

目 录

第一章 概 论	(1)
1—1 发展材料表面防护和强化技术的意义	(1)
1—2 热喷涂 (焊) 技术在材料表面防护和强化 技术中的地位	(2)
1—2.1 材料表面防护和强化方法概述	(3)
1—2.1.1 化学热处理法	(3)
1—2.1.2 化学气相沉积法	(3)
1—2.1.3 物理气相沉积法	(4)
真空蒸汽沉积涂层	(4)
离子涂层	(4)
溅射涂层	(5)
离子涂层、溅射涂层的特点和应用 状况	(5)
1—2.1.4 电镀和化学镀法	(7)
电 镀	(7)
刷 镀	(7)
化学镀	(8)
1—2.1.5 气焊和电焊法	(9)
1—2.1.6 热喷涂 (焊) 法	(10)
1—2.2 热喷涂 (焊) 技术与其它方法的比较	(10)
1—2.3 热喷涂 (焊) 技术的特点	(14)

1—3 热喷涂(焊)技术发展历史	(15)
1—3.1 名词的由来	(15)
1—3.2 技术的定义	(16)
1—3.3 设备的发展	(18)
1—3.4 材料的发展	(20)
1—3.5 技术的发展	(21)
1—4 热喷涂(焊)方法概述	(25)
1—4.1 气体燃烧法	(25)
1—4.1.1 氧乙炔焰丝材喷涂法	(26)
1—4.1.2 氧乙炔焰棒材喷涂法	(26)
1—4.1.3 氧乙炔焰粉末喷涂(焊)法	(26)
1—4.2 液体燃烧法	(27)
1—4.3 电弧加热法	(27)
1—4.3.1 电弧丝材喷涂法	(27)
1—4.3.2 等离子弧粉末喷涂(焊)法	(28)
1—4.3.3 等离子弧棒材喷涂法	(29)
1—4.3.4 等离子弧丝材喷涂法	(29)
1—4.4 爆炸喷涂法	(30)
1—4.4.1 氧乙炔焰粉末爆炸喷涂法	(30)
1—4.4.2 脉冲放电丝材爆炸喷涂法	(33)
1—5 热喷涂(焊)方法的比较	(34)
1—6 我国热喷涂(焊)技术现况	(39)
1—6.1 材 料	(40)
1—6.2 设 备	(41)
1—6.3 应 用	(42)
1—6.4 展 望	(43)

第二章 氧乙炔焰丝材喷涂技术 (45)

2—1 纯金属及合金喷涂丝	(46)
2—1.1 锌及锌合金喷涂丝	(46)
2—1.2 铝及铝合金喷涂丝	(47)
2—1.3 铜及铜合金喷涂丝	(50)
2—1.4 锡及锡合金喷涂丝	(52)
2—1.5 铅及铅合金喷涂丝	(53)
2—1.6 镉喷涂丝	(54)
2—1.7 镍及镍合金喷涂丝	(55)
2—1.7.1 镍—铬合金喷涂丝	(55)
2—1.7.2 蒙乃尔合金喷涂丝	(56)
2—1.8 钼喷涂丝	(58)
2—1.9 铁及铁合金喷涂丝	(58)
2—1.9.1 普通碳钢喷涂丝	(58)
2—1.9.2 低合金钢喷涂丝	(60)
2—1.9.3 不锈钢喷涂丝	(60)
2—1.9.4 耐热铁—铬—铝合金喷涂丝	(61)
2—1.9.5 含钇的铁基耐热喷涂丝	(65)
2—2 复合喷涂丝	(67)
2—2.1 放热型喷涂材料	(69)
2—2.1.1 镍铝复合喷涂丝	(69)
2—2.1.2 其它含铝型喷涂丝	(72)
2—2.2 自结合一步涂层材料	(74)
2—2.2.1 自结合“不锈钢”复合喷涂丝	(74)
2—2.2.2 镍—铝—钼复合喷涂丝	(75)

