铸件表面缺陷常用挽救技术及其适用性

钱翰城[1],王公平[2],赵建华[1]

（1 重庆大学，重庆 400044；2 重庆铸造行业协会，重庆 ）

摘要：文章指出了铸件挽救工程的意义，介绍了铸件表面缺陷常用挽救技术：电弧冷态焊、电弧热态焊、氧炔焰冷焊及热焊、液膜溶解扩散焊、高分子化学冷粘补、电火花微弧放电焊、电弧堆焊、氧-乙炔堆焊及热喷涂等技术及其适用性。

关键词：铸件表面缺陷；挽救工程；适用性

1 前言

随着我国经济的起飞，铸造业也与时俱进。图 1 是我国 GDP 近十年的增长情况图，到 2008 年已达到 30 万亿左右，十年来增长了 3 倍。图 2 是中、美及全世界近 7 年铸件产量图（万吨）。从图可见铸件产量逐年增长，2008 年已达到 3350 万吨。由于铸件各种品种的产量不同，难以精确估计其产值，大致产值在 1800 亿元～2500 亿元左右，大约占国民经济 GDP 的 0.6%～0.8%左右。

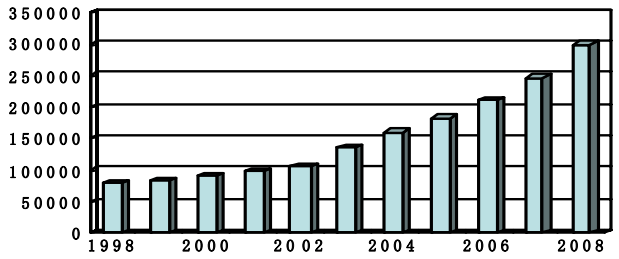


图 1　中国近十年 GDP 值(亿元）

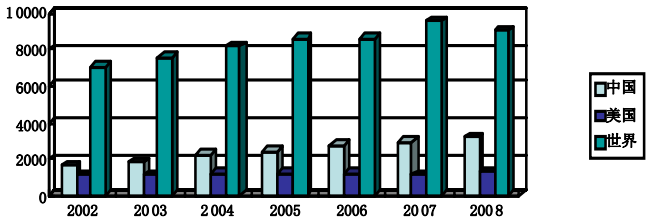


图 2　中、美及全世界近 7 年铸件产量图（万吨）

从图 2 可见，到 2008 年，我国铸件产量已是美国的 1.4 倍多，在全世界铸件总产量中的比重亦逐年增加，目前已占世界铸件总产量的 36%左右。已是名符其实的铸造大国，在某些指标上也已经进入强国行列。但在很多技术、经济指标方面还有一段长路要走。我们必须针对性地提出这些差距，并制订出相应的措施。

例如：在综合技术经济指标方面，全员劳动生产率、铸件的废品率、吨铸件能耗等；在质量指标方面，相对强度与相对硬度、薄壁铸件的最小壁厚、厚壁铸件的硬度均匀性，以及尺寸公差、形位公差、表面粗糙度、重量公差等；铸造生产的绿色化程度及铸造生产管理水平等，尚有一定的差距。这是我们铸造工作者需努力奋斗的目标。

2 铸件挽救工程概述

2.1 铸件挽救工程的定义

铸件挽救工程是指将有缺陷的铸件毛坯、在制品及模具等进行修复，使之成为合格品或恢复其使用功能的技术。它是集物理、化学、材料冶金、化工及机械电子等各种基础及应用基础学科知识而成的一门综合性应用技术。也可以称为工程医疗技术。

