

高级耐火复合涂层

〔苏〕Л.М.捷米金科 著

马志春 译

薛启文 校

内 容 简 介

本书译自1979年苏联冶金出版社出版的Л.М.捷米金科(Демиденко)著的《Высокоогнеупорные композиционные покрытия》一书。

本书系统地论述了耐火材料复合涂层制取的理论与实践问题及其在保护制品上的喷涂方法;分析了涂层形成的机理及其与基面的相互作用;阐述了涂层喷涂的各种方法及不同成分的涂料的喷涂特点。同时,还介绍了涂层各种性质的检测方法及其在冶金、机械制造(包括航空及空间技术)等工业中的应用。

本书可供冶金、机械制造及国防工业中从事耐火材料与热工设备的内衬喷涂、研究制品的耐热、耐磨性能的工程技术人员参考。

高级耐火复合涂层

(苏)Л.М.捷米金科 著

马志春 译

薛启文 校

冶金工业出版社 出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 6 3/4 字数176千字

1984年10月第一版 1984年10月第一次印刷

印数 00,001~4,150 册

统一书号: 15062·4134 定价1.30元

目 录

序言

第一章 高温喷涂耐火复合涂层的理化原理..... 1

第一节 用熔液润湿固体表面..... 1

1. 润湿现象的实质 1

2. 固体表面结构的影响 2

3. 熔液成分和温度的影响 4

4. 气体介质的影响 8

第二节 喷涂质点在火焰中的运动..... 9

1. 火焰中质点的浓度 10

2. 质点的运动速度 13

3. 火焰和质点间的热交换 16

4. 质点的球化 19

5. 熔融质点的凝固 21

6. 熔融相和固相间的凝结 22

7. 熔体液滴的破碎 23

8. 质点的化学变化和结构的变化 24

第三节 涂层的形成..... 25

1. 质点冲击表面 26

2. 质点与基面粘附的机理及动力学 31

3. 涂层的结构 34

第四节 热处理过程中涂层与基面的相互作用..... 36

1. 化学反应 37

2. 涂层的显微组织 39

3. 涂层内的应力 42

第二章 高温喷涂涂层..... 45

第一节 火焰喷涂涂层..... 45

1. 粉末的喷涂	47
2. 芯条的喷涂	48
3. 涂层的爆炸喷涂	49
第二节 等离子喷涂涂层	53
1. 电弧等离子喷涂涂层	57
2. 高频等离子喷涂涂层	65
第三节 在电磁场中喷涂涂层	68
第三章 耐火材料复合涂层	71
第一节 喷涂用粉末的制备工艺	86
第二节 涂层的稳定性	93
第三节 氧化铝基涂层	95
1. 玻璃粘结剂的氧化铝基涂层	96
2. 金属作粘结剂的氧化铝基涂层	100
3. 氧化铝和金属氧化物基涂层	102
第四节 氧化铝和二氧化硅基涂层	108
第五节 氧化铝和氧化镁基涂层	113
第六节 氧化铝和氧化锆基涂层	115
第七节 氧化镁基涂层	116
1. 镁石基涂层	117
第八节 氧化镁和氧化铬基涂层	122
第九节 二氧化锆基涂层	125
第十节 锆石基涂层	129
第十一节 氧化铬基涂层	131
第十二节 碳化物基涂层	132
1. 用金属作粘结剂的碳化钨涂层	132
2. 碳化铬涂层	143
3. 混合碳化物涂层	143
第十三节 碳基涂层	145
第十四节 氮化物基涂层	146
第十五节 多层涂层	146

第十六节 加固涂层	153
第四章 涂层性质的检验方法	157
第一节 涂层的机械强度	157
1. 耐压强度	158
2. 抗折强度	158
3. 抗拉强度	159
4. 蠕变和持久强度	160
第二节 涂层与基面的粘结强度	163
第三节 涂层的热稳定性	166
第四节 涂层的化学稳定性	171
第五节 涂层的耐磨性	173
第六节 涂层的导电性	175
第七节 涂层研究的特殊方法	180
第八节 涂层的无损检测法	181
1. 超声波探伤法	181
2. 涡流法	182
3. 全息照像干涉量度法	183
4. 红外线辐射法	184
5. 无线电超高频法	185
第五章 涂层在冶金中的应用	186
第一节 金属的保护	187
第二节 铸模的保护	190
第三节 制品的喷涂成型	190
第四节 在热工设备内衬上喷涂涂层	191
1. 中间盛钢桶	191
2. 转炉	193
参考文献	199

