

等离子喷涂热障涂层的 服役性能

董 会◇著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

等离子喷涂热障涂层的服役性能

董会 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了等离子喷涂热障涂层的结构设计、陶瓷层材料及制备方法,服役过程中热障涂层陶瓷层温度场演变特征,涂层裂纹萌生及扩展行为特征,多种因素协同控制下热障涂层的寿命模型,热障涂层失效机理。另外,本书还探讨了热障涂层未来的研究方向。

本书适合从事无机涂层及材料高温保护研究工作的技术人员,尤其是从事热障涂层研究工作的教师及科研人员借鉴。

图书在版编目 (CIP) 数据

等离子喷涂热障涂层的服役性能 / 董会著. —北京:
中国石化出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-5114-4922-1

I. ①等… II. ①董… III. ①等离子喷涂-热障-
涂层-研究 IV. ①TG174.442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 138837 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者
以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

700×1000 毫米 16 开本 8 印张 150 千字

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前言

CONTENTS

热障涂层(Thermal Barrier Coatings, TBC)是一种功能隔热涂层,通常是将导热系数较低的高熔点材料涂覆于高温部件表面,从而避免高温介质直接作用于金属基体表面,以良好的隔热性能达到降低金属部件温度从而达到保护合金基体的目的。目前,热障涂层已经在燃气轮机、航空航天发动机等领域得到了广泛应用。

等离子喷涂热障涂层(APS TBC)的典型结构为三层:高温合金基体上沉积一层金属过渡层,然后再沉积一层陶瓷隔热层。其中,陶瓷隔热层采用的典型材料为7%~8% Y_2O_3 - ZrO_2 (YSZ),YSZ层采用等离子喷涂(APS)制备。APS TBC目前主要应用于地面燃气轮机,可有效提升燃气轮机的效率及服役寿命。热障涂层服役过程中,YSZ层的脱落严重制约了其发展及应用。因此,了解APS TBC服役性能(包括服役过程中涂层各层的变化特点,裂纹扩展行为,寿命演变规律及涂层失效机理等方面)十分重要。

结合国内外热障涂层的研究进展,本书首先介绍了热障涂层的制备技术、典型结构、材料的性质、制备方法及YSZ的结构及相变性能。在介绍了两种常用裂纹表征方法的基础上,详细叙述了APS TBC服役过程中温度场随裂纹性质(尺寸、位置、形状等)的演变规律,热障涂层服役过程中裂纹扩展行为特征及裂纹对YSZ层烧结行为的影响,多因素控制下热障涂层服役寿命预测模型,寿命影响因素对APS TBC失效机理的影响。最后简单介绍了APS TBC的应用,并探讨了热

障涂层的未来研究方向。本书能够为 APS TBC 裂纹扩展行为, 寿命预测, 失效机理等方面的研究提供参考及借鉴, 同时希望本书能够为燃气轮机安全服役提供新的监测方法及思路。

本书获西安石油大学优秀学术著作出版基金资助, 并得到了陕西省自然科学基金(2016JQ5077、2017JQ5042), 西安石油大学《材料科学与工程》省级优势学科(YS37020203), 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题研究基金(No. P2018-17)等项目的资助。

本书编写过程中得到了西安交通大学热喷涂实验室各位老师的指导和大力支持, 书中部分试验数据由西安交通大学热喷涂实验室提供, 作者在此表示感谢。

由于作者水平有限, 文中难免会有错误及不周之处, 如蒙指正, 不胜感激。

目 录

CONTENTS

1 等离子喷涂热障涂层概述	(1)
1.1 热障涂层及其发展历程	(1)
1.2 热障涂层制备方法	(2)
1.2.1 等离子喷涂	(2)
1.2.2 电子束物理气相沉积	(4)
1.2.3 其他制备方法	(6)
1.3 冷喷涂技术	(7)
1.3.1 冷喷涂发展及原理	(7)
1.3.2 喷涂设备	(9)
1.4 等离子喷涂热障涂层结构	(10)
1.4.1 热障涂层典型结构	(10)
1.4.2 热障涂层结构设计	(13)
1.5 热障涂层材料及制备方法	(15)
1.5.1 涂层粉末	(15)
1.5.2 粉末的制备方法	(16)
1.5.3 高温合金	(18)
1.6 氧化锆基热障涂层	(20)
1.6.1 氧化锆的相及晶体结构	(20)
1.6.2 YSZ 涂层相变性能	(21)

