

# 热喷涂喷焊层的抗磨性研究

## Study of Wear Resistance of Coatings with Thermal Spraying and Spray Welding

赵文轸 (西安交通大学材料强度研究所)

Zhao Wenzhen (Research Institute of Strength of Metals, Xian Jiaotong University)

[摘要] 热喷焊和热喷涂技术被广泛用于机件的耐磨强化。按涂层材料和工艺的不同会得到不同组织和性能的涂层,研究评价这些涂层在磨粒磨损和冲蚀磨损中的抗磨能力及规律性,可为工程应用提供一定的指导。

关键词 热喷涂 喷焊 磨损

[Abstract] The thermal spraying and spray welding are extensively used to strengthen the wearing surface of parts. The coats with different structures and properties can be obtained according as coat materials and processes. It is a guide for engineering application to study and to evaluate the wearabilities and wear regularities of the coats in the scoring abrasion and erosive abrasion.

Keywords thermal spraying spray welding wear

### 1 前言

用热喷涂工艺提高机件表面的耐磨性中有些基本问题人们还并不十分清楚,例如,热喷涂和热喷焊工艺差别很大,其抗磨效果是否相同?Metco439 是美国 Metco 公司 70 年代末研制的自粘性耐磨合金粉,认为可以用等离子喷涂该粉来代替自熔合金喷焊,这不仅可得到相当的耐磨性,且可防止热变形,但还不知道实际效果如何。不仅热喷涂喷焊层各有特点,磨损的方式也不相同。因此,讨论涂层的耐磨性,必须以选定的磨损形式为前题。例如,磨粒磨损和冲蚀磨损具有不同的磨损机理,同一种涂层会具有不同的抗磨效果。只有掌握了各种涂层在不同类型的磨损中的抗磨规律,才能针对具体情况,选择工艺,设计涂层。

本研究仅对多种常用的热喷涂、喷焊层进行了磨粒磨损和冲蚀磨损两种类型的试验。在试验的基础上,对两种情况下的抗磨性进行比较和评价。

### 2 试验方法

#### 2.1 试验用材

热喷涂用材共有十种,其中按外形分为线材和粉末

两类,按成分分为碳钢、自熔性合金 (Ni、Fe 基),复合型粉末 (包覆型和自粘型),其化学成分,粉末粒度,见表 1。试样基体采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。

#### 2.2 试样

两种磨损试样尺寸如图 1 所示。

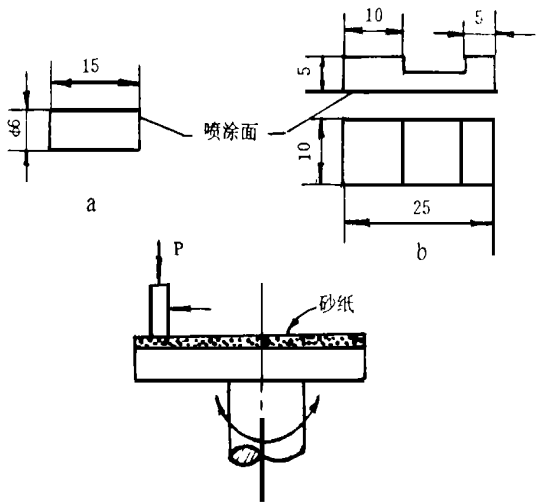


图 1 磨粒磨损试样 (a) 和冲蚀磨损试样 (b) 以及销盘磨损示意图

Fig. 1 Specimens of abrasive wear (a) and erosive wear (b), and pin-disk abrader drawing

表 1 十种涂层材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of 10 kinds of coating materials

