



国际机械工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

热喷涂科学 与工程

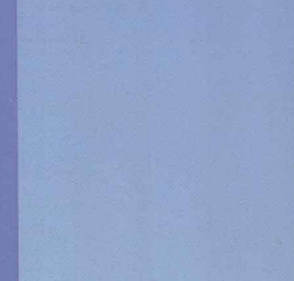
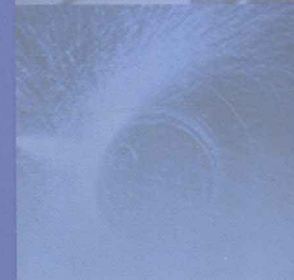
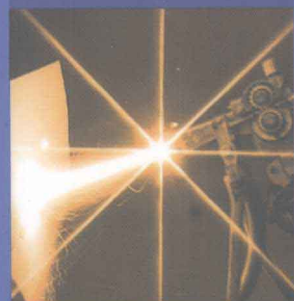
(原书第2版)

THE SCIENCE AND ENGINEERING
OF THERMAL SPRAY COATINGS

(法) LECH PAWLOWSKI 著
李辉 贺定勇 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

热喷涂科学与工程

(原书第2版)

(法) LECH PAWLOWSKI 著

李 辉 贺定勇 译



机械工业出版社

本书内容丰富, 结构完整, 论述深入浅出, 具有鲜明的学术特色, 同时它也比较全面地介绍了热喷涂技术在工业领域的应用。全书共 9 章, 基本涵盖了热喷涂研究和应用的几个主要方面, 书中含有大量的插图、数据、引文, 清晰地表述了相关内容, 可以当做工具书使用。本书不仅可作为从事热喷涂相关专业的本科生和研究生的教材, 也可供从事热喷涂技术和热喷涂材料研究的专业人员参考。

The Science And Engineering of Thermal Spray Coatings/by Lech Pawlowski/ISBN: 978-0-471-49049-4

Copyright© 2008 by John Wiley&Sons Ltd,

All rights reserved Authorized translation from the English language edition published by JohnWiley&Sons, Limited, Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Machine Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons, Limited No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited

本书中文版由机械工业出版社独家出版发行。未经机械工业出版社的书面许可, 不得以任何方式复制、传播本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2008-4824

本书封面贴有机械工业出版社和 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者或两者缺一者不得销售。

图书在版编目 (CIP) 数据

热喷涂科学与工程/ (法) 帕瓦罗瓦斯基 (PAWLOWSKI, L.) 著; 李辉, 贺定勇译
—北京: 机械工业出版社, 2010 11
(国际机械工程先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-32163-7

I ①热… II ①帕 ②李·③贺… III ①热喷涂 IV ①TG174 442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 195926 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吕德齐 责任编辑: 王春雨

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇,

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·22 印张·546 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-32163-7

定价 89.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务 策划编辑 (010) 88379772

社服务中心: (010)88361066 网络服务

销售一部: (010)68326294 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010)68993821 封面无防伪标均为盗版

献给我的妻子 **Muryel** 和我的孩子 **Irene** 和 **David**

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化化的机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等。
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等。
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己

的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术及技术交流方式。早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料更方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

译者前言

本书译自 L. Pawlowski 教授著《The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings》2008 年第 2 版。原书作者 L. Pawlowski 教授是热喷涂界国际知名的学者，多年来一直从事热喷涂领域的研究工作，并在热喷涂涂层的工业应用方面做出过特殊的贡献。

本书的第 1 版于 1994 年出版，十多年来这本书一直受到从事热喷涂研究和应用的学者及工程技术人员的欢迎和青睐。近二十年是热喷涂技术飞速发展的阶段，新的热喷涂技术和材料不断涌现，人们对热喷涂技术的基础探究也有新的进展，作者基于对这些发展动向的深刻理解和把握，对原版的《热喷涂科学与工程》进行了大幅度的调整和拓展，增加了许多最新的研究成果和内容，这就是我们所看到的《热喷涂科学与工程》第 2 版。

本书内容丰富，结构完整，论述深入浅出，具有鲜明的学术特色，同时它也比较全面地介绍了热喷涂技术在工业领域的应用。全书共分 9 章，基本涵盖了热喷涂研究和应用的几个主要方面，书中含有大量的插图、数据、引文，清晰地表述了相关内容，可以当做工具书使用。本书不仅可作为从事热喷涂相关专业的本科生和研究生的教材，也可供从事热喷涂技术和热喷涂材料研究的专业人员参考。

