

塑料管电熔焊技术（上）

张胜玉

（上海瑞控阀门有限公司，上海 201715）

摘要：电熔焊是连接热塑性塑料（主要为 PE）管道的常用方法之一。电熔焊采用带有电阻加热线圈的模制承插管件。将准备好的管端插入承口中并夹紧。然后通过线圈施加预设时间的电流，使周围的聚合物加热，并将热量传递到管壁上。管件末端的冷区遏制住中心部分的熔体，从而产生较高的熔体压力并形成均匀的接头。电熔接头以其可靠性和多年无需维护的运行特点而为人所知。电熔焊特别适合于气管和水管的连接和维修，因为它可以在现场进行。电熔焊的特点是装置相对较小，因而适用于无法抽出和切割有缺陷管段的应用场合。如果未经过彻底测试，通过此方法熔接的接头容易泄漏。电熔接头的缺陷可能是由于对管材的加热不当、熔化界面不足、过度焊接、孔隙和结构变形等原因引起。通常，电熔焊管接头的失效是由沿熔化界面的开裂、穿过管件的开裂以及沿加热丝界面的开裂导致的。本文论及电熔焊原理及过程、焊接设备、工艺参数、焊接工艺、焊接性、特点、质量控制、电熔接头的应力模拟。

关键词：电熔焊；聚乙烯管；电熔接头；加热线圈；承口；指示销

引用论文：张胜玉. 塑料管电熔焊技术 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(9):20-25.

中图分类号：TQ330.46

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2026)09-0020-06

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.09.004

0 前言

电熔焊 (Electrofusionwelding)，是一种采用内埋电阻丝的专用电熔管件，通过专用设备，控制内埋于管件中的电阻丝的电压或电流及通电时间，使其达到熔接目的的连接方法。电熔焊包括电熔承插焊 (socketelectrofusionwelding)、电熔鞍形焊 (saddleelectrofusionwelding)。

电熔焊是一种专用于焊接热塑性管道的特殊形式的电阻焊。

电熔焊特别适合于气管和水管的连接和维修，因为它可以在现场进行。

1 电熔焊接原理及过程

如图 1 所示，电熔焊需用到一个模制的承插管件 (moldedsocketfitting)，其中包含两个由中心冷区隔开的电阻加热线圈。将准备好的管端插入承口，夹紧后，在预设时间内使电流通过线圈。线圈及周边聚合物受热，热量传递至管壁。管件两端的冷区将熔体限制在熔化区内，从而产生较高的熔体压力并形成均匀的接头 (图 2)。

电熔焊前需要通过擦拭清理、刮削两个管材端部，然后将其插入预制的、消耗性的管件中，该管件内部

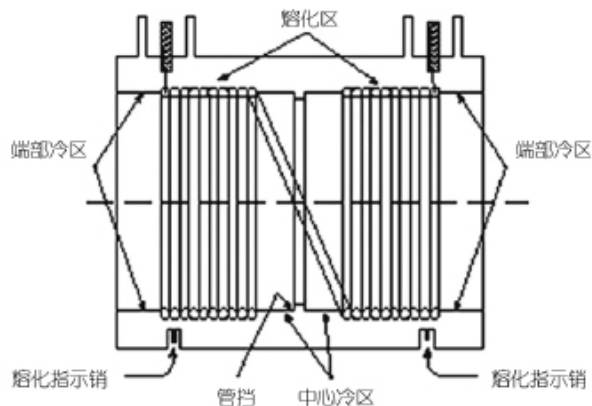


图 1 电熔焊原理简图

包含加热线圈。随后，管材被稳固地夹持在特别设计的夹具中。接下来，由发电机和控制单元产生的电压施加到线圈上特定时间，使承口内部和管材外表面的塑料熔化。最终，加热区域冷却并固化，形成牢固且稳定的焊缝。该管件成为管道的一个组成部分，因此其设计压力等级 (MOP) 应与管材相同。

电熔接头的示意图如图 2 所示。该管件通常通过

作者简介：张胜玉 (1970-)，男，硕士，高级工程师，本科，主要研究方向为塑料及复合材料焊接，压力容器、管道、阀门焊接，焊接新技术新工艺，企业管理等，已发表论文 30 余篇。

注塑成型制造。在大多数情况下，它由两个相连的由铜或其他导电金属制成的电阻加热线圈组成。这些线圈位于熔化（热）区内，并被冷区环绕。线圈的作用是熔化材料并在管材和管件之间形成焊缝，而冷区则是防止熔体从熔化区流出，从而产生形成焊缝所需的熔体压力；此外，熔体外流可能会对操作人员构成威胁、污染管道内部，或产生可能引发裂纹的应力集中。

