

国外

自熔合金表面喷焊技术

上海钢铁研究所顾德骥 主编

442

上海科学技术文献出版社

前 言

随着科学技术的日益发展，对机械设备的要求愈形严格，采用新工艺、新技术以不断提高机械设备的效率和延长其服役寿命已愈来愈引起人们的注意。热喷涂技术作为表面处理的一个领域正获得应用和发展。而其中自熔合金表面喷焊技术由于设备与操作较简便、效率又高，国外较普遍地用于提高产品和设备性能，以延长其使用寿命。在国际上，美国、日本、瑞士等工业较发达国家均有专业公司从事这方面的研究、设备制造和原料供应工作。

国外自熔合金表面喷焊作为耐磨、耐蚀防护技术已广泛应用于石油化工、冶金、矿山、机械、水电、玻璃工业、造纸工业等部门。近年来，国内对该项技术也有所重视，并有了一定的发展。

为了贯彻“洋为中用”的原则，加速实现四个现代化，适应我国工农业生产发展的需要，我们查阅了六十年代以来的国外自熔合金表面喷焊技术的有关资料，并按照原理、特征、材料、喷焊工艺与设备、应用等方面，编译了本译文集供国内从事喷焊技术工作的生产、研究人员参考。

由于水平限制，译文中可能有缺点和错误之处，请予批评指正。

编 者

一九七九年四月

目 录

1. 粉末喷焊中的最近发展	(1)
2. 自熔合金喷焊	(10)
3. 喷焊Ni-Cr-B-Si 合金和 C-Co-Cr-W-B 合金.....	(19)
4. 喷涂技术的最近动向	(26)
5. Colmonoy 喷焊法及其应用	(29)
6. 新式等离子喷焊及其运用	(40)
7. 耐磨、耐腐蚀和抗氧化的喷焊金属涂层	(62)
8. 论 Ni-Cr-B-Si 硬质涂层合金的结构及其粘合作用	(71)
9. 火焰粉末喷射的自熔合金的耐磨性	(75)
10. 自熔火焰喷焊材料	(85)
11. WC 弥散型自熔合金的各种性能	(90)
12. 高温火焰喷射粉末与工艺	(95)
13. 美国焊接协会的自熔合金喷焊操作标准	(100)
14. 日本自熔合金喷焊操作规范	(111)
15. 陶瓷火焰喷涂	(116)
16. 碳化钨涂层轧辊的摩擦及磨损特性	(121)
17. 喷焊自熔合金的表面硬化法实例	(131)
18. 用硬质合金的表面喷焊给磨损的泵环以新的生命	(139)
19. 金属喷涂技术应用目录	(140)

粉末喷焊中的最近发展

提要 本文回顾了粉末喷焊工艺的所有技术方面，讨论了甚为流行的粉末的性质。对所有各种形式的喷炬、重力和空气辅助枪以及等离子-弧设备也加以讨论，并对它们的各种工作的潜力作了评价。

一、引言

近几年来，由于人们对粉末的化学需要具有较好的理解，较好及较有效的喷焊工具以及许多廉价粉末的大量供应，因而粉末的应用有了很快的增长，尤其是玻璃制造业和矿业加工业成了粉末的大量使用者，并促进建立了广阔的粉末市场。上述两种工业都需要有化学稳定和在各种不同弯曲表面和形状上具有采用其他方法所很难并很不满意地达到的耐腐蚀性光洁面。

在许多国家中，建立了许多粉末制造厂，随着在镍的开采和精炼中出现的突然兴隆就引起了在这个特殊领域中继续不断地扩展——镍变成使用大量粉末的基础。就整体来说，澳大利亚工业现在每年采用很多粉末作为涂层之用。但影响发展的主要因素是有效地应用和应用技术。

在镍-硅和硼的系统中发展的钎焊合金，在真空钎焊的条件下，具有较高的流动性和良好的焊接接头强度。也曾注意到，这种合金中的某些合金当显露在物件表面时，是极硬和具有极低的摩擦系数，后者性能的发展，产生了目前有用的硬面材料的领域。

粉末

很好地控制颗粒形状和大小，对粉末喷射的过程是重要的。在这里，为获得良好的流动性，粉末的几何形状应该是圆球形的。

粉末是以高频熔化的合金制成——常在真空中进行。把液体合金以可控的速率倾入一只大容器的顶部，在这里，它可以自由落下并裂成小滴，小滴的大小是以合金的成份、气体的形式及容器内气体的压力为函数而控制的。颗粒通常在容器的底部水中淬冷，在此基础上，就可以发展成近乎连续的操作过程。

因为颗粒大小对通过粉末工具能否具有良好的性能是很重要的，正确的大小分布可以用选择的分筛来获得，颗粒的大小分布随着各种应用的范围而不同。

金属的每一小粒或晶粒因而是完全由同类和均匀熔化的合金成份所组成。各种不同的颗粒的机械混合物不可能构成满意的涂层，因为选择性的熔化和颗粒分布及流动性的偏差能造成合金小滴的不均匀性。

大多数合金是在以氧乙炔焰作为方便而灵活的热源的熔化范围内发展的。与局部极高温的电弧相比，采用较广而又加热较慢的氧乙炔焰为热源能获得许多应用上的利益。

二、粉末工艺学

大量的粉末是以镍为基础的,当镍和一种或几种元素如硼、硅、碳、铬、锰及铜合成合金时,合金的熔点将降低到可以容易被氧乙炔焰所熔化的范围而喷焊工艺就是根据这一事实起源的。镍的熔点为 1452°C (2645.6°F),约为92%的镍, 3.50%硼和4.50%硅的合金具有温度在 1000°C (1832°F)范围的固-液相状态,这种合金元素确实改变了性质,所以就有可能在相当广阔的限度内从 $R_{\text{b}} 85$ 到 $R_{\text{c}} 65$ 之间调节其硬度,并具有耐腐蚀性和抗氧化性。也有几种以铁和钴为基础的合金,但这些合金的熔点较高,在 $1200\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ($2191\sim 2372^{\circ}\text{F}$)之间,具有反应缓慢的性质,并很难采用氧乙炔焰。它需要更高温度的热源,如以后所述的等离子弧。