2—2.2.3	铜—铝复合喷涂丝	(75)
2—2.3	其它类型的喷涂丝材	(76)
2—2.3.1	锌—铝复合喷涂丝	(76)
2—2.3.2	铝—铅复合喷涂丝	(76)
2—2.3.3	铁基复合喷涂丝	(77)
2—2.4	粉末粘合型复合喷涂丝	(77)
2—2.5	陶瓷及金属陶瓷型复合喷涂丝	(79)
2—2.5.1	纯陶瓷棒	(79)
2—2.5.2	金属陶瓷棒	(81)
2—3	丝材火焰喷涂工艺中的若干问题	(81)
2—3.1	氧和乙炔比例的影响	(82)
2—3.2	压缩空气的作用与喷涂距离的选择	(85)
2—3.3	丝材直径与进丝速度的影响	(88)
2—3.4	喷射角的影响	(91)
2—3.5	其它因素的影响	(92)
2—3.5.1	涂层材料本性的影响	(92)
2—3.5.2	基体材料特性的影响	(94)
2—3.5.3	喷前表面处理的作用	(95)
2—3.5.4	环境条件的影响	(95)
2—3.5.5	预热基体与冷却涂层的作用	(96)
2—3.5.6	工件表面状态的作用	(97)
2—3.5.7	移动工件的作用	(98)
2—3.6	丝材喷涂中的金属损耗	(99)
2—3.6.1	喷涂距离的影响	(99)
2—3.6.2	压缩空气压力的影响	(100)
2—3.6.3	氧压的影响	(100)

2—3.6.4	喷射角的影响	(100)
2—3.6.5	工件表面温度的影响	(101)
2—3.6.6	表面粗糙度的影响	(101)
2—3.6.7	丝材直径的影响	(102)
2—3.6.8	喷涂方式的影响	(102)
2—3.6.9	进丝速度的影响	(102)
2—3.6.10	使用燃气类型的影响	(103)
2—3.6.11	工件表面形状与尺寸的影响	(103)
2—3.6.12	基体材料的影响	(103)
2—3.6.13	喷涂设备的影响	(104)
2—3.6.14	操作者技术水平的影响	(104)
2—3.7	关于基体表面的喷涂强化效应	(105)
2—3.7.1	涂层粒子的扁平度	(106)
2—3.7.2	喷涂粒子的硬度	(106)
2—3.7.3	喷涂金属的收缩率	(108)
2—3.7.4	关于热影响	(109)
2—3.7.5	表面后处理造成的过热	(109)
2—3.7.6	各种影响因素的综合作用	(109)
第三章	氧乙炔焰粉末喷涂 (焊) 工艺	(115)
3—1	概 述	(115)
3—1.1	定 义	(115)
3—1.2	喷涂与喷焊的区别	(116)
3—1.3	喷涂 (焊) 设备	(117)
3—2	喷焊工艺	(118)
3—2.1	喷焊前的准备工作	(118)

3—2.1.1	待喷工件表面的预处理	(118)
3—2.1.2	工具的准备	(119)
	粉末喷焊枪的选择	(119)
	测量及常用工具的准备	(119)
	旋转工具的准备	(120)
3—2.1.3	供喷焊用的粉末	(120)
3—2.1.4	焊层厚度设计	(121)
3—2.2	喷 焊	(121)
3—2.2.1	喷焊二步法工艺	(122)
	预 热	(122)
	喷 粉	(124)
	重 熔	(129)
	缓 冷	(131)
3—2.2.2	喷焊一步法工艺	(132)
	预 热	(132)
	预喷粉	(132)
	喷粉重熔	(132)
	缓 冷	(133)
3—3	喷涂工艺	(133)
3—3.1	喷涂前的准备工作	(134)
3—3.1.1	待喷面的预处理	(134)
3—3.1.2	工具准备	(134)
3—3.1.3	供喷涂用的粉末	(134)
3—3.1.4	涂层厚度	(134)
3—3.2	喷涂工艺	(135)
3—3.2.1	预 热	(135)

3—3.2.2	粗糙表面.....	(135)
3—3.2.3	喷过渡层粉末.....	(136)
3—3.2.4	喷工作层粉末.....	(137)
3—3.2.5	缓 冷.....	(137)
第四章	粉末和喷涂(焊)层性能检验.....	(138)
4—1	金属粉末物理工艺性能检验.....	(138)
4—1.1	粉末颗粒形态的观测.....	(138)
4—1.1.1	粉末颗粒形貌的观测.....	(138)
4—1.1.2	粉末颗粒内部形态的观测.....	(139)
4—1.2	粉末粒度的分析.....	(139)
4—1.2.1	筛分析.....	(139)
4—1.2.2	亚筛分析.....	(140)
	沉降天平法.....	(140)
	库尔特计数器.....	(141)
	光透过法.....	(142)
	淘洗法.....	(142)
4—1.3	比表面积测定.....	(143)
4—1.3.1	气体吸附——容量法.....	(144)
4—1.3.2	气体吸附——色谱法.....	(144)
4—1.3.3	气体透过——费氏法.....	(145)
4—1.4	粉末密度的测定.....	(146)
4—1.4.1	粉末真密度的测定.....	(146)
4—1.4.2	松装密度的测定.....	(147)
4—1.5	粉末的流动性能.....	(147)
4—1.6	粉末颗粒硬度的测定.....	(147)

