粉末涂层材料粒度测试的研究

刘海飞

（1. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160；
2. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心，北京 102206；
3. 特种涂层材料与技术北京市重点实验室，北京 102206）

摘要：采用干筛分法、激光衍射法和扫描电子显微镜法测试了粉末涂层材料的粒度，对比了不同方法的测试结果，研究了粉末材料的形貌对粒度测试的影响。结果表明：干筛分法测试球形的粉末、不规则形粉末、片状粉末的粒度分布具有较好的重复性；三种方法测试的结果相差较大，且粒度越大，差异越大。

关键词：粉末涂层材料；干筛分法；激光衍射法；扫描电镜法

中图分类号：TG174.4 文献标识码：A **文章编号**：1674-7127(2020)12-0008-7
DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2020.04.008

Study on Particle Size Measurement of Powders for Coating Materials

Haifei Liu

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;
2. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry Parts, Beijing 102206;
3. Key Laboratory of Beijing for Special Coating Material and Technology, Beijing 102206)

Abstract: The particle size of powders for thermal spraying was measured by dry sieving method, laser diffraction method and scanning electron microscopy method. The effect of the powder morphology on the particle size test results was studied by comparing the test results between different methods. The result shows that the particle size distribution of spherical powder, irregular powder and flake powder measured by dry sieving method exhibits good repeatability. The results of the three test methods are huge different, and the larger the particle size, the greater the difference.

Keywords：Powders for thermal spraying; Dry sieving method; Laser diffraction method; Scanning electron microscopy method

0 引言

随着热喷涂、激光熔覆等表面技术的发展，用于这些涂层制备的材料也不断快速发展。涂层制备工艺用的材料以粉末材料为主，涂层制备的基本过程为在载气的协助下通过送粉器将粉末送入喷枪内或喷枪口处，在高温高速的燃烧气流或等离子气焰等作用下将粉末加热并喷射至基体的表面。粉末从送粉器至喷枪内或喷枪口处有一定的行程，为使喷涂过程顺利、均匀，不发生粉末粘壁、堵枪等问题，保证涂层质量和制备效率，要求粉末具有良好的流动性。粉末的流动

第一作者：刘海飞(1964-)，男，正高级工程师，E-mail: liuhaifei_507@126.com

性能除与其形貌、密度等有关外，还与粉末的粒度分布密切相关，粉末涂层材料粒度一般控制在15μm~125μm。为了满足涂层制备工艺的要求，粉末粒度的控制和测试显得尤为重要。目前，粉末粒度表征方法主要有筛分法、显微镜法、沉降法、光衍射法、费氏法等[1-4]，本文采用干筛分法、激光衍射法和扫描电子显微镜法 (SEM) 对三种不同形貌的粉末涂层材料进行粒度测试研究，以论述这些方法在实际应用中的差异。

1 试验样品、仪器和试验方法

1.1 试验样品

本试验采用的是北矿新材科技有限公司生产的三种不同形貌的粉末涂层材料，分别是镍基自熔合金粉末（产品牌号 Ni60B）、镍包碳化钨复合粉（产品牌号 KF-56）和镍包天然石墨（产品牌号 KF-21T），其中镍基自熔合金粉末主要用于火焰喷涂或喷焊，制备的涂层具有良好的耐磨耐蚀性能；镍包碳化钨复合粉用于热喷涂或激光熔覆，制备涂层具有良好的耐冲击磨损、磨粒磨损等性能；镍包天然石墨复合粉主要用于自润滑涂层或可磨耗封严涂层的制备。其中镍基自熔合金粉末采用雾化法制备，粉末形貌为球形；镍包碳化钨复合粉和镍包天然石墨复合粉采用化学还原包覆法制备，粉末形貌继承铸造碳化钨粉末和天然石墨粉末的原始形貌，分别为不规则形和片状。三种粉末的粒度规格为45μm（325 目）~106μm（140 目），粉末的形貌照片如图 1 所示。

