

# 上海南团 喷涂加工工艺

产品名称	上海南团 喷涂加工工艺
公司名称	上海南团电气附件有限公司
价格	8.00/平方米
规格参数	品牌:上海南团
公司地址	南汇大团林艺266号
联系电话	86-021-58238335-15 18136261486

## 产品详情

随着涂层新材料和新工艺的不断涌现，热喷涂涂层已在国民经济各个工业部门广泛地应用.加之现代计算机技术、传感测试技术、自动化及机器人技术、真空技术与热喷涂技术的结合和渗透，使得热喷涂技术的深入发展和工业规模化生产均有大幅度的进步和提高。对未来热喷涂发展的方向以及市场与工业规模的预测为：技术附加值高、效益好的如生物工程，航空航天，工、模具，电子工业等，但规模相对较小；要求成本低的大规模产业如汽车工业和钢结构，但技术附加值低；应用面最广的仍是机械工业，包括石油化工、轻纺、能源、冶金、航空、汽车等也均属此范畴。热喷涂技术能赋予各类机械产品，特别是关键零部件许多特种功能涂层，形成复合材料结构具有的综合作用，真正做到了"好钢用在刀刃上"，是材料科学表面技术发展的一个方向。但热喷涂技术仅通过涂层在机械产品基体表面获得一定的特殊功能，而不能代替基材或提高产品的结构性能。

### 1、钢铁长效防腐蚀涂层

由于锌、铝、锌铝、铝镁涂层的电极电位均负于钢铁，故对钢铁结构能起到阴极保护作用。从20世纪40年代起，国外已将它们喷涂于钢铁构件上作为长效抗腐蚀涂层。国内自70年代起开始推广应用，迄今成功的实例不胜枚举。表1列举部分应用实例。目前大面积钢结构喷涂锌、铝涂层一般采用电弧喷涂工艺，局部辅助以氧乙炔火焰线材喷涂补遗。现在国内每年采用热喷涂大面积施工工程均在数百万平方米以上。

表1钢结构喷锌、铝长效防护涂层的应用

应用领域	应用实例
钢结构塔架	广播电视发射塔，高压输电铁塔，微波通讯发射塔，海上导航灯塔，钢结构建筑塔架等
水工钢结构	大型水闸门，大坝钢结构预埋件，防污栅栏，供水塔，高层建筑饮用水箱，码头钢桩，大型水处理塔等
桥梁	钢结构桥梁，钢管混凝土拱桥，斜拉索桥梁钢筋、钢绳及鞍座，立交桥钢厢梁，桥梁的拉杆、护栏
石油储运	罐车，罐船，球罐，储槽，油箱
应用领域	应用实例
化工	碳化塔，热交换器，循环水槽及管道，烟囱等
大型机械	龙门吊车，电站风机、除尘器，消声器，原子反应堆外围设备，标准件退火钢包，煤矿井筒框架等
舰船及海洋	舰船船体及甲板，烟囱，舰载炮塔，雷达天线，船内动力机房，油舱，淡水舱，海洋平台，桅杆等
城市设施	人行天桥，高速公路隔离护栏，大型体育馆钢结构，灯杆，钢制门窗，给排水地下球铁等管，天然气管道等

锌、铝、锌铝、铝镁涂层用于长效防护虽然均能大幅度提高钢结构抗环境腐蚀能力，但根据涂层材料的性能以及所应用的环境对象也有所选择。如锌在常温下电位负于钢铁，可作为牺牲阳极的阴极涂层保护钢铁。但当环境温度高于60度时，锌的电极电位发生了逆转，仅比钢铁正，失去了阴极保护作用。其次

，仅用喷涂层保护钢铁是不够的，由于喷涂层存在孔隙，腐蚀介质的侵蚀，缩短了涂层应有的防护寿命。在喷涂层表面施加与其性能匹配又能适应环境的有机涂层进行封孔和复合保护，使金属基体完全与环境腐蚀介质隔离，能成倍地延长钢结构的使用寿命。典型应用事例如下。（1）大型水工钢结构闸门水工闸门及其钢结构辅助设施是热喷涂大面积防护应用最广的对象。基于美国焊接学会19年的环境腐蚀试验和我国正在进行尚未完成的30年大气腐蚀试验已表明；热喷涂锌、铝及其合金涂层是迄今对钢铁抗蚀防护寿命最长的工艺技术。法国塞纳河上的拦水坝钢结构自1930年喷锌防护至今已历经大半个世纪，效果十分明显。我国江苏三河闸钢结构闸站自1950年采用喷锌防护，至今完好无损。大型水利枢纽葛洲坝工程建设至1984年开始对其闸门钢结构及预埋件采用热喷涂技术防护。例如大江冲砂弧闸门以及船闸内浮桶滑道预埋件，喷涂面积达3000多平方米，涂层设计为“喷涂锌、铝涂层（120um）+whd8401(90um,环氧改性聚氨酯漆)+环氧沥青涂料（90um）”，至今历时17年之久，喷涂层依然完好无损。举世瞩目的三峡工程钢结构达28万t，基本上采用电弧喷涂和高压无气喷涂保护，施工保护面积十分巨大，目前处于干湿交替环境的闸门已固定采用热喷涂技术防护。

（2）桥梁钢结构 桥梁所处环境基本上属大气腐蚀环境，大部分桥梁钢结构在建设时期所有的部件均可在工厂内进行喷涂预保护，仅少量拼装部分在现场进行喷涂再保护。大部分钢结构桥梁，尤其是公路桥梁维修周期长。且现场维修难度大，故要求达到15~20年的一次防护寿命。1993年经专家反复审查并通过验收的三峡对外交通专用公路钢管混凝土拱桥钢结构件长效防护复合涂层，一致认为：拱桥钢管采用喷涂铝涂层（约120um）+whd8406(环氧改性聚氨酯底漆约40um)+whd8401（环氧改性聚氨酯面漆约60um）构成的长效防腐蚀复合涂层经过拉压交变应力条件下100万次疲劳试验后，其结合强度，耐腐蚀性能等指标仍然满足gb/t9793—1997标准的要求。可预计该涂层系统有效使用年限可达20年以上，此复合涂层体系和电弧喷涂施工工艺可用于现场涂层施工。目前国内许多钢结构公路桥的桁梁、钢箱梁及其他钢结构采用了上述方案。

