

	常见金属材料焊接	试述中碳钢焊接工艺关键点。	(1)预热 预热有利于减低中碳钢热影响区最高硬度，预防产生冷裂纹，这是焊接中碳钢关键工艺方法，预热还能改善接头塑性，减小焊后残余应力。通常，35 和 45 钢预热温度为 150～250℃含碳量再高或因厚度和刚度很大，裂纹倾向大时，可将预热温度提升至 250～400℃。 若焊件太大，整体预热有困难时，可进行局部预热，局部预热加热范围为焊口两侧各 150～200mm。(2)焊条 条件许可时优先选择碱性焊条。(3)坡口形式 将焊件尽可能开成 U 形坡口式进行焊接。假如是铸件缺点，铲挖出坡口外形应圆滑，其目标是降低母材熔入焊缝金属中百分比，以降低焊缝中含碳量，预防裂纹产生。(4)焊接工艺参数 因为母材熔化到第一层焊缝金属中百分比最高达 30%左右，所以第一层焊缝焊接时，应尽可能采取小电流、慢焊接速度，以减小母材熔深。(5)焊后热处理 焊后最好对焊件立即进行消除应力热处理，尤其是对于大厚度焊件、高刚性构件和严厉条件下（动载荷或冲击载荷）工作焊件更应如此。消除应力回火温度为 600～650℃。 若焊后不能进行消除应力热处理，应立即进行后热处理。
			(1)焊接性 当高碳钢碳质量分数大于 0.60%时，焊后硬化、裂纹敏感倾向更大，所以焊接性极差，不能用于制造焊接结构。常见于制造需要更硬度或耐磨部件和零件，其焊接工作关键是焊补修复。(2)焊条选择 因为高碳钢抗拉强度大全部在 675MPa 以上，所以常见焊条型号为 E7015、E6015，对构件结构要求不高时可选择 E5016、E5015 焊条。另外，亦可采取铬镍奥氏体钢焊条进行焊接。(3)焊接工艺 1）因为高碳钢零件为了取得高硬度和耐磨性，材料本身全部需经过热处理，所以焊前应优异行退火，才能进行焊接。 2）焊件焊前应进行预热，预热温度通常为 250～350℃以上，焊接过程中必需保持层间温度不低于预热温度。 3）焊后焊件必需保温缓冷，并立即送入炉中在 650℃进行消除应力热处理。
2	常见金属材料焊接	试述高碳钢焊接工艺关键点。	(1)预热 预热是预防裂纹有效方法，而且还有利于改善接头性能。但预热线会恶化劳动条件，使生产工艺复杂化，过高预热温度还会降低接头韧性。所以，焊前是否需要预热和预热温度确实定应依据钢材成份（碳当量）、板厚、结构形状、刚度大小和环境温度等决定。(2)焊接线能量选择 含碳低热轧钢（09Mn2、09MnNb 钢等）和含碳量偏下限 16Mn 钢焊接时，因为这些钢淬硬、脆化等倾向小，所以对焊接线能量没有严格限制。焊接含碳量偏高 16Mn 钢时，为降低淬硬倾向，焊接线能量应偏大一点。对于含 V、Nb、Ti 钢种，为降低热影响区粗晶脆化所造成不利影响，应选择较小焊接线能量。如 15MnVN 钢焊接线能量应控制在 40～45kJ/cm 以下。 对于碳及合金元素含量较高而屈服点为 490MPa 正火钢（如 18MnMoNb 钢等），因淬硬倾向大，应选择较大焊接线能量，但当采取焊前预热时，为了避免过热倾向，能够合适地降低线能量。(3)后热及焊后热处理 后热是指焊接结束或焊完一条焊缝后，将焊件立即加热至 150～250℃范围内，并保温一段时间，使接头中氢扩散逸出，预防延迟裂纹产生。 对于厚壁容器、高刚性焊接结构和部分在低温、耐蚀条件下工作构件，焊后应立即进行消除应力高温回火，其目标是消除焊接残余应力，改善组织。 焊后应立即进行高温回火焊件，无需再进行后热处理。
			16Mn 钢属于碳锰钢，碳当量为 0.345%～0.491%，屈服点等于 343MPa（强度等级属于 343MPa 级）。16Mn 钢合金含量较少，焊接性良好，焊前通常无须预热。但因为 16Mn 钢淬硬倾向比低碳钢稍大，所以在低温下（如冬季露天作业）或在大刚性、大厚度结构上焊接时，为预防出现冷裂纹，需采取预热方法。不一样板厚及不一样环境温度下 16Mn 钢预热温度，见表 8。 16Mn 钢手弧焊时应选择 E50 型焊条，如碱性焊条 E5015、E5016，对于不关键结构，也可选择酸性焊条 E5003、E5001。对厚度小、坡口窄焊件，可选择 E4315、E4316 焊条。 表 8 焊接 16Mn 钢预热温度 焊件厚度 （mm） 不一样气温下预热温度计（℃） 16 以上 不低于－10℃不预热，－10℃以下预热 100～150℃ 16～24 不低于－5℃不预热，－5℃以下预热 100～150℃ 25～40 不低于 0℃不预热，0℃以下预热 100～150℃ 40 以上 均预热 100～150℃ 16Mn 钢埋弧焊时 H08MnA 焊丝配合焊剂 HJ431（开 I 形坡口对接）或 H10Mn2 焊丝配合焊剂 HJ431（中板开坡口对接），当需焊接厚板深坡口焊缝时，应选择 H08MnMoA 焊丝配合焊剂 HJ431。 16Mn 钢是现在中国应用最广泛低合金钢，用于制造焊接结构 16Mn 钢均为 16MnR 和 16Mng 钢。
4	常见金属材料焊接	试述 16Mn 钢焊接工艺。	18MnMoNb 钢屈服点等于 490MPa（属于 490MPa 级钢），因为碳及合金钢元素含量全部较高，所以淬火硬倾向及冷裂倾向均比 16Mn 钢大。焊接工艺关键点： 1）除电渣焊外，焊前对焊件应采取预热方法，预热温度控制在 150～180℃。对于刚度较大接头，预热温度应提升至 180～230℃。焊后或中止焊接时，应立即进
5	常见金属材料焊接	试述 18MnMoNb 钢焊接工艺。	

行 250~350℃ 后热处理。 2) 焊接材料选择, 见表 7。

		3) 为确保接头性能和质量, 应合适控制焊接线能量, 如手弧焊时, 焊接线能量应控制在 24kJ/cm 以下; 埋弧焊时, 焊接线能量应控制在 35kJ/cm 以下。但焊接线能量不能过小, 不然焊接接头易出现淬硬组织和降低韧性。同时, 层间温度应控制在预热温度和 300℃ 之间。 4) 焊后应进行热处理。电渣焊接头热处理方法是 900~980℃ 正火加 630~670℃ 回火。手弧焊及埋弧焊接头进行消除焊接残余应力高温回火处理, 回火温度比通常钢材回火温度低 30℃ 左右。 工作温度等于或低于 -20℃ 低碳素结构钢和低合金钢称为低温用钢, 其牌号及成份, 见表 9。对低温用钢关键要求是应确保在使用温度下含有足够塑性及抵御脆性破坏能力。 表 9 低温容器用钢牌号及成份 钢 号 化学成份 (质量分数) (%) C Mn Si V Ti 16MnDR ≤0.20 1.20~1.60 0.20~0.60 0.04~0.10 0.03~0.08 09MnTiCuREDR ≤0.12 1.40~1.70 ≤0.40 09Mn2VDR ≤0.12 1.40~1.70 0.20~0.05 06MnNbDR ≤0.07 1.20~1.60 0.17~0.37 钢 号 化学成份 (质量分数) (%) Cu Nb RE S P ≤ 16MnDR 0.20~0.40 0.02~0.05 0.15(加入量) 0.035 0.035 09MnTiCuREDR 0.035 0.035 09Mn2VDR 0.035 0.035 06MnNbDR 0.03 0.03 "低温用钢因为含碳量低,淬硬倾向和冷裂倾向小, 所以焊接性良好。焊接时, 为避免焊缝金属及热影响区形成粗晶组织而降低低温韧性, 要求采取小焊接线能量, 焊接电流不宜过大, 宜用快速多道焊以减轻焊道过热, 并经过多层焊重热作用细化晶粒, 多道焊时要控制层间温度不得过高, 如焊接 06MnNbDR 低温用钢时, 层间温度不得大于 300℃。" 焊接低温用钢焊条, 见表 10。 表 10 焊接低温用钢焊条 焊 条 牌 号 焊条型号 主 要 用 途 J506G E5016G 焊接 -40℃ 工作 16MnDR 钢 J507GR E5015G W707 TW70-7Cu 焊接 -70℃ 工作 09Mn2V 及 09MnTiCuRe 钢 W707Ni E5515C1 焊接 -70℃ 工作低温钢及 2.5%Ni 钢 W907Ni E5515C2 焊接 -90℃ 工作 3.5%Ni 钢 W107Ni TW10-7Cu 焊接 -100℃ 工作 06MnNb、06AlNbCuN 及 3.5%Ni 钢 低温用钢焊后可进行消除应力热处理, 以降低焊接结构脆断倾向。 高温下含有足够强度和抗氧化性钢称为耐热钢, 以 Cr、Mo 为关键合金元素低合金耐热钢, 基体组织是珠光体 (或珠光体+铁素体) 称为珠光体耐热钢, 常见钢号有 15CrMo、12CrMoV、12Cr2MoWVTiB、14MnMov、18MnMoNb、13MnNiMoNb。 因为珠光体耐热钢中含有一定量 Cr、Mo 和其它部分合金元素, 所以热影响区会产生硬脆马氏体组织, 低温焊接或焊接刚性较大结构时, 易形成冷裂纹。所以在焊接时应采取以下几项工艺方法: (1)预热 预热是焊接珠光体耐热钢关键工艺方法。为了确保焊接质量, 不管在定位焊或正式施焊过程中, 焊件全部应预热并保持为 80~150℃ 用氩弧焊打底和 CO2 气体保护焊时, 能够降低预热温度或不预热。 (2)焊后缓冷 焊后应立即用石棉布覆盖焊缝及热影响区, 使其缓慢冷却。 (3)焊后热处理 焊后应立即进行高温回火, 预防产生延迟裂纹、消除应力和改善组织。焊后热处理温度应避免在 350~500℃ 温度区间内进行, 因珠光体耐热钢在该温度区间内有强烈加热脆性现象。多个常见珠光体耐热钢焊后热处理温度见表 11。 表 11 珠光体耐热钢焊后热处理温度 钢 号 需热处理厚度 (mm) 焊后高温回火温度 (℃) 15CrMo >10 680~700 12Cr1MoV >6 720~760 20CrMo 任何厚度 720~760 12Cr2MoWVB 任何厚度 760~780 12Cr3MoVSiTb 任何厚度 740~780 常见多种熔焊方法, 全部能够适用于焊接低碳调质钢。其焊接工艺以下: (1)焊前预热 当板厚较小或接头拘束度也较小时, 焊前可不进行预热, 如 15MnMoVN、14MnMoNbB 钢。当板厚小于 13mm 时, 通常采取不预热施焊。伴随板厚增加, 为了预防产生冷裂纹, 必需进行预热, 不过必需严格控制预热温度, 因为过高预热温度会使热影响区冷却速度过于缓慢, 使热影响区强度下降, 韧性变坏。 多个低碳调质钢最低预热温度, 见表 14。许可最高预热温度和表中最低值相比, 不得大于 65℃。若有可能, 可采取低温预热加后热或不预热, 只采取后热方法来预防低碳调质钢产生冷裂纹, 能够减轻或消除过高预热温度对热影响区韧性损害。 表 14 低碳调质钢最低预热温度 (℃) 焊件厚度 (mm) 15MnMoVN 14MnMoNbB <13 不预热 不预热 13~16 50~100 100~150 16~19 100~150 150~200 19~22 100~150 150~200 22~25 150~200 200~250 25~35 150~200 200~250 (2)焊接材料 为预防产生冷裂纹, 所以必需严格控制焊接材料中含氢量, 要求所使用焊条必需是低氢型或超低氢型, 焊前应严格按照要求进行烘干、贮存。用于 CO2 气体保护焊 CO2 气体应符合 GB6052—85 中要求 I 级气体或 II 级 1 类气体要求。 焊接低碳调质钢推荐用焊接材料, 见表 15。 表 15 焊接低碳调质钢推荐用焊接材料 钢 号 手弧焊 熔化极气体保护焊 焊 条 焊 丝 保护气体 (体积分数) (%) HQ70A E7015 H08Mn2Ni2Mo CO2 HQ70B 或 Ar+CO220 15MnMoVN 或 15MnMoVNRE
6	常见金属材料焊接	试述低温用钢焊接工艺。
7	常见金属材料焊接	试述珠光体耐热钢焊接工艺。
8	常见金属材料焊接	试述低碳调质钢焊接工艺。