本书第 1 章至第 7 章由李辉翻译，第 8 章和第 9 章由贺定勇翻译，全文由李辉校核。

由于译者水平有限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请读者指正。

第2版前言

自从1994年《热喷涂科学与工程》第1版面世以来，热喷涂技术在科学、工程以及应用领域得到了进一步的发展。大型的实验室都已配备了相关的检测工具，能对单个粒子进行检测并对喷涂工艺进行智能优化。随着先进软件和高速计算机的普及，对喷涂过程的模拟也取得一定的进展。随着喷涂粉末制备技术和悬浮液喷涂技术的发展，纳米技术也开始在热喷涂领域出现。最后，关于热喷涂技术对环境影响的认识也取得了很大进展。

技术层面上，热喷涂技术的进展主要体现在一些新喷涂方法的出现，其中值得一提的有冷喷涂方法和轴向送粉等离子弧喷涂方法，前者能大幅度减少金属和合金涂层的氧化，后者则显著提高了涂层生产效率。许多精细的预处理、后处理方法以及涂层检测方法正进入常规的工业领域。

经济层面的进展主要涉及涂层新的应用领域，喷涂涂层在生物医学、化学、印刷业和汽车领域已得到推广，有望获得新的应用的将是电子领域。

本书第1版出版后得到了很高程度的认可，许多本领域的从业人员都在使用这本书。在文献中被400多次引用，说明了它的受欢迎程度和实用性。本次修订考虑了新喷涂技术的发展和日趋发展的成熟程度，并融入了作者自己的观点，同时，与很多同事的讨论也使我对本书进行了进一步的完善。最后，关于“喷涂车间的架构”一章在这一版中被删除。

我感谢许多鼓励我完成第2版书稿的学生们，我还要感谢我的博士研究生、硕士研究生及本科生，他们帮助我实现了我的一些科学想法，许多相关的工作都在这本书里进行了介绍。此外，还要感谢那些版权持有人允许在本书中引用他们的图片。最后，但并非最不重要的是我要感谢在本书写作过程中支持我的家人们。

Lech Pawlowski

于法国里尔

2007年12月

第 1 版前言

我最早接触到热喷涂是 1973 年秋天我选择硕士课题的时候，与我的弗罗茨瓦夫工程大学电子技术学院的同学一样，我最初对半导体方面的技术更感兴趣。但是当时我的导师，Licznernski 教授，通过向我展示厚涂层及等离子弧喷涂技术的制备原理，改变了我当时的想法。

这项技术仅仅是热喷涂技术“家族”中的一种。热喷涂技术现在不仅仅在许多大学的研究所中被研究，同时也在工业领域被大量应用。实验室内则力图实现对热喷涂过程中物理转变和化学变化的理解，而工业界则在探索这些涂层的应用。热喷涂技术在实验室和工业界的发展促使了这本书的问世。

因此，本书更注重的是面向不同教育背景的专业人员。具有较高层次的研究人员和工程师会在书中发现关于热喷涂技术的物理知识、涂层检测的知识，以及关于涂层性能方面最新的综述。

销售人员和技术员有望从书中关于热喷涂用材料、预处理、后处理技术方法中获得一些有益的信息。

最后，那些有志于在热喷涂技术进行投资的企业家，也可以在本书中找到关于热喷涂技术原理和搭建热喷涂车间的描述。

本书对热喷涂技术进行了全面的叙述，从粉末的制备、测试方法、预处理方法开始，包括目前最主要的热喷涂技术，以及对那些正处于发展阶段的技术也进行了讨论。最后，对如机械加工、高压高温处理、激光处理等涂层后处理技术也进行了简单介绍。

这本书还解释了热喷涂技术的物理本质，颗粒在焰流中加热加速现象的物理机制，涂层堆积过程中遇到的问题。从单个颗粒的飞溅开始，到涂层中热应力形成都进行了讨论。特别注意到涂层检测方面，如微观结构分析，力学性能、物理性能测试，可用于质量检测的无损检测方法等。对由不同方法制备出来的涂层的性能，涂层性能与涂层结构和工艺参数的关系进行了系统的介绍。此外，还介绍了涂层在现代工业重要领域的应用，如航空、印刷、电子及其他行业。