（3）海洋钢结构 海洋环境是自然条件下金属腐蚀最严重的环境之一。在海洋大气中的平均腐蚀速率为0.13~0.23mm/a,在海水飞溅区为0.3~0.5mm/a.同一种钢在飞溅区与全浸区内的腐蚀速率相差10倍。舰船、海洋石油平台以及灯塔航标等就是在腐蚀速率最大的飞溅区与全浸区下服役、使用。尤其是舰船防护更为复杂：舰船具有能源，船体的杂散电流在海水介质的作用下形成对钢铁和导电涂层的电解腐蚀；舰船的防污外涂层一般为含cu及cuo涂料，涂层设计与匹配如果不当，会在每个层间形成加速腐蚀；作战舰船应考虑可能遭到袭击的情景，涂层的高阻燃，低毒性烟雾是涂层选用的必备条件。喷涂铝涂层是舰船防护可行方案，我国自1987年至今，采用喷涂长效防护涂层试验在数艘舰船上进行实用考核。提出了喷涂铝涂层+wrl9028复合型封闭剂+高阻抗无机微片掺入的中间层和面层涂料+低电位或依生涂料的防污面层。不仅可增加涂层体系的电绝缘性，而且还可增强其抗海水渗透性、耐磨性和海水冲刷能力。新近开发研制的电弧喷涂ai+10%（质量）ai0复合线材和芯材，用作舰船甲板和海洋石油平台的耐磨耐蚀防滑涂层，已在我国大型科学考察船“远望号”上使用，效果良好，极具有推广价值。

(4) 塑料热喷涂层 氧乙炔火焰喷涂的塑料涂层的大型容器、塔罐内应用，弥补了其他工艺制备塑料涂层的不足。塑料涂层化学稳定性好，涂层致密无孔，与绝大多数常温下的溶液不产生反应。能有效地隔离金属罐体与溶液的接触，同时，塑料涂层绝缘性好，不会形成电化学腐蚀。1991年，对北京葡萄酒厂多个储酒罐内壁进行喷塑防腐处理。目的是解决不锈钢储罐中铬离子渗入高级葡萄酒内，造成变色降低酒类档次。工艺采用氧乙炔火焰喷涂环氧树脂塑料涂层，并用高压火花检漏仪进行孔隙检查，施工面积达1000多平方米，至今使用完好。

2、汽车与造船工业中的应用 为了提高汽车的性能，减少汽车的能耗和适应环保要求，热喷涂技术在汽车制造行业有了较大的发展。由于汽车工业属大工业化生产，一个成熟的工艺技术，往往形成的批量生产是很可观的。目前已形成批量产品的有同步环、活塞环，发动机的气门挺杆以及氧敏传感器探头等部件的热喷涂，其他许多部件仍在工业性试验中，或尚未形成批量生产，表2给出汽车工业零部件采用的涂层材料和工艺。

表2汽车零部件涂层工工艺和材料

零部件名称	基材	涂料材料	喷涂工艺	功能与作用
铝合金气门挺杆 发动机缸体 增压器壳 同步环 活塞环 刹车盘 分电器转子 转矩传感器 氧敏传感器 排气管 排气阀	铝合金 al-si合金 铝合金 钢 合金钢、 铸铁、不锈钢 钢 钢 铝合金 铂+氧化锆 钢 钢	fe-0.8%c 铁合金 抗磨涂层 al- si+50%mo cr3c2-20%nicr 氧化锆 al2o3-tio2 fe3o4 al2o3+mgo 铝 cocrwsbi	电弧喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 hvof 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂	减轻质量/减摩抗擦 伤 减轻质量/减摩、 抗擦伤 抗磨、提高工作效率 抗磨、比mo成本低 代替镀cr层 抗磨、高隔热性 低噪声、低成本

			电弧喷涂 等离子喷焊	磁性传感材料 保护探头/环保 耐高温烟气腐蚀 耐高温燃气腐蚀
--	--	--	---------------	---

从表中可见，为了减轻整车质量达到降低能耗，逐步采用铝合金取代传统金属材料，同时还要保持或提高原设计和选用材料的性能。因此，在铝合金上制备不同涂层的热喷涂技术，目前正针对不同需求开展研究。其次，非传统的功能性涂层，如高隔热涂层、低噪声涂层、磁性传感功能涂层、高精度抗蚀涂层、代铬涂层均有较好的应用前景。再者，等离子喷涂工艺在汽车制造工业中仍有强劲的生命力，且对其自动化、智能化、高精度、高效率要求越来越高，其原因是应适合汽车零部件生产大批量、低成本、高质量的要求。造船工业的应用，除了船用动力系统的排气阀，活塞环、缸套等部件按类似汽车工业的如大型船舶的艉轴、轴承座、发电机、舵机、锚机等辅机轴，各种阀门密封面、泵轴套、柱塞、机械密封环等运动部件。往往由于关键部位磨损超差，不能使用，针对部件材质、磨损形式和使用条件，采取适当涂层进行修复，经济效益十分可观。航道疏浚用的挖泥船，大量零部件如泥斗、耙头、铰刀、铲齿、泥泵叶轮等被泥沙磨损需修复。为提高部件的耐磨损性，主要用过用ni60或ni60+wc等硬质火焰喷焊层进行修复，较原部件提高寿命达数倍，效果十分明显。

3、航空、航天工业中的应用 热喷涂技术在航空、航天工业中应用历史久，范围广，涂层品种多，而且技术含量高。尽管航空、航天中飞机发动机、宇宙火箭等工作条件十分恶劣，对涂层可靠性要求非常苛刻，但当代航空发动机中一半以上的零件都有涂层（零件数已达成1000个以上）。主要用耐磨、耐腐蚀、抗氧化、封严。表3给出热喷涂技术在航空航天中的部分应用。

