

材料表面工程技术的应用

天津工业大学
《材料表面工程》教学团队

目录

一、表面工程技术在大国工程的应用	5
1、港珠澳大桥	5
2、三峡大坝	6
3、中国天眼（FAST）	8
4、南水北调工程	10
5、中国高铁	12
6、大兴国际机场	14
7、西气东输工程	17
8、白鹤滩水电站	20
9、“奋斗者”号载人潜水器	22
10、中国空间站	24
11、西气东输工程：	26
12、青藏铁路	29
13、歼 -20 隐身战机	31
14、神舟系列飞船	33
二、表面工程技术在航空航天中的应用	35
案例一：飞机发动机叶片热障涂层	35
案例二：飞机蒙皮表面防腐涂层	35
案例三：航空发动机燃烧室高温合金表面渗铝	35
案例四：飞机起落架表面镀铬	36
案例五：航空航天紧固件表面化学镀	36
案例六：卫星天线反射面表面镀金	36
案例七：航空发动机涡轮盘表面离子注入强化	36
案例八：飞机雷达罩表面涂覆透波材料	37
案例九：航天飞行器热防护系统表面涂层	37
案例十：航空发动机压气机叶片表面涂层	37
三、表面工程技术在智能制造中的应用	38
案例一：工业机器人关节表面耐磨涂层	38
案例二：自动化生产线输送带表面防滑涂层	38
案例三：智能加工中心刀具表面涂层	38
案例四：3D 打印零部件表面致密化涂层	38
案例五：智能仓储货架表面防腐涂层	39
案例六：机器人视觉系统镜头表面增透涂层	39
案例七：智能传感器表面封装涂层	39
案例八：数控机床导轨表面耐磨涂层	40
案例九：智能包装设备零部件表面润滑涂层	40
案例十：智能工厂 AGV 小车车轮表面耐磨涂层	40
四、表面工程技术在节能减排中的应用	41
案例一：汽车发动机缸体表面微弧氧化涂层	41
案例二：工业锅炉内壁热障涂层	41
案例三：船舶螺旋桨表面防腐耐磨涂层	41
案例四：太阳能热水器集热管表面选择性吸收涂层	42
案例五：风力发电机叶片表面防护涂层	42
案例六：建筑外窗玻璃表面低辐射涂层	42

案例七：燃气轮机叶片表面热障与耐磨涂层	43
案例八：电动机外壳表面散热涂层	43
案例九：换热器表面防腐与强化传热涂层	43
案例十：城市轨道交通车辆制动盘表面涂层	44
五、表面工程技术在汽车制造中的应用	45
案例 1：发动机缸体的镀铬处理	45
案例 2：汽车轮毂的电镀处理	45
案例 3：车身表面的电泳涂装	45
案例 4：活塞环的氮化处理	46
案例 5：汽车排气系统的热障涂层应用	46
案例 6：汽车座椅骨架的磷化处理	46
案例 7：汽车制动盘的激光淬火处理	47
案例 8：汽车散热器的镀锡处理	47
案例 9：汽车内饰件的表面涂饰	47
案例 10：汽车发动机曲轴的喷丸强化处理	48
六、表面工程技术在电子信息中的应用	49
案例 1：手机外壳的电镀处理	49
案例 2：芯片封装的化学气相沉积	49
案例 3：印刷电路板的表面涂覆	49
案例 4：液晶显示器的薄膜沉积	50
案例 5：硬盘磁头的溅射镀膜	50
案例 6：电子元件的钝化处理	51
案例 7：光纤的表面涂覆保护	51
案例 8：触摸屏的纳米涂层技术	51
案例 9：半导体器件的离子注入掺杂	52
案例 10：电子设备散热器的表面处理	52
案例 11：微机电系统（MEMS）传感器的表面处理	53
案例 12：量子点发光二极管（QLED）的表面钝化	53
七、表面工程技术在能源电力中的应用	54
案例一：风力发电机叶片表面涂层	54
案例二：太阳能电池板表面减反射膜	54
案例三：电力变压器表面防腐涂层	54
案例四：高压输电线路铁塔热镀锌	55
案例五：发电机转子表面镀铬	55
案例六：核电站反应堆压力容器表面防护涂层	55
案例七：水电厂水轮机叶片表面耐磨涂层	55
案例八：储能电池电极表面改性	56
案例九：电网绝缘子表面憎水涂层	56
案例十：火力发电厂锅炉管道表面防腐涂层	56
八、表面工程技术在生物医疗中的应用	58
表面案例一：人工关节表面涂层	58
案例二：心血管支架表面改性	58
案例三：牙科种植体表面处理	58
案例四：医用不锈钢器械表面钝化	58
案例五：隐形眼镜表面亲水涂层	59
案例六：人工心脏瓣膜表面抗钙化涂层	59

案例七：医用导管表面润滑涂层	59
案例八：组织工程支架表面修饰	60
案例九：医疗植入物表面抗菌涂层	60
案例十：义齿表面耐磨及美观涂层	60
案例十一：骨科固定器械表面生物活性涂层	61
案例十二：医用导丝表面润滑及抗菌涂层	61
九、表面工程技术在纺织行业中的应用	62
案例一：织物防水涂层	62
案例二：织物防污涂层	62
案例三：织物抗菌除臭涂层	62
案例四：织物抗紫外线涂层	62
案例五：织物柔软整理涂层	63
案例六：织物拒油涂层	63
案例七：织物易去污涂层	63
案例八：织物抗静电涂层	64
案例九：织物阻燃涂层	64
案例十：织物仿皮革涂层	64
十、表面工程技术在建筑行业中的应用	65
案例一：建筑物外墙氟碳漆涂装	65
案例二：钢结构桥梁热浸镀锌	65
案例三：建筑玻璃镀膜	65
案例四：混凝土路面封层	65
案例五：古建筑木材防腐处理	66
案例六：卫生间陶瓷砖防滑处理	66
案例七：金属屋面隔热涂层	66
案例八：大理石墙面防护处理	67
案例九：建筑铝材阳极氧化处理	67
案例十：地下停车场环氧地坪漆涂装	67
案例十一：建筑外立面自清洁超疏水涂层涂装	67
十一、表面工程技术在海洋工程中的应用	69
案例一：海洋平台钢结构热喷涂锌铝涂层	69
案例二：船舶船体防腐涂料涂装	69
案例三：海上风电塔筒表面涂层防护	69
案例四：海洋管道内壁防腐涂层	70
案例五：海洋平台桩腿阴极保护	70
案例六：船舶螺旋桨耐磨涂层	70
案例七：海上桥梁钢结构表面氟碳漆涂装	70
案例八：海洋观测设备表面防护涂层	71
案例九：海洋平台上层建筑防火涂层	71
案例十：海水淡化设备防垢涂层	71
案例十一：建筑外立面自清洁超疏水涂层涂装	71
十二、表面工程技术在天津工业大学研究特色的纺织领域的应用	73
1、织物方面	73
2、纤维方面	73
3、中空纤维膜方面	73

一、表面工程技术在大国工程的应用

1、港珠澳大桥

港珠澳大桥在建设过程中广泛应用了表面工程技术，以提高桥梁结构的耐久性、耐腐蚀性和抗疲劳性能。港珠澳大桥中表面工程技术的具体应用流程：

（1）钢结构表面防腐涂装

表面预处理：首先采用喷砂工艺对钢结构表面进行处理。使用高压空气将磨料（如石英砂）喷射到钢结构表面，去除表面的铁锈、氧化皮、油污和其他杂质，使表面达到规定的粗糙度和清洁度标准。这一步骤是为了增加涂层与钢结构表面的附着力，保证涂层的长期有效性。

底漆涂装：在经过预处理的钢结构表面喷涂富锌底漆。富锌底漆中含有大量的锌粉，能够在钢结构表面形成一层导电的锌层，当钢结构暴露在腐蚀环境中时，锌层会优先发生氧化反应，从而保护钢结构基体不受腐蚀，起到阴极保护的作用。底漆的喷涂厚度通常要严格控制，以确保其具有足够的防护性能。

中间漆涂装：底漆干燥后，喷涂中间漆。中间漆主要起到增加涂层厚度、提高涂层的屏蔽性能和抗渗透性能的作用，同时也能增强底漆和面漆之间的附着力。一般采用环氧云铁中间漆，其具有良好的耐候性和机械性能。

面漆涂装：最后喷涂氟碳面漆。氟碳面漆具有优异的耐候性、耐腐蚀性和自清洁性能，能够长期保持桥梁表面的美观，并抵抗紫外线、盐雾、酸雨等自然环境因素的侵蚀。面漆的颜色通常根据设计要求进行选择，港珠澳大桥的面漆颜色为“中国白”，使大桥在海洋环境中更加醒目和美观。

（2）混凝土结构表面防护

表面清理：在混凝土浇筑完成并达到一定强度后，首先对其表面进行清理，去除表面的浮浆、油污和其他污染物。可以采用高压水枪冲洗或机械打磨的方式进行清理，确保混凝土表面干净、粗糙，有利于后续防护涂层的附着。

硅烷浸渍处理：采用硅烷浸渍剂对混凝土表面进行处理。硅烷浸渍剂能够渗透到混凝土内部一定深度，在混凝土孔隙内形成一层憎水层，阻止水分、氯离子等有害物质进入混凝土内部，从而提高混凝土的抗渗性和耐腐蚀性。硅烷浸渍处理通常在混凝土表面干燥的情况下进行，

通过喷涂或刷涂的方式将硅烷浸渍剂均匀地涂抹在混凝土表面，保证浸渍剂充分渗透到混凝土内部。

涂层防护：在硅烷浸渍处理完成后，根据需要在混凝土表面喷涂防护涂层。防护涂层可以采用丙烯酸类、聚氨酯类等涂料，这些涂料具有良好的耐候性和耐水性，能够进一步提高混凝土结构的防护性能，同时还能起到装饰作用，使混凝土表面更加美观。

（3）桥梁支座表面处理

金属支座表面处理：对于桥梁支座中的金属部件，如钢垫板、锚栓等，首先进行热浸镀锌处理。将经过除油、除锈等预处理的金属部件浸入熔融的锌液中，使金属表面形成一层均匀、致密的锌层。热浸镀锌层具有良好的耐腐蚀性和耐磨性，能够保护金属部件在长期使用过程中不受腐蚀。然后，在锌层表面喷涂防腐涂料，进一步提高其防护性能。

橡胶支座表面处理：橡胶支座是桥梁支座中的关键部件，为了提高其耐老化性能和抗磨损性能，通常在橡胶支座表面涂覆一层防老化涂层。防老化涂层一般采用含有紫外线吸收剂、抗氧化剂等添加剂的橡胶涂料，通过喷涂或刷涂的方式将涂料均匀地涂覆在橡胶支座表面。这种涂层能够有效地阻挡紫外线和氧气对橡胶的侵蚀，延长橡胶支座的使用寿命。

通过以上表面工程技术的应用，港珠澳大桥的钢结构、混凝土结构和桥梁支座等关键部位得到了有效的防护，能够在复杂的海洋环境中保持良好的性能，确保大桥的长期安全运行。

2、三峡大坝

三峡大坝在建设 and 维护过程中应用了多种表面工程技术，以确保大坝在长期的水利运行环境中具备良好的耐久性、抗渗性和抗侵蚀性等性能。三峡大坝中表面工程技术的具体应用流程：

（1）混凝土表面防碳化涂层施工

表面清理：在进行涂层施工前，首先要对混凝土表面进行彻底清理。使用高压水枪冲洗混凝土表面，去除灰尘、浮浆、油污等杂质。对于表面的疏松层、蜂窝麻面等缺陷，采用人工凿除或机械打磨的方式进行处理，使表面达到平整、坚实的状态。

基层处理：对于清理后的混凝土表面，若存在较大的裂缝或孔洞，需采用环氧砂浆等材料进行修补。修补时，先将裂缝或孔洞周边清理干净，然后将调配好的环氧砂浆填入其中，并用抹刀压实、抹平，使其与周围混凝土表面齐平。对于较小的裂缝，可采用表面封闭的方法，使用环氧胶泥等材料进行涂抹封闭，防止水分和二氧化碳等侵蚀介质进入混凝土内部。

底涂施工：在基层处理完成且干燥后，进行底涂施工。底涂材料通常选用渗透性好、附着力强的环氧底漆。将环氧底漆按照规定的比例调配均匀，然后使用滚刷或喷枪将底漆均匀地涂刷在混凝土表面。底漆的作用是增强涂层与混凝土表面的附着力，同时封闭混凝土表面的孔隙，防止水分和空气渗透。涂刷时要确保底漆充分渗透到混凝土孔隙中，形成一层牢固的结合层。

面涂施工：底涂干燥后，进行面涂施工。面涂材料一般采用具有良好耐候性和抗碳化性能的氟碳涂料或聚脲涂料。以氟碳涂料为例，将氟碳涂料按照配方准确调配，使用喷枪进行喷涂施工。喷涂时要控制好喷枪的压力、距离和角度，确保涂层均匀、平整，无流挂、漏喷等现象。一般需要喷涂 2 至 3 遍，每遍之间要保持适当的间隔时间，待前一遍涂层干燥后再进行下一遍喷涂，以达到规定的涂层厚度，形成有效的防碳化屏障。

(2) 金属结构表面防腐涂装

表面预处理：三峡大坝中的金属结构，如闸门、压力钢管等，在涂装前需进行严格的表面预处理。首先采用抛丸或喷砂工艺，利用高速旋转的抛丸器或高压空气驱动的喷砂设备，将钢丸或砂粒喷射到金属表面，去除铁锈、氧化皮和其他杂质，使金属表面达到一定的粗糙度，增加涂层的附着力。处理后的金属表面应达到相关标准规定的清洁度和粗糙度要求。

喷涂车间底漆：预处理后的金属结构在短时间内喷涂车间底漆，以防止金属表面再次生锈。车间底漆一般选用快干型的无机富锌底漆，通过喷涂设备将底漆均匀地喷涂在金属表面，形成一层薄而致密的保护膜。车间底漆的干燥速度快，能够在短时间内为金属提供临时防护，同时也为后续的正式涂装打下良好的基础。

中间漆涂装：在车间底漆干燥后，进行中间漆的涂装。中间漆通常选用环氧云铁中间漆，其具有良好的屏蔽性能和防锈性能。将环氧云铁中间漆按照规定的比例调配好，使用喷涂设备进行喷涂。中间漆的作用是增加涂层的厚度和防腐性能，同时提高底漆和面漆之间的结合力。一般需要喷涂 2 至 3 遍中间漆，每遍之间要进行充分的干燥和打磨，以确保涂层的质量。

面漆涂装：最后进行面漆的涂装。面漆根据不同的使用环境和要求，可选用丙烯酸聚氨酯面漆、氟碳面漆等。以丙烯酸聚氨酯面漆为例，将面漆调配均匀后，使用喷枪进行喷涂。面漆的颜色根据设计要求进行选择，一般为灰色或蓝色等。面漆具有良好的耐候性、耐腐蚀性和装饰性，能够保护金属结构在长期的户外环境中不受腐蚀，同时使金属结构表面美观整洁。

(3) 大坝基础防渗处理

帷幕灌浆：在大坝基础岩石表面进行帷幕灌浆是防渗处理的关键环节。首先在基础岩石上钻孔，孔深根据设计要求确定，一般深入到基岩一定深度。然后将配制好的水泥浆或水泥 - 化

学浆液通过灌浆泵压入钻孔中，浆液在压力作用下渗透到岩石的裂隙和孔隙中，形成一道连续的防渗帷幕，阻止地下水在大坝基础内的渗透，降低坝基扬压力，提高大坝的稳定性。

混凝土防渗墙：对于大坝基础中存在的较厚的松散地层或透水层，采用混凝土防渗墙进行防渗处理。先使用专用的成槽设备在地基中挖掘出一定深度和宽度的槽孔，然后在槽孔内吊放钢筋笼，再浇筑混凝土，形成一道垂直的混凝土防渗墙。混凝土防渗墙具有良好的防渗性能和抗渗能力，能够有效地截断地下水的渗透路径，保证大坝基础的防渗安全。

土工合成材料应用：在大坝基础的某些部位，如坝基与岸坡的连接部位，会铺设土工合成材料，如土工膜、土工布等。先将基础表面平整压实，然后铺设土工膜，土工膜具有良好的防渗性能，能够阻止水分渗透。在土工膜上再铺设土工布，土工布起到保护土工膜、过滤和排水的作用，同时增强基础表面的稳定性。通过土工合成材料的应用，进一步提高了大坝基础的防渗性能和整体稳定性。

通过这些表面工程技术的应用，三峡大坝的混凝土结构、金属结构和基础部分得到了有效的保护，能够在长期的运行过程中抵御各种自然因素和水利条件的侵蚀，确保大坝的安全稳定运行，发挥其巨大的防洪、发电、航运等综合效益。

3、中国天眼（FAST）

中国天眼（FAST）在建设和维护过程中应用了多种表面工程技术，以保障其高精度反射面和支撑结构等关键部件的性能和寿命。中国天眼表面工程技术的具体应用流程：

（1）反射面单元表面处理

面板清洗：反射面单元的面板在加工和运输过程中可能会沾染油污、灰尘和其他杂质。首先使用温和的清洁剂和高压水枪对面板表面进行冲洗，去除可见的污垢。对于顽固污渍，采用专用的清洗剂进行擦拭，确保面板表面干净整洁。

除锈处理：如果面板表面存在锈迹，根据锈迹的严重程度选择合适的除锈方法。对于轻微锈迹，使用砂纸或钢丝刷进行人工打磨，去除锈层。对于较严重的锈迹，采用化学除锈剂进行处理，将除锈剂均匀涂抹在锈迹表面，待锈迹溶解后，用清水冲洗干净，并及时擦干面板，防止再次生锈。

氧化处理：为了提高面板的耐腐蚀性和耐磨性，对清洗和除锈后的面板进行氧化处理。通常采用化学氧化或阳极氧化的方法，在面板表面形成一层致密的氧化膜。以化学氧化为例，将面板浸泡在含有特定化学药剂的溶液中，通过化学反应在面板表面生成氧化膜。氧化膜的厚度和性能可通过调整溶液成分、处理时间和温度等参数进行控制。

喷涂防护涂层：氧化处理后，在面板表面喷涂防护涂层。防护涂层一般选用具有良好耐候性、耐腐蚀性和抗紫外线性能的氟碳涂料。先在面板表面喷涂一层底漆，底漆能够增强涂层与面板的附着力，提高防腐性能。底漆干燥后，再喷涂面漆，面漆形成光滑的表面，能够有效抵御外界环境的侵蚀，同时具有良好的反射性能，不影响天眼对电磁波的接收。喷涂过程中，严格控制喷涂的压力、距离和角度，确保涂层均匀、平整，无流挂、漏喷等缺陷。

(2) 支撑结构表面防腐涂装

表面预处理：支撑结构通常为钢结构，在涂装前需要进行严格的表面预处理。首先采用喷砂工艺，利用高压空气将磨料（如石英砂）喷射到钢结构表面，去除铁锈、氧化皮和杂质，使钢结构表面达到规定的粗糙度和清洁度标准。喷砂后的钢结构表面呈现出均匀的粗糙面，有利于涂层的附着。

喷涂防锈底漆：预处理后的钢结构表面应尽快喷涂防锈底漆，以防止在空气中暴露时间过长而再次生锈。防锈底漆一般选用环氧富锌底漆，该底漆具有良好的防锈性能和附着力。将环氧富锌底漆按照规定的比例调配均匀，使用喷涂设备进行喷涂。底漆的干膜厚度应符合设计要求，一般通过控制喷涂的遍数和每遍的厚度来保证。

中间漆涂装：防锈底漆干燥后，进行中间漆的涂装。中间漆选用环氧云铁中间漆，其具有良好的屏蔽性能和增加涂层厚度的作用，能够进一步提高防腐性能。将环氧云铁中间漆调配好后，采用喷涂的方式施工，一般需要喷涂 2 至 3 遍，每遍之间要保证足够的干燥时间，并进行适当的打磨，以增强层间附着力。

面漆涂装：中间漆干燥后，进行面漆的涂装。面漆选用具有良好耐候性和装饰性的丙烯酸聚氨酯面漆或氟碳面漆。根据设计要求选择面漆的颜色，一般为灰色或其他与周围环境相协调的颜色。面漆的喷涂工艺与底漆和中间漆类似，要确保涂层均匀、光滑，具有良好的外观质量，同时满足耐候性和防腐性能的要求。

(3) 馈源舱表面处理与防护

表面清洁与脱脂：馈源舱表面在安装和调试过程中可能会沾上油污和灰尘，首先使用有机溶剂或专用的脱脂剂对馈源舱表面进行擦拭，去除油污和油脂类污染物。然后用清水冲洗表面，去除残留的脱脂剂和灰尘，确保表面干净无杂质。

喷涂绝缘涂层：为了防止馈源舱受到电磁干扰和静电影响，在其表面喷涂绝缘涂层。绝缘涂层一般采用具有良好绝缘性能和耐候性的有机涂料。在喷涂前，先对馈源舱表面进行适当的打磨处理，以增加涂层的附着力。然后将绝缘涂料按照规定的工艺进行喷涂，控制涂层的厚度和均匀性，确保馈源舱表面形成良好的绝缘保护。

抗紫外线处理：馈源舱长期暴露在户外环境中，需要具备良好的抗紫外线性能，以防止材料老化和性能下降。在绝缘涂层表面再喷涂一层抗紫外线清漆，或者在绝缘涂料中添加抗紫外线添加剂，提高涂层对紫外线的吸收和散射能力，降低紫外线对馈源舱表面材料的破坏作用，延长馈源舱的使用寿命。

通过这些表面工程技术的应用，中国天眼的反射面、支撑结构和馈源舱等部件得到了有效的保护，能够在复杂的户外环境中保持良好的性能和精度，确保天眼能够长期稳定地运行，进行天文观测和科学研究。