涂层材料			代号	典型化学成分, %								粒度, 目	名义硬度 HRC
				Ni	Cr	B	Si	Fe	C	Co	WC		
碳钢 (线)		T 8	A					余	0. 8				55
自熔合金粉	Fe 基	Fe50	B	20	13	4. 0	4. 0	余	1. 0			- 60 ~ + 200	50
	Ni 基	Ni40	C	余	9	3	3. 5	15	0. 5			- 150	40
		Ni60	D	余	16	3. 5	4. 5	15	0. 8			- 150	60
		Ni60+ 10% WC	E	余	14	3. 2	4. 0	14	0. 7		10	- 150	60
		Ni60+ 20% WC	F	余	13	2. 8	3. 6	12	0. 6		20	- 150	60
		Ni60+ 35% WC	G	余	10	2. 3	2. 9	10	0. 5		35	- 150	63
复合粉	包覆型	Ni/ Al	H	95				( Al) 5				- 140 ~ + 200	
		Co/ WC	I							17	83	- 270	
	自粘性	Metco 439	J	余	6. 0	1. 0	1. 5	( Al) 3. 0	0. 5	6	44	- 170	40 ~ 50

2.3 涂层工艺

采用的热喷涂喷焊工艺有：氧乙炔线材喷涂 T 8 钢，氧乙炔喷焊铁基和镍基自熔合金，等离子喷涂陶瓷、金属复合粉末，火焰喷涂 Ni/ Al 和 Metco 439 粉末。主要工艺参数按常规，涂层厚度约为 1mm。

2.4 磨粒磨损试验

采用 ML-100 销盘磨粒磨损试验机。试验机有一圆盘，圆盘以 60r/min 的转速旋转，以 120# 金相砂纸 (SiC，HV 2600) 为磨料，试样为销，上加 700g 负荷压紧在砂纸上。转动的同时，试样由外向内做径向移动 (图 1)。全部试样的每个磨损行程都为 11.66m，磨损量以失重表示。为了保证试验精度，试样表面都进行预研磨，使光滑平整。每个试样都进行两个行程的磨损，一张砂纸仅出一个数据。

2.5 冲蚀磨损试验

采用自制的 CMS-120 型冲蚀磨损试验机进行冲蚀磨损试验，试验机有一抽真空的圆腔，其用途是排除空气的干扰，内有高速旋转轮，试样装于转轮外侧。本试验选定的线速度为 70m/s，粒度为 60~80 目的石英砂由上方落下冲击试样表面。每次加砂 200g，砂流量 12.5g/min，每次冲蚀完后，称量试样的失重，每种涂层在低角 (30°)、中角 (60°) 和高角 (90°) 三种角度下，各采用 2~4 个试样，每个试样加砂四次，每次加砂 50g，以冲蚀失重量除以加砂量做为冲蚀失重率 (mg/g)。

3 试验结果

3.1 销盘磨粒磨损

若把 Metco439 等离子喷涂的抗磨力取为 1，其余涂层的抗磨力 A，以此为基准表示于图 2。

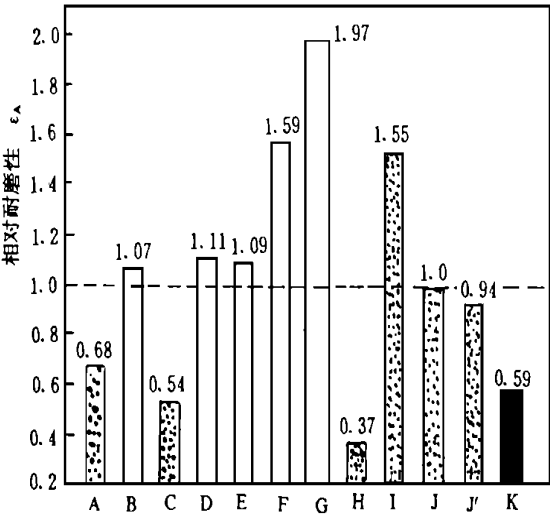


图 2 涂层对磨粒磨损的相对耐磨性  
Fig. 2 The relative abrasive resistance of coatings

由试验数据可知，所试验的十一种涂层对磨粒磨损抗力有以下规律：(1) 除 Co/ WC 等离子热喷涂层外，所有的自熔合金喷焊层的耐磨抗力都高于热喷涂层；(2)