表3航空、航天工业中的应用

领域	零部件	喷涂工艺	涂层材料	涂层用途
火箭技术	火箭头部和喷管	等离子喷涂	al203,zro2,w	耐热、抗冲蚀
宇宙飞行器	喷气推进弹体整流罩	等离子喷涂	zro2,zro2,w	绝热 防粘连、绝热

	宇宙研究装置 超短波天线	等离子喷涂 等离子喷涂	al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , w 金属, 氧化物及碳化物 al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	、热辐射性能 绝热、绝缘
航空	喷气发动机涡轮及压 气机叶片 燃气涡轮叶片 燃烧室内衬 起落架轴颈 机翼及机身承力结构 前整流舱 机匣	等离子喷涂 等离子, hvof 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子, hvof 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂	co-wc, tic, cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ni- al, nicrbsi ni-al, al, al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cocraly, mgo. zro <sub>3</sub> 硬质碳化物及其合金 纤维增强复合材料 聚苯酯、硅铝 镍包 石墨、镍包硅藻土	而冲蚀 耐热 耐热 耐热 耐磨 强度、刚度 滑动、封严 耐磨、 润滑可磨、封严

对于发动机的绝热涂层，过去一般采用稳定型的zro<sub>2</sub>（稳定剂为y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，mgo,cao,ceo等）面层材料和conicaly高温粘结底层材料，通过等离子喷涂，制备两层或数层阶梯结构涂层。自20世纪80年代末至90年代初，由于新的涂野技术——电子束物理气相沉积技术（eb-pvd法）的开发成功，制备的热障涂层（tbc）为柱状晶结构，与粘结底层结合牢固，涂层表面光洁，使用寿命高于等离子喷涂层一个数量级。关于热障涂层的粘结底层加陶瓷涂层结构，我国目前主要采用二层涂层结构（conicaly底层+稳定型zro<sub>2</sub>面层），并已应用在新型发动机燃烧室，加力燃烧室等热部件上。目前对热障涂层的改进主要从多层或梯度功能涂层的设计，粘结底层的预氧化处理，热障陶瓷面层的渗铝处理、陶瓷面层激光改性处理等方面研究和发展。发动机封严涂层随着热端高温气流温度的逐级提高，使用温度300℃到1100℃，目前最高温度可达1350℃。alsi-聚苯酯，镍-石墨，镍-硅藻土，nicraly-bn,y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>稳定zro<sub>2</sub>-bn等复合粉末涂层，已获得成功应用。其中，尤以高温封严涂层制备和工作条件最困难。要求其厚度达到2~3mm，喷涂时必须严格控制涂层应力的产生。另外，要承受1000~1350℃高温，遭受2~3倍音速的高温气流冲刷，受到超过300m/s线速度叶片尖部刮削而不发生剥落。故涂层必须耐高温、抗氧化、耐热震、结合强度高，化学惰性，而且质软（46~108hv），多孔（孔隙率达25%~30%）。航空发动机某些零部件的磨损问题也是十分严重的，在服役期间，有的发动机低压转子转速5000r/min,高压转子转速15000r/min；并在极高负载和各种频率的振动下工作，从而产生各种机理的磨损，这些磨损仅靠改变基体材料是达不到要求的。据英国rr公司统计，1976年前发动机零部件60%因磨损而报废，采用耐磨涂层后报废率降到30%，目前采用爆炸喷涂和hvof喷涂涂层已有50多种在航空产品零件上获得应用，如高低压压气机叶片、涡轮叶片、轮毂封严槽、齿轮轴、火焰筒外壁、衬套、副翼滑轨、制动装置等。目前国内开发的某新机种上，规定采用十几种热喷涂涂层（主要是耐磨涂层）数百个零件，其中四种最关键的耐磨涂层必要采用结合强度高、涂层致密度高的爆炸喷涂和hvof喷涂工艺制备。表4-67为爆炸喷涂在国内航空方面的应用。

表4 爆炸喷涂在国内航空方面的应用

零件名称	涂层种类	应用特性效果
发动机蜗轮轴 蜗轮叶片叶冠 发动机燃没导管 压气机叶片阴尼台 三叉戟发电机轴 三叉戟襟翼滑轨 三叉戟前轮轴、套筒	nicrbsi-ni-al x-40 nicrsi co-wc co-wc ni3al-wc co-wc	磨损报废，重新使用 磨损超差，重新使用 耐磨，延长使用寿命 耐微振磨损 耐磨一年以上 磨损，喷漆后使用 磨损，喷漆后使用

4、钢铁工业中的应用 热喷涂技术在钢铁工业的应用已有相当长的历史。从西方发达国家钢铁工业中热喷涂技术应用的对象来看，各式各样的辊子占全部热喷涂部件的85%以上，取得极显著的技术经济效果。如co-wc喷涂的张紧辊，其寿命由镀硬铬使用的两个半月延长到5年，停机检修时间和费用仅为原费用的1/10。退火炉导辊，过去平均每月停机30min进行检修，喷涂后则可保持3年内不检修，并极大地提高带钢的品质。日本钢铁公司热喷涂退火炉辊的比率，从1982年的20%上升到1988年的100%，而百叶窗钢因辊面结瘤引起的废品率则由80%下降到零。各国热喷涂钢铁用辊类部件见表5。

表5各种辊类部件的热喷涂应用

部件名称	喷涂材料	喷涂方法	涂层厚度/mm	涂层硬度	最高工作温度/°c	中间层材料	结合强度/ mpa
炉辊(cal,cgl)	50%si-zro2 cocraly-al2o3 cocraly-y2o3+crb2	等离子喷涂 爆炸喷涂	1.0	400hv 700hv 1000hv			40 100 100
镀锌导辊(cgl)	co-wc	hvof	1.0	1300hv			
炉辊(apl)	5.5bn/ni-14cr-8fe-3.5al	火焰喷涂	1.0/2.5 1.0/2.5				