第一章 高温喷涂耐火复合涂层的理化原理

制取物理机械性能高、抗热负荷及耐腐蚀的耐火涂层，是当代重要的课题之一。

无论采用火焰法、等离子法、高频法或爆炸法，高温喷涂涂层形成的科学原理都相同，只是操作技术和工艺上存在差异而已。

由于涂层是从熔融状态凝固而成的，所以受喷保护面及涂层的固体组分（如果不是涂层的所有组分在其形成时都处于熔融状态）都被熔液充分润湿是获得必要质量涂层的重要因素。

获得高质量涂层的其它必要条件是：质点具有热活化作用、质点的化学成分不变、质点能获得必需的动能、表面受到塑性冲击，以及质点之间和质点与受喷基面之间能坚固地粘结。

第一节 用熔液润湿固体表面

在固相与液相的接触界面上，固相与液相发生相互作用，开始时呈现为液体润湿固体。

用金属、氧化物和玻璃等的熔液润湿固体表面，其润湿的程度完全取决于固体表面的结构、熔液的成分、周围介质的温度及特性。

1. 润湿现象的实质

润湿乃是熔液与固体相互产生理化作用的一种特殊形式，它或者以熔液的液滴在固体表面上流散的形式表示出来，或者相反，以熔液的液滴在固体表面上凝结的形式表示出来。

系统力图减少固体、熔液与气体分界面上的表面自由能的力量，是熔液流散过程的动力，如图1-1所示。

系统表面自由能的变量 ΔZ 可用下式表示：

$$\Delta Z = \Delta S_{p-\Gamma} \sigma_{p-\Gamma} + \Delta S_{T-\Gamma} \sigma_{T-\Gamma} + \Delta S_{p-T} \sigma_{p-T} \quad (1-1)$$

式中 $\Delta S_{p-\Gamma}$ ——熔液与气体分界面上的自由能的变量；

$\Delta S_{T-\Gamma}$ ——固体与气体分界面上自由能的变量；

ΔS_{p-T} ——熔液与固体分界面上自由能的变量；

$\sigma_{p-\Gamma}$ ——熔液与气体分界面上的表面张力；

$\sigma_{T-\Gamma}$ ——固体与气体分界面上的表面张力；

σ_{p-T} ——熔液与固体分界面上的表面张力。

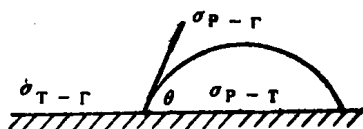


图 1-1 熔液液滴的平衡状态

完全润湿时, $\Delta S_{p-\Gamma} = \Delta S_{p-T} = -\Delta S_{T-\Gamma}$, 于是得出:

$$\Delta Z / \Delta S = \sigma_{p-\Gamma} + \sigma_{p-T} - \sigma_{T-\Gamma} \quad (1-2)$$

公式 (1-2) 是文献 [1] 首先提出来的。

在一般情况下, $\Delta S_{p-\Gamma} = \Delta S_{T-p} \cos \theta$, 因而

$$\Delta Z / \Delta S = \sigma_{p-\Gamma} \cos \theta + \sigma_{p-T} - \sigma_{T-\Gamma} \quad (1-3)$$

在热力学平衡的条件下, $\Delta Z / \Delta S = 0$, 即

$$\sigma_{T-\Gamma} = \sigma_{p-\Gamma} \cos \theta + \sigma_{p-T} \quad (1-4)$$

从而

$$\cos \theta (\sigma_{T-\Gamma} - \sigma_{p-T}) / \sigma_{p-\Gamma} \quad (1-5)$$