9	常见金属材料焊接	试述中碳调质钢焊接工艺。	(3)焊接技术 为避免过分损伤热影响区韧性，应避免使用过大线能量，所以，不推荐使用大直径焊条或焊丝。 只要可能，应采取多层小焊道焊缝，最好采取窄焊道，而不采取横向摆动运条技术。(4)焊后热处理 大多数低碳调质钢焊接构件全部是在焊态下使用，只有在下述条件下才进行焊后热处理。 1) 焊后或冷加工后韧性过低。 2) 焊后需进行高精度加工，要求确保结构尺寸稳定性。 3) 焊接结构承受应力腐蚀。 焊后热处理温度必需低于母材调质处理回火温度。 常见多种熔焊方法，全部能够适用于焊接中碳调质钢。 (1)预热及后热 除了拘束度小、结构简单薄壳结构不用预热外，中碳调质钢全部应采取焊前预热和后热方法，预热温度约为 200～350℃后热温度为 300℃左右。假如焊后不能立即进行调质处理，则必需在焊后立即进行中间热处理，即在等于或高于预热温度下进行保温一段时间热处理，如低温回火或 650～680℃高温回火。若焊件焊前处于调质状态，其预热温度、层间温度及热处理温度全部应比母材淬火后回火温度低 50℃。进行局部预热时，应在焊缝两侧各 100mm 范围内均匀加热。 (2)焊接材料 为了预防产生热裂纹，要求采取低碳焊丝，焊丝中碳质量分数应控制在 0.15%以内，最高不超出 0.25%，而且控制硫、磷质量分数应小于 0.03%～0.035%。 焊接中碳调质钢焊条选择，见表 16。表中 HTJ-1 及 HTJ-4 焊条涂料只起稳弧作用，焊缝金属力学性能和抗裂性能较差，只适用于受力小、待焊处可达性不好及要求变形小 30CrMnSiA 钢薄板焊接。 (3)焊接线能量 中碳调质钢宜用小线能量焊接，以有利于降低淬火区高温停留时间，降低奥氏体晶粒长大，从而降低淬火区脆化程度。 表 16 焊接中碳调质钢焊条选择 <table><tr><td>焊条牌号</td><td>焊 芯 直 径 (mm)</td><td>焊接钢种</td></tr><tr><td>HTJ-4 (钛型)</td><td>H08A 1.6～4.0</td><td>25CrMnSiA HTJ-1 (钛型)</td></tr><tr><td>H08CrMoA 30CrMnSiA HTJ-2 (低氢型)</td><td>H08CrMoA 1.6～4.0</td><td>30CrMnSiA 40CrMnSiMoVA HTJ-3 (低氢型)</td></tr><tr><td>H08CrMoA 1.6～6.0</td><td>25CrMnSiA 30CrMnSiA 30CrMnSiNi2A 40CrMnSiMoVA</td><td>HTG-1 (低氢型) HGH30</td></tr><tr><td>1.6～5.0</td><td>焊接已调质：</td><td>25CrMnSiA 30CrMnSiA HTG-2 (低氢型) HGH41 30CrMnSiNi2A HTB-3 (低氢型)</td></tr><tr><td>H1Cr19Ni11Si14A1Ti 1.6～4.0</td><td>30CrMnSiA A507 (低氢型)</td><td>E1-16-25Mn6N-15</td></tr><tr><td>焊接已调质</td><td>A502 (钛钙型)</td><td>E1-16-25Mn6N-16 30CrMnSiA</td></tr></table> 注：“HT”——航空焊条、“J”——结构钢焊条、“G”——高温合金焊条、“A”——不锈钢焊条及 A5××焊条——焊缝中铬质量分数(含铬量)为 16%，镍质量分数(含镍量)为 25%。	焊条牌号	焊 芯 直 径 (mm)	焊接钢种	HTJ-4 (钛型)	H08A 1.6～4.0	25CrMnSiA HTJ-1 (钛型)	H08CrMoA 30CrMnSiA HTJ-2 (低氢型)	H08CrMoA 1.6～4.0	30CrMnSiA 40CrMnSiMoVA HTJ-3 (低氢型)	H08CrMoA 1.6～6.0	25CrMnSiA 30CrMnSiA 30CrMnSiNi2A 40CrMnSiMoVA	HTG-1 (低氢型) HGH30	1.6～5.0	焊接已调质：	25CrMnSiA 30CrMnSiA HTG-2 (低氢型) HGH41 30CrMnSiNi2A HTB-3 (低氢型)	H1Cr19Ni11Si14A1Ti 1.6～4.0	30CrMnSiA A507 (低氢型)	E1-16-25Mn6N-15	焊接已调质	A502 (钛钙型)	E1-16-25Mn6N-16 30CrMnSiA
焊条牌号	焊 芯 直 径 (mm)	焊接钢种																						
HTJ-4 (钛型)	H08A 1.6～4.0	25CrMnSiA HTJ-1 (钛型)																						
H08CrMoA 30CrMnSiA HTJ-2 (低氢型)	H08CrMoA 1.6～4.0	30CrMnSiA 40CrMnSiMoVA HTJ-3 (低氢型)																						
H08CrMoA 1.6～6.0	25CrMnSiA 30CrMnSiA 30CrMnSiNi2A 40CrMnSiMoVA	HTG-1 (低氢型) HGH30																						
1.6～5.0	焊接已调质：	25CrMnSiA 30CrMnSiA HTG-2 (低氢型) HGH41 30CrMnSiNi2A HTB-3 (低氢型)																						
H1Cr19Ni11Si14A1Ti 1.6～4.0	30CrMnSiA A507 (低氢型)	E1-16-25Mn6N-15																						
焊接已调质	A502 (钛钙型)	E1-16-25Mn6N-16 30CrMnSiA																						
10	常见金属材料焊接	试述耐候钢及耐海水腐蚀用钢焊接工艺。	铜、磷能显著地降低钢腐蚀速度，这是耐候钢及耐海水腐蚀用钢关键合金元素，常见耐候钢及耐海水腐蚀用钢有：16CuCr、12MnCuCr、15MnCuCr、09Mn2Cu、16MnCu、09MnCuPTi、08MnPRE、10MnPbRE 钢等。 铜、磷耐蚀钢对焊接热循环不敏感，焊接热影响区最高硬度不超出 350HV。即使钢中含有 Cu、P 等元素，但其含量均不高，通常铜质量分数控制在 0.2%～0.4%，不会促进产生热裂纹。含磷钢中碳、磷质量分数全部在 0.25%以下，所以钢冷脆倾向也不大，所以焊接性良好，焊接工艺和强度等级较低(σs 为 343～392MPa)一般热轧钢相同。焊接耐候及耐海水腐蚀用钢焊条，见表 17。埋弧焊时，采取 H08MnA、H10Mn2 焊丝配合 HJ431 焊剂。 表 17 焊接耐候及耐海水腐蚀用钢焊条 牌 号 型 号 主 要 用 途 <table><tr><td>J422CrCu E430</td></tr><tr><td>焊接 12CrMoCu J502CuP 焊接 10MnPbRE、08MnP、09MnCuPTi J502NiCu E5003-G 焊接耐候铁道车辆 09MnCuPTi J502WCr J502CrNiCu E5003-G 焊接耐候近海工程结构 J506Wcu E5016-G 焊接耐候用钢 09MnCuPTi J506NiCu E5016-G 焊接耐候用钢 J507NiCu E5015-G 焊接耐候用钢 J507CrNi E5015-G 焊接耐海水腐蚀用钢海洋关键结构</td></tr></table>	J422CrCu E430	焊接 12CrMoCu J502CuP 焊接 10MnPbRE、08MnP、09MnCuPTi J502NiCu E5003-G 焊接耐候铁道车辆 09MnCuPTi J502WCr J502CrNiCu E5003-G 焊接耐候近海工程结构 J506Wcu E5016-G 焊接耐候用钢 09MnCuPTi J506NiCu E5016-G 焊接耐候用钢 J507NiCu E5015-G 焊接耐候用钢 J507CrNi E5015-G 焊接耐海水腐蚀用钢海洋关键结构																			
J422CrCu E430																								
焊接 12CrMoCu J502CuP 焊接 10MnPbRE、08MnP、09MnCuPTi J502NiCu E5003-G 焊接耐候铁道车辆 09MnCuPTi J502WCr J502CrNiCu E5003-G 焊接耐候近海工程结构 J506Wcu E5016-G 焊接耐候用钢 09MnCuPTi J506NiCu E5016-G 焊接耐候用钢 J507NiCu E5015-G 焊接耐候用钢 J507CrNi E5015-G 焊接耐海水腐蚀用钢海洋关键结构																								
常见金属材料焊接	试述奥氏体不锈钢手弧焊工艺。	奥氏体不锈钢手弧焊含有热影响区小、易于确保质量，适应多种焊接位置及不一样板厚工艺要求优点。焊条有酸性钛钙型和碱性低氢钠型两大类。低氢钠型不锈钢焊条抗热裂性较高，但成形不如钛钙型焊条，耐腐蚀性也较差。钛钙型焊条含有良好工艺性能，生产中应用较普遍。																						
接		因为奥氏体不锈钢电阻率为低碳钢 4 倍以上，焊接时产生电阻热较大，药皮轻易发红和开裂，所以一样直径焊条焊接电流值应比低碳钢降低 20%左右，焊条长度亦比同直径碳钢焊条短，不然焊接时因为药皮快速发红、开裂会失去保护而无法焊接。																						
		施焊时，焊条不应作横向摆动，采取小电流、快速焊，一次焊成焊缝不宜过宽，最好不超出焊条直径 3 倍。多层焊时，每焊完一层要根本清除焊渣，层间温度应低于 60℃																						