	21bentonite/ni-4cr-4al 20sio2-280conicraly 44si o2-28cao-17mgo-mno	火焰喷涂 火焰喷涂 火焰喷涂	0.2 0.2				
炉辊(cal,cgl)	wco-c w-c-cr-ni	爆炸喷涂			540(无氧) 450(有氧)		
炉辊(cal,cgl)	crc+ni-cr crc+mcraly cc o-cr-ta-al- y+氧化物(al2o3) ni-cr- al-y+氧化物(al2o3) 100%(氧化物)	爆炸喷涂			850(无氧) 750(有氧) 1200(无氧) 850(有氧) 1250(有氧) >=1300(有/ 无氧)		
炉辊(cal)	co-25cr-10ta-8al-0.8y	爆炸喷涂		1000hv			
炉辊(cal)	co-ni-ce-al-ta- y-(al2o3-cr2o3) co- zro2sio2	等离子喷涂		350hv	1100 1000	conicraltay	100
炉辊(cal)	co基-氧化物- 碳化物金属陶瓷 cr3c2-25nicr zro2-sio2 cr3c2-20nicr al2o3-50cr2o3 zro2-8%y2o3	等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂		700hv 700hv 776hv 270hv	1050 950 900 950	无无 nicraly nicraly	100 95 95 7.4 2.0

注：cal--火炉辊（continuous annealing line）cgl—连续热镀锌产线辊（continuous galvanizing line）；  
apl—不锈钢带退火酸洗生产线辊（stainless steel strip annealing-picking line）。(1)连续退火炉辊 汽车用外壳薄板和硅钢片板材表面质量要求极高，不允许有任何划痕和缺陷。故生产中各个工艺环节对与钢板接触传动的炉辊表面提出严格要求。在宝钢薄板生产线上采用hvof技术在连续退火炉辊表面喷涂nicr-cr3c2作抗积瘤涂层，该涂层具有耐磨、耐高温自清洁作用。使用效果达到日本同类产品水平。在武钢硅钢片生产线上采用等离子喷涂nicr-8%y2o3/zro2涂层用于硅钢片高温连续退火炉辊防积瘤。该辊长2700mm，工作部位长1500mm，辊径120mm，工作温度860~920℃，工作介质为氮氢还原性气氛并具有不同露点。使用结果证明：陶瓷涂层炉辊寿命超过6个月，最长达2年。涂层抗积瘤效果明显，硅钢片表面质量达到武钢设计要求。(2)热浸镀锌生产线沉没辊 采用森吉米尔（sedzimir）法进行薄板钢带连续热浸镀锌（cgl）和热浸镀铝、锡等金属熔液秤线中。溶液坩锅中工作的沉没辊和稳定辊等均遭受694~800℃铝熔液和452~570℃锌熔液侵蚀，同时钢带由辊面带动的运动速度高达35~40m/s。合金辊一般在铝熔液中寿命仅2~3天，锌溶液中则仅10天左右就会产生很深的磨痕和蚀坑，划伤带钢表面使废次品率增加。采用等离子喷涂al2o3+tio2, mgo-zro2, moal2o4,与nicraly形成的梯度涂层（总厚达1mm），以用hvof喷涂co-wc涂层作为沉没辊和稳定辊工作层。由于涂层材料与铝、锌熔液不润湿和不产生化学反应。上述两种工艺涂层分别在连续热浸镀铝、锌生产线坩锅中运动的寿命提高3~4倍。该类涂层还可用在熔融cu、钢液方面作锭模、运输槽、坩锅



内壁涂层和电偶套管、搅拌器、支架等保护层。(3) 热轧工具 大口径无缝钢管(219~377mm)自动轧管机所用的轧管机顶头,传统采用cr17ni2mo整体铸造的耐热马氏体不锈钢制造,顶头与970~1050℃的钢管内壁以每秒3~3.5m速度相对位移,实际顶头表面温度高达1050~1150℃,使顶头高温硬度和强度急剧下降,表面氧化烧伤,产生“结瘤”,撕裂、拉伤、凹陷。其消耗量为每轧制千吨钢管耗16t。采用等离子喷焊技术,在锻制的45#钢顶头基体上喷焊ni基高合金+35%碳化钨焊层,厚度为1.2~1.5mm。经包钢无缝钢管厂3年的实际生产验证,喷焊顶头平均使用寿命提高3~5倍。轧制每千吨钢管耗顶头降至3t。年增效益达1000万元以上。其他工模具的应用,还有结晶器,高炉风机、热剪刀、压铸和挤压模具等等。

5、印刷、造纸工业中的应用 随着科技的发展,对纸张和印刷的技术要求越来越高,苛刻特殊的性能要求恰好是热喷涂涂层发挥其作用的领域。(1) 印刷机械 等离子喷涂陶瓷涂层技术在印刷机辊子上已成功应用多年,其应用领域正日益扩大。陶瓷涂层的许多特点正适合印刷机辊子的需要,它们包括:高耐磨性;高耐蚀性;绝热性;防粘性;可刻蚀性;可维修性;选择性润湿性、亲水性;电绝缘性、亲水性;咬人性、适度粗糙度的保持性。1 晕光辊聚乙烯塑料薄膜电刻蚀用电晕处理机辊,辊长5000mm,其典型外径为250~500mm,需要在辊面等离子喷涂介电常数6~9的介电涂层,耐2万v以上的击穿电压。氧化铝涂层耐压强度为100~175kv/cm,因此满足2万v以上的击穿电压需制备2mm左右的厚涂层。喷涂态的氧化铝涂层为易吸潮的r-