2.2 铸件挽救工程的意义

2.2.1 直接经济意义

前已述及，目前我国铸件年产量已达 3350 万吨左右，但由于企业在技术、管理、规模等方面参差不齐，不良品率相差较大。以保守的估计，全国铸件平均不良品率应在 10%以上（含内外废），照此计算，年不良品铸件至少在 300 万吨以上。而全世界铸件产量超过 300 万吨的国家亦寥寥可数，损失是相当巨大的。因此，对这部分不良品进行挽救是理所当然的。我们习惯将铸件挽救的意义与人类的医疗制度相比，人类（乃至其它生命体）生病需要医治，铸件出了缺陷当然也可以允许修复，这是常理。经过这二十年的发展，现在已经很少有人怀疑这一观点了。当然，经挽救后的铸件必须要达到与原铸件相似的性能，并能满足在服役条件下的考核。目前，已有一些企业在制订这些检验及验收标准。

同时还应指出，一部分缺陷是在加工过程中发现的，如机床床身导轨面等，常常在加工后出现较小的气孔、缩孔及缩松等缺陷。此时铸件已经增值，弃之更为可惜。

此外，模具的修复也是挽救工程的重要领域之一。模具在加工过程中出现尺寸超差或碰伤，在使用过程中出现磨损、刮伤等缺陷，由于模具属高值产品，且制造周期较长，也必须进行修复。

还有一部分耐磨件、耐热、耐蚀等特种铸件，在使用过程中经磨损后尺寸超差，亦需进行修复。

可见挽救工程的经济意义是十分巨大的。

2.2.2 绿色化意义

经过三十年的改革开放，我国的工业化速度令全世界瞩目，但同时对环境也造成了严重的损害。水中有害化工排放物及重金属等污染，大气中 CO_2、SO_2 及有害氮氢化物的污染，粉尘污染，塑料等固体废弃物污染，目前已成为公害。国家及人民均已严重关切。国家有关部门已制订出各项控制污染的法律、法规，对老企业加以整改，对新企业严格环保验收。

绿色化生产有两重含义：一是清洁化生产，即在生产过程中严格控制固、液、气体排放物对环境的污染；二是在生产过程中使生产等量产品时的能源、物质达到最优利用率。尽量延长人类在地球上的生存时间。

众所周知，人类生存的地球质量是有限的，我们赖以生存的各种资源也是有限的，能源也是有限的，总有一天会达到消耗殆尽的地步。常用的铁、铝、铜、镍、锌等金属地球储量如表 1 所示。以现有的消耗速度计算，大约不出千年，即将告罄。在世界工业化以前的数千年中，人类基本上是进行着绿色化生产，没有对大自然过多的索取和损害。而现在则不然，大规模、高速度地对大自然索取和损害，这不能不令人担心。

表 1　种常用金属的资源储量和资源寿命

元素	1984 年		1988 年		1990 年		1994 年	
	储量（t）	寿命（年）	储量（t）	寿命（年）	储量（t）	寿命（年）	储量（t）	寿命（年）
Fe	6.5×10^{10}	130	1.53×10^{11}	167	1.51×10^{11}	175	6.5×10^{10}	71
Al	2.0×10^{11}	250	2.18×10^{11}	224	2.18×10^{10}	200	2.3×10^{10}	216
Ni	5.2×10^{7}	70	5.4×10^{7}	65	4.9×10^{7}	52	4.7×10^{7}	55
Cu	5.0×10^{8}	71	3.5×10^{8}	41	3.2×10^{8}	36	3.1×10^{8}	33
Zn	2.43×10^{8}	40	1.47×10^{8}	21	1.44×10^{8}	20	1.4×10^{8}	19

在能源方面，也具有相同的趋势，特别是燃料能源，如石油、天然气及煤炭，它是我国能源的主力，以石油而言，如按目前的消耗速度，则不出 50 年，即将陷入危机。因此，目前我们除节约能源外，必须开发新能源。如风能、水能太阳能、地热能以及原子能。应该说核能（原子能）是非常有前途的能源之一，我国近十五年将建造大约 36 座核电站，改变我国能源的结构。

如前分析，物质和能源的快速消耗，对地球人的生存已构成严重危机。怎么办？目前的最优方案是进行绿色化生产，在绿色化生产中的一个重要措施是循环生产，挽救工程正符合这一理念。它将废弃的铸件、零件进行修复再利用，既节约了物质又节约了能源。因此，挽救工程是循环型生产的一种方式。其框图如图 3 所示。它符合绿色化生产的原则。