		和腐蚀介质接触焊缝，为预防因为反复加热而降低耐腐蚀性，应最终焊接。焊后可采取强制冷却方法，加速接头冷却。焊接开始时，不要在焊件上随便引弧，以免损伤焊件表面，影响耐腐蚀性。																																																																																																																																																																								
12	常见金属材料焊接	试述奥氏体不锈钢埋弧焊工艺。 奥氏体不锈钢埋弧焊时，因为焊接电流密度大，热量集中，所以形成弧坑也较大，而且熔池厚度也增大，在局部间隙较大处很轻易烧穿，所以在施焊过程中需要在焊件后面采取一定工艺方法，以防烧漏。常见方法是采取手弧焊封底，并用纯铜板垫、永久垫和焊剂垫等。 18-8 型奥氏体不锈钢埋弧焊时焊接工艺参数，见表 20。 <table><tr><th>表 20</th><th>18-8 型不锈钢埋弧焊焊接工艺参数</th><th>焊件厚度（mm）</th><th>装配间隙（mm）</th><th>焊接电流（A）</th><th>电弧电压（V）</th><th>焊接速度（m/h）</th></tr><tr><td>6</td><td>1.5</td><td>2.0</td><td>650</td><td>700</td><td>34</td><td>38</td></tr><tr><td>8</td><td>2.0</td><td>3.0</td><td>750</td><td>800</td><td>36</td><td>38</td></tr><tr><td>10</td><td>2.5</td><td>3.5</td><td>850</td><td>900</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>12</td><td>3.0</td><td>4.0</td><td>900</td><td>950</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>15</td><td>3.5</td><td>4.5</td><td>1000</td><td>1050</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>18</td><td>4.0</td><td>5.0</td><td>1100</td><td>1150</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>20</td><td>4.5</td><td>5.5</td><td>1200</td><td>1250</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>25</td><td>5.0</td><td>6.0</td><td>1300</td><td>1350</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>30</td><td>5.5</td><td>6.5</td><td>1400</td><td>1450</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>35</td><td>6.0</td><td>7.0</td><td>1500</td><td>1550</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>40</td><td>6.5</td><td>7.5</td><td>1600</td><td>1650</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>45</td><td>7.0</td><td>8.0</td><td>1700</td><td>1750</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>50</td><td>7.5</td><td>8.5</td><td>1800</td><td>1850</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>55</td><td>8.0</td><td>9.0</td><td>1900</td><td>1950</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>60</td><td>8.5</td><td>9.5</td><td>2000</td><td>2050</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>65</td><td>9.0</td><td>10.0</td><td>2100</td><td>2150</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>70</td><td>9.5</td><td>10.5</td><td>2200</td><td>2250</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>75</td><td>10.0</td><td>11.0</td><td>2300</td><td>2350</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>80</td><td>10.5</td><td>11.5</td><td>2400</td><td>2450</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>85</td><td>11.0</td><td>12.0</td><td>2500</td><td>2550</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>90</td><td>11.5</td><td>12.5</td><td>2600</td><td>2650</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>95</td><td>12.0</td><td>13.0</td><td>2700</td><td>2750</td><td>38</td><td>40</td></tr><tr><td>100</td><td>12.5</td><td>13.5</td><td>2800</td><td>2850</td><td>38</td><td>40</td></tr></table> 注：1、表中厚度为 6～12mm 焊件焊接工艺参数是在焊剂垫上进行单面埋弧焊参数。2、厚度为 8～40mm 焊件，应进行双面焊，但焊接第 1 道焊缝时能够在焊剂垫上进行。 3、焊丝均采用 $\phi 5\text{mm}$。 奥氏体不锈钢钨极氩弧焊适宜于厚度不超出 8mm 板结构，尤其适宜于厚度在 3mm 以下薄板、直径在 60mm 以下管子和厚件打底焊。钨极氩弧焊电热功率率低，所以焊接速度较慢，约为手弧焊速度 1/2～1/3。所以，焊接接头冷却过程中在危险温度区停留时间长，耐腐蚀性能较差。 奥氏体不锈钢钨极氩弧焊对接接头焊接工艺参数，见表 21。 奥氏体不锈钢采取熔化极氩弧焊时，若使用纯氩气作为保护气体会引发一系列困难： 1）液体金属粘度及表面张力较大，易产生气孔；焊缝金属润湿性差，焊缝两侧易产生咬边。 2）电弧阴极斑点不稳定，产生所谓阴极飘移现象，使焊缝成形很差。如厚度为 3mm 不锈钢焊后焊缝宽约 4mm，而余高竟超出 3mm，所以没有得到推广应用。处理上述现象方法是采取氧化性混合气体作保护气体，即在纯氩气中加入少许氧气或 CO₂ 气体。 焊接厚板时推荐以射流过渡焊接，保护气体质量分数为 Ar98%+O₂2%。因为射流过渡必需采取较高电压和电流值，熔池流动性好，故只适于平焊和横焊；焊接薄板时推荐以短途经渡焊接，保护气体质量分数 97.5%Ar+2.5%CO₂。短途经渡时电压和电流值均较低，熔滴短路时会熄弧，熔池温度较低轻易控制成形，所以适用于任意位置焊接。 为预防后面焊道表面氧化和保持良好成形，底层焊道后面应附加氩气保护。	表 20	18-8 型不锈钢埋弧焊焊接工艺参数	焊件厚度（mm）	装配间隙（mm）	焊接电流（A）	电弧电压（V）	焊接速度（m/h）	6	1.5	2.0	650	700	34	38	8	2.0	3.0	750	800	36	38	10	2.5	3.5	850	900	38	40	12	3.0	4.0	900	950	38	40	15	3.5	4.5	1000	1050	38	40	18	4.0	5.0	1100	1150	38	40	20	4.5	5.5	1200	1250	38	40	25	5.0	6.0	1300	1350	38	40	30	5.5	6.5	1400	1450	38	40	35	6.0	7.0	1500	1550	38	40	40	6.5	7.5	1600	1650	38	40	45	7.0	8.0	1700	1750	38	40	50	7.5	8.5	1800	1850	38	40	55	8.0	9.0	1900	1950	38	40	60	8.5	9.5	2000	2050	38	40	65	9.0	10.0	2100	2150	38	40	70	9.5	10.5	2200	2250	38	40	75	10.0	11.0	2300	2350	38	40	80	10.5	11.5	2400	2450	38	40	85	11.0	12.0	2500	2550	38	40	90	11.5	12.5	2600	2650	38	40	95	12.0	13.0	2700	2750	38	40	100	12.5	13.5	2800	2850	38	40
表 20	18-8 型不锈钢埋弧焊焊接工艺参数	焊件厚度（mm）	装配间隙（mm）	焊接电流（A）	电弧电压（V）	焊接速度（m/h）																																																																																																																																																																				
6	1.5	2.0	650	700	34	38																																																																																																																																																																				
8	2.0	3.0	750	800	36	38																																																																																																																																																																				
10	2.5	3.5	850	900	38	40																																																																																																																																																																				
12	3.0	4.0	900	950	38	40																																																																																																																																																																				
15	3.5	4.5	1000	1050	38	40																																																																																																																																																																				
18	4.0	5.0	1100	1150	38	40																																																																																																																																																																				
20	4.5	5.5	1200	1250	38	40																																																																																																																																																																				
25	5.0	6.0	1300	1350	38	40																																																																																																																																																																				
30	5.5	6.5	1400	1450	38	40																																																																																																																																																																				
35	6.0	7.0	1500	1550	38	40																																																																																																																																																																				
40	6.5	7.5	1600	1650	38	40																																																																																																																																																																				
45	7.0	8.0	1700	1750	38	40																																																																																																																																																																				
50	7.5	8.5	1800	1850	38	40																																																																																																																																																																				
55	8.0	9.0	1900	1950	38	40																																																																																																																																																																				
60	8.5	9.5	2000	2050	38	40																																																																																																																																																																				
65	9.0	10.0	2100	2150	38	40																																																																																																																																																																				
70	9.5	10.5	2200	2250	38	40																																																																																																																																																																				
75	10.0	11.0	2300	2350	38	40																																																																																																																																																																				
80	10.5	11.5	2400	2450	38	40																																																																																																																																																																				
85	11.0	12.0	2500	2550	38	40																																																																																																																																																																				
90	11.5	12.5	2600	2650	38	40																																																																																																																																																																				
95	12.0	13.0	2700	2750	38	40																																																																																																																																																																				
100	12.5	13.5	2800	2850	38	40																																																																																																																																																																				
13	常见金属材料焊接	试述奥氏体不锈钢钨极氩弧焊工艺。																																																																																																																																																																								
14	常见金属材料焊接	试述奥氏体不锈钢熔化极氩弧焊工艺。																																																																																																																																																																								
15	常见金属材料焊接	试述铁素体不锈钢焊接工艺。 属于铁素体不锈钢钢号有 0Cr13Al、1Cr17、1Cr28、0Cr17Ti、1Cr25Ti、1Cr17Mo2Ti 等。 铁素体不锈钢焊接工艺以下： (1)焊接性 铁素体不锈钢焊接时，因为热影响区晶粒急剧长大、475℃脆性和 σ 相析出不仅引发接头脆化，而且也使冷裂倾向加大。在温度高于 1000℃熔合线周围快速冷却时会产生晶间腐蚀，但经 650～850℃加热并随即缓冷就能够加以消除。因为铁素体钢在加热和冷却过程中不发生相变，所以晶粒长大以后，不能经过热处理来细化。 (2)焊接工艺 1）焊接时将焊件预热 100～150℃，含铬量越高，预热温度越高。 2）可分别选择铬不锈钢焊条或铬镍奥氏体焊条。采取铬镍奥氏体焊条时，可不进行焊前预热和焊后热处理。 焊接铁素体不锈钢用焊条，见表 22。 表 22 焊接铁素体不锈钢用焊条 钢种 对接头性能要求 选择焊条 预热及焊后热处理 型号 牌号 1Cr17 耐硝酸及耐热 E0-17-16 G3 焊前预热 120～200℃，焊后 750～800℃回火 Cr17Ti E0-17-15 G307 Cr17 提升焊																																																																																																																																																																								

16	常见金属材料焊接	试述马氏体不锈钢焊接工艺。	-15 A207 1Cr25Ti 抗氧化性 E1-23-13-15 A307 不预热，焊后 760～780℃回火 1Cr28 提升焊缝塑性 E2-26-21-16 A402 不预热，不热处理 1Cr28Ti E2-26-21-15 A407 3）采取小焊接线能量，不摆动焊接。多层焊时应控制层间温度高于 150℃。不宜连续施焊。 4）焊后进行 750～800℃回火处理，目标是改善塑性，提升耐腐蚀性。回火后快冷，可预防出现 σ 相及 475℃脆性。 对于超低碳高铬铁素体不锈钢，如 00Cr26Mo1、00Cr30Mo，现在还没有专用焊条，可采取 E1-23-13-26（A302）、E2-26-21-16（A402）焊条进行焊接。 属于马氏体不锈钢钢号有 1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13、3Cr13Mo、1Cr17Ni2、2Cr13Ni2、9Cr18、9Cr18MoV 等。 (1)焊接性 有强烈冷裂倾向，焊缝及热影响区焊后均为硬而脆马氏体组织，钢中含碳量越高，冷裂倾向越大。焊接时在温度超出 1150℃热影响区内，晶粒显著长大。过快或过慢冷却全部可能引发接头脆化。比如，1Cr13 钢焊后冷却速度小于 10℃/s 时，在热影响区将得到粗大铁素体加碳化物组织，使塑性显著降低；当冷却速度大于 40℃/s 时，则会产生粗大马氏体组织，一样也使塑性下降。 马氏体不锈钢晶间腐蚀倾向很小。 (2)焊接工艺 1）焊前预热 焊前预热是预防产生冷裂纹关键工艺方法。当 C 质量分数为 0.1%～0.2% 时，预热温度为 200～260℃，对高刚性焊件可预热至 400～450℃。 "2）焊后冷却 焊件焊后不应从焊接温度直接升温进行回火处理，因为焊接过程中奥氏体可能未完全转变，如焊后立即升温回火，会出现碳化物沿奥氏体晶界沉淀和奥氏体向珠光体转变，产生晶粒粗大组织，严重降低韧性。所以回火前应使焊件冷却，让焊缝和热影响区奥氏体基础分解完了。对于刚性小焊件，能够冷至室温再回火；对于大厚度焊件，需采取较复杂工艺；焊后冷至 100～150℃，保温 0.5～1h,然后加热至回火温度。" 3）焊后热处理 目标是降低焊缝和热影响区硬度，改善塑性和韧性，同时降低焊接残余应力。焊后热处理分回火和完全退火两种。回火温度为 650～750℃，保温 1h，空冷；若焊件焊后需机加工，为了得到最低硬度，可采取完全退火，退火温度为 830～880℃，保温 2h 炉冷至 595℃，然后空冷。 4）焊条选择 焊接马氏体不锈钢用焊条分为铬不锈钢焊条和铬镍奥氏体不锈钢焊条两大类。常见铬不锈钢焊条有 E1-13-16（G202）、E1-13-15（G207）；常见铬镍奥氏体不锈钢焊条有 E0-19-10-16（A102）、E0-19-10-15（A107）、E0-18-12Mo2-16（A202）、E0-18-12Mo2-15（A207）等。 制造焊件全部加工方法和实施要求，包含焊接准备、材料选择、焊接方法选定、焊接参数、操作要求等。
			制造焊件全部关加工和实践要求细则文件，可确保由熟练焊工或操作工操作时质量再现性
			1. 无铅焊接技术发展趋势 伴随欧盟 RHS 相关 7 月 1 日无铅化期限迫近,日本著名电子产品制造商: PANASONIC/NATIONAL、SONY、TOSHIBA、PIONEER、NEC 等，从开始导入无铅化制程，至今已基础实施无铅化制造，在日本及欧美市场上推出"绿色环保"家电产品。中国政府已于 3 月由信息产业部确定《电子信息产品生产污染防治管理法》自 7 月 1 日严禁电子产品含铅（Pb）。所以，出于对环境保护考虑，市场发展趋势是使用含铅焊料电子产品将无法进入市场。对于电子组装企业来说，无铅焊接技术应用已经是摆在企业面前必需处理现实问题。 2. 无铅焊接技术工艺特点 电子产品制造业实施无铅化制程需面临以下问题：1) 焊料无铅化；2)元器件及 PCB 板无铅化；3)焊接设备无铅化 1） 焊料无铅化到现在为止，全世界已报道无铅焊料成份有近百种，但真正被行业认可并被普遍采取
17	通常术语	焊接工艺	
18	通常术语	焊接工艺规范规程	
19	无铅波峰焊接	无铅波峰焊接工艺技术和设备	