2	等离子喷涂热障涂层服役时的温度场特征	(23)
2.1	有限元模型	(23)
2.1.1	分析流程	(23)
2.1.2	模型的建立	(23)
2.2	横向裂纹长度对热障涂层温度场的影响	(24)
2.3	横向裂纹扩展位置对热障涂层温度场的影响	(28)
2.4	横向裂纹形状对热障涂层温度场的影响	(30)
3	等离子喷涂热障涂层横向裂纹扩展行为	(33)
3.1	涂层横向裂纹表征方法	(33)
3.1.1	断面表征方法	(33)
3.1.2	YSZ 层表面亮斑表征方法	(33)
3.2	横向裂纹的扩展行为	(34)
3.2.1	横向裂纹的萌生	(34)
3.2.2	横向裂纹的扩展及合并行为	(35)
3.3	横向裂纹尺寸对热障涂层剩余寿命的作用	(39)
3.3.1	基于断面表征热障涂层剩余寿命与裂纹尺寸关系	(39)
3.3.2	基于亮斑尺寸表征涂层剩余寿命与裂纹尺寸关系	(40)
3.4	陶瓷层烧结行为对裂纹扩展的影响	(41)
3.4.1	高温服役时陶瓷层烧结行为	(42)
3.4.2	较高温度服役时陶瓷层烧结对横向裂纹扩展的作用	(44)
4	等离子喷涂热障涂层服役寿命模型	(46)
4.1	热障涂层服役性能常用表征方法	(46)
4.1.1	等温热震试验方法	(46)
4.1.2	梯度热震试验方法	(46)
4.2	黏结层高温氧化行为	(48)
4.2.1	黏结层氩气氛中的氧化行为	(48)

4.2.2	高温下黏结层在空气中的氧化行为	(50)
4.3	α - Al_2O_3 基 TGO 厚度对热障涂层寿命的决定性作用	(54)
4.4	混合氧化物对热障涂层寿命的作用	(55)
4.5	温度梯度对等离子喷涂热障涂层寿命的影响	(58)
4.6	黏结层温度对等离子喷涂热障涂层寿命的影响	(62)
4.7	热膨胀不匹配对热障涂层寿命的影响	(65)
4.8	热障涂层服役寿命模型	(66)
5	等离子喷涂热障涂层失效机理	(68)
5.1	热障涂层应力分析有限元模型简介	(68)
5.2	热障涂层开裂机制随 α - Al_2O_3 基 TGO 生长的演变	(71)
5.2.1	涂层开裂路径变化	(71)
5.2.2	TGO 厚度不同时热障涂层失效模式及开裂机理	(75)
5.3	混合氧化物对热障涂层失效机理的控制作用	(81)
5.4	温度梯度对涂层开裂机制的影响	(83)
5.4.1	不同温度梯度下涂层的开裂位置	(83)
5.4.2	YSZ 温度梯度对涂层应力分布的影响	(85)
5.5	黏结层/YSZ 界面温度对热障涂层开裂机理的作用	(89)
5.5.1	热障涂层失效模式分析	(89)
5.5.2	黏结层/YSZ 界面温度对热障涂层应力分布的影响	(90)
5.6	黏结层表面状态对涂层开裂机制的影响	(92)
5.6.1	界面粗糙度对涂层应力场的作用	(92)
5.6.2	黏结层表面平滑度对涂层应力场的作用	(96)
6	等离子喷涂热障涂层的应用及发展方向	(101)
6.1	等离子喷涂热障涂层在燃气轮机中的应用	(101)
6.1.1	燃气轮机的发展历程及运行原理	(101)
6.1.2	燃气轮机的构造材料及热障涂层的应用	(102)