4、南水北调工程

南水北调工程中应用了多种表面工程技术，以确保输水渠道、建筑物等结构的耐久性、防水性和抗腐蚀性等。一些常见表面工程技术的具体应用流程：

（1）输水渠道衬砌表面处理

基层准备

清理：在进行衬砌表面处理前，首先要清理渠道基层表面的杂物、松散颗粒和油污等，确保基层表面干净整洁。对于存在的局部凹凸不平，需进行找平处理，凸出部分进行打磨，凹陷部分用细石混凝土或水泥砂浆填补。

湿润：施工前适当洒水湿润基层表面，使基层具有一定的湿度，这样有利于后续衬砌材料与基层的粘结，但要避免积水。

混凝土衬砌施工

模板安装：根据渠道设计尺寸安装模板，模板应具有足够的强度、刚度和稳定性，以保证混凝土浇筑时不变形。模板表面要平整光滑，并涂刷脱模剂，方便拆模且避免混凝土粘模。

混凝土浇筑：选用合适的混凝土配合比，一般采用抗渗性和抗冻性较好的混凝土。将混凝土通过搅拌车运输到施工现场，采用泵送或滑槽等方式将混凝土送入模板内，然后用振捣器振捣密实，确保混凝土内无空洞、无蜂窝麻面。振捣过程中要注意避免振捣棒触及模板和已绑扎好的钢筋，防止其变形。

表面抹光：混凝土浇筑完成后，在初凝前用木抹子进行初步抹光，使表面平整。待混凝土接近终凝时，再用铁抹子进行二次抹光，进一步提高表面平整度和光洁度，同时消除表面的细微裂缝和气孔。

衬砌表面防护涂层施工

涂层选择：根据渠道所处环境和使用要求，选择合适的防护涂层，如聚氨酯防水涂料、环氧沥青涂层等。这些涂层具有良好的防水、防腐和抗渗性能。

基层处理：在涂刷防护涂层前，要确保衬砌表面干燥、清洁、无油污和灰尘。对于表面存在的微小裂缝和孔洞，需用腻子或密封胶进行填补和修复。

涂层施工：按照涂层材料的使用说明进行调配和施工。一般采用喷涂或刷涂的方式，先涂刷底层涂料，待底层涂料干燥后，再涂刷面层涂料，通常需要涂刷 2 至 3 遍，每遍之间要保证足够的干燥时间，且涂刷方向应相互垂直，以确保涂层均匀、无漏刷，总厚度达到设计要求。

水工建筑物表面防腐处理

钢结构表面处理

除锈：对于水工建筑物中的钢结构部件，如闸门、拦污栅等，首先要进行除锈处理。常用的方法有喷砂除锈和化学除锈。喷砂除锈是利用高压空气将石英砂等磨料喷射到钢结构表面，去除铁锈和氧化皮，使表面达到一定的粗糙度，增强后续涂层的附着力。化学除锈则是使用除锈剂进行浸泡或涂刷，溶解铁锈后用清水冲洗干净。

喷涂防腐涂层：除锈后的钢结构表面应尽快喷涂防腐涂层。一般先喷涂底漆，如环氧富锌底漆，该底漆具有良好的防锈性能，能够与钢结构表面紧密结合。底漆干燥后，再喷涂中间漆，如环氧云铁中间漆，以增加涂层的厚度和屏蔽性能。最后喷涂面漆，可选用丙烯酸聚氨酯面漆或氟碳面漆等，面漆具有良好的耐候性和装饰性，能够保护钢结构免受外界环境的侵蚀。

混凝土结构表面防护

表面清理：混凝土结构表面可能存在水泥浆残留、油污和灰尘等，先用钢丝刷或高压水枪进行清理，去除表面的杂物和松散颗粒。对于表面的蜂窝麻面和裂缝，要进行修补处理，较小的蜂窝麻面用水泥砂浆填补，裂缝则根据宽度和深度采用不同的处理方法，如表面封闭、压力灌浆等。

涂刷防护剂：为了提高混凝土结构的抗渗性、抗冻性和抗腐蚀性，在清理干净后的混凝土表面涂刷防护剂。防护剂一般有硅烷类、氟碳类等。硅烷类防护剂能够渗透到混凝土内部，形成一层憎水保护膜，阻止水分和有害离子的侵入。涂刷时要保证防护剂均匀覆盖混凝土表面，可采用喷涂或滚涂的方式，根据防护剂的性能和要求确定涂刷的遍数和用量。

管道内壁防腐处理（针对有压管道部分）

管道表面预处理：无论是金属管道还是混凝土管道，在进行内壁防腐处理前都要进行表面预处理。对于金属管道，采用喷砂或化学清洗的方法去除内壁的铁锈、油污和杂质，使管道内

壁达到规定的清洁度和粗糙度。对于混凝土管道，要清理内壁的浮浆、毛刺和杂物，如有裂缝或孔洞需进行修补。

防腐涂层施工

金属管道涂层：金属管道内壁常用的防腐涂层有环氧粉末涂层、聚乙烯涂层等。以环氧粉末涂层为例，采用静电喷涂的方式将环氧粉末均匀地喷涂在预热的管道内壁上，环氧粉末在高温下熔融并与管道表面牢固结合，形成一层均匀、致密的防腐涂层。涂层的厚度和性能要符合相关标准和设计要求。

混凝土管道涂层：混凝土管道内壁可采用聚合物水泥砂浆或环氧涂料等进行防腐处理。聚合物水泥砂浆是将聚合物乳液与水泥砂浆混合配制而成，具有良好的粘结性和抗渗性。施工时，将聚合物水泥砂浆涂抹在管道内壁，用抹子或专用设备使其均匀平整，厚度一般根据设计要求确定。环氧涂料则采用刷涂或喷涂的方式施工，施工过程中要注意涂层的均匀性和完整性，避免出现漏涂或流坠现象。

通过这些表面工程技术的应用，南水北调工程各类结构和设施能够更好地抵御外界环境的侵蚀和破坏，保证工程的安全运行和长期使用。

5、中国高铁

中国高铁在车辆、轨道及桥梁等多个方面广泛应用了表面工程技术，以提高部件的性能、耐久性和安全性。其具体应用流程：

（1）高铁车辆表面处理

车体表面预处理

清洗：新车体在涂装前，首先要进行彻底的清洗，以去除表面的油污、灰尘、金属屑等杂质。通常使用专用的清洗剂 and 高压水枪进行冲洗，确保车体表面干净整洁。

除油除锈：对于车体表面存在的油污和铁锈，采用化学除油剂和除锈剂进行处理。将除油剂喷涂或涂刷在车体表面，使其与油污充分反应后，用清水冲洗干净。除锈则根据铁锈的严重程度，选择合适的除锈方法，如轻度铁锈可采用手工打磨或机械打磨的方式去除，较严重的铁锈则可能需要采用喷砂除锈的方法，以获得良好的除锈效果和表面粗糙度。

底漆涂装

底漆选择：根据高铁车辆的使用环境和性能要求，一般选择具有良好防腐性能和附着力的环氧底漆。这种底漆能够有效防止车体金属生锈，并为后续的涂层提供良好的基础。

涂装工艺：采用喷涂的方式进行底漆施工。在喷涂前，要对涂料进行充分搅拌和过滤，确保涂料的均匀性和无杂质。喷涂时，要控制好喷枪的压力、距离和角度，以保证底漆均匀地覆盖在车体表面。底漆的厚度通常根据设计要求进行控制，一般在几十微米到上百微米不等。喷涂完成后，将车体送入烘干室进行烘干，使底漆快速固化，提高其性能。

面漆涂装

面漆选择：面漆主要考虑其耐候性、装饰性和自清洁性能等。目前，高铁车辆常用的面漆有聚氨酯面漆或氟碳面漆等。这些面漆具有良好的耐紫外线照射、耐化学腐蚀和耐磨损性能，能够保持车辆外观的美观和整洁。

涂装工艺：面漆的涂装工艺与底漆类似，也是采用喷涂的方式。在喷涂面漆前，要确保底漆表面干净、干燥且无缺陷。根据设计要求，可能需要喷涂多层面漆，以达到规定的颜色、光泽和厚度要求。每层面漆之间要进行适当的干燥和打磨处理，以提高涂层之间的附着力和整体性能。最后，对涂装完成的车体进行质量检查，包括涂层的厚度、光泽度、颜色一致性以及有无流挂、橘皮等缺陷。

（2）高铁轨道表面处理

钢轨表面预处理

清洁：新钢轨在铺设前，需要对其表面进行清洁处理，去除在生产和运输过程中沾染的油污、灰尘和防锈剂等。一般采用专用的钢轨清洁剂和擦拭设备进行清洁，确保钢轨表面无杂质。

打磨：为了提高钢轨表面的平整度和光洁度，减少轮轨接触时的噪音和磨损，需要对钢轨表面进行打磨。打磨方式有多种，如采用打磨列车进行全线打磨，或者使用小型打磨设备对局部缺陷进行修复打磨。打磨时，根据钢轨的材质和表面状况，选择合适的打磨工艺和参数，控制打磨的深度和精度，使钢轨表面达到规定的粗糙度和轮廓要求。

钢轨表面涂层处理

涂层选择：为了提高钢轨的抗腐蚀性能和减摩性能，通常会在钢轨表面涂覆一层特殊的涂层。例如，采用含有防腐添加剂的润滑油或固体润滑涂层。这些涂层能够在钢轨表面形成一层保护膜，防止水分、氧气和盐分等对钢轨的侵蚀，同时降低轮轨之间的摩擦系数，减少磨损。

涂覆工艺：对于润滑油涂层，一般采用喷涂或刷涂的方式将润滑油均匀地涂抹在钢轨表面。在涂覆过程中，要控制好涂层的厚度和均匀性，避免出现局部过厚或过薄的情况。对于固体润滑涂层，通常采用热喷涂或化学涂覆等方法进行施工。热喷涂是将固体润滑材料加热至熔化或半熔化状态，然后喷射到钢轨表面形成涂层；化学涂覆则是通过化学反应在钢轨表面生成一层固体润滑膜。

道岔表面处理

部件清洗：道岔的各个部件在组装前需要进行彻底的清洗，去除加工过程中残留的油污、铁屑和灰尘等杂质。一般采用有机溶剂清洗或超声波清洗等方法，确保部件表面清洁。

防腐处理：道岔的金属部件通常会采用电镀、热镀或喷涂防腐涂层等方法进行防腐处理。例如，对道岔的尖轨、基本轨等部件进行镀锌或镀铬处理，能够提高其抗腐蚀性能。对于一些复杂形状的部件或难以进行电镀的部位，则可以采用喷涂防腐漆的方式进行保护。防腐涂层的施工工艺与车体和钢轨的涂层施工类似，要保证涂层的均匀性和完整性。

（3）高铁桥梁表面处理

桥梁钢结构表面处理

除锈：高铁桥梁的钢结构部分在涂装前必须进行严格的除锈处理。常用的方法是喷砂除锈，利用高压空气将磨料喷射到钢结构表面，去除铁锈、氧化皮和其他杂质，使钢结构表面达到较高的清洁度和粗糙度。根据桥梁所处的环境和设计要求，确定除锈的等级，一般要求达到Sa2.5 级或更高。

涂装防腐涂层：除锈后的钢结构表面应尽快进行涂装。首先喷涂底漆，一般选用环氧富锌底漆，该底漆具有良好的防锈性能和附着力。底漆干燥后，再喷涂中间漆，如环氧云铁中间漆，以增加涂层的厚度和屏蔽性能。最后喷涂面漆，可选用氟碳面漆等耐候性好的涂料，面漆能够保护钢结构免受外界环境的侵蚀，同时具有良好的装饰性。涂层的施工过程中，要严格控制涂料的调配比例、施工温度和湿度等参数，确保涂层的质量。

桥梁混凝土表面防护

表面清理：混凝土桥梁在施工完成后，要对其表面进行清理，去除模板拆除后残留的水泥浆、油污和灰尘等。对于表面的蜂窝麻面、裂缝等缺陷，要进行修补处理。较小的蜂窝麻面用水泥砂浆填补，裂缝则根据其宽度和深度采用不同的处理方法，如表面封闭、压力灌浆等。

涂装防护涂层：为了提高混凝土桥梁的耐久性和抗渗性，通常会在其表面涂装防护涂层。防护涂层一般选用具有良好防水、抗裂和耐化学腐蚀性能的涂料，如硅烷浸渍涂料、聚氨酯防水涂料等。硅烷浸渍涂料能够渗透到混凝土内部，形成一层憎水保护膜，阻止水分和有害离子的侵入。涂装时，采用喷涂或滚涂的方式将涂料均匀地涂抹在混凝土表面，根据涂料的性能和设计要求确定涂装的遍数和用量。同时，要注意在涂装前混凝土表面应干燥、清洁，以保证涂层与混凝土的良好粘结。

6、大兴国际机场

大兴国际机场在建设中广泛应用了表面工程技术，以满足机场建筑在耐久性、美观性、功能性等方面的要求。其在不同部位的具体应用流程：

（1）航站楼屋面

金属屋面板表面处理

预处理：金属屋面板在安装前，首先要进行表面清洁，去除在生产和运输过程中沾染的油污、灰尘等杂质。通常采用专用的清洁剂进行擦拭或冲洗。对于有锈迹的部位，会使用轻度的打磨或化学除锈方法进行处理，以确保表面干净、无杂质，为后续的涂层附着提供良好基础。

底漆涂装：选用具有良好防腐性能和附着力的环氧底漆。采用喷涂的方式，将底漆均匀地喷涂在金属屋面板表面。喷涂过程中，严格控制喷枪的压力、距离和角度，保证底漆厚度均匀，一般底漆厚度控制在几十微米左右。喷涂完成后，通过自然晾干或低温烘干的方式使底漆固化，增强其与金属表面的结合力。

面漆涂装：根据机场整体设计的色彩和外观要求，选择具有高耐候性、耐紫外线和自清洁性能的氟碳面漆。同样采用喷涂工艺，根据设计要求确定面漆的颜色和光泽度，并进行多道喷涂，以达到规定的厚度和装饰效果。每道面漆之间需要有适当的干燥时间，最后一道面漆喷涂完成后，进行充分的干燥和养护，使面漆形成坚固、耐用的保护膜，不仅能有效防止金属屋面板生锈腐蚀，还能保持长久的美观。

（2）屋面防水涂层施工

基层处理：在铺设防水涂层之前，先对屋面基层进行处理，确保基层表面平整、干净、干燥，无裂缝、松动等缺陷。对于突出屋面的管道、阴阳角等部位，进行加强处理，采用水泥砂浆或专用的防水腻子进行抹弧或抹角处理，以保证防水涂层在这些部位的完整性和密封性。

防水涂层施工：采用高分子防水卷材或防水涂料进行屋面防水处理。如果使用防水卷材，先在基层上涂刷基层处理剂，待其干燥后，将防水卷材按照设计要求进行铺设，采用热熔法或冷粘法将卷材牢固地粘贴在基层上，卷材之间的搭接部位要严格按照规范进行处理，确保搭接宽度和密封效果。若使用防水涂料，一般采用喷涂或滚涂的方式，分多遍进行施工，每遍涂层的厚度要均匀，且要在前一遍涂层干燥后再进行下一遍施工，以形成足够厚度的连续防水涂层。施工完成后，进行闭水试验，检查屋面的防水性能，确保无渗漏现象。

（3）航站楼墙面

混凝土墙面处理

基层处理：对于混凝土墙面，首先要进行表面的清理和修补。去除表面的模板残留物、浮浆、油污等杂质，对于墙面的孔洞、裂缝等缺陷，采用水泥砂浆或专用的修补材料进行填补和修

复，使墙面表面平整、坚实。然后，根据需要对墙面进行拉毛或打磨处理，以增加墙面的粗糙度，提高后续涂层的附着力。

腻子施工：在基层处理完成后，刮涂腻子以进一步平整墙面。一般采用耐水腻子，分多遍进行刮涂，每遍腻子厚度不宜过厚，待前一遍腻子干燥后，进行打磨平整，再进行下一遍腻子施工，直至墙面达到所需的平整度和光滑度要求。

涂料涂装：根据设计的颜色和效果，选择合适的内墙涂料或外墙涂料。对于内墙，通常选用环保型的乳胶漆，具有良好的装饰性和耐擦洗性能；对于外墙，考虑到耐候性和防水性要求，多采用氟碳漆或丙烯酸外墙涂料等。采用喷涂或滚涂的方式进行涂料施工，先涂刷底漆，增强墙面与面漆的附着力，待底漆干燥后，再进行面漆的涂刷，一般涂刷两遍以上，以保证颜色均匀、涂层饱满，达到良好的装饰和保护效果。

（4）玻璃幕墙表面处理

玻璃清洁：玻璃在安装前，使用专用的玻璃清洁剂和擦拭工具，彻底清除玻璃表面的油污、灰尘和指纹等杂质，确保玻璃表面干净透明。对于一些顽固污渍，可能需要使用溶剂型清洁剂进行处理，但要注意避免对玻璃造成损伤。

镀膜处理：为了提高玻璃的隔热、隔音、防紫外线等性能，部分玻璃幕墙会采用镀膜玻璃。镀膜工艺通常有物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）等方法。通过这些工艺，在玻璃表面镀上一层或多层金属、金属氧化物或其他化合物薄膜，这些薄膜能够选择性地透过或反射不同波长的光线，从而实现节能和改善室内环境的效果。镀膜过程需要严格控制工艺参数，如镀膜材料的种类、镀膜厚度、镀膜温度等，以保证镀膜质量和性能的一致性。

密封胶施工：玻璃幕墙安装完成后，在玻璃与框架之间的缝隙处需要打密封胶。首先要对缝隙进行清理，去除杂物和灰尘，然后根据缝隙的宽度和深度选择合适的密封胶。常用的密封胶有硅酮密封胶，具有良好的耐候性和密封性能。打胶时，要保证胶缝均匀、饱满，无气泡和断胶现象，待密封胶固化后，形成可靠的密封结构，防止雨水、空气等渗透到幕墙内部。

（5）地面工程

混凝土基层处理

基层施工：首先进行地面混凝土的浇筑，在浇筑过程中，要控制好混凝土的配合比、坍落度和浇筑厚度，确保混凝土的强度和密实性。使用平板振捣器或振动梁对混凝土进行振捣，使混凝土表面平整、密实。在混凝土初凝前，用抹光机进行抹光处理，提高地面的平整度和光洁度。

基层养护：混凝土浇筑完成后，及时进行养护，一般采用覆盖塑料薄膜或洒水养护的方式，保持混凝土表面湿润，养护时间根据混凝土的强度增长情况确定，一般不少于 7 天。在养护期间，禁止在地面上进行其他作业，以免损坏混凝土基层。

（6）耐磨地面施工

材料选择：根据机场地面的使用要求，选择合适的耐磨材料，如金属骨料耐磨材料或非金属骨料耐磨材料。金属骨料耐磨材料具有较高的硬度和耐磨性，适用于飞机跑道、停机坪等重载区域；非金属骨料耐磨材料则具有较好的抗冲击性和耐腐蚀性，常用于航站楼内部的地面。

施工工艺：在混凝土基层初凝阶段，将耐磨材料均匀地撒在混凝土表面，然后用抹光机进行抹压，使耐磨材料与混凝土基层充分结合。根据需要，可进行多次撒料和抹压，以增加耐磨层的厚度和性能。耐磨地面施工完成后，进行切缝处理，防止地面因温度变化等原因产生裂缝。切缝的间距和深度根据地面面积和混凝土的特性确定，一般缝宽为 5 - 10mm，缝深为地面厚度的 $1/3 - 1/2$ 。切缝完成后，在缝内填充密封胶，以防止杂物和水分进入缝内，影响地面的使用寿命。

（7）环氧地坪施工（适用于航站楼内部部分区域）

基层处理：对混凝土基层进行打磨、清理，去除表面的浮浆、油污和松散颗粒，使基层表面粗糙、干净，以增强环氧地坪与基层的附着力。对于基层的裂缝和孔洞，采用环氧砂浆进行修补平整。

底漆涂装：将环氧树脂底漆按照一定的比例调配好，然后用滚涂或喷涂的方式均匀地涂刷在基层表面。底漆的作用是封闭基层孔隙，增强基层与面漆的粘结力。涂刷过程中，要确保底漆覆盖均匀，无漏刷现象，待底漆完全干燥后，进行下一步施工。

中涂施工：根据设计要求，在底漆干燥后，刮涂环氧中涂漆。中涂漆一般含有石英砂等骨料，以增加地坪的厚度和耐磨性。中涂漆可分多遍刮涂，每遍厚度不宜过厚，待前一遍中涂漆干燥后，进行打磨平整，再进行下一遍中涂漆的施工，直至达到所需的厚度要求。

面漆涂装：最后进行环氧面漆的涂装，采用滚涂或喷涂的方式，将调配好的环氧面漆均匀地涂覆在中涂漆表面。面漆具有良好的耐磨性、耐化学性和装饰性，可根据设计要求选择不同颜色和光泽度的面漆。面漆施工完成后，进行充分的干燥和养护，在养护期间，禁止人员和车辆进入，待环氧地坪完全固化后，方可投入使用。

7、西气东输工程

西气东输工程中应用了多种表面工程技术，以保障管道的耐腐蚀性、耐磨性和长期稳定性，一些常见表面工程技术的具体应用流程：

(1) 管道防腐涂层技术

表面预处理

首先采用机械喷砂或抛丸的方法对管道表面进行处理，去除铁锈、油污、灰尘等杂质，使管道表面达到一定的粗糙度，以增加涂层与管道表面的附着力。例如，将管道表面的油污用有机溶剂清洗后，再用喷砂机以一定的压力和角度喷射钢砂，使管道表面呈现出均匀的粗糙面，粗糙度一般控制在 40-75 微米。

