

金属涂层气体动力喷涂技术

方法的产生和它的现状

卡史林 阿·伊·——奥柏尼斯克粉末喷涂中心执行经理

史柯得金 阿·弗·——奥柏尼斯克粉末喷涂中心总工艺师

(本文写于 2006 年)

金属涂层的气体动力喷涂方法是大约在二十年前,由俄罗斯学者第一次提出的,并得到研究人员和专家们的广泛关注。

在 2004 年以前,气体动力喷涂是一个够新的技术,并不被重视(1)。近十几年以来,本方法在各领域发展得如此之快(2)(3),是与它的基本特性有直接的关系。这个特性就是能采用未熔融金属颗粒,在被加工表面上制造金属涂层。气体动力喷涂技术与众所周知的热气喷涂方法不同,涂层气孔率很低,基体材料和涂层的热负荷很小,材料氧化少,消除了涂层中结晶化不均匀的现象。

(一) 气体动力喷涂方法的产生

原苏联科学院西伯利亚分院理论和应用力学所(4)的学者阿·巴·阿尔赫莫夫、弗·费·柯沙列夫和阿·尼·马比林,将铝以超音速双相流绕过阻碍物时,发现它沉积在阻碍物的顶部。这便是气体动力喷涂金属涂层方法的历史起源。他们研究发现,当粒子流的速度超过一定值,即所谓的临界速度时,在阻碍物上沉积一层硬厚的金属粉末涂层。作者们称它为“冷气动力喷涂”(5)(6)。

方法的实质,原则上是够简单的。被驱动的未熔融金属颗粒的速度达到 500-1000 米/秒时,与阻碍物发生碰撞,会产生强烈的变形,并在表面固化形成厚涂层。利用这种方法,作者们获得了许多金属(Al、Cu、Zn、Ni、Co、V、Fe、Ti 等)、它们的合金和混合物的涂层。

最初的一些研究发现:随着粒子沉积效益的增加,当速度超过临界速度时,观察到颗粒的变形程度减弱,涂层的硬度降低和它的气孔率增加(5)。此外,为了使粒子达到临界速度,大多数情况下,要求采用单一的原子气体,例如氦气。这阻碍了该方法实际应用的扩展。因此,必须扩大研究范围,不仅要研究涂层的特性,而且还要研究其工作最佳方式和寻找实现本技术的具体办法。

(二) 气体动力喷涂技术的基本参数

由于气体动力喷涂未熔融金属颗粒的方法应用很广泛,所以登记了专利(7)。专利的基本点(8)是:

- 加速气流的温度应该低于颗粒材料的熔点温度或热软化的温度;
- 颗粒的大小应处于 1-50 微米范围内;
- 颗粒的速度与其材料和颗粒的尺寸有关,为 300-1000 米/秒。

作者(8)介绍“冷气动力喷涂”典型的双相气流参数组如下:

---推动气流的压力, 大气压	10-30
---推动气流的温度, 摄氏.度	0-700
---气体消耗量, 米 ³ /分	1-2
---粉末材料供给量, 公斤/小时	5-15
---喷涂距离, 毫米	10-50
---需要的功率(加热气体用), 千瓦	5-25
---颗粒尺寸, 微米	1-50

以上参数只供研究气体动力喷涂过程使用

运载气体的参数

为了进行气体动力喷涂，必须加速气体颗粒，形成颗粒流。我们首先应该注意获得更高的气流速度，而它与音速 a 有直接的关系，为：

$$a = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$$

其中， μ —气体分子量； γ —绝热常数； C_p / C_v —相对热容量； T —气体的绝对温度

R —气体万能常数

当气温度为 0 摄氏度时，某些气体的音速如下：

表 1

气 体	音 速 米 / 秒	绝 热 係 数	克 分 子 量 克 / 摩尔	密 度 公斤 / 米 ³
空 气	331	1.40	29	1.29
氮 气	334	1.40	28	1.25
氟 气	435	1.66	20	0.90
氦 气	965	1.66	4	0.18
氢 气	1284	1.40	2	0.09

为了得到超音速气流，需用超音速喷嘴—拉瓦尔式喷嘴（包括收缩和扩展两部分）加速气体。当气体通过临界喷嘴断面（最窄处）时，气体速度就是此部位的音速，而在喷嘴出口扩展部位，其速度可能超过音速若干倍。

从表 1 中可以看出，气流在氢气中比在空气中更容易达到高速。因此，单从这点考虑，对于气体动力喷涂，最好是采用氢气或它与空气的混合物。

从公式（1）得出，加热气体能使其音速增大。因此，喷嘴中的气流速度也增大。这种特性常用于喷涂设备的设计工作中。加热气体的功率可达到几十千瓦，而压缩气体的温度可达几百度。在这种情况下，好像冷气体动力喷涂是温热的，甚至好像是酷热的。但是，沉积颗粒还是未熔融的固体状态。

质量为 M_p 的气体颗粒的加速度 a 为，

$$a = \frac{C_d S_p \rho_g (V_g - V_p)^2}{2m_p}$$

其中 C_d ---颗粒的空气动力阻抗系数； S_p ---颗粒的有效断面积； ρ_g ---加速气体的密度； V_g ---气流的速度； V_p ---颗粒的速度。

必须指出：颗粒的加速度 a ，除了与上述参数有明显的关系以外；而且其中 C_d （气体动力阻抗系数）不仅与颗粒的形状和尺寸有关，而且与相互作用的气体参数（速度、密度、粘度和温度）也有关系。因此，决定加速效率，不仅与气流速度有关，而且与它的其它参数，以及颗粒的特性都有关系。图 1 上所载的是，运动在超音速喷嘴中的气流速度变化与温度的关系曲线。虚线表示喷嘴临界断面和气体喷出断面的位置。

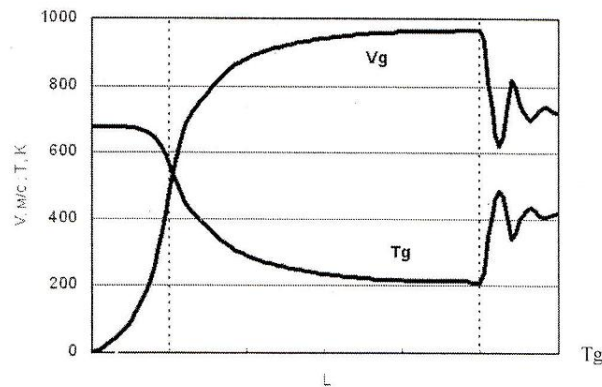


图 1 沿喷嘴中心轴气体速度 V_g 变化与温度 T_g 的特性曲线

加速气体的制动压力是形成气流的决定因素，气体压力的增加会扩大喷嘴开口的程度，从而使气流速度增大；除了对气流产生严重影响以外，喷嘴壁上的加速气流也受阻。这限制了喷嘴的长度，自然也就缩短了颗粒在喷嘴中加速的时间。增大工作气体的压力和喷嘴开口的程度，可以降低这种影响。在已研制的气体动力喷涂设备中，通常采用的气压为 15-35 大气压。