6.2 热障涂层其他应用	(104)
6.2.1 热障涂层在柴油机中的应用	(104)
6.2.2 热障涂层在高炉风口及渣口中的应用	(105)
6.3 热障涂层存在的问题及其未来研究方向	(105)
附录 本书符号表	(108)
参考文献	(111)

1 等离子喷涂热障涂层概述

1.1 热障涂层及其发展历程

随着燃气轮机技术和航空、航天发动机的发展,高温工作环境对工程结构材料的要求越来越苛刻。目前,燃气温度已接近甚至超过 2000K(1727℃),明显高于高温合金的熔点($\sim 1300^{\circ}\text{C}$)。因此,高温合金已经不能完全满足使用要求。为适应严酷的高温工作环境,高温合金表面改性成为必要。热障涂层(Thermal Barrier Coatings, TBC)是一种隔热的功能涂层,通常将导热系数较低的高熔点材料涂覆于热端部件的表面,从而避免高温介质直接作用在金属基体表面,成为高温介质加热金属基体表面的屏障,以良好的隔热性能达到降低金属部件表面温度从而保护合金基体的作用。

热障涂层的发展源于高温防护涂层的发展。第一代高温防护涂层主要是简单铝化物涂层,产生于 20 世纪 50 年代。50 年代粉末包埋渗铝涂层开始用于钴基导向叶片,70 年代以后渗铝涂层在钴基和镍基涡轮及导向叶片上的应用越来越广泛。第二代为多元铝化物涂层,其主要是基于第一代简单铝化物涂层发展而来。在简单渗铝涂层中加入一定量的 Si、Cr 等元素能够显著改善涂层的抗热腐蚀性能,降低涂层与基体之间的互扩散。其中, Pt 还能提升 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 膜的抗剥落和自愈能力。因此,多元铝化物涂层在燃气轮机的热端部件上得到了广泛应用。第三代为 MCrAlY 涂层,始于 20 世纪 70 年代,现已发展成一系列的涂层体系,其中 M 为 Fe、Co、Ni 或它们的组合, Al 主要用来形成保护性的 Al_2O_3 膜, Cr 主要用来促进氧化膜的形成,并提高抗热腐蚀能力, Y 主要用来提高氧化膜的附着力。前三代高温防护涂层主要是为高温合金提供抗氧化和抗腐蚀性能。第四代为热障涂层,该涂层不仅具有抗氧化与抗腐蚀的能力,还可以保证高温合金叶片在高温下保持较低的温度。

迄今为止,热障涂层的发展同样也经历了三代。热障涂层发展开始于 20 世纪 60 年代初。最初的热障涂层主要用于燃烧室内部。采用火焰或大气等离子喷涂方法(Atmospheric Plasma Spraying, APS)制备 Ni 基高温合金涂层,而陶瓷隔热层则采用大气等离子喷涂氧化镁稳定的氧化锆(22MSZ),其最高使用温度为 982°C ,这种用于早期燃烧室的热障涂层的耐久性随燃烧室中温度的提高而降低,

因此被随后开发的 Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2 陶瓷涂层代替 (YSZ)。而 Y_2O_3 质量分数为 7%~8% 时其制备的涂层寿命最高, 因此普遍应用的陶瓷隔热层材料为质量分数 7%~8% Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2 , 即第一代热障涂层。

第一代热障涂层的陶瓷层成分为 7-8YSZ。截止到目前, 7-8YSZ 仍然是热障涂层最主要的陶瓷层材料。黏结层成分为 NiCoCrAlY , 陶瓷层和黏结层均采用大气等离子喷涂制备, 仍主要用于燃烧室。7-8YSZ 的应用明显提高了热障涂层的耐久性以及隔热性能, 在 1094℃ 时其热循环剥落寿命达到 22MSZ 的 4 倍。采用大气等离子喷涂方法制备黏结层时, 粒子在等离子焰流中发生氧化导致黏结层中铝的有效含量降低, 服役过程中将过早产生保护性差的非 Al_2O_3 基热生长氧化物。