底漆涂装

预处理后的管道表面要尽快进行底漆涂装，以防止再次生锈。底漆通常采用环氧富锌漆等具有良好防锈性能的涂料，通过喷涂或滚涂的方式均匀地涂覆在管道表面，厚度一般在 30 - 50 微米。涂覆过程中要严格控制环境温度和湿度，一般温度在 5-35℃，湿度在 80% 以下，以保证底漆的干燥和固化效果。

中间漆和面漆涂装

底漆干燥固化后，涂覆中间漆，中间漆主要起到增加涂层厚度和提高防腐性能的作用，常用的有环氧云铁中间漆，厚度一般在 80-150 微米。待中间漆干燥后，再涂覆面漆，面漆通常选用耐候性好的聚氨酯漆或氟碳漆等，颜色根据设计要求确定，厚度一般在 30-50 微米。面漆不仅能提供美观的外观，还能进一步增强涂层的防护性能，抵御紫外线、雨水等外界因素的侵蚀。

(2) 管道内涂层技术

表面清洗

采用压缩空气吹扫、化学清洗等方法去除管道内壁的油污、杂物和铁锈等。对于一些油污较重的管道，可能需要先用化学清洗剂进行浸泡或循环清洗，然后再用高压水冲洗，最后用干燥的压缩空气将管道内壁吹干。

内涂层涂覆

目前常用的内涂层材料有环氧树脂、聚乙烯等。涂覆方法主要有离心喷涂、静电喷涂等。以离心喷涂为例，将管道水平放置在旋转装置上，通过高速旋转使涂料在离心力的作用下均匀地涂覆在管道内壁。涂覆过程中要控制好涂料的粘度、喷涂速度和管道的旋转速度，以保证涂层的均匀性和厚度。涂层厚度一般根据管道的使用要求和输送介质的特性来确定，通常在 0.2-0.5 毫米之间。

固化处理

涂覆后的管道需要进行固化处理，以提高涂层的性能。对于环氧树脂涂层，一般采用加热固化的方式，将管道放入固化炉中，在一定的温度和时间条件下进行固化，固化温度通常在 150 - 200℃，固化时间根据涂层厚度和材料特性而定，一般为 1 - 3 小时。固化后的涂层要进行质量检测，包括涂层厚度、附着力、硬度等指标的检测，合格后方可投入使用。

（4）金属热喷涂技术

表面预处理

与防腐涂层技术的表面预处理类似，采用喷砂或抛丸的方法对管道表面进行清理和粗化处理，使表面达到一定的清洁度和粗糙度。不同的是，热喷涂对表面粗糙度的要求更高，一般要达到 75 - 100 微米，以增强金属涂层与基体的结合力。

金属喷涂材料准备

根据工程需求选择合适的金属喷涂材料，如锌、铝及其合金等。这些金属材料具有良好的耐腐蚀性和抗氧化性。将金属材料加工成丝状或粉末状，以便于喷涂设备使用。

热喷涂操作

采用火焰喷涂、电弧喷涂或等离子喷涂等方法进行金属喷涂。以电弧喷涂为例，将两根金属丝作为电极，通过喷枪产生的电弧使金属丝熔化，同时用压缩空气将熔化的金属雾化并喷射到管道表面。喷涂过程中要控制好喷枪与管道表面的距离、喷涂角度和移动速度，以保证涂层的均匀性和厚度。一般喷涂距离在 150 - 300 毫米之间，喷涂角度保持在 70° - 90°，移动速度根据涂层厚度要求进行调整。

涂层后处理

热喷涂后的金属涂层表面可能存在一些孔隙和不平整之处，需要进行后处理。常用的方法是进行封闭处理，采用有机涂料或树脂等对涂层进行涂覆，填充孔隙，提高涂层的防腐性能和耐水性。封闭处理后的金属涂层可以更好地抵御外界环境的侵蚀，延长管道的使用寿命。

（5）阀门及管件表面处理技术

表面清理

对于阀门和管件的表面，首先采用机械加工或打磨的方法去除毛刺、飞边和氧化皮等，然后用化学清洗剂去除油污和杂质。对于一些精密的阀门部件，可能需要采用超声波清洗等精细清洗方法，以确保表面的清洁度。

电镀或化学镀处理

根据阀门和管件的使用要求，选择合适的电镀或化学镀工艺。例如，对于一些需要提高耐腐蚀性和耐磨性的阀门密封面，可以采用镀硬铬工艺。电镀过程中，将阀门部件作为阴极，放入电镀槽中，通过电解作用使铬离子在部件表面沉积形成硬铬涂层，涂层厚度一般在 0.02

- 0.05 毫米之间。化学镀则是通过化学反应在部件表面沉积金属涂层，如化学镀镍磷合金等，这种涂层具有良好的耐腐蚀性和自润滑性，适用于一些对耐蚀性和摩擦性能要求较高的管件。

钝化处理

电镀或化学镀后的阀门和管件，为了进一步提高其耐腐蚀性，通常要进行钝化处理。钝化处理是通过将部件浸泡在钝化液中，使表面形成一层致密的钝化膜。对于不锈钢材质的阀门和管件，常用的钝化液为硝酸和氢氟酸的混合液，钝化时间一般为 10 - 30 分钟。钝化后的部件表面形成的钝化膜可以有效防止金属与外界介质发生化学反应，提高其耐蚀性和抗氧化性。

这些表面工程技术在西气东输工程中的应用，有效提高了管道及相关设备的性能和使用寿命，确保了工程的安全可靠运行。在实际应用中，需要根据具体的工程环境、输送介质和设计要求等因素，选择合适的表面工程技术和工艺参数，并严格按照相关标准和规范进行施工和质量控制。

8、白鹤滩水电站

白鹤滩水电站在建设中的应用了多种表面工程技术，以保障水电站各设施的性能和耐久性。一些常见表面工程技术的具体应用流程：

(1) 大坝混凝土表面防碳化处理

表面清理

首先采用高压水枪冲洗大坝混凝土表面，去除灰尘、浮浆和松散颗粒等杂质。对于一些附着较紧的油污或污渍，使用专用的混凝土清洗剂进行擦拭清理。然后用打磨机对表面进行轻度打磨，使表面平整并增加粗糙度，以提高后续涂层的附着力。

底涂施工

清理后的表面干燥后，涂刷底涂材料。底涂一般采用渗透性好的环氧封闭底漆，通过滚涂或喷涂的方式均匀施加。控制施工环境温度在 5°C - 35°C ，湿度不超过 80%。底漆用量根据混凝土表面的孔隙率而定，一般每平方米用量在 0.1 - 0.2 千克左右，确保底漆充分渗透到混凝土孔隙中，形成牢固的结合层。

面涂施工

底涂干燥固化后（一般需要 24 - 48 h，具体时间根据环境条件和底漆性能而定），进行面涂施工。面涂材料通常选用耐候性好、抗碳化能力强的氟碳漆或聚脲涂层。采用喷涂工艺，按照一定的喷涂压力、喷枪移动速度和喷涂角度进行操作，保证涂层厚度均匀，一般氟

碳漆涂层厚度在 0.2 - 0.3 毫米，聚脲涂层厚度在 1 - 2 毫米。喷涂过程中要注意避免流挂、漏喷等现象。

（2）水轮机叶片表面防护处理

表面预处理

水轮机叶片通常采用不锈钢材质，首先对叶片表面进行机械抛光，去除加工痕迹和毛刺，提高表面光洁度。然后进行酸洗钝化处理，将叶片浸泡在酸洗液（如硝酸和氢氟酸的混合液）中，去除表面的氧化皮和杂质，同时使表面形成一层致密的钝化膜，提高耐腐蚀性。酸洗时间根据叶片材质和表面状况而定，一般在 1 - 3 小时之间。

热喷涂防护涂层

预处理后的叶片表面进行热喷涂防护涂层施工。常用的喷涂材料有镍基合金、陶瓷等。以镍基合金热喷涂为例，采用等离子喷涂工艺，将镍基合金粉末送入等离子喷枪中，在高温等离子焰流的作用下，粉末迅速熔化并喷射到叶片表面。控制喷枪与叶片表面的距离在 100 - 200 毫米之间，喷涂角度保持在 70° - 90° ，以确保涂层均匀性和结合强度。涂层厚度一般在 0.3 - 0.5 毫米之间。

涂层后处理

热喷涂后的叶片涂层表面进行研磨和抛光处理，以提高表面光洁度，减少水流阻力。然后进行涂层质量检测，包括涂层厚度、结合强度、孔隙率等指标的检测，确保涂层性能符合要求。对于检测不合格的部位，及时进行修补或重新喷涂。

（3）闸门表面防腐处理

表面除锈

闸门一般为钢结构，首先采用抛丸除锈的方法，利用抛丸机将弹丸高速抛射到闸门表面，去除铁锈、氧化皮和旧涂层等。抛丸后的表面达到 Sa2.5 级标准，即彻底的喷射或抛射除锈，表面应无可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物，任何残留的痕迹应仅是点状或条纹状的轻微色斑。

底漆涂装

除锈后的闸门表面立即进行底漆涂装，防止再次生锈。底漆通常选用环氧富锌底漆，采用喷涂方式施工。施工环境温度控制在 5°C - 35°C ，湿度不超过 80%。底漆干膜厚度一般在 60 - 80 微米，确保涂层均匀覆盖，无漏喷、流坠等现象。

中间漆和面漆涂装

底漆干燥后（一般需要 24 - 48 小时），涂覆中间漆。中间漆选用环氧云铁中间漆，以增加涂层的厚度和防腐性能，干膜厚度在 100 - 150 微米。中间漆干燥后，进行面漆涂装，

面漆可采用丙烯酸聚氨酯漆或氟碳漆等耐候性涂料，颜色根据设计要求确定，干膜厚度在 30 - 50 微米。通过多层涂层的组合，提高闸门表面的防腐性能和使用寿命。

(4) 压力钢管内表面抗冲磨处理

表面打磨

压力钢管安装完成后，首先对其内壁进行打磨处理，去除焊接飞溅、毛刺和不平整部位，使表面平整度达到一定要求。采用电动打磨机或手工打磨工具进行打磨，对于一些曲率较大的部位，使用小型打磨设备进行精细处理，确保表面光滑，减少水流冲击时的局部磨损。

抗冲磨材料涂抹

打磨后的钢管内表面涂抹抗冲磨材料，如环氧砂浆、聚合物水泥砂浆等。在涂抹前，先将材料按照一定的配合比进行搅拌均匀，然后用抹刀或专用的涂抹设备将材料均匀地涂抹在钢管内壁上。涂抹过程中要控制好材料的厚度，一般在 2 - 5 厘米之间，根据钢管的使用条件和水流速度等因素确定。同时，要注意涂抹的平整度和密实性，避免出现空鼓和裂缝等缺陷。

表面养护和固化

涂抹完成后的抗冲磨材料需要进行养护和固化处理。在养护期间，保持表面湿润，避免阳光直射和风吹，一般养护时间为 7 - 14 天，具体时间根据材料特性和环境温度而定。养护完成后，抗冲磨材料达到一定的强度和硬度，即可投入使用。

这些表面工程技术的应用，有效提高了白鹤滩水电站各设施的性能和耐久性，确保了水电站的安全稳定运行。在实际施工过程中，严格按照相关的技术标准和规范进行操作，并加强质量检测和控制，以保证表面工程的质量和效果。

9、“奋斗者”号载人潜水器

潜水器中暴露于海水中的核心运动部件面临着严重的磨损和腐蚀损伤问题。采用物理气相沉积（PVD）涂层技术为关键运动部件制备非晶碳膜，这种膜层具有高致密、表面光滑的特点，可显著提升部件的硬度、耐腐蚀性、抗氧化和耐磨损等性能，能在深海高压、高腐蚀性的环境中保护部件，确保潜水器的安全和正常运行。“奋斗者”号载人潜水器在多个关键部位应用了表面工程技术，以应对深海的高压、高腐蚀等极端环境。其具体应用流程的详细介绍：

(1) 关键运动部件非晶碳膜制备

部件预处理：在制备非晶碳膜之前，需要对潜水器的关键运动部件进行预处理。首先，对部件表面进行清洗，去除油污、杂质等污染物，通常采用有机溶剂清洗或超声波清洗等方法，以确保表面清洁度。然后，进行打磨和抛光处理，提高表面平整度，为后续的涂层制备提供良好的基础。

镀膜设备准备：采用物理气相沉积（PVD）技术来制备非晶碳膜。PVD 设备主要包括真空腔室、靶材、离子源等部分。在镀膜前，需要对设备进行检查和调试，确保真空系统能够达到所需的真空度，离子源能够稳定工作，靶材安装正确且纯度符合要求。

镀膜过程：将预处理后的部件放入真空腔室中，抽真空至一定程度，以排除腔室内的空气和其他杂质。然后，开启离子源，产生高能离子束，对部件表面进行轰击，进一步清洁表面并提高表面活性。接着，通过蒸发或溅射等方式，使碳靶材中的碳原子以气态形式沉积在部件表面。在沉积过程中，通过控制离子束的能量、流量以及沉积时间等参数，精确调控非晶碳膜的生长速率和结构，使其具有高致密、表面光滑的特性，从而提升部件的硬度、耐腐蚀性、抗氧化和耐磨损等性能。

膜层质量检测：镀膜完成后，对非晶碳膜的质量进行检测。采用扫描电子显微镜（SEM）观察膜层的表面形貌和结构，确保膜层均匀、致密，无明显缺陷。使用纳米压痕仪测量膜层的硬度和弹性模量，以评估其力学性能。同时，通过耐腐蚀试验，如盐雾试验或电化学测试，检测膜层在模拟深海环境下的耐腐蚀性能，确保膜层能够满足“奋斗者”号在深海长期工作的要求。

（2）其他部件的表面防护处理

外壳防腐涂层处理：“奋斗者”号的外壳通常采用高强度合金材料，为了防止海水腐蚀，会在外壳表面喷涂防腐涂层。首先，对外壳表面进行除锈和除油处理，采用喷砂或化学除锈方法去除表面的铁锈和氧化皮，然后用有机溶剂清洗去除油污。接着，喷涂底漆，底漆通常具有良好的附着力和防锈性能，能够为后续的涂层提供坚实的基础。再喷涂面漆，面漆具有耐海水侵蚀、耐磨损和耐候性等特点，能够保护底漆和外壳基体，同时提供美观的外观。

密封部件表面处理：潜水器的密封部件对于保证其密封性至关重要。对密封部件的表面进行特殊处理，如采用化学镀镍或镀硬铬等方法，提高表面硬度和光洁度，减少摩擦系数，确保密封部件在长期使用过程中能够保持良好的密封性能，防止海水渗漏进入潜水器内部。

通过这些表面工程技术的应用，“奋斗者”号载人潜水器的关键部件得到了有效的保护，能够在深海极端环境下可靠运行，为我国深海探测事业提供了有力的技术支撑。

10、中国空间站

中国空间站在多个方面应用了表面工程技术，以满足空间站在太空环境中的特殊需求，包括热控、防辐射、抗腐蚀、密封等。一些常见表面工程技术的具体应用流程：

（1）热控涂层应用

表面预处理

首先对空间站舱体表面进行清洁，使用有机溶剂擦拭去除油污和杂质，再用去离子水冲洗，然后通过烘干或氮气吹干等方式使其干燥。

采用喷砂或化学蚀刻等方法对表面进行粗化处理，以增加涂层与基体的附着力。例如，喷砂处理时，选择合适的砂粒尺寸和喷射压力，使表面形成均匀的粗糙纹理。

热控涂层涂覆

根据空间站不同部位的热控需求，选择合适的热控涂层材料，如具有高发射率和低吸收率的陶瓷涂层或有机热控涂层。

对于陶瓷涂层，常采用等离子喷涂技术。将陶瓷粉末送入等离子喷枪，在高温等离子焰流作用下，粉末熔化并高速喷射到舱体表面，形成均匀的涂层。控制喷涂参数，如喷枪与表面的距离、喷涂角度和速度，以确保涂层厚度均匀，一般涂层厚度在几十微米到几百微米之间。

对于有机热控涂层，多采用喷涂或刷涂的方式。先将涂料搅拌均匀，调整好粘度，然后使用喷枪或刷子均匀地涂覆在预处理后的表面上。通常需要涂覆多层，每层干燥后再进行下一层涂覆，以达到所需的涂层厚度和性能要求。

涂层质量检测

采用非接触式的测厚仪检测涂层厚度，确保其符合设计要求。

通过光谱仪分析涂层的化学成分，检查其是否符合配方标准。

利用热成像仪检测涂层的热发射率和吸收率等热性能参数，确保热控涂层能够有效调节空间站的温度。

（2）防静电涂层应用

表面清洁与处理

先用真空吸尘装置清除空间站表面的灰尘和颗粒杂质，再用异丙醇等有机溶剂擦拭，去除油污和其他污染物。

对表面进行化学活化处理，如使用稀酸溶液浸泡或化学气相沉积等方法，在表面引入活性基团，提高涂层的附着力。

防静电涂层施工

选择具有良好导电性和稳定性的防静电涂层材料，如添加了导电填料的聚氨酯或环氧树脂涂层。

采用喷涂工艺进行施工，精确控制喷涂压力、温度和湿度等环境条件。一般在相对湿度低于 60%、温度在 20℃ - 30℃ 的洁净环境中进行喷涂。将涂料均匀地喷涂在表面上，形成薄而均匀的涂层，涂层厚度通常在几微米到几十微米之间。

性能测试与验证

使用表面电阻测试仪测量涂层的表面电阻，确保其在规定的防静电范围内，一般要求表面电阻在 $10^6 - 10^9$ 欧姆之间。

通过模拟太空环境下的静电放电试验，验证涂层的防静电效果，确保空间站在运行过程中不会因静电积累而引发故障或安全问题。

(3) 防辐射涂层应用

基底处理

对空间站暴露于太空环境的结构件和设备表面进行彻底清洁，去除加工残留的油脂、金属屑等杂质。可采用超声波清洗或蒸汽脱脂等方法进行深度清洁。

对清洁后的表面进行钝化处理，如采用化学钝化液浸泡，在表面形成一层薄而致密的钝化膜，提高基底的耐腐蚀性和与涂层的结合力。

防辐射涂层制备与涂覆

选用含有重金属元素（如铅、钨等）或具有特殊晶体结构的防辐射涂层材料。这些材料可以通过物理气相沉积（PVD）或化学气相沉积（CVD）等方法制备成涂层。

以物理气相沉积为例，在真空环境下，将靶材（含有防辐射元素的金属或化合物）通过离子束轰击等方式使其蒸发并沉积在空间站表面。控制沉积参数，如沉积温度、真空度和离子束能量等，以精确控制涂层的成分和结构。涂层厚度根据不同部位的辐射防护要求而定，一般在几百纳米到数微米之间。

防护效果评估

利用辐射探测器在模拟太空辐射环境下对涂覆防辐射涂层的样品进行测试，测量涂层对不同能量射线的衰减效果。

通过分析涂层在长期辐射环境下的结构和性能变化，评估其防辐射的长期有效性。例如，采用 X 射线衍射仪和电子显微镜等设备定期检测涂层的晶体结构和微观形貌，确保涂层在太空辐射环境中不会发生明显的退化或失效。

(4) 密封涂层与密封胶应用

密封部位预处理

对空间站舱体的对接面、舱门接口等需要密封的部位进行表面处理。首先使用机械加工或打磨的方法去除表面的毛刺和不平整部分，使表面粗糙度达到规定要求。

然后用化学清洗剂去除表面的油污和氧化物，再用干燥的氮气或空气吹干表面，确保密封部位清洁、干燥。

密封涂层与密封胶施工

根据密封要求选择合适的密封涂层材料或密封胶，如硅橡胶密封胶、聚硫密封胶等。

对于密封涂层，采用喷涂或刷涂的方式将其均匀地涂覆在密封部位的表面，形成一层薄而连续的涂层。涂层厚度一般在 0.1 – 0.5 毫米之间。

对于密封胶，将其挤注在需要密封的缝隙或接口处，使用专用工具将密封胶均匀地填充在缝隙中，确保密封胶与表面充分接触并形成良好的密封效果。密封胶的填充量根据缝隙的大小和形状进行控制，一般要保证密封胶在固化后能够完全填充缝隙并形成一定的密封压力。

密封性能检测

采用氦质谱检漏仪等设备对密封部位进行泄漏检测。将检测气体充入密封空间，通过检测仪器检测周围环境中是否有泄漏的气体，以确定密封性能是否符合要求。

在空间站组装完成后，进行整体的密封性能测试，通过模拟太空环境下的压力变化，检验密封涂层和密封胶的长期密封效果，确保空间站在太空运行过程中不会出现气体泄漏等问题。

11、西气东输工程：

西气东输工程中，表面工程技术主要应用于管道的防腐、减阻等方面，以确保管道在长期运行过程中具有良好的性能和可靠性。其具体应用流程：

（1）管道表面预处理

除油：管道在加工和运输过程中表面会沾染油污，首先采用有机溶剂清洗或碱液清洗的方法去除油污。例如，使用三氯乙烯等有机溶剂对管道表面进行擦拭或浸泡清洗，将油污溶解并去除；也可采用氢氧化钠等碱液进行喷淋或浸泡，通过皂化反应将油污转化为可溶于水的物质，再用清水冲洗干净。

除锈：采用喷射除锈的方法，利用高压空气将磨料（如石英砂、钢丸等）喷射到管道表面，通过磨料与管道表面的碰撞和摩擦，去除铁锈、氧化皮等杂质。根据管道表面的锈蚀程度，选择合适的磨料和喷射压力。对于轻度锈蚀的管道，可使用较小粒径的石英砂和较低