本书最后介绍了现代热喷涂车间的设计和架构。

许多人直接或者间接地对本书的出版做出了相应的贡献。

我想感谢法国列摩日大学教授 P. Fauchais 的友好支持，同样还感谢 S. Sturlese 教授。感谢其他在罗马（意大利）材料研发中心的科学家，他们帮助修订了本书中涂层热性能和电学性能的部分。

普莱克斯公司（美国印第安纳波利斯州）的初级工程师 R. C. Rucker 博士友好地对书中 D-gunTM 技术部分进行了修订，德国 Gerlingen 公司的 K. Kirner 博士参与了书稿清样的校订工作。

德国杜塞尔多夫 Cermet Vertrieb OHG 公司的 F. Kilp 工程师与法国 Voreppe 法铝集团的 D. Lombard 博士在粉末制备方法上贡献了他们的文章。法国列摩日大学的 A. Vardelle 教授

提供了关于喷涂颗粒撞击的论文，同时，日本神户的 Tocalo 公司的 J. Tekeuchi 博士提供了造纸业和钢铁行业涂层辊的图片。

我想向给我提供图片并允许我在书中使用这些图片的下述同事和相关组织表示感谢：J. Andresen 先生，Z. Babiak 博士、工程师，哥伦布贝特利研究所，P. Bork 工程师，T. Cosack 博士，F. J. Driller 先生，H. Herman 教授，B. Kushner 先生，Lemmens 先生及夫人，E. H. Lutz 博士，M. Marchese 博士，Dr A. Mascanzoni 博士，Matrasur，博士 Monerie-Moulin，女士 B. Ottesen，E. Prinz 工程师和 Sheritt 公司的 G. Slaughter 先生。

还要感谢我的妻子 Muryel 绘制了书中许多图表，以及她在写书最后几个月给予的耐心支持。

Lech Pawlowski

诺捷，法国

1994 年 8 月

符 号 说 明

1. 缩写/简写

1SLD	One-step laser deposition	激光一步法沉积
2SLD	Two-step laser deposition	激光两步法沉积
2-D	Two dimensional	二维
3-D	Three dimensional	三维
AA	Average roughness (see Ra)	平均表面粗糙度 (见“物理量”中的 Ra)
AC	Alternating current	交流
AEA	Acoustic emission analysis	声发射分析
AFM	Atomic force microscope	原子力显微镜
AHF	Ability-of-heating factor	加热能力因子 (见 5 3 2 节)
APS	Atmospheric plasma spraying	大气等离子喷涂
ARCI	Advanced Research Centre for Powder Metallurgy and NewMaterials, International (Hyderabad, India)	国际粉末冶金和新材料先进研究中心 (印度海德拉巴)
AS	Arc spraying	电弧喷涂
AZO	Aluminum zinc oxide	锌铝氧化物
b. c. c.	Body-centred cubic	体心立方
BET	Brunauer-Emmett-Teller	布鲁诺-埃梅特-特勒 (用于孔隙率测试的方法见表 7-7)
BIC	Bunsen ice calorimeter	本生冰卡计
BSE	Backscattered electron	背散射电子
c	Cubic	立方
CAPS	Controlled-atmosphere plasma spraying	控制气氛等离子喷涂
CaSZ	Calcia-stabilized zirconia	氧化钙稳定氧化锆
CBN	Cubic boron nitride	立方氮化硼
CCD	Charge-coupled device	电荷耦合装置
CeSZ	Ceria-stabilized zirconia	氧化铈稳定氧化锆
CFD	Computational fluid dynamics	计算流体力学
CGSM	Cold-gas spraying method	冷喷涂
CLA	Central-line average (see Ra)	中心线 (见“物理量”中的 Ra)
CP	Continuous pulse	连续脉冲
CVD	Chemical vapour deposition	化学气相沉积
CW	Continuous wave	连续波
DC	Direct current	直流
DCB	Double-cantilever beam	双悬臂梁
D-GUN	Detonation-gun spraying	爆炸喷涂
DIC	Differential interference contrast	微差干涉对比
DMF	Difficulty-of-melting factor	熔化程度因子 [见式 (5 32)]

