

关于热喷涂工艺在铸造领域的应用的探索

叶茂林 闫登坤 王云飞
新兴铸管股份有限公司 北京 100020

摘要：热喷涂是一种表面强化技术，利用热源将喷涂材料沉积形成涂层的方法，从而获得更优异的性能和外观，从而实现材料、能源节约的目的。铸造产品采用喷涂技术，实现寿命延长和高效修复，从而实现成本的降低，并通过复合涂层，推动铸造产品进入更广泛的应用场景。

关键词：铸造；热喷涂；材料；能源节约；复合涂层

1 热喷涂与铸造简介

热喷涂是一种表面强化技术，是复合材料和表面工程技术应用的重要组成部分，利用热源（例如电弧、等离子喷涂或燃烧火焰等）将喷涂材料加热至熔化或半熔化状态，喷射沉积到经过预处理的基体表面沉积形成涂层的方法，这些特殊性能可以提高产品、模具表面质量，从而获得更优异的性能和外观，部分喷涂可达到防腐、耐磨、减摩、抗高温、抗氧化、隔热、绝缘、导电、防微波辐射等一系列功能，实现材料、能源节约的目的。

铸造是通过熔融金属来制造各种形状和尺寸的零件或产品的技术，铸造由于自身工艺、模具磨损等，需要采用喷涂技术，在腐蚀、磨损部位、缺陷部位喷涂特殊性能的涂层，实现寿命延长和高效修复，从而实现成本的降低。国际公认各国仅腐蚀损失占国内生产总值（GDP）的3%—5%，优异的喷涂可以减缓各种腐蚀。此外，通过喷涂产生的复合涂层，推动铸造产品进入更广泛的应用场景。有数据统计表明，单台先进的航空发动机核心主要为铸造产品，但需要热喷涂的零部件竟然超过5000个，其中热障涂层已经成为高性能航空的关键技术之一；优异的热喷技术，为铸造产品的应用开拓更广阔的空间。

2 热喷涂历史

热喷涂技术最早于1910年由瑞士发明，1943年美METCO首次出版《金属喷镀》手册，中国热喷涂技术，从建国不久的50年代，上海已组建国内专业化喷涂厂，

作者简介：叶茂林（1975-），男，博士，主要研究方向为经济学、铸造冶金工艺。

闫登坤（1973-），男，学士，高级工程师，主要研究方向为铸造设计和制备、涂层工艺

王云飞（1980-），男，学士，工程师，主要研究方向为铸造设计和制备、涂层工艺

并发展了制氧乙炔焰丝喷丝材电弧喷涂；60年研发了离子喷涂；70年代中国国内已出现品种和型号齐全的喷涂设备和材料，1981年全国热喷涂会议后，并形成跨地区、行业、部门的推广应用热喷涂技术体系。