第二代热障涂层是为防止黏结层在喷涂过程中的氧化并提高涂层的致密性, 采用低压等离子喷涂 (LPPS) 代替大气等离子喷涂方法制备 NiCoCrAlY 黏结层, 解决了喷涂过程金属粒子发生严重氧化的问题, 涂层的致密性、结合强度提高, 其耐久性为第一代热障涂层的 2 倍以上。第二代热障涂层应用在工作环境比燃烧室更恶劣的部件上, 如静子导向叶片与涡轮转子叶片表面等。由于黏结层结合强度和抗氧化性能的提高, 热障涂层失效通常发生在黏结层附近的陶瓷层中, 即涂层失效始于陶瓷层内部。

第三代热障涂层应用在工作条件最为恶劣的涡轮转子叶片上, 陶瓷层的沉积工艺采用了电子束物理气相沉积 (Electron-Beam Physical Vapor Deposition, EB-PVD), 该方法制备的涂层具有“柱状晶”结构, 柱状晶粒之间大的垂直间隙使其应变缓和能力大幅提升。相对于第二代热障涂层, 第三代热障涂层耐久性提高了 2~4 倍, 其失效破坏通常发生在黏结层/TGO/YSZ 界面处。由于具有良好的耐热冲击性, 第三代热障涂层通常用于开机停机频繁的航空发动机。对于工业燃气轮机而言, 陶瓷涂层以大气等离子喷涂为主。

1.2 热障涂层制备方法

目前, 制备陶瓷层的方法有很多种, 其中等离子喷涂与电子束物理气相沉积是制备热障涂层陶瓷层最主要的两种方法。等离子喷涂制备的陶瓷层因工艺的灵活性, 可喷涂材料的广泛性及良好的经济性, 已经在国民经济的各个领域 (钢铁冶金、石油化工、机械制造、能源技术等) 获得了广泛的应用 (除航空发动机关键部件外绝大多数工作环境)。

1.2.1 等离子喷涂

等离子喷涂采用等离子电弧作为热源, 是将陶瓷、合金、金属等材料加热到熔化或半熔化状态, 并以高速喷向经过预处理的工件表面而形成涂层的热喷涂方

法。图 1-1 所示为大气等离子喷涂的原理图。通入电流后，等离子电弧在喷枪的钨阴极及铜阳极之间产生，属于非转移弧，其温度约为 20000K。在送粉气流的带动下喷涂粉末被送入高温等离子焰流，在高温、高速等离子焰流的加热作用下，粉末被加热、加速。加热至全熔化或半熔化的粉末以一定的速度（ $\sim 340\text{m/s}$ ）撞击到工件表面，液滴依次撞击基体或已形成的涂层表面，粒子横向流动扁平化，急速冷却凝固，不断堆积起来而形成涂层。

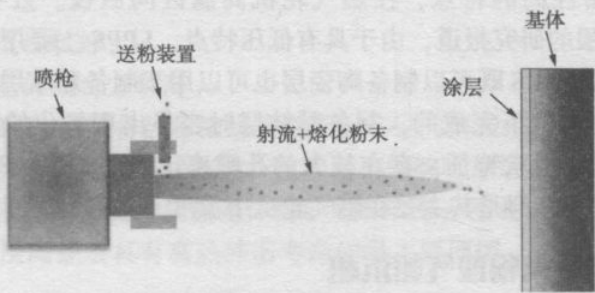


图 1-1 外送粉式等离子喷涂原理图

熔融粒子在与沉积表面接触撞击直至凝固时的冷却速度极高，陶瓷粒子一般为 $10^4 \sim 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ，金属粒子一般为 $10^6 \sim 10^8 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 甚至更高。因此，一般熔滴完全凝固所需时间为 $10 \sim 20 \mu\text{s}$ ，而完成扁平化所需时间为 $0.5 \sim 1 \mu\text{s}$ 。前一熔滴撞击基体表面到后一颗熔滴撞击到基体表面的时间间隔大约为 0.1 s ，所以，在后一熔滴到达之前，前一熔滴有足够时间进行变形并充分冷却凝固成固体。可以认为每个喷涂粒子的沉积行为在时间与空间上都是相互独立的，涂层是由数量巨大的熔滴经过撞击→扁平变形→冷却凝固堆积而成的，熔滴之间的变形凝固过程相互独立。这便使得等离子喷涂的涂层具有典型的层状结构，如图 1-2 所示。