al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>结构,涂层的介电常数取决于涂层中的干燥度,一般喷涂的氧化铝涂层要用硅酮树脂封孔。2 彩色胶印辊彩色胶印辊工作原理见图4-83,印刷辊(4)、由辊(1)、输送油墨(3)、传统的辊(1)工作面一般采取镀铜或铬后电刻蚀成型。自20世纪80年代后,采取喷涂陶瓷涂层一磨光或抛光一激光刻蚀一抛光成型成套工艺制备。经刻蚀后的辊面能精确地向印刷辊输送油墨,因而能获得图像清晰的彩色胶印画面,不串色。采用等离子喷涂氧化铬[cr<sub>2</sub>o<sub>3</sub>+5%(质量)sio<sub>2</sub>]涂层能满足彩色胶印辊使用要求。涂层制备时,要求孔隙率低和涂层不失氧,一般采取在等离子喷涂送粉气中加氧,功率在50kw以上进行喷涂作业。制备的涂层经适当磨光后,用激光进行刻蚀,刻蚀形成的窝状溶池最佳半径应为1~3μm,典型深度为10~15μm,但一般高品化制作大于要求的数倍,如激光刻蚀的密度为140线/cm。国内进行该方面的研究,已达到大面积、长时间喷涂的涂层无任何缺陷,涂层经精密加工到ra0.1μm以下,满足激光刻蚀400线/cm的要求。激光刻蚀的溶池不规则平整,涂层应进行表面最后抛光才能应用。目的是使刮刀与辊面完全接触,有效控制油墨输送量,形成清晰的印刷效果。(2) 造纸机械 造纸工业中,从纸浆生产到成品纸张成型的整个工序过程,采用热喷涂涂层的主要零件有:压光辊、烘缸、木材输送盘损板、风机叶轮、输送螺杆、蒸煮锅、黑液锅炉管道、腭形夹爪,纸张脱水机、泵轴及轴套、机械密封环等十几种。针对具体使用环境,可采用各种涂层进行防腐保护和提供特殊功能表面,延长工件的服役寿命和降低成本。目前,热喷涂涂层在下面几个部件上的应用效果十分突出。

1 烘缸造纸烘缸基体一般均用铸铁铸造而成,烘缸直径有1.5m, 2.0m, 3.0m等等,最大的可达6m以上。烘缸内通入压力为1mpa的过热蒸汽用于干燥烘缸表面的纸张。由于烘缸材质为铸铁,连续的纸带贴于缸面干燥,并以高速(最高可达约30m/s)从缸面揭去,加之刮纸刀相对于烘缸运动(功能为刮揭纸张),故烘缸表面同时受到自身缺陷、纸浆中所含碱液、松香、明矾等介质的腐蚀和刮刀的磨损,需要施加涂层。传统方法是在烘缸表面镀硬铬、电弧喷涂铝青铜+1cr18ni9ti涂层和等离子喷涂mo和含mo的镍基涂层。最推出用高速氧燃料喷涂(hvof),在我国又称为超音速火焰喷涂,这种工艺喷涂co-wc层和氟化乙丙烯(fep)聚金操作时,可使用烘缸表面的释放性能显著提高。因为在hvof中,喷涂粉末粒度只有5~30μm,粒子飞行速度达600~900m/s;因而产生高硬度(1100~1200hv)的无孔隙涂层。喷涂操作时,每遍喷涂厚度为0.01~0.15mm,不存在层间缺陷,而涂层在使用期间磨损是均匀的,故可保证涂层在任何剩余厚度下都具有相同性能。co-wc涂层可抛光到相当低的粗糙度,氟化乙丙烯拥有与温度低于200℃时的特氟隆一样的抗粘连特性和耐腐蚀性,且与cocr-wc涂层有更好的粘连性,能更有效地改善纸张的表面效果。

2 压光辊典型的压光辊要求有非常光滑的表面,用来加工高档光板纸。传统的表面处理方法是镀硬铬后抛光,由于工作运行时表面与刮刀接触,易产生划痕磨损。辊的寿命3~6个月。先后采用电弧和等离子喷

漆ni-al+高铬不锈钢后用酚醛清漆封闭，但涂层表面粗糙度达不到要求。采用hvof和sb-hvof喷涂100um厚度的耐磨cocr-wc或co-wc涂层，然后抛光精蚀到ra=0.01~0.03um,压光辊的使用寿命可达2年。

3 黑液锅炉管道纸浆碱回收用的黑液锅炉，在使用过程中，燃烧的黑液和无机物对锅炉水冷壁管道有严重的腐蚀和冲刷磨损作用。采用美国tafa公司研制的45ct (ni55cr45) 电弧喷涂单层涂层，取代过去采用的多层涂层体系 (ni-al+锈钢+纯al+sial封孔剂) 使用寿命可达4年以上。由于45ct属高镍铬材料，成本贵且制成丝材工艺要求高，随后相继研制了fe-22cr-6al合金线材等，采用电弧喷涂涂层基本达到45ct丝材性能指标，而成本大降低。

6、能源、核工业中的应用 能源工业主要包括热能、水力、核能及太阳能等。热喷涂涂层在火力发电锅炉水冷轮机、核反应堆、太阳能吸收和转换上均能发挥特殊作用。

(1) 锅炉“四管”保护除了造纸工业中黑液锅炉的保护涂层。针对电站、化工及其他行业的工业锅炉水冷壁管、过热管、再过热管、省煤器管的保护应用进行了研究和开发。目前全国数家单位研究出适用电弧喷漆的高crni, fecrni及feral合金涂层线材，喷漆的涂层质量达到45ct涂层指标。成本低廉适合我国国情。另一种新型粉芯丝材，电弧喷漆后可形成fe3al+wc金属陶瓷涂层。具有优异的抗高温防腐蚀作用，可以替代美国超音速火焰喷漆ds200涂层。同时开发先进的高速，超音速电弧喷涂设备，大大提高了涂层的结合强度和致密性。目前，我国各地喷涂20万kw,30万kw和60万kw的发电机组锅炉水冷壁管二十多家，几十台锅炉，使用寿命成倍提高。fe3al+wc粉芯丝材涂层用于耐冲刷要求高的省煤器管道，效果十分突出。对沸腾硫化订式锅炉管道弯头，一般采用氧乙炔火焰喷焊ni60+35%wc，可提高使用寿命2倍以上。至于电站风机叶轮、发电机、燃气轮机的维修保护就不一一赘述了。

(2) 水轮机过流部件的抗气蚀 气蚀是造成水轮机叶片等部件失效的主要原因之一。我国长江，尤其是黄河中含有大量泥沙，对水轮机过流面造成一定的冲刷磨损，使气蚀在磨损面上更加强烈。调研表明：我国水轮机气蚀破坏量数倍于国外同类机组。由于制造工艺等方面的局限，水轮机整体材质的选择受到一定的限制。表面保护和强化技术显示出较大的优越性，研制成功的试水ni-46，试水ni-67两种自容性合金粉末，采用氧乙炔火焰喷焊的焊层与奥102不锈钢堆焊层在模拟气蚀试验条件下，线速度为46m/s;水压为0.1mpa,试验时间为44h,耐气蚀性能比较列于表6。ni-46,ni-67分别采用氧乙炔喷焊在清水电站(气蚀)水轮机过流部件和浑水电站(磨损+气蚀)水轮机过流部件使用效果均高出原件1倍以上寿命。现已在小型电站水轮机导水叶，转轮，叶片，迷宫环上推广应用。我国小浪底电站水轮机组现已采用hvof喷涂硬质耐磨抗蚀层进行保护，使用效果有待进一步观察。