角 θ 称作边缘角, 用以度量熔液润湿能力的大小。边缘角 θ 越小, 润湿就越好。必须考虑边缘角的滞后现象。开始边缘角 θ_p 决定熔液的流散程度, 最终边缘角 θ 决定熔液集结成液滴的能力, 这两个角的差 $\theta_p - \theta$ 表示润湿的滞后作用。

2. 固体表面结构的影响

与光滑表面的润湿相比, 粗糙表面的润湿有其特点, 表面不平度使得熔液与固体表面的接触面积增大。粗糙度对润湿边缘角的影响可用温则里—捷良金 (Венцель—Дерягин) 公式来描述:

$$\cos\theta = r\cos\theta_0 \quad (1-6)$$

式中 θ ——粗糙固体表面上的润湿边缘角；

θ_0 ——光滑固体表面上的润湿边缘角；

r ——熔液在粗糙表面上和在光滑表面上接触面积的比率。

熔液的液滴与粗糙表面接触的实际面积，取决于受喷基面凸出部分的高度和宽度。虽然用这些参数来描述表面特征还相当困难，但在某些情况下，也能确定这些参数对润湿边缘角的影响程度。例如，凸出部分的平均倾斜角为 17° 时，铜熔液的边缘角取决于粗糙的玻璃质表面凸出部分的高度。它们有如下的关系^[2]：

凸出部分的高度，微米	0	0.2	0.5	1.0	10
润湿边缘角，度	134	152	151	151	150

由上述数据可知，润湿边缘角随着底板表面凸出部分的增高而增大，最后实际上为不变值。

开口气孔率对润湿边缘角的影响，在一般情况下可用下式确定^[3]：

$$\cos\theta_n = (1-n)\cos\theta \pm n \quad (1-7)$$

式中 θ ——无气孔表面上的润湿边缘角；

n ——气孔率。

$\theta < 90^\circ$ 时取“+”号， $\theta > 90^\circ$ 时取“-”号。

对于碳化硅—熔液系统来说，当碳化硅底板开口气孔率为5~35%时，文献^[4]的作者给出了润湿边缘角与底板气孔率更准确的经验关系式：

$$\theta_n = \theta - 0.03n \quad (1-8)$$

式中 θ ——无气孔表面上的润湿边缘角；

θ_n ——多孔表面上的润湿边缘角；

n ——气孔率，%。

底板开口气孔的大小，影响边缘角的滞后作用。例如石墨，其气孔平均尺寸为4微米时，滞后角等于 20° ；而当气孔尺寸增大到100微米时，则润湿滞后角增加到 80° ^[5]。通常，随着熔液

接触时间的延长，多孔表面上的边缘角则减小。

多晶体的基面颗粒尺寸，实际上不影响润湿边缘角，例如，单晶和多晶氧化铝受不同金属液滴润湿的边缘角都相同^[6]。

3. 熔液成分和温度的影响

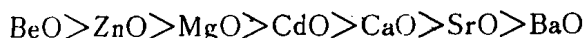
尽管目前关于各种底板受玻璃及金属氧化物熔液润湿的资料很多，但是，有关晶格结构、原子中电子的分布及熔液的成分对润湿性能的影响，暂时还没有明确提出来。润湿性方面的大部分资料都是经验数据，并且某些规律是显而易见的。

高粘度的熔液在金属和耐火材料的表面上流散得不好，其特点是润湿边缘角很大。

随着温度的提高，润湿边缘角减小，这首先是由于熔液粘度的降低而引起的。

(1) 用玻璃熔液润湿表面

各种表面受玻璃熔液润湿的程度与玻璃熔液的结晶化趋势有关。例如，往钠、钛组成的玻璃熔液中加入周期表中第二主族金属氧化物，其结晶的趋向取决于添加物的种类，一般可按下列顺序排列^[7]：



BeO 、 ZnO 、 MgO 这些氧化物通常使玻璃结成立体结晶，结果导致润湿作用变坏。 CdO 、 CaO 、 SrO 、 BaO 这些氧化物添加到玻璃熔液中，可促使面晶出现，面晶能改善润湿作用。