DOE	Design of experiment	实验设计
DSC	Differential scanning calorimetry	差分扫描热量计
DT	Double torsion	双扭
DTA	Differential thermal analysis	差热分析
e	Base of normal logarithm ≈ 2.718	自然对数底, $e \approx 2.718$
e-beam	Electron beam	电子束
EBPVD	Electron-beam physical vapour deposition	电子束气相沉积
EDS	Energy-dispersive spectroscopy	能谱
EELS	Electron energy-loss spectroscopy	电子能量损失谱
EMPA	Electron microprobe analysis	电子探针分析
EXAFS	Extended X-ray absorption fine structure	扩展 X 射线吸收精细结构谱
f	Focus	焦距
F	Fuel	燃料
f. c. c	Face-centred cubic	面心立方
FS	Flame spraying	火焰喷涂
FS-powder	Flame spraying using a powder	粉末火焰喷涂
FS-wire	Flame spraying using a wire	丝材火焰喷涂
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy	傅里叶变换红外光谱
FWHM	Full width at half maximum	半宽高
HA	Hydroxyapatite [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$]	羟基磷灰石 [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$]
HAZ	Heat-affected zone	热影响区
HBSS	Hank's balanced salt solution	汉克斯平衡盐溶液
h. c. p.	Hexagonal close-packed	密排六方
HF	High frequency	高频
HIP	Hot isostatic pressing	热等静压
HOSP	Homogenous oven spherical powder	均质炉制球形粉末
HPPS	High-power plasma spraying	高能等离子喷涂
HVAF	high-velocity air-fuel	高速空气-燃料火焰喷涂
HVOF	High-velocity oxy-fuel	高速氧-燃料火焰喷涂
HYPREPOC	Hydrogen-pressure-reducing powder coating	水压还原粉末涂层
ICP	Inductively coupled plasma	感应耦合等离子弧
ICPES	Inductively coupled plasma-emission spectroscopy	感应耦合等离子弧发射光谱分析仪
ID	Internal diameter	内孔直径
IPS	Inert plasma spraying	惰性等离子喷涂
ir	Infrared	红外
IRS	Infrared absorption spectroscopy	红外吸收光谱仪
ITO	Indium tin oxide	铟锡氧化物
L	Liquid	液体
L2F	Laser Two Focus	激光双聚焦
LCVD	Laser-assisted chemical vapour deposition	激光辅助化学气相沉积
LD	Line density	线密度
LDV	Laser Doppler velocimetry	激光多谱仪测速计
LF	Laser-flash method of thermal diffusivity determination	激光闪光热扩散测试仪

LPPS	Low-pressure plasma spraying (see VPS)	低压等离子喷涂 (见 VPS)
LSP	Laser-shock processing	激光冲击加工
LTE	Local thermodynamic equilibrium	局部热力学平衡
LV	Laser velocimetry	激光测速仪
Mag	Magnification	放大倍数
MB	Modulated-beam method of thermal diffusivity determination	光束调制测热扩散率法
MF	Mechanofusion	机械熔合
MgSZ	Magnesia-stabilized zirconia	氧化镁稳定氧化锆
MIP	Mercury-intrusion porosimetry	压汞仪
MMC	Metal-matrix composite	金属基复合物
MOCVD	Metal-organic chemical vapour deposition	金属-有机物气相沉积
NDT	Non-destructive testing	无损检测
NIC	Nomarski interference contrast	诺马斯基干涉对比
OM	Optical microscopy	光学显微镜
PECVD	Plasma-enhanced chemical vapour deposition	等离子辅助气相沉积
PLD	Pulsed-laser deposition	脉冲激光沉积
PVD	Physical vapour deposition	物理气相沉积
PTA	Plasma-transferred arc	转移型等离子弧
PZT	Lead-zirconate-titanate	锆钛酸铅
R	Alkyl group, C_nH_{2n+1} , e. g. CH_3 or C_2H_5	烷基
RF	Radiofrequency	射频
rpm	Rotations per minute	每分钟转速 r/min
RS	Raman spectroscopy	拉曼光谱仪
RT	Room temperature	室温
SAD	Selected area diffraction	选区衍射
SAW	Surface acoustic wave	表面声波
SBF	Simulated body fluid	模拟体液
SCE	Standard calomel electrode	标准甘汞电极
ScSZ	Scandia-stabilized zirconia	氧化钪稳定氧化锆
SE	Secondary electron	二次电子
SEM	Scanning electron microscopy	扫描电子显微镜
SHS	Self-propagating high-temperature synthesis	高温自蔓延合成
SIMS	Secondary-ion mass spectrometry	二次离子质谱分析法
slpm	Standard litre per minute	标准 L/min
SOFC	Solid-oxide fuel cell	固体氧化物燃料电池
SPS	Shrouded plasma spraying	气保护等离子喷涂
STM	Scanning tunnelling microscopy	隧道扫描显微镜
t	Tetragonal	四方相
t'	Tetragonal non-transferable phase of sprayed stabilized ZrO_2	喷涂稳定氧化锆中不可转变四方相
TAT	Tensile adhesion test	拉伸试验
TBC	Thermal-barrier coating	热障涂层
TCP	Tricalcium phosphate $Ca_3(PO_4)_2$	磷酸三钙

