; John Wiley 和 Sons, 2007.

关键词

APS、大气等离子喷涂、级联等离子弧、柱状晶分割涂层、密集垂直裂纹、耐侵蚀、燃气轮机、热段部件涂层、内在裂纹、结构诱发裂纹、分割式涂层、悬浮液等离子喷涂、TBC、热障涂层、热循环、垂直柱状晶分割、垂直裂纹分割、氧化钇稳定的氧化锆。

关于欧瑞康美科

客户受益于欧瑞康美科独特而广泛的表面技术、设备、材料和全套的涂层服务。此外，我们还根据客户的需求提供灵活的客户支持服务组合。作为热喷涂领域的领导者，我们提高了客户组件和系统的性能、效率和可靠性。除了热喷涂，我们还为增材制造行业提供材料，为电子行业和其他关键工业流程提供导电填料。欧瑞康美科服务于航空、电力、汽车、石油燃气业以及其他专业市场且在欧洲、中东、非洲、美洲和亚太地区运营着50多个动态增长的服务中心。欧瑞康美科与欧瑞康巴尔查斯和欧瑞康增材制造同属于瑞士欧瑞康集团表面处理事业板块。

信息如有更改，恕不另行通知