是 Sn-Ag-Cu 三元合金，也有采取多元合金，添加 In,Bi,Zn 等成份。现阶段国际

		上是多个无铅合金焊料共存局面，给电子产品制造业带来成本增加，出现不一样用户要求不一样焊料及不一样工艺，未来发展趋势将趋向于统一合金焊料。（1）熔点高，比 Sn-Pb 高约 30 度；（2）延展性有所下降，但不存在长久劣化问题；（3）焊接时间通常为 4 秒左右；（4）拉伸强度早期强度和后期强度全部比 Sn-Pb 共晶优越。（5）耐疲惫性强。（6）对助焊剂热稳定性要求更高。 （7）高 Sn 含量，高温下对 Fe 有很强溶解性 鉴于无铅焊料特征决定了新无铅焊接工艺及设备 2）元器件及 PCB 板无铅化 在无铅焊接工艺步骤中，元器件及 PCB 板镀层无铅化技术相对要复杂，包含领域较广，这也是国际环境保护组织推迟无铅化制程原因之一，在相当初间内，无铅焊料和 Sn-PbPCB 镀层共存，而带来 "剥离(Lift-Off)"等焊接缺点,设备厂商不得不从设备上克服这种现象。另外对 PCB 板制作工艺要求也相对提升，PCB 板及元器件材质要求耐热性愈加好。 4. 1 不等厚度及不一样材料点焊在通常条件下，不一样厚度和不一样材料点焊时，熔核不以贴合面为对称，而向厚板或导电、电性差中偏移，其结果使其在贴合面上尺寸小于该熔核直径。同时，也使其在薄件或导电、导热性好焊件中焊透率小于要求数值，这均使焊点承载能力降低。 1. 偏移产生原因熔核偏移根本原因是焊接区在加热过程中两焊件析热和散热均不相等所致。偏移方向自然向着析热多、散热缓慢一方移动。不一样厚度点焊时，厚件电阻大析热多，而其析热中心因为远离电极而散热缓慢；薄件情况正相反。这就造成焊接温度场及熔核图 38a 向厚板偏移。不一样材料点焊时，导电性差工件电阻大析热多，但散热缓慢；导电性好材料情况正相反。这一样要造成焊接温度场图 38b 向导电性差工件偏移。温度场偏移则带来熔查对应偏移。 2. 克服熔核偏移方法（1）采取硬规范 硬规范点焊时电流场分布，能愈加好反应边缘效应对贴合面集中加热效果，而且因为焊接时间短使热损失下降，散热影响相对减小，均对纠正熔核偏移现象有利。比如，可用电容储能焊机来点焊厚度比很大精密零件。（2）采取不一样电极 1) 采取不一样直径电极。薄件（或导电、导热性好焊件）那面采取小直径电极，以增大电流密度，减小热损失；而厚件（或导电、导热性差焊件）那面则选择大直径电极。上、下电极直径不一样使温度场分布趋于合理，减小了熔核偏移。不过，在厚度比比较大不锈钢或耐热合金零件点焊中和上述标准相反，只有小直径电极安置在厚件那面方能有效，工厂中俗称为“反焊”。反焊已取得多年实际应用，但其原理及合理应用范围现在还有争议。 2) 采取不一样材料电极。因为上、下电极材料不一样，其散热程度不相同。导热性好材料放于厚件（或导电、导热性差焊件）那面使其热损失也大，也可调整温度场分布，减小熔核偏移。比如，点焊 5A02-3A21 板材（λ5A02>λ3A21，δ5A02＝2mm、δ3A21＝3mm），可在 5A02 那面采取导热性差 CrCdCu 合金电极，而在 3A21 那面采取导热性好 T2 纯铜电极。结果表明，薄件焊透率达 20％～25％，满足质量要求。 3) 使用特殊电极。在电极头部加不锈钢环、黄铜套（图 39）或采取尖锥状电极头，均可使焊接电流向中间集中，从而使薄件（或导电、电性性好焊件）析热强度增加，使温度场分布趋于合理。（3）在薄件（或导电、电性性好焊件）上附加工艺垫片（图 40） 工艺垫片由导热性差材料制作，厚度为 0.2～0.3mm，有降低薄件（或导电、电性性好焊件）散热、增加电流密度作用。比如，不锈钢箔片可作为铜、铝合金点焊工艺垫片；低碳钢箔片可作为黄铜点焊工艺垫片；铝箔可作为金丝和金箔点焊工艺垫片等。在使用工艺垫片时应注意规范不要过大，以避免垫片和零件表面产生粘结，焊后应很轻易将其揭掉。 3.
20	点焊工艺	特殊情况点焊工艺

利用帕尔贴效应帕尔贴效应是热电势现象逆向现象，即当直流电按某特定方向经

过异种材料接触面时，将产生附加吸热或析热现象，所以这个效应仅在单向通电

时有效，而且现在仅用于铝和铜合金电极间才较显著和含有实用价值，图 41 所表

示。部分异种金属材料点焊焊接参数参见表 21 和表 22。表 21 常见异种钢点焊

焊接参数 钢 号 厚度 焊前状态 电极直径 焊接参数 熔核 /mm 及清理 /mm 直

径 焊接电流 通电时间 电极压力 /mm /A /S /N 1Cr13+ 1.2+1.2 1Cr13 回火， 5.0~

6.0 6000~6500 0.24~0.28 1000~4500 ≥5.0 1Cr18Ni9Ti 1.5+1.5 1Cr18Ni9Ti 淬火，

抛光 6.0~7.0 6500~6800 0.28~0.32 5000~5500 ≥5.5 Cr17Ni2+ 2.5+2.0 油淬，回

火 5.0~7.0 8500~9500 0.32~0.38 8000 ≥4.5 1Cr11Ni2W2MoV Cr17Ni2+ 1.5+2.0

Cr17Ni2 油淬，回火，1Cr18Ni9Ti 4.0~4.5 6500~7000 0.30~0.38 5800 ≥4.0

1Cr18Ni9Ti 1.5+3.5 淬火 5.0~7.0 9200~9700 0.32~0.38 7300 ≥4.5 1Cr18Ni9Ti+

1.0+1.0 正火 4.0~5.0 6400 0.14~0.22 4900 4 21-11-2.5 铸造不锈钢 1.0+1.0 7100

0.12~0.22 6000 4.3 表 22 不锈钢和镍基高温合金点焊焊接参数 材料 厚度 焊前

电极直径 工艺参数 熔核尺寸 /mm 状态 /mm 焊接电流 通电时间 电极压力 d /

① /A /s /kN /mm (%) GH3044+ 1.5+1.0 固溶 5 5800~6200 0.34~0.38 5.2~6.4 3.5

4.0 — 1Cr18Ni9Ti GH1140+ 1+1 固溶 5 6100~6500 0.26 4.4~5.4 4.5 40~60

1Cr18Ni9Ti 1+1.5 5.0~6.0 6200~6500 0.26~0.30 4.4~5.4 4.5 50~60 1.5+1.5 7

8200~8400 0.38~0.44 5.1~6.1 5.0~7.0 40~70 1+2 5.0~6.0 6500~6800 0.26~

0.30 5.4~5.7 5.5 60~70 1+4 10.0~12.0 6400~6800 0.30~0.34 5.9~6.4 5.5 40~

55 ① A 为焊点关键焊透率。 4. 2 胶接点焊和减振钢板点焊 1. 胶接点焊 在点

焊工艺中采取结构胶粘剂，可使接头性能显著提升，这种将点焊和胶接两种工艺

结合起来焊接方法称为胶接点焊，简称胶焊。胶焊结构含有强度高、质量轻、减

振和声学性能好等优点。比如，它静抗剪强度是点焊 1.5~2 倍，疲惫强度为点焊

3~5 倍；可预防（铝合金）焊后阳极化处理时搭接区内表面腐蚀等。 经过对胶

焊、点焊和胶接三种拉剪试件力学性能进行研究，试验结果见表 23。表 23 胶焊

点焊和胶接拉剪试件强度试验结果 方 法 破断载荷 F/N 疲惫寿命 Nf Fmax=

板，就是在两层金属板材之间夹一层减振胶钢板，比如厚度 1.45mm 日本 NKK 钢厂和宝钢生产减振钢板，其组成为钢板（0.7mm

)/热可塑非导电型减振胶层(0.05mm)/钢板(0.7mm)。表 24 425-2 胶粘性

能 牌号 组 成 工艺条件 胶粘剂抗剪 胶焊后抗剪 胶焊后不均匀扯离强度/kN.m-
强度/Mpa 强度/Mpa 温度 强度值 温度 强度值 /℃ /℃ 425-2 甲 E-51 环氧 100

甲:乙:丙:丁 25 (铝) 25 (铝)≥14.7≥14.7≥40 ±60℃适用于铝合金胶接
点焊结构,先焊后胶 D-17 环氧 25 #VALUE! 60 ≥24.5 60 间苯二酐正丁醛 预固

化:20℃50h -60 ≥19.6 环氧树脂 5 固化:135℃3h ≥17.6 环氧稀释 263 18 乙 "4,
二氨基二苯甲烷 2-" 乙基,4-甲基咪唑 10 亚麻油酸锡盐 1 β-羟乙基乙二胺 3 丙

780 聚硫橡胶 10 丁 KH-550 5 这种非导电型减振钢板点焊原理以下(图 42):

用导电板组成副导电回路,点焊时先使焊机输出电流 I2 从工件 1 上表面经过导电
板流到工件 2 下表面,I2 产生电阻热使导电区域减振胶熔化,待焊处已熔化减振

胶在电极压力作用下被挤出,造成焊接主回路 I1 导通,焊接区形成熔核,这就是
第 1 个焊点。当焊接第 2 个焊点时,就以第 1 个焊点组成副导电回路,...,依次

类推。焊接技术关键点: 1) 副导电回路导电情况影响到点焊过程是否稳定,其
中关键原因有回路长度和导电截面大小,所以调整导电板尺寸和位置很关键,有

时可用 2 个副导电回路(板两端各 1 个)。2) 使用球面电极能愈加好挤出焊接
区减振胶,有利于确保点焊质量稳定。3) 减振钢板点焊电流比相同厚度一般低

碳钢大 15%~30%,且其恒流控制精度应不低于±3%。导电型减振钢板价格较贵,
但能够按常规点焊工艺焊接。4. 3 微型件点焊微型件是指几何尺寸甚小仪表构

件、元器件等,其接头组成中最少有一个为厚度或直径≤0.1mm 箔材或丝材,点焊
位置空间窄小且材质往往特殊或有镀层(Au、Ag、Ni 等),如可伐合金、TiNi

合金、钼合金、铍青铜、AgMgNi 合金等。焊接技术关键点: 1) 因为焊件热惯
性小,点焊时析热少,而散热强烈是其关键特点,所以在贴合面上难于形成集中

加热效果,尤其是导热性好材料更为困难。所以要求焊接电流波形应脉冲幅值大
而通电时间极小,控制精度很高,如采取半波点焊、中频逆变式(IGBT)点焊、

电容放电点焊等。2) 接头焊接形式除熔化焊接(熔核)外,有时亦许可固相焊
接,即贴合面并不熔化,仅发生较充足再结晶和扩散(但要有一定体积深度)。

固相焊接强度即使波动较大,但对微型件导电、导磁性能均能满足。也有只能选
择固相焊接场所:①易再结晶热脆材料,如钼及其合金;②熔点相差悬殊材料,

如铝—镍、铝—铜焊接;③热导率极高,熔化焊接困难而固相结合温度较低材料,
如银等。经典固相焊接优质接头金相照片图 43 所表示。3) 平行间隙焊(又称平

行微隙焊, parallel micro gap welding)是一个专用于点焊电子元器件线和底盘组
装技术,在太阳能电池中也有应用,电源可采取电容式或逆变式精密点焊设备。

下面介绍一个可直接焊接漆包线引出接点平行间隙焊新技术,原理以下:用

SW(stripping-welding, 除漆—焊接)焊头(中国专利号: ZL01114808.x; 美国专利
号: US6737503B2)压紧待焊处(图 44a); 电容储能点焊机输出脉冲电流 I0 流

经二个电极尖端接触部分,产生电火花(图 44b),使一部分绝缘漆被烧除,其
它部分熔化自动向外侧退缩,使金属裸露出来;在焊接压力和电阻热作用下,被

焊工件间接触电阻小于 SW 焊头尖端接触电阻,大量电阻 I2 转而流入裸露金属线
和基底,实现焊接(图 44c),同时,仅有一少许电流 I1 成为分流。这就实现了

用同一电流脉冲完成除漆和焊接,图 45 所表示。焊接技术关键点: 1) SW 焊头
设计和制造至关关键:采取烧结材料作电极,尖端外形为笔尖形,两个电极尖端

接触是不变线接触。2)