等离子喷涂热障涂层主要以机械结合为主，涂层与基体的结合强度主要依靠

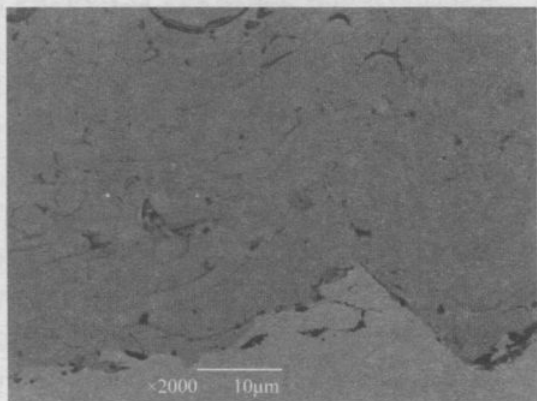


图 1-2 等离子喷涂涂层的典型断面结构

基体粗糙的表面与涂层之间形成“互锁”效应。因此，等离子喷涂之前，基体往往需要喷砂处理。喷砂处理后，基体表面被净化、活化，表面能升高，不仅获得了更有利于熔融粒子沉积的表面，粗糙不平的表面更能提升涂层的界面结合强度。

目前，等离子喷涂主要由大气等离子喷涂 (APS) 和低压等离子喷涂 (LPPS) 组成。就热障涂层而言，LPPS 主要用于制备黏结层，LPPS 制备的黏结层由于具有低氧化、致密性高的特点，在燃气轮机高温区间服役。近年来，开始出现 LPPS 制备陶瓷层的研究报道，由于具有低压特点，LPPS 主要用于制备高应变容限的柱状陶瓷层。APS 既可以制备陶瓷层也可以用于制备黏结层，但是由于 APS 的工艺过程是在大气下完成的，制备黏结层时容易出现氧化的问题，并且 APS 制备的黏结层具有层状特征，存在较大的孔隙率。因此尽管 APS 制备的黏结层目前仍在大量使用，但是其主要在燃气轮机中温度不太高的区间中服役。

1.2.2 电子束物理气相沉积

电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 是电子束技术与物理气相沉积技术相结合的产物，是在高真空状态下，利用具有高能量密度的电子束轰击原料，使原料蒸发并在基体上凝结沉积形成涂层的工艺方法，其原理如图 1-3 所示。电子枪是 EB-PVD 设备最关键的结构，用来产生能够蒸发原料的高能电子束流。带负电荷的电子束流在电场的作用下射向原料。期间，电子束流被加速电极加速，被电磁透镜聚焦，变成高速高能的电子束流。高能量密度的电子束流轰击到原料上时电子的动能转换为原料的内能，原料在极短的时间内 (几分之一微秒) 温度升高至上万摄氏度。能量来不及扩散的情况下会瞬间熔化和汽化原料。汽化的原料通过稀薄气氛输送到工件上，在工件上冷凝沉积形成涂层。