对于喷焊自熔合金, 无论铁基还是镍基, 如果不加入外来硬质颗粒 WC, 只凭自身硬度, 只能使其抗磨性保持在一个中等水平上; (3) 自熔合金喷焊层中加入 WC 颗粒, 可以明显提高涂层耐磨粒磨损性能, 且随含量的升高, 耐磨性急剧提高, 当 WC 增加到 35% 质量分数时, 耐磨性比原来可提高约 1 倍; (4) 同种自熔合金粉末喷涂层的耐磨粒磨损性能, 仅达喷焊时的约 50%。

### 3.2 冲蚀磨损

同样, 如果以 Metco439 等离子涂层在低角 (30°) 下的耐冲蚀力为 1, 各种涂层在高、中、低角下的耐冲蚀力  $A$  可以图 3 表示。由试验结果可知, 八种涂层的抗冲蚀能力有以下规律: (1) 所有喷焊合金的耐冲蚀性, 优于任何喷涂层, 因此, 在通常情况下, 只有喷焊层才可用于冲蚀保护层; (2) 自熔合金喷焊层中加入 WC 硬粒子会改善涂层耐冲蚀性, 当含量较少 (例 10%) 时, 改善作用不明显; 当含量增至 20% 时, 耐冲蚀性才会有明显提高; 不过, 当增至 35% 时, 耐冲蚀性又开始下降; (3) 自熔合金喷焊层本身虽然硬度较高, 但耐低角冲蚀都相对较差, 即呈现塑性材料的冲蚀特征, 但随 WC 含量的增加, 无论耐低角冲蚀, 还是耐高角冲蚀力都明显提高, 使涂层兼有塑、脆两种材料的特点; (4) 所有热喷涂层, 耐高角冲蚀力都很差, 具有典型脆性材料的冲蚀特点。

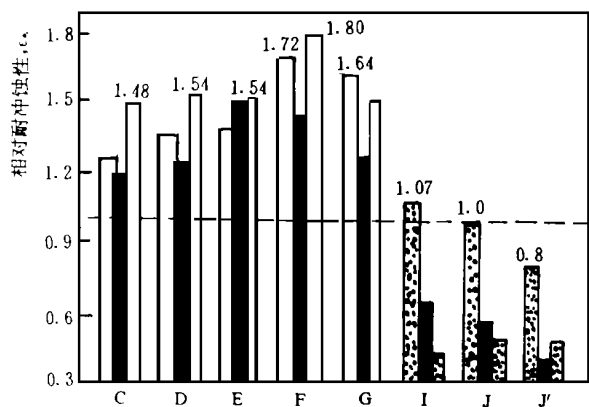


图 3 涂层的相对耐冲蚀力

(对每种涂层: 左-30° 中-60° 右-90°)

Fig.3 Relative erosive abrasive resistance of coatings

## 4 讨论

### 4.1 涂层的耐磨粒磨损机理分析

按磨粒磨损的理论<sup>[3]</sup>, 象砂纸这样的硬磨料滑动磨损的主要机理应是显微切削。E. Rabinowicz 1966 年根据简化的模型提出的磨粒磨损失重公式为人们所接受, 即

$$\frac{V}{L} = K \cdot \frac{W}{H}$$
 式中:  $V$ —磨损体积,  $L$ —滑动距离,  $K$ —磨损常数,  $W$ —所加载荷,  $H$ —表面硬度。由式可见, 表面硬度是影响磨粒磨损最重要的材料参数。而实际上韧性也是重要的。