或其它电阻焊方法相比含有较少内部气孔；高焊接速度（高于一般电阻缝焊和电弧焊，低于激光焊）；中等
装备成本：不需填充金属或保护气体。

2. 1 高频焊关键特点 1. 高频焊关键特点 1) 焊速高。这是因为电能高度集中，焊接区加热速度极快，焊速高达 150~200m/min 时仍不会产生“跳焊”现象。 2) 热影响区小。这是因焊速高，工件自冷作用强，故热影响区窄且不易发生氧化，从而可取得良好组织和性能焊缝。 3) 待焊处表面可无须进行焊前清理。 2. 高频感应焊管和高频接触焊管相比其优点 1) 焊管表面光滑，尤其是焊道内表面较平整。 2) 感应圈不和管壁接触，故对管坯接头及表面质量要求比较低，亦不会像高频接触焊时那样可能引发管子表面烧伤。 3) 因不存在电极（滑动触头）压力，故不会引发管坯局部失稳变形，也不会引发管坯表面镀层擦伤，所以能适宜于制造薄壁管和涂层管。 4) 不用电极，所以省料省时，亦不存在电极脱离工件造成功率传输不稳而影响焊接质量等问题。不过，高频感应焊能量损失较大，在使用相同功率焊制同种规格管子时，其焊速仅为高频接触法 1/2~1/3，所以对中、大径管焊制时以选择高频接触法为宜。 2. 2 高频焊焊接参数及选择高频焊优质接头取得，关键取决于能否建立理想焊接状态和是否能将氧化物及其它杂质挤出对口焊缝区。其关键是在焊接区板内、外边缘取得一致温度，并使挤压力和加热温度有合适匹配。除材质原因外，关键影响因素有：电源频率、管坯坡口形状、会合角、电极和感应圈及阻抗器安放位置、输入功率、焊接速度、焊接压力（挤压力）等。1. 电源频率频率提升有利于集肤效应和邻近效应发挥，提升焊接效率，但要取得优质焊缝，频率选择关键取决于管坯材质及其壁厚。通常焊有色管频率要比焊碳钢管时为高，这关键因有色管热导率高所致。同时，为确保对口两边加热宽度适中，又能确保厚度方向加热均匀，通常焊薄壁管时选择频率高些，焊管壁厚时选频率低些。比如，焊制碳钢管多采取 350~450kHz 频率，而在焊制尤其厚壁管时，采取 50kHz 频率。 2. 管坯坡口形状通常采取 I 形坡口，可使沿厚度方向加热均匀，而且坡口准备轻易。但当管坯厚度很大时，I 形坡口将使坡口横断面中心部分加热不足，而其上、下边缘加热过分，这时可选择双 V 形坡口以使横断面加热均匀，焊后接头硬度亦趋向一致。 3. 会合角选择会合角 α 大小对高频焊闪光过程稳定性、焊缝质量、焊接效率全部有很大影响，通常取 2°~6°比较适宜（图 5）。会合角过小，将使闪光过程不稳定，焊缝中易产生火口、针孔等缺点；会合角过大，将使邻近效应减弱，功耗增加。同时，形成过大 α 角度也较困难并易引发管坯边缘产生折皱。 4. 电极、感应圈及阻抗器安放位置 （1）电极位置 在高频接触焊中，电极安放位置应尽可能靠近挤压辊轮，和其中心线距离取 20~150mm，焊铝管时取下限，焊壁厚 10mm 以上低碳钢管时取上限，见表 1。表 1 电极位置（低碳钢） 管外径 D/mm 16 19 25 50 106 至两挤压辊轮中心连线距离 L/mm 25 25 30 30 （2）感应圈位置 在高频感应焊中，感应圈应和管子同心放置，其前端距两挤压辊轮中心连线亦应尽可能靠近（表 2）。同时，应注意感应圈宽度 a 和管坯直径 D 关系为 $a = (1.0 \sim 1.2) D$ ；感应圈内径和管坯表面间隙 $h \approx 3 \sim 5\text{mm}$ （图 5）。表 2 感应圈位置（低碳钢） 管外径 D/mm 25 50 75 100 125 150 175 至两挤压辊轮中心连线距离 L/mm 40 55 65 80 90 100 110 （3）阻抗器位置 阻抗器应和管坯同轴安放，移动阻抗器、感应圈前后位置，均可加强或减弱对口边缘加热，调整板厚方向内外温度至靠近一致。通常阻抗器前端可超出两挤压辊轮中心线 $c = 3 \sim 4\text{mm}$ ，但可能使拖走阻抗器次数增加，影响焊接生产正常进行，所以在确保质量条件下，c 也能够选为零值或不到辊中心边线 10~20mm。同时，阻抗器（磁棒）截面积应约为管坯内圆截面积 75%，且和管坯内壁之间隙为 6~15mm。 5. 输入功率选择 生产上用振荡器输入功率来度量输给焊缝加热功率。输入功率小时，因管坯坡口面加热不足，达不到焊接温度而产生未焊透缺点；输入功率过大，将使坡口面加热温度过高而引发过热或过烧，甚至使焊缝击穿，造成熔化金属严重喷溅而形成针孔或夹杂缺点。 6. 焊接速度选择 焊接速度是关键焊接参数。伴随焊接速度提升，管坯坡口面挤压速度会伴随提升，这有利于将焊接区液态金属层和氧化物被挤出去，得到优质固相焊接。然而，在输入功率一定情况下，焊接速度不可能无限制提升，不然将达不到理想焊接温度。焊接速度可用下式估算： $v = P / K_1 K_2 \delta b$ （m/min）（1）式中 P——高频振荡器输入功率（kW）； K_1 ——和管坯材质相关经验系数，见表 3； K_2 ——和管径相关修正系数，高频接触焊取 1，高频感应焊时见表 4； δ ——管坯壁厚（mm）； b——坡口两边加热区宽度（cm），通常设 $b = 10\text{mm}$ 。表 3 K_1 值 材料种类 K_1 材料种类 K_1 低碳钢 0.8~1.0 18-8 不锈钢 1.0~1.2 铝 0.5~0.7 铜 1.4~1.6 表 4 感应焊时 K_2 值 管外径 K_2 管外径 K_2 mm in mm in 25 1 100 4 1.43 50 2 1.11 125 5 1.67 75 3 1.25 1.6 2 7. 焊接压力选择 焊接压力是高频焊关键焊接参数，通常以 100~300MPa 为宜。在生产上以管坯被挤压力来表示，它是经过改变挤压辊轮间距来调整。挤压力也常见挤压辊前后管材周长差 ΔL 来表示，其具体值随管壁厚度不一样而异，见表 5。表 5 挤压力经验值 管壁厚 $\delta/\text{mm} \leq 1.0$ 1.0~4.0 4.0~6.0 周长差 $\Delta L/\text{mm}$

δ₂/3δ₁ 2.3 高频直缝焊管 1. 低合金高强度钢管纵缝高频焊碳当量 CE<0.2% 碳素钢管, 其高频焊接性良好, 焊后可无须进行热处理。但低合金高强度钢管 CE 通常在 0.2%~0.65%, 在高频焊过程中, 因为集肤效应、邻近效应和热传导共同作用, 造成了管坯边缘周围温度分布梯度, 形成了熔化区、部分熔化区、过热组织区、正火区、不完全正火区、回火区等特殊区域。其中过热组织区因为焊接温度在 1373K 以上, 奥氏体晶粒急剧长大, 冷却后晶粒粗大, 在一定化学成份和冷速条件下还会形成淬硬组织; 另外, 因为温度梯度存在也会产生焊接应力。作为综合结果, 接头力学性能将低于母材, 所以必需进行焊后热处理, 即所谓“焊缝物理无缝化处理”。关键有两种方法: ①焊缝局部常化处理——切除钢管外毛刺后, 在通水冷却和定径之前用中频感应加热装置(图 1-6)将焊缝热影响区加热至约 1200K, 然后空冷至 811K 以下, 这是一个在线正火热处理, 适用于较大管径钢管(外径 200mm 以上); ②整体常化处理——对于直径较小钢管, 能够采取中频感应或火焰加热方法将管坯加热到 1173K 以上, 然后空冷或在带有可控气氛冷却室中冷却下来。当焊接含有易生成难熔氧化物元素(如 Cr)管坯时, 为降低焊缝中氧化夹杂, 可在高频焊接装置处和管坯内部喷送中性气体流(N₂)进行气体保护。 2. 不锈钢管纵缝高频焊 不锈钢导热性差, 电阻率高, 可用较低输入功率和较高焊接速度焊接。但因为高温强度大需要增大焊接压力, 比焊低碳钢管大 40~50MPa。同时, 不锈钢管纵缝高频焊关键问题是焊接热影响区因为碳化物析出使耐蚀性降低。采取焊前固溶处理、高焊接速度, 并紧接着焊后使管材经过冷却器进行急冷等方法, 在不用惰性气体保护下就可得到耐蚀性良好接头。 3. 铝合金管纵缝高频焊 铝合金管纵缝高频焊关键是必需将对口中难熔氧化物 Al₂O₃ 挤出焊缝, 这就要求提升焊接速度, 约为焊制钢管 2 倍。只有这么才可缩短在液态温度下停留时间, 降低散热所引发温度降低, 并可增加挤压速度, 促进氧化物挤出。同时, 铝合金是非导磁体, 高频电流穿透深度较大, 要求高频电源电压和功率应含有较高稳定度及较小波动系数, 并应选择较高电源频率。 2.4 高频螺旋缝焊管 高频螺旋缝焊管简称高频螺旋焊管, 除能使用较窄带钢(卷带)焊出直径很大管子外, 还能用同一宽度带钢焊出一样直径管材。焊接时, 将带钢连续送入成形机, 使之螺旋地绕轴弯曲成圆筒状, 并使其边缘间相互形成对接缝(图 7a)或搭接缝(图 7b), 同是却又组成对应 V 形会合角, 然后再用高频接触法进行连续焊接。对接缝通常用于制造厚壁管; 搭接缝用于生产薄壁管。为避免对接端面出现不均匀加热, 接头两边应加工成 60°~70°角坡口。搭接缝搭接量可随管坯厚度不一样在 2~5mm 选择。用 200kW 高频电源可制造壁厚 6~14mm, 直径达 1024mm 大直径螺旋缝焊管, 焊接速度可达 30~90m/min。因为螺旋管比直缝管承载能力大, 多用于石油、天然气管道。综上所述, 高频焊可焊接低碳钢、低合金高强度钢、不锈钢、铝及铝合金、钛及钛合金(需用惰性气体保护)、铜及铜合金(黄铜件要使用焊剂)、镍、锆等金属材料; 可焊接薄壁管、电缆套管、直缝管、螺旋缝管、鳍片管、结构型材(T 形、I 形、H 形等)、板(带)材等。

2.1 扩散焊接工艺特点 1. 工艺特点和其它焊接方法相比, 扩散焊接技术有以下几方面优点: 1) 接合区域无凝固(铸造)组织, 不生成气孔、宏观裂纹等熔焊时缺点。 2) 同种材料接合时, 可取得和母材性能相同接头, 几乎不存在残余应力。 3) 对于塑性差或熔点高同种材料、相互不溶解或在熔焊时会产生脆性金属间化合物异种材料(包含金属和陶瓷), 扩散焊接是可靠焊接方法之一。 4) 精度高, 变形小, 精密接合。 5) 能够进行大面主动及圆柱焊接。 6) 采取中间层可降低残余应力。扩散焊接缺点是: 1) 无法进行连续式批量生产。 2) 时间长, 成本高。 3) 对接合表面要求严格。 4) 设备一次性投资较大, 且焊接工件尺寸受到设备限制。 2. 接头形式设计 (1) 接头基础形式 扩散焊接接头形式比熔化焊类型多, 可进行复杂形状接合, 如平板、圆管、管、中空、T 形及蜂窝结构均可进行扩散焊接。在实际生产中常见接头形式图 10 所表示。(2) 扩散焊接制造复合材料 在纤维强化复合材料制造过程中, 常见加工方法之一是扩散焊接。 2.2 扩散焊接工艺参数选择 扩散焊接参数关键有温度、压力、时间、气氛环境和试件表面状态, 这些原因之间相互影响、相互制约, 在选择焊接参数时应综合考虑。另外, 扩散焊接时还应考虑中间层材料选择。 1.

焊接温度焊接温度 T 越高，扩散系数越大，金属塑性变形能力越好，焊接表面达成紧密接触所需压力越小。

不过，加热温度受到再结晶、低熔共晶和金属间化合物生成等原因影响。所以，不一样材料组合焊接温度，应依据具体情况，经过试验来选定。从大量试验结果看，焊接温度大全部在 $0.5\sim 0.8T_m$ （母材熔化温度）范围内，最适合温度通常为 $\approx 0.7T_m$ 。对瞬时液相扩散焊接温度，常选择在可生成液相最低温度周围，温度过高将引发母材过量溶解。固相扩散焊接时，元素之间互扩散引发化学反应，温度越高，反应越猛烈，生成反应相种类也越多。同时，在其它条件相同时，伴随温度增加，反应层厚度越厚。图 11 是 SiC/Ti 界面反应层厚度和时间、温度关系，从图中可知，焊接时间相同时，提升温度能够大幅度增加接头反应层厚度。接头强度是多方面原因综合结果，是由各反应层本身强度、各反应层间界面强度和反应层和母材之间界面强度所决定。

在其它条件一定时，焊接温度和接头强度存在最好值。锡青铜和钛扩散焊接时，温度在 1073K（800℃）以下，即使施加很大压力，接头强度仍然很低，关键原因是温度过低，界面处于活化状态原子少，无法形成良好接合界面。焊接温度在 1073~1093K 范围内，接头强度随温度上升而增加（图 12），在 1093K 时达成 165MPa 最大强度值。但焊接温度深入增加，接头强度逐步下降。由断口分析可知，接合界面出现了脆性金属间化合物，该化合物层随温度增加而变厚，从而降低了接头强度。

2. 扩散焊接时间扩散焊接时间 t 也称保温时间。关键决定原子扩散和界面反应程度，同时也对所焊接金属蠕变产生影响。焊接时间不一样，所形成界面产物和界面结构不一样。扩散焊接时，要求接头成份均匀化程度越高，焊接时间就将以平方速度增加。在实际扩散焊接工艺中，焊接时间从几分钟到几小时，甚至达成几十小时。但从提升生产率考虑，焊接时间越短越好。若缩短焊接时间，必需对应提升温度和压力。接头强度通常是随焊接时间增加而上升，以后逐步趋于稳定。

接头塑性，伸长率和冲击韧度和扩散焊接时间关系也和此相同。图 13 是铜和钢接头强度和焊接时间关系，在焊接时间为 20min 时得到最大值；当添加镍中间层时，接头强度有所提升，但改变趋势相同。和金属之间焊接相比，陶瓷和金属扩散焊接所用时间较长。焊接时间选择必需考虑到焊接温度高低。在焊接温度一定时，焊接时间越长，反应层越厚（图 11）。同时，受反应层厚度影响，接头性能也随焊接时间增加发生改变。图 14 所表示，SiC/Ti 扩散焊接接头在反应层厚度为 $5\mu m$ 时接头抗剪强度达成 160MPa 最大值，而对于 SiC/Cr 接头，反应层厚度为 $2\mu m$ 时接头强度最大。SiC/Nb 和 SiC/Ta 接头强度也随反应层厚度而改变，但没有出现显著下降。