喷 嘴

超音速喷嘴出口处的断面积和长度，直接与加速气体的总消耗量和压力有关。当气体动力喷涂的压力和消耗量为正常值时，其园断面喷嘴的出口直径，一般不会超过 8-10 毫米。增大喷嘴出口直径一倍，会导致气体消耗量扩大 4 倍。气体的实际消耗量大约限制在 1-2 米³/分。因此，**喷嘴出口断面的尺寸，不能增加太大。**

要增加喷涂宽度，只能在保持喷嘴断面积不变的情况下，增加一个边的尺寸（断面为非园）。为了减少颗粒在冲击层内的阻力，在气体动力喷涂技术研究的最初阶段，选择了长方形的断面。这时，喷嘴出口断面一边尺寸愈小，则冲击波的输出愈小，颗粒在阻碍物前的阻力也愈小。但是，过份地减小方形断面一边的尺寸，会减慢气体的速度，使输出喷嘴的颗粒速度也减少。目前，大多数情况下都是采用园形断面的喷嘴。

为了获得高速的颗粒，必须增长它在加速气流中停留的时间。这要求增长喷嘴的长度。图 2 中所载的是，气体和尺寸为 5 微米和 25 微米的铜颗粒在喷嘴轴上运动时达到的（ V_g 、 V_{p5} 和 V_{p25} ）速度曲线。虚线表示喷嘴的临界断面和出口处断面的位置。

显然可知，喷嘴长度的增大会使颗粒速度增高。而喷嘴的总长度和断面积又与加速气体的参数有关。所以，喷嘴长度的增加必定会增大气体的压力。

确定驱动喷嘴最佳的参数是气体动力喷涂技术的重要研究课题

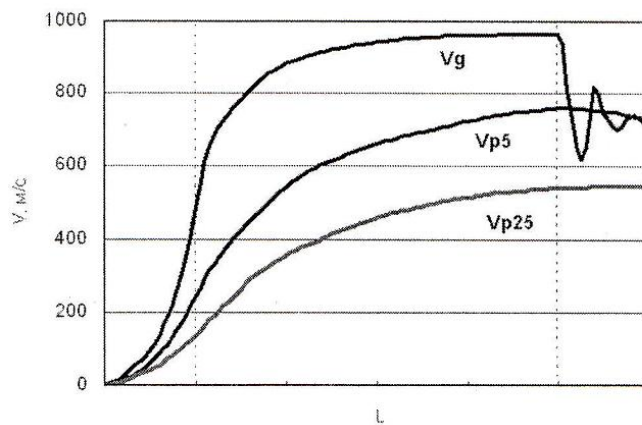


图 2 气体和铜颗粒（速度为 V_g 、 V_{p5} 和 V_{p25} ）沿喷嘴轴线变化的曲线

对沉积颗粒特性的要求

从公式（2）中可知，颗粒的质量，尺寸和形状对气流的加速有很大的影响。

当然，颗粒愈轻，达到高速度就愈快。但是，已加速的颗粒在输出喷嘴之后，受到阻碍物跟前气体层内的阻力。因此，当轻颗粒与阻碍物相互作用时，其速度会大大地降低。此时，愈重的颗粒，愈难用气流驱动；但当它接近阻碍物时，更容易保持自己的速度。正因为这一点，颗粒材料的密度、尺寸和形状之间的关系是气体动力喷涂技术优化的重要参数。

气体动力喷涂技术最重要的参数之一是颗粒材料的硬度。金属颗粒所以能在阻碍物上固定下来，是因为它在接触区内产生了塑性变形。因此，为了固定较软颗粒所需要的速度较低；对于固定硬金属颗粒，要求大大增加它的速度。

采用预热的办法（利用硬度与温度的关系）可以降低颗粒材料的硬度。这种预热运载气体的方法并不常用。当在喷嘴中进行绝热扩展时，气体温度会下降很快。所以通常预热只能补偿颗粒温度的降低。在图 3 中，所载的是：当初始温度为 673K（绝对温度）时，气体和直径为 5 微米与 25 微米的铜颗粒，沿着喷嘴轴线运动的温度（ T_g 、 T_{p5} 和 T_{p25} ）特性曲线。虚线表示临界断面和出口断面处的位置。

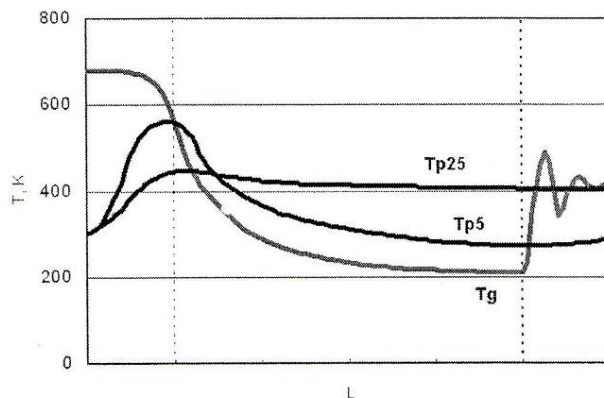


图 3 气体和铜颗粒沿喷嘴轴线变化的温度特性线（ T_g 、 T_{p5} 和 T_{p25} ）

颗粒在气流中加热和冷却的速度，与颗粒材料的导热性和热容量以及它的尺寸有关系。因此气体动力喷涂过程的优化，不仅与气流的选择有关，而且与选择适合的粉末材料也有关系。

涂层的性质

气体动力喷涂方法所制备的涂层的突出特性，是保持原始粉末材料的化学成份不变。因为喷涂过程是在比颗粒材料熔点温度低得多的温度下进行的，所以实际上不产生任何相位转变，任何化学变化和严重的材料氧化。

这种涂层特点是气孔率低。因为在喷涂过程中，颗粒会产生强烈的变形。

当已加速的硬颗粒冲击阻碍物时，会产生严重的变形。接触区内的局部强热会产生局部的升温，使接触表面附近硬度降低和变形加大。此时，变形值可达到 80%，涂层的粘合强度达 30-80 兆帕。虽然涂层中存在内应力（因为涂层材料内有硬化），但它的热应力余留下来的很小。这使涂层接合得很好，甚至厚度达到 10mm 和更厚的涂层也是如此。

