

冷喷涂技术的最新进展及其在 航空航天领域的应用展望

New Development of Cold Spraying Technology and Its Potential Application in
Aerospace Field

西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室 周 禹 李京龙 李文亚



周 禹

硕士研究生,主要从事材料连接及材料表面工程技术方面的研究。

热喷涂技术广泛地应用于国防、航空航天、燃气轮机和石油化工等工业领域,其最主要用途包括:表面涂层制备、表面强化、机械零部件修复和零部件制造等。由于喷涂过程大多使用高温热源(如高温等离子、电弧、燃烧火焰),喷涂材料通常会被加热到熔融或熔化状态,所以喷涂材料在喷涂过程中不可避免地会发生氧化、相变、分解、化学反应

利用冷喷涂技术来制备航空航天器发动机特殊保护层,制备航空航天武器的特殊功能涂层,通过喷涂成形可以直接制造复杂结构、形状的航空航天部件。这些工程应用仅仅是冷喷涂技术在航空航天领域应用的几个方面,相信在不久的将来,冷喷涂技术一定能够更为广泛地应用于航空航天工业的各个领域。

等现象。然而近年来发展起来并日趋成熟的冷喷涂(Cold Spraying)技术,可以实现低温状态下的涂层沉积,与热喷涂技术相比,冷喷涂过程对粉末粒子的结构几乎无热影响,金属材料沉积过程中的氧化可以忽略。

冷喷涂技术的原理与特点

冷喷涂,又称冷空气动力学喷涂(Cold Gas Dynamic Spraying),它是由热喷涂技术拓展而来的一种新型、先进的表面涂层技术。冷喷涂过程通常通过低温(室温~600℃)、高速(300~1200m/s)的固态粒子与基体发生塑性碰撞,通过产生较

大的塑性变形而沉积于基体表面,从而实现涂层的沉积。因为粒子沉积主要靠粒子的动能来实现,所以冷喷涂又称为动能喷涂(Kinetic Spraying)。该方法的具体工作原理是将高压压缩气体(压力一般为0.7~3.5MPa的空气、N₂、He或者它们的混合气体)导入收缩-扩张型拉伐尔喷嘴,气流经过喷嘴喉部后产生超音速流动,然后将喷涂粒子(粒度一般为5~50μm)沿轴向从喷嘴上游送入,其速度经过整个喷嘴后被加速到约300~1200m/s,形成高速粒子射流,在喷涂距离(约5~50mm)内,与基体碰撞发生剧烈的塑性变形而沉积形成涂层。

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) 可以用来喷涂对温度敏感的材料,如易氧化材料、纳米结构材料等;
- (4) 涂层组织致密,可以保证良好的导电、导热等性能;
- (5) 涂层内残余应力小,且为压应力,有利于沉积厚涂层;
- (6) 粉末可以回收利用;
- (7) 送粉率高,可以实现较高的沉积效率和生产率;
- (8) 如果采用压缩空气,喷涂成本低;
- (9) 噪声小,操作安全。

冷喷涂技术的缺点有:

- (1) 陶瓷或者类似陶瓷类的硬质材料无法制备厚涂层,除非与塑性金属粉末混合;
- (2) 并非任何基体均可制备涂层;
- (3) 耗气量很大;
- (4) He 价格昂贵。

冷喷涂技术的研究现状

冷喷涂技术是 20 世纪 80 年代中期,由前苏联科学院西伯利亚分院理论和应用力学研究所的 Papyrin 和他的同事发现的,到现在已有 20 多年的历史。在这 20 多年里,冷喷涂技术从 1990 年概念的正式提出,到 1994 年、1995 年先后获得美国专利和欧洲专利,直到 2000 年加拿大国际热喷涂会议首次对冷喷涂技术的发展与应用设立了专门讨论组,冷喷涂技术才在国际上引起广泛关注,除前苏联科学院西伯利亚分院的理论与应用力学研究所外,美国、德国、英国、加拿大、法国、中国、日本及韩国等国家的部分大学、研究所和企业研究机构对该工艺给予了极大的关注,并开始了相关的基础与应用研

究,这一方面得益于政府投资,另一方面也得益于企业资助。

在美国,早期由 Papyrin 引入的冷喷涂技术主要是在企业联合体(CRADA)资助下进行研究开发的,政府资助相对较少。后来,ASB Industries 又组织 NASA GRC, Pratt & Whitney 以及很多航空企业进行了航空航天领域中的应用研究。另外,美国材料学会热喷涂专业委员会(ASM TSS)也成功举办了 3 次冷喷涂专题会议。