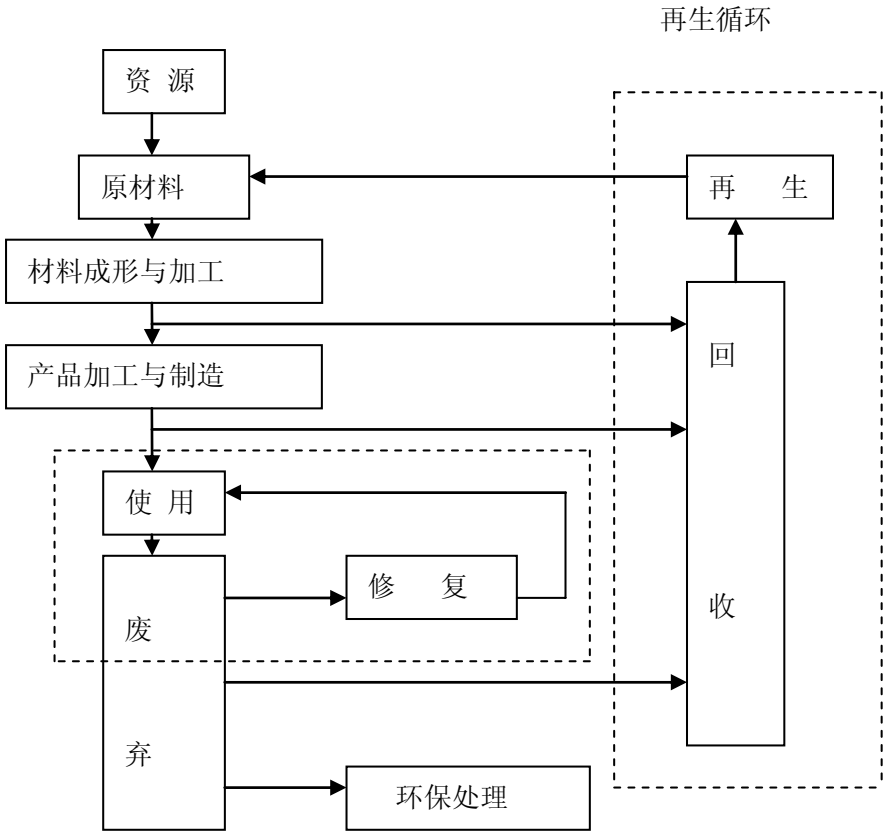


图 3　循环型生产框图

这一框图是一个开口的循环系统，即在入口端不断补充生产产品的物质，在每个工艺节点不断进行不良品挽救，使之进入正常流程；另一方面又对加工后的废料及废品进行及时的回收、再生，使其回到原材料系统。

3 表面缺陷修复的常用技术

3.1 电弧冷态焊

该技术是铸件在常温下进行电弧焊修复。由于待焊铸件处于冷态，焊补后冷却速度较快，铸件在冷却过程中很易出现渗碳体等硬脆相，造成加工困难，故在焊条材质、施焊工艺等方面应特别注意。对铸铁件冷焊而言，常用的焊条、工艺及焊缝性能如表 2 所示。

表 2　铸铁焊条电弧冷焊特点

焊条牌号	焊缝金属	电源种类	焊缝硬度	熔合区白口宽度（正常规范）	
				单层	二层
Z100	碳钢	交、直流	HB400	0.8	--
Z116	高钒钢	直流(反接)或交流	HB200～250	0.3	0.15～0.2
Z117	高钒钢	直流(反接)	HB200～250	0.3	0.15～0.2
Z308	镍	直流(正接)或交流	HB160～170	0～0.2	0～1.5
Z408	镍铁合金	直流(正接)或交流	HB200～230	0～0.2	--
Z508	镍铜合金	直流(正接)或交流	HB130～150	0～0.2	--
Z607	铜铁混合物	直流(反接)	--	0.8	--
Z612	铜铁混合物	交、直流	--	--	--