除了降低熔点外,第二个有助于镍合金系统的成功和发展的重要因素,就是镍与硼、硅合成的粉末具有自熔的性质。这种机理是有趣和值得作简单介绍的,因为它说明了所需的实际步骤和应用时应注意到的若干现象。基本上,合金在中间温度下氧化,并在更高温度下,这些氧化物形成一种焊剂。在喷射过程中,金属粉末被加速和加热,直到颗粒变成稍稍可塑的状态。在加热期间,火焰中的氧使颗粒的表面稍稍氧化。当它们冲击着工件时,在接触点上,它们就自行焊合起来,并以良好的多孔质方式与工件焊合。当粉末被加热到它的熔点时,硅和硼扩散到颗粒的外面,并与氧化物起反应,形成硼-硅酸盐。就是这个产物,它具有助焊性质,并在熔合完毕后,在沉积的表面,会看到小的玻璃样的黑点。实际上,在应用之前,把工件轻轻地预热到蓝热程度,约 500°F (260°C),形成一种很轻的氧化铁薄膜。加热是必需的,以防止细粒的骤然淬冷,并确保其过渡层粘合。在硼-硅酸盐形成之后,及后继的熔融期,基底金属表面的氧化膜被熔解,并与粉末完全熔化确保了完好的钎焊焊接,并且在表面上形成一层镍合金的均匀薄膜。

很明显,熔剂的数量取决于所给的粉末的数量,所以,如果把基体物质过分加热或保持在极长的高温时间,那末就会形成比焊剂所能形成的还要多的氧化物。其结果可以从下述情况中看出:在粉末和基底金属之间没有连接好,在小点形状的薄膜中有裂缝,使液体合金不能完全覆盖。由于在液体中形成放气作用或氧化物小片的悬浮而造成合金中有许多小孔。后者可能只在已经把表面精细地磨光后才暴露出来。这些因素都应该在钢、不锈钢及合金钢的基底金属上的喷焊-钎焊时考虑到。

以生铁为基底金属时,引起了其他有趣的现象,它是与石墨的成份有关。生铁中的石墨片是很大的,如果过热或熔融温度的周期过长时,就会使镍合金很快地穿入铁内。当小形的生铁柱塞头上的喷涂层保持熔融状态达两分钟时,就能穿入深达 $1/8$ 英寸。这种形式的穿入常伴着在靠近生铁和喷涂层的交界面处有许多粗大的小孔。可以设想,液体合金把石墨带进溶液,并经过石墨孔隙和沿着晶粒交界面而穿入。有某些证据认为:在生铁和Ni-Si-B合金之间有些硅的迁移或分配,这就会使铸铁发生分裂而有些铁也会进入溶液。

小片的铸铁和S.G.(球形石墨)或孕育铸铁并不显示这些明显的现象。

易切削钢或含硫钢,由于在交界面处形成一种低熔点的脆性的镍硫化物,而不能产生满意的焊合。在凝固和冷却之后,喷涂层常常会脱离基底金属,好象一个完全的外壳。

来自粉末的焊剂成份是在 $750\sim 900^{\circ}\text{C}$ ($1382\sim 1652^{\circ}\text{F}$)的范围内形成的。在低于这个温度时,表面主要是氧化镍和氧化铬。在通常的商业合金中是有加入铬的。这种涂层在温度达

到 500°C (932°F) 时, 将产生良好的化学和抗高温氧化能力。这些性能是最适合于玻璃工业, 因为玻璃是在 900°F (482°C) 和 1100°F (538°C) 之间的塑料状态下与模具面的喷涂层接触, 由于氧化镍和氧化铬并不和氧化硅混合, 玻璃就不会在半液体状态下粘着表面。同时, 由于极低的摩擦系数, 喷涂层具有极好的耐磨性能。

Ni-Cr-Si-B 合金的湿润性是非常好的, 对于不锈钢、铬、钨合金以及碳化钨, 它们也都很好。事实上, 与碳化钨的小粒沉淀相混合形成基体合金, 因而就扩展了它们如硬覆盖物和对耐磨损的应用范围。高达 80% 碳化钨对 20% 基体的比率是很正常的。再高的比率也是可能的, 但在实际上, 由于收缩和缺少延性, 沉积物会产生严重的裂纹。

一般认为 Ni-Cr-Si-B 合金只适宜于供涂层之用, 但, 它们具有有用的抗张性能, 当用以熔接铸铁时, 最为有效。抗张强度为 40,000 磅/英寸² 或更高些, 虽然延伸性是不高的, 但用作铸铁熔接, 还是很足够的。对于铸铁的接头, 要它发挥灰口铁的全部强度是很有希望的, 而当在采用镍电弧焊时, 由于在热影响区域存在马氏体/贝氏体的薄层而只能发挥 80% 的强度。这种应用对于以铸铁制造的特殊管弯头和接头以及泵铸件的套衬里和凸缘, 都有很大的潜力。

简单地看一下其他的粉末系统, 例如 Stellite 6 的钴合金可以喷射得相当满意, 在用氧乙炔焰时, 可以自熔, 但局限于小块或相当薄的截面和边缘, 因为需要高温, 才能获得满意的流动性。在排气阀和热加工的剪切叶片的应用方面, 这种合金的性质及其有关的钴合金在抗热性方面是众所周知的。

铜-磷合金系统也是自熔的, 在复杂的铜管系统和电导体方面, 现已备有能做成很好接头的各种粉末。但是, 这个系统只能在纯铜或高铜合金, 如在一些青铜上才能自熔。对于含有锌的合金, 也即黄铜, 必须另加有个别的化学焊剂来处理氧化锌。在大多数例子中, 预先放置这种焊剂并不是一个问题。然而与镍和钴合金相比, 铜合金的应用场合是有限的。

直到现在还没有生产过适宜于喷焊工艺的铝合金。

用于喷焊的最最多的大量合金是镍基的, 这是由于它们的用途很广和容易应用所致, 对有些合金, 已经有几种美国标准起草出来。但是, 这些标准是很不严格的, 在每种标准中, 性能的变动是很大的。

三、用 具

输送粉末设备的基本原理和围绕它的若干变动仍然是很有用的和用途很广的工具(图1)。喷炬的原理是: 通过一个漏斗将粉末引入氧气流或混合气流, 并通过火焰从喷炬尖端喷出而到达工件上。当粉末通过火焰的过程被加热到稍稍塑性的状态, 并粘附在金属表面。只能以低速度推进粉末, 喷炬端部必须保持在离开表面 1 ~ 2 英寸以内, 这样使粉末仍然保存在火焰的包围之中。