试验采用的自熔合金喷焊层, 虽然具有较高硬度, 但还远不及 SiC 颗粒的硬度高, 因此 SiC 粒子会被压入其内一定深度, 造成显微切削。其硬度与中碳淬火钢相当, 但喷焊层的韧性要高得多, 切削要消耗更多的能量, 因此磨损阻力也较大, 失重率要比淬火钢小<sup>[4]</sup>。若在喷焊层中加入 WC 颗粒, 这些颗粒虽然仍不及 SiC 硬, 但已很相近, SiC 粒子是很难直接侵入 WC 粒子之内的。不过, 当 WC 粒子含量分数较小时, 在 WC 粒子之间还有较大体积的自熔合金基体, SiC 粒子会侵入其中, 进行犁沟、切削, Si 粒子在移动中, 若迂到 WC 粒子, 有两种可能, 一是把 WC 粒子掀起刮落、击碎, 不过, 后来的 SiC 粒子还会继先头的粒子, 对 WC 颗粒进行掀刮, 最终把其刮掉, 因此, 少量 (10%) WC 对涂层的耐磨强化作用很小, 以致在本试验中几乎没有体现出来。当 WC 粒子含量较高, 例如达 35% 时, 硬粒子的密度升高了, 粒子相接处的砂粒可侵入的位置大大减少, SiC 粒子仅能在诸多的 WC 粒子的表面上滑动, 破碎, 因此, 失重率大大减少。当含 WC 为 20% 时, 由于粒子间的基体分数介于 10% 和 35% 涂层之间, 因此, 耐磨性也介于 10% WC 和 35% WC 之间。按上述分析可以推定, 如果再进一步增加 WC 的含量, 可使耐磨性进一步提高, 但是, 这在喷焊工艺上是很难实现的, 因为当自熔合金分数低于 60% 时, 涂层的重熔性会大大恶化, 得到的涂层会疏松多孔, WC 不能被很好地粘合, 很易被 SiC 砂粒掀落, 因而不可能有好的耐磨性。

Metco439 自粘性复合粉是金属陶瓷材料, 含有 44% 的 WC 颗粒, 平均硬度 813HV, 按前面的数学表达式应有很好的抗磨粒磨损性, 但事实上并非如此, 由于存在 56% 的韧塑性的自熔合金和 Ni/Al 混合物, 测试发现, 这些部位显微硬度仅为 600HV 左右, 因此砂粒比较易于侵入。此外, 由于等离子喷涂是扁平粒子的叠层组织, 有较大的空隙度, 空隙附近的 WC 粒子也很容易被掀掉, 抗磨性能很一般。火焰喷涂的 Metco439 涂层, 组织更疏松, 因此, 耐磨性更差一些。

Co/WC 涂层也是等离子喷涂组织, 其硬质 WC 粒子的含量高达 83%, 少量的 Co 包覆在 WC 的颗粒上, 起固结作用, 分布比较均匀。平均硬度 1014HV, 最低的硬度也在 800HV 以上, 几乎没有韧塑性的基体, SiC 磨粒很难侵入其中。其主要的磨粒磨损机理不再是塑性变形式的

切削, 而是粒子或粒子间的断裂和剥落, 因此也有较高的抗磨性。不过由于喷涂离子之间没有足够的结合力、加上涂层大量的空隙, 并没有达到与 1010HV 硬度应有的耐磨性。

#### 4.2 涂层冲蚀机理分析

关于整体材料的冲蚀磨损的机理已有许多的研究, I. Finmie 认为冲蚀磨损是由于磨粒以一定速度和角度侵入材料的表面并切削金属造成的, 给出数学表达式:

$$V = \frac{m^2}{2} \cdot \frac{1}{y} \cdot f(\alpha)$$

式中,  $V$  为体积流失,  $m$  为冲击粒子质量,  $v$  为冲击速度,  $y$  为材料屈服强度,  $\alpha$  为冲击角度。即冲击时材料冲蚀磨损率与冲蚀粒子的动能成正比, 与材料的屈服强度成反比, 与冲击角呈一定的函数关系。实际上该式仅能适合在低角度冲蚀下的规律。在低角度下, 涂层的冲蚀也基本遵从这一规律。由图 4 可见, 随喷焊层硬度 ( $H$ ) 自左向右增加, 30° 角的耐冲蚀性的确提高了。喷涂层也有此规律。随冲蚀角的增高, 冲蚀破坏的机理主要的不再是切削, 因此与小角情况正相反, 在高角下  $y$  低的材料, 冲蚀失重反而变小。硬度高、脆性大的材料, 冲蚀失重会加剧。喷焊层中加入 WC 粒子, 无疑会使材料的硬度和脆性增加, 但实验发现, 其耐高角冲蚀性不但不减, 反而有所增加, 对此我们曾进行过研究<sup>[5]</sup>, 原因可从喷焊层组织进行解释: 强而硬的 WC 粒子, 喷焊时可牢固地镶嵌在韧性的自熔合金基体中, 当砂粒正面冲击时, 砂粒冲击在 WC 粒子上, 但冲击功多为韧性的基体所吸收, 因此, 在高角冲蚀时, 涂层反而显示出塑性材料的耐冲蚀特点。而在低角冲击时, WC 粒子又可以有效地阻止冲击粒子的切削, 因此涂层又显示脆性材料的特征。可是, 当 WC 粒子含量过高时, 由于涂层的韧塑性不足、且 WC 与基体熔合不好, 涂层变疏松, 因此, 反而会使耐冲蚀性下降。