铸铁冷焊的关键问题是熔合区及热影响区硬度的控制，一般说来，如果采用 Z308、Z408、Z508 等纯镍、镍基焊条，在熔合区的硬度可控制在 HB220 以下，但在界面及热影响区有时会达到 HB220～HB240 左右，造成加工性能下降。目前应用较广泛的焊条是 Z308、Z408、Z508 焊条。从焊缝强度及经济性等方面考虑，一般推荐 Z408 及 Z508 焊条。配用工艺参数如表三所示。

表 3　镍基铸铁焊条电流选择

焊条直径（mm）	2.5	3.2	4.0
焊接电流（A）	60～80	90～100	120～150

电弧冷焊工艺的操作要点是：

1）焊前准备

用风铲、扁铲和砂轮等工具，将缺陷中的砂子、氧化皮、铁锈等杂质清除干净，直至露出金属光泽为止。若有油污应用气焊火焰烧掉，以免产生气孔。

如果缺陷是裂纹，应找准裂纹的全长，并在裂缝末端钻Φ4～Φ6mm 的止裂孔。

坡口多用 U 型，因 U 型比 V 型的熔化比小，如果缺陷较大，可按缺陷形状制备镶块。镶块一般是厚 2～3 mm的低碳钢板。为减少焊接应力，可将镶块制成弧形或在板上开一缺口。

焊补缺陷体积大、焊接层数多和受力较大、要求强度高的铸铁工件时，为加强焊缝和母材的结合，防止焊缝剥离，可采用栽丝法和垫板焊接法。

2）焊接

（1）电流和极性　应尽量取小电流以防止接头过热并减少熔深。电流范围，可根据各种焊条的特点选用，极性对熔深有明显影响。

（2）每道焊缝长度要短　对较薄工件（δ=5～10 mm），一般每道焊缝长不超过 10～15 mm，对厚壁工件不超过 30～50 mm。

（3）断续焊　焊接速度要快，每道焊缝焊后待冷却至较低温度时，再焊下一道。

（4）分段焊　每段焊道的位置应分散分布。

（5）捶击焊缝金属　每焊一道，要立即用小圆角的尖头小锤迅速捶击焊缝金属，使焊缝产生塑性变形松弛焊接应力。捶击方向应垂直坡口表面，用力适中，以焊缝金属呈麻点状为宜。

电弧冷焊适合于钢、铁材质中大批量生产，缺陷尺寸在Φ50 mm×50 mm以下，深度≤15 mm的情况，其特点是不用预热，节省能源且劳动条件较好。

3.2 电弧热态焊

电弧热焊是将铸件加热至 600℃左右进行施焊，与冷焊相比其优点是焊后冷速较慢，不易出现渗碳体

等硬脆相，硬度易于控制。且可用廉价的铁基材质焊条，如 Z208(C=3.0 Si=4.0 余铁)、Z238(C=3～4 Si=2～3 余铁)、Z238F(C=3.2 Si=4.0 Mn=0.5 余铁)、Z238SnCu(C=3.5～4.0 Si=3.5 Mn=0.8 Sn Cu 少量 余铁)、Z248(C=3.5 Si=3.0 余铁)等焊条。

电弧热焊运用于大批量修复尺寸较大的缺陷。

3.3 氧炔焰冷焊及热焊

氧炔焰冷焊与电弧冷焊的差别是其热输入速度较慢，故熔池的热影响区相对较小。如果采用直径较小的焊条，且控制火焰的温度及在弱还原性气氛下施焊，则可以将硬度控制在较理想的范围。

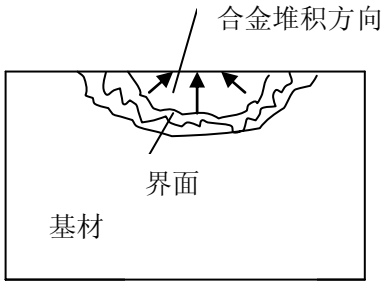
如果用气冷焊仍然导致焊补区硬度较高，则可使用热态焊。一般说来，气焊适合于毛坯件上中、小缺陷的修复，以及经加工后暴露出来的浅层缺陷的修复。