由于颗粒产生强烈的冲击变形，其涂层材料晶格缺陷的密度也显著地增大。**晶格的缺陷率，涂层中颗粒强度的提高以及由于时间短和相互作用的温度所产生的颗粒之间的无渗入区的明显界线的存在**，降低了涂层材料的相对伸长，其值小于 1%。实际上，用气体动力喷涂法所制的涂层，都是够脆的。涂层材料在喷涂过程中的强烈硬化，大大地提高了它的硬度。随后涂层的热处理，能保证涂层材料相对伸长值增加和它的硬度降低。

（三）气体动力喷涂技术的研究和发展

作者（6）所称的“冷气动力喷涂技术”，是利用未熔融金属颗粒的高动能作用，进行金属颗粒喷涂的方法。目前它称为冷喷（“Cold Spray”），在全世界得到了广泛的认知。

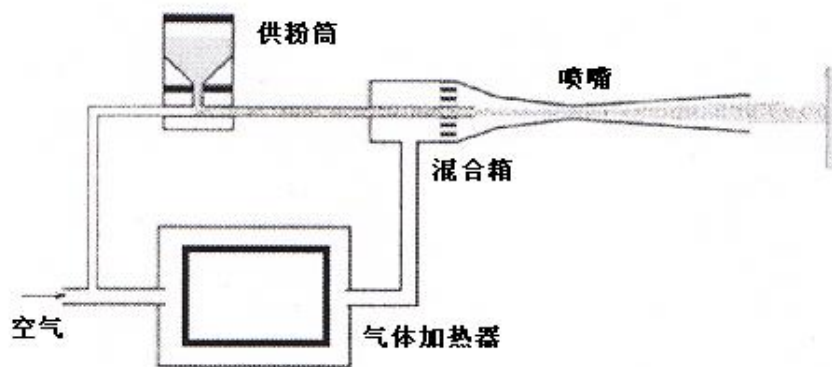


图 4 经典气体动力喷涂装置的示意图

图中包括气体预热器、密封供粉筒、混合箱和拉瓦尔喷嘴

过去和现在，本方法的发展道路都是多样化的。但它的主要研制都是在经典法的框架内进行的，包括双相混合物的建立和它在超音速喷嘴中的加速（图 4）。

在俄国科学院新西伯利亚分院的多相系统物理实验室中，阿·巴·阿尔赫莫夫、弗·费·柯沙

列夫和谢·弗·克林柯夫继续并扩大了冷气动力喷涂技术的实验和理论研究。

他们大部分研究工作是优化驱动气体的喷嘴(9-13)。对超音速双相气流的加速和阻尼的细致研究,促使建立了数学分析公式;利用这个公式,可以对在各种不同的压力、温度和驱动气体成份的情况下,同时还考虑颗粒的浓度,尺寸和密度的影响,评估颗粒由喷嘴输出的速度。这就为我们设计出具有最好断面的喷嘴和选择最适合的从喷嘴断面到阻碍物的距离(14-17),提供了依据。

最近,新西伯利亚的研究人员和阿·尼·巴比林(美国俄侨---译者)合作研制了冷喷过程的统计学模型。这个模型是建立在“颗粒和阻碍物高速度相互作用使表面激活”的观点上(参阅 А.П.Алхимов 等«ХОЛОДНОЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ», (冷气动力喷涂,莫斯科,物理数学文献出版社,共 535 页。作者均为俄国科学院西北利亚分院理论与实验力学所的教授--译者), 2010 年)。

研究气流与阻碍物的热容量影响(18,19)和颗粒冲击阻碍物时的变形量(19,20),能得出喷涂技术的优化条件,研制出多种实用的设备,包括手动操作的装置(22)。可是它们在企业中实际应用受到严重的阻力,主要是运载气体的消耗问题。在企业中应用氦气是很贵的,而用 15 个大气压的空气所得涂层的质量又得不到保证(23)。尽管如此,下列单位通过细致的研究,设计出试验设备或样机: МАИ(莫斯科)、“Рикс”公司(莫斯科)、Даймлер Бенз公司(德国)、中科院金属研究所(中国、沈阳)和国际先进技术和粉末喷涂中心(印度)

俄罗斯大量的研究工作,是探索气体动力喷涂技术应用设计的具体方案,力求以空气作为驱动气体。克里沙 В.К.和穆哈美查罗夫 А.Г. 研制了双超音速气流的方案(24);尼吉金 П.В.和斯莫林 А.Г. 提出了环状超音速喷嘴装置(25);吉昆 Ю.В.把表面准备过程和喷涂过程结合起来(26)。在吉昆的研究基础上,“金属间复合物”(Интерметкомпозит) (ИМС)公司(莫斯科)制造了工业用的气体动力喷涂设备方案 НГА-5 型,其功率为 18kw,空气为工作气体,压力达 15 大气压。

在乌克兰,果洛柯 А.Н. 和唐吉柯 В.Н.在冶金研究院(得涅伯罗彼得罗夫斯克)对气体动力喷涂技术进行了研究(27,28)。他们采用空气(加热 250 摄氏度,压力为 18 大气压)作为驱动气体,确定了喷涂尺寸大于 50 微米颗粒应用的可能,因为当超音速气流处于绝热冷却时,它们在喷嘴扩展部分,缓慢变凉。

在美国,气体动力喷涂技术是 90 年代中期,由巴比林(此人原为俄科学院新西伯利亚分院理论和应用力学所的研究人员,本技术发现者之一---译者)(8)和美国 Sandia National Laboratories 实验室共同研究而开始的(29)。他们设计了气体动力喷涂的基础装置。后来, Ktech 公司生产了工业化的计算机系统的气体动力喷涂设备,气压达 30 大气压,功率为 25 千瓦。从此在美国有许多单位开始对气体动力喷涂技术进行研究 例如, ASB Industry Corp. 的 Delphi Corp.实验室和其它单位等。

ASB 公司首先是着手改善设备的操作性能(32)。设备使用的关键在于,当强加热双相混合物时,金属颗粒在喷嘴临界断面处沉积很严重(33)。所以,今后的研究方向是喷涂技术的应用研究和涂层的建立(34,36)。

在 Delphi Corp. 实验室,研究尺寸为 50-150 微米颗粒的喷涂技术(37)。在文献(27)中,他们发现:在加热双相混合物时,提高颗粒的塑性,能降低颗粒固化在基体上所需要的速度;而当驱动气绝热冷却时,粗大颗粒冷却较慢,速度降低也慢(38,40)。加大气体预热会导致颗粒在喷嘴临界断面处的粘附,所以这个问题必须解决的(41)。

美国国防研究实验室(42,43)和宾夕尼亚大学:(44)从事喷涂技术优化的研究工作,其中从事改善驱动喷嘴特性的优化,最佳喷涂粉末材料的选择,以及所喷制的涂层性质研究和确定它们在各种技术任务中应用。