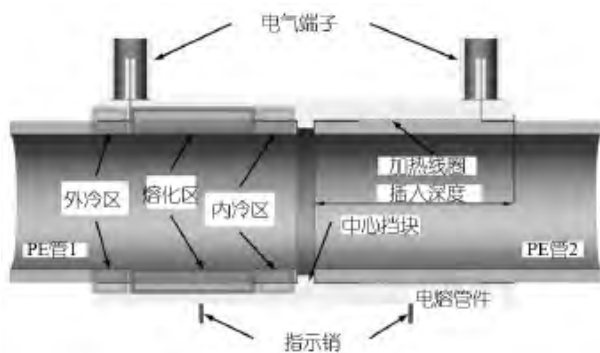


图2 电熔接头剖面图

加热元件由两组相互连接的线圈组成，起始和终止于电气端子，控制单元的电缆连接于此。管件中间通常有一个凸起（中心止挡），以防止操作人员将管材插入管件过深。底部伸出的两个小指示销会被熔体压力推出，表明熔体已经产生。

电熔焊中的接头形成包含四个阶段。

在孕育阶段（1），电流通过线圈，套管周边材料受热膨胀，填充管材与套管之间的间隙。随后，套管与管材接触并加热管材材料。

在接头形成阶段（2），套管的熔体与管材的熔体融合，形成稳定的熔池。由于套管中的冷区以及塑料的低热导率，阻止了熔融材料挤出接头，并将树脂的熔化限制在熔化区。此阶段的焊接强度较低，由于焊接界面间分子扩散有限，易发生脆性断裂。

在接头巩固阶段（3），较高分子量的分子开始在焊接界面扩散，接头强度随加热或熔化时间的增加而提高，强度试验中的失效模式由脆性转变为韧性。然而，过长的熔化时间可能导致聚合物降解。

在接头冷却阶段（4），电流终止，焊缝在管道仍被夹紧以防止移动的状态下开始冷却。随着冷却的持续进行，聚合物从靠近冷区的区域开始再结晶，然后向熔化区中心推进。

当受热时，聚合物首先于固态下膨胀，接着逐渐熔化，仍在膨胀。当其抵达冷区时，便冷却并固化。由于还有更多的塑料熔化，熔化区压力开始上升。图3

所展示的界面压力作为焊接时间函数的图表，为理解这一过程提供了一种便捷的方式。在图3中，可以辨别出三个区：

I区：孕育阶段（1阶段）—此时尚未发生熔化，界面刚刚开始升温且缓慢膨胀；

II区：上升和峰值阶段（2+3阶段）—此刻聚合物开始迅速熔化并快速膨胀，填充空隙，压力显著上升；

III区：冷却阶段（4阶段）—电流停止，压力缓慢降低，因为聚合物在固化过程中收缩。

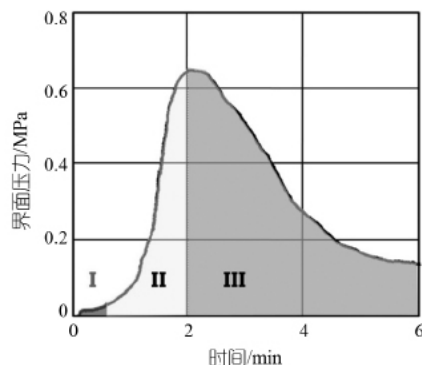


图3 100 mm 套管电熔焊界面压力相对于时间变化图

2 电熔焊设备

进行电熔焊必需的主要设备有三项：管件本身、电熔控制单元（ECU）以及管道约束夹。

用于电熔焊的套管和其他管件通常是注塑成型的。较大直径的套管有时由厚壁管或坯料加工而成。将电阻丝插入管件有各种专利方法，通常采用机器人或计算机数控（CNC）制造。

电熔承插管件可以采用套管、弯头、三通和异径管的形式，现实可用的有：16~710 mm 的多种管径的压力管道，以及高达1 800 mm 的非承压应用管道。小直径的给水管连接至大直径的主管采用鞍形管件，通常是鞍形直通（branch saddle）或鞍形旁通（tapping tee）。

