

热喷涂简介

May 2022



Contents

1 引言	4
1.1 表面特性	4
1.2 涂层工艺	5
2 热喷涂涂层	6
2.1 定义	6
2.2 基体材料	6
2.3 喷涂材料	7
2.4 热喷涂工艺	8
2.5 涂层结构	13
2.6 涂层性能	14
2.7 后加工处理	14
2.8 涂层特性	15
3 技术应用	16
3.1 生产型应用	17
3.2 抢修及修复应用	20
4 小结	21
5 附录	22
5.1 对照表	22
5.2 参考文献	23

1 引言

当今的工业领域，都打着“更好、更快、更便宜”这一既常见又有效的口号，看起来似乎生产的需求在不断增长。但是苛刻的要求和恶劣的工矿环境经常导致装备过早失效。

如图1a所示的是一个在约千小时实际运行后，已经完全磨损的一个水斗式水轮机喷嘴针阀。如果该使用寿命令人无法接受的话，那么只能是：要么整个元件用一种更抗磨损的材料制造，要么必须妥善保护接触面而减少磨损。从成本方面考虑，通常会选择后者。这就产生了表面涂层的应用。至于是将涂层覆盖整个部件、还是应用于易侵蚀的表面，关键还要看哪一种涂层更能满足需要。

1.1 表面特性

一个工件必需的表面性能主要由它的运行环境决定，不时变换。

表面性能的范围包括足够的耐磨损、耐腐蚀、热绝缘、电绝缘，甚至包括涂层应用后，外观上能够符合美学标准。

事实上，很少有元件只承受单一类型的运行条件。通常呈现的是多种条件的组合：例如，磨损与高热应力相结合。耐磨损和耐腐蚀是表面涂层必须承受的，也是最常遇到的工作环境。

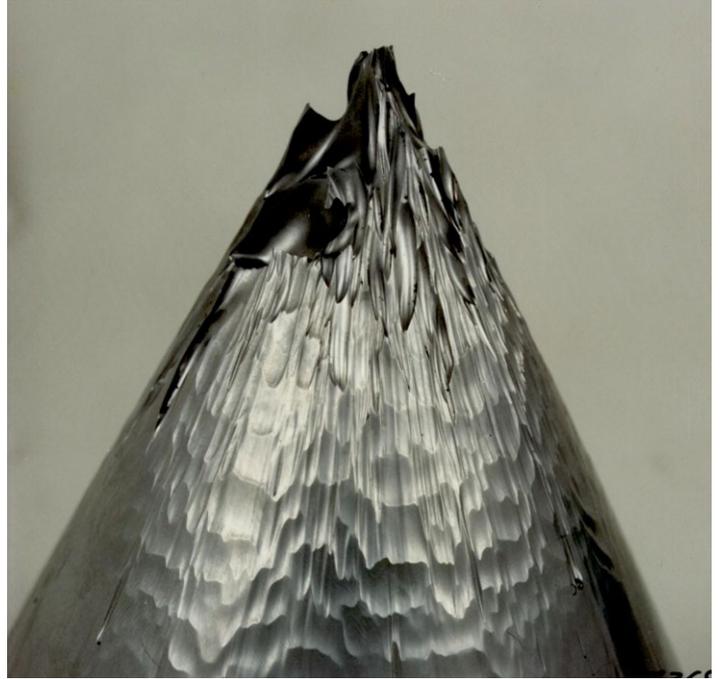


图1a - 电镀铬，水斗式水轮机13/4钢喷嘴针阀运行后图片

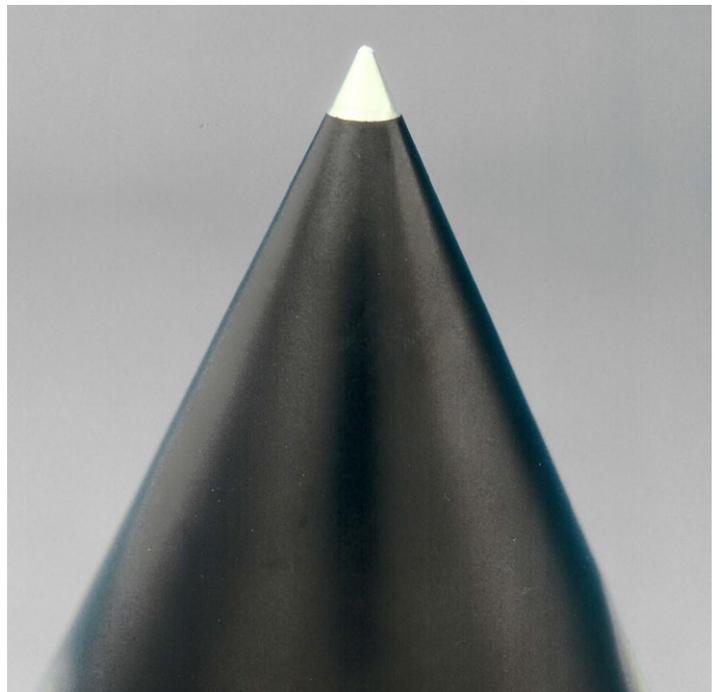


图1b - 喷嘴针阀喷涂氧化铬涂层，耐磨损

1.2 涂层工艺

通常涂层应用有多种工艺，涂层材料也有无数种。为相关的涂层应用选择正确组合，通常需要专家的专业知识。

表1列出了主要的涂层工艺原理、典型的涂层厚度、常用的涂层材料及应用实例。有些工艺对某一特定的涂层材料不适用；同时，不是所有的方法都能达到所需要的涂层厚度。除此之外，有些工艺必须的设备可能会非常复杂，因而也就非常昂贵。使用成本分析的方法能够确定哪一种涂层是切实可行的解决方案。目前的法规规定对各种涂层工艺是否符合生态标准必须进行分别测定，因为并不是所有的方法对环境的影响都相同。

涂层工艺	典型涂层厚度	涂层材料	特性	实例
PVD	1 – 5 μm (40 – 200 μin)	钛基硬质合金	耐磨损	机床
CVD	1 – 50 μm (40 – 2000 μin)	碳化硅	耐磨损	纤维涂层
培烧聚合物涂层	1 – 10 μm (40 – 400 μin)	聚合物	耐腐蚀,装饰性	汽车
热喷涂	0.04 – 3 mm (0.0015 – 0.12 in)	陶瓷和金属合金	耐磨损,耐腐蚀	轴承
电镀硬铬	10 – 100 μm (40 – 4000 μin)	铬	耐磨损	辊子
堆焊	0.5 – 5 mm (0.02 – 0.2 in)	钢、硬合金	耐磨损	阀门
镀锌	1 – 5 μm (40 – 200 μin)	锌	耐腐蚀	钢板
钎焊	10 – 100 μm (40 – 4000 μin)	镍-铬-铜-硅合金	高硬度, 高密度表面	轴

表1a – 主要的涂层工艺及特性

热喷涂工艺能够最广泛地选择涂层材料、涂层厚度和可达到的涂层特性。

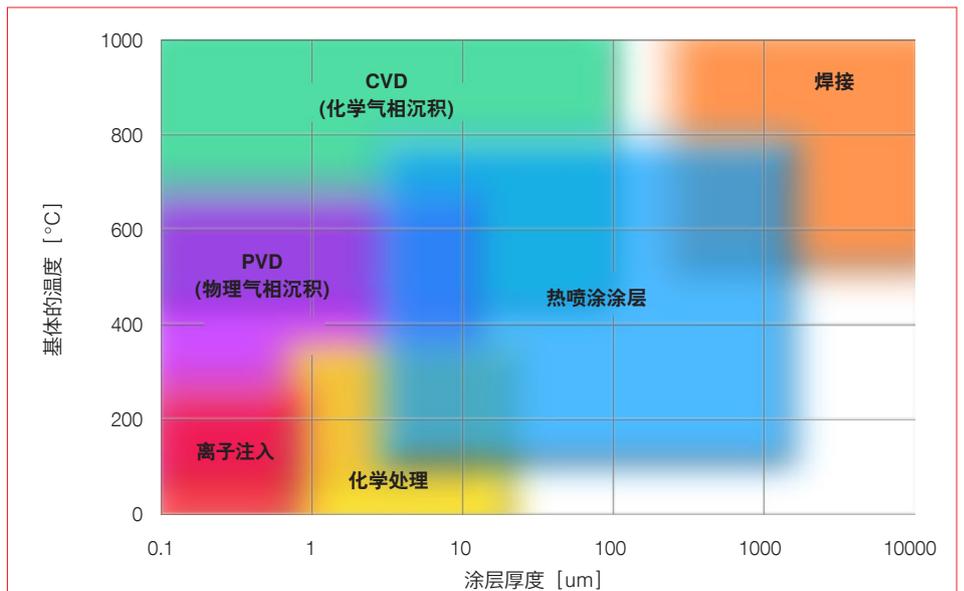


表1b – 涂层工艺对照表

2 热喷涂涂层

2.1 定义

按照德国工业标准 DIN 657 [1] *，对热喷涂涂层的定义是“...这种涂层的应用是通过特殊的设备（或系统）将熔化的或熔融的喷涂材料高速喷射到一个干净的、预处理过的工件表面上...”该定义其实并没有完全描述热喷涂的工艺过程。