气焊的特点之一是需将修复面打磨干净，以免引起夹渣等缺陷。

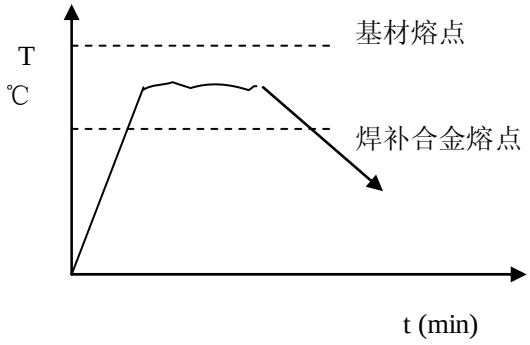
3.4 液膜溶解扩散焊

无论是电弧焊或气焊，均属熔焊范畴，即在焊接时将基材与焊材同时进行熔化混合，之后凝固而形成接头，这一工艺导致熔合区、热影响区与基材的硬度不均，尤其对于铸铁材质而言，熔体在快速冷却时，将呈亚稳系凝固，从而出现渗碳体等硬脆相。而在热影响区也将由于冷速不同而出现铁素体、珠光体不同比例含量而导致硬度不同。甚至会出现二次渗碳体及其它高硬度针状相。因此，铸铁件的冷焊焊补一直存在着这一问题。

为解决这一问题，我们在 1985 年左右提出了液膜溶解扩散焊的设想，即在施焊时，使焊材熔化而铸件界面则未熔化。熔化的焊材逐渐将铸件界面“溶解”，然后凝固形成牢固的接头，其工艺原理如图 4 所示。



a）工艺示意



b）温度曲线

图 4　溶解扩散焊工艺原理

溶解扩散焊，是依靠液相焊材与固相基材之间的溶解扩散而形成牢固结合层的连接技术。与熔焊工艺相比，溶解扩散焊热量输入较小，变形及裂纹倾向小。与喷涂、刷镀及粘接等工艺相比，其连接层为冶金

结合，具有强度高、抗腐蚀性能好等优点。特别是由于在施焊过程中基材不熔化，对铸铁材质来说，可以避免形成共晶渗碳体，从而可以保证连接部位的加工性能，外观色泽也与母材基本一致。因此，此工艺特别适合于铸铁件加工面上缺陷的挽救。同时对钢基、铜基材质工件的挽救也同样适用。该技术已列为国家级科技成果重点推广项目，在国内一大批企业中获得应用，取得了显著的经济效益与社会效益。

溶解扩散焊是以氧-乙炔为热源，将特制的合金粉末通过专用焊炬喷着在经过清理的工件表面上，在工件基体金属不熔化的情况下，加热粉层，使之成为液膜润湿在工件缺陷表面上，同时与固态工件表面相互溶解和扩散，如此重复这一工艺过程，直至缺陷填满，最后获得一牢固结合的接头。由于基体金属并未熔化，故不会出现渗碳体之类的硬化相。

溶解扩散焊过程包括以下三个阶段：表面液膜的形成；液膜原子向基材扩散及基材原子向液膜内溶解与扩散；液相的凝固。

铸铁基材中除铁以外主要包含碳、硅元素，而焊材中主要为镍元素。由于铁和镍的原子半径较大，在固相基材中的扩散较弱，主要是表面上液相原子对基材原子的溶蚀。碳和硅由于原子半径较小，除表面扩散外还存在着体扩散。