TEM	Transverse electromagnetic (wave); transmission electron microscopy	透射电镜
TGA	Thermogravimetric analysis	热重分析
TGO	Thermally grown oxide	热生长氧化物
TSC	Thermally sprayed composite	热喷涂复合涂层
TSR	Thermal shock resistance	抗热震性
TTBC	Thick thermal-barrier coating	厚热障涂层
TTCP	Tetracalcium phosphate ($\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$)	磷酸四钙
UPS	Underwater plasma spraying	水下等离子喷涂
UV	Ultraviolet	紫外线
VPS	Vacuum plasma spraying (see LPPS)	真空等离子喷涂 (见 LPPS)
WDS	Wavelength-dispersive spectroscopy	波谱仪
WSP	Water-stabilized plasma	水稳等离子
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy	X 射线光电子能谱;
XRD	X-ray diffraction	X 射线衍射
XRF	X-ray fluorescence	X 射线荧光
YAG	Yttrium aluminum garnet	钇铝石榴石
YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	钇钡铜氧
YSZ	Yttria-stabilized zirconia	氧化钇稳定氧化锆

2. 商标

Amdry TM	粉末, 瑞士 Wohen, 苏尔寿美科生产
Ampert TM	粉末, 德国 Goslar, 斯泰克公司生产
Axial III TM	等离子弧喷枪, 加拿大 Richmond Mettech 公司生产
D-gun TM	爆炸喷枪, 美国普莱克斯公司使用
DPV-2000 TM	热喷涂测温测速仪, 加拿大魁北克地区 Tecnar 公司
JetStar TM	HAVF 喷涂技术, 美国普莱克斯公司使用并销售
Laserblast TM	用于表面清洁和表面活化的激光装置, 法国 Quantel 公司
Plazjet TM	高热焰等离子弧喷枪, 美国 TAFA 公司
PROTAL TM	激光烧蚀表面活化辅助热喷涂, 瑞士苏尔寿美科公司及法国贝蒙理工大学
Rokide TM	陶瓷棒火焰喷涂, 法国 Saint Gobain 公司
RotaPlasma TM	内壁旋转等离子喷涂, 瑞士苏尔寿美科公司研发并销售
Sonarc TM	电弧超声速复合喷涂, 德国多特蒙德大学开发
SprayWatch TM	热喷涂测温测速仪, 芬兰 Oseir 公司
Super D-gun TM	D-gun 爆炸喷枪改进型, 美国普莱克斯公司使用
Triplex TM	三阴极等离子弧喷枪, 德国慕尼黑 K Landes 教授开发, 瑞士苏尔寿美科公司使用

3. 物理量

$\Delta_f H^\circ$	标准生成焓
Δx	变量 x 的变化量
a	能量吸收比率 [见式 (4 4)] 或者扩散率 [见式 (4 5)]
A	常数
B	磁感应
B_i	毕奥数 [定义见式 (5 30)]

c	声速或光速 [见式 (5.46)]
c_p	定压比热容 [定义见式 (7.21)]
c_v	定容比热容
C	电容量
C_D	拖曳系数
d	直径或者厚度 [见式 (7.29)]
$\text{div}(\mathbf{v})$	$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$
e	电子电荷 ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)
$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$	x, y, z 方向上的单位向量
E	能量; 弹性模量 [见式 (6.18)]; 电场
F	频率
Fr_o	弗劳德数 [定义见式 (1.11)]
g	重力加速度 (9.81m/s^2)
$\text{grad}(\mathbf{v})$	$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$
G_i	界面断裂能
G_{ic}	I 型断裂时单位面积上临界裂纹扩展能
h	滞止焓; 传热系数 [见式 (5.28)]; 普朗克常数 ($6.6262 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$); 扁平颗粒厚度
H	总焓; 硬度 [见式 (7.11) 和式 (7.12)]; 磁场强度
H_{ev}	蒸发热
H_m	熔化热
HK	努氏硬度
HRC	洛氏硬度
HVc	c 牛顿载荷下的维氏显微硬度
i	整数
I	电流, 辐射强度
J	电流密度
k	湍流动能, 反应常数 [见式 (5.8)], 玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)
K	激光光束质量 [(见式 (4.3))]; 韧性
K_{Ic} Cntic	I 型断裂临界应力强度 (断裂韧性)
K_n	克努曾数 [见式 (5.20)]
l	长度, 位移, 路径
L	能量密度下降至 $1/e$ 时的光吸收深度 [见式 (4.4)]
m	质量
M	马赫数 v/c
n	整数
N	整数; 浓度
Nu	努塞尔数 [见式 (5.28)]
p	压力
p^*	气压
P	孔隙率; 能量