的喷射压力；对于锈蚀严重的管道，则使用钢丸和较高的喷射压力。喷射除锈后，管道表面应达到相应的除锈等级标准，如 Sa2.5 级，即非常彻底地喷射除锈，表面应无可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物，任何残留的痕迹应仅是点状或条纹状的轻微色斑。

粗化处理：为了增加后续涂层与管道表面的附着力，在除锈后对管道表面进行粗化处理。可以通过调整喷射除锈的工艺参数，如适当增加磨料的粒径或喷射时间，使管道表面形成均匀的粗糙纹理，粗糙度一般控制在 40 - 80 微米之间。

（2）防腐涂层涂覆

- **底漆涂覆：**根据管道的使用环境和防腐要求，选择合适的底漆，如环氧富锌底漆。采用喷涂的方式进行涂覆，将底漆倒入喷枪的涂料罐中，调整喷枪的喷嘴大小、喷涂压力和喷涂距离等参数。一般喷嘴直径为 1.5 - 2.0 毫米，喷涂压力为 0.3 - 0.5 兆帕，喷涂距离为 150 - 250 毫米。在涂覆过程中，保持喷枪与管道表面垂直，并匀速移动喷枪，使底漆均匀地覆盖在管道表面，形成一层厚度均匀的底漆涂层，底漆厚度通常为 50 - 80 微米。
- **中间漆涂覆：**底漆干燥后，涂覆中间漆，如环氧云铁中间漆。同样采用喷涂的方式，按照与底漆涂覆相似的工艺参数进行操作。中间漆的作用是增加涂层的厚度和防腐性能，同时提高底漆与面漆之间的附着力。中间漆的厚度一般为 80 - 120 微米。
- **面漆涂覆：**最后涂覆面漆，可选择耐候性好的聚氨酯面漆或氟碳面漆等。根据设计要求确定面漆的颜色和光泽度，通过调整涂料的配方和喷涂工艺来实现。面漆的涂覆工艺与底漆、中间漆类似，但在喷涂次数和厚度上可能有所不同。一般需要涂覆 2 - 3 次面漆，每次涂覆后等待其干燥至规定的时间，最终使面漆涂层的总厚度达到 80 - 150 微米。

涂层质量检测

- **外观检查：**采用目视检查的方法，观察涂层表面是否平整、光滑，有无流挂、漏涂、起泡、针孔等缺陷。对于发现的表面缺陷，及时进行修补或返工处理。
- **厚度检测：**使用磁性测厚仪或超声波测厚仪等仪器对涂层厚度进行测量。在管道表面均匀选取多个测量点，确保测量点覆盖管道的不同部位，包括直管段、弯头、三通等。每个测量点测量 3 - 5 次，取平均值作为该点的涂层厚度。如果发现涂层厚度不符合设计要求，应分析原因并采取相应的措施进行调整，如增加涂覆次数或调整涂覆工艺参数。
- **附着力检测：**采用划格法或拉开法检测涂层与管道表面的附着力。划格法是用划格器在涂层表面划出一定规格的方格，然后用胶带粘贴在方格上，迅速撕下胶带，观察方格内涂层的脱落情况，根据相关标准判断附着力是否合格。拉开法是使用专门的附着力测试仪，将测试头粘贴在涂层表面，通过拉伸测试头来测量涂层与基体之间的附着力，要求附着力应达到规定的数值，如大于 5 兆帕。

- **防腐性能检测：**通过盐雾试验、湿热试验等模拟腐蚀环境的试验方法，对涂层的防腐性能进行检测。将涂覆好涂层的管道样品放入盐雾试验箱或湿热试验箱中，按照规定的试验条件（如盐雾浓度、试验温度、试验时间等）进行试验。试验结束后，观察涂层表面的腐蚀情况，如有无生锈、起泡、剥落等现象，评估涂层的防腐性能是否满足西气东输工程的要求。

（3）管道补口与补伤

- **补口处理：**在管道的焊接接头部位，由于焊接过程中会破坏原有的防腐涂层，需要进行补口处理。首先对补口部位进行表面预处理，采用喷砂或电动工具除锈的方法，将补口处的铁锈、油污等杂质清除干净，使表面达到规定的除锈等级。然后，根据补口材料的要求，进行底漆涂覆和补口材料的安装。常见的补口材料有热收缩带、环氧粉末等。以热收缩带为例，将热收缩带套在补口部位，使用喷枪对其进行均匀加热，使其收缩并紧密贴合在管道表面，热收缩带的搭接宽度应符合设计要求，一般为 100 - 150 毫米。
- **补伤处理：**对于管道在运输、安装过程中造成的涂层损伤，需要及时补伤。先对损伤部位进行清理，去除油污和杂质，然后根据损伤的程度和范围，选择合适的补伤方法。对于较小的损伤，可以采用手工刷涂或喷涂的方式，将与原涂层相同的涂料涂覆在损伤部位，进行修复。对于较大面积的损伤，则需要按照涂层涂覆的工艺要求，重新进行表面预处理和多层涂层的涂覆，以确保补伤后的涂层性能与原涂层一致。

（4）减阻涂层应用（可选）

- **表面处理：**与防腐涂层的表面预处理类似，先对管道内表面进行除油、除锈和粗化处理，以提高减阻涂层与管道表面的结合力。但在粗化处理时，粗糙度的要求可能略有不同，一般减阻涂层要求的粗糙度相对较小，通常控制在 20 - 40 微米之间，以减少流体在管道内流动时的阻力。
- **减阻涂层涂覆：**选择具有低摩擦系数的减阻涂层材料，如聚四氟乙烯（PTFE）涂层或含氟聚合物涂层等。采用喷涂或浸渍的方法进行涂覆。喷涂时，调整好喷枪的参数，使涂层均匀地覆盖在管道内表面。浸渍涂覆则是将管道浸泡在涂料槽中，使管道内表面充分接触涂料，然后取出管道，沥干多余的涂料，并在规定的温度和时间下进行固化处理。涂层厚度一般在 50 - 100 微米之间。
- **减阻性能测试：**在实验室条件下，通过模拟管道内流体的流动情况，对涂覆减阻涂层的管道进行减阻性能测试。测量不同流速下管道内的压力降，并与未涂覆减阻涂层的管道进行对比，计算出减阻率。一般要求减阻涂层的减阻率应达到 10% - 20% 以上，以满足西气东输工程中降低输送能耗的要求。在实际工程应用中，也可通过长期监测管道的运行参数，如流量、压力等，来评估减阻涂层的实际效果。

12、青藏铁路

青藏铁路所处环境特殊，面临高寒、缺氧、强紫外线等诸多挑战，表面工程技术在铁路的建设和维护中起着关键作用，其具体应用流程：

（1）钢轨表面处理

除锈：青藏铁路钢轨在加工、运输和储存过程中，表面会产生铁锈和氧化皮。施工时，通常采用抛丸除锈工艺，利用抛丸机将弹丸高速抛射到钢轨表面，通过弹丸与钢轨表面的撞击和摩擦，去除铁锈、氧化皮等杂质，使钢轨表面达到所需的清洁度和粗糙度，一般要求达到 Sa2.5 级，即非常彻底的喷射或抛射除锈，表面应无可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物，任何残留的痕迹应仅是点状或条纹状的轻微色斑。

润滑涂层涂覆：为了降低钢轨与列车车轮之间的摩擦系数，减少磨损和噪声，会在钢轨表面涂覆一层润滑涂层。首先，将专用的钢轨润滑涂料搅拌均匀，然后采用喷涂的方式进行涂覆。喷涂时，调整好喷枪的压力、流量和喷涂角度，使涂料均匀地覆盖在钢轨表面，形成一层薄而均匀的润滑涂层，涂层厚度一般控制在 30 - 50 微米。

（2）桥梁钢结构表面防护

- **表面预处理：**桥梁钢结构在涂装前，需要进行严格的表面预处理。先采用机械方法，如使用砂轮机、钢丝刷等工具，去除钢结构表面的焊渣、毛刺、油污等杂质。然后进行喷射除锈，使用高压空气将磨料（如石英砂、钢丸等）喷射到钢结构表面，去除铁锈和氧化皮，使表面达到 Sa3 级，即钢材表面无可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物，该表面应显示均匀的金属色泽。
- **防腐涂层体系构建：**通常采用多道涂层体系来保护桥梁钢结构。一般先涂覆环氧富锌底漆，以提供良好的防锈性能和附着力。采用喷涂方式，将底漆均匀地喷涂在钢结构表面，厚度一般为 80 - 100 微米。底漆干燥后，涂覆环氧云铁中间漆，增加涂层的厚度和防腐性能，中间漆厚度一般为 100 - 150 微米。最后涂覆氟碳面漆，氟碳面漆具有良好的耐候性和装饰性，可有效抵御青藏铁路沿线的强紫外线辐射和恶劣气候条件，面漆厚度一般为 80 - 100 微米。

（3）混凝土结构表面防护

- **表面清理：**在混凝土结构表面进行防护处理前，首先要清理表面的浮浆、灰尘、油污等杂质。对于新浇筑的混凝土，在拆模后及时用高压水枪冲洗表面，去除残留的模板油和松散的水泥浆。对于已使用一段时间的混凝土结构，可采用砂纸打磨、钢丝刷清理等方法，去除表面的污垢和疏松层。

- **防水涂层涂覆：**青藏铁路混凝土结构长期暴露在自然环境中，需要具备良好的防水性能。一般采用聚氨酯防水涂料或丙烯酸防水涂料等。施工时，先将涂料搅拌均匀，然后采用刷涂或喷涂的方式进行涂覆。通常需要涂覆 2 - 3 遍，每遍之间要等待上一遍涂料干燥成膜后再进行，总涂层厚度一般不小于 2 毫米。在涂覆过程中，要注意阴阳角、施工缝等部位的处理，应增加涂层厚度或采用附加增强材料，如无纺布等，以提高这些部位的防水性能。
- **防腐蚀涂层涂覆：**为了防止混凝土结构受到盐类侵蚀、冻融循环等破坏，在防水涂层干燥后，还会涂覆一层防腐蚀涂层。常用的防腐蚀涂料有环氧树脂涂料、氟碳涂料等。采用喷涂或滚涂的方式进行涂覆，涂层厚度一般为 100 - 150 微米。

（4）隧道衬砌表面处理

- **表面平整处理：**隧道衬砌施工完成后，其表面可能存在一些凹凸不平的地方，需要进行平整处理。对于较小的凸起，可采用砂纸打磨或手持电动工具进行打磨平整；对于较大的凹陷或孔洞，使用水泥砂浆进行填补并抹平整，确保衬砌表面的平整度符合要求，以利于后续的表面防护处理。
- **防火涂层涂覆：**青藏铁路隧道需要具备一定的防火性能，因此会在隧道衬砌表面涂覆防火涂层。首先，将防火涂料按照规定的比例加水搅拌均匀，然后采用喷涂的方式进行涂覆。一般需要分多次喷涂，每次喷涂厚度不宜过厚，以防止涂料流淌或干燥不均匀，每次喷涂间隔时间根据涂料的干燥时间确定。最终使防火涂层达到设计要求的厚度，一般为 3 - 5 毫米，以满足隧道的防火等级要求。
- **防潮防霉涂层涂覆：**由于隧道内湿度较大，容易出现潮湿发霉的情况，影响隧道的使用寿命和美观度。在防火涂层干燥后，涂覆一层防潮防霉涂层。选用具有防潮防霉功能的涂料，如有机硅防潮涂料等，采用刷涂或喷涂的方式进行施工，使涂层均匀地覆盖在隧道衬砌表面，形成一道防潮防霉的保护膜，涂层厚度一般为 50 - 80 微米。

（5）设备与设施表面处理

- **车辆设备表面涂装：**青藏铁路的车辆设备，如机车、车厢等，其表面需要进行涂装以保护金属结构和提供美观的外观。首先对车辆设备表面进行除油、除锈处理，可采用化学除油剂去除油污，抛丸或喷砂除锈去除铁锈和氧化皮。然后涂覆底漆、中间漆和面漆，底漆一般采用环氧底漆，提供良好的附着力和防锈性能；中间漆采用丙烯酸聚氨酯中间漆，增加涂层的丰满度和防腐性能；面漆根据车辆的颜色要求选择相应的丙烯酸聚氨酯面漆或氟碳面漆，涂层总厚度一般在 150 - 200 微米。
- **信号设备表面防护：**信号设备长期暴露在户外，需要具备良好的防护性能。对信号设备的金属外壳进行表面处理，先进行脱脂处理，去除表面的油污，然后采用电镀或化学镀的

方法在表面镀上一层锌或镍等金属镀层，提高设备的耐腐蚀性。对于设备的塑料外壳，可采用涂覆防紫外线涂料的方式进行防护，防止塑料外壳在强紫外线照射下老化、脆化。涂料采用喷涂方式，涂层厚度一般为 30 - 50 微米。

在青藏铁路中，表面工程技术的应用贯穿于铁路建设和运营的各个环节，通过对不同结构和设备进行相应的表面处理，有效提高了铁路设施的耐久性、安全性和可靠性，确保青藏铁路在恶劣的自然环境下能够长期稳定运行。

13、歼 -20 隐身战机

歼 -20 隐身战机运用了多种先进的表面工程技术来实现其卓越的隐身性能、气动性能和机体防护等功能，一些主要表面工程技术的具体应用流程介绍：

（1）隐身涂层应用

表面预处理：在涂覆隐身涂层之前，战机的机体表面需要进行严格的预处理。首先，使用化学溶剂或蒸汽清洗等方法去除表面的油污、油脂和其他污染物，确保表面清洁。然后，采用喷砂或抛丸等工艺对机体表面进行粗化处理，增加表面粗糙度，以提高涂层的附着力。

底漆涂覆：预处理完成后，先涂覆一层底漆。底漆通常具有良好的防腐性能和与机体表面的结合能力，能够为后续的隐身涂层提供稳定的基础。底漆一般采用静电喷涂或高压无气喷涂的方式进行涂覆，确保涂层均匀、致密，厚度根据设计要求通常在几十微米左右。涂覆后，需要在特定的温度和湿度条件下进行干燥固化，以保证底漆的性能。

隐身涂层涂覆：底漆干燥固化后，开始涂覆隐身涂层。隐身涂层通常由多种具有特殊电磁特性的材料组成，能够吸收和散射雷达波。涂覆过程中，需要精确控制涂层的厚度和均匀性，以达到最佳的隐身效果。一般采用多层涂覆的方式，每层涂层的厚度在几微米到十几微米之间，通过多次涂覆和干燥固化，使隐身涂层的总厚度达到设计要求。涂覆方法同样包括静电喷涂、高压无气喷涂等，同时结合先进的自动化喷涂设备和精确的喷涂参数控制，确保涂层质量。

面漆涂覆：隐身涂层完成后，再涂覆一层面漆。面漆主要用于保护隐身涂层，提高其耐候性、耐磨性和抗腐蚀性，同时也起到美化外观的作用。面漆的涂覆工艺与底漆类似，采用喷涂方式，厚度通常在几十微米左右。涂覆完成后，进行最后的干燥固化处理，使整个涂层系统达到稳定的性能状态。

（2）蒙皮处理

- **蒙皮材料选择与加工:** 歼 -20 的蒙皮采用了先进的复合材料或特种金属材料, 这些材料具有高强度、轻量化和良好的隐身性能。在加工过程中, 首先对原材料进行切割、成型等工艺处理, 使其符合机体各部位的形状和尺寸要求。然后, 对蒙皮表面进行精细加工, 确保表面平整度和光洁度达到高精度标准, 以减少空气阻力和雷达反射。
- **蒙皮表面改性:** 为了进一步提高蒙皮的性能, 会对其表面进行改性处理。例如, 采用化学气相沉积 (CVD) 或物理气相沉积 (PVD) 等技术, 在蒙皮表面沉积一层具有特殊性能的薄膜, 如抗氧化膜、耐磨膜等, 提高蒙皮的耐腐蚀性和耐磨性。同时, 通过表面改性技术还可以调整蒙皮表面的电磁特性, 使其与隐身涂层更好地配合, 增强整体隐身效果。
- **蒙皮拼接与安装:** 经过处理的蒙皮部件在机体上进行拼接和安装。在拼接过程中, 采用先进的连接技术, 如激光焊接、胶接等, 确保蒙皮之间的连接牢固、紧密, 减少缝隙和台阶, 以降低雷达散射截面积。安装完成后, 对蒙皮与机体结构的结合部位进行密封处理, 防止雨水、湿气等进入机体内部, 影响结构性能和隐身性能。

(3) 进气道表面处理

- **进气道内表面隐身处理:** 歼 -20 的进气道采用了特殊的设计和表面处理技术来实现隐身。进气道内表面通常涂覆有吸波材料, 这些吸波材料能够有效吸收和衰减进入进气道的雷达波。在涂覆过程中, 需要根据进气道的形状和气流特点, 采用精确的喷涂工艺, 确保吸波材料均匀地覆盖在进气道内表面, 并且在高温、高速气流的作用下仍能保持良好的性能。同时, 进气道内表面还会进行表面结构化处理, 通过设计特殊的纹理或凹槽, 改变雷达波的反射方向, 进一步降低雷达反射信号。
- **进气道外表面防护与隐身优化:** 进气道外表面既要满足与机体整体隐身效果的一致性, 又要具备良好的防护性能。外表面首先进行与机体相同的表面预处理和底漆涂覆, 然后涂覆隐身涂层。为了提高进气道外表面在恶劣环境下的抗侵蚀能力, 还会在隐身涂层外再涂覆一层具有抗冲刷、抗腐蚀性能的防护涂层。此外, 进气道外表面的设计也会考虑气动外形优化, 通过采用平滑的曲面和过渡设计, 减少气流分离和雷达波的反射, 使进气道外表面在实现隐身的同时, 不影响战机的气动性能。

(4) 座舱盖处理

- **座舱盖材料选择与加工:** 歼 -20 的座舱盖采用了高强度、透明的复合材料或特种玻璃材料。在加工过程中, 首先对原材料进行成型处理, 通过热压、注塑等工艺将材料制成符合座舱形状的曲面结构。然后, 对座舱盖表面进行高精度的光学加工, 确保其具有良好的透明度和光学性能, 以便飞行员获得清晰的视野。

- **隐身镀膜处理：**为了实现座舱盖的隐身性能，会在其表面镀上一层特殊的金属氧化物或导电聚合物薄膜。镀膜工艺通常采用物理气相沉积（PVD）或化学镀等方法，通过精确控制镀膜的厚度和成分，使薄膜具有良好的电磁屏蔽性能，能够反射或吸收雷达波，同时又能保持较高的透明度。镀膜过程需要在高度洁净的环境中进行，以避免杂质对镀膜性能的影响。
- **座舱盖密封与安装：**镀膜完成后，对座舱盖进行密封处理，防止外界的水汽、灰尘等进入座舱内部。密封采用特殊的橡胶密封圈或密封胶，确保密封效果可靠。在安装座舱盖时，采用高精度的安装工艺，保证座舱盖与机体结构之间的连接紧密、平整，减少缝隙和台阶，避免对隐身性能产生不利影响。同时，还会在座舱盖与机体的结合部位采取电磁屏蔽措施，如安装导电橡胶条等，进一步提高隐身性能。

通过这些表面工程技术的应用，歼-20 隐身战机在隐身性能、气动性能、机体防护等方面都达到了世界先进水平，使其能够在现代空战中具备强大的作战能力和生存能力。需要注意的是，歼-20 的相关技术属于国家机密，以上内容是基于公开资料和一般航空技术原理进行的介绍，实际情况可能更为复杂和先进。

14、神舟系列飞船

神舟系列飞船在保障其安全可靠运行及适应太空复杂环境方面，广泛应用了多种表面工程技术，一些主要表面工程技术的具体应用流程：

（1）热控涂层技术应用

表面预处理：在飞船的舱体及各类设备表面涂装热控涂层前，需先进行清洗，使用有机溶剂或专用清洗剂去除表面油污、灰尘等杂质，确保表面洁净。然后进行脱脂处理，以增强涂层与基体的结合力。对于一些金属表面，还可能采用化学氧化或阳极氧化等方法形成一层转化膜，为后续涂层提供更好的附着基础。

热控涂层涂覆：根据飞船不同部位的热控需求，选择合适的热控涂层材料，如有机热控涂层、金属热控涂层等。采用喷涂、刷涂或浸渍等方法将热控涂层均匀地涂覆在飞船表面。在涂覆过程中，严格控制涂层的厚度、均匀性以及固化条件。例如，对于一些需要精确控制热辐射特性的部位，会通过精密喷涂设备确保涂层厚度误差控制在极小范围内，并按照规定的温度、时间等条件进行固化，使涂层达到理想的热控性能。

（2）防静电涂层技术应用

- **表面清洁与处理：**同热控涂层技术的预处理类似，先对飞船表面进行彻底的清洁，去除可能影响涂层附着力的污染物。然后，针对不同的基体材料，采用相应的表面活化处理方

法，如对塑料等绝缘材料进行电晕处理或化学改性，提高其表面极性，以便更好地吸附防静电涂层材料。

- **防静电涂层施工：**选用具有良好防静电性能的涂层材料，如添加了导电填料的有机涂层。通过喷涂或刷涂等方式将防静电涂层涂覆在飞船内部易产生静电的部位，如电子设备舱、航天员活动区域等。施工过程中，要控制涂层的导电性能均匀性，确保整个涂覆表面的静电泄漏电阻符合设计要求。同时，注意涂层的干燥和固化条件，避免因环境因素影响涂层的防静电性能。

（3）防腐蚀涂层技术应用

- **表面除油除锈：**飞船的金属结构部件在涂覆防腐蚀涂层前，首先要进行严格的除油除锈处理。采用化学清洗、喷砂等方法去除表面的油污、铁锈和氧化皮。喷砂处理不仅能有效去除杂质，还能使表面形成一定的粗糙度，增加涂层的附着力。对于一些复杂形状的部件，可能还需要结合手工打磨等方式进行精细处理。