4—1.7 熔点的测定.....	(148)
4—1.7.1 时间温度法.....	(148)
4—1.7.2 反速度法.....	(148)
4—1.7.3 速度曲线法.....	(148)
4—1.7.4 推导示差曲线.....	(148)
4—2 喷涂、喷焊层性能的测定.....	(149)
4—2.1 喷涂层的表观密度和孔隙度的测定.....	(149)
4—2.1.1 涂层剥离称量法.....	(149)
4—2.1.2 直接称量法.....	(150)
流体静力称量法.....	(150)
称量法.....	(151)
4—2.2 喷涂、喷焊层硬度的测定.....	(151)
4—2.2.1 布氏硬度.....	(151)
4—2.2.2 洛氏硬度.....	(152)
4—2.2.3 维氏硬度.....	(155)
4—2.2.4 划伤硬度.....	(155)
比氏划伤硬度.....	(155)
赫夫曼划伤硬度.....	(157)
4—2.3 磨损试验.....	(157)
4—2.3.1 磨料磨损试验.....	(158)
固定磨料的磨损试验.....	(158)
不固定磨料的磨损试验.....	(160)
4—2.3.2 腐蚀磨损.....	(161)
4—2.3.3 耐蚀性能.....	(161)
4—2.4 膨胀系数的测定.....	(162)
4—2.5 喷涂、喷焊层的力学性能的测定.....	(164)

4—2.5.1	抗拉强度	(164)
4—2.5.2	结合强度	(166)
	法向结合强度的测定	(166)
	切向结合强度的测定	(169)
4—2.5.3	弯曲性能	(173)
第五章	热喷涂用复合粉末材料	(175)
5—1	发展概况	(175)
5—2	特征评述	(178)
5—2.1	包覆型复合粉	(178)
5—2.2	并合型复合粉	(179)
5—2.3	复合粉优点	(179)
5—3	制粉技术	(180)
5—3.1	包覆型复合粉的制备	(180)
5—3.1.1	气相沉积法	(180)
	热分解法	(181)
	置换反应	(182)
	氢还原	(182)
	化合物沉积	(182)
5—3.1.2	液相沉积	(183)
5—3.1.3	固相沉积	(184)
5—3.2	并合型复合粉的制备	(185)
5—3.2.1	固相团聚法	(186)
5—3.2.2	雾化法	(188)
5—3.2.3	烧结—破碎法	(188)
5—3.2.4	其它方法	(188)

5—4	复合粉的性能评价	(189)
5—4.1	化学成份	(189)
5—4.2	物理性能	(190)
5—4.2.1	粉末形貌	(190)
5—4.2.2	粒度组成	(190)
5—4.2.3	金相检查	(190)
5—4.3	粉末的工艺性能	(191)
5—4.3.1	粉末的松装比重	(191)
5—4.3.2	粉末的流动性	(191)
5—4.4	粉末的热化学性能	(191)
5—5	复合粉的涂层功能	(194)
5—5.1	自粘性涂层	(204)
5—5.1.1	粘结底层	(204)
5—5.1.2	放热反应	(205)
5—5.1.3	自粘性材料的涂层功能	(205)
5—5.1.4	自粘一步复合粉	(206)
5—5.2	耐磨损涂层	(207)
5—5.3	耐热抗氧化涂层	(218)
5—5.4	电绝缘涂层	(218)
5—5.5	恢复尺寸涂层	(218)
5—5.6	机件间隙控制涂层	(218)
5—6	自粘性复合粉的放热机理与涂层冶金学	(220)
5—6.1	Ni—Al 粉的放热过程	(220)
5—6.2	喷涂条件下的热化学行为	(222)
5—6.3	Ni—Al 粉的放热反应类型	(224)
5—6.4	Ni—Al 复合粉涂层的冶金学	(225)

5—7	复合粉的喷涂工艺	(226)
5—7.1	喷涂工艺	(227)
5—7.2	涂层的物理性能	(227)
5—7.3	涂层的工程性能	(227)
第六章	热喷涂(焊)用粉末材料	(233)
6—1	热喷涂(焊)粉末材料分类	(233)
6—2	自熔合金粉末	(233)
6—2.1	概 述	(233)
6—2.2	技术要求	(237)
6—2.3	制造工艺	(239)
6—2.3.1	概 述	(239)
6—2.3.2	雾化制粉的基本原理	(240)
6—2.3.3	雾化制粉工艺设备	(242)
	气喷水冷雾化制粉工艺与设备	(242)
	液体雾化法	(243)
	气喷气冷雾化制粉工艺	(243)
6—2.4	成份、性能、用途	(244)
6—2.4.1	国外主要自熔合金粉末系列	(244)
6—2.4.2	国内自熔合金粉末系列成份与性能	(250)
6—2.5	自熔合金粉末分类	(250)
6—2.5.1	镍基自熔合金粉末系列	(250)
	镍硼硅 (Ni—B—Si) 系列	(250)
	镍铬硼硅 (Ni—Cr—B—Si) 系列	(256)
6—2.5.2	钴基自熔合金粉末	(259)
6—2.5.3	铁基自熔合金粉末	(260)