Pr	普朗特数 [见式 (5.29)]
q	送粉率; 能量密度 [见式 (4.5)]; 热流 [见式 (5.12) 和式 (7.24)]
r	半径; 圆柱坐标和球形坐标
R	反射率; 半径; 气体常数 $\approx 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 电阻
R_a	表面粗糙度, 定义为在测量距离上表面轮廓变化幅值绝对值相对于中心线比变化幅值的几何平均值
R_v	单位体积化学物生成速率
$R_{\max}$	最大表面粗糙度, 定义为在测量距离上表面最大轮廓峰高
R_s	薄膜电阻
R_z	平均表面粗糙度, 定义表面轮廓 5 个最高峰和 5 个最低谷绝对值的平均值
Re	雷诺数 [定义见式 (5.18)]
S	面积; 能量源 [见式 (5.4)]
t	时间
T	温度
TCR	热阻系数; 接触热阻
TEC	热膨胀系数 [定义见式 (7.23)]
U	超越方程 [式 (6.7) ~ 式 (6.9)]
v	速度
$\mathbf{v} \times \mathbf{v}$	矢量叉乘, 结果为矢量
$\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}$	矢量点乘, 结果为标量
V	电压
w	重量
x	笛卡儿坐标参数
X	笛卡儿坐标参数
y	笛卡儿坐标参数
Y	笛卡儿坐标参数
z	笛卡儿坐标参数
Z	笛卡儿坐标参数; 原子数
α	角度; 超越方程 [式 (6.12) ~ 式 (6.16)] 的根
β	阿仑尼乌斯方程 [式 (5.8)] 中温度指数; 无量纲蒸发速率 [见式 (5.39)]; 衍射谱半高宽的仪器修正系数 [见式 (7.4)]; 电场因子增强系数 [见式 (7.31)]
γ	比热比 (c_p/c_v) [见式 (7.17)]
ε	介电常数; 湍流 (k) 动能耗散系数; 辐射系数 [见式 (5.31)]; 应变
ε_0	真空介电常数 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)
η	动态粘度
θ	润湿角; 衍射角 [见式 (7.3)]; 复合物与送粉速率相关的参数 [见式 (8.3)]
λ	热导率; 波长
μ	摩尔质量; 摩擦因数 [见式 (7.10)]
μ_r	相对磁漏能力
ν	泊松比
ξ	扁平颗粒相对于初始颗粒尺寸的扁平率 [见式 (6.2)]

π	常数 ($=3.1415\cdots$)
ρ	密度; 电阻率
σ	斯特凡-玻尔兹曼系数 [$\approx 5.67051 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]; 表面能 [见式 (6.4)]; 应力 [见式 (6.18), 图 7-13 和图 7-25)]; 电导率 [见式 (7.26)]
τ	脉冲时间; 延时
Φ	当量比 [见式 (3.2)]; 工作函数
χ	等压等体积 (对于单原子气体, $5/3$) 的比热率

4. 下标

0	起始
I	断裂模式 (见 7.2.4 节)
II	断裂模式 (见 7.2.4 节)
III	断裂模式 (见 7.2.4 节)
a	活化
app	表观
bb	黑体
c	燃烧; 临界值; 接触 [见式 (6.12)]; 对流 [见式 (6.17)]; 矫顽力 (见图 7-32)
co	涂层
corr	腐蚀
cr	晶体
d	沉积
D	多普勒; 拖拽
def	变形
e	电子
eff	有效性
ev	蒸发
f	形成; 断裂 [见式 (7.13) 和式 (7.25)]
fi	薄膜
fr	边缘
g	气体
h	米勒指数
i	整数; 撞击 [见式 (6.1)]
in	送粉喷嘴
ind	压头
ion	电离
j	整数
k	米勒符号; 动能; 整数
l	米勒符号
L	液体
m	熔化; 母材 [见式 (7.16)]
M	中间值
max	最大值