随着玻璃熔液温度的升高，润湿边缘角缩小。此时发现下列规律：给定成分的玻璃熔液，具有临界温度，在此温度下，润湿角达到最大限度（ 155° ），而与底板的力学性质无关^[8]。继续提高温度，会导致润湿边缘角的减小。但是，在高温时润湿边缘角实际与底板类型又无关。显然，这是由于高温下玻璃熔液的粘度降低，从而保证完全润湿的结果。在温度为 1200°C 的氩气中，用含有添加物（ $16\% \text{Na}_2\text{O}$ 、 $64\% \text{SiO}_2$ 和 20% 金属氧化物）的硅酸盐熔液润湿铁质表面，其润湿边缘角取决于添加物的种类，可用下列数值表示^[9]：

添加的氧化物	BaO	SrO	CaO	MgO
润湿边缘角, 度				
开始	34	48	52	65
最终	31	41	40	47
溶液粘度, 泊·秒	0.202	0.212	0.215	0.256

硅酸钠玻璃熔液中含有氧化镁添加物时, 润湿滞后角最大。这种玻璃溶液的润湿边缘角与添加物的种类有关, 按MgO、CaO、SrO、BeO这种排列次序依次减小。用成分(重量)为72.14%SiO₂、0.85%Al₂O₃、7.75%CaO、3.55%MgO、15.12%Na₂O、0.11%Fe₂O₃、0.48%SO₃的玻璃熔液润湿耐火材料底板, 其润湿作用取决于耐火材料种类(见表1-1)^[10]。

表 1-1 几种耐火材料受玻璃熔液润湿的边缘角

耐火材料种类	润湿边缘角, 度						
	800℃	850℃	900℃	950℃	1000℃	1050℃	1100℃
斜锆刚玉 20	152	142	117	98	83	73	—
斜锆刚玉 33	150	140	113	97	82	70	59
莫 来 石	—	125	103	85	75	69	—
刚 玉	145	125	93	86	78	70	—
高铝质耐火材料	125	112	93	86	75	69	—

由表1-1可以看出, 玻璃熔液在斜锆刚玉耐火材料(斜 锆 刚玉20、33)表面上的润湿边缘角最大, 而在高铝质耐火材料表面上的润湿角则比刚玉表面上的稍小。

由下列资料可知, 电熔刚玉能被分成分Ⅰ和Ⅱ的硅酸铝硼熔液很好地润湿(润湿角是在观测温度下将液滴停放45~60分钟后测定的^[11]):

温度, °C	1200	1250	1300
润湿边缘角, 度			
用成分Ⅰ润湿电熔刚玉时	88	78	38
用成分Ⅱ润湿电熔刚玉时	86	74	50
玻璃熔液成分, % (重量);			

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO
I	54.26	24.48	0.45	2.62	3.17
II	59.66	15.04	0.69	0.84	3.31
	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	灼碱
I	0.81	2.90	2.54	2.36	5.37
II	1.02	3.75	2.13	7.73	5.83

B₂O₃、K₂O、Na₂O、Li₂O是相间活泼的氧化物。更换或添加碱性氧化物时，玻璃熔液的润湿性能按K₂O→Na₂O→Li₂O的次序逐渐得到改善。

(2) 用氧化物熔液润湿表面

在2050℃等温静置的条件下，金属钼、钽及铌受氧化铝润湿的边缘角减小，而钼受润湿时，大约经过40~50分钟，其边缘角就达到恒定值，即等于40°^[12]。

氧化铝对钼的润湿角比对钼的润湿角小得多，并且随着时间的延长，前者将继续减小，一直到液滴完全流散为止。很明显，润湿作用的改善与金属和氧化铝之间化学反应的时间有关。

添加物既可减少熔液的表面张力，又可增加熔液的表面张力。显然，在两种情况下，固体与液体相间界面上的自由表面能改变了。例如，研究金属钨、钼、铌被氧化铝熔液（氧化铝熔液中添加从0到50%的BeO、MgO、CaO、Cr₂O₃、ZrO₂、TiO₂、V₂O₅）润湿时，如果添加的氧化物增加，则所有难熔金属上的初始润湿边缘角首先增大，而达到最大值之后，又重新减小（见表1-2）。