根据原料及工艺参数的不同电子束物理气相沉积可以用于制备隔热、耐磨、

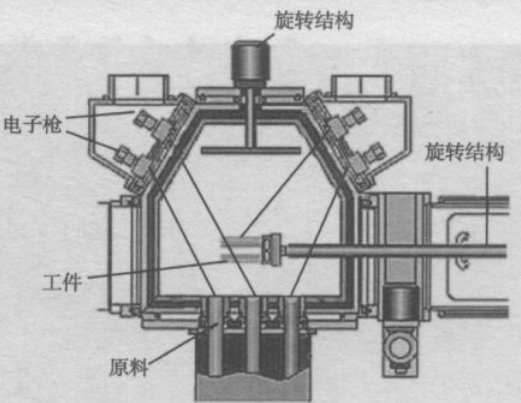


图 1-3 EB-PVD 设备工作原理示意图

耐腐蚀和耐冲蚀等性能的多功能涂层。

EB-PVD 具有以下工艺特点：

- (1) 工艺过程在真空状态下进行，有利于防止基体与涂层材料被污染、氧化，从而获得质量较高的涂层；
- (2) EB-PVD 可以制备难熔及蒸气压低的材料；
- (3) 调整好工艺参数及工艺过程可以制备与蒸发材料的相和元素含量基本一致的涂层；
- (4) 工艺重复性较好；
- (5) 涂层与基体结合力较高。

图 1-4 为 EB-PVD 制备热障涂层陶瓷层(YSZ)的典型结构。EB-PVD 制备的热障涂层陶瓷层具有典型的层状结构，这种结构能够将涂层内部的应力降低至接近零，并且在一定范围内能够根据基体的膨胀和收缩产生相应的应变，这是 EB-PVD 制备热障涂层陶瓷层具有高热冲击寿命的最主要原因。

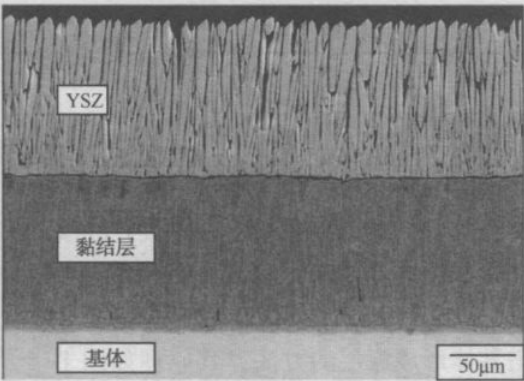


图 1-4 EB-PVD 制备热障涂层的典型结构

表 1-1 所示为 EB-PVD 与 APS 制备陶瓷层的性能差异。APS 制备的 YSZ 涂层的热导率显著低于 EB-PVD 制备 YSZ 层的热导率。其主要原因为 APS 制备的陶瓷层具有典型的层状结构，扁平粒子之间的孔隙及未结合界面垂直于热流方向，能够显著增加涂层的热阻，降低涂层热导率，EB-PVD 制备的 YSZ 层具有典型的柱状结构，且柱状结构与黏结层界面垂直，即与热流方向平行，平行于热流方向的孔隙不仅不能起到隔热的作用，反而还能热流提供快速传递通道，进而显著增加 EB-PVD 陶瓷层的热导率。这种柱状结构的陶瓷层具有较高的应变容限，因此，EB-PVD 陶瓷层具有较高的寿命。前面提到 APS 制备的陶瓷层与基体主要依靠粗糙不平的界面产生的“互锁”效应结合，主要为机械结合，并且基于涂层的沉积机理，APS 陶瓷层内部同样存在大量的缺陷，这些都导致 APS 陶瓷层结合强度较低。EB-PVD 技术的机理决定了其制备的陶瓷层与金属基体主要

以化学键结合。因此，APS 涂层的结合强度显著低于 EB-PVD 陶瓷层的结合强度。就弹性模量而言，APS 陶瓷层的结构决定了其弹性模量低于 EB-PVD 陶瓷层。但是与 EB-PVD 技术相比，制备陶瓷层时 APS 具有较高的涂层制备速度，其涂层制备速度至少是 EB-PVD 技术的 10 倍以上。基于上述两种方法制备热障涂层的结构及性能特点，EB-PVD 制备的热障涂层主要用于航空航天发动机，APS 制备的热障涂层主要用于地面燃气轮机。