电熔管件的一个特色零件是弹出式熔化指示销。熔化区熔池的膨胀会导致这些指示销在焊接循环过程中触发，向操作人员表明已经产生了熔化压力。

ECU 为电熔管件提供必需的电流，以通电并加热线圈。它要么从移动式发电机获取电力，要么从标准市电电源获取电力，并将其转换为管件所需的电压。市场上有许多来自不同的供应商的不同类型的 ECU 可供选择。大多数最新的型号都具备数据存储设施，其

中每个接头的所有焊接参数,包括日期和时间,都记录在一个存储芯片上,以用于质量保证(QA)目的。其他功能,如手动或自动操作模式的选择,以及操作语言的选择,通常也是可用的。最新的一项进展是引入了电池供电的ECU,适用于在管径达63 mm的管道上进行有限数量的接头连接。这消除了对辅助电源的需求,使得在现场焊接时能够完全自由地使用。

3 电熔焊工艺参数

焊接参数通常显示在产品上,要么通过黏性标签,要么直接压印在塑料上。许多管件还在条形码标签上提供了熔化数据,可通过连接到控制单元的光笔读取。

决定正确焊接工艺的三个基本参数是时间、温度和压力,它们必须相互协调以获得令人满意的焊缝。材料等级也很重要,它决定了熔融塑料在加热丝之间以及在管道表面流动的难易程度。

3.1 时间

电熔焊的主要焊接参数是熔化时间和冷却时间。工作电压也是一个参数,但对于特定制造商的一系列管件通常是固定的,即它们都设计为在相同的电源电压下工作。每种尺寸的电熔产品都有其特定的焊接参数。表1显示了随着管径的增加,熔化和冷却时间是如何增加的。

表1 典型的电熔焊接参数

管径/mm	熔化时间/sec	冷却时间/min
25	32	4
90	120	9
180	260	18
315	760	30

不同制造商的相同尺寸的管件有时具有不同的熔化和冷却时间。这是由于不同的设计规格造成的,例如加热丝材料和直径、线圈间距、加热丝埋深的差异。

允许EF管件设计者控制的参数包括:

- (1) 布线:即线圈长度、线间距、深度、几何形状;
- (2) 加热丝材料和厚度;
- (3) 管件材料等级;
- (4) 冷区布置;
- (5) 管材与套筒表面之间的间隙大小;
- (6) 加热时间,也称为规定熔化时间(SFT)。

3.2 温度

为提升塑料的温度,向端子施加电压。控制单元在设定的时间内产生电压,以达到熔化区中产生熔体的正确压力和温度。广泛采用的做法是在EF管件上放置

带有条形码的标签,其中包含焊接数据,可由连接到控制单元的读取器读取。这确保了出色的可重复性——操作人员无需输入数据,从而减少了出错的机会。

PE100的熔化温度约为130~135℃,但为获得良好的焊缝,必须超过此温度,因为必须使足够量的管件和管材熔化。然而,应注意不要超过最佳焊接温度,因为如果温度过高,材料可能会降解,可能导致脆性断裂。还存在一个最低的熔体压力水平,若低于此水平,不足以产生足够程度的熔化,接头强度会受到损害。

为确保接头安全,焊接界面需达到的最低温度为150℃。达到期望温度后,电源切断,冷却阶段开始。起初,界面温度迅速下降,但由于聚乙烯(PE)结晶,温度稳定在120℃。套管表面的升温速度比界面慢,因此在电流停止后的一段时间,其温度达到最高。

切勿使接头过热。当材料因加热超过其规定熔化时间(SFT)的140%,或者当环绕加热丝的PE达到350℃时,材料强度减弱,几乎无法正常使用。在测试的直径90 mm的接头中,在55%~140% SFT范围内,强度基本保持恒定。强度在上升和峰值阶段迅速增加,直至达到约80% SFT,随后在达到140% SFT之前基本保持恒定。精确数值可能因套管的尺寸而有所不同。

内管壁的温度不应超过110℃,否则管道的刚度会受损。

适当的冷却对于焊接质量至关重要。接头冷却应在管道仍被夹紧且无任何负载的情况下。ISO12176-2规定了电熔(EF)焊接的允许环境温度范围为-10℃至+40℃。因此,在现场作业时,如果环境温度过低,则需要附近设置加热器;若温度过高,则需搭建帐篷以提供遮阴,防止阳光加热管道;在炎热天气下,冷却所需时间更长。突然淬火会导致接头内部产生应力,可能影响其质量。

极端环境温度的不利影响在一定程度上可通过调节加热能量来补偿。温度每升高或降低1℃,应从原始能量值中减去或加上0.7%。通常,通过改变加热时间最易实现此操作——现代控制单元具有根据环境条件自动调节功能。