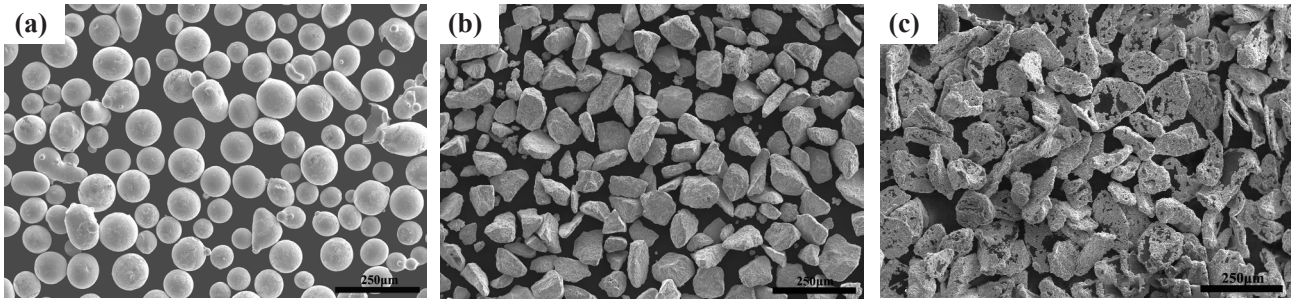


图 1 三种粉末涂层材料扫描电镜形貌照片 (×100): (a) Ni60B; (b) KF-56; (c) KF-21T

Fig.1 SEM of the powders (×100): (a) Ni60B; (b) KF-56; (c) KF-21T

1.2 试验仪器及方法

采用拍击式标准筛振筛机（型号 SPB-200）和标准试验筛测定三种粉末的筛分粒度，标准试验筛经检定机构校准，其中 140 目筛对应筛孔尺寸 106μm，325 目筛对应筛孔尺寸 45μm。采用电子天平（型号 BS210S，精度 0.1mg）测定粉末试验筛筛上、筛下的质量。测试过程按照 GB/T1480 规定要求的进行。用电子天平称取 100g 粉末样品，放入到标准试样筛中，将试验筛放置在振筛机上，筛分时间 15min，振动频率为 290 次 / 分，分别称量各试验筛中粉末的重量，用“ + ”表示试验筛筛上质量，用“ - ”表示筛下质量。

采用激光粒度仪（马尔文 3000）按照 GB/T19077 的规定测试粉末的激光粒度分布，采用六偏磷酸钠作为分散剂，取一定量的粉末样品，放入激光粒度仪的测试烧杯中进行测试。

将粉末样品制样，放入扫描电子显微电镜 (Hitachi，SU5000) 中，放大到一定倍数，随机测量 200~300 个粉末颗粒的尺寸，然后换算成等效球体积粒径，利用 Excel 分析软件得出粉末粒度分布曲线。

2 结果与分析

2.1 干筛分法测试粉末粒度

采用干筛分法测试三种不同形貌的粉末粒度组成，测试用标准试验筛为 140 目（对应筛网孔径 106μm）和 325 目（对应筛网孔径 45μm），测试结果和标准方差值如表 1 所示，用下列公式计算每个粒度段百分含量的标准方差：

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i-\bar{A})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

式中：A_i 为单次测量的粒度段含量值；$\bar{A}$为测量 n 次各粒度段含量的平均值；n 为测量次数（本试验中，n 为 5）。根据 GB/T1480 的规定，该测定方法适用于干的、不含润滑剂的金属粉末，不适用于形状明显不等轴的（如片状）金属粉末及颗粒尺寸全部或大部分小于 45μm 的金属粉末。从表 1 可以看到，无论是球形的镍基自熔合金粉末、不规则的镍包碳化钨复合粉末或片状的镍包石墨复合粉末，测试的三个粒度段百分比含量的标准差均在至 0.03% 至 0.22% 之间，显示了较好的重复性，且粒度越大，测试结果的误差越小，表明筛分法更适合于粒径较粗的粉末的粒度测试。这与李文凯采用锅炉渣的灰样对比激光法与干筛分法的比较研究中所获得的结果一致 [5]，他认为造成这种现象的原因主要有以下几点：(1) 对于较细的粉末易造成颗粒团聚；(2) 颗粒在振动过程中摩擦产生电荷，导致凝聚成团，影响结果准确性；(3) 由于筛网清洁不够，使得极细颗粒会粘连筛网上造成测量偏差等。本文采用的测试样品是涂层粉末材料，粒度相比较粗 (-106μm~+45μm)，具有较好的流动性能，测试前对样品进行充分的烘干，因此上述的几个原因对于本文的测试样品获得的结果不适用。造成筛网越小，测试误差越大的原因可能是，越细小筛网的编织制造技术难度大，筛网网孔尺寸产生的偏差及不均匀性就越大，造成测试的偏差越大。