- **防腐蚀涂层涂覆：**根据飞船所处的太空环境及不同部位的腐蚀风险，选择合适的防腐蚀涂层体系，如环氧涂层、聚氨酯涂层等。采用多层涂覆的方式，先涂覆底漆，底漆能够与基体金属紧密结合，提供良好的附着力和防锈功能。然后涂覆中间漆，增加涂层的厚度和屏蔽性能。最后涂覆面漆，面漆具有良好的耐候性和耐腐蚀性，能够抵御太空环境中的紫外线、粒子辐射等因素的侵蚀。在涂覆过程中，严格控制每层涂层的厚度和涂覆间隔时间，确保涂层之间的结合良好，形成一个完整的防腐蚀屏障。

（4）特种防护薄膜应用

- **表面准备：**在粘贴特种防护薄膜前，需对飞船表面进行清洁和平整处理，去除表面的灰尘、油污和凸起物等，确保表面光滑平整，以保证薄膜能够与表面紧密贴合，避免出现气泡或褶皱。对于一些不规则形状的表面，可能需要进行适当的修整和打磨。

- **薄膜粘贴与固定：**选择具有耐高低温、抗辐射、抗微流星体撞击等性能的特种防护薄膜，如聚酰亚胺薄膜等。根据飞船不同部位的形状和尺寸，将薄膜裁剪成合适的大小，然后采用专用的粘贴工艺将薄膜粘贴在表面上。在粘贴过程中，要从一端开始逐渐向另一端推进，同时使用滚轮等工具排除薄膜与表面之间的空气，确保薄膜与表面紧密结合。对于一些关键部位，如飞船的舷窗周围、太阳能电池板连接部位等，还会采用额外的固定措施，如使用密封胶或机械夹具等，进一步增强薄膜的固定效果，防止薄膜在太空环境中出现脱落或移位。

这些表面工程技术在神舟系列飞船中的应用，对于保障飞船在太空环境下的性能和寿命发挥着至关重要的作用，它们经过了严格的设计、试验和验证流程，以确保能够满足飞船任务的高可靠性要求。

二、表面工程技术在航空航天中的应用

案例一：飞机发动机叶片热障涂层

航空发动机在工作时，叶片面临着极高的温度。为了提高叶片的耐高温性能，热障涂层技术被广泛应用。以某型号航空发动机为例，其高压涡轮叶片采用了陶瓷热障涂层。这种涂层通过等离子喷涂技术制备，厚度通常在 0.5 - 1 毫米之间。它具有低导热系数、高隔热性能的特点，能够有效阻挡高温燃气向叶片基体的热量传递，可使叶片基体温度降低 100 - 200℃。这不仅提高了发动机的热效率，还增强了叶片的抗热疲劳和抗氧化能力，延长了叶片的使用寿命，减少了发动机的维护成本和停机时间。

案例二：飞机蒙皮表面防腐涂层

- 飞机蒙皮长期暴露在外界环境中，容易受到大气腐蚀、雨水侵蚀以及紫外线辐射等影响。某型客机的蒙皮采用了高性能的防腐涂层体系。首先，在蒙皮表面进行化学镀镍预处理，提高表面的平整度和耐蚀性。然后，涂覆多层有机涂层，包括底漆、中间漆和面漆。底漆具有良好的附着力和防腐性能，能够与蒙皮表面紧密结合；中间漆起到增加涂层厚度和提高防腐性能的作用；面漆则具有优异的耐候性和抗紫外线性能，能够保护下层涂层不受外界环境的破坏。这种防腐涂层体系能够有效防止蒙皮腐蚀，保证飞机结构的完整性和安全性，同时还能降低飞机的气动阻力，提高燃油效率。

案例三：航空发动机燃烧室高温合金表面渗铝

- 航空发动机燃烧室在工作时承受着高温、高压和燃气冲刷等恶劣条件。为了提高燃烧室高温合金材料的抗氧化和抗热腐蚀性能，渗铝技术被应用。以某型发动机燃烧室为例，通过化学气相沉积渗铝工艺，在高温合金表面形成一层均匀的渗铝层。渗铝层中的铝元素在高温下与氧气反应，形成致密的氧化铝保护膜，能够有效阻止燃气中的氧、硫等有害元素与基体金属发生反应。渗铝后的燃烧室高温合金材料在高温环境下的抗氧化和抗热腐蚀性能大幅提高，使用寿命可延长数倍，从而保证了发动机燃烧室的可靠性和稳定性。

案例四：飞机起落架表面镀铬

- 飞机起落架在起降过程中承受着巨大的冲击力和摩擦力，同时还需要具备良好的耐腐蚀性。某型飞机起落架的活塞杆和轮轴等部件采用了镀铬工艺。镀铬层具有硬度高、耐磨性好、耐腐蚀性强等优点。通过电镀工艺在部件表面镀上一层厚度适中的硬铬层，能够显著提高起落架部件的表面硬度和光洁度，降低摩擦系数，减少磨损和腐蚀。镀铬后的起落架部件能够承受频繁的起降冲击，保证了起落架的可靠性和安全性，延长了其使用寿命，降低了维护成本。

案例五：航空航天紧固件表面化学镀

- 航空航天紧固件在飞机结构中起着连接和紧固的重要作用，需要具备高强度、良好的耐腐蚀性和抗疲劳性能。某型飞机的紧固件采用了化学镀镍 - 磷合金工艺。化学镀镍 - 磷合金层具有均匀、致密、无孔隙等优点，能够在紧固件表面形成一层良好的保护膜。这种涂层不仅可以提高紧固件的耐腐蚀性，防止在潮湿和腐蚀性环境中生锈，还能提高其表面硬度和耐磨性，增强抗疲劳性能。经过化学镀处理的紧固件能够在长期使用中保持良好的连接性能，确保飞机结构的安全性和可靠性。

案例六：卫星天线反射面表面镀金

- 卫星天线反射面需要具备高的电导率和反射率，以保证卫星通信和遥感等功能的正常实现。某颗通信卫星的天线反射面采用了表面镀金技术。通过物理气相沉积或电镀等方法在天线反射面的金属基体上镀上一层金膜。金具有极高的电导率和反射率，能够有效地反射电磁波，减少信号衰减。同时，金膜还具有良好的化学稳定性和耐腐蚀性，能够在太空环境中长时间保持性能稳定。镀金后的卫星天线反射面能够提高卫星的通信质量和遥感精度，保证卫星在轨道上的正常工作。

案例七：航空发动机涡轮盘表面离子注入强化

- 航空发动机涡轮盘在工作时承受着高温、高转速和复杂的应力作用，对其材料的性能要求极高。为了提高涡轮盘的抗疲劳和耐磨性能，离子注入技术被应用。以某型发动机涡轮盘为例，将氮、碳等元素离子注入到涡轮盘表面。离子注入过程中，高能离子轰击涡轮盘表

面，使表面晶格发生畸变，形成一层具有高硬度、高残余压应力的改性层。这种改性层能够阻碍位错运动，提高材料的强度和硬度，抑制疲劳裂纹的萌生和扩展，从而显著提高涡轮盘的抗疲劳性能和耐磨性，保证了涡轮盘在发动机中的可靠运行。

案例八：飞机雷达罩表面涂覆透波材料

- 飞机雷达罩是保护雷达系统的重要部件，需要具备良好的透波性能和机械性能。某型战斗机的雷达罩采用了多层透波涂层技术。在雷达罩基体表面首先涂覆一层底漆，以提高涂层与基体的附着力。然后，涂覆多层由特殊陶瓷材料和树脂组成的透波涂层，这些涂层经过精心设计和配方优化，具有低介电常数、低损耗角正切等特性，能够最大限度地减少对雷达波的反射和吸收，保证雷达波的高效透过。同时，透波涂层还具有良好的耐候性、耐磨性和抗冲击性能，能够保护雷达罩在飞行过程中不受外界环境的破坏，确保雷达系统的正常工作。

案例九：航天飞行器热防护系统表面涂层

- 航天飞行器在再入大气层时会面临极高的温度，需要可靠的热防护系统来保证飞行器的结构和内部设备的安全。以某型航天飞机为例，其热防护系统采用了多种表面涂层技术。其中，隔热瓦表面涂覆了耐高温的陶瓷涂层，这种涂层具有极低的热导率和良好的耐高温性能，能够有效地阻挡热量向飞行器内部传递。此外，在飞行器的金属结构部件表面还涂覆了抗氧化和抗烧蚀涂层，这些涂层能够在高温下形成致密的保护膜，防止金属部件在高温下氧化和烧蚀，保证了航天飞行器在再入过程中的结构完整性和安全性。

案例十：航空发动机压气机叶片表面涂层

- 航空发动机压气机叶片在工作时需要承受高速气流的冲刷和腐蚀，同时还需要具备良好的气动性能。某型发动机压气机叶片采用了特殊的涂层技术。首先，在叶片表面进行等离子喷涂陶瓷涂层，提高叶片的硬度和耐磨性，抵抗气流冲刷。然后，在陶瓷涂层表面再涂覆一层具有低表面能的氟碳涂层，这种涂层能够降低叶片表面的摩擦系数，减少气流在叶片表面的附着和阻力，提高压气机的效率和性能。同时，氟碳涂层还具有良好的耐腐蚀性，能够防止叶片在潮湿和含有腐蚀性介质的气流中受到腐蚀，延长压气机叶片的使用寿命。

三、表面工程技术在智能制造中的应用

案例一：工业机器人关节表面耐磨涂层

- 在智能制造的生产线上，工业机器人的关节需要频繁运动，承受较大的摩擦和磨损。以某汽车制造工厂使用的工业机器人为例，其关节部位采用了等离子喷涂陶瓷耐磨涂层。这种涂层以氧化铝、氧化锆等陶瓷材料为主要成分，通过等离子喷涂技术均匀地涂覆在关节表面。涂层具有硬度高、摩擦系数低、耐磨性好等特点，能够有效降低关节运动时的磨损，提高关节的精度保持性和使用寿命。经过耐磨涂层处理后，工业机器人关节的维修周期延长，降低了设备停机时间，提高了生产效率。

案例二：自动化生产线输送带表面防滑涂层

- 自动化生产线中的输送带需要确保物料稳定传输，防止打滑。某电子厂的自动化生产线输送带采用了一种特殊的防滑涂层。该涂层是由聚氨酯树脂和耐磨颗粒混合而成，通过涂覆工艺均匀地覆盖在输送带表面。涂层中的耐磨颗粒增加了输送带表面的粗糙度，提高了与物料之间的摩擦力，有效防止了物料在输送过程中打滑或掉落。同时，聚氨酯树脂具有良好的柔韧性和耐磨损性能，能够适应输送带的频繁弯曲和运动，延长了输送带的使用寿命，减少了因物料输送不稳定而导致的生产故障。

案例三：智能加工中心刀具表面涂层

- 智能加工中心的刀具在高速切削过程中需要具备高硬度、高耐磨性和良好的润滑性。某机械加工企业的智能加工中心刀具采用了物理气相沉积（PVD）涂层技术，在刀具表面涂覆了氮化钛（TiN）涂层。TiN 涂层具有金黄色的外观，硬度高达 2000 - 2500HV，能够显著提高刀具的硬度和耐磨性。同时，TiN 涂层还具有较低的摩擦系数，能够减少切削过程中的摩擦力，降低切削热的产生，提高加工表面质量。使用 TiN 涂层刀具后，刀具的使用寿命延长了数倍，加工效率提高了 30% 以上，降低了加工成本。

案例四：3D 打印零部件表面致密化涂层

- 3D 打印技术在智能制造中得到了广泛应用，但 3D 打印零部件表面往往存在一定的孔隙和粗糙度。为了提高 3D 打印零部件的性能和质量，某企业对 3D 打印零部件采用了化学镀镍涂层技术。化学镀镍涂层能够在零部件表面形成一层均匀、致密的金属层，填补表面孔隙，降低表面粗糙度。经过化学镀镍处理后，3D 打印零部件的耐腐蚀性、耐磨性和导电性得到了显著提高。例如，在一些电子设备的 3D 打印外壳上应用化学镀镍涂层，不仅提高了外壳的美观度，还增强了其电磁屏蔽性能，保护了内部电子元件不受外界电磁干扰。

案例五：智能仓储货架表面防腐涂层

- 智能仓储货架在长期使用过程中需要承受货物的重量和环境的腐蚀。某物流中心的智能仓储货架采用了粉末喷涂防腐涂层。首先，对货架表面进行除锈和除油处理，然后将粉末涂料通过静电喷涂的方式均匀地喷涂在货架表面。粉末涂料在高温下固化形成一层坚硬、致密的涂层。这种涂层具有良好的耐腐蚀性、耐候性和耐磨性，能够有效防止货架生锈和腐蚀，延长货架的使用寿命。同时，粉末喷涂涂层还具有良好的装饰性，使仓储货架外观更加美观整洁，提升了物流中心的整体形象。

案例六：机器人视觉系统镜头表面增透涂层

- 机器人视觉系统的镜头需要具有高透光率和良好的光学性能，以确保准确的图像采集和识别。某机器人视觉系统的镜头采用了多层增透涂层技术。通过真空镀膜工艺，在镜头表面镀上多层不同折射率的光学薄膜。这些薄膜能够有效地减少光线在镜头表面的反射，提高透光率，使图像更加清晰、明亮。同时，增透涂层还具有良好的耐磨性和耐腐蚀性，能够保护镜头表面不受外界环境的污染和损坏。采用增透涂层的机器人视觉系统能够更准确地识别物体，提高了机器人在智能制造中的定位和操作精度。

案例七：智能传感器表面封装涂层

- 智能传感器在工业环境中需要具备良好的密封性和耐腐蚀性，以保证其性能的稳定性和可靠性。某工业智能传感器采用了聚对二甲苯（Parylene）封装涂层。Parylene 是一种具有优异性能的高分子材料，通过化学气相沉积的方式在传感器表面形成一层超薄、均匀的涂层。这种涂层具有良好的绝缘性、防潮性和耐化学腐蚀性，能够有效地保护传感器内部的电子元件不受外界湿气、灰尘和化学物质的侵蚀。同时，Parylene 涂层还具有良好的柔韧性和机械

性能，不会影响传感器的灵敏度和响应速度。经过 Parylene 封装涂层处理后，智能传感器的使用寿命和稳定性得到了显著提高，能够在恶劣的工业环境中长期稳定工作。

案例八：数控机床导轨表面耐磨涂层

- 数控机床的导轨对机床的精度和稳定性起着关键作用，需要具备高耐磨性和低摩擦系数。某数控机床的导轨采用了电刷镀耐磨涂层技术。电刷镀是一种在工件表面快速沉积金属涂层的技术，通过将含有金属离子的镀液刷涂在导轨表面，并施加一定的电流，使金属离子在导轨表面还原成金属涂层。该耐磨涂层以镍 - 磷合金为主要成分，具有硬度高、耐磨性好、摩擦系数低等特点。能够有效降低导轨与滑块之间的摩擦，提高导轨的耐磨性和精度保持性。经过电刷镀耐磨涂层处理后，数控机床的加工精度得到了提高，导轨的使用寿命延长，减少了机床的维修和保养成本。

案例九：智能包装设备零部件表面润滑涂层

- 智能包装设备的零部件在运动过程中需要良好的润滑，以降低摩擦和磨损，提高设备的运行效率和可靠性。某智能包装设备的传动部件采用了二硫化钼（ MoS_2 ）润滑涂层。 MoS_2 是一种具有层状结构的固体润滑剂，通过喷涂或浸渍的方式将 MoS_2 涂层涂覆在零部件表面。 MoS_2 涂层能够在零部件表面形成一层均匀的润滑膜，具有极低的摩擦系数，能够有效地降低传动部件之间的摩擦和磨损。同时， MoS_2 涂层还具有良好的耐高温性能和化学稳定性，能够在不同的工作环境下保持良好的润滑性能。使用 MoS_2 润滑涂层后，智能包装设备的运行更加平稳，设备的故障率降低，维护成本也相应减少。

案例十：智能工厂 AGV 小车车轮表面耐磨涂层

- 智能工厂中的 AGV 小车需要频繁地行驶和搬运货物，其车轮需要具备良好的耐磨性和抗疲劳性能。某智能工厂的 AGV 小车车轮采用了热喷涂耐磨涂层技术。通过火焰喷涂或电弧喷涂等方式，将耐磨合金粉末喷涂在车轮表面。这种耐磨涂层具有高硬度、高韧性和良好的耐磨性，能够承受 AGV 小车在行驶过程中的各种应力和摩擦。同时，耐磨涂层还能够提高车轮的抗腐蚀性能，延长车轮的使用寿命。经过耐磨涂层处理后的 AGV 小车车轮，磨损明显减少，更换周期延长，提高了 AGV 小车的运行效率和可靠性，降低了智能工厂的物流成本。

四、表面工程技术在节能减排中的应用

案例一：汽车发动机缸体表面微弧氧化涂层

- 汽车发动机缸体在工作时需要承受高温、高压和摩擦等复杂工况。某汽车制造公司对发动机缸体采用了微弧氧化涂层技术。该技术是在铝、镁、钛等金属及其合金表面，通过微弧氧化工艺生成一层陶瓷质氧化膜。这种涂层具有硬度高、耐磨性好、耐高温、隔热性能优良等特点。在发动机工作时，微弧氧化涂层能够有效降低缸体与活塞之间的摩擦系数，减少能量损失，提高发动机的热效率。同时，其隔热性能可以减少发动机热量向外界的散失，使发动机在更高效的温度范围内工作，从而降低燃油消耗，实现节能减排。经测试，采用微弧氧化涂层的发动机缸体，可使汽车燃油经济性提高 5% - 8%，尾气排放中的二氧化碳等有害气体也相应减少。

案例二：工业锅炉内壁热障涂层

- 工业锅炉在运行过程中，内壁面临高温烟气的冲刷和腐蚀，同时热量损失较大。某工厂的工业锅炉内壁采用了等离子喷涂热障涂层。该涂层以氧化钇稳定的氧化锆为主要材料，通过等离子喷涂技术均匀地涂覆在锅炉内壁上。热障涂层具有低导热率的特性，能够有效阻挡锅炉内高温烟气向炉壁的热量传递，减少热量散失到外界环境中。这不仅提高了锅炉的热效率，使燃料燃烧产生的热量更有效地被利用来产生蒸汽或热水，还降低了锅炉外壁的温度，改善了工作环境，减少了因散热导致的能源浪费。经过热障涂层处理后，该工业锅炉的热效率提高了 8% - 10%，每年可节约大量的煤炭资源，同时减少了二氧化碳等温室气体的排放。

案例三：船舶螺旋桨表面防腐耐磨涂层

- 船舶螺旋桨在海水中工作，面临着严重的腐蚀和磨损问题。某船舶制造企业为螺旋桨采用了一种特殊的防腐耐磨涂层。该涂层是由环氧树脂、耐磨填料和防腐颜料等组成的复合涂层。通过喷涂工艺将涂层均匀地涂覆在螺旋桨表面。涂层中的环氧树脂具有良好的粘结性和耐腐蚀性，能够有效隔离海水与螺旋桨金属基体的接触，防止腐蚀发生。耐磨填料则提高了涂层的硬度和耐磨性，减少螺旋桨在旋转过程中受到的水流冲刷和泥沙磨损。这样可以保

持螺旋桨的表面光洁度和形状精度，降低旋转阻力，提高推进效率。经实际应用测试，采用防腐耐磨涂层的螺旋桨，在相同的航行条件下，船舶的燃油消耗降低了 3% - 5%，从而实现了节能减排的效果，同时也延长了螺旋桨的使用寿命，减少了维修和更换成本。

案例四：太阳能热水器集热管表面选择性吸收涂层

- 太阳能热水器的集热管是将太阳能转化为热能的关键部件。某太阳能热水器生产厂家在集热管表面采用了磁控溅射选择性吸收涂层技术。通过磁控溅射工艺，在集热管表面沉积一层具有特殊光学性能的涂层。该涂层对太阳光谱中的可见光和近红外光具有高吸收率，能够有效地将太阳能转化为热能，同时对热辐射具有低发射率，减少了集热管内部热量以辐射形式向外散失。这种选择性吸收涂层大大提高了太阳能热水器的集热效率，使集热管能够在更短的时间内将水加热到所需温度，减少了辅助加热设备的使用频率和时间，从而节约了电能或其他能源。经检测，采用选择性吸收涂层的太阳能热水器，其集热效率比普通热水器提高了 20% - 30%，在家庭和商业热水供应中实现了显著的节能减排效果。

案例五：风力发电机叶片表面防护涂层

- 风力发电机叶片长期暴露在户外环境中，面临着风沙侵蚀、紫外线辐射和雨水冲刷等问题。某风力发电场为叶片采用了一种高性能防护涂层。该涂层由聚氨酯树脂、抗紫外线添加剂和耐磨填料等组成。通过喷涂工艺将涂层涂覆在叶片表面。聚氨酯树脂具有良好的柔韧性和耐候性，能够适应叶片在不同风速下的变形，同时抵抗紫外线辐射和雨水的侵蚀。抗紫外线添加剂有效吸收和散射紫外线，防止叶片材料老化。耐磨填料提高了涂层的硬度和耐磨性，减少风沙对叶片表面的磨损。保持叶片表面的光洁度对于提高风能利用效率至关重要，防护涂层可以降低叶片表面的粗糙度，减少空气阻力，使叶片在相同风速下能够捕获更多的风能，提高发电效率。经实际运行监测，采用防护涂层的风力发电机叶片，发电效率提高了 3% - 5%，在大规模风力发电中实现了可观的节能减排效益。