碱金属氧化物熔液对钼和铁的润湿作用，按K₂O、Na₂O、Li₂O的次序增大，而碱土金属氧化物对这些金属的润湿作用，则按MgO、CaO、SrO、BaO的次序急剧增加^[14,15]。碱土金属氧化物的熔液对陶瓷和耐火材料表面的润湿作用也遵循上述规律^[16]。

用铁橄榄石熔液，于1300℃时对耐火材料表面进行润湿，其平衡边缘角 α 如下^[17]：

底板材料	石英	斜锆刚玉	刚玉	镁砖	铬镁砖	水镁石
润湿边缘角，度	50	45	20	15	0	0

表 1-2 用氧化铝润湿的边缘角与添加物种类和数量的关系

添加物数量% (重量)	金属的润湿角 ^① , 度			添加物数量% (重量)	金属的润湿角 ^① , 度			添加物数量% (重量)	金属的润湿角 ^① , 度		
	W	Mo	Nb		W	Mo	Nb		W	Mo	Nb
添 加 MgO				添 加 Cr ₂ O ₃				添 加 TiO ₂			
0	34	33	35	5	41	50	35	5	—	44	28
	25	26	27		32	33	29		—	43	25
5	44	38	36	10	44	62	36	10	—	42	30
	36	37	25		36	36	30		—	32	33
10	53	47	41	20	32	55	28	20	—	33	12
	41	44	24		29	31	26		—	23	11
20	45	48	41	30	20	28	18	30	—	28	5
	37	44	26		17	20	16		—	20	5
30	57	40	43	40	10	14	9	40	—	25	—
	45	34	29		7	10	7		—	17	—
40	47	31	29	50	—	—	—	50	—	15	—
	43	31	15		—	—	—		—	10	—
50	45	25	19								
	38	25	7								

① 分子为 $\tau=0$ 时的润湿角；分母为 $\tau=30$ 分钟时的润湿角。

铁橄榄石在1300℃的温度下对石英、斜锆刚玉、刚玉、镁砖、镁铬砖和水镁石的润湿强度，从石英到水镁石依次逐渐增大。氧化亚铁在流散的情况下，除石英外，对上述耐火材料的润湿角也按同样的次序迅速减小，大约经过0.6秒钟润湿角即达到零度。

(3) 用金属熔液润湿表面

对铁水在氧化铝和氧化镁组成的底板上，流入或流开时的润湿角^[18]曾进行过研究，当液滴处于两平行板之间，上板可移动。在没有薄膜的条件下，铁水在金属表面上的最大流入角为140°~147°。铁与氧化铝、氧化镁接触并保持1~2小时，在平板表面上所形成的流入角为160°~170°，最小为100°，而当液滴向四周扩散时，则流入角逐渐增加到110°。

金属熔液对碳化物、硼化物的润湿作用，受供应体与接受体

的关系所制约。

元素周期表中第Ⅳ族金属的碳化物 (TiC、ZrC、HfC) 含不活泼的电子, 因此, 它们与金属熔液反应微弱^[4]。第Ⅴ族金属的碳化物 (VC、NbC、TaC) 是接受体, 所以, 它们对熔液的活泼性增强。第Ⅵ族金属的碳化物, 与金属的反应最强。

在氩气介质中测定的熔液动粘度及熔液对碳化物的润湿角 α 如下^[4]:

	Fe	Co	Ni	Al
温度, °C	1550	1500	1450	900
动粘度及对碳化钛				
的润湿角 α ①	756②/125	3600/6	3420/25	139/184

下列镍熔液对TiC—VC组成的复合物的润湿角的数据表明, 润湿角与复合物中的成分含量有关^[19]:

TiC的含量, % (分子量)	0	10	25	40	75	100
润湿边缘角, 度	14	0	0	0	18	30

通常, 氮化物能被过渡元素金属的熔液润湿, 并且在1500~1550°C时也可被含碳的铁熔液润湿^[21]。在某些情况下, 硼化物的润湿作用与 $1:N^n$ 的比值有关 (N 为主量子数; n 为熔融金属原子 d 亚层上的电子数)。电子转移到未充满熔液成分元素的 d 亚层, 可使润湿作用得到改善。对于钛和锆的硼化物而言, 随着 $1:N^n$ 比值的减小, 润湿边缘角减小, 润湿作用改善。很明显, 润湿作用的改善, 与电子转移到未充满熔液成分元素的 d 层上及固体—液体界面上的液体, 表面张力减小有关^[21]。