筛分法是测试颗粒是否通过一定尺寸的平面筛孔来测定粒度的组成，试验筛筛孔一般为正方形，片状颗粒可以看作二维度的颗粒，如果颗粒的二维形状接近正方形或圆形，是可以采用这种方法来表征粒度的分布。从图 1(c) 镍包石墨复合粉的显微形貌可以看到，颗粒近似方形或圆形。

表 1 干筛分法测试三种粉末粒度组成结果

Table 1 The dry sieving method to test the composition of three powder sizes

样品	粒度组成	含量，%						标准方差，%
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值	
KF-Ni60B	+106μm	3.6	3.6	3.8	3.7	3.5	3.6	0.05
	-106μm~+45μm	91.7	90.4	90.8	90.6	90.9	90.9	0.22
	-45μm	4.7	6.0	5.4	5.7	5.6	5.5	0.22
KF-56	+106μm	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.03
	-106μm~+45μm	96.0	96.1	96.2	96.1	96.2	96.1	0.04
	-45μm	3.2	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	0.05
KF-21T	+106μm	1.3	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	0.06
	-106μm~+45μm	93.2	93.3	92.7	92.7	92.8	92.9	0.13
	-45μm	5.5	5.6	6.2	6.3	6.2	6.0	0.17

2.2 激光衍射法测试粉末粒度

采用激光衍射法分别对三种粉末进行粒度测试，测试结果如表 2、表 3、表 4 所示。

表 2 激光衍射法测试镍基自熔合金粉末粒度分布结果

Table 2 The particle size distribution of Nickel-based self-fusing alloy powder measured by laser diffraction

粒度 (μm)	% 体积以下	粒度 (μm)	% 体积以下	粒度 (μm)	% 体积以下
30.0	0.00	50.0	5.67	89.0	65.43
31.0	0.00	52.0	7.22	90.0	66.79
32.0	0.00	53.0	8.51	91.2	68.41
35.0	0.02	58.2	14.88	96.0	74.67
37.0	0.17	60.0	17.58	100.0	79.11
38.0	0.26	61.0	19.25	106.0	84.57
39.0	0.35	62.0	20.89	123.0	95.07
40.0	0.43	63.0	22.51	125.0	96.02
43.0	1.44	74.0	41.28	143.0	99.83
44.0	1.77	75.0	42.97	150.0	99.99
45.0	2.10	80.0	51.51	166.0	100.00
48.0	4.17	88.0	64.05	180.0	100.00

表 3 激光衍射法测试镍包碳化钨复合粉粒度分布结果

Table 3 The particle size distribution of Nickel coated tungsten carbide composite powder measured by laser diffraction

粒度 (μm)	% 体积以下	粒度 (μm)	% 体积以下	粒度 (μm)	% 体积以下
30.0	0.00	52.0	0.53	91.2	33.42
31.0	0.00	53.0	0.81	96.0	39.53
32.0	0.00	58.2	2.16	100.0	44.60
35.0	0.00	60.0	2.98	106.0	52.18
37.0	0.00	61.0	3.56	123.0	70.82
38.0	0.00	62.0	4.12	125.0	72.80
39.0	0.00	63.0	22.51	143.0	86.46
40.0	0.00	74.0	13.17	150.0	89.93
43.0	0.01	75.0	14.03	166.0	96.06
44.0	0.02	80.0	19.70	180.0	98.76
45.0	0.02	88.0	29.16	192.0	99.86
48.0	0.21	89.0	30.50	200.0	100.00
50.0	0.36	90.0	31.84	260.0	100.00

表 4 激光衍射法测试镍包石墨复合粉粒度分布结果

Table 4 The particle size distribution of nickel-coated graphite composite powder measured by laser diffraction