3.3 间隙尺寸和熔体压力

电熔接头设计中最重要的一面之一是间隙尺寸(管件内孔与管材外表面之间的空间),因为它会影响达到最佳熔体压力所需的时间。工业中针对此问题采用两种方法:紧配合和宽配合。在前者中,管件内孔的制造与管材的距离最小,因此形成接头所需的膨胀

量较小。在这种情况下，相同时间内可达到更高的压力，孕育期更短，能够达到更高的绝对压力值。对于相同的焊接能量，间隙更小时可达到更高的温度。紧配合的缺点在于，只能用于圆度完美的管道。增大间隙则提供了更宽容的方法。但另一方面，需要更长的熔化时间和更大的功率，这可能导致不稳定的性能和缺陷，并且需要更长的冷却时间。紧配合的接头在固定时间内往往能达到更高的压力，并且在机械试验中表现更优。

在带状弯曲试验中，熔体压力未达到 0.1 MPa 的接头会失效。

峰值界面压力应介于 0.098 MPa 至 0.98 MPa 之间。故而，在刮削管道时，切不可去除过多材料。

对于固定功率值，外径为 110 mm 的 EF 接头，其间隙尺寸高达焊接管外径的 2%（即 2.2 mm）时，似乎最为坚固。

4 电熔焊工艺

4.1 电熔承插焊

4.1.1 焊前检查

在进行连接操作之前，应当对以下方面进行检查：

（1）每个管件的两端应当有足够长度的管插口，以实现机械刮削以及重新整圆和约束夹具的安装。

（2）管材周围应当有充足的空间，以允许接近管端。在壕沟中，周围至少需要 150 mm 的净空。对于较大的公称尺寸，可能需要更大的净空。

（3）多余的积水都已被清除。避免管材端部受到污染所花的时间比事后清理泥土和水分所花的时间要少。

（4）为防止准备好的表面受到污染，可以使用防水布或合适的板子覆盖接头下方的地面。在适当的情况下，可以使用移动遮棚来保护接头免受雨水或风吹灰尘的影响。

（5）所有必需的辅助设备都已具备。

（6）发电机有足够的燃料来完成连接操作，并且在连接到电熔控制箱之前应启动发电机，以检查其是否正常运行。电熔控制箱应展现有效的标定标签。

（7）控制箱引线末端的接插件应干净且无损坏。

（8）管材和管件的尺寸相同。应当检查制造商的交货标签以确认管件的适配性。

（9）来自电熔控制箱的引线端子的尺寸应与电熔管件的端子尺寸相匹配。4.0 mm 和 4.7 mm 的引线脚均被广泛使用。

4.1.2 准备——管道表面

通过去除一层薄材料来准备管道，可提供最清洁的连接表面。

电熔焊是一个连续的过程，在连接之前应立即对管道表面进行准备，具体如下：

（1）应当检查管道是否存在任何可能对连接性能产生不利影响的磨损或冲击损伤。待连接的管端应当与轴线垂直切割，并去除毛刺。

（2）对于具有可去除外皮和 PE 阻隔层的 PE 管道，应遵循管道制造商关于外层去除长度和正确去除方法的说明。

（3）在进行管道表面准备之前，应当将管端（超出夹紧区域）冲洗干净，以去除所有污垢或泥土。若使用湿巾，应符合 4.1.3(3) 的要求。

（4）使用记号笔，在管道上标记出管件端部期望的最终位置。

（5）使用管道端部准备工具，从管道的整个表面均匀去除 0.2~0.4 mm 的一层材料，最好是在已标识的区域（即超出插入深度）形成连续的切屑带。一旦准备完成，管道表面绝不能被触碰，用干净、干燥的聚乙烯袋包裹并用胶带固定，以获得更好的保护。

注 1：在通过刮削（或其他准备方法，见注 2）对管道表面进行准备后，应立即将电熔管件放置在管道上。若有多个管端需要准备，管件仍应放置在管端上，但仍需用其包装袋进行保护。

注 2：具有可去除外皮的 PE 管道应使用管道制造商提供的工具和方法进行准备。未经批准的工具可能会损坏管道。如果在去除外皮的过程中或在将电熔管件放置在管道上之前，管道表面受到污染，则应将管道视为常规的 PE 管道，并使用旋转或手动刮削工具对其表面进行准备。