这种喷炬是可以改变其干体的长度和形状来修改的, 以便使它能够过多地进入困难和局限的区域。在采用大火焰时, 采用水冷却以防止喷炬端部过热。每小时几盎司到高达每小时 3 磅左右的喷射沉积速度是可能的。

早期的喷炬本来是为小阀、模边及小轴工作的喷焊工艺之用。不过, 现在已经有了大型喷炬, 对于曲轴和泵套之类的重件就可以解决了。

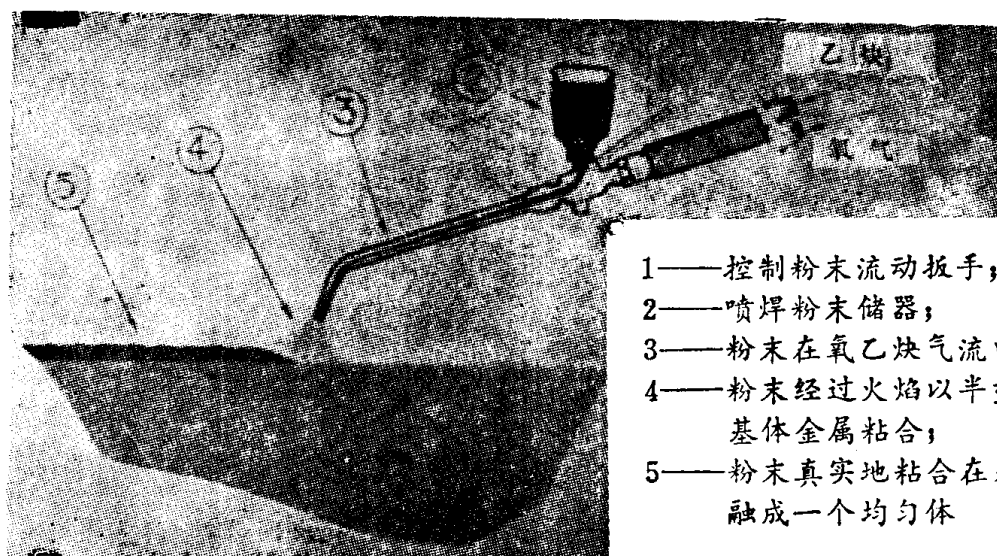


图 1 喷焊过程

这里解释两种不同的喷射工艺是必要的。

1. 喷焊*

在喷焊工艺中，如前所述，粉末是从喷炬喷射出来，在向前移动前，完全与表面熔合。当已有足够的粉末喷射沉积并把火焰连续地加热局部面积直到发生熔融时，就通过喷炬上的一个杠杆系统停止供粉。间断地压下杠杆，并慢慢地向前移动，就铺下了一条熔融焊合的金属带。

2. 喷射-后熔融**

此工艺需要把所需要厚度限于 0.015 英寸左右的粉末覆盖着整个表面，然后，将整块基底金属加热到使整个粉末层均匀地和平滑地熔融的温度。这个方法必须采用一个外加的大型加热喷炬，把基底金属升高到象樱桃红的温度。这是否有害，则要看部件的基底金属和/或其最终应用而定。

喷焊工艺对热处理部件和冶金术的重要结构提供最小的热骚动，但在沉积速度来说，这种工艺是受到限制的。

当需要较高的沉积速度或较大数量的喷射层时，则应采用更新设计改进的粉末喷射枪以及喷射-后熔融工艺。

在这种喷枪中(图 2)，把粉末从一个合成的喷嘴注入到火焰里，在这只喷嘴中，粉末的通道是靠近和平行于火焰孔。吸入粉末并运载粉末的气体是氧或空气。在较高的吸入压力条件下工作，粉末的压力是较高的，而喷射沉积速率也高达每小时 5~6 磅。喷枪离开工件更远，远达 9~10 英寸的距离，衬套式尖端的火焰能覆盖由粉末的碰撞所形成的多孔性烧结层面积。由于粉末流的飞溅和分散而引起的损耗，能达到很小，其正常的效率在 85~90% 左右。

* 即一步法——译注

** 也可称喷熔即二步法——译注

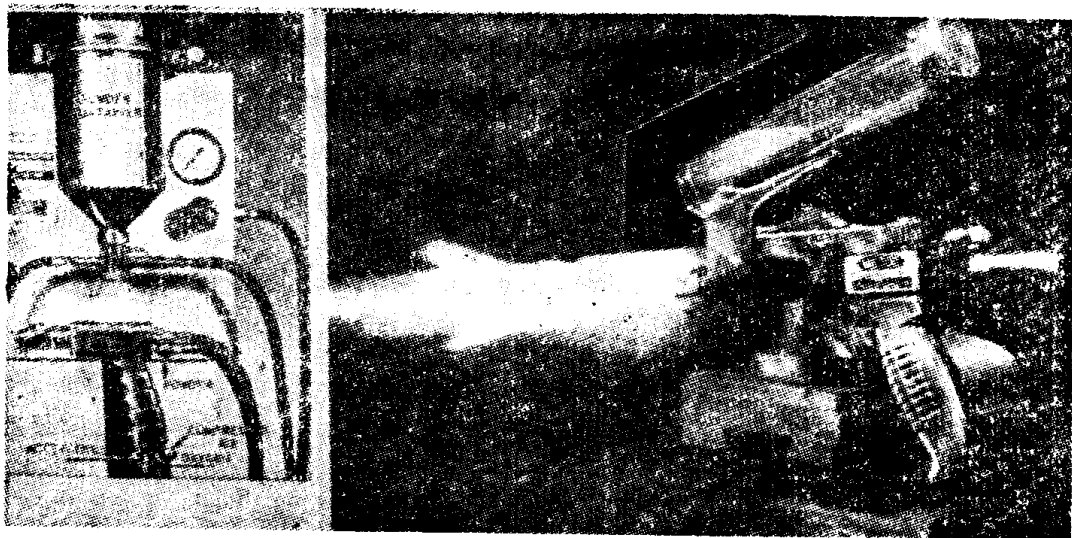


图 2

如果工件相当小，而又在大的物体上火焰还不足以宽到极快或有效的情况下，可以采用同一个喷炬作为熔融粉末之用，所以我们推荐一种大的多孔预热喷炬，并用很微弱的还原火焰。在喷射之后，对工件进行一次较长时间的再加热使温度维持在 $500 \sim 800^{\circ}\text{F}$ ($260 \sim 427^{\circ}\text{C}$) 以便保持热量，直到发生熔融为止。必须把火焰稍稍摇动，以防止局部过热。