表 1-1 EB-PVD 和 APS 制备 YSZ 涂层的性能比较

性能参数	APS	EB-PVD
热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.6~2.2	1.2~2.4
结合强度/MPa	5~40	300~400
弹性模量/GPa	30~50	80~90
涂层制备速度/ $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	50~200	3~6
服役寿命	低	高
应用场合	地面燃气轮机	航空航天发动机、地面燃气轮机动叶片

1.2.3 其他制备方法

除上述两种方法外，热障涂层还能采用超音速火焰喷涂(High velocity Oxygen Fuel, HVOF)、高频脉冲爆炸喷涂(High Frequency Pulse Detonation, HFPD)制备。由于应用较少，本节仅对上述两种制备方法作简单介绍。

超音速火焰喷涂是以氧气和燃料燃烧的能量熔化喷涂材料，粉末在超高速焰流的带动下高速撞击基体形成涂层的方法，其原理如图 1-5 所示。通常以氧-丙烷火焰为主，燃料还可以采用乙炔、丙烯、天然气等，近年新发展的航空煤油等燃料也逐渐开始应用。超音速火焰喷涂具有气流速度高，涂层致密、结合强度高、设备简单等优点。但是，超音速火焰喷涂采用的热源为燃烧的气体，燃气的

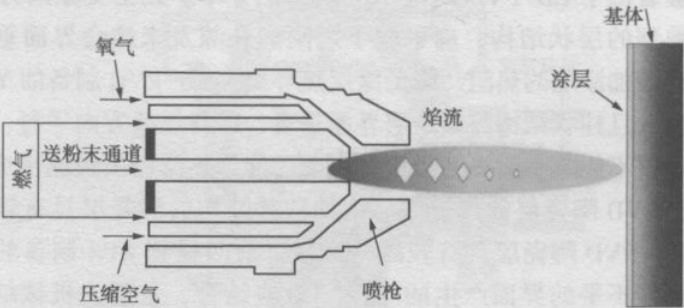


图 1-5 超音速火焰喷涂原理图

温度以氧-乙炔的最高，约 3300℃，氧气-丙烷、氧气-天然气等燃烧的最高温度仅为 2300℃ 和 1900℃。对于 YSZ 来说，其熔点约为 2700℃，属于高熔点材料，其粉末在燃气中的熔化程度较低，导致涂层的抗热冲击性能较差。因此，YSZ 粉末不宜采用超音速火焰喷涂制备。超音速火焰喷涂制备热障涂层黏结层具有低氧化、高致密性等特征，目前燃气轮机部分高温部件的热障涂层黏结层采用超音速火焰喷涂制备。

爆炸喷涂是在特殊设计的燃烧室里，将氧气和乙炔气按一定的比例混合后引爆，使料粉加热熔融并使颗粒高速撞击在零件表面形成涂层的方法。爆炸喷涂的最大特点是粒子飞行速度高、动能大。因此，爆炸喷涂制备的涂层具有结合强度高、涂层致密、气孔率低、工件表面温度低等特点。爆炸喷涂可喷涂金属、金属陶瓷及陶瓷材料，但是由于该设备价格高，生产效率低，噪声大，属氧化性气氛等原因，国内外应用还不广泛。目前，国内已有一个厂家开始使用爆炸喷涂制备其他功能涂层。

1.3 冷喷涂技术

1.3.1 冷喷涂发展及原理

冷喷涂技术是沉积热障涂层黏结层极具潜力的方法，因此本节对冷喷涂技术及其设备作简要介绍。具有一定塑性变形能力的粒子撞击到材料表面时，粒子速度不同会产生不同的效果，如图 1-6 所示。当粒子以较低的速度撞击金属表面时，将迫使金属表面局部产生变形，粒子速度增加会使金属表面产生越来越严重的冲蚀效应。工业生产中 对工件表面的除锈、喷丸便是对此效应的具体应用。前苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所的 Papyrin 等在用示踪粒子进行超音速风洞试验时偶然发现，当示踪粒子的速度超过某一临界值时，示踪粒子对