（6）在每个待连接的管道上，通过将袋装管件的承口放置在管端旁边，标记出超出插入深度需要去除氧化层的区域。应在距管端适当距离处沿圆周绘制一条线，并使用合适的记号笔勾勒出该区域。

（7）管道的椭圆度，特别是盘管上的，可能对承插管件和鞍形管件上的电熔接头的完整性产生不利影响。建议在熔接之前，使用专门为此设计的工具将待连接区域内的管道轮廓整圆至所规定的椭圆度范围内。

4.1.3 准备——污染物去除

（1）在进行组装和连接操作之前，管端应立即进行新的刮削处理。

注1：首选做法是刮削管端并即刻用即将连接的管件罩上。

(2) 若在管端刮削后，其待连接的表面上积聚了灰尘污染物或泥（干或湿态），在组装之前，应使用一叠崭新未用的湿巾（见4.1.3(3)）来清除污染。每一表面均应使用单独的湿巾团，使用后随即丢弃。在进行熔接之前，表面应完全干燥。

注2：若湿巾使用不当（例如：用脏手/手套擦拭、多次使用的湿巾），可能会将污染物散布于接头周围，因此提醒安装人员使用全新的湿巾清除污染物，并确保将其“揉成一团”或“揉成球状”，以防例如手套上的污垢转移至管表面。

(3) 湿巾应为预浸渍的无绒布，且已浸泡于90%异丙醇与10%水的混合液中。不得添加其他溶剂、洗涤剂或清洁剂。

(4) 对于重度污染泥土或水的管件或已准备的管表面，不应尝试进行清洁。若无法去除污染，应废弃该管件或已准备的管表面。

4.1.4 接头组装与夹紧

(1) 应按照4.1.2的要求准备一根管端，在完成管表面的刮削准备工作后，应立即打开管件袋的一端，并将管插入管件中，使其与中心挡块接触。若管件无中心挡块，则应将管插入先前标注的深度标记处。对第二根管端进行准备并重复上述操作。

(2) 一旦管子正确插入管件，应在管上标注插入深度（若此前未标注或因刮削导致标记不清晰），并将其置入约束夹具中。

(3) 应始终使用夹具来固定管端，以确保在熔接周期内它们在管件内不会移动。

(4) 应通过目视检查管端和管件，以确保它们准确对齐。

(5) 一旦完成准备工作或去除包装，即将进行熔接的表面不得触碰。

4.1.5 熔接周期

(1) 应检查控制箱上的复位停止按钮（若配备），以确保其处于正确模式，并且电熔控制箱的输入线已连接至发电机。

(2) 应将控制箱的输出引线与管理端子相连，并检查确保其已完全插入。

(3) 应将熔接接头的时间输入控制箱的计时器（首选自动识别方式）。

(4) 应检查控制箱上显示的熔接时间，以确保其

与管件上所示的时间一致。

注1：若使用条形码读取器将熔接时间输入至控制箱，需注意某些管件设计在条形码中包含温度补偿。温度补偿会依据环境温度改变熔接时间。在此情况下，管件上显示的熔接时间将与控制箱上显示的时间不匹配。建议安装人员在使用前与管件制造商进行沟通。

(5) 应启动控制箱上的启动按钮，并检查加热周期是否如显示的倒计时所示进行。

注2：在极为罕见和极端的故障情况下，少量熔融的PE材料可能从接头或熔化指示销中逸出。或者，从终端线夹处可能会有火花或少量熔融金属溅出。此类情况极为少见，但操作人员应按照风险评估中确定的要求佩戴适当的个人防护设备。

注3：若熔融材料从接头中逸出（escape），这表明电熔控制箱出现故障或管与管件的错边严重。这种逸出可能导致接头中出现孔隙，应将接头切除并更换。

4.1.6 接头目视检查

(1) 一旦熔接周期完成，操作人员应检查整个熔接时间是否已完成，且控制箱未显示任何错误警告。

(2) 应检查管上的插入标记，以确保未发生过度的管移动。

(3) 接头应在夹具中保持规定的冷却时间（如管件上所注明）。

(4) 应检查管件上的熔化指示销，以确保其已上升。若一个或两个熔化指示销均无明显移动，应将接头切除并制作新的接头。

(5) 应通过目视检查管件外的熔体移动迹象。若熔体已流出管件端部，应将接头切除并制作新的接头。

(6) 在任何情形下，均不得试图在任何管件上进行第二次熔接循环。

4.2 电熔鞍形焊

4.2.1 连接前检查

(1) 连接前检查与4.1.1相同。

(2) 一旦PE管上外皮的适当区域已被移除，鞍座可熔接至带有可移除外皮的PE管上。应遵循制造商的具体说明。

(3) 严禁通过电熔将鞍座连接至PE阻隔管(barrier pipes)。应采用诸如机械套圈(mechanical ferrules)等替代方案，但此类配件用于相关管道应得到批准。