在控制气氛或燃烧气体气氛中，依照工件的大小，采用炉内来熔融，也是实际可用的，但必须把温度调节得极高，以免长时间的曝置。较厚的喷射层可能会有泄出或塌沉的倾向，当熔化和扩散进入铸铁基底金属时，也可能发生这种不希望的现象。

对于能在车床中旋转以获得极光滑和均匀表面的圆柱体工件，喷射-后熔融工艺最为适宜。

为构造更简单、用途更广泛的喷射-后熔融工艺采用的一个喷炬的前景正在出现。进粉是依靠重力从一个漏斗直接进入，是以火焰(图 3)而不是以另外的气流向前加速地推进的。取去漏斗，同一只喷炬可供熔融之用。

这种设备改变了喷射-后熔融概念的局限性或优越性。

大型的喷炬把大量热能注进工件以熔化粉末，对此，在物理上和技术上具有许多目的。在热处理部件的情况下，可能有使部件变成正火或甚至退火的目的。当部件的面积极大、重量很重的场合，要获得足够的热量进入部件，并降低其辐射耗损是极其困难的。在熔融熔点很高的合金(如钴合金以及氧化铝或氧化钛的耐火材料)时，是不可能采用喷射-后熔融工艺的。



图 3

等离子弧设备的使用确实解决了很多这类问题，在设备的型式方面，这是逻辑的进展。这种工艺提供了一个基本上不同的粉末沉积做法。一个极其强大的热源使粉末在到达工件之前变成液态，因而沉积物立即熔入表面，而不需要诸如氧乙炔焰所用的喷射-后熔融工艺。热源的热能是这样地使表面发生稍稍地熔融，以确保粉末与基底之间具有良好的焊接。所以就有可能在大块的金属上喷射沉积金属，而不产生大量的整体热量，使热处理和热敏感的部件

性能差不多保持不变。每小时为10~12磅左右的金属沉积的高沉积速率和沉积厚度达到每次运行 $\frac{1}{4}$ 英寸，都是很有可能的。与前述的氧乙炔焰方式相比，这种设备是昂贵的。不过，对于很多应用方面，如泵和阀衬、船用推进器轴、轧辊和部件的整体尺寸公差、热处理、稳定性均为重要的方面来说，这是大面积表面涂层的唯一实用方法。高熔点的钴合金和钨以及耐火材料，如氧化钛和氧化铝等都是可以很容易地喷涂的。

采用等离子弧有两种模式，它们之间的差异是：在第一种情况下，电弧是保持在枪内，在第二种情况下，电弧是保持在枪和工件之间。

等离子在喷炬中产生，它有一个钨电极，被收缩气流的水冷却嘴所包围，因而建立起等离子状态。经过收缩的气流使电离的等离子流越出喷火炬尖端的回圈之外，然后以“U”形的轨道回到嘴上。当放在靠近工件作为局部加热和把粉末送入等离子流时，粉末差不多立即熔化，以液态喷射而沉积下来。

等离子弧是被外面的保护气体所围绕着。

第二种模式是建立在粉末通过时的钨和工件之间，称为“转移弧”模式。

后者的优点是在于能从工件上的阳极点获得额外的热量，并和在TIG焊接(钨极惰性气体保护焊)一样，离子流破坏了微小的氧化物膜。金属表面稍稍熔融确保了由液体状粉末所扩散而形成的良好焊合。采用这种模式，可以获得高的沉积速率，与电弧焊相比，不需再做准备工作。

用等离子弧喷射的重要特点是：由于基底金属的缺少热运动，对裂纹的敏感极小，应力畸变也低。采用钴合金沉积时，这是一个重要的因素，即对于消除应力的十字开裂，钴合金沉积一般是高度敏感的。

氩是用作等离子流，氩-氢混合物则作环境气氛之用。在增加了气流的情况下，其消耗率将以每磅金属约为5立方英尺的最高速率而沉积下来。

等离子工艺由于其自动化的关系而适用于重复工作的场合。

四、应 用

所有镍-基自熔合金具有低的延伸性和比钢高1.5倍的热膨胀系数。因而在选择粉末和工艺时，必须注意，以免发生开裂的危险。软的粉末比硬的粉末明显地更能延伸，而往往值得选用软性的基底，以适应收缩应力。

对镍喷焊层的最成功之一是如前所述的在玻璃工业中作为模子和顶头的涂层。顶头的基底材料常为铸铁，虽然也有偶用含铬铸铁的。顶头在车床上以10~20转/分的速率旋转，常在容量较大的喷枪中选用一只，均匀地喷上约0.025英寸(0.64毫米)厚度的粉末层。采用喷射-后熔融工艺，因为这是最最适合生铁的基底金属。一只大喷炬把整个顶头加热到樱桃红来熔融粉末，并缓慢地冷却，以确保铸铁维持在完全珠光体状态，因而变得软而容易加工。在此时期产生自然的消除应力，并且也让气体逸出表面，而留下一层良好而均匀的金属膜。图4示出加工前后的顶头形状。需要精细的抛光，以使表面完全浸有微细的孔洞。在工作中，玻璃会受压而进入微孔中，当移去顶头时，在玻璃容器的内部表面上，就会留下一个瑕疵。在连续不断地冲压的情况下，情况极快地恶化，因为有更多的玻璃粘附在浸透的表面。

在模子的两个半部上的边缘必须重复地改造和修饰，以免沿着玻璃边上出现一条闪光或凸线。这些模子也是铸铁的，但，由于它们的尺寸和重量不同，喷射-后熔融工艺是不适用的，或确实是不需要的。往往采用预热到 300°F (149°C) 的方法，以防止热冲击，于是把先挖好槽的边用大型喷炬或火焰，用喷焊工艺(一步法)焊起来。因为挖好槽的边是狭窄的，在经过整块模子的大量热量耗散之前，已很快地熔融了。