表6几种焊层耐气蚀性能比较

焊层材料	sh.f102	试水ni-46	试水ni-67	奥102不锈钢
耐气蚀系数	0.97	10.03	10.22	1

(3) 核电工程功能图 核聚变装置大致可分成磁约束聚变反应堆 (mcf) 和惯性约束聚变反应堆 (icf) 两大类。b4c是一种能吸收高深度x射线而表面受热最小的低z材料，它不会被中子激活，并且有较高的硬度和汽化温度，icf反应堆可采用b4c涂层作为第一级保护墙。另外，在封闭磁场中维持燃料连续核聚变，使mcf反应堆长期运行，选用高z材料是有利的，如钨，可用作tokamacmcf反应堆和其中的toraid燃料装置（等离子产生装置）的保护。b4c和w涂层性能见表7。涂层均采用低压等离子喷涂（vps）制备。核反应堆水循环系统的高温截止阀、控制阀是为了防止钴合金受核辐射对水回路造成污染，对其密封面材料提出喷焊无钴少硼自熔性合金粉末。研制的ni-cr-w-c基自熔性合金粉末与传统的自熔性ni-cr-b-si粉末相比，硼硅含量相低，且含钨、铬和碳均较高。形成的等离子喷焊层为韧性好的ni基固溶强化的奥氏体中镶嵌初晶态和共晶态硬质相组织。焊层有较好的抗裂性和耐热冲击性，摩擦系数小，耐磨性好，高温硬度和强度高，已投入使用。

表7 b4c和w涂层的性能

材料纯度/%	w99.9	b4c99
涂层厚度/um	100+-25	555+-50
孔隙率	2%	<3
粗糙度ra/um	30	--
硬度/hv	—	>2000

黏结强度/mpa	35	25~30
----------	----	-------

新能源工业中，目前出现的钇钽铜氧 (yba<sub>2</sub>cu<sub>3</sub>o<sub>7</sub>) 铋锶钙铜氧 (bisrcacuo) 高温超导陶瓷涂层，固体燃料电池涂层，储氢材料涂层以及太阳能吸收与转换涂层均已有雏形正在深入研究，工业化应用前景广阔。

7、纺织、化纤工业中的应用 现代纺织机械特别是化纤机械，正向高速、轻质、节能方向展。许多耗能的高速运动零部件一般尽可能采用轻质合金基体（如铝）+表面强化及功能涂层复合制造。纺织部件要求有一个轮廓分明的表面形状，这是由于在与纤维接触中这些部件必须起导向、卷绕、纺丝和拉丝并缠绕纤维作用所要求的。特殊的表面能提供设计要求的张力，同时又对纤维不造成拉毛和擦伤，同时自身还必须有足够的耐磨性，以满足纺机长时间稳定工作的要求，尤其是纺织行业规模化生产，这种要求更突出。上述种种通过热喷涂功能性涂层的设计和制备方能满足。目前在纺织行业成套设备数千个受力点所用的部件大部分采用功能涂层复合部件，零件涂层性能见表8。从表8中可知，纺织工业中使用al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>和tio<sub>2</sub>涂层范围较广，尽管这类涂层有很好的耐磨抗蚀性能。但由于al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>和tio<sub>2</sub>以及其他氧化物可成不同比例组成新的陶瓷涂层材料，经等离子喷涂后用不同的后处理技术如抛磨，刷磨，磨削和砂光等加工方法，可获得不同年硬度与不同表面状态的涂层，以适应各种纤维纺织性能的需要。其特点如下。

表8 零件涂层性能

零件名称	表面涂层	喷涂工艺	应用特征
丝束切断刀片 牵伸罗拉 卷曲罗拉 加捻摩擦盘 高速纺织机槽筒 倍捻机锭杯 上油辊 测长轮、鼓、盘 紧缩辊 挤压机、计量螺杆 导丝辊 槽行罗拉	co-wc、tic cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> 、al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> co-wc cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> 基涂层 al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> 、al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> co-wc 、tic cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> 、al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> 、al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub>	等离子、hvof 等离子喷涂 等离子、hvof 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子喷涂 等离子、hvof 等离子喷涂 等离子喷涂	耐磨、较无涂层寿命提高 4~10倍 橘皮表面、纤维松脱性好 与纤维亲和性好、耐磨咬 合性好 摩擦力一定、加捻 纤维性好 低摩擦表面、耐磨 耐磨减摩、导静电 橘皮表面、耐磨

			耐磨损、减摩 耐磨损、减摩 抗腐蚀和气蚀 耐磨损，适当的表面轮廓 耐磨损，适当的表面轮廓
--	--	--	--

具有优异的耐高速纤维磨损性能，氧化物陶瓷涂层硬度高和低表面能性质，决定必备耐磨和减摩性，这一点不容易被其他材料所取代。不同的陶瓷涂层后加工方法使表面具有不同的轮廓，因而会有不同的摩擦力。能对纤维施以适度的“捻力”，使纤维达到必要的强度和韧度。利用喷涂表在无数微粒凸起的喷涂（可经适当的加工消除尖利的峰顶），提供适度的表面粗糙度，与纤维作用时使纤维表面获得必要的“绒度”，达到染色性好，有一定的吸湿性等。