在英国剑桥大学、利物浦大学和诺丁汉大学从事冷喷技术的研究,主要科研方向是研

究采用纯氦气动力喷涂技术所获得的涂层性质,探索利用冷喷技术直接制造给定形状另件的可能性(45,46)。

加拿大政府提供大额支助,渥太华大学对冷喷技术和涂层性质进行了大量的研究。他们采用了纯氦气和氮气。加拿大的研究主要是改善喷嘴中颗粒驱动技术和在各种工艺过程中应用的可能性:(47-49)。

在日本 旬宿(Шиншу)大学从事优化喷嘴的研究工作。他们发现驱动重颗粒的喷嘴长度可以大大地增大;并在临界断面之后,采用垂直供金属粉的方法(50),因此避免了当强预热气体时,在临界断面处沉积颗粒的毛病,而且缩短了加速的长度。

在中国,西安,某大学的材料学院对冷喷技术参数的优化和利用各种粉末涂层性质进行了非常积极的研究(51,52)。

在德国,在 X. 克列伊 的领导下,汉堡的博得斯维拉(Бундесвера)大学,对冷喷技术也进行的大力的研究。德国研究者在数学模拟(53)和实验研究(54,55)的基础上,建立了冷喷技术的细致模型,并获得了颗粒在涂层上固化的标准条件。他们确定,当颗粒在冲击阻碍物时,超过临界速度会产生绝热移动的不稳性,促使颗粒产生塑性变形,并固定在阻碍物上。他们在这些研究的基础上,确定了各种金属颗粒的临界速度值,并研制了冷喷技术用的优化园口喷嘴。CGT 公司在上述研究基础上,生产了气体动力喷涂设备,它功率为 30 千瓦。为了达到高效的沉积和高质量的涂层,设备中采用氦气作为工作气体。这就要求粉末颗粒大小处于够窄的粒级范围内。有时为了提高效率,也采用氦气或它与氮气的混合物,压力达 30 大气压,粉末消耗量为 2 米³/分。

X. 克列伊后续的研究发现,,由于颗粒尺寸和温度的不同,不同材料颗粒的临界速度也不同(57)。这为提高双相混合物的加热和增大工作颗粒的尺寸,提供了依据(58)。利用这个研究成果,CGT 公司在“Kinetics-4000”(59)中,喷嘴前增加了双相混合物加热的补充组件。后者使喷涂的粉末粒级范围扩大,氮气压达 30 大气压,阻尼温度达 900 摄氏度。

设备“Kinetics-3000”在世界市场的出现,使得在比利时,法国,意大利和其它国家开始了气体动力喷涂技术的研究工作。他们在大多数情况下是采用氮作为工作气体,但“Kinetics-4000”的出现,绝大部分研究工作只用氮气。

除了采用经典方法(即建立双相混合气体并利用高压驱动气体,在超音速喷嘴中加速它)研究和设计设备以外,另外还有两种独立发展起来的气体动力喷涂方法。

在美国 P.托珀侯林指出:在氦气中音速是足够大,所以加速金属颗粒甚至可以在低于音速的气流中进行(60)。如果在氦气中采用低于音速,那么不会产生密度的降低和那么轻的气体。这样促使颗粒更好地得到加速。意洛瓦低公司(美国,加利弗尼亚)曾研制过“动力金属化方法“,其气体压力比经典方案中气体压力低得多(61,62)。采用特殊断面的喷嘴实现了低于音速的工作方式。此时,不论是在粉末输入区,还是在整个颗粒加速过程中,颗粒都进行加热;这与超音速方法不同,颗粒在加速气流中进行冷却。意洛瓦低公司设备的示意图与气体动力喷涂经典设备没有区别。由于采用了低音速的喷嘴,气压与需要的功率均大大地降低。

奥柏尼斯克粉末喷涂中心,在奥·费·克留也夫的领导下,彻底改变了气体动力喷涂技术的实现方法。他们提出,只用 10 大气压以下的空气就实现了纯金属与它们和陶瓷粉末混合物的气体动力喷涂技术(63,64)。他们在加速气流中同时输入陶瓷颗粒,以陶瓷颗粒的动能补充金属颗粒动能的不足。已加速的陶瓷颗粒与基体相互作用,对所形成的涂层进行动力加工。由此获得密实均匀的塑性金属涂层,例如,铝、铜、锌和镍。这种动力金属化过程称为“聚美特”(Dymet)技术(65)。

由于陶瓷颗粒对喷嘴断面的强烈腐蚀,因此需要从根本上改变实现喷涂的方法。首先应该避开颗粒流通过喷嘴临界断面。在设计设备时,把混合粉末输入口安装在喷嘴的扩展部位,

临界断面之后。用这种方法，他们研制生产了气体动力喷涂机，其压缩空气只有 5 大气压（66-68）。

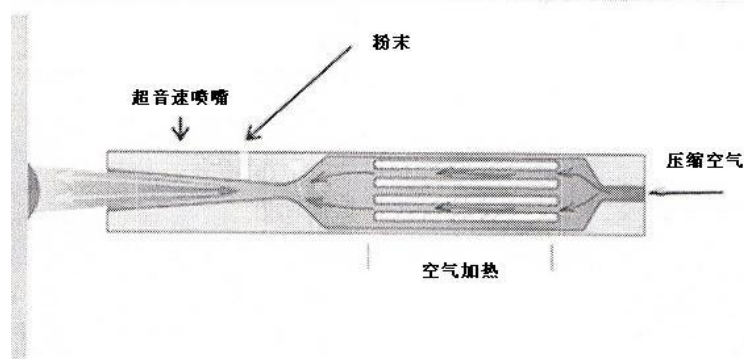


图 5 “集美特”装置示意图
（由气体加热器，粉末供给筒，粉末喷射组和拉瓦尔喷嘴等四部分组成）

加速用的气体要求低和设备所需功率小，保证奥柏尼斯克粉末喷涂中心（俄罗斯）设计生产了结构紧凑，携带方便的一系列“聚美特”喷涂设备（68）。这些设备应用广范，甚至在小型的车间或作坊都适合采用。加拿大“CenterLine” 公司购买“聚美特”技术，生产了移动式设备（69），但它只能在北美销售。

由于出现了对加速气体要求低和粉末消耗少的低压气体动力喷涂设备（70,71），所以产生了新名称，“高压气体动力喷涂”和“低压气体力喷涂”之分或称“高压冷喷涂” (High pressure cold spray)和“低压冷喷涂” (Low pressure cold spray)（2）。