粒度 (μm)	% 体积以下	粒度 (μm)	% 体积以下	粒度 (μm)	% 体积以下
3.90	0.00	31.0	2.11	75.0	13.81
4.59	0.00	32.0	2.11	80.0	18.68
5.00	0.07	35.0	2.11	88.0	26.91
5.50	0.03	37.0	2.11	89.0	29.11
6.00	0.12	38.0	2.11	90.0	29.30
7.80	0.29	39.0	2.11	91.2	30.72
10.0	0.47	40.0	2.11	96.0	36.19
11.0	0.57	43.0	2.14	100.0	40.82
11.2	0.58	44.0	2.15	106.0	47.89
13.1	0.80	45.0	2.16	123.0	65.81
15.0	1.04	48.0	2.34	125.0	67.74
15.2	1.07	52.0	2.64	143.0	91.75
17.6	1.38	53.0	2.87	150.0	85.47
18.0	1.42	58.2	3.99	166.0	92.53
20.0	1.65	60.0	4.67	180.0	96.06
22.0	1.83	61.0	5.14	192.0	98.12
25.0	2.02	62.0	5.60	200.0	98.93
27.6	2.11	63.0	6.06	260.0	100.0
30.0	2.11	74.0	13.10	300.0	100.0

激光衍射法测试的是粉末颗粒粒径不同粒径段所占的体积累积分布，从表 2、表 3、表 4 中可以看到，在激光衍射法测试的镍基自熔合金粉末、镍包碳化钨复合粉、镍包石墨复合粉的粉末粒度分布中，45μm 以下粒度段的体积累积百分数分别为 2.1%、0.02% 和 2.16%，106μm 以上粒度段的体积累积百分数为 15.43%、47.82% 和 52.11%；将 -45μm 粒度段和 +106μm 粒度段的激光法测试的结果与干筛分相比（如表 5 所示），表明：(1) 二者的测试结果相差较大；(2) 粒度越大（如 106μm 以上）测试结果相差越大，粒度越小（如 45μm 以下）测试结果相差越小。

2.3 扫描电镜法测试粉末粒度

扫描电镜测试粉末粒度方法属于显微镜法，是利用图像分析技术对粉末粒度分布进行测试的方法 [1]。在该方法中引进了等效体积概念，对于球形粉末，粉末的直径为即为粒度值，对于不规则粉末，将不规则粉末的体积换算成等体积的球形粉末，该球形粉末的直径视作不规则粉末的等效体积直径，然后利用图像分析技术做出粒度分布曲线。任中京归纳了常用的一些等效粒径的方式 [6]，并认为不同等效粒径的分析结果差异较大，不具有可比性。本文采用等效体积粒径的方式，利用扫描电镜在一定放大倍数下，随机选定视场下测量粉末的等效体积粒径，利用 Excel 数据分析软件，以 5μm 作为最小分段，计算颗粒直径在该粒度段内出现的频率，然后做出粉末的粒度分布曲线。对于球形的 Ni60B 合金粉末，直接测量

表 5 同一粒度段不同测试方法测试结果的比较

Table 5 Comparison of test results of different test methods in the same granularity segment

粒度段	测试方法	含量，%		
		KF-Ni60B	KF-56	KF-21T
+106μm	干筛分法（平均值）	3.6	0.8	1.1
	激光法	15.43	47.82	52.11
	扫描电镜法	1.0	7.5	60.0
	标准方差	4.4	14.7	18.5
-45μm	干筛分法（平均值）	5.5	3.0	6.0
	激光法	2.1	0.02	2.16
	扫描电镜法	5.2	8.5	0.5
	标准方差	1.1	2.5	1.6

颗粒的直径 d 作为粉末颗粒粒径，如图 2(a)；对于不规则的镍包碳化钨复合粉，将每个颗粒近视为椭球形，测量颗粒的最长和最短处尺寸，分别作为各轴的长度，如图 2(b) 椭球的体积计算公式为：

$$V = \frac{4\pi abc}{3} \tag{2}$$

其中，a 与 b,c 分别代表各轴的一半，为简化测试和计算，设定 a=b，则体积公式为：

$$V = \frac{4\pi a^2 c}{3} \tag{3}$$

换算成等效球形体积，计算等效体积直径：

$$\frac{4\pi a^2 c}{3} = \frac{4\pi r^3}{3} \tag{4}$$

则：

$$d = 2r = 2\sqrt[3]{a^2 c} \tag{5}$$

对于片状的镍包石墨复合粉，相对于 Ni6B 合金粉末和镍包碳化钨复合粉更接近于二维形状，为简化计算，本文测量片状粉末的最长边 d_{max} 和最短边 d_{min}，取二者的平均值作为等效球形的直径，如式 (6) 所示：