4. 气体介质的影响

金属初次接近氧化性气体介质时, 气体介质所产生的影响与金属表面上形成的氧化膜有关。大家知道, 硅酸盐熔液能很好地

① 铝在900°C时的动粘度及对碳化物, 即VC、Cr₂C₃的润湿角 α 分别等于326/130和457/120;

② 分子表示动粘度, 千焦耳/米², 分母表示润湿角 α , 度。

润湿氧化了的金属表面，而润湿未氧化的金属表面则较差。下列资料表明：随着铁的氧化程度的提高，在910℃温度下，硅酸钠熔液（70% SiO₂、30% Na₂O）对铁的润湿作用变好^{〔22〕}：

铁的氧化物	Fe	FeO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃
润湿边缘角，度	90	52	19	15

但是，这一规律不是对全部金属都适用的。由Mn₃O₄、MnO构成的涂层，能够很好地被酸性熔液润湿。下列数据表明，随着锰的氧化程度的提高，硅酸盐熔液对锰的润湿作用变坏^{〔23〕}。

锰的氧化物	MnO	Mn ₂ O ₃	MnO ₂
润湿边缘角，度	29	100	120

看来（文献〔24〕的作者这样认为），氧化了的表面对润湿性能的影响，不仅决定于表面氧化的程度，而且也取决于氧化层的结构。对薄而致密的氧化膜的润湿比对厚而粗糙的表面（同材质）要好。

第二节 喷涂质点在火焰中的运动

复合材料的高温喷涂过程，按下列几个阶段依次连续或同时进行：质点运动的加速、加热、熔化、凝聚、破碎、球化、质点冲击受喷基面及涂层的形成。

下面研究气体及等离子流股（假定称之为火焰）中的这些过程。

粉末质点和火焰乃是分散系统，且分布在火焰（分散相）中的质点（分散内相）的体积很小。

分散流股根据运动的特性，可分为层流和紊流。层流运动时，混合和迁移的全部过程属于分子特性；紊流状态时，出现宏观的涡流运动。

一般情况下，分散流股的特性可用无量纲的表示流体力学性质的雷诺数来判定。

$$Re = wd_s / \nu \quad (1-9)$$

式中 w ——质点的相对速度，米/秒；

ν ——气体的运动粘度, 米²/秒;

d_s ——质点的当量直径, 米。

假定质点重量与逆着流股的气体动压头相等, 便可得到 w 的计算式:

$$1/6\pi d_s^3 (\rho_r - \rho_g) g = C_f (\pi d_s^2 / 4) (\rho_g w^2 / 2) \quad (1-10)$$

于是

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_r - \rho_g) g}{\rho_g C_f} d_s} \quad (1-11)$$

式中 ρ_r ——质点密度, 公斤/米³;

ρ_g ——气体密度, 公斤/米³;

C_f ——质点的阻力系数。

因此

$$\begin{aligned} Re &= \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_r - \rho_g) g d_s}{\rho_g C_f} \frac{d_s^2}{\nu^2}} \\ &= \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_r - \rho_g) g d_s^3}{\rho_g \nu^2} \frac{1}{C_f}} \\ &= \sqrt{\frac{4}{3} \frac{Ar}{C_f}} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 Ar ——阿基米德准数。

公式 (1-12) 是 П. Б. 梁森科最早提出的 [205]。

用雷诺数 $Re \leq 2300$ 表示的分散流股可视为层流; 而 $Re > 10000$ 的分散流股则可视为紊流。当 Re 为 2300~10000 时, 根据火焰组织及其各向异性之不同, 其流股可为层流也可为紊流。

1. 火焰中质点的浓度

分散系统的特性, 以固相对气相的相对流量浓度 μ 及分散内相在总分散相中所占的体积比的体积浓度 β 来表示。对于分散系统

$$\mu = M_r / M_g = (1 - \beta) / \beta \cdot (\rho_r / \rho_g) (u / v) \quad (1-13)$$

$$1 - \beta = M_r / u F \rho_r \quad (1-14)$$

式中 M_g ——气体介质的流量, 公斤/秒;