图2展示了热喷涂的基本原理。首先涂层材料在加热源中熔化。然后这一液态或熔融的涂层材料得到工艺气体的推动，喷涂到一个基体材料上，最后固化成一个坚硬的固体层。

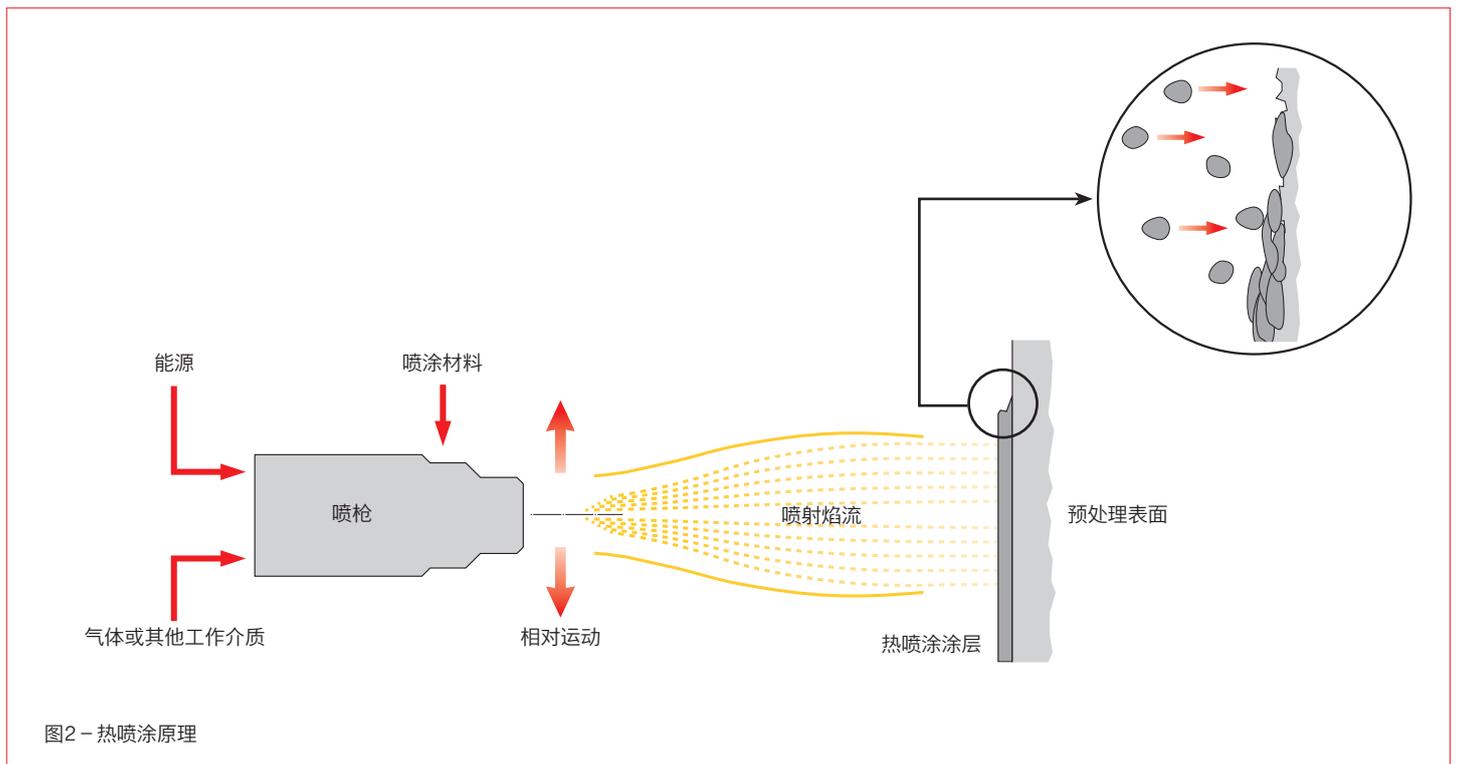
2.2 基体材料

合适的基体指的是能承受用喷砂方法毛化表面的材料，且表面硬度不能超过55HRC。特殊的工艺技术要求基体具有更高的表面硬度。因为涂层粘附于基体上主要通过机械结合，所以小心谨慎地清洁表面并对表面进行预处理是极其重要的。

通过化学或机械的方法去除表面杂质后，通常使用一种喷砂的方法毛化材料表面。这样就通过增加表面自由能而激活了表面，同时增大了喷涂微粒粘附的表面面积。

该液态或熔融的涂层微粒高速撞击基体表面。这样就使得微粒发生形变，并且像“薄煎饼”一样分布在基体表面。

* 译自德文文本。



高温颗粒的热量传递到温度更低的基材材料。当颗粒冷缩和凝固的时候，它们就粘附在基体材料粗糙的表面。因此涂层的粘附力就是基于机械“相互嵌合”。这种方法在图2和图3中用图解的方式清晰地展现。由于涂层颗粒和基体材料之间的扩散作用产生的冶金结合强度非常微小，有关结合机理（铝除外）的讨论可以忽略不计。

使表面粗化通常是用干燥的金刚砂进行喷砂处理。另外，一些应用工艺需要用到其他介质，诸如冷淬铁、钢砂或硅化合物。除了喷粒的类型，其他重要的因素包括喷砂颗粒的尺寸、形状、喷砂的角度和压力，以及喷砂介质的纯度。

2.3 喷涂材料

原则上，当熔融时不会分解的任何材料都能被用作热喷涂涂层材料。喷涂材料可以是线状或粉末状，这取决于热喷涂工艺类型。

在表2中，列出了一些常用的材料分类，并列出了典型实例、特性以及应用范例。为某一特定应用程序选择合适的涂层材料需要有关操作环境的专门知识，以及有关材料的知识。

除了物理特性，例如：膨胀系数、密度、导热性和熔点之外，附加因素，诸如颗粒形状、粒子大小分布和粉末材料的制造过程（例如：团聚、烧结、混合）都会影响涂层性能。正因为大多数喷涂材料像合金或混合物一样容易获得，这会产生无限的材料组合选择。但只有多年的使用经验和广博的专业技术，才能做出正确的选择。

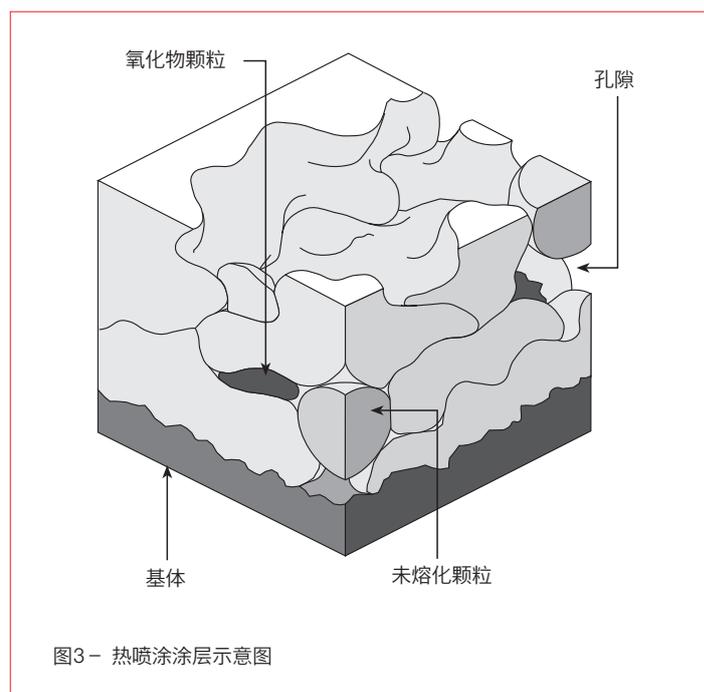


图3 - 热喷涂涂层示意图

材料种类	实例成份	特性	实例应用
纯合金	锌	腐蚀防护	桥梁建筑
自熔合金	铁-镍-铜-硅	高硬度，易熔，最小孔隙率	转轴，轴承
钢	铁-13%铬	低成本，耐磨	修复用
金属铬铝钇	镍铬铝钇	耐高温，耐腐蚀	燃气涡轮叶片
镍-石墨	镍-25%碳	耐腐蚀	压缩机进风管道
氧化物	氧化铝	抗氧化，高硬度	纺织工业
碳化物	碳化物-12%钴	耐磨损	转轴

表2 - 热喷涂粉末通用分类

2.4 热喷涂工艺

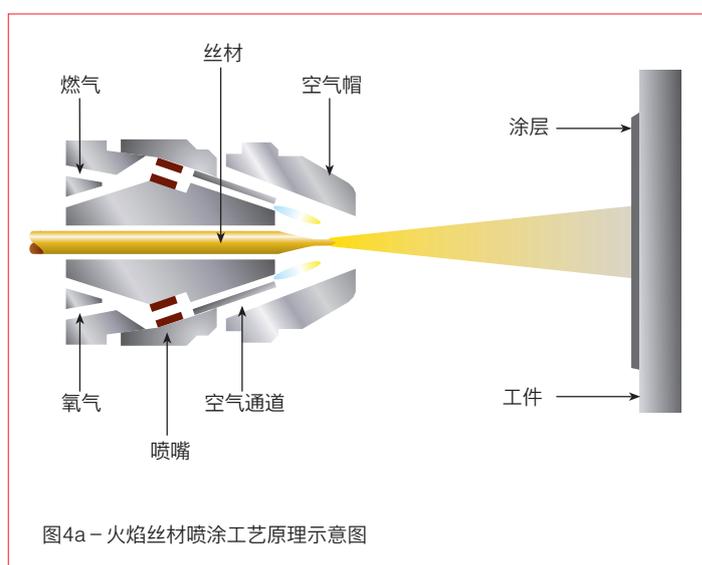
有几种不同工艺能够应用于热喷涂^[2]。具体如下所示：

- 传统火焰喷涂
- 电弧丝材喷涂
- 等离子喷涂
- 高速火焰喷涂 (HVOF)