4.2.2 准备——管道表面

(1) 在刮削之前，在鞍座即将组装的大致区域内

的管材表面, 应使用干净的一次性无绒材料或湿巾进行清洁。

(2) 包装好的管件应放置在主管上的所需位置。应在管材待焊表面周围做标记, 留出距鞍座底部区域 10 mm 的间隙, 并使用合适的记号笔对该区域进行阴影标记。

(3) 整个标记区域内的管材表面应使用合适的利器刮削至 0.2~0.4 mm 的深度。所有切屑应被清除, 但一旦准备完毕, 管材表面绝不可触碰。

(4) 如果刮削后表面被灰尘或泥土污染, 则可使用湿巾清洁表面 (见 4.1.3)。

4.2.3 鞍形焊接程序

(1) 将管件从其包装袋中取出, 并小心放置在准备好的管材表面上。在组装过程中, 管材和管件的接合面均不得触碰。

(2) 使用适当的夹紧方法 (如有不确定, 应寻求制造商的建议), 将正确的预设负载施加于鞍形管件。

(3) 管件连接至控制箱, 并按照 4.1.5 进行熔接。

(4) 熔接时间结束后, 夹具应在管件上保留适当的冷却时间, 冷却时间以管件上的说明为准。

(5) 在冷却周期完成后至少 10 min 内及在成功

完成目视检查前, 不得用整体式刀具在主管上开孔。

(6) 在开孔之前, 应对熔接管件进行两分钟的水压试验, 压力为管材或管件额定压力的 1.5 倍, 以较低者为准。

(7) 在压力试验时, 应目视检查所有接头, 以确保无泄漏。

注意: 强烈建议在焊接过程中佩戴手套和护目镜。

4.2.4 鞍座的目视检查

(1) 目视检查应依照 4.1.6 进行。

(2) 如果鞍座未能完成正确的熔接循环或未能通过目视检查, 应如图 4 所示从其底部切除三通, 并制作新的鞍形接头。

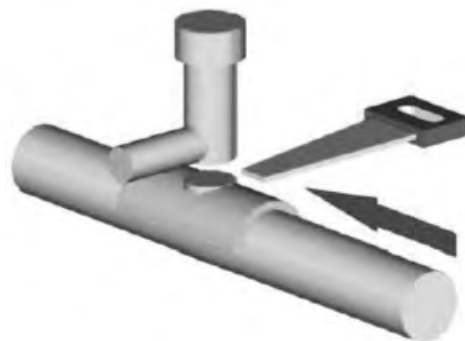


图 4 鞍形接头切除

Electric fusion welding technology for plastic pipes

Zhang Shengyu

(Shanghai Ruikong Valve Co. LTD., Shanghai 201715, China)

Abstract: Electrofusion welding is one of the commonly used methods for joining thermoplastic (primarily PE) pipes. It employs molded socket fittings equipped with resistance heating coils. The prepared pipe ends are inserted into the sockets and clamped securely. Current is then applied through the coils for a preset duration, heating the surrounding polymer and transferring the heat to the pipe wall. The cold zone at the end of the fitting contains the melt in the central part, resulting in high melt pressure and the formation of a uniform joint. Electrofusion joints are renowned for their reliability and years of maintenance-free operation. Electrofusion welding is particularly suitable for the connection and repair of gas and water pipes, as it can be performed on-site. The characteristic of electrofusion welding is its relatively small equipment, making it suitable for applications where defective pipe sections cannot be extracted and cut. If not thoroughly tested, joints welded by this method are prone to leakage. Defects in electrofusion joints may arise from improper heating of the pipe material, insufficient melting interface, excessive welding, porosity, and structural deformation. Typically, failures of electrofusion welded pipe joints are caused by cracking along the melting interface, cracking through the pipe, and cracking along the heating wire interface. This article discusses the principles and process of electrofusion welding, welding equipment, process parameters, welding techniques, weldability, characteristics, quality control, and stress simulation of electrofusion joints.

Key words: electrofusion welding; polyethylene pipe; electrofusion joint; heating coil; socket; indicator pin

(R-03)

(未完待续)