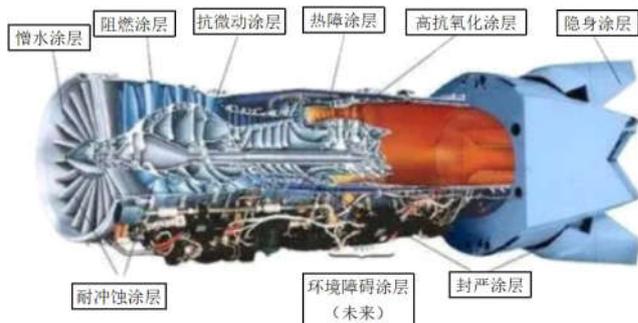


图1 航空发动机涂层应用

3 常见热喷涂技术

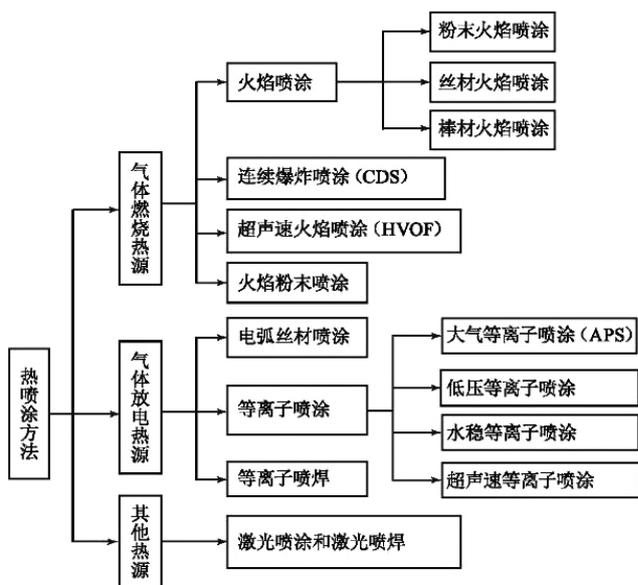


图2 热喷涂方法图

3.1 火焰类喷涂，利用气体燃烧产生的高温熔化喷涂材料，从喷枪中喷出至铸造等产品上，形成保护涂层。

按材质形态可分为丝材、粉末、棒材火焰喷涂等；按焰流形态可分为普通、超音速火焰喷涂以及气体爆燃式喷涂等。

3.1.1 常规火焰，喷涂操作简单，不需要复杂仪器，对环境要求不高，不过在喷涂效果上没有其他热喷涂技术有效，例如塑料类涂层。

3.1.2 超音速火焰喷涂：采用高压反应腔和喷射管，反应腔燃烧后产生的高压火焰，通过Laval管的膨胀管形成高压射流，喷嘴外燃烧时粉末被高压气体送入火焰中，通过压缩气体将火焰压缩、加速，从而将熔融的粉末喷向底材，火焰喷涂对于小面积修复是经济的。

3.2 电弧喷涂：包括电弧喷涂和等离子喷涂；电弧类，将金属材料作为两个电极，然后通电高温在电极两端产生电弧，融化喷涂材料，高压气体将材料喷涂到铸件表面。工艺简单，成本较小，喷涂效果较好，材料需丝状，其中新兴铸管电弧喷涂技术得到较好的应用。

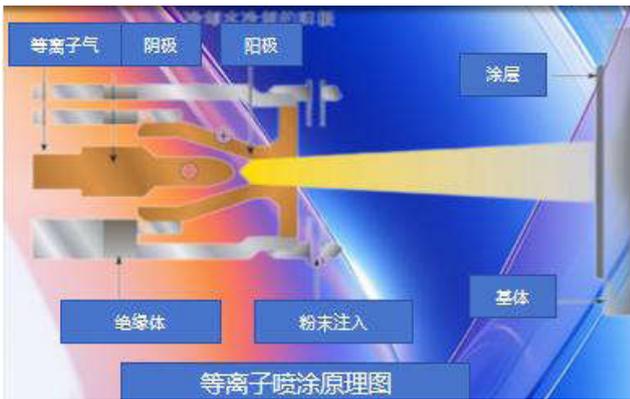


图3 等离子原理涂

3.3 电热法，包括感应加热喷涂、电容放电喷涂、电爆喷涂；其中电容采用的是涡流加热后用高压气体雾化并加速地喷涂。

3.4 激光类：激光喷涂，重点在难熔化材料。

4 常见热喷涂应用

热喷涂涂层从金属到难熔金属、陶瓷及其混合物，性能各异，可以提供耐磨和润滑、热保护、抗氧化腐蚀、导电和电绝缘、催化、复合材料制备以及零部件修复等多种功能。

4.1 防腐涂层的应用，金属腐蚀目前是损失最大的一种。锌、铝和锌铝伪合金涂层具备的钝化和阴极保护、自我修复等使长效防腐十分有效，金属涂料中有NiCr、NiAl、NiAlCrY、WCoCr等。氧化物主要为涂层ZrSiO₂、MgO—ZrO₂、Al₂O₃；抗熔融和耐腐蚀能力的MgO—ZrO₂；涂层抗气蚀的NiCrBSi和WC。例如常规铸钢、铸铁等铸造产品单独采用油漆保护时间短，如果喷

锌、喷铝防腐年限可达30年以上。如采用锌铝涂层外加封闭涂层，则防腐年限可达50年甚至更长。特殊环境，如水利项目铸造产品，长期接触潮湿的水区域，甚至污水、海水等都需要采取针对性措施。高温区域的产品如果采用耐高温氧化，同样可以大幅度提高阀门的寿命。

4.2 隔热涂层的应用，主要是氧化物，如氧化铝、钙、镁，以及CeO₂、氧化锆，上述又称热障涂层。同时可提高涂层与基体的结合力，常用NiAl、NiCr等作为结合层。其中汽车汽缸内衬，排气位置采用热障涂层，活塞环、曲轴等采用耐磨；阀门喷涂陶瓷。正式金属陶瓷梯度涂层的落实，进一步提高了涂层的热冲击性能。