2.4.1 传统火焰喷涂工艺

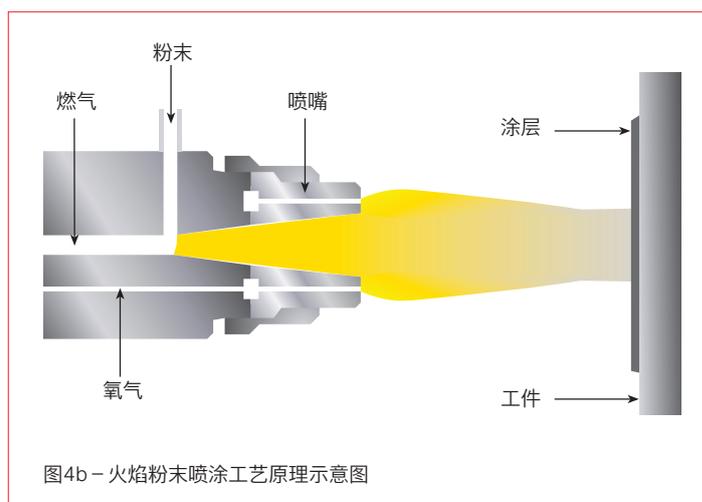
2.4.1.1 火焰丝材喷涂

火焰线材喷涂工艺，是用氧气和燃气混合燃烧火焰将丝材材料熔化进行喷涂。燃气可以使用乙炔、丙烷或者氢气。丝材被送入火焰中心，丝材熔化后经压缩空气雾化成细微颗粒，被直接喷向工件表面。



2.4.1.2 火焰粉末喷涂

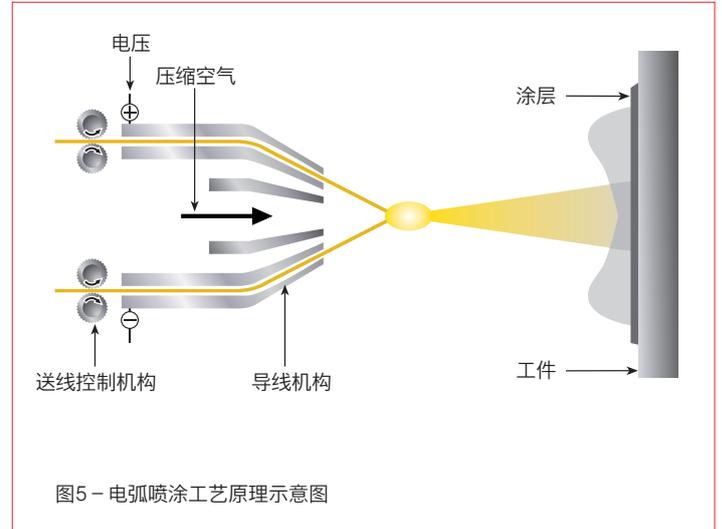
火焰粉末喷涂工艺是基于与火焰丝材工艺相同的操作原理，不同之处在于前者涂层材料使用的是喷涂粉末。因此火焰粉末喷涂在材质选择方面有更多选择，因为不是所有的材质都能被做成丝材。



2.4.2 电弧丝材喷涂

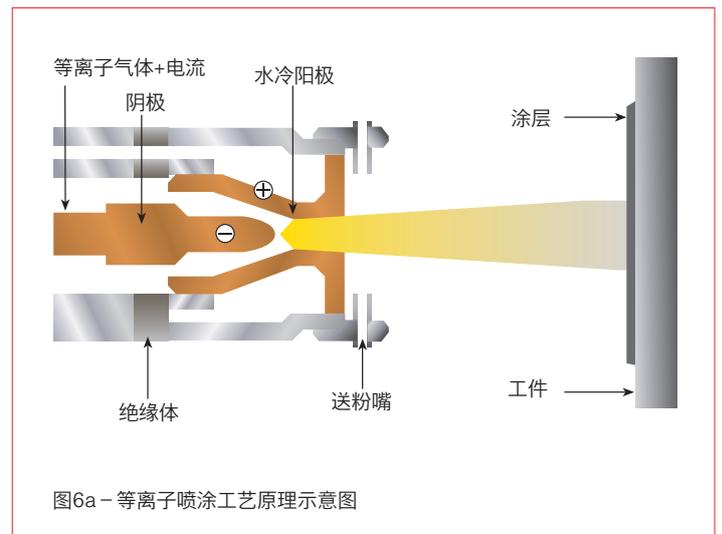
电弧喷涂，是将各自带有正负电荷、通常相同化学成分的两条金属丝接触产生电弧，瞬间产生高热将金属丝材尖端熔化。

压缩空气将熔融的喷涂材料雾化，然后加速喷射到基材表面。喷涂的速度通过调节适当的丝材给进量进行调整，因此才能保持电弧恒定。



2.4.3 等离子喷涂

等离子喷涂的基本原理，如示意图6a所示。在一个阳极和一个阴极之间点火，产生高频率电弧。气体（如：氦、氢、氮或其混合气体）流经电极之间被电离，由此产生几厘米长的等离子弧。等离子火焰中心温度可高达16000 K。喷涂材料从枪喷嘴外以粉末状注入等离子焰流，被熔化，最后被气体加速并撞击基材表面形成涂层。



对于一些特殊的喷涂工艺，有另一种自动控制的低压环境下进行的等离子喷涂。与在大气中喷涂（大气等离子喷涂，或称APS）相比，真空等离子喷涂熔融的颗粒氧化物极少，其产生的涂层品质更佳^[3]。



2.4.4 高速氧燃料火焰喷涂 (HVOF)

高速氧燃料火焰喷涂 (HVOF) 工艺相对来说是最近才进入热喷涂工艺系列。因为该工艺使用的是超音速喷枪 (这点有别于传统火焰喷涂), 所以颗粒撞击基材表面的速度要快得多, 这样就提高了涂层性能。该工艺的基本原理与传统火焰喷涂类似, 差别在于其喷枪出口处的气流扩展 (如图7所示)。高速火焰喷涂 (HVOF) 可以使用的燃气有丙烷、丙烯、乙炔、氢气和天然气, 以及煤油等液体燃料。

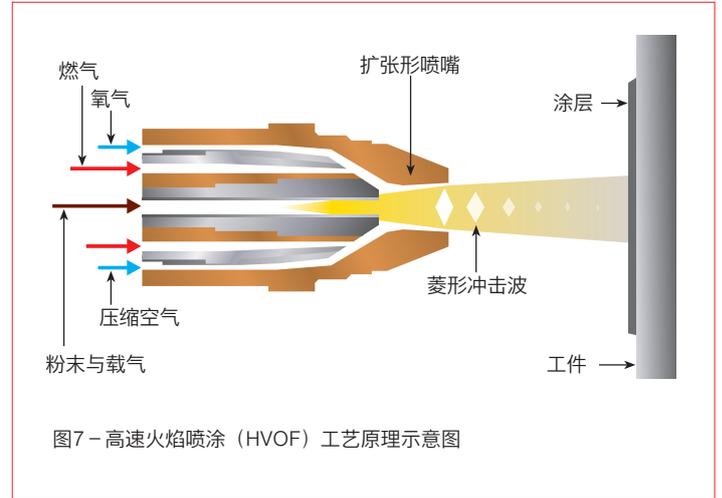


图7 - 高速火焰喷涂 (HVOF) 工艺原理示意图

2.4.5 工艺对比

前面所讨论的各种不同的涂层工艺, 在对喷涂粒子所供给的热能和动能方面, 有着根本的区别。热能是由可达到的焰流温度决定的, 而喷涂粒子的动能是高压气体流速提供的。喷涂工艺的不同能量对比如图8所示。等离子喷涂的高温尤其适合于高熔点的材料, 例如: 陶瓷。

高速火焰喷涂 (HVOF) 工艺过程具有高动能及相对比较低的热能特性, 这对于涂层的高性能有非常积极的影响, 并且有利于诸如碳化钨等材料的喷涂。各种不同工艺的对比所关注的焦点在于工艺与其产生的涂层之间的关系。表3列举出了一些重要的涂层特性, 并按照材料类别进行分类。