$$d = \frac{d_{max}+d_{min}}{2} \tag{6}$$

这种方式产生的误差可能会较大，作为参考分析。

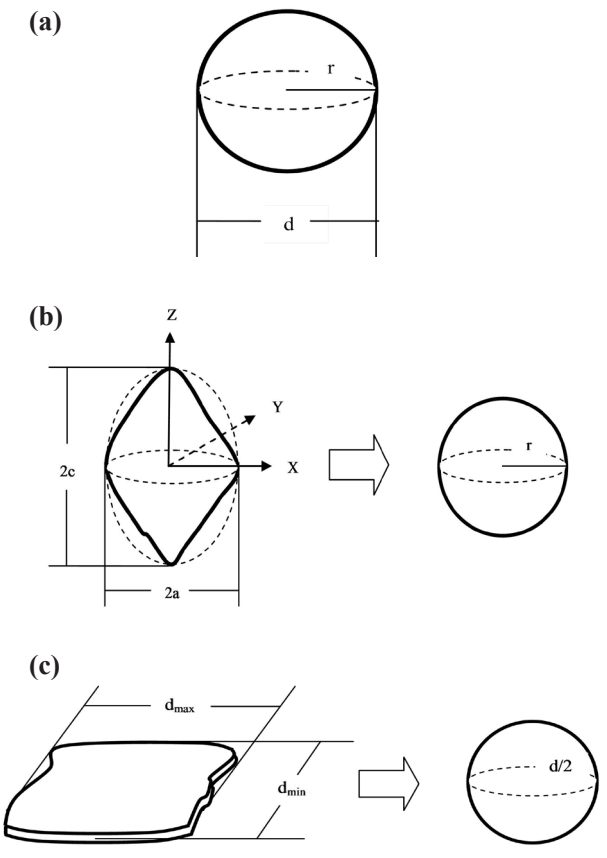
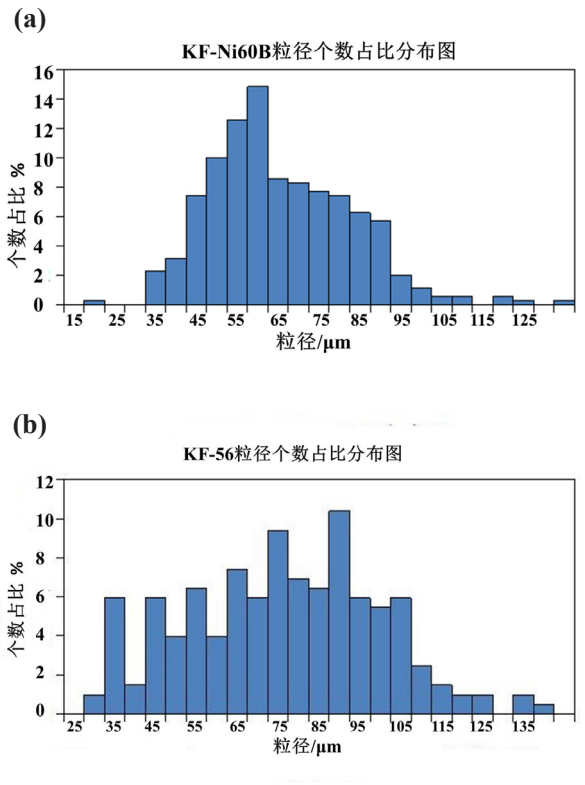


图 2 三种形状粉末等效体积直径计算示意图：(a) 球形粉末；(b) 类椭球形粉末；(c) 片状粉末

Fig.2 Schematic diagram of equivalent volume diameter calculation of three different shapes of powder: (a) spherical powder; (b) type ellipsoidal powders; (c) flake powder