4.3 耐磨涂层的应用，耐磨损一般具有高硬度、低气孔率、坚韧、结合力好等特点，为此是热喷涂应用范围最广的领域，例如，铸造的汽轮叶片，喷涂上高度防水蚀材料，国际市场上单价卖到2—3万欧元，价值升高到一台奥迪车的价格。常规材料有钴基、镍基、碳化物、氧化物等。其中碳化钨、氧化铝耐磨高密封；氧化铝、二氧化钛耐磨、消静电。

4.4 喷涂成型与修复，一般采用热喷涂技术制作异型和复杂形状的部件，经济、方便，实际是一种新型3D打印技术。例如采用石墨模型，在制造铸造用钨钼坩埚等。当磨损或机加工超差，采用热喷涂实现新的表面，形成新的耐磨、抗蚀层。例如油田、燃气等大型阀门，阀杆等多因磨损尺寸不足，采用热喷涂可以恢复尺寸，大幅度降低周期和成本。

4.5 关键位置材料替代

部分铸造阀门，一般是阀板的边缘接触，全部采用不锈钢等成本昂贵，例如，铸铁阀门，在其表面喷涂0Cr、1Cr18Ni9Ti或等不锈钢材料，大幅度降低不锈钢用量。

4.6 激光熔覆技术

激光熔覆加工技术，目前适用范围非常广泛，冶金矿山、石化、运输、电力、航空、机床等几乎整个行业。

4.7 差异化对热喷涂层的应用的借鉴

部分厂家，在其他产品的涂层中不断进步，热喷涂具有先天优势，可以迅速的改进配比借鉴运用。例如新日铁ZAM涂层，Zn—6%Al—3%Mg，已广泛应用于建筑行业、机电行业、高速公路防护栏、汽车行业、电力行业等。SuperDyma涂层：Zn—11%Al—3%Mg—0.2%Si，据称具有超强耐蚀性，优异的耐黑变性和涂装性。赛乐米塔尔Magnelis涂层，Zn—3.5%Al—3%Mg，针对含Cl离子和氨气环境，具有良好耐穿孔和耐膜下腐蚀性，优异的切边保护性。蒂森克虏伯，ZMEcoprotect涂层成分：Zn—1%Mg，容易获得更好的表面质量；浦项制铁，

PosMAC涂层, 铝2.5%, 镁3%耐蚀性高出5倍。他山之石可以攻克玉, 国外不断研发的涂层, 对铸造低成本高性能仍有较大的借鉴意义。

热喷涂应用数量仍以中小企业为主, 但目前大型企业不断采用高端制造应用及全机械化喷涂正不断涌入。热喷涂作为防腐、耐磨和新型材料制造应用正逐渐走向舞台中央。材料修复依然成为一个核心要素发挥着重要作用。材料研发和采用应用性研发仍然具有重要的意义, 例如锌铝喷涂的断丝问题等仍然需待不断地解决。应用方面仍存在部分问题, 水平高低不齐, 不分厂家致力于建设具有全球影响力的热喷涂龙头企业。

结束语

铸造做为工业基础, 伴随时代进步正发挥越来越重要的作用, 随着新型材料和技术的涌现, 将促进铸造迈向新的起点。热喷涂技术是一种重要的表面处理技术, 其市场规模庞大且不断增长趋势, 伴随社会的发展和

新材料需求的增加, 铸造在热喷涂技术上的应用将具有广阔的前景, 同时随着高性能材料的应用、智能化喷涂、环保型喷涂和定制化喷涂等方面的发展, 技术创新和研发正在不断变化以满足市场的需求。

参考文献

- [1]《材料保护》喷涂及激光熔覆制备难熔金属涂层的研究现状2023-June崔焱、王守勇等
- [2]《热喷涂技术在航空发动机上的应用》热喷涂技术在航空发动机上的应用,2016-December段绪海、王学连
- [3]《浙江省科技厅3D打印世界》基于超音速激光沉积的金属增材制造技术基础研究,2016-December姚建华
- [4]《铸铁材料在水环境中的腐蚀研究现状[J]》.全面腐蚀控制,2009.师素粉,夏兰廷,李宏战.
- [5]《等离子喷涂陶瓷涂层的耐蚀性与抗污性能研究》防爆电机,2010王振凯.