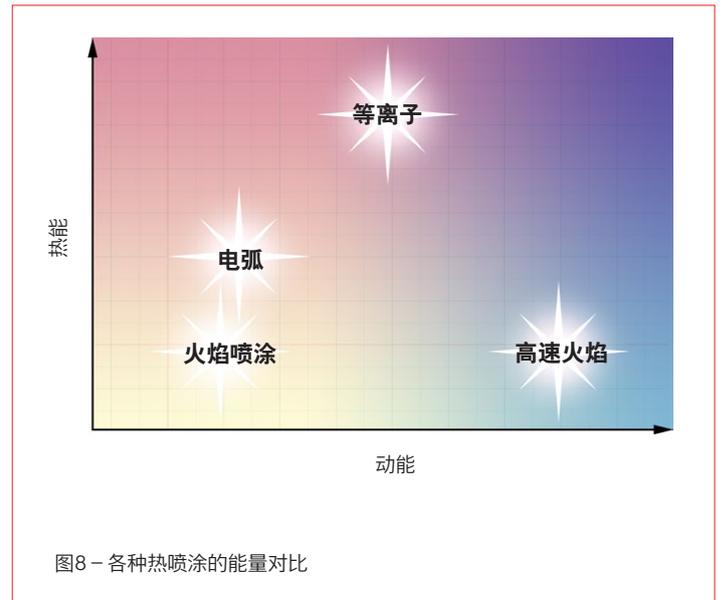


图8 - 各种热喷涂的能量对比

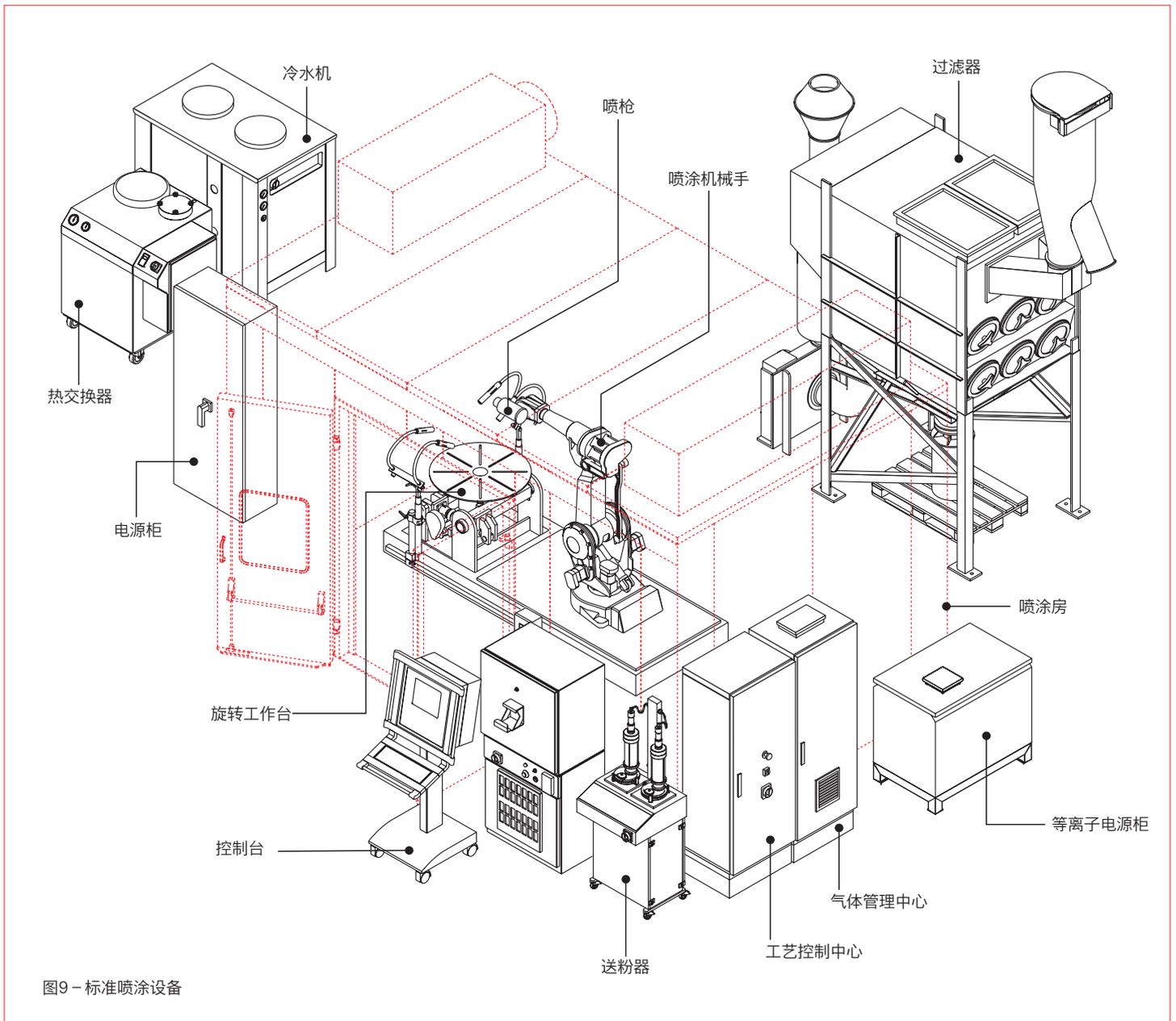
特性	涂层类型	火焰粉末	高速火焰	电弧丝材	等离子
气体温度	[°C]	3000	2600 – 3000	4000 (电弧)	12000 – 16000
	[°F]	5400	4700 – 5400	7200 (电弧)	21500 – 29000
喷涂速率	[kg/h]	2 – 6	1 – 9	10 – 25	2 – 10
	[lb/h]	4.5 – 13	2 – 20	22 – 55	4.5 – 22
粒子速度	[m/s]	≤ 50	≤ 700	~ 150	≤ 450
	[ft/s]	≤ 160	≤ 2300	~ 500	≤ 1500
结合强度	[MPa] 铁合金	14 – 21	48 – 62	28 – 41	21 – 34
	[psi]	2000 – 3000	7000 – 9000	4000 – 6000	3000 – 5000
	[MPa] 有色金属	7 – 34	48 – 62	14 – 48	14 – 48
	[psi]	2000 – 5000	7000 – 9000	4000 – 7000	4000 – 7000
	[MPa] 自熔合金	83+ (合并的)	70 – 80	15 – 50	—
	[psi]	12000+ (合并的)	10000 – 11500	2200 – 7200	—
	[MPa] 陶瓷	14 – 34	—	—	21 – 41
	[psi]	4000 – 5000	—	—	3000 – 6000
	[MPa] 碳化物	34 – 48	83+	—	55 – 69
	[psi]	5000 – 7000	12000+	—	8000 – 10000
涂层厚度	[mm] 铁合金	0.05 – 2.0	0.05 – 2.5	0.1 – 2.5	0.4 – 2.5
	[in]	0.002 – 0.080	0.002 – 0.100	0.004 – 0.100	0.015 – 0.100
	[mm] 有色金属	0.05 – 5.0	0.05 – 2.5	0.1 – 5.0	0.05 – 5.0
	[in]	0.002 – 0.200	0.002 – 0.100	0.004 – 0.200	0.002 – 0.200
	[mm] 自熔合金	0.15 – 2.5	0.05 – 2.5	—	—
	[in]	0.006 – 0.100	0.002 – 0.100	—	—
	[mm] 陶瓷	0.25 – 2.0	—	—	0.1 – 2.0
	[in]	0.010 – 0.075	—	—	0.004 – 0.080
	[mm] 碳化物	0.15 – 0.8	0.05 – 5.0	—	0.15 – 0.8
	[in]	0.006 – 0.030	0.002 – 0.200	—	0.006 – 0.030
硬度 (见附录表A1)	[HRC] 铁合金	35	45	40	40
	有色金属	20	55	35	50
	自熔合金	30 – 60	30 – 60	—	30 – 60
	陶瓷	40 – 65	—	—	45 – 65
	碳化物	45 – 55	55 – 72	—	50 – 65
孔隙率	[%] 铁合金	3 – 10	< 2	3 – 10	2 – 5
	有色金属	3 – 10	< 2	3 – 10	2 – 5
	自熔合金	< 2 (合并的)	< 2	—	—
	陶瓷	5 – 15	—	—	1 – 2
	碳化物	5 – 15	< 1	—	2 – 3

表3 – 热喷涂工艺之间的特征值 (近视值) 比较

2.4.6 基础设备（系统要求）

除了喷涂系统的主要组成部件及喷枪的主要组成部分，在某一工业环境中应用涂层工艺所必需的还有其他许多部件。图9所示的就是一个喷涂系统。喷涂房的作用就在于屏蔽喷涂过程中喷枪所产生的噪音和粉尘。喷涂房中包括电源和气体供给入口、工序过程监测和控制设备。通常喷枪装载于一个机械手上，机械手按照需要涂层的特殊工件预先编制的操作程序进行操作。进行喷涂的工件通常是安置在一个工装设备

上，例如：旋转工作台。这样才有可能对具有非常复杂几何形状工件实施喷涂工艺。同时，千万不要忽略了带过滤器的通风系统，因为存在着所谓的“过喷”，例如：没有粘附于工件表面的粉末喷涂材料，能够被除尘器吸取并且截留下来。某些喷涂材料所产生的喷涂粉尘可能容易着火；因此，在这些操作环境下，整个系统必须能够防火防爆。如21页图26所示的是一个现代化的、自动化的、高效率的涂层设备。



2.5 涂层结构

在一定程度上，热喷涂工艺决定了涂层的孔隙率。火焰和电弧喷涂工艺产生的孔隙率最大。而高速火焰喷涂（HVOF）涂层所产生的涂层非常致密，孔隙率小于0.5%。典型的等离子喷涂形成的涂层孔隙率在1%到2%之间。

喷枪在基体表面上方来回往复地运行，涂层逐渐地层层堆积，标准的每一层厚度为10到20 μm （400到800 μin ），喷涂涂层就这样形成了。值得注意的是，在层与层间隙之间可能生成氧化物。通过在真空或惰性气体环境中喷涂的方法，可以将这些氧化物数量减少到最低。

因为喷涂过程所产生的细粉尘及未熔化的颗粒可能变成涂层中的滞留物质。粉尘是导致涂层材料不能与工件紧密结合的罪魁祸首。后继的喷涂颗粒将这些粉尘拖曳到涂层表面，并成为涂层中的滞留物。

图10所示的是一个X40 CR 13电弧喷涂层的显微图片。我们从中可以辨认出层状结构和存在的孔隙（黑色区域）。圆形颗粒是因为再固化之前颗粒没有完全熔化而形成的。该涂层的厚度可达几毫米。