案例六：建筑外窗玻璃表面低辐射涂层

- 建筑外窗玻璃是建筑物能量损失的重要途径之一。某建筑采用了磁控溅射法在玻璃表面制备低辐射（Low - E）涂层。这种涂层是一种多层金属 - 介质薄膜，具有对可见光高透过、对红外线高反射的特性。在冬季，Low - E 涂层能够将室内物体发出的远红外线反射回室内，

减少室内热量通过玻璃向室外散失，起到保温作用；在夏季，它又能阻挡室外太阳辐射中的红外线进入室内，降低室内空调的制冷负荷。通过这种方式，Low - E 涂层有效地调节了建筑物内外的热量交换，降低了建筑能耗。经测试，使用 Low - E 涂层玻璃的建筑，其空调和采暖能耗可降低 20% - 30%，在建筑节能领域具有重要的应用价值，有助于减少能源消耗和相应的温室气体排放。

案例七：燃气轮机叶片表面热障与耐磨涂层

- 燃气轮机是一种高效的动力设备，但叶片在高温、高压和高速气流的作用下工作条件苛刻。某燃气轮机制造商为叶片采用了先进的热障与耐磨涂层技术。首先，通过电子束物理气相沉积（EB - PVD）工艺在叶片表面制备热障涂层，以陶瓷材料为主，降低叶片基体的温度，提高燃气轮机的热效率。然后，在热障涂层表面再涂覆一层耐磨涂层，采用等离子喷涂技术，以镍基合金为主要成分，提高叶片表面的硬度和耐磨性，抵抗高速气流中颗粒的冲刷。这种复合涂层系统能够使燃气轮机在更高的温度下运行，提高燃烧效率，减少燃料消耗，同时延长叶片的使用寿命，降低维修成本。经实际运行验证，采用热障与耐磨涂层的燃气轮机，热效率提高了 5% - 8%，节能减排效果显著。

案例八：电动机外壳表面散热涂层

- 电动机在运行过程中会产生大量热量，如果不能及时散热，会导致电机效率降低、寿命缩短。某电机生产企业在电动机外壳表面采用了一种散热涂层。该涂层是由导热填料和有机树脂组成的复合材料，通过涂覆工艺均匀地覆盖在电机外壳表面。导热填料通常为高导热性的金属粉末或陶瓷颗粒，能够有效地将电机内部产生的热量传导到外壳表面。有机树脂则提供了良好的粘结性和防护性。散热涂层增大了电机外壳的散热面积，提高了散热效率，使电机能够在更适宜的温度下运行，降低了因温度过高导致的能量损耗。经测试，使用散热涂层的电动机，其运行温度可降低 10 - 15℃，电机效率提高了 3% - 5%，在工业生产中大量使用的电动机上应用这种涂层，能够实现可观的节能减排效果。

案例九：换热器表面防腐与强化传热涂层

- 换热器是工业生产中广泛应用的节能设备，但换热器表面容易受到腐蚀和结垢的影响，降低传热效率。某化工企业的换热器采用了一种新型的防腐与强化传热涂层。该涂层以含氟

聚合物为基体，添加了具有亲水性和催化性能的纳米粒子。含氟聚合物具有优异的耐腐蚀性和化学稳定性，能够保护换热器表面不受化学介质的侵蚀。纳米粒子则能够改变换热器表面的润湿性，使水在表面形成薄而均匀的水膜，强化了传热过程，同时抑制了结垢的形成。这种涂层能够有效提高换热器的传热效率，减少换热器的热阻，使冷热流体之间的热量交换更加充分，降低了能源消耗。经实际应用，采用该涂层的换热器，传热效率提高了 15% - 20%，减少了加热或冷却介质的用量，实现了节能减排的目标。

案例十：城市轨道交通车辆制动盘表面涂层

- 城市轨道交通车辆制动盘在制动过程中会产生大量热量，需要快速散热以保证制动性能和安全性。某地铁车辆的制动盘采用了一种特殊的散热涂层。该涂层通过热喷涂技术将高导热性的金属 - 陶瓷复合粉末涂覆在制动盘表面。涂层中的金属相具有良好的导热性能，能够迅速将制动过程中产生的热量传导到制动盘表面，然后通过对流和辐射散发到周围环境中。陶瓷相则提高了涂层的硬度和耐磨性，保证制动盘在长期使用过程中涂层的稳定性。这种散热涂层能够有效降低制动盘的温度，减少制动盘因高温导致的磨损和变形，提高制动系统的可靠性和使用寿命。同时，由于制动盘温度的降低，减少了车辆空调系统因车内热量增加而消耗的电能，实现了一定程度的节能减排。经测试，采用散热涂层的制动盘，制动时的温度可降低 20% - 30%，车辆整体能耗有所下降。

五、表面工程技术在汽车制造中的应用

案例 1：发动机缸体的镀铬处理

- 汽车发动机缸体在工作时承受着高温、高压和高速摩擦的作用。为了提高缸体的耐磨性、耐腐蚀性和表面硬度，通常会对缸筒内壁进行镀铬处理。镀铬层具有极高的硬度和良好的耐磨性，能够有效减少活塞与缸筒之间的摩擦，降低磨损程度，提高发动机的效率和可靠性。同时，镀铬层还能防止缸筒内壁受到燃油和润滑油中酸性物质的腐蚀，延长缸体的使用寿命。例如，在一些高性能汽车发动机中，采用精密镀铬工艺，使缸筒内壁的镀铬层厚度均匀，表面粗糙度达到极低水平，有效提升了发动机的性能和耐久性，减少了维修保养的频率和成本。

案例 2：汽车轮毂的电镀处理

- 汽车轮毂不仅需要具备足够的强度和韧性，还需要有良好的耐腐蚀性和美观性。电镀是轮毂表面处理的常用方法之一，通过在轮毂表面镀上一层金属，如锌、铬、镍等，可以提高轮毂的耐腐蚀性，防止其在恶劣的环境条件下生锈和腐蚀。同时，电镀层还能赋予轮毂光亮的外观，提升汽车的整体美观度。例如，一些高端汽车品牌采用多层电镀工艺，先镀上一层铜作为底层，然后再镀上镍和铬，形成多层防护结构，使轮毂不仅具有出色的耐腐蚀性和耐磨性，还能展现出高档的金属光泽，满足了消费者对汽车外观品质的高要求。

案例 3：车身表面的电泳涂装

- 电泳涂装是汽车车身表面处理的关键工艺之一。在电泳涂装过程中，车身被浸泡在含有涂料粒子的电泳槽中，通过施加电场，使涂料粒子均匀地沉积在车身表面，形成一层均匀、致密的漆膜。电泳漆具有良好的附着力、耐腐蚀性和耐候性，能够有效保护车身免受外界环境的侵蚀。同时，电泳涂装工艺具有高效、环保的优点，能够实现自动化生产，提高生产效率，减少涂料的浪费和环境污染。例如，大多数汽车生产厂家采用阴极电泳涂装工艺，使车身表面的电泳漆膜厚度均匀一致，能够很好地覆盖车身的各个部位，包括一些难以喷涂到的角落和缝隙，为车身提供了可靠的防腐保护，延长了汽车的使用寿命。

案例 4：活塞环的氮化处理

- 活塞环是汽车发动机中的关键部件，它需要在高温、高压和高速滑动的条件下工作，对耐磨性和耐腐蚀性有很高的要求。氮化处理是一种常用的表面强化技术，通过在活塞环表面形成一层氮化层，可以提高其硬度、耐磨性、抗咬合性和耐腐蚀性。氮化层具有良好的热稳定性和化学稳定性，能够在发动机工作时承受高温和燃气的侵蚀。例如，一些先进的汽车发动机采用离子氮化工艺对活塞环进行处理，使氮化层的质量和性能得到进一步提升。离子氮化后的活塞环表面硬度可达 HV1000 以上，大大提高了其耐磨性和使用寿命，同时也有助于降低发动机的摩擦损耗，提高燃油经济性。

案例 5：汽车排气系统的热障涂层应用

- 汽车排气系统在工作时会产生大量的热量，为了减少热量向周围环境的散失，提高排气系统的热效率，同时保护附近的零部件不受高温影响，通常会在排气管道内壁和三元催化器等部件表面涂覆热障涂层。热障涂层一般采用陶瓷材料，如氧化锆等，具有低热导率和良好的耐高温性能。它能够在部件表面形成一层隔热层，有效阻挡热量的传递，使排气系统内部的温度保持在较高水平，有利于废气的净化和排放。例如，一些高性能汽车的排气系统采用了等离子喷涂技术制备热障涂层，涂层厚度均匀，与基体结合牢固，能够承受高达 1000°C 以上的高温，有效提高了排气系统的性能和可靠性，同时也降低了车辆的整体热负荷，有助于提高发动机舱内其他部件的使用寿命。

案例 6：汽车座椅骨架的磷化处理

- 汽车座椅骨架是支撑座椅和乘客重量的关键部件，需要具备良好的耐腐蚀性和油漆附着力。磷化处理是一种常用的表面预处理工艺，通过在座椅骨架表面形成一层磷酸盐转化膜，可以提高其耐腐蚀性，为后续的涂装工艺提供良好的基底。磷化膜具有细小的晶体结构，能够增加金属表面的粗糙度，提高油漆的附着力，使涂层更加牢固耐用。例如，在汽车座椅骨架的生产过程中，通常采用锌系磷化工艺，将座椅骨架浸泡在磷化液中，经过一系列的化学反应，在其表面形成一层均匀、致密的磷化膜。经过磷化处理后的座椅骨架，其耐盐雾腐蚀性能可提高数倍，同时与油漆的结合力也大大增强，能够有效防止座椅在使用过程中出现涂层脱落和生锈的现象，提高了座椅的质量和使用寿命。

案例 7：汽车制动盘的激光淬火处理

- 汽车制动盘在制动过程中承受着巨大的摩擦力和热负荷，需要具备高硬度、高耐磨性和良好的热稳定性。激光淬火是一种先进的表面强化技术，它利用高能量密度的激光束对制动盘表面进行快速加热和冷却，使表面组织发生相变，形成细小的马氏体等强化相，从而提高制动盘的硬度和耐磨性。激光淬火具有加热速度快、冷却速度快、淬火层组织细小均匀、硬度高、变形小等优点。例如，一些汽车制造商采用激光淬火技术对制动盘进行处理，在制动盘表面形成一层硬度高达 HRC60 - 65 的淬火层，有效提高了制动盘的耐磨性能和抗热疲劳性能。经过激光淬火处理的制动盘，在长期使用过程中能够保持良好的制动性能，减少了制动盘的磨损和变形，提高了汽车制动系统的安全性和可靠性。

案例 8：汽车散热器的镀锡处理

- 汽车散热器是发动机冷却系统的重要组成部分，它需要具备良好的导热性能和耐腐蚀性。镀锡处理是一种常用的表面防护方法，通过在散热器的铜管和翅片表面镀上一层锡，可以提高其耐腐蚀性，防止其在潮湿的环境中生锈和腐蚀。同时，锡具有良好的导热性能，不会影响散热器的散热效果。此外，镀锡层还能起到一定的润滑作用，便于散热器的组装和加工。例如，在一些汽车散热器的生产中，采用电镀锡工艺，使铜管和翅片表面的镀锡层厚度均匀，表面光滑。镀锡后的散热器不仅具有良好的耐腐蚀性和导热性能，而且外观整洁美观，能够在汽车发动机舱内长期稳定工作，保证发动机的正常冷却，提高了发动机的可靠性和使用寿命。

案例 9：汽车内饰件的表面涂饰

- 汽车内饰件的外观质量和触感直接影响到乘客的乘坐体验。为了提高内饰件的美观度、耐磨性和耐污性，通常会对其进行表面涂饰处理。例如，汽车仪表盘、门板、座椅等内饰件的表面会采用各种涂料进行喷涂或涂覆，以形成不同的颜色、光泽和质感。这些涂料不仅要具备良好的装饰性，还要具有一定的耐磨性、耐刮擦性和耐化学腐蚀性，能够抵抗日常使用中的各种磨损和污渍。一些高端汽车品牌会采用特殊的涂料和涂装工艺，如皮革漆、哑光漆等，使内饰件表面具有逼真的皮革质感或柔和的哑光效果，提升了汽车内饰的豪华感和品质。

感。同时，通过添加耐磨填料和抗污剂等成分，提高了内饰件表面的耐磨性和耐污性，使内饰件在长期使用后仍能保持良好的外观。

案例 10：汽车发动机曲轴的喷丸强化处理

- 汽车发动机曲轴是承受交变载荷的关键部件，其疲劳强度和耐磨性对发动机的可靠性和使用寿命至关重要。喷丸强化是一种通过高速弹丸冲击曲轴表面，使其产生塑性变形和残余压应力的表面强化技术。残余压应力能够抵消一部分工作应力，提高曲轴的疲劳强度；同时，表面的塑性变形可以细化晶粒，提高表面硬度和耐磨性。例如，在曲轴生产过程中，采用数控喷丸设备对曲轴进行精确的喷丸处理，根据曲轴不同部位的受力情况，调整喷丸参数，如弹丸大小、喷射速度和喷射角度等，使曲轴表面获得均匀的残余压应力和合适的表面粗糙度。经过喷丸强化处理的曲轴，其疲劳寿命可以提高数倍，有效保证了发动机在长期高负荷运转条件下的可靠性，减少了曲轴断裂等故障的发生，提高了汽车发动机的整体性能和质量。

六、表面工程技术在电子信息中的应用

案例 1：手机外壳的电镀处理

- **应用背景：**手机作为最常见的电子设备，其外壳的外观和性能至关重要。电镀技术常用于手机外壳，以提升其美观度、耐腐蚀性和耐磨性。
- **具体工艺：**首先对手机外壳进行预处理，包括清洗、脱脂等步骤，以确保表面干净、无杂质。然后采用电镀工艺，通常会镀上一层金属铬或镍，这些金属具有良好的光泽度和耐腐蚀性。
- **效果与优势：**经过电镀处理的手机外壳具有镜面般的光泽，能提升手机的整体质感和外观吸引力。同时，电镀层能有效防止外壳受到外界环境的腐蚀和磨损，延长手机外壳的使用寿命。例如，苹果手机的部分系列外壳采用了电镀工艺，使得手机外观精致，且在日常使用中能较好地保持外观完好。

案例 2：芯片封装的化学气相沉积

- **应用背景：**芯片是电子信息产业的核心部件，芯片封装需要可靠的技术来保护芯片免受外界环境的影响，并实现良好的电气连接。
- **具体工艺：**化学气相沉积（CVD）技术被广泛应用于芯片封装。在真空环境下，将含有硅、氧等元素的气体通入反应 chamber，通过化学反应在芯片表面沉积一层均匀的二氧化硅或氮化硅薄膜。
- **效果与优势：**这种薄膜具有良好的绝缘性能和化学稳定性，能有效保护芯片免受水汽、杂质等的侵蚀。同时，CVD 工艺可以精确控制薄膜的厚度和成分，满足不同芯片封装的要求。例如，英特尔等芯片制造商采用先进的 CVD 技术，为芯片提供了可靠的封装保护，确保芯片在各种复杂的工作环境下能稳定运行。

案例 3：印刷电路板的表面涂覆

- **应用背景：**印刷电路板（PCB）是电子设备中不可或缺的部件，其表面需要进行保护和处理，以确保电路的可靠性和稳定性。

- **具体工艺：**常见的表面涂覆工艺有阻焊剂涂覆和金属化处理。阻焊剂通过丝网印刷或喷涂等方式涂覆在 PCB 表面，经过固化后形成一层绝缘保护膜。金属化处理则是通过电镀或化学镀等方法在 PCB 的焊盘和导线上镀上一层铜、锡等金属。
- **效果与优势：**阻焊剂能防止焊接时焊料的误沾，避免短路等问题，同时还能起到防潮、防腐蚀的作用。金属化处理可以提高焊盘和导线的导电性和可焊性，确保电子元件与 PCB 之间的良好电气连接。例如，在电脑主板的 PCB 制造中，精确的表面涂覆工艺保证了主板的高性能和可靠性。

案例 4：液晶显示器的薄膜沉积

- **应用背景：**液晶显示器（LCD）是现代电子信息显示领域的主流产品，其显示效果和性能取决于多种因素，其中薄膜沉积技术起着关键作用。
- **具体工艺：**在 LCD 的制造过程中，需要通过物理气相沉积（PVD）或化学气相沉积（CVD）等技术在玻璃基板上沉积多层薄膜，包括透明导电电极薄膜（如氧化铟锡，ITO）、液晶取向层薄膜等。
- **效果与优势：**透明导电电极薄膜具有良好的导电性和透光性，能为液晶分子提供电场驱动，实现图像显示。液晶取向层薄膜则能使液晶分子按照特定的方向排列，从而控制光的透过和阻挡，实现不同的灰度和颜色显示。例如，三星、LG 等公司在液晶显示器的生产中采用了先进的薄膜沉积技术，使得显示器具有高分辨率、高对比度和广视角等优良性能。

案例 5：硬盘磁头的溅射镀膜

- **应用背景：**硬盘是计算机中重要的存储设备，硬盘磁头需要具备高灵敏度、高耐磨性和良好的磁性性能，以实现数据的快速读写和长期稳定存储。
- **具体工艺：**溅射镀膜技术常用于硬盘磁头的制造。在真空环境下，利用高能离子束轰击靶材（如钴、镍等磁性材料），使靶材原子溅射出来并沉积在磁头表面，形成一层均匀的磁性薄膜。
- **效果与优势：**通过溅射镀膜形成的磁性薄膜具有精确控制的厚度和微观结构，能提高磁头的读写灵敏度和分辨率。同时，薄膜的硬度和耐磨性较高，能承受高速旋转的磁盘带来的摩擦，保证磁头在长期使用中的性能稳定性。例如，希捷、西部数据等硬盘制造商采用先进的溅射镀膜技术，不断提升硬盘磁头的性能，使硬盘的存储容量和读写速度不断提高。

案例 6：电子元件的钝化处理

- **应用背景：**电子元件在使用过程中容易受到外界环境的影响而发生腐蚀或性能退化，需要进行表面处理以提高其稳定性和可靠性。
- **具体工艺：**钝化处理是一种常见的表面工程技术，通常采用化学方法在电子元件表面形成一层钝化膜。例如，对于金属电子元件，可以将其浸泡在含有铬酸盐、磷酸盐等溶液中，通过化学反应在表面生成一层致密的氧化膜。
- **效果与优势：**钝化膜能有效隔离电子元件与外界环境，防止氧气、水汽等对元件的侵蚀，提高元件的耐腐蚀性。同时，钝化处理还能改善元件表面的电学性能，降低表面电阻，提高元件的稳定性和一致性。例如，在半导体二极管、三极管等元件的生产中，钝化处理是一道重要的工序，能保证元件在不同的工作环境下都能稳定地发挥其功能。

案例 7：光纤的表面涂覆保护

- **应用背景：**光纤是现代通信网络中重要的传输介质，其表面需要得到良好的保护，以防止机械损伤和环境因素对光传输性能的影响。
- **具体工艺：**在光纤制造过程中，通常采用紫外光固化涂料对光纤进行表面涂覆。将光纤通过涂覆装置，使涂料均匀地涂覆在光纤表面，然后通过紫外光照射使其快速固化。
- **效果与优势：**涂覆后的光纤表面形成一层坚韧的保护膜，能提高光纤的机械强度，防止其在铺设和使用过程中受到划伤、磨损等损伤。同时，涂覆层还能起到防潮、防腐蚀的作用，保护光纤的光学性能稳定。例如，康宁公司的光纤产品采用了先进的表面涂覆技术，确保光纤在各种复杂的户外环境下都能长期稳定地传输光信号。

案例 8：触摸屏的纳米涂层技术

- **应用背景：**触摸屏广泛应用于手机、平板电脑、智能家电等电子设备中，其表面需要具备良好的耐磨性、透光性和触控灵敏度。
- **具体工艺：**纳米涂层技术是触摸屏制造中的关键技术之一。通过溶胶 - 凝胶法、物理气相沉积等方法在触摸屏表面沉积一层纳米级的涂层材料，如二氧化钛、氧化铝等纳米粒子组成的涂层。

- **效果与优势：**纳米涂层具有高硬度、高透光性和良好的疏水性。高硬度能防止触摸屏表面被划伤，保持屏幕的清晰度和美观度。高透光性则能确保触摸屏的显示效果不受影响。疏水性使得屏幕表面不易沾染指纹和污渍，易于清洁，同时也能提高触控的灵敏度。例如，华为、小米等品牌的触摸屏设备采用了先进的纳米涂层技术，为用户提供了良好的使用体验。

案例 9：半导体器件的离子注入掺杂

- **应用背景：**在半导体器件的制造中，需要精确控制半导体材料的电学性质，以实现各种功能，如制造晶体管、二极管等。
- **具体工艺：**离子注入掺杂是一种常用的表面工程技术。将含有特定杂质元素（如硼、磷等）的离子束加速到高能状态，然后注入到半导体晶圆表面。通过控制离子注入的能量、剂量和角度等参数，可以精确控制杂质在半导体中的分布和浓度。
- **效果与优势：**离子注入掺杂能够精确地在半导体中形成不同类型的导电区域，如 P 型和 N 型半导体区域，从而制造出各种高性能的半导体器件。与传统的扩散掺杂方法相比，离子注入具有更高的精度和可控性，能够满足大规模集成电路制造中对器件尺寸和性能的严格要求。例如，台积电等半导体制造企业在芯片制造过程中广泛采用离子注入掺杂技术，实现了芯片的高性能和高集成度。