近十年以来，大量的研究工作加深了对气体动力喷涂技术的理解和研制了许多实用的气体动力喷涂设备。

X·克列也在 2006 年艾尔金（Эрдинг）（72）会议上提出的图示，很好地说明气体动力喷涂技术的发展。图 6 反映了采用 30 大气压的氦气（灰亮色椭圆表示）和氮气（暗灰色椭圆表示）的经典方法的发展变化步骤。椭圆用于描绘，当尺寸为 20 微米变到 50 微米的铜颗粒冲击阻碍物时的温度变化区和速度变化区。喷嘴的优化和气体加热温度的增加，能提高颗粒的速度和温度（图中用 1-5 表示）。这里，划细线条的区域是表示两种不相干而独立的意洛瓦低公司的技术（I）和聚美特（Dymet）技术（D）。

由图 3 可以看出，在经典方法发展的范围内，增加速度和提高温度能保证喷嘴断面和结构优化，同时也能增加能量在过程中的吸收。目前已达到的成果是，尺寸为 20—70 微米铜颗粒的沉积效率大于 90%，结合力大约为 80 兆帕。此时，氮的消耗量为 2 米³/分，压力为 30 大气压，加热温度达 900℃。为了达到以上结果，采用氮气的话，其加热温度可以减少一倍

“Inovati”（意洛瓦低）的设备只能采用氮气工作，但它压力和气体消耗大大地减少；因为它是采用低于音速的气流，加热气体的功率也变得很小。从图 6 中也可以看到：I 指的是 Inovodi 技术的情况，它的喷涂效率达 60%。但由于气体消耗量小，它的总生产率也会下降。

为了节约氮气，采用了回收系统，因此整个系统需要密封

“聚美特”技术采用了空气喷涂，气体消耗量为 0.5 米³/分，压力为 5—8 大气压。这限制了颗粒的速度范围（请参看图 6 中，D）。金属颗粒沉积的效率比其他方法低，约为 50%，

因为加入双相混合物中的陶瓷颗粒，基本上被基体弹回。总的沉积效率约 20-30% 。由于气体消耗小，总生产效率同样受到粉末材料消耗的限制，为 0.5-0.6 克/秒

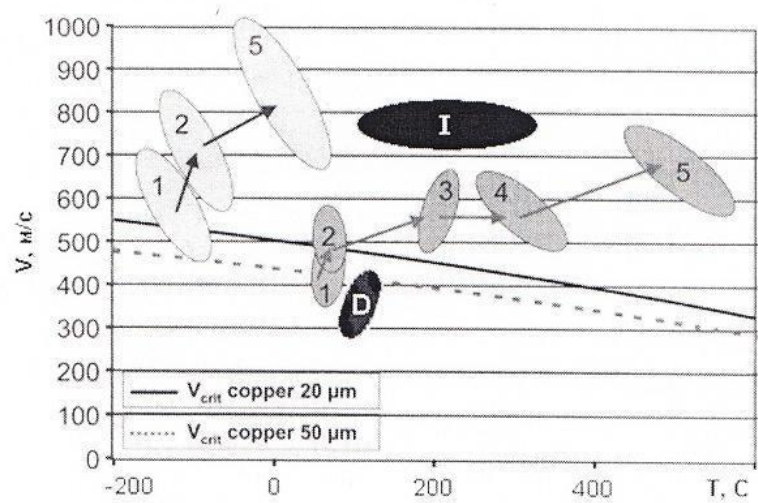


图 6，铜颗粒在阻碍物前的速度和温度图示

亮椭圆 1-5 表示 Kinecics 氮气设备的在各个发展阶段的图示

暗椭圆 1-5 表示 Kinecics 氮气设备的在各个发展阶段的图示

黑椭圆(I)(D)分别表示意洛瓦低（Inovati）技术(和聚美特（Dymet）技术的图示

（四）气体动力喷涂技术实际采用的设备

大多数气体动力喷涂技术的研究，促使各单位设计制造了各种不同的喷涂设备。这些自制的设备是在实验室内设计制造的；它们大多数，不是单台为从事实验研究工作用，就是为了某项特定任务的需要而设计制造的。

目前能批量生产供应市场的气体动力喷涂设备的单位有：CGT（德国）、Интерметкомпозит（IMC）（俄罗斯）、Inovati（美国）和 ОЦПН（OPSC）（俄罗斯）。这四家主要技术参数列入下表：

表 2

生产者	CGT		Inovati	IMC	OPSC
设备型号	Kinetics-3000	Kinetics-4000	KM	НГА-5	Dymet
工作气体	氮 / 氮	氮 / 氮	氮	空气	空气
压力，大气压	25-30	30-40	3.5	10-15	5-8
消耗量，米 ³ /分	2-4	2-4	0.2	2	0.4
功率，千瓦	30	47	2.5	18	3.5

“Kinetics”设备是在 X.克列也的领导下研究工作的基础上，由 CGT 公司生产的，并在电气工业中找到了应用，即在散热片上涂铜层。另外，还有一些公司曾有个别定货。大部分还是在实验室作研究使用。图 7 所载的就是设备的图片。Kinecics 设备的噪声很大，工作时必须采用隔音操作箱。采用“Kinetics”设备，其喷嘴一般要固定在工业机器人操作装置上。

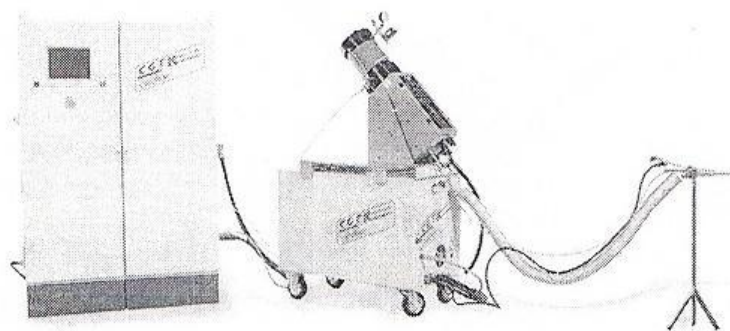


图 7 CGT 公司生产的 Kintics-3000 设备

Интерметкомзит (IMC) 公司在尤·吉库研究的基础上，采用经典气体动力喷涂技术，设计制造了 HГA 型号的喷涂设备。其供粉末的位置，在喷嘴的临界断面处。但该设备目前尚未找到广泛的应用。由于功率小和气体消耗少，它可以手动操作，



图 8 Интерметкомзит (IMC) 公司生产 HГA-5 型喷涂设备

Inovati 公司生产的 KM 型设备，既可以在钢结构件上喷涂局部铝涂层，也可以在航天和航空技术中制造专用涂层。尽管该产品粉末沉积效率高，但其应用范围也是有限的，因为它必须采用氦气驱赶颗粒。采用氦气回收装置，可以扩大它的应用范围。KM 型喷涂设备示于图 9。为了实现氦气的回收，整个喷涂过程必须在密闭环境中进行。