在欧洲,德国联邦武装大学(Helmut Schmidt University)一直进行着冷喷涂研究,在与德国 Linde Gas 公司等合作下,成立了冷气技术公司(Cold Gas Technology, CGT),出售商品化冷喷涂系统,目前在世界各地已售出 30 多套。法国也于 2006 年在巴黎矿业大学成立了一个冷喷涂俱乐部(COLD SPRAY CLUB),每年召开讨论会,交流冷喷涂技术的研究与应用进展。韩国也在政府资助下成立了冷喷涂国家实验室。自 2000 年起,国际期刊以及国际会议相关论文发表数量逐年增加,目前 SCI 共收录 180 篇左右,还有一些待出版英语源刊论文待收录。

近几年来,国内一些大学和科研机构也对冷喷涂技术进行了深入的研究,并取得了一定的成果。国内较

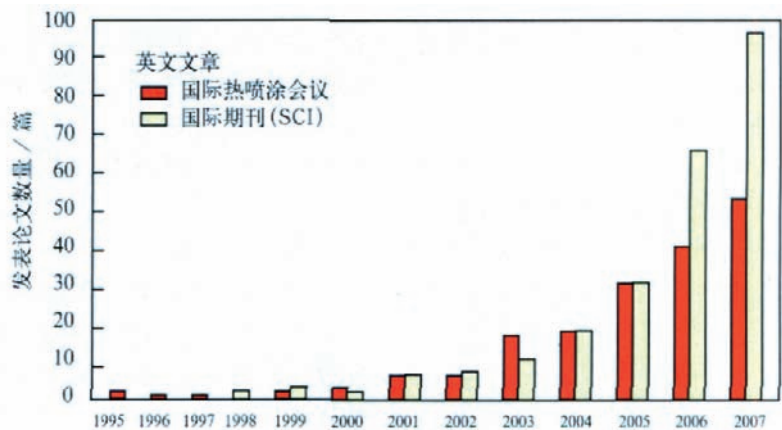
早从事冷喷涂技术研究的机构主要有西安交通大学的李长久课题组、中科院金属研究所的熊天英小组、大连理工大学王晓放小组。国内其他一些机构也已开始从事冷喷涂技术的研究与开发工作,如宝山钢铁股份有限公司技术中心前沿技术研究所张俊宝小组、哈尔滨焊接研究所王志平小组、725 所(青岛)王洪任小组、北京科技大学周香林小组。

冷喷涂技术的最新进展

1 冷喷涂设备

(1) 随着冷喷涂技术研究的深入,近几年来冷喷涂设备也得到了飞速的发展,德国、俄罗斯、加拿大等国家都相继推出商用冷喷涂设备,这为冷喷涂技术从实验室研究走向实际生产提供了必要的条件,如德国 CGT 公司早期开发的 Kinetic-3000 型计算机控制冷喷涂系统,已在国际上得到认可。2006 年 CGT 公司又推出了改进的 Kinetic-4000 型冷喷涂系统,该系统一方面可以实现送粉气体的预热,提高粒子的温度与变形能力,从而进一步提高涂层质量,提高生产效率;另一方面可实现难冷喷涂材料(如金属陶瓷)的涂层制备。

(2) 俄罗斯 Obninsk Center for Powder Spraying、波兰 Metal Forming Institute、加拿大



国际热喷涂会议和期刊中的冷喷涂相关论文数不完全统计

University of Windsor 联合开发便携式冷喷涂系统(DYMET 系列),该系统的主要特点是采用小于 1MPa (一般为 0.7MPa) 的压缩空气作为加速气体,从而大大降低了成本,但该系统不适合大面积喷涂作业,主要适用于修补或小面积喷涂。另外,美国 Inovati 公司也推出了动能金属化(KINETIC METALLIZATION)系统(KM-CDS 系列),该系统的主要特点是通过特殊设计的直通喷嘴,采用低压(小于 1MPa) He 实现金属陶瓷(如 WC-Co)涂层的制备。除了这几种已经商业化的冷喷涂设备外,韩国 Taekwang Technology 有限公司通过改进 Kinetic 3000 系统,推出了 DPD-2004 计算机控制冷喷涂系统,该系统加入了送粉气的加热器,从而实现了难冷喷涂材料(如 WC-Co)涂层的制备。法国 LERMPS 实验室基于喷嘴优化设计开发出的内孔冷喷涂系统,也可以制备出高质量涂层。