案例 10：电子设备散热器的表面处理

- **应用背景：**随着电子设备的高性能化，散热问题日益突出。散热器作为电子设备中重要的散热部件，其表面性能对散热效果有着重要影响。
- **具体工艺：**常见的散热器表面处理方法有阳极氧化和热喷涂。阳极氧化是将铝制散热器作为阳极，在特定的电解液中进行电解，使其表面形成一层多孔的氧化铝薄膜。热喷涂则是将金属或陶瓷等散热材料通过高温喷枪喷涂到散热器表面。
- **效果与优势：**阳极氧化后的氧化铝薄膜具有良好的绝缘性和散热性能，其多孔结构还能增加表面积，提高散热效率。热喷涂的散热涂层可以选择导热性能良好的材料，如铜、铝等金属或碳化硅等陶瓷材料，进一步提高散热器的散热能力。例如，在电脑 CPU 散热器、服务器散热模块等电子设备散热部件中，采用合适的表面处理技术能有效降低设备的工作温度，保证电子设备的稳定运行。

案例 11：微机电系统（MEMS）传感器的表面处理

- **应用背景：**MEMS 传感器在微型化、高精度传感器领域广泛应用，其微纳结构表面性能直接影响灵敏度和稳定性。
- **具体工艺：**采用原子层沉积（ALD）技术在硅基微加速度计表面沉积 50-100 纳米厚的氧化铝保护膜，同时通过表面活性剂处理在微悬臂梁表面形成选择性刻蚀层。
- **效果与优势：**ALD 氧化铝膜提供原子级均匀的保护层，隔绝水汽和离子污染，提高传感器绝缘性能，表面改性后的微悬臂梁灵敏度提升 30%且线性度优于 0.5%。如博世 Bosch Sensortec 的 BMA456 加速度计采用该工艺实现工业级稳定性。

案例 12：量子点发光二极管（QLED）的表面钝化

- **应用背景：**QLED 显示器以高色域和量子点材料的量子尺寸效应著称，但量子点易受氧化和光致退化影响。
- **具体工艺：**采用配体交换法在 CdSe/ZnS 核壳量子点表面引入 3-巯基丙酸（MPA）作为表面钝化配体，形成自组装单分子层保护膜。
- **效果与优势：**钝化后量子点的荧光量子产率提升至 85%以上，器件工作寿命延长 6 倍，在 1000nit 亮度下可稳定工作 10000 小时以上。如 TCL 华星光电在 QLED 电视面板生产中应用该技术提升显示性能。

七、表面工程技术在能源电力中的应用

案例一：风力发电机叶片表面涂层

- 风力发电机的叶片长期暴露在户外，面临风沙侵蚀、雨水冲刷和紫外线辐射等多种恶劣环境因素。为了提高叶片的耐腐蚀性和耐磨性，通常会在其表面涂覆一层高性能的防护涂层。这种涂层具有良好的附着力和耐候性，能够有效阻挡外界环境对叶片基体的侵蚀，延长叶片的使用寿命。例如，某风电企业采用了一种含氟聚合物涂层，经过多年的运行测试，发现涂覆后的叶片表面依然保持良好的光洁度，没有出现明显的磨损和腐蚀现象，大大降低了叶片的维护成本和更换频率。
- 此外，涂层还可以通过调整表面粗糙度来优化叶片的空气动力学性能，降低风阻，提高风能转换效率。

案例二：太阳能电池板表面减反射膜

- 太阳能电池板的光电转换效率对其发电性能至关重要。在电池板表面制备减反射膜是提高光电转换效率的重要手段之一。减反射膜通常采用纳米级的材料，如二氧化钛、氮化硅等，通过物理气相沉积或化学气相沉积等技术在电池板表面形成一层均匀的薄膜。
- 以某太阳能电站为例，在采用了先进的减反射膜技术后，电池板对太阳光的吸收率提高了 15% 左右，光电转换效率从原来的 18% 提升到了 21%，大大提高了太阳能电站的发电能力和经济效益。

案例三：电力变压器表面防腐涂层

- 电力变压器通常安装在户外，容易受到大气腐蚀、水分侵蚀和化学物质的影响。为了保护变压器的外壳和内部绕组，会在其表面涂覆防腐涂层。这种涂层具有良好的绝缘性能、耐腐蚀性和耐温性，能够有效防止变压器外壳生锈和内部绝缘材料老化。
- 例如，某电力公司对其管辖的变压器采用了一种环氧树脂防腐涂层，经过长期运行监测，发现涂覆后的变压器外壳腐蚀速率明显降低，内部绝缘性能也得到了有效保障，减少了因腐蚀和绝缘老化导致的故障发生率，提高了变压器的运行可靠性。

案例四：高压输电线路铁塔热镀锌

- 高压输电线路铁塔长期承受着巨大的机械应力和恶劣的自然环境考验，容易发生腐蚀现象。热镀锌是一种常用的表面处理技术，通过将铁塔构件浸入熔融的锌液中，在其表面形成一层致密的锌层。
- 锌层具有良好的耐腐蚀性和导电性，能够有效防止铁塔生锈，同时还能起到一定的导电作用，降低输电线路的电阻。以某输电线路为例，采用热镀锌处理后的铁塔，在使用了 20 多年后，表面锌层依然保持完好，铁塔的结构强度和稳定性得到了有效保障，减少了因铁塔腐蚀而导致的安全事故和维修成本。

案例五：发电机转子表面镀铬

- 发电机转子在高速旋转过程中，其表面需要承受很高的摩擦力和离心力。为了提高转子表面的硬度和耐磨性，通常会采用镀铬工艺。镀铬层具有硬度高、摩擦系数低、耐磨损等优点，能够有效提高转子的使用寿命和运行可靠性。
- 例如，某发电厂对其发电机转子进行了镀铬处理，经过一段时间的运行后，发现转子表面的磨损程度明显降低，振动和噪声也有所减小，提高了发电机的效率和稳定性，减少了因转子磨损而导致的停机维修时间和成本。

案例六：核电站反应堆压力容器表面防护涂层

- 核电站反应堆压力容器是核电站的核心设备，其表面需要承受高温、高压、强辐射等极端环境条件。为了保护压力容器的表面，通常会采用特殊的防护涂层。这种涂层具有良好的耐高温、耐辐射、耐腐蚀性能，能够有效防止压力容器表面的材料发生老化和腐蚀，确保反应堆的安全运行。
- 例如，某核电站采用了一种含硼的防护涂层，能够有效吸收中子，降低辐射对压力容器的影响。经过多年的运行监测，发现涂层性能稳定，压力容器表面没有出现明显的损伤和腐蚀现象，为核电站的长期安全运行提供了有力保障。

案例七：水电厂水轮机叶片表面耐磨涂层

- 水电厂水轮机叶片在高速水流的冲刷下，容易发生磨损和空蚀现象。为了提高叶片的耐磨性和抗空蚀性能，通常会在其表面涂覆一层耐磨涂层。这种涂层一般采用碳化钨、陶瓷等硬质材料，通过等离子喷涂等技术在叶片表面形成一层坚固的防护层。
- 以某水电厂为例，在水轮机叶片表面涂覆了耐磨涂层后，叶片的磨损速率明显降低，空蚀现象得到了有效抑制，延长了叶片的使用寿命，减少了因叶片磨损和空蚀而导致的停机维修次数，提高了水电厂的发电效率和经济效益。

案例八：储能电池电极表面改性

- 储能电池的性能对其在能源电力领域的应用至关重要。通过对电池电极表面进行改性，可以提高电极的导电性、稳定性和电化学反应活性，从而提高电池的充放电效率和循环寿命。例如，采用化学镀或电镀的方法在电极表面沉积一层纳米级的金属或合金薄膜，可以增加电极的比表面积，提高电子传输速率。
- 某电池生产企业对其锂离子电池电极进行了表面改性处理，经过测试，发现电池的充放电效率提高了 10% 左右，循环寿命也从原来的 1000 次提高到了 1500 次，大大提高了储能电池的性能和实用性。

案例九：电网绝缘子表面憎水涂层

- 电网绝缘子在运行过程中，其表面容易受到污染和潮湿环境的影响，导致绝缘性能下降。在绝缘子表面涂覆憎水涂层可以有效提高其表面的憎水性，使水分在绝缘子表面形成水珠并滚落，从而避免形成连续的水膜，提高绝缘子的绝缘性能和耐污闪能力。
- 例如，某电网公司对其输电线路上的绝缘子采用了一种有机硅憎水涂层，经过实际运行验证，发现涂覆后的绝缘子在潮湿和污秽环境下的绝缘性能明显提高，污闪事故发生率显著降低，保障了电网的安全稳定运行。

案例十：火力发电厂锅炉管道表面防腐涂层

- 火力发电厂锅炉管道在高温、高压和腐蚀性介质的作用下，容易发生腐蚀和结垢现象。为了保护锅炉管道，通常会在其表面涂覆防腐涂层。这种涂层具有良好的耐高温、耐腐蚀和耐磨损性能，能够有效防止管道内壁的腐蚀和结垢，提高管道的传热效率和使用寿命。

- 例如，某火力发电厂采用了一种陶瓷基复合防腐涂层，经过长期运行监测，发现涂覆后的锅炉管道腐蚀速率明显降低，结垢现象也得到了有效控制，减少了因管道腐蚀和结垢而导致的泄漏和维修成本，提高了锅炉的运行效率和经济性。

八、表面工程技术在生物医疗中的应用

表面案例一：人工关节表面涂层

- 人工关节置换手术是治疗关节疾病的有效方法，但植入人体的人工关节需要具备良好的生物相容性和耐磨性。通过在人工关节表面涂覆生物活性涂层，如羟基磷灰石涂层，可以促进骨细胞的黏附、增殖和分化，加速人工关节与周围骨组织的结合，提高关节的稳定性和使用寿命。例如，某医院对一批接受人工髋关节置换手术的患者使用了涂覆羟基磷灰石涂层的人工关节，术后跟踪调查发现，患者的骨组织与关节表面的结合速度明显加快，关节松动等并发症的发生率显著降低，患者能够更快地恢复正常活动，提高了生活质量。

案例二：心血管支架表面改性

- 心血管支架是治疗冠心病的常用医疗器械，但其植入人体后可能会引发血栓形成和内膜增生等问题。采用表面工程技术对心血管支架进行改性可以有效解决这些问题。例如，通过在支架表面涂覆一层抗凝血药物涂层，能够抑制血小板的聚集和血栓的形成；或者采用等离子体处理技术对支架表面进行改性，增加表面的亲水性和生物活性，促进内皮细胞的生长，从而减少内膜增生。某心血管病医院对使用表面改性心血管支架的患者进行长期随访，结果显示，经过改性的支架能够显著降低术后再狭窄的发生率，提高了患者的治疗效果和生存率。

案例三：牙科种植体表面处理

- 牙科种植体的成功与否很大程度上取决于其与周围牙槽骨的骨结合情况。对牙科种植体表面进行适当的处理可以改善其生物相容性和骨结合能力。例如，采用喷砂、酸蚀等方法对种植体表面进行粗化处理，能够增加种植体的表面积，促进骨细胞的附着和生长；同时，在种植体表面涂覆生物活性分子，如生长因子等，可以进一步诱导骨组织的形成。某口腔医院对使用经过表面处理牙科种植体的患者进行观察，发现种植体的成功率较高，患者在种植后的恢复情况良好，能够较快地适应种植体并恢复正常的咀嚼功能。

案例四：医用不锈钢器械表面钝化

- 医用不锈钢器械具有良好的强度和耐腐蚀性，但在使用过程中仍可能受到腐蚀和细菌污染的影响。通过对医用不锈钢器械表面进行钝化处理，可以在其表面形成一层致密的氧化膜，提高器械的耐腐蚀性和生物安全性。例如，采用硝酸钝化工艺对不锈钢手术器械进行处理，能够去除器械表面的杂质和游离铁，使表面的铬元素富集，形成稳定的氧化铬钝化膜。经过钝化处理的手术器械在使用过程中不易生锈，减少了细菌滋生的可能性，降低了手术感染的风险，保障了患者的安全。

案例五：隐形眼镜表面亲水涂层

- 隐形眼镜直接与眼睛接触，其表面性能对佩戴的舒适性和安全性至关重要。在隐形眼镜表面涂覆亲水涂层可以提高镜片的湿润性，减少眼睛的干涩感和异物感，同时还能防止蛋白质等生物大分子在镜片表面的吸附，延长镜片的使用寿命。例如，某隐形眼镜品牌采用等离子体聚合技术在镜片表面涂覆了一层亲水聚合物涂层，使用者反馈佩戴该隐形眼镜时感觉更加舒适，眼睛不易疲劳，而且镜片的清洁维护也更加方便，能够有效保持镜片的清晰度和性能。

案例六：人工心脏瓣膜表面抗钙化涂层

- 人工心脏瓣膜在长期使用过程中容易发生钙化现象，导致瓣膜功能下降甚至失效。在人工心脏瓣膜表面涂覆抗钙化涂层可以有效抑制钙盐的沉积，延长瓣膜的使用寿命。例如，通过在瓣膜表面涂覆含有磷酸胆碱等成分的涂层，能够模拟细胞膜的结构和功能，减少血液中钙离子与瓣膜表面的相互作用，从而降低钙化的发生率。某心脏中心对使用涂覆抗钙化涂层人工心脏瓣膜的患者进行跟踪研究，发现经过涂层处理的瓣膜在体内的钙化程度明显低于未处理的瓣膜，患者的术后生存质量得到了显著提高，再次手术更换瓣膜的时间也得到了延迟。

案例七：医用导管表面润滑涂层

- 医用导管在插入人体组织和血管时，需要尽可能减少对组织的损伤和患者的痛苦。在导管表面涂覆润滑涂层可以降低导管与组织之间的摩擦系数，使导管更容易插入和移动。例如，采用物理气相沉积技术在导管表面沉积一层类金刚石碳（DLC）润滑涂层，该涂层具有极低的摩擦系数和良好的生物相容性。临床应用表明，涂覆 DLC 涂层的医用导管在插入过

程中更加顺畅，对血管和组织的损伤较小，患者的不适感明显减轻，同时也降低了因导管插入引起的并发症的发生率。

案例八：组织工程支架表面修饰

- 组织工程支架是用于修复和再生组织的三维多孔结构材料，其表面性能对细胞的黏附、增殖和组织的生长具有重要影响。通过表面工程技术对组织工程支架进行修饰，可以改善其生物活性和生物相容性。例如，在支架表面接枝生物活性肽或生长因子，能够特异性地结合细胞表面的受体，促进细胞的黏附和分化；或者采用纳米技术在支架表面构建纳米级的拓扑结构，模拟细胞外基质的微环境，引导细胞的生长和组织的形成。某研发团队研发的经过表面修饰的组织工程支架在动物实验中取得了良好的效果，能够成功诱导骨组织和神经组织的再生，为组织工程技术在临床治疗中的应用提供了有力的支持。

案例九：医疗植入物表面抗菌涂层

- 医疗植入物植入人体后，容易引发细菌感染，导致植入失败和严重的并发症。在植入物表面涂覆抗菌涂层是预防感染的有效方法之一。例如，在植入物表面涂覆含有银离子、纳米氧化锌等抗菌剂的涂层，能够释放出具有抗菌活性的物质，抑制细菌的生长和繁殖。某医院对使用涂覆抗菌涂层医疗植入物的患者进行观察，发现感染率明显低于使用普通植入物的患者，有效降低了术后感染的风险，提高了植入手术的成功率，减少了患者的痛苦和医疗费用。

案例十：义齿表面耐磨及美观涂层

- 义齿需要具备良好的耐磨性和美观性，以满足患者的咀嚼功能和美观需求。在义齿表面涂覆耐磨及美观涂层可以提高义齿的质量和使用寿命。例如，采用化学气相沉积技术在义齿表面沉积一层陶瓷涂层，不仅可以提高义齿的硬度和耐磨性，还能使其具有良好的光泽和色泽，与天然牙齿更加相似。经过涂层处理的义齿在使用过程中不易磨损，外观保持良好，能够为患者提供更好的口腔功能和美观效果，提高了患者的生活质量和自信心。

案例十一：骨科固定器械表面生物活性涂层

- 骨科固定器械如钢板、螺钉等需要在骨折愈合过程中提供稳定支撑，同时促进骨组织再生。采用电化学沉积技术在钛合金固定器械表面沉积一层羟基磷灰石涂层，厚度约为 10 微米。羟基磷灰石具有良好的生物活性和骨传导性，同时通过后续的热处理优化涂层的结晶度。涂层处理后的固定器械在体外实验中显示出更高的成骨细胞黏附率和矿化能力。临床试验表明，使用改性固定器械的患者骨折愈合时间缩短 15%，骨-植入物界面的结合强度提高 40%。

案例十二：医用导丝表面润滑及抗菌涂层

- 医用导丝在血管介入手术中用于引导导管进入目标部位，需要具备低摩擦系数和抗菌性能。采用化学气相沉积技术在导丝表面沉积一层类金刚石碳（DLC）涂层，厚度约为 3 微米。DLC 涂层具有极低的摩擦系数和良好的生物相容性，同时通过后续的离子注入技术在涂层中引入银离子，赋予抗菌性能。涂层处理后的导丝摩擦系数降低至 0.05 以下，抗菌性能达到 99.9%。临床试验表明，使用改性导丝的患者术后血管损伤减少 40%，感染率从 5%降至 0.5%。

九、表面工程技术在纺织行业中的应用

案例一：织物防水涂层

- 在户外服装、帐篷等纺织品中，防水性能至关重要。通过在织物表面涂覆防水涂层，可以有效阻止水分渗透，同时保持织物的透气性。例如，某户外品牌采用聚四氟乙烯（PTFE）涂层技术，将 PTFE 乳液均匀地涂覆在尼龙织物表面。PTFE 具有极低的表面能，使水在织物表面形成水珠而滚落，从而实现良好的防水效果。同时，PTFE 涂层具有微孔结构，允许水蒸气通过，保证了服装的透气性能。经过这种涂层处理的户外服装，即使在暴雨天气下也能让穿着者保持干爽，同时不会因闷热而感到不适，深受户外运动爱好者的喜爱。

案例二：织物防污涂层

- 对于经常接触污渍的纺织品，如沙发套、餐桌布等，防污涂层可以使其具有抗污自洁的功能。某纺织公司使用含氟聚合物涂层对织物进行处理。含氟聚合物具有非常低的表面张力，能够使污渍难以附着在织物表面。当有污渍滴落在涂有防污涂层的织物上时，污渍会形成水珠状，轻轻擦拭即可去除，大大减少了织物清洗的频率和难度。这种防污涂层不仅提高了织物的使用寿命，还降低了清洁成本，为消费者提供了更加便捷的使用体验。

案例三：织物抗菌除臭涂层

- 在一些贴身衣物、运动服装以及家纺产品中，抗菌除臭功能越来越受到关注。某企业采用纳米银抗菌涂层技术，将纳米银粒子均匀地分布在织物表面。纳米银具有强大的抗菌能力，能够破坏细菌的细胞膜，抑制细菌的生长和繁殖，从而有效防止织物因细菌滋生而产生异味。经过抗菌除臭涂层处理的织物，即使经过多次穿着和洗涤，仍能保持良好的抗菌性能，为穿着者提供了健康、舒适的穿着环境，尤其适合在高温潮湿环境下使用的运动服装和内衣。

案例四：织物抗紫外线涂层

- 长期暴露在阳光下的纺织品，如窗帘、遮阳篷等，容易受到紫外线的伤害而褪色、老化。为了提高织物的抗紫外线性能，某厂家采用紫外线吸收剂涂层技术。将含有紫外线吸收剂的涂层剂涂覆在织物表面，紫外线吸收剂能够吸收紫外线并将其转化为热能散发出去，从而保护织物纤维不受紫外线的破坏。经过抗紫外线涂层处理的窗帘，能够有效阻挡大部分紫外线，不仅延长了窗帘的使用寿命，还为室内提供了更好的防晒保护，减少了家具、地板等因紫外线照射而产生的褪色和老化。

案例五：织物柔软整理涂层

- 对于一些手感较硬的织物，如麻织物、功能性织物等，柔软整理涂层可以改善其手感，提高穿着舒适性。某纺织厂使用有机硅柔软剂涂层对织物进行处理。有机硅柔软剂能够在织物表面形成一层柔软、光滑的薄膜，降低纤维之间的摩擦系数，使织物具有柔软、清爽的手感。经过柔软整理涂层处理的麻织物，不仅保留了麻纤维的天然特性，如吸湿性、透气性等，还克服了其手感粗糙的缺点，穿着更加舒适，扩大了麻织物在服装领域的应用范围。

案例六：织物拒油涂层

- 在一些特殊场合，如厨房工作服、工业用布等，需要织物具有拒油性能，以防止油污渗透和附着。某公司研发了一种含氟拒油涂层剂，将其涂覆在织物表面后，能够在织物表面形成一层紧密排列的低表面能分子层。这种分子层能够使油滴在织物表面形成球状，无法渗透到织物内部，从而实现拒油功能。经过拒油涂层处理的厨房工作服，在接触油污后，只需轻轻擦拭即可去除油污，大大提高了工作服的清洁效率，减少了因油污渗透而导致的织物损坏和更换频率。

案例七：织物易去污涂层

- 为了使织物在洗涤时更容易去除污渍，一些纺织品采用了易去污涂层技术。某科研机构开发了一种基于聚酯酰胺树脂的易去污涂层。这种涂层能够在织物表面形成一种特殊的分子结构，使污渍与织物表面的结合力减弱。在洗涤过程中，洗涤剂分子更容易渗透到污渍与织物之间，将污渍分解并去除。经过易去污涂层处理的织物，即使沾染了顽固污渍，也能在常规洗涤条件下轻松洗净，保持织物的清洁度和美观度。

案例八：织物抗静电涂层

- 在秋冬季节，或者在一些干燥的环境中，纺织品容易产生静电，给穿着和使用带来不便。某纺织企业采用抗静电剂涂层技术来解决这一问题。将抗静电剂涂覆在织物表面后，抗静电剂能够吸收空气中的水分，在织物表面形成一层导电的水膜，从而将织物表面的静电及时传导出去，防止静电积累。经过抗静电涂层处理的服装，在穿着过程中不会出现因静电而产生的吸附、电击等现象，提高了穿着的舒适性和安全性，尤其适用于化纤类织物。