M_r ——固相的流量, 公斤/秒;

u ——固相的速度, 米/秒;

v ——气体介质的速度, 米/秒;

ρ_r ——固相的密度, 公斤/米³;

ρ_g ——气体介质的密度, 公斤/米³;

F ——火焰流股的截面积, 米²。

根据分散内相的浓度, 分散流股可分为下列类型^[26]: 微粉尘流股、气体悬浮流股、流体化流股、饱和相中的流股及万有引力移动层。

几种主要类型的分散流股的近似界线如下: 微粉尘流股 $0 < \beta < 0.00035$; 气体悬浮流股 $0.00035 < \beta < 0.03$; 流体化流股 $0.03 < \beta < 0.3$; 饱和相中的流股 $0.3 < \beta < \beta_{kp}$ 。

喷涂涂层时, 质点在等离子流股火焰中的体积浓度 β 通常不大于 0.03。

流股中固体质点浓度的增加, 导致其主要特性 (密度、速度、散热系数) 发生变化。

由于气体流股的扩张 (膨胀), 火焰中固体质点的浓度 μ_r 不是一个常数。流股轴心上的 μ 值为^[27]:

$$\mu = \rho_r / \rho_g - 1 \quad (1-15)$$

式中 ρ_r ——流动流股截面中心上的混合物的密度, 公斤/米³;

ρ_g ——气体密度, 公斤/米³。

根据 Г. Н. 阿勃拉莫维奇 (Абрамович) 的资料^[27], 考虑到对质点分散性的修正及其初始浓度, 以固体质点浓度表示流股流散特性的数学式可写为^[28]:

$$\frac{d\bar{r}}{dx} = C \frac{1 + 0.5\mu_r}{1 + \mu_r} \left(1 + \frac{f}{1 + \mu_0} \mu_r \right) \quad (1-16)$$

式中 $\bar{r}$ ——从流股起点到距离为 x 的截面中的无因次半径,

$$\bar{r} = r / r_0;$$

C ——等温流股的扩展速度;

μ_r ——流股中心的固体质点的浓度;

μ_0 ——开始的浓度;

f ——考虑质点分散成分所采取的折算系数；

r_0 ——喷嘴半径；

r ——所计算流股的半径。

粉尘空气流股的扩展计算简图如图1-2^[29]所示。

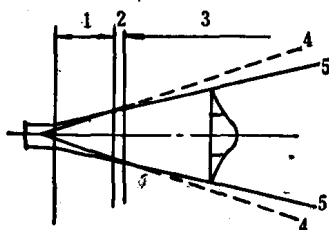


图 1-2 粉尘空气流股的扩展计算简图

1—开始区域；2—过渡区域；3—基本区域；4—空气流股界线；

5—粉尘空气流股界线

关于质点沿火焰截面的分布，可以根据喷涂料流股的几何形状来判定。为了制得均匀厚度的涂层，在选择涂层的喷涂距离时，这个特性是很重要的。高温喷涂涂层时，喷涂料的喷涂强度（喷涂圈）曲线如图1-3所示^[30]。

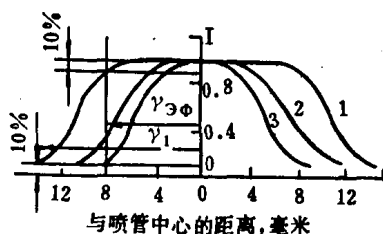


图 1-3 爆炸喷涂镍粉时喷涂料按喷涂圈的分 布（喷涂距离为90毫米）

1、2、3—喷管直径，分别为21.5、16和12毫米

图1-3上的纵坐标为相对的喷涂强度 I ，可按公式 $I = h/h_{\max}$ 计算，式中 h 为喷涂圈中心到距离为 r 处的涂层的高度（米）； $h_{\max}$ 为喷涂圈中心处的高度（米）。

图1-3所示特性曲线可用下式表式^[31]：