采用扫描电镜法测得的三种粉末的粒度分布曲线如图 3 所示。图 3(a) 为 Ni60B 合金粉末扫描电镜测试的粒度分布图，从图看到，45μm 以下粉末所占累积百分数约为 5.2%，106μm 以上粉末所占累积百分数约为 1.0%，干筛分法测得的结果分别为 5.5% 和 3.6%（如表 5 所示），二者测试结果较为接近，而激光法测得的结果分别为 2.1% 和 15.43%，与扫描电镜法和干筛分测试的结果相差较大。图 3(b) 为镍包碳化钨复粉扫描电镜法测试的粒度分布图，从图看到，45μm 以下粉末所占累积百分数约为 8.5%，106μm 以上粉末所占累积百分数约为 7.5%，干筛分法测得的结果分别为 0.8% 和 3.0%（如表 5 所示），二者测试结果有一定差异，激光法测得结果分别为 0.02% 和 47.82%，与扫描电镜法和干筛分测试的结果相比存在较大差异。图 3(c) 为扫描电镜法测得的镍包天然石墨复合粉粒度分布图，从测试结果可知，45μm 以下粉末所占累积百分数约为 0.5%，106μm 以上粉末所占累积百分数约为 60.0%，干筛分法和激光衍射法测得这两个粒度段的含量则分别为 6.0%、1.1% 和 2.16%、52.11%，均存在较大差异。



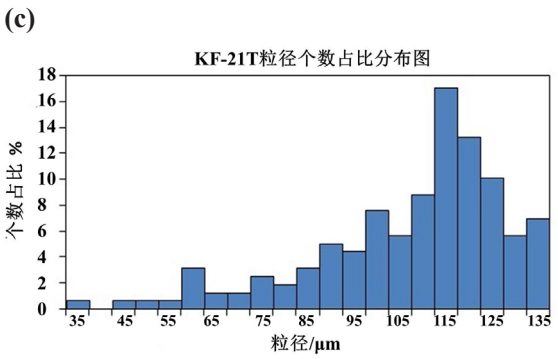


图 3 扫描电镜法测试粉末粒度分布曲线图：(a) Ni60B; (b) KF-56; (c) KF-21T

Fig.3 The powder particle size distribution curve measured by SEM: (a) Ni60B; (b) KF-56; (c) KF-21T

对于同一产品，采用公式 (1) 计算三种测试方法获得的各种粒度段含量测试结果的标准误差，如表 5 所示，对于 +106μm 粒度段，采用干筛分法、激光法、显微镜法测试的镍基自熔合金粉末、镍包碳化钨复合粉和镍包石墨复合粉的标准方差分别为 4.4%、14.7% 和 18.5%；对于 -45μm 粒度段，采用三种方法测试的镍基自熔合金粉末、镍包碳化钨复合粉和镍包石墨复合粉的标准方差分别为 1.1%、2.5% 和 1.6%。结果表明，粉末越细，三种方法测试结果的之间的误差越小，每种方法的测试结果误差也越小。

根据以上干筛分法、激光衍射法和扫描电子显微电镜法测试三种不同形貌粉末粒度的测试结果和测试过程情况，分析三种方法存在较大差异的原因主要有以下几个方面：(1) 三种方法测试原理不同；(2) 各种方法每次测试的样品数量差异较大，干筛分法样品量为 100g，激光衍射法样品量为几克，而扫描电镜法的样品量为 200~300 个粉末颗粒；(3) 粉末形貌的差异；(4) 等效体积直径计算方法产生的偏差；(5) 制样产生的偏差，如扫描电镜法在制样过程中，采用导电胶粘带制样时，粉末颗粒大小取样不均匀。