3. 焊接压力扩散焊接时单位面积上压力 P 关键为促进焊接表面产生塑性变形及达成紧密接触状态使界面区原子激活，加速扩散和界面孔洞弥合及消失，预防扩散孔洞产生。压力越大，温度越高，紧密接触面积也越多。但不管压力多大，在扩散焊接早期不可能使焊接表面达成 100% 紧密接触状态，总有一小部分演变成界面孔洞。现在，扩散焊接规范中应用压力范围很宽，最小只有 0.04MPa（瞬时液相扩散焊接），最大可达 350MPa（热等静压扩散焊接），而通常压力约为 $10\sim 30MPa$ 。压力较小时，增大压力能够使接头强度提升和伸长率增大。图 15 是用 Cu 或 Ag 焊接 Al₂O₃ 陶瓷、用 Al 焊接 SiC 时改变趋势。和焊接温度和时间影响一样，压力也存在最好值，在其它规范参数不变条件下，最好压力时接头能够取得最好强度。另外，压力影响还和材料类型、厚度和表面氧化状态相关。

4. 环境气氛扩散焊接通常在真空、不活性气体（Ar、N₂）或大气氛环境下进行。通常来说，真空扩散焊接接头强度高于在不活性气体和空气中焊接接头强度。真空中材料在温度升高时，气体会从零件和真空室内壁中析出。计算和试验结果表明，真空室内真空度在常见规范范围内（ $1.33\sim 1.33\times 10^{-3}Pa$ ），就足以确保焊接表面达成一定清洁度，从而确保实现可靠焊接。图 16 是用 Al 做中间层焊接 Si₃N₄ 时环境条件对接头强度影响，真空焊接接头强度最高，抗弯强度超出 500MPa，接头呈交叉状断在 Al 层和陶瓷中，Al 层中止口为塑性，陶瓷中止口为脆性。在氩气保护下接头强度即使分散度较大（330~500MPa），但平均强度超出 400MPa。而在大气中焊接时强度低，只有 100MPa 左右，断口分析发觉，接头沿 Al/Si₃N₄ 界面脆性断裂，这是因为焊接时界面发生氧化反应，生成 Al₂O₃ 氧化膜，造成接头强度降低。在 1773K 高温下直接扩散焊接 Si₃N₄ 陶瓷时，因为高温下 Si₃N₄ 陶瓷轻易分解形成孔洞，所以在 N₂ 气中焊接能够限制陶瓷分解，N₂ 气压力高时接头抗弯强度较高。比如，在 1MPa 氮气中焊接接头抗弯强度在 380MPa 左右，而在 MPa 氮气中焊接接头，抗弯强度下降了 1/3，只有 220MPa。

5. 表面状态扩散焊接材料表面应光滑平整，通常应优异行机械加工，然后去除加工表面油、锈及表面氧化物。（1）表面粗糙度影响几乎全部焊接件全部需要由机械加工制成，不一样机械加工方法，取得粗糙等级不一样。扩散焊接试件通常要求表面粗糙度应达成 $Ra>2.5\mu m$ （△6）以上。扩散焊接时，被焊接工件表面粗糙度对接头力学性能也有影

响，高温下不易变形材料，焊接时塑性变形小，则表面粗糙度要细部分，通常来讲，工件表面粗糙度 R_a 在 $0.63\mu m$ 左右。对耐热合金和耐热钢扩散焊接，要求表面粗糙度应达成 $R_a=0.32\mu m$ 以上。表面加工质量越高，即表面粗糙度越小，越有利于结合面之间紧密结合。图 17 是 CrNi80WNbAlN （相当于 CrNi80WNbAlN ）合金表面加工状态对扩散焊接接头强度影响（焊接压力 $P=20\text{MPa}$ ），研磨加工比车削加工能够取得更高接头强度。同时，合适增加扩散焊接时材料横向膨胀率，也使接头强度增加。

Si3N4 陶瓷和金属焊接时，表面粗糙度对接头强度影响十分显著，粗糙表面会在陶瓷中产生局部应力集中而

轻易引发脆性破坏。Si3N4—Al 接头表面粗糙度对接头抗弯强度影响图 18 所表示（试件焊接温度 T＝1073K，压力 P＝0.05MPa，焊接时间 t＝10min）。从图中可知，表面粗糙度为 0.1μm 时，接头强度比母材强度稍低，

当表面粗糙度由 0.1μm 变为 0.3μm 时，接头抗弯强度从 470MPa 降低到 270MPa。机械去膜是去除表面氧化物和锈蚀最简单方法，除机械加工外，还可用锉刀、刮刀和砂布打磨，也可用金属丝刷、金属丝轮和砂轮去膜。

对形状复杂或表面大部件，可用喷砂或喷丸去膜，喷砂后零件，还应作去除砂粒补充处理。（2）表面清理待焊接零件在扩散焊接前加工和存放过程中，被焊接表面不可避免地形成氧化物、覆盖着油脂和灰尘等。在

焊接前需经过脱脂、去除氧化物及气体处理等工艺过程。6. 中间层选择扩散焊接时，中间层材料很关键，除了能够无限互溶材料以外，异种材料、陶瓷、金属间化合物等材料多采取中间层来进行扩散焊接。中间

层材料不仅在固相扩散焊接时使用，在液相扩散焊接中应用也比较广泛。（1）中间层作用 中间层在扩散焊接时关键起以下作用：1) 改善表面接触，减小扩散焊接时压力。对于难变形材料，扩散焊接时采取软质金

属或合金做中间层，利用中间层塑性变形和塑性流动，使结合界面达成紧密接触，提升物理接触效果和降低达成紧密接触所需时间。同时，中间层材料加入，使界面浓度梯度变大，促进元素扩散，加速扩散空洞消失。

2) 能够抑制夹杂物形成，促进其破碎或分解。比如，Al 合金表面易形成一层稳定 Al2O3 氧化物层，扩散焊接时该层不向母材中溶解。能够采取 Si 作中间层，利用 Al-Si 共晶反应形成液膜，促进 Al2O3 层破碎。又如 Ni

基合金表面也轻易形成氧化膜，扩散焊接时，因为微量氧存在，可在焊接界面促进碳化物和氮化物形成，影响接头性能。若采取 Ni 箔做中间层进行扩散焊接，能够对这些化合物生成抑制作用。3) 改善冶金反应，避免或降低形成脆性金属间化合物和有害共晶组织。异种金属材料扩散焊接时，最好选择和母材不形成金属化

合物第三者材料，方便经过控制界面反应，改善材料焊接性。比如，Fe 和 Ti 扩散焊接时，除形成 Fe-Ti 化合物以外，Fe 中 C 元素和 Ti 反应形成 TiC。若采取 Ni 做中间层进行扩散焊接，能够抑制 TiC 脆性相出现。而

且，在 Ni 和 Ti 界面上，形成 Ni-Ti 化合物后，接头强度比形成 TiC 时高。4) 能够降低焊接温度，降低扩散焊接时间。比如，Mo 直接扩散焊接时，焊接温度为 1260℃，而采取 Ti 箔作为中间层，焊接温度只需要 930

℃。5) 控制接头应力，提升接头强度。异种材料焊接时，因为材料物理化学性能突变，尤其是因热膨胀系数不一样，接头易产生很大热应力。选择兼有两种母材性能材料作为中间层，形成梯度接头，避免或降低界面热应力，从而提升接头强度。（2）中间层选择 中间层选择应遵照以下标准：1) 轻易塑性变形，熔点比

母材低。2) 物理化学性能和母材差异比被焊接材料之间差异小。3) 不和母材产生不良冶金反应，如不产生脆性相或不期望出现共晶相。4) 不引发接头电化学腐蚀。中间层可采取多个方法添加，如薄金属垫片、非

晶态箔片、粉末（对难以制成薄片脆性材料）和表面镀膜（如蒸镀、PVD、电镀、离子镀、化学镀、喷镀、离子注入等）。（3）固相扩散焊接中间层材料 在固相扩散焊接中多用软质纯金属材料做中间层，常见材料

为 Ti、Ni、Cu、Al、Ag、Au 及不锈钢。比如 Ni 基超合金扩散焊接时采取 Ni 箔，Ti 基合金扩散焊接时采取 Ti 箔。常见中间层材料及扩散焊接参数见表 1。表 1 固相扩散焊接时中间层材料及焊接参数 焊接母材 中间层材料 焊接参数 压力/Mpa 温度/℃ 时间/min 保护气氛 Al/Al Si 7～15 580 1 真空 Be/Be — 70 815～900 240

不活性气体 Be/Be Ag 箔 70 705 10 真空 Mo/Mo — 70 1260～1430 180 不活性气体 Mo/Mo Ti 箔 70 930 120 不活性气体 Mo/Mo Ti 箔 85 870 10 真空 Ta/Ta — 70 1315～1430 180 不活性气体 Ta/Ta Ti 箔 70 870 10 真空

Ta-10W/Ta-10W Ta 箔 70～140 1430 0.3 氩气 Cu-20Ni/钢 Ni 箔 30 600 10 真空 Al—Ti — 1 600～50 1.8 真空 Al—Ti Ag 箔 1 550～600 1.8 真空 Al—钢 Ti 箔 0.4 610～635 30 真空 在陶瓷和金属扩散焊接中，活性金

属中间层可选择 V、Ti、Nb、Zr、Hf、Ni-Cr 及 Cu-Ti 等。为缓解陶瓷和金属接头残余应力，中间层选择可分为三种类型，即单一金属中间层、多层金属中间层和梯度金属中间层。单一金属中间层通常采取软金属，如

Cu、Ni、Al 及 Al-Si 合金等，经过中间层塑性变形和蠕变变形来缓解接头残余应力。比如，在进行 Si3N4 和负铁扩散焊接中发觉，不录采取中间层时，接头中最大残余应力为 350MPa；当分别采取 1.5mm

厚 Cu 和 Mo 中间层时，接头最大残余应力数值分别降至 180MPa 和 250MPa。多层金属中间层降低接头残余应力效果愈加好，通常在陶瓷一侧施加低热膨胀系数、高弹性模量金属，如 W、Mo 等；而在金属一侧施加塑性好软金属，如 Ni、Cu 等。梯度金属中间层是按弹性模量或热膨胀系数逐步改变设计，整个中间层表现为在陶瓷一侧部分热膨胀系数低、弹性模量高；而在金属一侧部分热膨胀系数高、塑性好。也就是说，从陶瓷一侧过渡到金属一侧，梯度中间层弹性模量逐步降低，而热膨胀系数逐步增高，这么能更有效地降低陶瓷/金属接头残余应力，提升接头性能。（4）液相扩散焊接中间层 液相扩散焊接时，除了要求中间层（钎料）含有上述性能以外，还要求和母材润湿性好、凝固时间短、含有加速扩散元素（硼、铍、硅等）。对于 Ti 基合金，能够使用含有 Cu、Ni、Zr 等元素 Ti 基中间层。对 Al 及其 Al 合金，可使用含有 Cu、Si、Ag 等元素 Al 基中间层。

2. 1 工艺特点超声波焊接焊点，应有高接合强度和合格表面质量，除了表面不能有显著挤压坑和焊点边缘凸出以外，还应注意和上声极接触处焊点表面情况，不许可有裂纹和局部未熔合，所以，超声波焊接形式选择、接头设计和焊接参数选择很关键。 1. 超声波焊接特点 1) 可焊接材料范围广，可用于同种金属材料、尤其是高导电、高导热性材料（如金、银、铜、铝等）和部分难熔金属焊接，也可用于性能相差悬殊异种金属材料（如导热、硬度、熔点等）、金属和非金属、塑料等材料焊接，还能够实现厚度相差悬殊和多层箔片等特殊结构焊接。 2) 焊件不通电，不需要外加热源，接头中不出现宏观气孔等缺点，不生成脆性金属间化合物，不发生像电阻焊时易出现熔融金属飞溅等问题。 3) 焊缝金属物理和力学性能不发生宏观改变，其焊接接头静载强度和疲惫强度全部比电阻焊接头强度高，且稳定性好。 4) 被焊金属表面氧化膜或涂层对焊接质量影响较小，焊前对焊件表面准备工作比较简单。 5) 形成接头所需电能少，仅为电阻焊 5%；焊件变形小。 6) 不需要添加任何粘结剂、填料或溶剂，含有操作简便、焊接速度快、接头强度高、生产效率高等优点。超声波焊关键缺点是受现有设备功率限制，所以和上声极接触焊件厚度不能太厚，接头形式只能采取搭接接头，对接接头还无法应用。 2. 超声波焊接分类根据超声波弹性振动能量传入焊件方向，超声波焊接基础类型能够分为两类（图 3）：一类是振动能量由切向传输到焊件表面而使焊接界面产生相对摩擦，这种方法适用于金属材料焊接；另一类是振动能量由垂直于焊件表面方向传入焊件，关键是用于塑料焊接。常见金属超声波焊接可分为点焊、环焊、缝焊及线焊；多年来，双振动系统焊接和超声波对焊也有一定应用。（1）点焊 点焊是应用最广一个焊接形式，依据振动能量传输方法，能够分为单侧式、平行两侧式和垂直两侧式。振动系统依据上声极振动方向也能够分为纵向振动系统、弯曲振动系统和介于二者之间轻型弯曲振动系统（图 4）。功率 500W 以下小功率焊机多采取轻型结构纵向振动；千瓦以上大功率焊机多采取重型结构弯曲振动系统；而轻型弯曲振动系统适用于中小功率焊机，它兼有上述两种振动系统优点。（2）环焊 环焊方法图 5 所表示，关键用于一次成形封闭形焊缝，能量传输采取是扭转振动系统。焊接时，耦合杆 4 带动下声极 5 作扭转振动，振幅相对于声极轴线呈对称分布，轴心区振幅为零，边缘位置振幅最大。该类焊接方法最适合于微电子器件封装工艺，有时环焊也用于对气密性要求尤其高直线焊缝场所，用来替换缝焊。因为环焊一次焊缝面积较大，需要有较大功率输入，所以常常采取多个换能器反向同时驱动方法。（3）缝焊 和电阻焊中缝焊类似，超声波缝焊实质上是由局部相互重合焊点形成一条连续焊缝。缝焊机振动系统按其滚轮振动状态可分为纵向振动、弯曲振动和扭转振动三种形式（图 6）。其中最常见是纵向振动形式，只是滚轮尺寸受到驱动功率限制。缝焊能够取得密封连续焊缝，通常焊件被夹持在上下滚轮之间，在特殊情况下可采取平板式下声极。