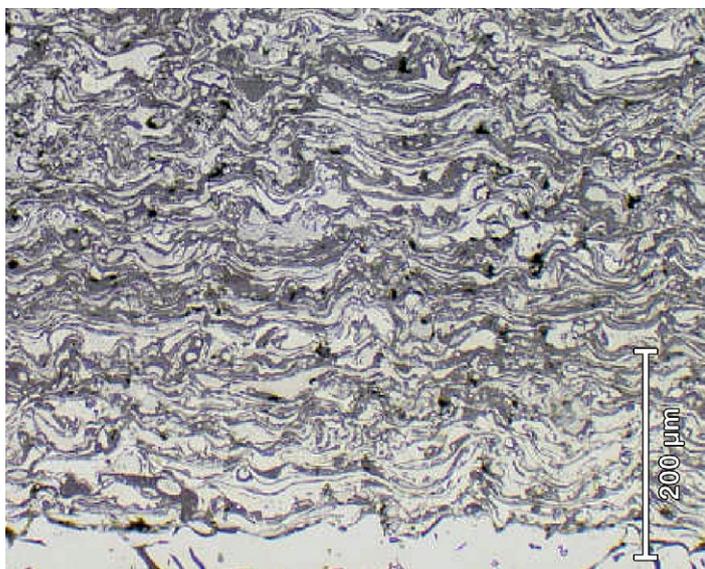


图10 - 电弧喷涂涂层

高速火焰喷涂（HVOF）工艺能生成更致密的涂层。图11描述了一个碳化钨/钴铬 WC（CoCr）涂层。肉眼几乎看不到任何孔隙。亮区由碳化钨硬质相组成，碳化钨硬相镶嵌于钴铬韧性基体中。HVOF喷涂工艺形成的标准涂层厚度在0.2到0.3毫米之间（0.008到0.012英寸）。

热喷涂涂层通常呈现出高内应力，这可归因于固化和冷却的过程。当热颗粒冷却时收缩，导致内部涂层应力增大。

如果把基体材料及涂层材料的热膨胀系数的比率考虑在内，那么这些内应力将被产生的压缩应力部分抵消。因此，涂层工艺过程中的温度控制，在决定是冷却基体还是加热基体方面起着极其重要的作用。

有的时候，基体表面的陶瓷涂层的结合强度不能满足要求。为了增加结合强度，可以应用一个粘结层，粘结层通常是由镍铝合金或镍铬合金制成，起着基体和陶瓷涂层之间中间层的作用。该中间涂层同时提供了附加的防腐蚀这一重要的功能。



图11 - WC（CoCr）高速火焰喷涂涂层

2.6 涂层性能

如前所述，热喷涂涂层的孔隙率是由工艺类型决定的，并且涂层呈现一种各向异性和层状结构。这些特性可以在一个很大的范围内调整，从而能够适应某些特殊的应用要求。

2.6.1 耐磨损

热喷涂涂层重要用途之一就是耐磨损^[4]。这些应用中经常使用陶瓷和碳化物材料。所用的碳化物材料是碳化钨或钴碳化钨。在这里，碳化物硬质相（WC）展现出防止磨损及侵蚀磨损的优良特性，并且镶嵌于韧性金属粘结剂中。

2.6.2 防腐蚀

低碳的、非合金钢及铸铁材料极易生锈，因此通常需要持续的表面防护。铝或锌火焰喷涂涂层能够达到表面防护的功能，其最主要的应用领域就是用于桥梁等海上建筑物。如果要满足耐高温的工艺应用需求，可以使用金属-铬-铝-钇（MCrAlY）材料，这些材料经常被应用于在可控环境下进行的等离子喷涂。

2.6.3 绝缘涂层（热绝缘/电绝缘）

陶瓷材料是优良的热和电的绝缘体，同时它们还具有良好的防止氧化和耐磨损的性能。当作为隔热涂层应用于引擎和涡轮元件时，这些特性非常有用。隔热涂层降低了基材的表面温度，从而延长了工件可使用的有效期限。另一方面，工件在相同的运行温度下由于隔热涂层减少了热损失，使效率大大提高。这些涂层系统由一个粘结层通常是抗氧化的金属-铬-铝-钇材料（其中的金属是铁、镍或钴）和一个陶瓷面涂层构成。一般说来，面涂层经常使用氧化钇稳定氧化锆材料，因为该材料具有良好的抗热冲击特性。

2.7 后加工处理

因为许多喷涂材料有其固有的粗糙表面和多孔性，所以必须进行后加工处理。另外，特殊的工艺程序需要其他的处理方法，按照需要，可能是涂层后扩散处理、氮化、热等静压工艺或者喷丸强化处理。

2.7.1 机械后加工处理

热喷涂涂层的表面粗糙度在5和20 μm 之间（参照附录表A2）。因此，经常需要机械加工以达到成品尺寸和表面光

洁度的要求。针对不同工艺涂层表面可以通过传统机械加工或者也可以通过碾磨或抛光达到成品尺寸。

2.7.2 封孔

涂层封孔主要是用作填补涂层表面的孔隙和细微裂纹，这样就相当于提供了对腐蚀性介质的额外防护，否则腐蚀性介质可能渗透到基体。

如果使用树脂或蜡这些密封剂，当它们呈现液态状的时候，就会渗入到孔隙中，然后硬化（通常经过加热）。如果封孔剂是经过喷射或者直接涂在表面的话，该工序必须重复多次以保证涂层表面被完全覆盖。

封孔剂也可以用于生成无粘性的表层（聚四氟乙烯基密封胶）。

2.7.3 涂层之后热处理

经由涂层之后热处理，可以增加基体和涂层之间的结合强度，并且合金具有的“自我扩散”作用，同自熔合金的熔化不同。

各种自熔合金构成了喷涂材料的一个特殊类别，对于自熔合金而言，在喷涂后，将实施重熔这一附加的步骤。这些合金的喷涂材料通常是铬、铁和镍的混合物，并且含有相当数量的温度抑制物质，如硼和硅。

在喷涂的工艺过程中，有一些金属间化合物形成。接下来的涂层熔融导致涂层材料完全转化，并生成硅化物及硼化物硬相。渗入到基材的扩散作用也将发生，从而提高结合强度，孔隙也几乎全部消除，不存在任何连通孔隙。

自熔合金涂层展现出极度优良的抗腐蚀及高硬度的特性。熔化涂层最常使用的手动方法是使用乙炔焊炬。用激光、电子束或感应加热将涂层熔化在熔炉内同样行之有效。有效的重熔温度要求范围是在1000 °C到1200 °C（1800 °F到2200 °F）之间。

图 12正好就是显示了镍-铬-铜-硅合金涂层在涂层溶化前后之间的变化。涂层结构的均质化可以从图中清晰地辨认出来，换句话说涂层结构均质化也就是熔融的涂层孔隙的减少和结构密致化。

2.8 涂层特性

对于涂层应用而言，除了涂层性能非常重要之外，还有一些性能相对容易测试，并且具备标准的质量控制检测方法。它们是：

- 目测
- 涂层厚度测量
- 表面光洁度测量

如有必要的话，利用相同时间和条件下喷涂的试验样品，能够对涂层进行测试，以确定涂层质量的其他性能：

- 为精确观察涂层厚度、孔隙率和显微结构，以及未熔颗粒和氧化夹杂物等，对涂层进行横截面切割制样
- 显微硬度/宏观硬度测量
- 结合强度测定
- 弯曲试验

试验测定需要使用标准化的试样尺寸。具体的执行和阐述与标准[6]保持一致。除此之外，还有许多其他方法。事实上，涂层的性能非常复杂，所以存在许多不同的测试方法，这些方法并无共性。

除此之外，各种各样的元素分析方法，以及刮痕试验、摩擦学性能研究、应力分析、腐蚀和磨蚀特性研究，也都包括在内。因为这些都是破坏性检验，所以它们并不是特别适合成品，在试验样品测试中也很少采用。现在许多最终使用者自主研发出测试的技术条件和测试方法以鉴定及评价涂层的质量。需要特别注意的是，航空和航天工业对测试的要求有非常严格的指导性文件。

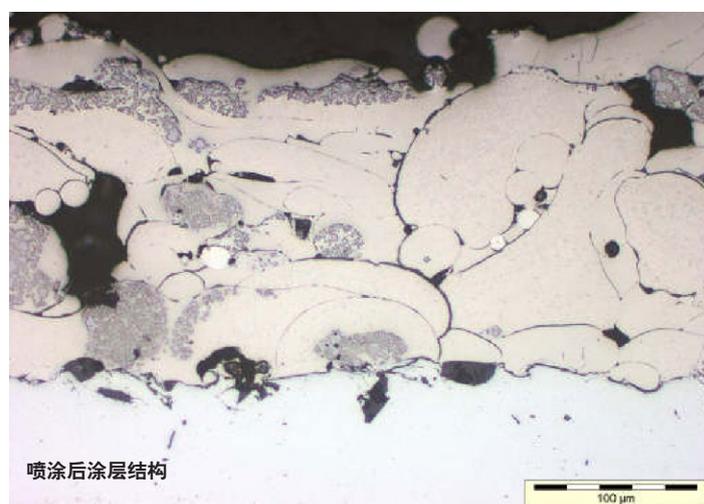
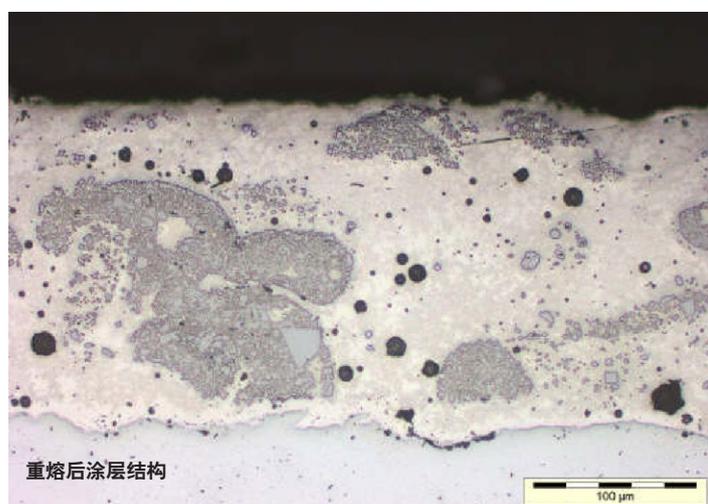