3 结论

(1) 采用干筛分法测试三种不同形貌粉末涂层

（下转 68 页）

[3] 吴萍 , 周昌帜 , 唐西南 . 激光熔覆 Ni 基合金与 Ni/WC 涂层的磨损特性 [J]. 金属学报 , 2002, 38(12): 1257-1260.
[4] Chen Y, Wang H M. Growth morphology and mechanism of primary TiC carbide in laser cladding TiC/FeAl composite coating[J]. Materials Letters, 2003, 57: 1233-1238.
[5] 李强 , 雷廷权 , 孟庆昌 , 等 . 激光熔覆 Ni-Cr-B-Si-C 合计涂层显微组织的透射电镜研究 [J]. 中国激光 , 1999, 26(4): 374-377.
[6] 赵文强，苗鸿宾，游小红 . 矿用液压支柱的激光熔覆强化技术研究 [J]. 矿山机械 , 2011, 12: 18-19.
[7] 韩文静 , 宋进朝，刘学功，等 . 煤矿机械应用激光熔覆技术的研究与实践 [J]. 电镀与精饰 , 2016, 08: 18-22.
[8] 俞树荣 , 何燕妮 , 李淑欣 , 等 . 晶粒尺寸对奥氏体不锈钢晶间腐蚀敏感性的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报 , 2012, 01: 70-74.
[9] 汪兵 , 刘清友 , 贾书君 , 等 . 晶粒尺寸对普碳钢耐工业环境下大气腐蚀性能的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报 , 2007, 04: 193-196.
[10] 罗检，张勇 , 钟庆东 , 等 . 晶粒度对一些常用金属耐腐蚀性能的影响 [J]. 腐蚀与防护 , 2012, 04: 349-352.
[11] 宛农 , 董建新 , 谢锡善 . 1Cr17Ni2 不锈钢平衡组织的预测及控制 [J]. 动力工程 , 2005, 03: 449-452.
[12] 巢昺轩 , 蒋克全 , 王宝龙 . 1Cr17Ni2 不锈钢热处理工艺及性能研究 [J]. 热处理技术与装备 , 2017, 05: 18-22.
[13] Sigolo E, Soyama J, Zepon G, et.al. Wear resistant coatings of boron-modified stainless steels deposited by plasma transferred arc[J]. Surface and Coatings Technology 2016, 302: 255-264.
[14] 刘松 . 不同 δ 铁素体含量的 $1Cr_{17}Ni_2$ 钢耐腐蚀性能研究 [J]. 失效分析与防护 , 2017, 04: 265-268.
[15] 黄斌 , 陶华 , 张广来 , 等 . 不同热处理 $1Cr_{17}Ni_2$ 钢材料性能及其应用的影响 [J]. 机械强度 , 2005, 27(6): 847-850.
[16] 白鹤 , 王伯健 . 马氏体不锈钢成分、工艺和耐蚀性的进展 [J]. 特殊钢 , 2009, 02: 30-33.
[17] 尹燕 , 刘鹏宇 , 路超 , 等 . 选区激光熔化成形 316L 不锈钢微观组织及拉伸性能分析 [J]. 焊接学报 , 2018, 08: 77-81.
[18] 张述林 , 李敏娇 , 王晓波 , 等 . 18-8 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀 [J]. 中国腐蚀与防护学报 , 2007, 02: 124-127.
[19] 李俐群 , 申发明 , 周远东 , 等 . 超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比 [J]. 中国激光 , 2019, 10: 11-18.
[20] 朱红梅 , 李勇作 , 张振远 , 等 . 激光熔覆制备马氏体 / 铁素体双相不锈钢层的力学与腐蚀性能研究 [J]. 中国激光 , 2018, 12: 1-6.

（上接 63 页）

材料（粒度规格为 45μm~106 μm）的粒度分布，测试值的标准误差小，具有较好的重复性。对于 45μm 以上的粉末涂层材料，采用干筛分法表征这些粉末材料的粒度分布是适宜的。

(2) 对粒度规格为 45μm~106μm 的三种粉末，三种方法测试的结果存在一定的差异，且粒度越大，差异越大。测定结果显示，干筛分法与扫描电镜法测试的球形镍基自熔合金粉末的结果较为相近，对于 106μm 以上的粉末材料，两种方法测试的结果分别为 3.6%、1.0%，对于 45μm 以下的粉末材料，两种方法的测试结果分别为 5.5%、5.2%。

(3) 粉末越细，三种方法测试结果的之间的误差越小，且每种方法的测试结果误差也越小。

参考文献

[1] 胡荣泽 . 粉末颗粒和孔隙的测量 [M]. 北京 : 冶金工业出版社 , 1982.
[2] 夏阳华 , 熊惟皓 , 丰平 . 粉末粒度测试方法评述 [J]. 硬质合金 , 2003, 20(1): 29-31.
[3] 杨粉荣 , 文洪杰 , 钟勤 . 几种粒度测定方法的比较 [J]. 物理测试 , 2005, 23 (5): 36-39.
[4] 沙菲 . 几种常用的粉体粒度测试方法 [J]. 物理检验 - 物理分册 , 2012, 23 (6): 374-377.
[5] 李文凯 , 吴玉新 , 黄志民 , 等 . 激光粒度分析和筛分法测粒径分布的比较 [J]. 中国粉体技术 , 2007(5): 10-13.
[6] 任中京 . 颗粒粒度的定义与粒度测定结果的可比性 [J]. 中国粉体技术 , 2000, 6: 184-185.