6—2.5.4	含碳化钨自熔合金粉末	(261)
6—2.5.5	铜基自熔合金粉末	(262)
6—3	喷涂用工作层粉末	(264)
6—3.1	一般工作层粉末	(264)
6—3.2	一步涂层粉末	(265)
6—4	组合型热喷涂(焊)粉末	(279)
6—5	热喷涂陶瓷材料	(284)
6—5.1	氧化物陶瓷涂层	(284)
6—5.1.1	氧化铝	(285)
6—5.1.2	氧化锆	(285)
6—5.2	氧化物棒料	(295)
6—5.3	金属陶瓷涂层粉末	(295)
6—6	塑 料	(295)
6—6.1	热塑塑料	(296)
6—6.2	热凝塑料	(296)
6—7	涂层密封剂	(296)
6—7.1	塑料密封剂	(297)
6—7.2	石蜡密封剂	(297)
6—7.3	无机密封材料	(298)

第七章 技术和基础理论研究 (299)

7—1	粉 末	(299)
7—1.1	塑性范围	(299)
7—1.2	热膨胀系数	(300)
7—1.2.1	热膨胀系数的测定	(300)
7—1.2.2	多层涂层	(304)

7—1.3 相 变	(304)
7—1.4 粒 度	(307)
7—2 相图的研究	(308)
7—3 结合机理	(310)
7—3.1 机械结合	(310)
7—3.2 物理结合	(311)
7—3.3 化学或冶金结合	(311)
7—3.3.1 喷焊层的冶金结合	(312)
7—3.3.2 喷涂层的显微冶金结合	(312)
7—3.3.3 喷涂层的化学结合	(313)
7—3.4 其它结合机理	(314)
7—4 工 艺	(315)
7—4.1 工件表面预处理	(315)
7—4.1.1 表面清洁处理的作用	(315)
7—4.1.2 表面粗糙处理的作用	(315)
7—4.1.3 表面处理对工件疲劳寿命的影响	(317)
7—4.2 工件预热	(319)
7—4.2.1 对涂层内应力的影响	(319)
7—4.2.2 对粉末冷却速率的影响	(319)
7—4.2.3 对涂层结合强度的影响	(319)
7—4.3 喷涂参数	(322)
7—4.3.1 喷涂参数对粉末沉积率的影响	(322)
7—4.3.2 喷涂距离与粉末速度、粉末温度的 关系	(323)
7—4.3.3 喷涂距离对涂层性能的影响	(324)
7—4.3.4 粉末速度对涂层性能的影响	(325)

7—4.3.5 喷涂气氛对涂层性能的影响.....	(327)
7—5 涂层结构、性能.....	(328)
7—5.1 层状结构.....	(328)
7—5.2 多孔结构.....	(330)
7—5.3 各向异性.....	(333)
7—5.4 涂层强度.....	(334)
7—5.4.1 涂层强度的名词解释.....	(334)
7—5.4.2 高强度涂层和薄涂层的强度检验 工作.....	(335)
7—5.4.3 涂层厚度对结合强度的影响.....	(336)
7—6 无损检验.....	(337)
7—6.1 染色渗透技术.....	(337)
7—6.2 x—光或 γ —射线探伤技术.....	(338)
7—6.3 超声波检验技术.....	(338)
7—6.3.1 检验涂层缺陷.....	(338)
7—6.3.2 检验涂层结合强度.....	(339)
7—6.4 全息干涉量度技术.....	(340)

第一章 概 论

1—1 发展材料表面防护 和强化技术的意义

众所周知，除极少数贵金属外，金属表面会与周围介质发生化学反应和电化学作用而遭受腐蚀。例如钢铁结构即使在大气中亦会生锈，如果在工业气氛下、高温下、海水或化学介质中使用，则腐蚀现象更为严重。