cr2o3涂层比al2o3+tio2涂层硬度值更高，且具有耐化学腐蚀作用，碳化物涂层则主要提供耐磨性能，在纺织工业中均有特殊的用途。大多数纺机零件均需要制备表面极平整、细腻、均匀的薄型陶瓷涂层表面。喷涂过程中必须把握以下三个环节：一是用  $\phi=0.25\text{mm}$  的细粒刚玉进行表面粗化喷砂；二是采用粒度范围5~45um的粉末喷涂；三是涂层厚度一般为0.15~0.20mm。这些应用已在我国形成系统化、规模化和规范化。纺织化纤工业陶瓷涂层的应用占全国陶瓷涂层大部分市场。8、电子工业中的应用 金属-陶瓷复合材料结构是微电子工业机芯材料的一种理想材料。在金属板（如钛合金、铜、铝、钢）上热喷涂高介电常数的陶瓷涂层，具有高热导率的金属能将强电流所产生的热发散开，而陶瓷涂层则提供很好的介电绝缘性能。以铜板上喷涂al2o3陶瓷涂层为例，其总热导率比相同厚度铜板烧结氧化铝层的总热导率高5倍，而传统作为介电导热的beo的热导率仅较氧化铝涂层1倍，故可能过适当减薄涂层厚度，用作集成电路板的介电散热。提高集成电路的功率。美国已能喷涂25mm\*25mm的介电陶瓷涂层复合电路板，一批次生产可达5万件规模。热喷涂技术是生产厚膜电路的有效方法，这种电路比印刷电路可承受较高的电流。其制造过程是：在非导电基体上（如塑料、陶瓷或玻璃等）喷涂金属。电路模型喷涂前需遮蔽，喷涂后腐蚀去不需要的部分即可。或用塑料注模法来制作，对塑料表面全部喷涂后，磨出凸出部分（多余涂层）则凹陷部分为所要的电路模型。厚膜电常用的喷涂金属为铜、铝、锌和银，在制造电阻器、电容器和电感器方面已得到应用和发展。在热处理后的玻璃上热喷涂铝等涂层已制成电加热板。在大型闸刀开关

的接触面1500a/60v直流电源开关导电触头上喷涂导电涂层，经2000次开关寿命试验表明：紫铜涂层制触头耐电蚀性最差；银或银钨合金涂层的触头耐电蚀性较好；等离子喷涂agw或cuw涂层的触头各种性能均最佳。锌涂层可提供高能级的电磁波衰减范围，可用于屏蔽电磁波和无线电频率（eni/rfi），同时可清除静电放电火花。这方面的应用包括计算机终端装置、电子办公设施、感光电子设备等。

9、化学工业中的应用 化学工业中最大的问题是腐蚀，各种材料在不同腐蚀介质、腐蚀环境、腐蚀温度中形成的腐蚀机理也是千差万别的。热喷涂涂层抗腐蚀的作用是：将耐蚀性能优异的合金、陶瓷、塑料等材料在需保护的基体上形成一定厚度的涂层或多重涂层，再对涂层的微孔采用合适的封孔剂（环氧树脂、硅树脂、聚氨酯等）进行封闭，用隔离形式保护基体免受腐蚀。由于上述耐蚀材料形成涂层时，由于相变或部分元素烧损等原因，耐蚀性会略有下降。同时封孔剂的选配和封闭技术的差异，有时也达不到100%的封孔效果，故防蚀是一项系统而艰辛的工作，需要认真分析腐蚀原因，科学设计防腐涂层体系，仔细严格操作程序。一般来说，用于大气常温环境下的耐蚀涂层，采用喷涂铝、锌、锌铝、不锈钢、铝青铜类合金涂层外加封孔形成复合防护体系即可耐20年以上的自然腐蚀。对于较严重的工业区大气环境，可采用喷涂镍基、钴基、mo、塑料和陶瓷涂层加某些专用封孔剂进行局部防护。镍、钴、铁基自熔性的喷涂重熔，形成的无孔致密焊接层耐蚀性较好，几乎与整体同种材料的抗蚀性相当。火焰喷涂的塑料喷涂层会形成致密无孔的涂层，经高压电火花检漏仪进行检测确认无孔后，能用于塑料软化温度以下的多种腐蚀介质并存的工况条件，但其弱点是塑料不耐老化，使用寿命有限。氧化物陶瓷主要用于较强腐蚀介质，如醋酸、磷酸、氢氧化物以及各种盐类的腐蚀加磨损工况条件中，同时也耐数百度高温条件下的腐蚀介质侵蚀，但涂层的封孔材料和涂层设计需认真选配方能达到预期效果。由于该类涂层技术要求高，制造成本贵，仅在特殊工况下的关键零部件上局部应用，大面积现场采用不太现实。超音速火焰喷涂、超音速等离子喷涂、燃气爆炸喷涂技术在抗腐蚀涂层中应用，可制备结合强度高（50~100mpa），孔隙率极低（ $\leq 1.5\%$ ）的优质涂层，并获得很好的应用效果。涂层封孔剂方面的研究进展据不完全统计，我国研制成功并实施应用的达近百种。其中绝大部分用于常温、弱介质环境涂层封孔。用于恶劣工况环境的封孔剂根据资料介绍，目前已经有20多种可用于包括王水在内的介质环境涂层封孔，其中5种可在200度以上长期使用，耐温最高达500度，有10种封孔剂可用于食品以及医药行业。作为封孔剂材料均应具有以下特点。

耐反应原料、中间反应物以及最终产品的腐蚀。耐上述各种物质的溶解。  
抵御上述各种物质的应力开裂倾向。

表9 热喷涂涂层在腐蚀介质中的反应

零部件名称	喷涂工艺	涂层体系	性能与用途
化工管道	电弧喷漆 氧乙炔喷涂	zn,al不锈钢、nicr+封闭、 塑料涂层、青铜	耐水介质腐蚀和大气痒化抗弱介质气氛和熔液腐蚀
葡萄酒啤酒储罐	痒乙炔喷漆 电弧喷漆	环痒树脂涂层，不锈钢+	无孔、无毒与乙醇不产生反应、阻止基体中有害离子的渗入
泵柱塞、叶轮机械密封环 阀门密封面	氧乙炔喷焊 等离子喷焊 等离子喷涂 hvof 爆炸喷涂	ni、co、fe、cu基自熔合金 氧化物陶瓷al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> 、al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> 、cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> 、mo-co-wc	减摩抗磨性好，抗介质和高温腐蚀，寿命提高2~3倍，主要用于零件部件运动工作面
化工反应釜搪瓷内衬修补	氧乙炔喷涂	cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> .sio <sub>2</sub> .tio <sub>2</sub> 加聚苯硫醚 高温漆	耐250~350 强酸碱的腐蚀和流体的冲刷，适用于局部小面积掉瓷区域的修补
轴类、轴套	等离子喷涂 hvof 爆炸喷涂	al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> +tio <sub>2</sub> cr <sub>2</sub> o <sub>3</sub> co-wc ni-cr-b-si 加封孔剂	耐250~350 强酸碱的腐蚀，减摩、耐磨性好，用于运动工作面上