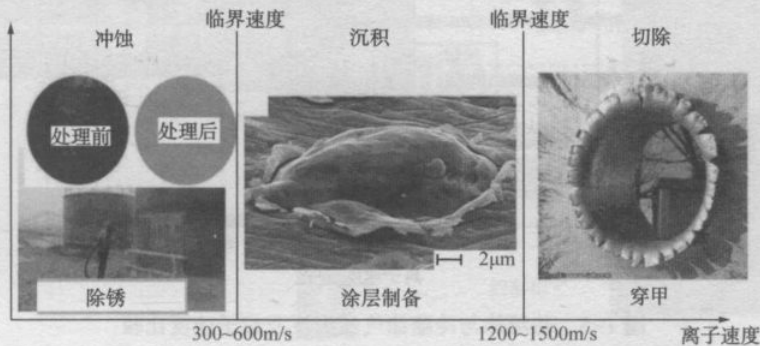


图 1-6 不同速度的固态粒子撞击金属表面产生的不同现象

靶材表面的作用从冲蚀转变为加速沉积，由此在 1990 年提出了冷气动力喷涂 (Cold Gas Dynamic Spray, Cold Spray, 简称冷喷涂) 的概念。当粒子速度进一步增加到某一上限值时，粒子由沉积转变为对基体的严重冲蚀或者是切割。

冷喷涂技术是一种基于空气动力学的涂层制备方法，原理如图 1-7 所示。预热后的高压气体携带粉末粒子通过 Laval 缩放管形成超音速流动，在完全固态下高速撞击基体，通过粒子/基体界面处剧烈的塑性变形与基体表面形成结合。所以，冷喷涂与热喷涂的区别在于粉末粒子不熔化，即冷喷涂过程中粉末也加热，但是加热温度低于粉末熔点。广义上讲，冷喷涂技术也属于热喷涂技术的一种。

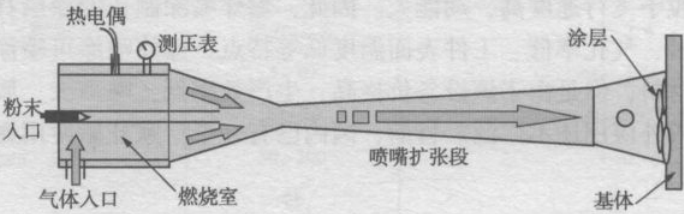


图 1-7 冷喷涂技术原理示意图

图 1-8 为典型热喷涂技术与冷喷涂过程中的气流温度与粒子速度的对比。从对比可以看出，冷喷涂技术主要有两个显著特点：粒子速度高，气体温度低。因此，与传统热喷涂技术相比，冷喷涂技术具有以下优点：

- (1) 可以避免或者降低喷涂粉末的氧化、分解、相变、晶粒长大等；
- (2) 对基体几乎没有热影响；
- (3) 涂层组织致密，可以保证良好的导电、导热等性能；
- (4) 涂层内残余应力为压应力有利于制备较厚涂层。

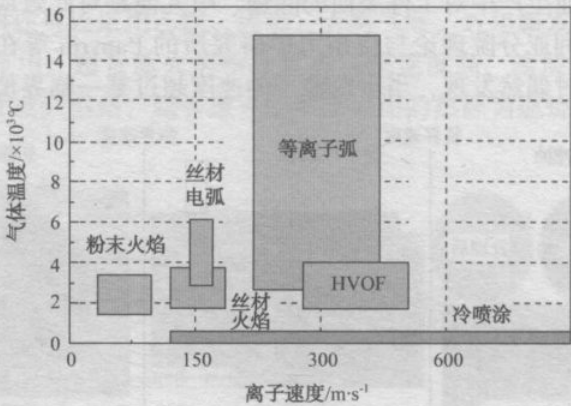


图 1-8 热喷涂与冷喷涂气流温度及粒子速度比较

冷喷涂过程中，粒子飞行速度是粒子碰撞基体后能否沉积形成涂层的关键因