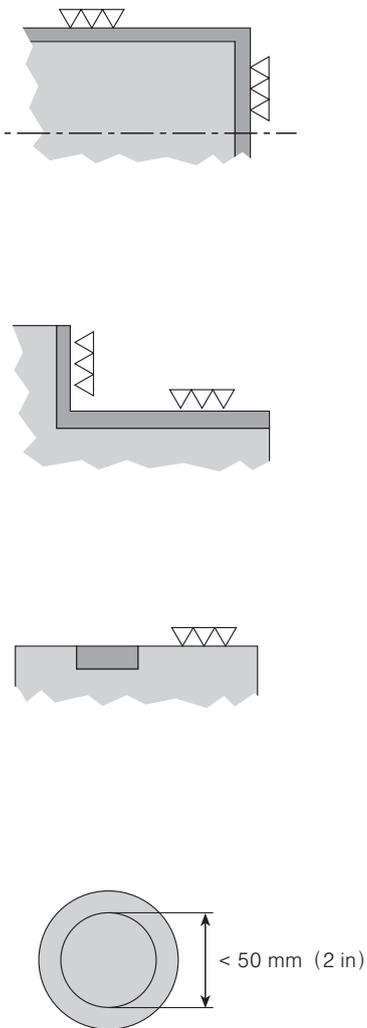
图12 - 自熔合金涂层

3 技术应用

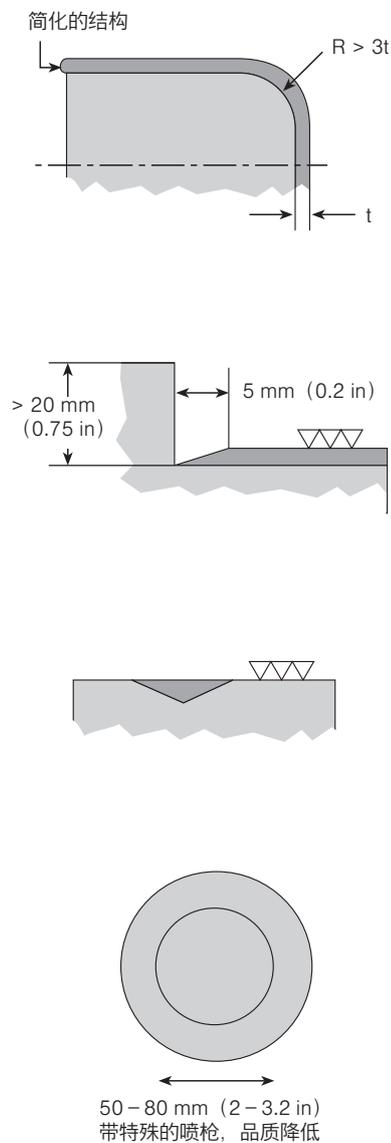
为了最大限度地应用热喷涂先进技术，必须适当选择涂层材料，当然还必须选择适当的涂层工艺并整理出相应的工艺参数。同样，为了涂层的需要必须注明准确的零部件尺寸形状。

涂层首选的几何结构就是圆盘、平直面板及可旋转的对称型零部件，如图13所示。

不可行



可行



优先配置

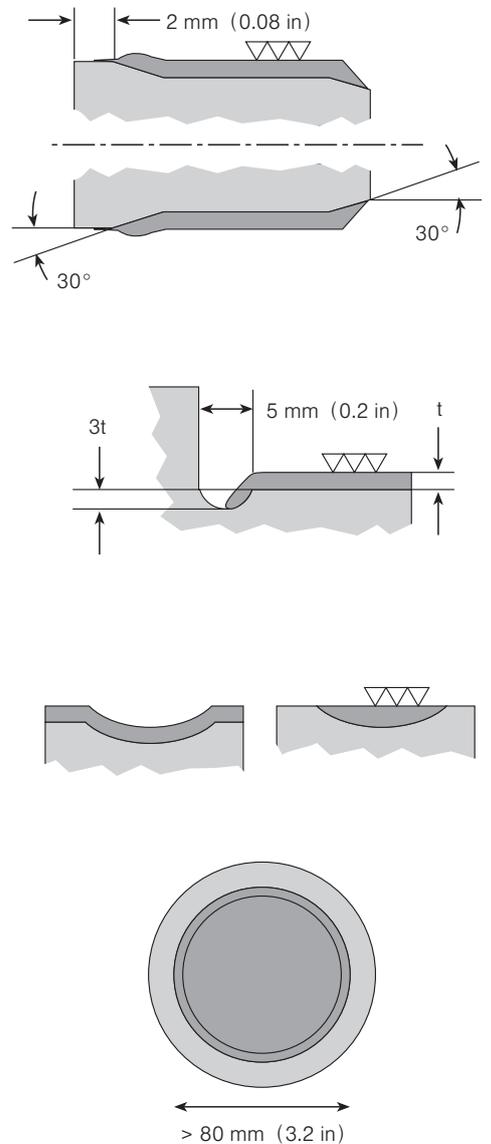


图13 - 对涂层有利的工件几何结构

3.1 生产型应用

3.1.1 替代镀硬铬

热喷涂作为电镀硬铬的一种替代技术，可以用来提供耐磨损和腐蚀防护，并且可以使用纯铬或各种各样的碳化物涂层^[5]。高速火焰喷涂涂层的性能通常优于铬镀性能，且高速火焰喷涂的工艺时间更短。为了达到电镀硬铬的具有反射性的表面外观，要对高速火焰喷涂涂层进行研磨及抛光。使用热喷涂涂层代替电镀硬铬的一个应用实例就是飞机起落架零部件的热喷涂涂层，图14所示。



图14 - 表面碳化钨/镀铬涂层的F5“老虎”战斗机前起落架

3.1.2 医疗移植

为了使整形外科的移植（例如：人工髌关节）能够牢固而持久，表面光洁处理具有极其重要的作用。采用真空等离子喷涂工艺的欧瑞康美科Metco™PLANT 涂层，特意喷涂成孔隙很多的表面，从而使得骨头生长渗入到孔隙中。同时有些Metco™PLANT 涂层技术应用具有生物相容性的钛涂层（如图15所示），或者应用具有生物活性的、羟基磷灰石涂层，具有生物活性的羟基磷灰石涂层对于人体骨头的生长并渗入假肢的表面起着非常积极的作用。



图15 - 髌部植入物的具有生物相容性 Metco™PLANT钛涂层

3.1.3 纺织机械

Metco™TEX 涂层系统的开发研制是多年来与纺织机制造合作的结果。该涂层的特点在于使用各种不同的处理方法，得到精确的涂层表面形态和布局。表面结构对于与纤维相接触的纺织机械零部件而言非常重要。为了使纤维生产量最大化，可以使用氧化物陶瓷涂层，通常还带有一个镍粘合层，同时能够提供腐蚀防护作用。图16展示了这种样本应用。



图16 - 各种纺织机械零部件

3.1.4 燃气轮机

无论是对于固定的工业燃气轮机，还是对于移动的航空发动机，热喷涂涂层在许多不同地方能够广泛使用，并且具有各不相同的功能。防止高温腐蚀的保护性涂层、热障涂层、间隙控制涂层以及采用相同成份进行高温合金表面修复。这些只是部分实例（参照图17）。

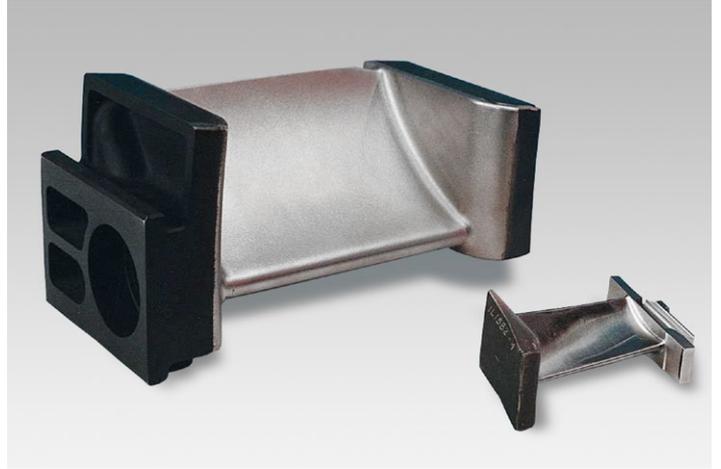


图17 - 燃气涡轮叶片涂层

3.1.5 印刷工业

带涂层的辊筒和缸体广泛地使用于印刷机械。通过与造纸和印刷工业客户建立合作关系，开发研制出多种Metco™PRINT涂层技术。等离子喷涂氧化铬涂层在油墨辊筒呈现出细密的显微结构，这样就可以在涂层上进行细小且致密的激光雕刻（如图18所示）。