在两种工艺之间选择轴的覆盖物是一个问题，它是由轴的尺寸、负载因数及合金的情况所决定。负载不重的、大约 2 英寸直径的软钢轴和水力压头可用喷射-后熔融工艺，在很大的面积上极有效地进行涂层。在轴上所需的熔合粉末的高温会使钢正火，所以并不严重地降低它的强度。它必须有适当的支持，以免在使用时期发生变形下陷和畸变。

较大的截面和热敏的合金应该用喷焊工艺来涂层。这种方法较为缓慢，对热处理的深度影响极小。以适中沉积速率的大火焰，在热量能向任何深度穿透之前，使表面很快地熔融。

最近，已经在 2 英寸直径的热处理到 200,000 磅/英寸² (140 公斤/毫米²) 状态的低合金轴上进行试验，它已被喷涂上 0.015 英寸 (0.38 毫米) 的熔融镍粉末，并把它横截试验。热影响面积在 $\frac{1}{2}$ 英寸深度处消失，硬度从无影响中心面积上 R_c 45 下降到接近镍沉积表面的 R_c 35。对抗张强度有关的这些数字，在没有计及沉积作用的情况下，在轴的负载-承担能力方面，

只有 5% 的耗损。在熔融时，火焰升高的温度是处在钢的变态温度范围内，而火焰的主要影响是预热的一个方面，所以冷却率一般慢到足以避免形成不合意成份的马氏体。热影响区域是在正火到稍稍回火的状态之间变动。

在焊接曲轴等的步骤时，必须着重注意，以防止钢本身内部由热膨胀而引起的畸变。在基底金属中由热量而引起热效应使应力畸变比由覆盖物本身运动所产生的还要大。均匀地加热，在控制畸变方面更为重要。

对于大面积的平板，畸变也是一个主要的问题。不过，这可以用大推进器(见图 5)的例子来说明是如何克服的。在这只推进器的叶瓣和中心锥体的所有工作面上涂以 0.010 英寸 (0.25 毫米) 的碳化钨涂层。推进器的构造应使叶瓣牢固，并在平板两边平衡地加热，以产生极小的畸变。这只扇面上所有的粉末重量约为 250 磅，寿命从几个月增加到一年以上。为了这个

工作，发展了一只供喷炬用的特殊干体和水冷尖端。在处理受空气尘埃磨蚀的许多工业中，这种方法是经常应用的。

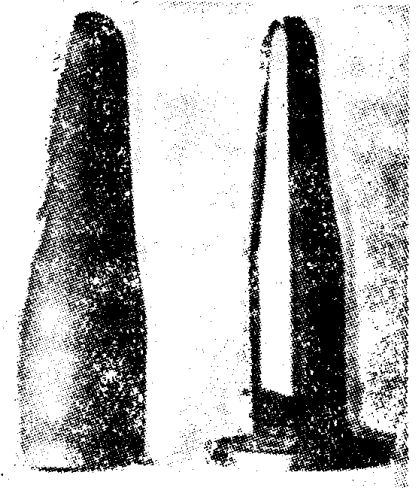


图 4



图 5

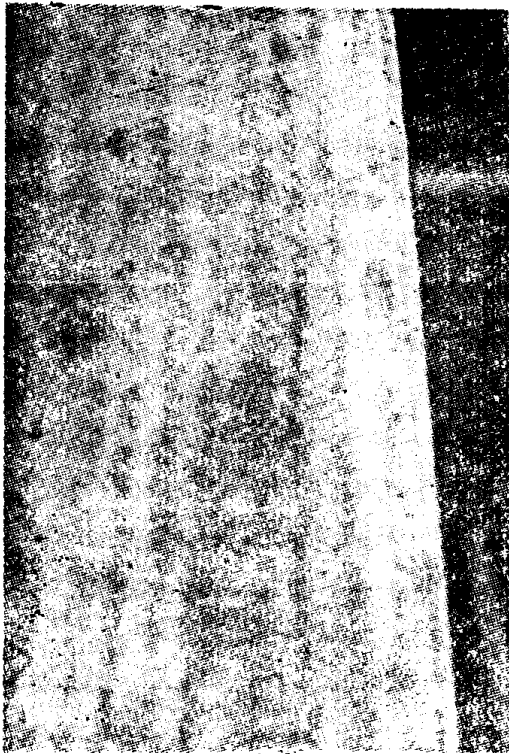


图 6

图 6 示出采用喷粉后不再加以修饰或清理的光滑表面。

把粗达 3 英尺直径的管子和处理强苛性及腐蚀性铝矾土淤浆的泵铸件涂以镍的涂层时，当 R_c 为 50~60 之间的硬度时，这种工作经常要消耗大量的粉末，达几吨之多。部件的寿命是从六个月增长到两年以上。所用的方法是喷射-后熔融工艺，液态的平滑的通道能产生光滑、无摩擦的表面。

碳化钨的良好抗磨损性从用在钻头和钻杆之间的耦合器上，更可以说明之。

平滑的薄碳化钨膜涂层产生保护作用，而不要显著地增加其直径，在喷射覆盖时，没有畸变或不圆的情况发生。碳化钨和镍基体块本身组合具有相当高的抗磨损性质，同时，还有碳化钨所没有的抗冲击或抗碰撞性能。钻孔的寿命已增加了几千英尺，钻头和其耦合器的覆盖物现正成为实用的标准。

喷焊工艺的广阔用途可在焊接重型铸铁蒸汽阀阀门体中说明之。铸件内部为 18 英寸，只隔开 3 英寸的阀门表面是很难进入的。发明了一个特制的水冷杆，以伸进这个局限的区域。又制出了一只特别的量规，采用阀的一个外表面，作为基准线来控制喷焊。每个内表面上的沉积，在 9 英寸的节距圆上，厚为 $3/8$ 英寸，阔为 $3/4$ 英寸，因为铸件的内部复杂，先给以 24 小时、 500°F (260°C) 的保温预热，在喷射覆盖时期，以来自喷炬的热量及用防止热耗散的石棉围绕铸件，来保持这个温度。所用喷焊工艺必须做五、六次才能达到沉积的厚度。

这是喷炬所能到达困难区域的很多变动中的唯一方法。曾一度用过六英尺长的杆，来焊接一个发生于热互变器的复杂管子系统的应力-腐蚀裂缝。也曾用过鹅颈形杆，伸进困难的弯角和圆形弯头。