热喷涂涂层体系在化学腐蚀领域中的应用实例见表9。表9中反映釜搪瓷内衬修补技术已申请专利，用于酸碱盐及有机物80~350度腐蚀环境中的封孔剂已形成聚酯型、有机聚合物型、树脂型和胶粘剂型等系列，并获得国家专利及发明奖。图4-8为等离子喷涂cr<sub>2</sub>o<sub>3</sub>涂层用于化工反应釜搅拌轴运动部位，涂层厚度达0.3~0.4mm，用耐350度有机硅封孔剂封孔，使用效果满足工况技术要求，形成固定工艺要求。

10、生物医疗器械中的反应 随着人类生活质量的提高，人类平均寿命延长，对人工骨骼的需求量日增。

据统计，1983年美国使用人工关节情况为：髌关节11万件，膝关节：6.5

万件，肩、指其他关节：5万件。1990年资料报道，美国每年使用8.8万全膝关节。1997年全世界人工关节预测显示：全髌关节40万件，全膝关节20万件，髌/肘/肩关节70万件，手指关节60万件。我国人口众多，占世界总人口的四分子一，按1997年全世界人工关节预测，我国每年需要髌关节10万件，由于我国经济发展不平衡，医疗和整体康复的水平还与发达国家还有相当差距，随着现代化的逐步实现，生物功能材料在我国开发应用的市场前景十分广阔。传统的人工骨骼是采用不锈钢1cr18ni9ti和合金ti-6al-4v制作。植入人体后耐体液腐蚀性不强，与肌肉细胞组织不亲和而产生积水，关节运动部件抗磨损性差等问题。目前典型的应用是已强度高韧性好的ti-6al-4v合金作基材，表面喷涂基磷灰石类陶瓷涂层(ha)。该类结构具有以下特点。

人工骨骼采用复合材料结构设计，对生物体无毒适于体内安全使用。

基磷灰石涂层与骨骼材料成分相近，对生物体和细胞有良好的适应性和亲和性，无副作用。

表面涂层及复合材料结构设计耐人体体液腐蚀。陶瓷涂层表面耐长期运动过程中的磨损。

钛合金基体具有人体运动所必须承受的强度、韧性等力学性能。

喷涂层的多孔性和粗糙表面，有利于生物体组织在人工骨骼表面的生长与亲和。更细致的工作是在钛合金与面涂层之间，制备ti或al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>、zro<sub>2</sub>等生物惰性中间过渡层。目的是：1、屏蔽体液通过涂层于钛合金的接触，避免钛合金中的v等金属离子渗入生物肌体引起“中毒”现象；2、是中间过渡层的采用能提高基磷灰石涂层于整体的黏结强度达到50%~100%。因此，热喷涂金属基生物陶瓷涂层的人工骨骼，是比较理想的人工骨骼材料，我国众多研究单位和大专院校已先后在人体股骨、髌骨、肘关节、骨盆、人造牙齿等方面研究成功并用于临床。

11、机械工业与其他方面的应用（1）液压陶瓷涂层活塞杆热喷涂陶瓷和金属陶瓷涂层，不仅具有高的硬度，优异的耐磨性；而且摩擦系数低，能耗小；对密封填料的磨损小，涂层硬度和耐磨性不会因局部过热而降低。因此在抗衡腐蚀磨损领域，热喷涂涂层正成为电镀硬铬技术强有力的竞争者和取代者。大型水利工程及海洋开发用的液压油缸大型活塞杆，采用等离子喷涂al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>+tio<sub>2</sub>陶瓷涂层代替镀硬铬，可达到高质量，长寿命，免维修。现已制造出长16m，重10t的超大型陶瓷涂层活塞杆及相应的液压油缸系统。涂层厚度200~350um，硬度900~1200hv，表面粗糙度ra0.3~0.35um。该设计涂层活塞杆运行总行程超过1200km之后仍保持完好状态。在化工厂高压往复汞柱塞上应用al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>+tio<sub>2</sub>涂层，其使用寿命比原镀铬柱塞提高6倍，密封填料的寿命也提高3倍。目前，在低应力滑动磨损和腐蚀工况下工作的各种液压活塞杆柱塞、水轮机叶轮轴磨环、电枢轴头、磨床轴、抗咬死轴套、活塞环、凸轮随动件等，几乎所有原用镀铬制品均可用热喷涂涂层取代。从而避免由镀铬带来的铬水污染和“氢脆”后果。（2）拉丝轮采用hvof喷涂co-wc和nicrbsi涂层制造各种类型的拉丝机轮和塔轮，经适当的处理，较原用拉丝轮提高十几倍，现在我国已经形成年产值进千万元的产业，在电线电缆行业，汽车橡胶工业得到推广应用，并保持较高的增长势头。（3）喷涂成型用热喷涂方法制备整体成型零件产品是一种快速喷铸制造方法。其特点在于根据产品特点要求调整和选配不同性能的喷涂材料灵活制备，具有独特的优势。制造各种高熔点氧化物陶瓷成型产品，可采用水稳等离子喷涂和高能等离子喷涂技术进行。典型的方法之一是：对金属模表面进行轻微喷砂处理后，在喷镀一层脱模剂薄涂层（如食盐），然后喷涂陶瓷涂层到达一定厚度，成型后的制品只需溶到脱模剂（如水淋溶解食盐）即可获得净尺寸工件。如飞机雷达天线外罩，用氧化铝浆成型干燥后烧固，体积收缩率达8%~20%，而喷涂成型的al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>