溶解扩散焊中的扩散过程属于非稳态扩散，可近似地用菲克第二定律描述，即

$$\frac{dc}{dt} = D\frac{d^2c}{dx^2} \qquad (1)$$

式中：c ——扩散物质的浓度；

t ——扩散时间；

D ——扩散系数；

x ——扩散距离。

扩散通量除与扩散物质浓度梯度的导数有关外，还与扩散系数有关，而扩散系数与温度之间遵循下列关系

$$D=D_0\exp(-Q/RT) \qquad (2)$$

式中：D_0——扩散因子，它与晶格类型有关，也与原子振动频率有关；

Q ——扩散激活能；

R ——气体常数；

T ——温度。

从式（1）、式（2）可知，扩散激活能越高，扩散越不易进行。对于金属，存在着三种形式的扩散：体扩散、沿晶界的扩散和沿表面的扩散。激活能在体扩散时具有最大数值，而沿晶界的扩散和沿表面的扩散中，激活能要小一些，即 $Q_{表面}<Q_{晶界}<Q_{体}$。因此，扩散易在表面及晶界优先进行。扩散受温度影响较大，温度越高扩散过程进行得越快，连接层亦越厚。但在铸铁缺陷修复时，加热温度应以铸铁基材不熔化为上限。一般将加热温度控制在铸铁的熔点及焊材熔点之间，约 950～1100℃。较为适宜。

我们对几种不同的材质的试样，在加工后试样的标距段内，人工制造一 V 形缺陷，缺陷深度为试样直径的 1/2～2/3，将试样焊补好，精加工尺寸到位后进行拉伸试验。其抗拉强度如表。从表中可知，焊补后的普通灰铸铁和球铁试样，最后断裂均发生在基材本体，说明焊补处强度高于铸铁本体的强度。当焊补低合金钢时，断裂发生在基材或焊补处，焊补强度可达 760～810MPa。如此高的强度，说明焊接接头处形成了冶金结合。表 4 为灰铸铁、球铁及 40 Cr 钢用液膜溶解扩散焊工艺焊补后的强度值。

表 4　焊补试样的抗拉强度

式样材质	缺陷深度	σ_b(MPa)	断口位置
HT200	1/2d	232	基材
	2/3d	228	基材
HT250	1/2d	279	基材
	2/3d	294	基材
QT450-10	1/2d	478	基材
	2/3d	460	基材
QT500-7	1/2d	545	基材
	2/3d	532	基材
40Cr	1/2d	812	焊补界面
	2/3d	767	基材

注：每组数据为 3 根试样的平均值

3.5 高分子化学冷粘补技术

高分子化学冷粘补技术与普通的粘补技术不同，它是以高分子聚合物与多种金属粉末组成的双组分或多组分材料粘合剂。经混合而使高分子材料充分与金属粉末互相扩散并进行分子间反应，形成分子间化学连接，在常温状态下即可硬化成形。在修复处形成强有力的连接，其涂层可厚达数十毫米，且不易脱落。因此，可以修复较大的缺陷，甚至大面积拉伤等缺陷。并具有较高的抗压强度、耐磨性和较低的膨胀系数和抗低温性能。当然，由于其不是金属的冶金结合，以及高分子材料与金属性能之间的差异，一般常应用于承受静态载荷零件缺陷的修复，例如机床导轨表面缺陷的修复。而避免应用于承受冲击载荷、交变疲劳载荷等动态载荷的机件。此法在修复工程中也得到了较广泛的应用。

3.6 电火花微弧放电焊技术

由上所述，电弧焊技术是连接、修复及领域中应用最广泛的技术。它有功效高、连接强度高等一系列的优点。但由于其形成瞬时高温熔池，使焊补处在冷却过程中形成亚稳相，造成硬度不均色泽差异等缺点。特别对铸铁件来说更难适应。因此，常采用热焊等方法解决。但对于加工后发现的缺陷以及尺寸超差等的挽救始终存在不足之处。因此，人们开始改变思路，既然用高功率密度快速熔焊的方法难以达到硬度均匀、变形小、色泽均匀等目的，就反过来采用微分逐层堆积法，使焊点外基体金属的温度始终保持在相变温度之下，这样就不会造成高温熔池带来的激冷效果，从而使焊点组织保持不变，硬度及色泽均匀。