在许多压碎、研磨和铣削操作中的选择条件下，十分重大的冲击是允许的。基于碳化钨粉末的喷焊层使起重机选择器的寿命从几小时增长到几天，完全不出所料，沉积是磨耗掉而不是切削掉。在喷焊之前，把所有的尖锐边都挖槽，在完成时，把终端再行回火。现在涂层新的选择器来延长它们的从头起的寿命。在很多小的复式锤上，也能有效地涂层。

另一种不同型式的冲击正在铁道路轨上(图 7) 焊接磨坏的接头中取得了经验。在欧洲和澳大利亚，对这些已发展的特殊粉末覆盖物的工作寿命，已取得了有希望的结果，只有些小的或加工-变硬的特性。在 0.75% 的碳钢轨上，以氧乙炔焰来加热时，与弧焊相比，提供了有吸引力的热特性。在弧焊中，形成了马氏体区域，或在熔合气焊中，把焊接处及其周围区域退火。

粉末喷焊是快速的，这就限制了热量吸收并使



图 7

沉积物能具有与钢轨钢相配合的硬度。在很多场合，证明了这种工作仍然能保持下去，但对它能否成为确定的和经济的方法，在修理方面来说还有些疑问。

有关冲击的应用方面，需要对粉末作出比弧焊更加仔细的准备和设计。一个焊到基底金属的坚强焊合是最起码的，在交界面处，往往被剪切所破坏。接头必须这样地设计，使主要负载不要加在接头的交界面处。实际上，这意味着在拐角处制备一个“J”形槽，比有一个简单槽要好。

R。为 60 的镍基合金，曾证明对冲压软金属是相当成功的，但在硬金属上的边缘滚过时，会很快地失去它们边缘的锋器。在采用钴基合金的场合下，边缘保持得很好，尤其对热金属的剪切工作更为有利。对于用作木材、纸张和甘蔗的割刀刀片，采用镍基合金是十分成功的，缺口的刀片可以用这种方法来把它修好。

压挤模的喷焊也是很成功的，但在金属被压出处还是有局限性的。镍对其他很多金属具有亲合力，所以，尤其在热压时期，对热压金属有一种使它结合在模子表面的趋势，因而产生不好的光洁面或有粘块。冷压挤对模子的寿命极为满意。钴基合金没有这种问题，因为它对其他金属没有亲合力，其工作温度是很高的。

阀面的喷焊是对粉末的另一个成功的应用。镍基合金用得又光滑又快，且能避免破裂，在许多很高温工作的应用中表示出它的工作寿命是与钴合金相等。钴合金的应用发生了若干有趣的问题，因为为了避免交叉折裂而采用粉末，比之采用棒状合金，已碰到了极大的困难。这种现象似乎与金属的沉积速度有关，沉积的速度愈高，发生的破裂愈多。采用棒状合金，是一种慢而实惠的工艺，在工件上产生非常大的热量，因而冷得极慢，从而减少了裂缝。采用粉末，沉积是快的，总的热能级是很低的，但明显地还不够高。破裂的普遍性是相当高的。高的预热随着极慢的冷却能大大地克服这种困难。采用等离子弧是极成功的，在很大面积的阀和表面上，只能看到极小的裂纹。等离子弧的应用简单，引起了在尺寸大到 36 英寸直径的极大阀面上采用粉末，其他还可以用在化学加工和炼油工作方面。

这些大规模的应用是从认为粉末是传统地应用于小的边焊和在小片上校正机械加工面积开始，经过了一段漫长的道路而进展的。不过，设备、粉末中的化学和应用技术的改进，扩展了应用和领域，在这个领域中，可以认为这种工艺是一种在工业上能够保存下来的涂面方法，在很多情况下，比弧焊或用等效合成物的平板来涂层具有较好的效果。在有些例子中，粉末的化学成份是这样地不能把它做成线材或带材。所以，就有可能采用具有良好耐磨或耐腐蚀特性的合金，对任何不是粉末的材料，这种特性是不可能做到的，因为制造的方法并不需要对任何合金进行机械加工。

译自《Australian Welding Journal》Vol.15, No.6, 1971, p.27~33

自熔合金喷焊

一、概 述

为了防止大量的结构件、焊接件、机械零件的磨损、腐蚀、高温氧化、侵蚀等而进行涂覆防蚀层和硬质层的方法有许多种，其中耐磨性和耐蚀性兼优的自熔合金喷焊表面硬化法的应用不断增多。

自熔硬质合金的喷涂熔敷处理是二次大战后开始的，在英、美称之为“硬面合金”。最初，应用在飞机、造船、汽车、水泵等机械工业，在石油、水泥、矿山、农业等领域中也得到了广泛地应用。近几年来，日本对自熔合金的应用较为重视。目前，应用的牌号是 Colmonoy 系 (Wall Colmonoy Co.) 和 Metco 系 (Metallizing Engineering Co. Inc.)，由美国进口，价格很贵(约4,000日元/磅)。除特别重要部门外，普及推广尚有困难。大阪府综合科学技术委员会自熔镍合金喷涂专业部门会议在1960~1961这两年间，对国产自熔镍合金进行了评价，现认为在研究和实际应用方面已基本完成。

二、自熔合金的特点

自熔镍合金是以镍或镍-铬为基，并添加硼、硅而成。普通的金属喷涂层是多孔性的，缺点是与基体机械结合易剥落，在喷涂层中含有大量氧化物等。而自熔合金在喷涂后，经再熔融，合金中的硼、硅成为三氧化硼、二氧化硅，其他的金属氧化物成为硼硅酸玻璃而熔融上浮，因此，喷焊层中含有的氧化物极少，且无气孔。喷涂层经再熔融处理，粒子间相互熔敷，同时与基体金属相互扩散，形成了合金层，使结合性增强。由于镍+铬固溶体中含铬硼化物(Cr_2B)和镍硼化物(Ni_2B)，而含碳(C)合金中还含有铬的碳化物(Cr_{23}C_6)，因此，显示出高硬度，并具有优异的耐磨性。因自熔合金是镍-铬基合金，所以具有耐氧化性，同时对硫酸、盐酸、氢氟酸、碱性碳酸钠等许多腐蚀剂具有耐蚀性。

自熔合金的喷涂熔敷处理与堆焊有根本的区别，堆焊时，基体熔融很深，呈不规则状，表面凹凸不平，而用自熔合金的喷涂熔敷处理时，基体保持原状，喷涂后，经熔敷处理，生成微薄的合金层，粘结性不亚于堆焊，对薄壁材料也不产生变形，示于图1。