（4）线焊 是线焊方法示意图，它是点焊方法一个延伸，利用线状上声极，在一个焊接循环内形成一条狭窄直线状焊缝，声极长度就是焊缝长度，现在能够达成 150mm，这种方法最适用于金属薄箔封口。（5）双超声波振动系统点焊 图 8 是采取两个不一样频率振动系统来完成一个点点焊示意图，上下两个振动系统频率分别为 27kHz 和 20kHz（或 15kHz），上下振动系统振动方向相互垂直，焊接时二者作交直振动。当上下振动系统电源各为 3kW 时，可焊铝件厚度达 10mm，焊点强度达成材料本身强度。双超声波振动系统多用于集成电路和晶体管细导线焊接，即使焊接方法和点焊基础相同，但焊接设备复杂，要求设备控制精度高，方便实现焊点高质量和高可靠性焊接。（6）超声波对焊 超声波对焊关键用于金属对接，是多年来开发一个新方法，焊接原理图 9 所表示。焊接设备由上、下振动系统、提供接触压力液压源和焊件夹持装置等部分组成。左边焊件一端由夹具固定，另一端夹在上、下振动系统之间作超声振动；右焊件端面和左端面对接，并由夹

具夹紧，接触压力加在右侧焊件上。焊接时，在超声振动作用下即可把两个焊件在端面焊接在一起。应注意，焊接装置上、下振动系统振动相位必需相反，上振动系统能够是无源。采取频率为 27kHz 该类焊接装置能够焊接 6~10mm 厚铝板、6mm 厚铜板和铝板焊接。现在能够实现 6mm 厚、100~400mm 宽铝板对接。

2. 2 超声波焊接头设计 1.

焊点设计超声波焊接时，要求焊点强度必需达成一定要求，需要设计出一个合理焊点结构，同时还要保持外形尽可能美观。焊点分布图 10 所表示，对焊点和板材边缘距离没有限制，能够沿边缘部署焊点，焊点之间距离能够任意选定，能够重合和反复焊接（修补），每行之间距离也能够依据需要任选，不存在电阻点焊时分流问题。

2. 焊接界面设计

为了在焊接过程中使能量集中，缩短焊接时间，提升焊接质量，焊接界面设计很关键，关键有以下多个形式。

（2）台阶式界面

为了提升焊接力，可设计成图 12 所表示台阶式焊接界面（W 为板宽），三角形凸缘能够使凸缘材料熔化以后流入预留孔隙，能产生较大切应力及拉力强度，这种设计还能够避免外表面上产生焊接痕迹。

（3）凹凸插接式界面

图 13 所表示，待焊材料设计成带有三角形凸缘凹凸形式，两焊件之间应留有间隙，凸形焊件壁应有一定斜度，方便塑料件轻易拼合，同时让熔融材料有流动空间，不致溢出外面。在超声波焊接头设计中应注意控制焊件谐振问题。当上声极向焊件引入超声振动时，假如焊件沿振动方向自振频率和引入超声振动频率相等或相近，就有可能引发焊件谐振，其结果往往造成已焊焊点脱落，严重时可造成焊件疲惫断裂。处理上述问题简单方法就是改变焊件和声学系统振动方向相对位置，或改变焊件自振频率。

2.3 超声波焊参数选择

超声波焊关键参数有振动频率 f 、振幅 A、静压力 F 及焊接时间 t，另外还应考虑超声波功率选择和各参数之间相互影响。在超声波焊接中，点焊应用得最普遍，下面以点焊为例讨论各参数对焊接质量影响。

1. 超声波振动频率 f

振动频率关键是指谐振频率数值友好。谐振频率精度

振动频率通常在 15~75kHz 之间。频率选择应考虑被焊材料物理性能和厚度，焊件较薄选择比较高振动频率，焊件较厚、焊接材料硬度及屈服强度较低时选择较低振动频率。这是因为在维持声功效不变前提下，提升振动频率能够降低振幅，所以可降低薄件因交变应力引发疲惫破坏。振动频率对焊点抗剪强度有影响，图 14 所表示，材料越硬、厚度越大时，频率影响越显著。应注意，伴随频率提升，高频振荡能量在声学系统中损耗将增大，所以大功率超声波点焊机频率比较低，通常在 15~20kHz 范围内。振动频率精度是确保焊点质量稳定关键原因，因为超声波焊接过程中机械负荷多变性，会出现随机失谐现象，造成焊接质量不稳定。

2. 振幅 A

振幅是超声波焊接工艺中基础参数之一，它决定着摩擦功率大小，关系到焊接面氧化膜去除、接合面摩擦产热、塑性变形区域大小及塑性流动层情况等。所以，依据被焊材料性质及其厚度正确选择振幅数值是取得高可靠接头前提。振幅选择范围通常为 5~25 μm ，小功率超声波焊机通常含有高振动频率，但振幅范围较低。低硬度焊接材料或较薄焊件应选择较低振幅；伴随材料硬度及厚度提升，所选择振幅也应对应提升。这是因为振幅大小对应着焊件接触表面相对移动速度大小，而焊接区温度、塑性流动和摩擦功大小又由该相对移动速度所确定。对于具体焊件，存在一个适宜振幅范围。图 15 为铝镁合金在不一样振幅值下焊点强度试验结果。当振幅 A 为 17 μm 时，焊点抗剪强度最大，振幅减小，强度随之降低。当振幅小于 6 μm 时，已经不能形成接头，即使增加振动作用时间也无效果。这是因为振幅值过小，焊件间相对移动速度过小所致。当振幅值超出 17 μm 时，焊点强度反而下降，这关键和金属材料内部及表面疲惫破坏相关，所以振幅过大，由上声极传输到焊件振动剪力超出了它们之间摩擦力，声极和工件之间发生相正确滑动摩擦，并产生大量热和塑性变形，造成上声极嵌入焊件，使有效接合截面降低所致。超声波焊机换能器材料和聚能器结构决定了焊机振幅大小，当它们确定以后，要改变振幅，通常是经过调整超声波发生器电参数来实现。另外，振幅值选择和其它参数相关，应综合考虑。必需指出，在适宜振幅范围内，采取偏大振幅可大大缩短焊接时间，提升焊接生产效率。

3. 静压力 F

静压力作用是经过声极使超声振动有效地传输给焊件，超声波焊接时所需静压力大小依据材料类型不一样而异。静压力和焊点抗剪力之间关系图 16 所表示。当静压力过低时，因为超声波几乎没有被传输到焊件，不足以在两焊件界面产生一定摩擦功，超声波能量几乎全部损耗在上声极和焊件之间表面滑动方面，所以不可能形成有效连接。伴随静压力增加，改善了振动传输条件，使焊区温度升高，材料变形抗力下降，塑性流动程度逐步加剧；另外，因为压应力增加，接触处塑性变形面积及连接面积增加，所以接头强度增加。当静压力达成一定数值后再增加压力，接头强度不再提升或反而下降。这是因为当静压力过大时，振动能量不能合理地利用，使摩擦力过大，造成焊件间相对摩擦运动减弱，甚至会使命振幅值有所降低，造成了焊件间连接面积不再增加或有所减小，加之材料压溃造成接头实际接合截面降低，使焊点强度降低。在其它焊接条件不变情况下，选择偏高静压力，能够在较短焊接时间内得到一样强度焊点，这是因为偏高静压力能在振动早期较低温度下产生塑性变形所致。同时，选择偏高静压力，能在较短时间内达成最高温度，缩短了焊接时间。

4. 焊接时间 t

爆炸焊工艺 2. 1 工艺特点 1. 材料焊接性 爆炸焊关键用于同种金属材料、异种金属材料、金属和陶瓷焊接，尤其是材料性能差异大而用其它方法难以实现可靠焊接金属（如铝和钢、铝和钼等）、热膨胀系数相差很大材料（钛和钢、陶瓷和金属等）、活性很强金属（如钨、铌、锆等）。实际上，任何含有足够强度和塑性并能承受工艺过程所要求快速变形金属，全部能够进行爆炸焊接，图 4 是成功实现爆炸焊接金属及合金组合。铸铁 钨 铂金 银 钼 钽 耐 钛 镍 铜 铝 不 合 碳 铬 蚀 合 合 锈 金 钢 钻 合 金 金 钢 钢 合 金 金 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 碳钢 16 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 合金钢 15 ●●●●●●●●●●●●●●●●●●

● 不锈钢 14 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 铝 13 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 铜合金 12 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 镍合金 11 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 钛 10 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 耐蚀合金 9 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 钼 8 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 铌 7 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 银 6 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 金 5 铂 4 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 钨钴合金 3 钒 2 ●●●●●●●●●●●●●●●●●● 钨 1 ●●●●●●●●●●●●●●●●●●

图 4 可实现爆炸焊接金属及合金 2. 接头形式 按焊件类型不一样，可分为板—板、管—管、管—板爆炸焊接，其接头形状及工艺装配图 5 所示。按产品和工艺要求，接头形式关键能够分为对接和搭接两种。基板和覆板厚度比值称为基覆比，该值通常大于 1。基覆比值越大，即基板和覆板厚度比越大，爆炸焊质量越轻易确保。

(1) 复板焊接 即在某一金属板上焊上另一个金属平板，如把不锈钢板、铜板、钛板、铝板等焊到一般钢板上。现在焊到基板上覆板最大尺寸能够达到 1.2m×2m，厚度从 1~6mm 不等。(2) 管—管包焊 即在某种材料内壁或外表面上，焊上另一个材料薄金属管，如钢管和钛管、钛管和紫铜管、硬铝管和软铝管、铝管和铜管焊接等。(3) 管和板焊接 关键用于大型热交换器焊接，其次因为部分管子损坏而漏水，也可经过爆炸焊接方法把该管堵塞。

2. 2 爆炸焊工艺步骤爆炸焊工艺步骤以下：(1) 表面清理 爆炸焊接时，试件对接表面必需平整，无缺点存在，表面粗糙度 $Ra \leq 12.5\mu m$ 。安装前应待焊面上污物除去，常见清理方法有化学清洗、机械加工、打磨、砂和喷丸等。(2) 安放间隙柱 为了保持基板和覆板之间距离，可用焊于基板四面铁丝作支撑，也可在两板之间安装立柱。安装立柱操作过程是把基板和覆板放到焊接基础后，将覆板向上抬高一定距离，将既定长度间隙柱放置其中。在基板边缘每隔 200~500mm 放置一个间隙柱。在间隙柱安放以后，假如复合板面积不太大，则两板之间就形成了以间隙柱长度为尺寸间隙距离，而且这个距离在两板之间任一位置全部是相同均匀。不过，假如复合板面积较大，间隙距离在两板几何中心位置就可能很小，甚至贴和在一起。在这种情况下，除在基板边缘放置间隙柱外，还应在基板待结合面上均匀地放置一定数量、形状和尺寸金属间隔物，以确保基板和覆板间整个间隙距离。应注意，覆板长度和宽度应比基板对应大 5~10mm。

(3) 涂抹缓冲保护层 当覆板在基板上支撑起来以后，用毛刷或滚筒将水玻璃或黄油涂沫在覆板上表面（上表面将接触炸药），有时采取橡胶材料作缓冲层，这一薄层物质起缓冲爆炸载荷和保护覆板表面免于氧化及损伤作用。(4) 放置药框 将预先备好木质或其它材质炸药框放到覆板上表面，药框内缘尺寸比覆板外缘尺寸稍小。(5) 布放主炸药 药框安放好后，将主炸药用工具放入药框，应确保各处炸药厚基础相同。(6) 布放