金属表面除受化学作用而引起腐蚀外，金属表面受各种机械作用而引起的磨损现象也极为严重。有时两种现象同时发生，则称为磨蚀。大量的金属构件因腐蚀、磨损或磨蚀而报废。

据一些工业发达国家统计，每年钢材腐蚀损失约占钢材总产量10%，损失金额占国民经济总产值2—4%。我国去年由国家科委组织调查金属腐蚀情况，初步调查结果推算出我国因金属腐蚀每年所造成的损失达100—150亿元之多。如果将金属腐蚀和磨损所造成的停工、停产和相应的引起工伤、失火、爆炸事故等损失统计在内，其数字是更加惊人的。因此发展金属表面防护和强化技术，是各国普遍关切的重大课题。

随着尖端科学的蓬勃发展和国民经济机械化，自动化程度的不断提高，机械设备向“高速、高温、高压、深海”进军，对材料性能提出越来越高的要求。很多尖端科学除要求材料具

有耐磨、耐蚀性能外，还要求材料具有各种特殊的功能，非单一材料所能满足要求。但在很多情况下，仅需要材料表面性能，尤其需要材料具有复合性能。因此材料表面防护和强化技术，对发展我国国民经济和实现“四个现代化”具有极其重要的意义。

1—2 热喷涂（焊）技术在材料表面 防护和强化技术中的地位

本世纪以来，由于重视材料表面防护和强化技术的发展，各种新型方法不断涌现，方法种类异常繁多，不胜枚举。例如化学转换膜（氧化、磷化、钝化等）、固体扩散（渗硅、渗铝等）、热浸（浸锌、浸锡等）、涂料（油漆、柏油、沥青等）、衬里（衬铅、衬橡胶、搪瓷等）和各种有机复层等。这些方法仍在广泛应用，但兼有防护和强化功能的，主要为下列六种方法：（1）化学热处理法；（2）化学气相沉积法；（3）物理气相沉积法；（4）电镀和化学镀法；（5）气焊和电焊法；

（6）热喷涂（焊）法。这些方法都有其特点，而且在不断地发展与完善中，但都有其局限性，没有一种万能的工艺。从事材料表面保护与强化技术工作者，必须了解各种工艺的特点和其局限性。根据材料所要求的特性，选择比较合适的经济的工艺，才能收到预期的效果。在推广热喷涂（焊）技术的同时，必须明确热喷涂（焊）在材料表面防护和强化技术中的地位，充分发挥热喷涂（焊）技术的优点，避免盲目地采用，不但收不到预期的效果，反而会损害热喷涂（焊）技术的名誉。为此对常用的几种材料表面防护和强化技术概述于下。

1-2.1 材料表面防护和强化方法概述

1-2.1.1 化学热处理法⁽¹⁾

此法包括固体碳化、固体硼化、液体氮化、液体碳氮化、气体氮化、气体碳氮化等法，但目前以气体氮化、硼化为常用的方法。气体氮化在氨气中和混有一定量的离介氨气氛中进行。欲氮化的工件放入不透气的容器中，温度升高和保持 $480\sim 620^{\circ}\text{C}$ （钢的转变点以下），不断地通入氮化气氛，从氨气中离解出来的 N_2 扩散于基材内与基材中的Cr、Al、Mo、V、W等元素反应，生成氮化物、起弥散硬化作用。氮化周期比较长，需根据氮化层的厚度而定。硬度超过威氏900。因为氮化温度低，工件有最小的畸变和保持尺寸稳定性。

在硼化方法中。试样在罐中埋入含有50%无定形硼（粒度 $< 3\mu$ ），1%二氟化铵，其余为 Al_2O_3 的混合粉末中。 Al_2O_3 是罐中的惰性填充物，二氟化铵当作催化剂供给卤素，升温到 815°C 使硼气相运输到工件表面上，硼扩散于工件表面内产生钢的硼化。维持反应时间6~24小时，按照所需扩散层厚度（ $10\sim 75\mu$ ）而定。不锈钢表面渗硼后硬度达威氏1600—2000，比渗氮和镀铬表面硬度高。

此法的优点如下：（1）表面硬度高；（2）增加耐磨性能；（3）提高疲劳寿命；（4）改进耐腐性能；（6）有良好的高温硬度；（6）工件变形小；（7）降低表面精整成本。

1-2.1.2 化学气相沉积法⁽²⁾

此法的特征是涂层的成份来源于进入反应室的气体。例如TiC涂层为 $\text{TiCl}_4 + \text{H}_2 + \text{CH}_4$ ，W涂层为 WCl_6 与 H_2 ，W—Re合金涂层为 WF_6 、 ReF_6 与 H_2 ，Mo涂层为 MoCl_5 与 H_2 ，