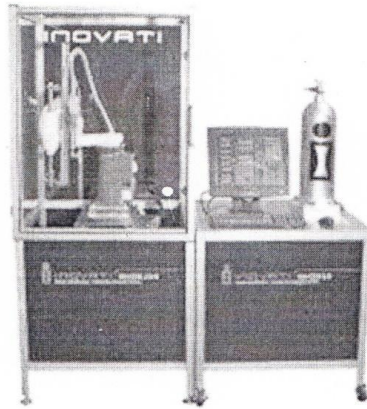


图 9, Inovati 公司生产的 KM 型喷涂设备

奥柏尼斯粉末喷涂中心生产的“聚美特”（Dymet）设备，具有非常低的驱动气体的要求和够低的功率要求。它们主要是手动操作，也可以利用操作器进行自动操作。聚美特-405 型设备示于图 10。尽管该设备的生产效率和粉末应用效率都低，但它可以解决局部修理和小批量生产中的许多技术任务。由于设备结构紧凑和对工作气体要求很低，聚美特产品已得到了广泛的应用。目前已有几百台设备应用在俄罗斯和国外（本文写于 2006 年。到 2012 年为止，单在俄国就有一千多个单位在使用聚美特设备。另外，有 17 个国家在应用。加拿大购买了聚美特技术，生产了产品，但只能在北美销——译者）。



图 10 OCSP 生产的聚美特-405 型（已改为 423 型）可携带的设备

气体动力喷涂技术与热喷涂方法比较，首先是材料不存在氧化和基体被加热的温度低；特别重要的是低气孔率和厚金属涂层的气体渗透性低。其次，其厚度达到 10 毫米时，涂层与基体的结合力仍然很高。

目前气体动力喷涂技术已得到了很好的实际应用。为了改善电接触和热交换，研制了铜涂层；在新西北利亚理论和实用力学研究所研制了铝电缆头上喷铜层的设备。CGT 公司的 Kinetics-3000 已应用于电子技术中铝散热器上喷铜层。聚美特设备已用于电解槽的铝触点上喷涂铜；在大型铜母线接触面上喷涂锡和铝，以及在强电流铝母线接触表面上喷涂镍和铜。一般地说，在电工技术中，喷涂层比较薄，约小于 1 毫米。

同样可以用薄涂层来作防锈保护。Inovati 公司的 KM 设备用于在钢结构表面上喷涂局部

的铝层。聚美特设备用于：在焊缝和钢结构的选定表面上局部喷涂锌层；喷涂铅和镍，保护工作在腐蚀环境中的另件。镍涂层和铝涂层能降低高温腐蚀的速度。

气体动力喷涂技术在复原和改变金属另件的尺寸（例如铝合金另件）的工作范围内具有广泛的应用。此时，涂层的厚度，从十分之几毫米到几十毫米。这样以来，说是喷涂，还不如说是生长金属。例如，Praxair 公司用气体动力喷涂技术复原已磨损的螺旋桨飞机推进器的叶片。聚美特设备，结构紧凑，使用方便，广泛地应用于汽车发动机缺陷的修理；小批量生产中，修正铸件的缺陷和聚合物造模的模型。

气体动力喷涂所制造的涂层的气体渗透率低。这允许不采用聚合物也能恢复金属结构的密封性。聚美特设备能用于在汽车空调器的铝薄壁散热片；在航天技术中消除制件焊接连接中的微气泄漏；以及已在库恰托夫研究所（原子能所）用于复原回转加速器铜制外壳的密封性。

在任何金属和陶瓷表面上，采用气体动力喷涂技术，获得任意厚度的涂层。因此，气体动力喷涂技术和聚美特设备，在很多生产制造和修理部门获得推广和应用。

（五）结论

气体动力喷涂方法理所当然地是金属喷涂技术之一，它属于低温和高速的技术领域。颗粒的变形和固化过程是在足够低的温度下进行的。也就是说，颗粒始终是处在固体状态，而不是液体状态。因此，要加强研究和设计制造出专门设备。

由于技术参数的区别和各方研究人员的假设前提不同，本人所介绍的金属喷涂技术具有很多名称：“冷喷涂”，“快速喷涂”，“运动金属化”“动力喷涂”和“动力金属化”等，不管他们有什么技术差异，但它们都包涵着同一个意思。金属颗粒加速是按照气体动力学定律进行的，金属颗粒与基体的相互动力作用也是如此。因此，采用名称“气体动力喷涂”，在整体上能比较完善地描绘本方法和过程的实质。

目前，随着气体动力喷涂技术研究的发展，它在修理行业和生产制造行业中，实际应用会更加广泛。可以肯定地说，气体动力喷涂技术已进入了实际应用的阶段，它将在现代涂层制造技术中占有一席之地。

参考文献

1. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. Москва, «Интермет Инжиниринг», 2004, 624 с.
2. Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
3. Proceedings of the 7th Colloquium on HVOF Spraying. C. Penszior, P. Heinrich, Eds., November 9-10, 2006 (Erding, Germany), Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., 2006.
4. Алхимов А.П., Нестерович Н.И., Папырин А.Н. Экспериментальное исследование обтекания тел сверхзвуковым двухфазным потоком. – ПМТФ, 1982, № 2, с.66-74.
5. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод “холодного” газодинамического напыления. - Докл. АН СССР, 1990, т.315, № 5, с.1062-1065.
6. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Нестерович Н.И. Метод “холодного” газодинамического напыления. - Тезисы докл. международн. рабоч. совещ. “Высокотемпературные запыленные струи в процессах обработки порошковых материалов (Новосибирск, 1988)”, Новосибирск, ИТФ СО АН СССР, 1988, с.100-103.
7. Alkhimov A.P., Papyrin A.N., Kosarev V.F., Nesterovich N.I., Shushpanov M.M. Gas Dynamic Spraying Method for Applying the Coating. - US Patent # 5302414, 1994.
8. Papyrin A. Cold Spray Technology. – Advanced Materials & Processes, September 2001, V. 159, N 11, pp.49-51.
9. Алхимов А.П., Клиников С.В., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Газодинамическое напыление. Исследование плоской сверхзвуковой двухфазной струи. – ПМТФ, 1997, т.38, № 2, с.176-183.

10. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления. – ПМТФ, 1998, т.39, № 2, с.182-188.
11. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Течение в сверхзвуковом сопле большого удлинения с прямоугольным сечением. – Теплофизика и аэромеханика, 1999, т.6, № 1, с.51-58.
12. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Натекание сверхзвуковой струи прямоугольного сечения на плоскую преграду. – ПМТФ, 2000, т.7, № 2, с.225-232.
13. Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Klinkov S.V. The features of cold spray nozzle design. – Journal of Thermal Spray Technology, 2001, V.10, p.375-381.
14. A.N. Papyrin, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev. Modeling of particle – substrate adhesive interaction under cold spray process. - Proceeding of ASM Cold Spray 2004 Conference, September 27-28 (Akron, Ohio, USA), ASM International, 2004.
15. A.N.Papyrin, V.F.Kosarev, S.V.Klinkov. Effect of the substrate surface activation on the process of cold spray coating formation. - Explore its surfacing potential: Proceedings of the 2005 International Thermal Spray Conference, May 2–4, 2005 (Basel, Switzerland), DVS-Verlag GmbH, 2005.
16. A.N.Papyrin, V.F.Kosarev, S.V.Klinkov. Effect of the coating erosion on the cold spray process. – Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
17. Klinkov S.V., Kosarev V.F. Measurements of Cold Spray Deposition Efficiency. - Journal of Thermal Spray Technology, 2006, V.15, N 3, pp.364-371.
18. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Исследование взаимодействия двухфазного потока с нагретой поверхностью. – Теплофизика и аэромеханика, 1998, т.5, № 1, с.67-73.
19. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Исследование теплообмена сверхзвуковой плоской струи с преградой в условиях газодинамического напыления. – Теплофизика и аэромеханика, 2000, т.7, № 3, с.389-396.
20. А. П. Алхимов, А. И. Гулидов, В. Ф. Косарев, Н. И. Нестерович. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду. – ПМТФ, 2000. т.41. № 1, с.204-209.
21. А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев. Экспериментальное исследование деформации и соединения микрочастиц с преградой при высокоскоростном ударе – ПМТФ, 2000, т.41, № 2, с.47-52.
22. А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, В.В. Лаврушин, О.А. Алхимов. Установка газодинамического напыления переносного типа. – Труды 6-й международной конференции «Пленки и покрытия», Санкт-Петербург, 2001, с.221-225.
23. Токарев А.О. Струение алюминиевого порошкового покрытия, полученного холодным газодинамическим напылением. - Металловедение и термическая обработка металлов, 1996, №3, с.36-39.
24. В.К. Крыса, А.Г. Мухамедзянов, В.К. Семенченко. Способ нанесения покрытий из порошковых материалов и устройство для его осуществления. – Патент РФ № 2213805, 2003.
25. П.В. Никитин, А.Г. Смолин. Устройство для нанесения покрытий на внешние поверхности деталей. – Патент РФ № 2193454, 2002.
26. Ю.В. Дикун. Установка для газодинамического нанесения покрытия из порошковых материалов. - Патент РФ № 2181390, 2002.
27. Данченко В.Н., Миленин А.А., Головкин А.Н. Теоретический анализ деформирования частиц порошка в процессе высокоскоростного напыления. – Доклады национальной академии наук Украины, 1995, № 11, с.46-49.

28. В.Н.Данченко, С.В.Кондратьев, А.Н.Головко. Нанесение металлических покрытий методом газодинамического напыления. – *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 1997, № 3, с.46 – 49.
29. Dykhuizen R.C., Smith M.F. Gas Dynamic Principles of Spray. - *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, V.7, N 2, pp.205-212.
30. R.C. Dykhuizen, M.F. Smith, D.L. Gilmore, R.A. Neiser, X. Jiang and S. Sampath. Impact of High Velocity Cold Spray Particles. - *Journal of Thermal Spray Technology*, 1999, V. 8, N 4, pp.559-564.
31. D.L. Gilmore, R.C. Dykhuizen, R.A. Neiser, T.J. Roemer and M.F. Smith. Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process. - *Journal of Thermal Spray Technology*, 1999, V. 8, N 4, pp.576-582.
32. Albert Kay and J. Karthikeyan. Advanced Cold Spray System. - US Patent # 6502767, 2003.
33. Albert Kay and J. Karthikeyan. Cold Spray System Nozzle. - US Patent # 6722584, 2004.
34. R.S. Lima, J. Karthikeyan, C.M. Kay, J. Lindermann, C.C. Berndt. Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured WC-Co coatings. - *Thin Solid Films*, 2002, V. 416, pp.129-135.
35. K. Balani, T. Laha, A. Agarwal, J. Karthikeyan, and N. Munroe. Effect of carrier gases on microstructural and electrochemical behavior of cold-sprayed 1100 aluminum coating. – *Surface and Coatings Technology*, 2005, V. 195, pp.272-279.
36. R.S. Lima, J. Karthikeyan, C.M. Kay, J. Lindermann, C.C. Berndt. Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured WC-Co coatings. - *Thin Solid Films*, 2002, V. 416, pp.129-135.
37. T.H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E. Teets, J.J.Moleski, D.W. Gorkiewicz, R.P. Tison, D.R. Marantz, K.A. Kowalsky, W.L. Riggs, P.M. Zajchowski, B. Pilsner, R.C. McCune, K.J. Barnett. Kinetic spray coatings. - *Surface and Coatings Technology*, 1999, V. 111, pp.62-71.
38. Z.B.Zhao, B.A. Gillispie and J.R. Smith. Coating deposition by the kinetic spray process. - *Surface and Coatings Technology*, 2006, V. 200, pp.4746-4754.
39. Van Steenkiste T.H., Smith J.R., Teets R.E. Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles. - *Surface and Coatings Technology*, 2002, V. 154, N 2, pp.237-252.
40. T.H. Van Steenkiste, and J.R. Smith. Evaluation of Coatings Produced via Kinetic and Cold Spray Processes. - *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, V. 13, N 2, pp.274-282.
41. Van Steenkiste, Thomas Hubert; Smith, John R.; Gorkiewicz, Daniel William; Elmoursi, Alaa A.; Gillispie, Bryan A.; Patel, Nilesh B. Method of maintaining a non-obstructed interior opening in kinetic spray nozzles. - US Patent # 6896933, 2005.
42. V. Champagne, D. Helfritch, P. Leyman, R. Lempicki and S. Grendahl. Nozzle Design Influence on the Supersonic Particle Deposition Process. / U.S. Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, MD. - *Proceeding of ASM Cold Spray 2004. Conference*, September 27-28 (Akron, Ohio, USA), ASM International, 2004.
43. D. Helfritch and V. Champagne. Optimal Particle Size for the Cold Spray Process. - U.S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. - *Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference*, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
44. T. Eden, D.E. Wolfe, J. Potter, A. Isaacson, S. Illyes, A. Jaroh, L. Sabo. Cr₃C₂-Based Coatings Applied by High Velocity Particle Consolidation (HVPC) for Wear Resistant Applications. / Applied Research Laboratory The Pennsylvania State University. - *Proceeding of ASM Cold Spray 2004 Conference*, September 27-28 (Akron, Ohio, USA), ASM International, 2004.
45. D. Zhang, P.H. Shipway, D.G. McCartney. Particle-Substrate Interactions in Cold Gas Dynamic Spraying. - *Advancing the Science and Applying the Technology: Proceedings*