高爆速引爆炸药 为提升主炸药引爆和传爆能力，在插放雷管位置上布放 50～200g 高爆速引爆炸药。引爆炸药也可在主炸药布放之前放到预定位置上。（7）安插雷管

引爆炸药和主炸药布放好后，将雷管插入引爆炸药位置上，并和覆板表面接触。为预防雷管爆炸后前端聚能作用对覆板冲积凹坑，可在雷管下垫一小块橡皮或其它柔性物质。（8）接起爆线 清理现场物品，工作人员撤离到安全区，引爆焊接。爆炸焊接时，接触界面撞击点前方产生金属射流，和爆炸发生时覆板变形和加速运动，必需沿整个焊接接头逐步地连续完成，这是取得爆炸焊牢靠接头基础条件。所以，炸药引爆必需是逐步进行，假如炸药同时一起爆炸，整个覆板和基板进行撞击，即使压力再高也不能产生良好结合。

2. 3 焊接工艺参数选择爆炸焊参数关键有：炸药品种、单位面积药量、基板和覆板安装间隙和安装角、基板和覆板尺寸参数（关键有板材厚度、基覆比）和表面状态等。

1. 炸药炸药是爆炸焊能源，其种类和密度决定爆炸速度。爆速过高，会使撞击角度变小和作用力过大，轻易撕裂结合部位；爆速过低，不能维持足够爆炸角，也不能产生良好结合。爆炸焊中使用炸药分为单一炸药和混合炸药。其中单一高爆速炸药用作附加药包内起爆药；混合低爆速炸药用作主炸药。炸药必需满足以下要求：

1) 爆速应合适，通常以 m/s 左右为宜。对于大面积复合板材焊接，覆板越厚，炸药爆速应该越低。通常来讲，混合炸药能够满足这个要求。

2) 所用炸药应该含有稳定物理、化学性质和爆炸性能，在厚度和密度较大改变范围内能够用起爆器材引爆，并能快速达成稳定爆轰，即不稳定爆轰区应该尽可能地小。

3) 炸药布放后和覆层紧密贴合，其间不应有间隙。

4) 炸药起源比较广、价格廉价、加工使用方便，在加工运输贮藏和使用过程中含有高稳定性和安全性等。

5) 炸药数量通常以覆板单位面积上布放炸药数量或炸药厚度来计算，以 $W_g(g/cm^2)$ 或 $\delta_o(mm)$ 表示。大面积复合板爆炸焊接时，常见 W_g 来计算总药量，在大厚度复合板坏爆炸焊接时，常见 δ_o 来计算总药量。药量计算现在尚无理论公式，可采取以下经验公式来计算。

式中 h_o ——覆板和基板安装间隙（cm）； W_g ——覆板单位面积上布放炸药量（ g/cm^2 ）； ρ ——覆板密度（ g/cm^3 ）； δ ——覆板厚度（cm）； σ_s ——覆板金属材料屈服点（Mpa）； $B、C$ ——计算系数， B 在 0.05~3.0 内选择， C 在 0.5~2.5 内选择。

2. 安装间隙和安装角爆炸焊能量传输、吸收、转换和分配，是经过间隙借助覆板和基板高速冲击碰撞来完成和实现。安装间隙和安装角是影响爆炸角关键原因之一，在爆炸焊中，假如爆炸角过小，不管撞击速度有多大，也不会产生射流现象，反而轻易引发结合面严重熔化，接头强度低。平行法爆炸焊时采取均匀间隙值，以 h_o 表示，通常为覆板厚度 0.5~1.0 倍。角度法爆炸焊时，间距小一端以 h_1 表示，间距大一端以 h_2 表示，由 h_1 和 h_2 之差、和金属板长度计算出初始安装角 α 。经验和实践表明，在大面积复合板爆炸焊接中常见平行法爆炸焊，小面积复合板和部分特殊试验中能够用角度法进行爆炸焊接。间隙计算也无理论公式，通常见以下经验企业来计算。

$H_o=A(\rho \delta)^{0.6}$ （2）式中 h_o ——覆板和基板之间间隙距离（cm）； ρ ——覆板密度（ g/cm^3 ）； δ ——覆板厚度（cm）； A ——计算系数，在 0.1~1.0 范围内选择。当 h_o 和 W_g 计算出来以后，就准备对应尺寸间隙柱和算出炸药总量，然后进行一组小型复合板试验。试验结果如有偏差，可对原来计算 h_o 和 W_g 值进行合适调整，利用得到能满足技术要求参数进行大面积复合板爆炸焊接。

3. 基覆比基板和覆板厚度之比称为基覆比。实践证实，基覆比越大则越轻易进行爆炸焊接，接头质量也越轻易确保，当基覆比靠近 1 时爆炸焊接极难进行，通常要求该值应在 2 以上。

4. 表面状态表面状态和形成物理接触面积相关，对焊接质量有很大关键影响，焊前一定要进行表面清理以保持金属表面尽可能清洁和含有一定表面粗糙度。试验结果表明，粗糙表面既难于形成波形界面，又易于熔化而形成金属间化合物中间层，所以应合理选择表面粗糙度。图 6 为钛-钢复合板抗拉强度和表面粗糙度关系，从图中可知， $R_a > 0.7\mu m$ 以后，接头强度降低。

变形焊工艺

2. 1 工艺特点

1) 变形焊接工艺最大特点是焊接时产生变形，变形时是实现两界面键合关键条件。经过变形不仅使氧化膜破碎，还能够克服界面上微观不平度，使两个界面间金属原子紧密接触。

2) 焊接所需最小变形量依据外界条件不一样而异，如在大气和室温下变形焊，其最小变形量均在 60% 以上。变形焊所需最小变形量还和待焊材料性质和表面氧化膜性质相关。比如，在室温和大气条件下，不一样金属焊接性差异很大，表面生成脆而硬氧化膜材料所需变形量小，如铝合金焊接；而生成软（活性好）氧化膜时所需变形量大，如铜合金焊接。大气和室温下冷压焊时，假如待焊表面存在油污，则不管多大变形量也不能实现连接。

3) 利用纯氩气保护，并在室温焊接条件下进行焊接时，所需最小变形量可在 20% 以下。在超高真空条件下进行变形焊接，其最小变形量可在 5% 以下。在惰性气体或超高真空条件下，假如表面进行了清理，多种金属变形焊焊接性没有太大差异，关键是氧化膜影响原因已经排除。

4) 表面粗糙度对变形时有影响，在真空精密焊接条件下，待焊界面粗糙度越小，所需最小变形量也越小。

5)

焊接温度对变形量也有影响，和扩散连接一样，提升焊接温度能够减小变形量，从而减小焊接压力和变形。

6) 超高真空变形焊能够消除氧化膜影响，使多种金属焊接性差异很小，其变形量只有大气中变形焊 6%，属

精密焊接，压痕最小，耗能也少。 2. 2 冷压焊工艺 1. 材料焊接性 冷压焊关键适用于硬度不高、塑性

好金属薄板、线材、棒材和管材连接。尤其适宜于在焊接中不许可接头升温产品。在模具强度许可前提下，

很多不会产生快速加工硬化或未经严重硬化塑性金属如 Cu、Al、Ag、Au、Ni、Zn、Cd、Ti、Su、Pb 及其合

金，均适合冷压焊 它们之间任意组合，包含液相、固相不相溶非共格金属如 Al 和 Pb、Zn 和 Pb 等组合，也

可进行冷压焊。表 1 给出了多种金属组合采取冷压焊焊接性。不过对于一些异种金属（如 Cu 和 Al），在高

温下会因扩散作用而产生脆性化合物，使其韧性显著下降，这类材料组合只宜在较低温度下进行冷压焊，工

作环境温度也不应太高。 表 1 多种金属冷压焊焊接性 材料 Ti Cd Pt Sn Pb W Zn Fe Ni Au Ag Cu Al Ti +++

+ Cd +++ Pt +++++ Sn +++++ Pb +++++ W + Zn +++++ Fe +++++

Ni +++++ Au +++++ Ag +++++ Cu +++++ Al +++++

++ 注：+为焊接性良好（++为同种金属焊接）；空白为焊接性差或无相关报道。 2. 表面状态 冷压焊工

艺要求焊接件接触界面要有良好表面状态，关键包含选择适宜表面粗糙度和清洁度。（1）表面粗糙度 通常

来说，冷压焊对待焊表面粗糙度没有很高要求，经过轧制、剪切车削表面全部能够进行冷压焊。带有微小沟

槽不平待焊表面，在挤压过程中有利于界面切向位移，对焊接过程有利。不过，当焊接塑性变形量小于 20%和

进行精密真空压焊时，就要求待焊表面有较低粗糙度，尤其是精密真空变形焊时，界面粗糙度越小，所需最

小变形量越小，此时待焊表面和扩散连接时表面加工要求相同。（2）待焊表面清洁度 待焊表面油脂、污染

物、水膜及其它有相杂质是影响冷压焊质量关键原因之一。在冷压焊过程中，这些杂质将被压延成微小薄膜，

不管焊接件产生多大塑性变形量，全部无法将其根本挤出结合面，所以必需在焊前采取化学溶剂清洗或超声

波净化方法去除。 焊件表面金属氧化对冷压焊质量也有影响，厚度不大脆性氧化膜（如铝件表面 Al₂O₃）在

塑性变形量大于 65%条件下不能够不进行清理，其它材料在冷压焊前全部应进行氧化膜清理。钢丝刷或钢丝轮

清理是最常见清理方法，钢丝轮（丝径为 0.2~0.3mm，材质最好是不锈钢）旋转线速度以 1000m/min 为宜，

然后再进行化学溶剂或超声波清洗。为确保取得质量稳定冷压焊接头，清理后焊接件表面不许可遗留残渣或

氧化膜粉屑。比如用钢丝轮清理时，通常要附加负压吸收装置，以去除氧化膜法屑。清理后表面应给予保护，

避免装配时造成待焊表面再污染。 3. 塑性变形量 冷压焊接时所需最小塑性变形量是控制焊接质量关键参

数，也是判定材料冷压焊接性好坏一个指标。材料塑性变形量越小，冷压焊接性就越好。不一样金属材料含

有不一样最小塑性变形量，纯铝变形程度最小，其冷压焊接性最好，其次是钛，也含有好冷压焊接性能。 实

现冷压焊条件之一是焊接件实际塑性变形量要大于该金属称“变形程度”值，但不宜过大。过大变形量会增

加冷作硬化现象，使韧性下降。比如对铝及多数铝合金搭接时，压缩率多控制在 65%~70%范围内。 搭接冷

压焊塑性变形程度用压缩率 ε 表示，是指被压缩厚度占焊件总厚度百分比，即
$$\epsilon = \frac{h_1 + h_2 - h}{h_1 + h_2} \times 100\%$$

（1） h₁+h₂ 式中 h₁、h₂——分别为焊件厚度； h——压缩后剩下厚度。 表 2 给出了多种金属材料

最小压缩率，这些材料压缩率是在相同厚度、相同冷压点焊条件下得到。在冷压焊生产中，为了确保得到满

意焊透率，并考虑到多种误差存在，实际选择压缩率应比表中数据大 5%~15%。 表 2 多种金属材料搭接点

焊最小压缩率 材料名称 压缩率（%） 材料名称 压缩率（%） 材料名称 压缩率（%）纯铝 60 铜和铝 84

镍 89 工业纯铝 63 铜和铝 85 铁 92 钛 75 铜和银 85 锌 92 硬铝 80 铜 86 银 94 铝 84 铝和钛 88 铁

和镍 94 镉 84 锡 88 锌合金 95 对接冷压焊塑性变形程度用总压缩量 L 表示，它等于焊件每次压缩长度和

顶锻次数乘积，可用下式表示。
$$L = n(L_1 + L_2)$$

（2） 式中 L₁——固定钳口一侧焊件每次压缩长度；

L₂——活动钳口一侧焊件每次压缩长度； n——顶锻次数。 对接冷压焊时，取得合格接头关键原因是要有足

够总压缩量，表 3 给出了对接冷压焊时最小总压缩量，有些材料需要靠数次顶锻才能实现可靠连接。对于塑

性好、变形硬化不强烈金属，工件压缩量通常小于或等于其直径或厚度，焊接时使构件伸出长度等于压缩长

度，可一次顶锻焊成。对于硬度较大、形变强化较强金属，压缩量通常大于或等于焊件直径或厚度，需要数

次顶锻才能焊成，对于大多数材料，顶锻次数通常小于 3 次。 表 3 对接冷压焊所需最小总压缩量 材料名称

每一工件最小总压缩量 顶锻次数 圆形件（直径 d） 矩形件（厚度 h₁） 铝和铝 （1.6~2.0）d （1.6~2.0）

h₁ 2 铝和铜 铝 （2~3）d 铝 （2~3）h₁ 3 铜 （3~4）d 铜 （2~3）h₁ 铜和铜 （3~4）d （3~4）h₁ 3 铝

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/118043070114006114>