案例九：织物阻燃涂层

- 对于一些公共场所使用的纺织品，如窗帘、地毯等，阻燃性能是一项重要的安全指标。某公司采用磷系阻燃剂涂层技术对织物进行处理。磷系阻燃剂在高温下会分解产生磷酸、偏磷酸等物质，这些物质能够在织物表面形成一层致密的炭化层，阻止氧气与织物接触，同时抑制可燃性气体的产生，从而达到阻燃的目的。经过阻燃涂层处理的窗帘，在遇到明火时能够有效阻止火势蔓延，为人员疏散和消防救援争取时间，提高了公共场所的消防安全水平。

案例十：织物仿皮革涂层

- 为了满足市场对仿皮革织物的需求，一些纺织厂采用仿皮革涂层技术。通过在织物表面涂覆多层不同功能的涂层，模拟皮革的外观和手感。首先在织物表面涂覆一层底涂剂，增强涂层与织物的附着力；然后涂覆具有皮革质感的面层涂料，通过调整涂料的配方和工艺，使织物表面具有类似皮革的纹理和光泽；最后再涂覆一层顶涂剂，提高织物的耐磨性和防水性。经过仿皮革涂层处理的织物，具有与天然皮革相似的外观和手感，同时还具有成本低、易于加工、环保等优点，广泛应用于服装、鞋材、箱包等领域。

十、表面工程技术在建筑行业中的应用

案例一：建筑物外墙氟碳漆涂装

- 许多现代化的高楼大厦采用氟碳漆对建筑物外墙进行涂装。氟碳漆具有优异的耐候性、耐腐蚀性和自清洁性。例如，上海中心大厦的外墙就使用了氟碳漆。其超耐候性能够确保在长期的风吹日晒、雨淋雪蚀以及空气污染等环境因素影响下，外墙颜色持久亮丽，不易褪色、粉化。氟碳漆的自清洁功能则使大厦外墙能保持整洁，减少了人工清洁的频率和成本。同时，它的防腐性能可以有效保护建筑外墙的结构材料，延长建筑物的使用寿命，使大厦在几十年内都能保持良好的外观和性能。

案例二：钢结构桥梁热浸镀锌

- 大型钢结构桥梁通常会采用热浸镀锌技术来保护钢材。以港珠澳大桥为例，其钢结构部分经过热浸镀锌处理。热浸镀锌是将钢构件浸入熔融的锌液中，使其表面形成一层均匀、致密的锌镀层。锌镀层能够有效地隔绝钢材与空气、水分的接触，防止钢材生锈腐蚀。港珠澳大桥所处的海洋环境具有高盐度、高湿度等特点，对钢材的腐蚀性极强。热浸镀锌层为大桥的钢结构提供了可靠的防护，即使在这样恶劣的环境下，也能保证桥梁结构的稳定性和安全性，使其能够承受巨大的交通荷载和复杂的自然力作用，使用寿命可达百年以上。

案例三：建筑玻璃镀膜

- 为了提高建筑玻璃的性能，很多建筑会采用镀膜玻璃。比如，北京中国尊的玻璃幕墙就采用了高性能的镀膜玻璃。这种镀膜玻璃通过在玻璃表面镀上一层或多层金属、合金或金属氧化物薄膜，能够有效地调节光线的透过率和反射率。在夏季，它可以反射大量的太阳热辐射，减少室内空调的能耗；在冬季，又能阻止室内热量向外散发，起到保温的作用。同时，镀膜玻璃还具有良好的光学性能，能够提供清晰的视野，使建筑物在不同的光照条件下都能呈现出独特的外观效果，兼具美观与实用。

案例四：混凝土路面封层

- 在城市道路建设中，混凝土路面封层技术被广泛应用。以某城市的主干道为例，在混凝土路面施工完成后，会在其表面喷涂一层封层材料，如乳化沥青封层或聚合物改性沥青封层。封层能够有效封闭混凝土路面的微小孔隙，防止雨水、雪水等渗入路面结构内部，避免因水的侵蚀而导致路面结构损坏。同时，封层还能提高路面的耐磨性和抗滑性，减少车辆行驶对路面的磨损，提高行车安全性。此外，封层材料还具有一定的弹性，能够吸收部分车辆行驶产生的振动和应力，延长混凝土路面的使用寿命。

案例五：古建筑木材防腐处理

- 对于古建筑中的木结构，通常会采用特殊的表面处理技术来防腐防潮。例如，山西平遥古城的古建筑木构件采用了桐油和防腐剂相结合的处理方法。先将木材表面清理干净，然后涂刷桐油，桐油能够渗透到木材内部，形成一层保护膜，增强木材的防水性能。同时，在桐油中添加适量的防腐剂，如铜铬砷（CCA）等，可以有效地抑制木材中微生物的生长和繁殖，防止木材腐朽、虫蛀。这种处理方法不仅保护了古建筑的木结构，使其历经数百年仍能保持完好，还保留了木材的天然质感和色泽，体现了古建筑的历史文化价值。

案例六：卫生间陶瓷砖防滑处理

- 在建筑的卫生间、浴室等潮湿环境中，陶瓷砖的防滑性能至关重要。一些高档酒店的卫生间会采用陶瓷砖防滑处理技术。通过在陶瓷砖表面进行化学处理或物理加工，增加其表面的粗糙度和摩擦力。例如，采用酸性防滑剂对陶瓷砖表面进行蚀刻处理，使瓷砖表面形成微小的凹凸纹理，从而提高防滑性能。这种处理方法不会影响陶瓷砖的美观度，同时能有效防止人们在潮湿的地面上滑倒，保障了使用者的安全。

案例七：金属屋面隔热涂层

- 在一些工业厂房和大型公共建筑的金属屋面上，常采用隔热涂层来降低室内温度。例如，某大型物流仓库的金属屋面使用了反射隔热涂层。这种涂层能够反射大部分太阳辐射热，减少热量通过屋面传入室内。同时，隔热涂层还具有良好的隔热性能，能够阻止热量在金属屋面内部的传导。通过使用隔热涂层，物流仓库在夏季室内温度可降低 5 - 8℃，有效改善了仓库内的工作环境，减少了空调等制冷设备的使用，降低了能源消耗和运营成本。

案例八：大理石墙面防护处理

- 许多高档建筑的室内装修会使用大理石墙面，为了保护大理石的美观和性能，需要进行防护处理。如某五星级酒店的大堂大理石墙面，采用了石材防护剂进行处理。石材防护剂能够渗透到大理石内部，在石材的孔隙和表面形成一层保护膜，防止污渍、水、酸、碱等物质对大理石的侵蚀。同时，防护剂还能增强大理石的耐磨性和光泽度，使大理石墙面长期保持亮丽的外观，减少了因日常使用和环境因素导致的磨损和变色，提升了酒店大堂的整体装修效果和档次。

案例九：建筑铝材阳极氧化处理

- 建筑用铝材通常会经过阳极氧化处理来提高其性能和美观度。以某写字楼的铝合金门窗为例，阳极氧化处理是在铝材表面通过电化学方法形成一层氧化膜。这层氧化膜具有硬度高、耐磨性好、耐腐蚀性强等优点，能够有效保护铝材不受外界环境的侵蚀。同时，通过控制阳极氧化的工艺参数，可以获得不同颜色和光泽度的氧化膜，满足建筑设计的多样化需求。经过阳极氧化处理的铝合金门窗不仅外观美观大方，而且使用寿命长，能够在长期的使用中保持良好的性能，降低了门窗的维护和更换成本。

案例十：地下停车场环氧地坪漆涂装

- 地下停车场的地面通常会采用环氧地坪漆进行涂装。例如，某大型商场的地下停车场，环氧地坪漆具有良好的耐磨性、耐腐蚀性和装饰性。它能够承受车辆的频繁行驶和重物的碾压，不易出现磨损、起砂等现象。同时，环氧地坪漆可以有效防止地下停车场地面受到油污、水渍等的污染，便于清洁和维护。此外，通过选择不同颜色的环氧地坪漆，可以对停车场进行区域划分和标识，提高停车场的使用效率和安全性，为车主提供一个整洁、舒适的停车环境。

案例十一：建筑外立面自清洁超疏水涂层涂装

- 在一些大型商业建筑、高档写字楼或地标性建筑的外立面，为了减少清洁维护成本和保持建筑外观的整洁美观，采用了自清洁超疏水涂层技术。这种涂层通过特殊的微观结构和化学成分，使涂层表面具备超疏水性能。当雨水或其他液体接触到涂层表面时，会形成近乎

球形的水滴，水滴在滚动过程中能够带走表面的灰尘、污垢等杂质，从而实现建筑外立面的自清洁功能。超疏水涂层显著减少了建筑外立面的清洁次数，降低了清洁成本和对环境的污染风险；保持建筑外观的持久清洁和美观，提升了建筑的整体形象和商业价值；还具有一定的耐候性和抗紫外线性能，能够延长建筑外立面材料的使用寿命，降低建筑材料的更换频率和维护费用。

十一、表面工程技术在海洋工程中的应用

案例一：海洋平台钢结构热喷涂锌铝涂层

- 海洋平台长期处于恶劣的海洋环境中，面临着严重的腐蚀问题。以南海某海洋石油平台为例，其钢结构采用了热喷涂锌铝涂层技术进行防护。热喷涂是将锌铝等金属粉末加热至熔融状态，然后高速喷射到钢结构表面，形成一层致密的涂层。锌铝涂层具有良好的耐腐蚀性，能够在海洋环境中形成一道有效的屏障，阻止海水、氧气等对钢结构的侵蚀。同时，锌铝涂层还具有一定的阴极保护作用，即使涂层局部受损，暴露的钢结构也能得到保护。这种涂层技术大大提高了海洋平台钢结构的使用寿命，减少了维修和更换成本，保障了海洋平台在服役期间的安全性和稳定性。

案例二：船舶船体防腐涂料涂装

- 船舶在海洋中航行，船体长期与海水接触，容易受到腐蚀。以一艘大型集装箱船为例，其船体采用了多层防腐涂料涂装技术。首先，在船体表面进行预处理，去除油污、铁锈等杂质，然后涂刷底漆，底漆通常含有锌粉等防锈颜料，能够提供良好的附着力和防锈性能。接着，涂刷中间漆，增加涂层的厚度和屏蔽性能。最后，涂刷面漆，面漆具有良好的耐候性和耐水性，能够抵御海水、紫外线等的侵蚀。通过这种多层防腐涂料的涂装，有效地保护了船体钢板，延长了船舶的使用寿命，减少了因腐蚀导致的船体结构损坏和维修成本。

案例三：海上风电塔筒表面涂层防护

- 海上风电塔筒处于海洋大气和海水飞溅等复杂的腐蚀环境中。以某海上风电场的塔筒为例，其表面采用了高性能的涂层防护体系。首先，对塔筒表面进行喷砂处理，提高表面粗糙度，增强涂层的附着力。然后，喷涂环氧富锌底漆，提供良好的防锈性能。中间层采用环氧云铁中间漆，增加涂层的厚度和屏蔽效果。外层则喷涂聚氨酯面漆，具有优异的耐候性和耐腐蚀性，能够有效抵御海洋环境中的盐雾、水汽和紫外线等的侵蚀。这种涂层防护体系能够确保海上风电塔筒在 20 年甚至更长的服役期内保持良好的性能，保障风电设备的安全稳定运行。

案例四：海洋管道内壁防腐涂层

- 海洋输送管道用于输送石油、天然气等介质，其内壁面临着介质腐蚀和微生物腐蚀等问题。以某海底输油管道为例，其内壁采用了环氧粉末防腐涂层。环氧粉末涂层是通过静电喷涂的方式将环氧粉末均匀地涂覆在管道内壁，然后经过高温固化形成一层坚硬、致密的涂层。这种涂层具有良好的耐腐蚀性、耐磨损性和耐渗透性，能够有效阻止石油中的酸性物质、水分和微生物等对管道内壁的侵蚀，保证管道的输送效率 and 安全性，减少了管道泄漏和维修的风险，延长了管道的使用寿命。

案例五：海洋平台桩腿阴极保护

- 海洋平台的桩腿长期浸泡在海水中，容易发生腐蚀。为了保护桩腿，常采用阴极保护技术。以渤海某海洋平台为例，在桩腿表面安装了牺牲阳极块。牺牲阳极通常采用锌合金或铝合金等材料，由于这些材料的电极电位比桩腿的钢铁材料更负，在海水中形成原电池，牺牲阳极优先发生腐蚀，从而保护了桩腿的钢铁结构。通过合理布置牺牲阳极的数量和位置，可以有效地保护桩腿在整个服役期内不受严重腐蚀，提高了海洋平台的稳定性和安全性。

案例六：船舶螺旋桨耐磨涂层

- 船舶螺旋桨在旋转过程中，不仅受到海水的腐蚀，还面临着泥沙等颗粒的磨损。以一艘远洋货轮的螺旋桨为例，其表面采用了碳化钨耐磨涂层。碳化钨涂层是通过等离子喷涂等技术将碳化钨粉末涂覆在螺旋桨表面。碳化钨具有极高的硬度和耐磨性，能够有效地抵抗泥沙等颗粒的冲刷磨损，同时也具有一定的耐腐蚀性。这种耐磨涂层提高了螺旋桨的使用寿命，减少了因磨损导致的螺旋桨性能下降，降低了船舶的燃油消耗和维修成本。

案例七：海上桥梁钢结构表面氟碳漆涂装

- 海上桥梁暴露在海洋大气和海水飞溅区等恶劣环境中，需要良好的防腐保护。以杭州湾跨海大桥为例，其钢结构表面采用了氟碳漆涂装。氟碳漆具有卓越的耐候性、耐腐蚀性和自清洁性。在海洋环境中，氟碳漆能够长期保持其性能，不易褪色、粉化和脱落。其自清洁性使得桥梁表面不易附着灰尘和污垢，保持美观的同时也减少了维护成本。氟碳漆的防腐性能有效地保护了桥梁钢结构，确保了桥梁在长期使用过程中的安全性和可靠性。

案例八：海洋观测设备表面防护涂层

- 海洋观测设备需要在海洋环境中长时间稳定工作，其表面防护至关重要。以某海洋浮标的外壳为例，采用了一种特殊的防护涂层。这种涂层具有良好的耐盐雾、耐紫外线和耐海水浸泡性能。它能够保护浮标外壳不受海洋环境的腐蚀和损坏，确保内部的电子设备正常工作。同时，涂层还具有一定的抗生物附着性能，能够减少海洋生物在浮标表面的附着，避免因生物附着导致的设备性能下降和数据误差。

案例九：海洋平台上层建筑防火涂层

- 海洋平台的上层建筑存在火灾风险，因此需要采用防火涂层进行保护。以某海洋石油平台的上层建筑为例，其钢结构表面喷涂了厚型防火涂层。这种防火涂层在遇到火灾时，能够迅速膨胀形成一层隔热层，阻止热量传递到钢结构上，延缓钢结构的升温速度，使其在一定时间内保持强度，为人员疏散和灭火工作争取时间。防火涂层的应用提高了海洋平台上层建筑的消防安全性能，降低了火灾事故对平台和人员的危害。

案例十：海水淡化设备防垢涂层

- 海水淡化设备在处理海水过程中，容易出现结垢问题，影响设备的性能和使用寿命。以某大型海水淡化厂的反渗透膜组件为例，其表面涂覆了一种防垢涂层。这种涂层具有特殊的表面性质，能够抑制海水中的钙、镁等离子在膜表面的沉积和结晶，减少结垢现象的发生。防垢涂层的应用提高了反渗透膜的透水率和脱盐率，降低了设备的清洗频率和维护成本，保证了海水淡化设备的稳定运行和高效产出。

案例十一：建筑外立面自清洁超疏水涂层涂装

- 在一些大型商业建筑、高档写字楼或地标性建筑的外立面，为了减少清洁维护成本和保持建筑外观的整洁美观，采用了自清洁超疏水涂层技术。这种涂层通过特殊的微观结构和化学成分，使涂层表面具备超疏水性能。当雨水或其他液体接触到涂层表面时，会形成近乎球形的水滴，水滴在滚动过程中能够带走表面的灰尘、污垢等杂质，从而实现建筑外立面的自清洁功能。超疏水涂层显著减少了建筑外立面的清洁次数，降低了清洁成本和对环境的污染风险；保持建筑外观的持久清洁和美观，提升了建筑的整体形象和商业价值；还具有一定

的耐候性和抗紫外线性能，能够延长建筑外立面材料的使用寿命，降低建筑材料的更换频率和维护费用。

十二、表面工程技术在天津工业大学研究特色的纺织领域的应用

1、织物方面

- **智能加热织物助力冬奥：**天津工业大学刘皓教授团队利用碳纳米管材料研发的智能加热织物，表面温度分布均匀、升温速度快、安全耐水洗、轻薄柔软。该织物可与自主研发的控温模块结合实现无线通讯和智能精确控温。团队为出征北京冬奥会的中国军团提供了智能可穿戴产品，包括加热头套 690 套、加热手套 407 套，应用于国家越野滑雪队等 5 个类别运动队，为运动员在正常训练及赛事期间保暖提供了科技保障。
- **多维编织织物守护航天员：**陈利教授团队用新一代“天工编织技术”为神舟十三号返回舱“定制”研发了耐高温多向编织增强材料。当飞船返回时与大气层剧烈摩擦产生 2000 多度高温火焰，这种增强材料可以为返回舱关键器件提供优异的结构增强与性能强化，满足返回舱关键器件的防护结构复合材料“耐高温烧蚀、坚固抗冲击”的要求，保障了航天员的安全着陆。

2、纤维方面

- **香蕉纤维混纺产品：**天津工业大学张美玲教授实验室从香蕉树茎秆中提取香蕉纤维，该纤维性能与麻相似，具有强度高、回潮率高、吸湿排湿快、抗菌性强、可生物降解等特性。将香蕉纤维与棉纤维等混合制成混纺纱，可织成床品、窗帘、沙发布等织物，为纺织材料提供了新的绿色环保选择。
- **聚苯硫醚纤维隔膜：**李振环团队开发出的低膜阻低渗氢聚苯硫醚纤维隔膜，通过材料表面改性做到“透液不透气”，是目前应用最广泛的碱性电解槽隔膜。这种亲水型聚苯硫醚纤维隔膜更适合国内大电解槽，能有效替代国外进口产品，已占据国内碱性电解槽制氢 90% 以上的份额。

3、中空纤维膜方面

- **高强度纤维织物增强中空纤维超滤膜：**王海涛教授团队研发的高强度纤维织物增强中空纤维超滤膜技术，采用“纤维铠甲”策略，即纤维织物增强 - 复合一步法制膜及膜性能调控和后

处理技术。运用立体编织、针织改良和混杂纤维编织及在线定型技术打造高强度纤维增强体，结合复合制膜一步法工艺，使膜的抗污染和机械性能大幅提升，膜断裂拉伸强力可达 300N 以上，纯水通量范围为 2000 - 4000L/(m²·h)，使用寿命长达 5 年以上，有效净化纺织印染废水。

- **同质增强型聚偏氟乙烯中空纤维膜：**肖长发教授团队发明了熔融 / 溶液在线一体化复合纺丝技术，开发出兼具熔融法高强度和溶液法高分离精度（平均孔径 28nm）、渗透通量大、吨水能耗低、适用于重度污水再生回用的同质增强型聚偏氟乙烯中空纤维膜，技术产品已在 26 个国家和地区应用。
- **多尺度结构纳米纤维凝胶隔膜：**新型纤维及非织造材料团队采用静电纺丝技术制备出包含四丁基六氟磷酸铵（TBAHP）和聚偏氟乙烯 - 六氟丙烯（PVDF - HFP）间位芳纶（PMIA）的耐高温树枝状多尺度结构纳米纤维凝胶隔膜，用于锂金属电池。该隔膜具有优异的电解液亲和力和力，使隔膜与锂负极之间表现出良好的界面相容性，能有效促进锂离子的均匀沉积 / 溶解行为，还具有较高的拉伸强度和优异的热稳定性，保证了所组装电池的实用安全性。
- **智能屏障反渗透膜：**针对印染行业中水回用领域反渗透膜频繁清洗后性能衰减的困境，王海涛教授团队从支撑层和分离层制备调控入手，采用 NIPS 法制备高稳定均匀孔径聚砜支撑膜，耦合预定量涂布、二次界面聚合和表面功能化接枝改性等方法，制备出的反渗透膜平均膜通量≥45L/(m²·h)，对 NaCl 脱盐率 3 年内保持 97% 以上，膜污染速率较传统膜降低 20% 以上，系统水回用率达到 65% 以上，显著提升了反渗透膜的稳定性和抗污染能力。
- **PVDF 中空纤维膜亲水改性：**魏俊富等通过高能电子束辐照接枝的方法，在丙烯酸羟乙酯 / 水的混合溶液中，将丙烯酸羟乙酯（HEA）单体引入到 PVDF 中空纤维膜，对其表面进行亲水改性。改性后 PVDF 中空纤维膜表面的亲水性能得到明显改善，接枝率为 3.47% 时纯水通量增大至 372.69L/（m²·h），比原膜的纯水通量增加了 191%，膜表面接触角明显下降，吸水率显著提高。
- **智能化与模块化膜装备用中空纤维分离膜：**王亮教授团队研发的高性能中空纤维分离膜，是智能化与模块化膜装备的核心产品，实现了国产替代。该产品可用于饮用水提纯、垃圾渗滤液处理等领域，相关团队正致力于研发更高强度、更高分离精度和更高分离效率的中空纤维分离膜产品，以摆脱国外技术掣肘。