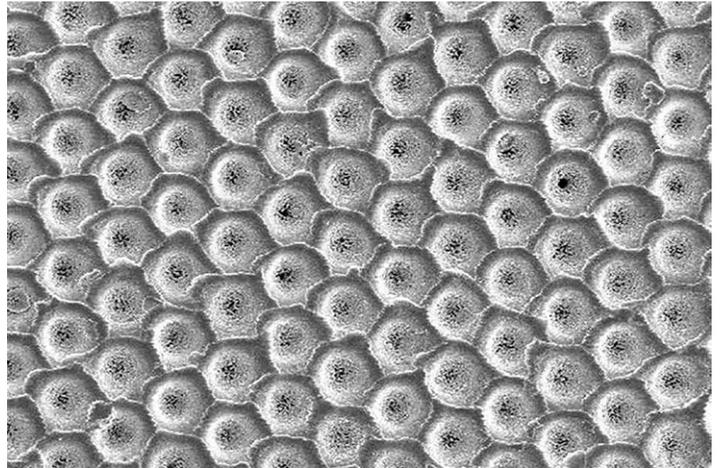


图18 - 激光雕刻Metco™PRINT涂层的网纹辊

3.1.6 一般工业用途

涂层技术应用种类最多的就是机械工业。图19所示的是水泥行业轴承上的巴氏合金喷涂。

这种特殊的多孔涂层是为油润滑作用而设计的，该多孔层可起到储油器的功能，从而防止“卡死”的现象。

其另一些应用实例：柴油机的活塞环、压缩机的活塞杆、泵轴承、阀盖等。

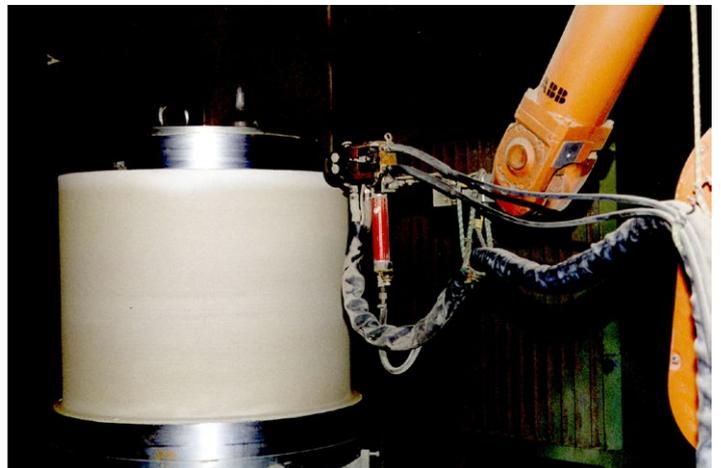


图19 - 轴承轴上巴氏合金涂层

3.1.7 消费品

虽然开发的大多数热喷涂涂层是用于一些非常特殊的专业零部件，但是热喷涂涂层其实也可以应用于消费品工业。图20所示的是电熨斗，在其底板喷涂陶瓷涂层以抵御磨损，再在其表面覆以一层抗粘结的涂层。类似涂层还可用于不粘平底锅。

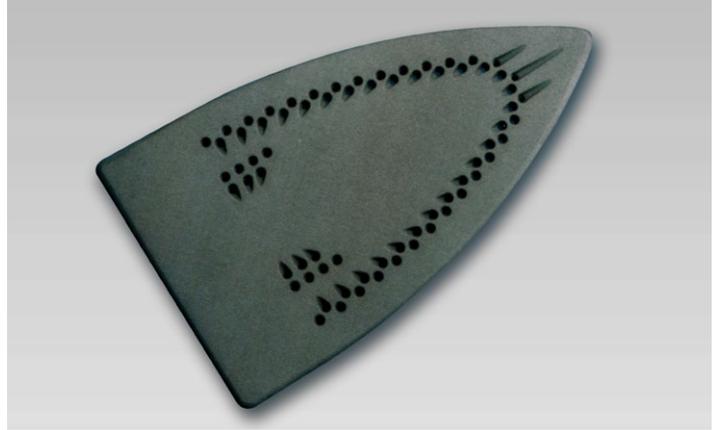


图20 – 经喷涂的家用蒸气熨斗垫板

3.1.8 汽车工业

继小部件涂层之后，欧瑞康美科的一项新的突破性进展就是为铝制发动机气缸制备涂层。发动机的气缸内壁借助于一个特制的、旋转式等离子喷枪（如图21所示）进行喷涂，该特制的装备可以将涂层技术应用于较小的内径部件内部，形成一个耐磨损的表面。

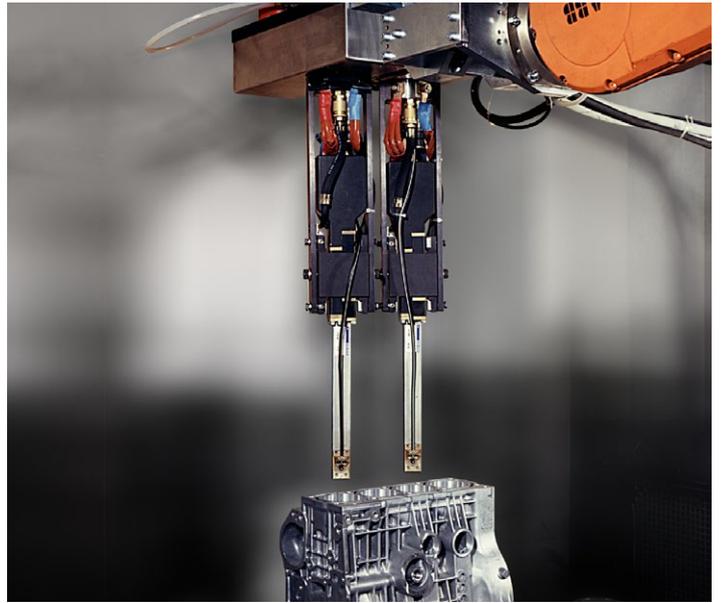


图21 – 双旋转等离子喷涂™

3.1.9 钢铁工业

钢铁工业中使用的轧辊必须能够承受加热状态中钢制品的重热负载。另外，还必须能够应对钢铁生产中的炉渣，以及生产过程中熔融的锌产生的侵蚀作用。几种不同的Metco™ STEEL涂层系统适合应用于新部件生产和部件修复（如图22所示）。



图22 – 沉没辊的高速火焰喷涂

3.1.10 造纸工业

造纸工业中使用的辊筒可能接触各种不同工况环境，包括磨损、染料的化学侵蚀、加热辊筒上的热应力以及刮刀刀片产生的机械应力。同时，造纸用辊筒必须保持高表面光洁度，持续的时间越长越好。Metco™CAL涂层技术能够满足上述的各种要求，对于研光辊特别适用。