图 1

- (a) 堆焊时，基体表面和堆焊层显著变形
(b) 喷涂熔敷时硬质合金层无变形

自熔合金的膨胀系数为 $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，比普碳钢稍高，比奥氏体系不锈钢低，值得注意的是自熔合金几乎能适用于所有的钢、铸钢、铜、铜合金、蒙乃尔合金。

表 1 各种自熔硬质合金的成份

型 号	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	Co	Cu	Mo	WC	W	硬 度 HR _c
Ni-Si-B	93.25	—	1.90	3.50	—	—	—	—	—	—	—	35
Ni-Si-B	91.25	—	2.90	4.50	—	—	—	—	—	—	—	60
Ni-Si-B	72.00	—	3.35	4.40	0.60	0.14	20.15	—	—	—	—	60
AMS4775	65~75	13.0~20.0	2.75~4.75	3.5~5.0	3.5~5.0	—	—	—	—	—	—	—
Ni-Cr-Si-B	82.00	7.0	2.90	4.50	—	—	—	—	—	—	—	60
Ni-Cr-Si-B	81.00	11.0	2.0	2.0	2.0	0.30	1.5	—	—	—	—	38
Ni-Cr-Si-B	78.00	11.5	3.0	3.5	3.5	0.40	—	—	—	—	—	48
Ni-Cr-Si-B	72.50	15.0	3.5	5.0	—	—	—	—	—	—	—	60
Ni-Cr-Si-B	65~75	13~20	2.75~4.75	10%	最	大	—	—	—	—	—	56~61
Ni-Cr-Si-B	75~85	8~14	2~3	8%	最	大	—	—	—	—	—	35~40
Ni-Cr-Si-B	71~81	10~17	2~4	6%	最	大	—	—	—	—	—	45~50
Ni-Cr-Si-B	余	14.0	3.25	4.0	4.0	0.75	—	—	—	—	—	59~62
Ni-Cr-Si-B	余	17.0	3.3	3.9	3.0	0.85	—	—	—	—	—	59~62
Ni-Cr-Si-B	余	9.0	2.0	3.0	3.75	0.45	—	—	—	—	—	35~40
Ni-Cr-Si-B	余	10.0	2.50	2.50	2.5	0.15	—	—	—	—	—	30~35
Ni-Cr-Si-B	余	17.0	3.5	4.0	4.00	1.0	—	—	—	—	—	60~65
Ni-Cr-Si-B	余	16.0	4.0	4.0	2.5	0.5	—	3.0	3.0	—	—	59~62
Ni-Cr-Si-B	余	15.0	3.5	4.0	4.0	1.0	—	—	—	—	—	30~38
结合的 WC	—	33.0	2.5~3.5	1.0	—	2.2	45.0	—	—	—	18	60~65
结合的 WC	余	10~13	1.75~3.25	2.5~4.0	2.5~4.0	0.4~0.7	—	—	—	—	15~17	50~55
结合的 WC	46.0	11.0	2.5	2.5	2.5	0.5	—	—	—	35.0	—	60~63
结合的 WC	14.0	3.5	0.8	0.8	0.8	0.1	—	—	—	80.0	—	60~63
结合的 WC	36.0	8.5	1.65	1.95	1.5	0.45	—	—	—	50.0	—	—

三、喷涂金属材料

由成份可知，自熔合金不能拉成线材，一般以100~150目粉末状应用，有时用铸造或树脂粘固制成棒状用。各种自熔合金的成份和硬度如表1所示。

四、喷涂和熔敷

自熔硬质合金的喷涂熔敷一般按照下述工序进行。

坯料表面的清洁处理→喷砂→喷涂→再熔敷→冷却→检验→表面整修、尺寸整修

下面来分别说明一下各工序

1. 坯料的预处理

坯料金属表面分别要进行去油、去锈，去油采用溶剂或加热到260~420℃，去锈采用喷砂。去油、去锈的目的也是为了不使钢砂污染，如坯料表面有电镀层、渗碳层、氮化层时要铲除。

喷砂普通用钢砂(SAE14~18目*)，空气压力为6~7公斤/厘米²，使表面适当“拉毛”。薄件(厚度<3毫米)或表面硬度低的零件(<洛氏硬度20)用细石英砂(SAE24~26目)或二氧化硅砂，为防止变形，空气压力降低为3~4公斤/厘米²。不进行喷涂部分，喷砂前要遮覆。轴、柱塞、轴承套等重要部件，要把磨损部位在半径方向上铲除掉0.25毫米以内，而在喷砂前进行清洁处理。

用喷砂“拉毛”时，自熔合金的喷涂层经熔敷过程，喷涂粒子向基体扩散生成合金层，使喷涂层与基体密切结合，所以“拉毛”程度比普通喷涂时减轻。不能使用喷砂机时，为了得到清洁的坯料，采用酸洗，砂纸修整也可以。尚应注意的是须采用清洁干燥的压缩空气，喷砂后，禁止用手抚摸；放置时间不能长，要在几分钟之内进行喷涂。如不得已要放置几分钟以上时，要密封或用防锈纸包覆。

总而言之，只有在坯料表面清洁，并适当“拉毛”后，经喷涂、再熔融处理后才能发挥自熔合金的特性，所以预处理必须小心仔细。

2. 喷涂

平的零件涂覆时，要放在水平地方，每次喷涂须涉及整个喷涂面厚度约为0.07~0.1毫米，接着改变90°方向，以同样方法喷涂，这样反复操作喷涂到所要的厚度。这些操作最好是机械化。