Metco439 等离子涂层虽然含有大量的塑性的合金成分, 但因粒子间连接较弱, 受冲击时往往不经过塑性变形, 整个粒子被冲击粒子冲切掉, 完全呈现脆性材料的冲蚀特点, 而且在低角下的抗冲蚀力也不大, 高角下更小。

Co/WC 涂层有相当高的硬度, 也表现出脆性材料的冲蚀特点, 低角下的抗冲蚀能力要比高角时大 1 倍, 但是, 由于粒子间的结合力远不如喷焊层, 因此其耐冲蚀性还远不及较软的 Ni40 涂层。同样的原因, 火焰喷涂的 Metco 439 涂层, 由于涂层更加疏松, 耐冲蚀力更差。此外, 在热喷涂冲蚀实验中发现, 有些涂层局部还有成片

脱落的现象, 这是局部片层之间结合力太差的原因。

#### 4.3 涂层对两种磨损抗力的比较

涂层在磨粒磨损和冲蚀磨损中所呈现的性能, 是由磨损机理和涂层组织特点所决定的。只有低角冲蚀和磨粒磨损才有大致相似的规律性, 因为引起破坏的机理, 基本都是显微切削, 涂层硬度是影响耐磨抗力的主要因素。但是高角冲蚀时, 磨损机制发生了变化, 对于喷涂层, 冲蚀磨损抗力明显变小。Co/WC 具有良好的耐磨粒磨损性能, 但在高角下耐冲蚀性极差。不过, 对于自熔合金喷焊层来说, 两种磨损形式下, 磨损规律差别不大, 例如, 含 20% WC 的合金层在磨粒磨损和高角冲蚀时, 都有较大抗力。

### 5 结论

(1) 自熔合金热喷焊层中加入的 WC 颗粒越多, 其耐磨粒磨损抗力越高。

(2) 适当地提高自熔合金喷焊层的 WC 含量, 会使涂层抗高、低角冲蚀的能力大大提高, 但如果不足或过量, 都会影响抗冲蚀效果。

(3) Metco 439 陶瓷-合金热喷涂层的耐磨粒磨损性和耐冲蚀性, 都不及热喷焊自熔合金涂层。

(4) Co/WC 包覆性陶瓷复合热喷涂层有较高的抗磨粒磨损性能, 但耐冲蚀, 尤其耐高角冲蚀性能很差。

#### 参考文献

- 1 American Welding Society. Thermal Spraying Practice, Theory, and Application, Florida, 1985
- 2 邓世均. 热喷涂技术在机械工业中的应用. 材料保护, 1982, 1
- 3 邵荷生等. 金属的磨料磨损与耐磨材料, 北京: 机械工业出版社, 1988
- 4 谢永松等. 氧-乙炔焰喷熔导摩擦磨损性能试验研究. 全国热喷涂交流会论文集, 桂林, 1988, 84~93
- 5 赵文珍. 热喷涂合金-陶瓷涂层的冲蚀特性. 西安交通大学学报, 1989, 23 (4)

收稿日期: 1997. 9. 18

修改稿收到日期: 1998. 3. 19

赵文珍, 男, 1945 年 12 月生, 西安交通大学副教授, 主要研究方向为表面工程。联系地址: 陕西省西安市交通大学强度研究所 (710049)