图23 – 超精抛光后的Metco™CAL 涂层

3.1.11 航空航天

除了已经提到过的燃气轮机零部件的涂层应用，热喷涂技术还广泛应用于航空飞机发动机。图24所示的就是燃烧室内部的涂层。

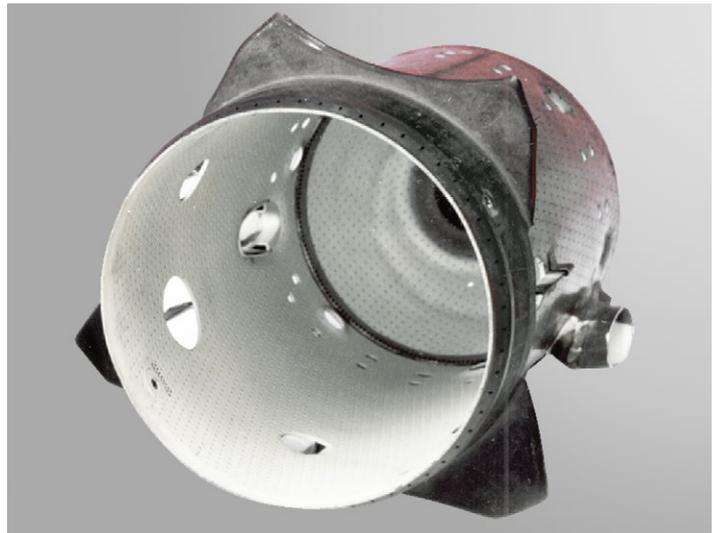


图24 – 燃烧室

3.2 抢修及修复应用

热喷涂也可以应用于修复工序中，将各种零部件修理恢复到它们原先的尺寸。涂层可以车削或磨削至成品尺寸。可以使用镍-铬、镍-铝或镍-铬-铝作为合金钢的修复材料。

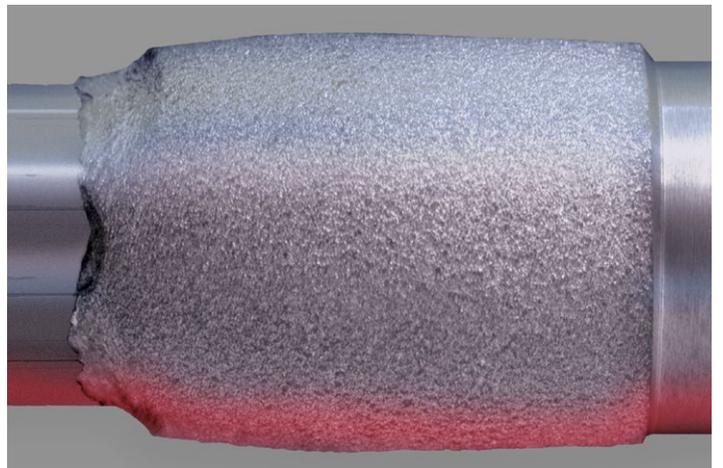


图25 – 修复工艺

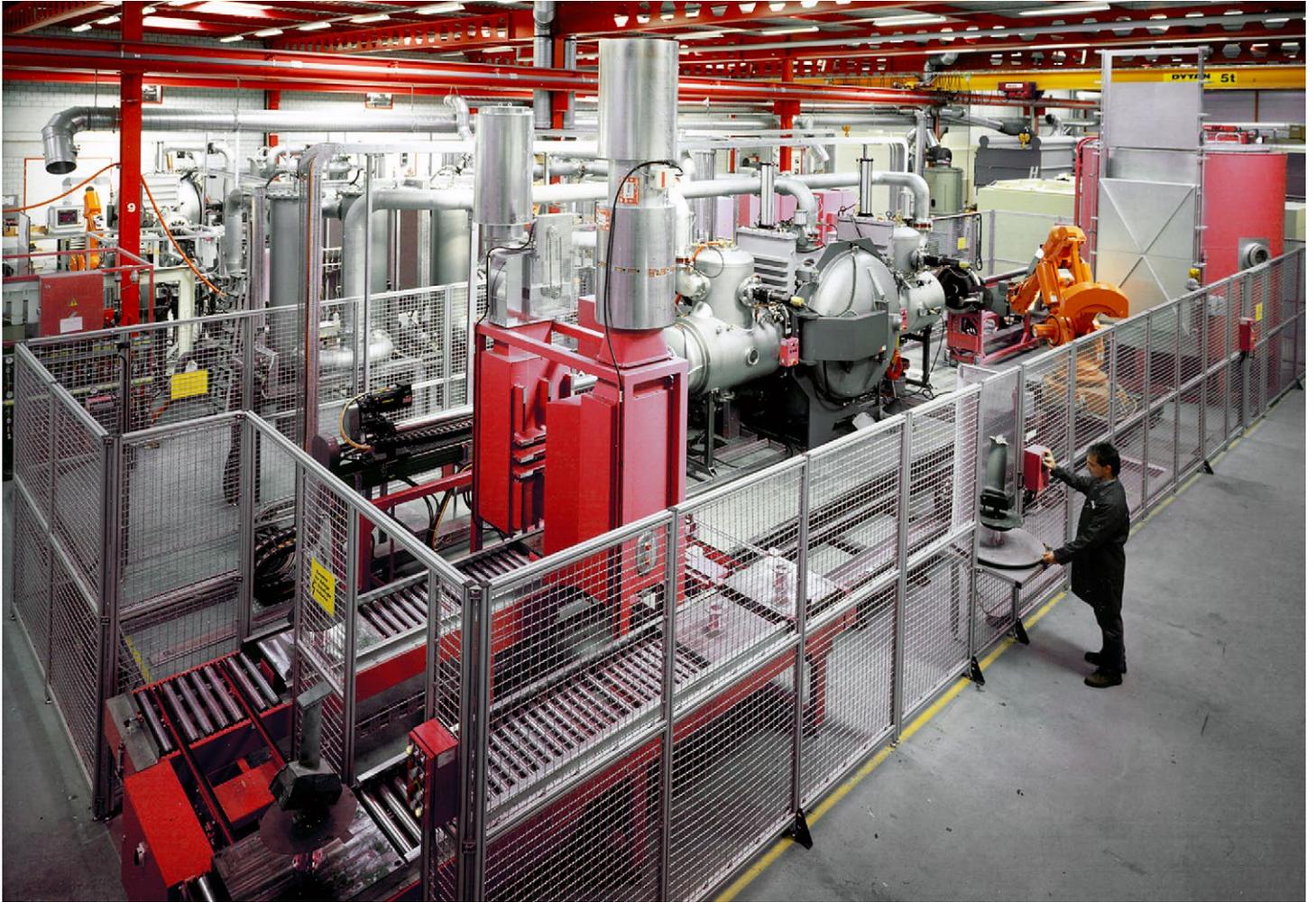


图26 – 现代高产能的低压等离子喷涂系统（LPPS）喷涂燃气涡轮叶片

4 小结

与其他的涂层工艺相比，热喷涂可适用的基材、可选择的涂层材料几乎没有任何限制。正因为如此，使得热喷涂涂层的应用范围更加广泛，既可以用于新零部件的制造，又可以用于已使用零部件的修复。热喷涂的涂层性能可以在一个很大的范围内变动，以适用于特殊的应用要求。当然，有丰富经验及知识的专业人员也非常重要。

欧瑞康美科在热喷涂系统的设计制造、热喷涂设备和材料的生产、以及涂层应用开发领域，具有无比卓越的技术知识和多年宝贵经验，能够满足所有热喷涂需要，是您最理想的合作伙伴。

如果需要进一步了解有关的信息，请与欧瑞康美科的客户代表联系，或者访问我们的网站www.oerlikon.com/metco。

5 附录

5.1 对照表

洛氏硬度	维氏硬度 (HV)	布氏硬度 (HB)	抗拉强度 (N/mm ²)
80	1865		
79	1787		
78	1710		
77	1633		
76	1556		
75	1478		
74	1400		
73	1323		
72	1245		
71	1160		
70	1076		
69	1004		
68	942		
67	894		
66	854		
65	820		
64	789		
63	763		
62	746		
61	720		
60	697		
59	674		
58	653	620	2180
57	633	599	2105
56	613	580	2030
55	595	570	1995
54	577	551	1920
53	560	532	1845
52	544	515	1780
51	528	495	1700
50	513	485	1665
49	498	475	1630
48	484	456	1555
47	471	447	1520
46	458	437	1485
45	446	423	1450
44	434	409	1385

洛氏硬度	维氏硬度 (HV)	布氏硬度 (HB)	抗拉强度 (N/mm ²)
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
37	363	340	1150
36	354	335	1140
35	345	330	1115
34	336	323	1095
33	327	314	1060
32	318	304	1030
31	310	295	995
30	302	285	965
29	294	280	950
28	286	271	915
27	279	266	900
26	272	257	865
25	266	252	850
24	260	247	835
23	254	242	820
22	248	238	800
21	243	233	785
20	238	228	770

表A1 - 洛氏硬度值在80到20间的硬度对照表（前后对照近视值）

表面光洁度	Ra [μm]	Ra [μin]	Rz [μm]
N0	0.0125	0.5	
N1	0.025	0.1	0.29
N2	0.05	2	0.55
N3	0.1	4	0.91
N4	0.2	8	1.74
N5	0.4	16	2.6
N6	0.8	32	4.65

表面光洁度	Ra [μm]	Ra [μin]	Rz [μm]
N7	1.6	64	7.87
N8	3.2	128	15.6
N9	6.3	250	40
N10	12.5	500	63
N11	25	1000	100
N12	50	2000	160

表A2 – 表面光洁度对照表（前后对照近视值）

5.2 参考文献

-
- [1] DIN EN 657 : 热喷涂 – 概念, 分类 ; Beuth-Verlag, Berlin (1994)
 - [2] H.D. Steffens, J. Wilden : “现代检验方法” DGM-Verlag, ISBN 3-88355-223-2, (1996)
 - [3] P. Huber : “真空塑料喷涂”表面, 10 (1992) , 8
 - [4] H. Simon, M. Thoma : “金属表面应用技术”Hanser-Verlag, München (1985)
 - [5] E. Lugscheider, H. Reymann : “磨损和腐蚀保护的高速火焰喷涂技术”Schweissen und Schneiden, 50 (1998) , 44
 - [6] DIN 50600 ; 金属结构图, Beuth-Verlag, Berlin
DIN EN 582 : 结合强度的确定, Beuth-Verlag, Berlin (1994)
DIN EN 10109 Teil 1 硬度测试, Beuth-Verlag, Berlin (1995)
DVS 2310 Teil 2 ; Anleitung zur Schlifffherstellung, DVS, Düsseldorf, (1989)
-

热喷涂

先进的技术解决方案和服务



通过材料优化及技术创新获得完美的解决方案

欧瑞康美科是表面处理工程解决方案和服务领域的世界领先者：

- 全套热喷涂等先进表面处理技术设备、成套系统及喷涂材料
- 集成系统
- 专业的涂层及表面强化技术服务
- 用户支持服务

欧瑞康美科提供一个集制造、分销及服务为一体的网络，充分满足航空航天、发电、汽车制造及其它战略性工业的需求。

要解决贵公司面临的任何表面处理工程难题，请与欧瑞康美科营销部联系，访问欧瑞康美科公司网站www.oerlikon.com/metco或者发送邮件到info.metco@oerlikon.com。

关于欧瑞康表面处理解决方案事业部

欧瑞康是全球领先的表面处理和增材制造解决方案和服务提供商。本部门广泛提供各种市场领先的薄膜、热喷涂和增材制造技术、设备、组件和材料。减少运输排放、最大限度地延长工具和组件的使用寿命和性能、提高效率 and 智能材料，无不构成其领先地位的标志。数十年来，本部门采用开创性技术，以遍布37个国家/地区共计170多家分支机构的全球网络，为客户提供标准化和度身定制的解决方案。

凭借其技术品牌——欧瑞康巴尔查斯、欧瑞康美科和欧瑞康增材制造，欧瑞康表面处理解决方案事业部专注于从性能、功能、设计、可靠性和可持续性方面，提高和优化各种技术和服务。为汽车、航空、模具、通用工业、奢侈品、医疗、半导体、发电、石油和天然气市场的客户，带来创新以及能够改变行业面貌的优势。

该部门隶属于公开上市的欧瑞康集团（瑞士证券交易所上市名称：OERL）。该集团总部位于瑞士，拥有12,000名员工，2021年的收入达26.5亿瑞士法郎。

本信息如有变更，恕不另行通知。