- of the 2003 International Thermal Spray Conference, B.R. Marple and C. Moreau, Ed., May 5-8, 2003 (Orlando, FL, USA), ASM International, 2003.
46. E. Calla, D.G. McCartney, P.H. Shipway. Deposition of copper by cold gas dynamic spraying: an investigation of dependence of microstructure and properties of the deposits on the spraying conditions. - *Advances in Technology and Application: Proceedings of the 2004 International Thermal Spray Conference*, May 10-12, 2004 (Osaka, Japan), ASM International, 2004.
 47. B. Jodoin. Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation. - *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, V. 11, N 4, pp. 496-507.
 48. P. Richer, B. Jodoin, L. Ajdelsztajn, K. Taylor, E. Sansoucy, M. Johnson. Effect of Particle Geometry and Substrate Preparation in Cold Spray. - *Explore its surfacing potential: Proceedings of the 2005 International Thermal Spray Conference*, May 2-4, 2005 (Basel, Switzerland), DVS-Verlag GmbH, 2005.
 49. E. Sansoucy, B. Jodoin, P. Richer, L. Ajdelsztajn. Effect of Spraying Parameters on the Microstructure and Bond Strength of Cold Spray Aluminum Alloy Coatings - Building on 100 Years of Success: *Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference*, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
 50. K. Sakaki. Influence of Nozzle Geometry on Expansion State of Gas Jet and Metal Coating Properties in Cold Spray Faculty of Engineering. / Shinshu University, Japan. - *Proceeding of ASM Cold Spray 2004 Conference*, September 27-28 (Akron, Ohio, USA), ASM International, 2004.
 51. C.-J. Li, W.-Y. Li. Deposition characteristics of titanium coating in cold spray. - *Surface and Coatings Technology*, 2003, V. 167, pp.278-283.
 52. C.-J. Li, W.-Y. Li. Examination of the critical velocity for deposition of particles in cold spraying. - *Explore its surfacing potential: Proceedings of the 2005 International Thermal Spray Conference*, May 2-4, 2005 (Basel, Switzerland), DVS-Verlag GmbH, 2005.
 53. H. Assadi, F. Gartner, T. Stoltenhoff, H. Kreye. Bonding mechanism in cold gas spraying. - *Acta Materialia*, 2003, V.51, pp.4379-4394.
 54. Stoltenhoff T., Kreye H., Richter H.J. An analysis of the Cold Spray Process and its Coatings. - *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, V.11, N 4, pp.542-550.
 55. C. Borchers, F. Gartner, T. Stoltenhoff, and H. Kreye. Microstructural bonding features of cold sprayed face centered cubic metals. - *Journal of Applied Physics*, 2004, V. 96 (8), pp.4288-4292.
 56. P. Richter, H. Hoell. Latest Technology for Commercially Available Cold Spray Systems. - *Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference*, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
 57. T. Schmidt, F. Gartner, H. Kreye. Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition. - *Acta Materialia*, 2006, V. 54, pp. 729-742.
 58. T. Schmidt, F. Gaertner, H. Kreye. New Developments in Cold Spray Based on Higher Gas- and Particle Temperatures - *Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference*, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
 59. A. Holl, P. Richter. New components for cold spraying. - *Proceedings 7th Colloquium on HVOF Spraying*. C. Penszior, P. Heinrich, Eds., November 9-10, 2006 (Erding, Germany), Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., 2006.
 60. R.M. Tapphorn, H. Gabel. The Solid-State Spray Forming of Low-Oxide Titanium Components. - *Journal of Metals*, 1998, V. 50, N 9, pp. 45-46,76.
 61. R.M. Tapphorn, H. Gabel. Powder fluidizing devices and portable powder-deposition apparatus for coating and spray forming. - *US Patent # 6715640*, 2004.

62. H.Gabel. Kinetic Metallization compared with HVOF. – Advanced Materials & Processes, 2004, V. 162, N 5, pp.47-48.
63. Буздыгар Т.В., Каширин А.И., Клюев О.Ф. Портнягин Ю.И. Способ получения покрытий. - Патент РФ № 2038411, 1993.
64. A.Shkodkin, A.Kashirin, O.Klyuev, T.Buzdygar. Metal particles deposition stimulation by surface abrasive treatment in gas dynamic spraying. – Journal of Thermal Spray Technology, 2006, V. 15, N 3, pp.382-386.
65. A.Shkodkin, A.Kashirin, O.Klyuev, T.Buzdygar. The basic principles of DYMET technology. - Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
66. О.Ф.Клюев, А.И.Каширин, А.В.Шкодкин. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 1. Процесс формирования покрытий. - «Сварщик», 2003, №4 (32), с.25-27.
67. О.Ф.Клюев, А.И.Каширин, А.В.Шкодкин, Т.В.Буздыгар. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 2. Применение покрытий. - «Сварщик», 2003, №5 (33), с.24-27.
68. О.Ф.Клюев, А.И.Каширин, А.В.Шкодкин, Т.В.Буздыгар. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 3. Оборудование «ДИМЕТ». - «Сварщик», 2003, №6 (34), с.25-27.
69. J. Villafuerte, Cold Spray: A new technology. - Welding Journal, 2005, V. 84, N 5, pp. 24-29.
70. R. Gr. Maev, Ev. Leshchinsky. Low Pressure Gas Dynamic Spray: Shear Localization during Particle Shock Consolidation. - Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
71. H. Weinert, E. Maeva, V. Leshchinsky. Low Pressure Gas Dynamic Spray Forming Near-net Shape Parts. - Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, 2006.
72. H. Kreye, F. Gartner, T.Schmidt, T.Klassen. Cold Spraying – from thermal spraying to kinetic spraying. - Proceedings 7th Colloquium on HVOF Spraying. C. Penszior, P.Heinrich, Eds., November 9-10, 2006 (Erding, Germany), Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V.. 2006.

全国总代理



北京创造彼得科贸有限责任公司
BEIJING CHUANGXUAN BIDE TECH&TRADE LTD

北京创造彼得科贸有限责任公司

联系电话 +86(0)10-62669472, +86(0)18600363502

传真 +86(0)10-88511816

电子邮箱 support@chuangxuanbide.com

网址 www.chuangxuanbide.com