圆筒部件须装在车床上，使之旋转，喷枪装在进给装置上或能以一定速度移动。如零件旋转速度为6~18米/分，这样就能得到误差在0.025毫米范围内的均匀涂层。

加大每次喷涂层厚度减少喷涂次数的操作法不如薄层多次反复喷涂操作法好。如采用

* SAE—美国汽车工程师协会

只喷涂一次厚涂层的操作法，往往会造成局部过热，破坏了再熔融前的密着层。

喷涂层厚度，由下述因素来决定：

(1) 磨损零件要达到原来尺寸，或新零件的经济厚度(容许磨损量)都要加上0.2~0.3毫米。

(2) 研磨到最终成品尺寸时保留的加工余量。

(3) 再熔融处理过程中，喷涂粒子熔融相邻的粒子与基体金属间产生相互熔敷，此时，喷涂层厚度产生20%收缩，把此因素一起考虑进去，然后来决定喷涂尺寸。

例如，现在加工尺寸是2.000英寸，加工余量为0.030英寸，再熔融后的尺寸是2.030英寸。如果表面过渡铲除后的尺寸是1.920英寸，其差为 $2.030 - 1.920 = 0.110$ 英寸，通过喷涂来增加其所差尺寸，这是由于没考虑收缩因素，所以所需的喷涂材料总量就是 $0.110 + 0.110 \times 20 / 100 = 0.132$ 英寸，因此，喷涂尺寸应为 $1.920 + 0.132 = 2.052$ 英寸。

必须综合考虑喷涂条件，即火焰状态，离被喷射体的距离，喷出的喷涂合金量，喷枪的移动速度，才能得到最佳性质的涂层。

若零件为小件、薄件就不需预热，水份去除得越彻底越好，预热温度还需考虑零件尺寸、形状、热传导率、膨胀系数等，一般90~150℃为宜(厚件预热到200~250℃)。预热过度就会引起喷涂层的剥离、起壳。喷涂效率随零件的尺寸、形状而不同，一般在80~92%之间。梅特科镍-铝喷涂法随合金种类不同，分成如下三种喷涂形式。

标准法：预热(90~150℃)→喷涂→再熔融

半熔融法：预热(180~230℃)→喷涂结合层(立即喷涂0.05~0.1毫米的薄层)→加热(不供应合金粉末，(700~760℃)→喷涂(在700~760℃保温下进行)

非熔融法：预热(90~150℃)→喷涂(当零件的熔点低时)

3. 再熔融

把喷涂层加热到该合金指定的熔融温度区域，此时，喷涂粒子相互熔敷，同时与基体金属形成合金层，得到了坚固结合的无孔涂层，再熔融工序是发挥自熔合金特点最重要的过程。

再熔融要在喷涂结束后，喷涂产生的热量未降低的期间内立即进行。再熔融温度为980~1100℃，在选择涂层材料时是必须首先考虑的一个因素。其次应考虑的是涂层材料与基体金属的膨胀系数，如膨胀系数显著差别时，随温度变化在涂层中会产生龟裂，引起涂层破坏。

再熔融普通用氧乙炔(或丙烷)多嘴式焰炬来进行，为防止涂层膨胀剥离，首先得急激加热，所以零件需预热。圆筒形零件要安装在与喷涂时相同的车床上，在表面清楚可见的旋转速度下进行再熔融。由于温度测定有困难，一般根据经验，使温度升高到涂层表面呈现油样似的光泽，此时喷涂粒子相互熔敷。

小零件等也可在控制气氛炉中进行再熔融，但缺点是设备价贵，对零件大小有限制，不能大量生产。对大量生产相同形状的零件也可以考虑采用高频感应加热来再熔融。

再熔融时如过热，会引起涂层流散，产生收缩孔，硬度降低，所以必须避免过热。如再熔融温度低，熔敷不充分，就会造成铬硼化物偏析。

4. 冷却

自熔合金的膨胀系数大，所以冷却过程中易产生龟裂。特别当零件是特殊材质或厚度大、

形状复杂时需充分缓冷。

当零件的厚度大于50毫米时，即使低合金钢也最好放在石灰中或包上石棉缓冷。高碳钢和镍钢需以 $10\sim 37^{\circ}\text{C}/\text{时}$ 的冷速在炉中慢冷。象这样使涂层整个表面均匀加热，接着用尽可能长的时间冷却，就能得到最佳耐磨性、耐蚀性和无裂纹的均匀硬质合金涂层。

5. 检验

检验涂层中有无龟裂和缺陷，有时当焰矩的焰心在涂层中微微移动时，熔敷不完全的零件因热应力，涂层会从零件上剥离，即所谓加热龟裂(heat checking)。

6. 精加工

除重要机械零件外，一般不要精加工，自熔合金喷涂主要是作为表面硬化，所以磨加工是最经济的。Colmonoy No20较软，容易进行机械切削。其他大部分合金能用硬质合金车刀切削。要求精密误差的精加工时，因工具磨损和发热，切削难以达到要求，所以需用磨加工。

干磨有时也适用，但随着发热，砂轮的磨损加快，因此难于精加工，要求精密误差的场合，可用碳化硅砂轮湿磨，加工质量良好。如有特殊要求，可用细砂轮进行超精度加工。

7. 操作上注意点

除遵守一般喷焊操作的注意点外，再熔融时，大面积的辐射热，在离开60厘米地方还达到 90°C ，所以氧乙炔容器不能放在此距离范围内。操作人员要经常穿戴短上衣围裙、手套和防护面罩、有色眼镜(为过滤再熔融时放出的紫外线、红外线而戴的眼镜)。多嘴焰炬因火急、消耗空气中的氧气多，所以在有限的空间场所中操作时，要特别注意供给充分的新鲜空气。

五、与基体金属的关系

喷焊自熔合金时，作为被喷焊体的基体金属的材质与喷焊材料的关系很重要，必须充分考虑适用性，下面来说明一下它们相互间关系。

(1)SAE1000(低碳钢)1200(含磷易切削钢)

1300(1.6~1.9%锰钢)4000(锰钢)

4100(铬~锰钢)5000(0.5~0.7%铬钢)

5100(0.8~1.0%铬钢) 6100(铬-钒钢)

8600(镍-铬-锰钢) 8700(锰稍多的镍-铬-锰钢)

(以上含碳都是小于0.25%的。)上述钢种普通都能适用喷涂，一般不需特别的热处理。

(2)上述钢种含碳在0.25~0.5%时，再熔融前要进行 $260\sim 370^{\circ}\text{C}$ 预热，再熔融后要缓冷才能适用。

(3)含碳 $>0.5\%$ 时，如有经验也能适用。合金铸铁、珠光体可锻铸铁、镍和镍基合金、铜和铜基合金、其他耐热合金也能适用。

(4)对于奥氏体系不锈钢或其他耐热合金，这些钢种膨胀系数大，喷涂前希望预热到 200°C ，紧接着进行再熔融。再熔融前也要充分预热。此外，奥氏体系不锈钢中易析出铬的碳化物，对此也需注意。