(3) 在国内,一些大学和科研机构也研制了相应的冷喷涂系统,开发了一些能够应用于某些特殊场合、具有某些特殊性能的冷喷涂设备。比如西安交通大学自主开发出的 CS-2000 冷喷涂系统,通过特殊的设计,开发出借助真空室来完成喷涂的改良的真空冷喷涂设备,该设备可喷涂亚微米、纳米陶瓷厚涂层,但这种冷喷涂陶瓷粒子的结合机理尚有待进一步阐明。

2 冷喷涂层及其应用

冷喷涂技术的逐渐成熟,不但推动了冷喷涂系统设备的研究与开发,还促进了可喷涂涂层材料的开发与涂层应用的研究。冷喷涂层这几年得到了广泛的研究,其应用潜力十分巨大。

(1) 保护层。

• 耐腐蚀涂层。

冷喷涂能够制备性能优良的防

腐蚀涂层。与多孔、易氧化的传统热喷涂保护层(Zn、Al 及它们的合金)相比,冷喷涂保护层具有比腐蚀金属电阻高、使用寿命长、涂层制备费用低的特点。同时,冷喷涂更易为在恶劣环境中使用的钢材沉积阴极金属(如 Ti、Ni、不锈钢等)。

• 耐高温涂层。

在火箭发动机中,典型的高温保护层包括: MCrAlY 高温保护层、TBCs 热障涂层粘合层、Cu-Cr-Al 抗氧化保护层以及在高温环境中具有高导热和导电率的 Cu-Cr-Nb 涂层。TBCs 热障涂层通常用于保护火箭发动机中的热端金属部件,使它与高温燃气隔绝,最终使热端金属部件表面温度降低 100 ~ 300℃,从而增加金属部件的耐久能力,提高发动机的性能。为了提高 TBCs 的使用寿命,通常可以通过冷喷涂技术在 TBCs 涂层外再制备一层具有一定厚度的纳米 MCrAlY 涂层。

• 耐磨涂层。

这类应用包括耐磨材料(如金属陶瓷、金属基复合材料)和减磨合金的冷喷涂涂层。这些涂层将显著提高工业部件的耐磨性能。

(2) 功能涂层。

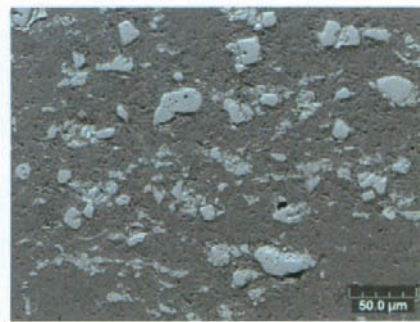
随着冷喷涂技术研究的深入,一些功能涂层材料也得到了一定程度的应用,例如非晶涂层、生物材料和复合材料涂层、金属间化合物涂层、纳米结构涂层、光催化 TiO₂ 涂层和热塑性材料沉积物等。然而这类涂层并不仅限于上述材料,另外一些功能涂层在不久的将来也会为人们所认识。

(3) 喷涂成型。

冷喷涂具有直接制造 Ti 部件的巨大潜力,Ti、Ti 合金和其他工程材料(如 Al 及 Al 合金、Cu 及 Cu 合金、Ni 及 Ni 合金)都可以通过喷涂成型来为大多数工业应用领域制造近净成形部件。

(4) 零件修复。

冷喷涂不仅可以直接制造工业零部件,还可以用于工业零部件的快速工具修复。利用 Al 及其合金涂层修复航天飞机固体燃料火箭推进器、修复飞行器结构中的部件、修复密封外壳燃气轮机的研究正在进行中。



冷喷涂制备金属基复合材料照片

冷喷涂技术在航空航天领域的应用前景

冷喷涂技术作为一种先进的表面工程与加工工艺已受到各个行业的广泛关注。目前,ASB Industries 已经成功地将冷喷涂技术推广到实际工程的应用中,仅在航空航天工业领域就有数项实际应用,并且大多数都拥有专利。例如,Pratt & Whitney Space Propulsion 与 ASB Industries 合作,改进了设计的 RL60 火箭发动机不锈钢燃料出口总管的制造工艺,通过引入冷喷涂技术,成功地在燃料出口总管表面制备了一层铜热管涂层,提高了发动机的性能。

鉴于冷喷涂技术上述的优点及所制备涂层的组织与性能特点,冷喷涂技术在制备复杂结构部件上也有着广阔的应用空间,冷喷涂技术可用来制备航空航天器发动机特殊保护层,制备航空航天武器的特殊功能涂层,通过喷涂成形直接制造复杂结构、形状的航空航天部件。相信在不久的将来,冷喷涂技术一定能够更为广泛地应用于航空航天工业的各个领域。(责编 蔺蓝)