电火花微弧放电修复的工艺原理是利用电源储能并进行放电，使其在金属电极与母材之间的空气电离，形成放电通道，进而在母材表面产生瞬间高温、高压微区，同时使离子化的电极材料在微电场的作用下熔渗入母材，形成准冶金结合。我们说其为准冶金结合，是因为该工艺并未形成母材与焊材的混合熔池，只存在表层的互渗结合。此工艺最早用于涂层加工、拉毛、点焊等方面，后来经逐步发展及改进，提高其输出功率，同时采用氩气保护，免致焊接界面氧化，并加速散热，减小其热影响区等措施，目前已用于铸造缺陷的修补。

电火花微弧放电修复设备是近年来进入应用领域较早的技术，它是利用焊材与基材之间的电火花放电，将焊材逐步堆积到修补缺陷内，形成能量作用于表层输入，焊材微堆积的效果，最终将缺陷填满。此法的优点是变形小（或无），结合强度较高，对环境基本无影响。其不足之处是修补质量与操作人员的水平也有一定相关性。此外，由于输入功率密度较低，一般功率在 2000～9000 W 左右，故修补功效较低，一个Φ5 ㎜×5 的孔洞的修补时间大约为 30～60 分钟左右。适宜于机床导轨等高值机件加工后表面缺陷的修复。如采用吹氩操作，功效略有提高。

但电火花微弧放电修复法也存在某些局限，即由于其为微分式堆焊，工艺时间较长，故对于局部小缺陷较合适，如加工后出现的缺陷及模具缺陷的修复。而对大规模生产中出现的大中型缺陷受到限制。

3.7 电弧堆焊、氧-乙炔堆焊及热喷涂

堆焊一般用于耐磨、耐热、耐蚀等功能表面的加工。例如：衬板、筛板、高温炉构件、耐磨泵构件等。堆焊可用多种耐磨、耐热、耐蚀合金焊条经电弧焊方式堆积在铸件或零件表面，也可由各种合金材料及粉末经气焊或喷焊的的方式堆积于铸件或零件表面。堆焊层一般较厚，可根据用途及工艺要求来选择。

如果所要求的功能层较薄，可采用热喷涂工艺，热喷涂工艺用来形成表面功能层已十分广泛，有一般氧炔焰热喷涂，超音速热喷涂，等离子喷涂，以及电弧喷涂等不同方法。一般说来，喷涂层较薄，且涂层抗铲括及冲击载荷的性能较差，一般要求全包覆，且在均匀载荷下工作。

4 各种挽救方法的适用范围

● 对于尺寸较大的缺陷，可采用电弧焊修复的方式。如果是大批量流水线生产，不妨用热态电弧焊，也可用冷态电弧焊；

● 对于尺寸较小的缺陷（Φ30 ㎜×10 ㎜），可采用专用焊条＋气焊的方式，或溶解扩散焊方法修复。尤其是加工后出现的缺陷，这两种方式更为合适；

● 如果对硬度均匀性的要求很高，缺陷尺寸又不是很大（一般在Φ10 ㎜×5 ㎜以下）的铸铁材质，可采用电火花微弧放电焊的方法，可用同质焊条或专用焊条。

● 对非重要加工面上的缺陷，可以采用以高分子材料为基材的粘补工艺；

● 渗漏缺陷的修复，可采用浸渗技术或局部刷涂浸渗剂工艺；

● 对零件功能层磨损的修复，可采用电弧堆焊、气焊堆焊或喷焊，以及热喷涂工艺；

● 对传动件（轴及套类）的精度修复，可用刷镀技术或喷涂技术；

● 对铝合金铸件表面缺陷的修复，可采用氩弧焊及专用修补机；

● 对模具尺寸超差及磨损等缺陷，可采用液膜溶解扩散焊及氩弧焊等工艺，填补后再进行精加工。

5 结束语

本文仅介绍了铸件表面缺陷常用的修复方法及其适用范围，且主要是针对铸铁及铸钢材质。限于篇幅，对于铝合金常用的氩弧焊等未作详细介绍。渗漏修复技术亦未作介绍。最后，还应提醒一下，目前尚不存在一种万能的技术，能适应所有种类缺陷的修复，必须根据具体情况选用合适的工艺。