

塑料管电熔焊技术（下）

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(10):23-27.

中图分类号：TQ330.46

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2026)10-0023-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.10.004

（续接上期）

5 各种塑料的电熔焊接性

电熔焊主要用于焊接输送气体、水和废水的聚乙烯（PE）管道。也应用于工业领域中聚丙烯（PP）和聚偏二氟乙烯（PVDF）管材的连接，近来还被用于尼龙燃气管的焊接。

在研究 EF 焊缝强度时，所使用的 PE 等级至关重要。其中一个方面是分子量 M_w 。 M_w 的增加会导致熔体流动速率（MFR）降低，MFR 用于衡量熔融塑料的黏度及流动速度。对于 PE 管材级，其值 ≤ 4 g/10 min，通常为 0.3~1 g/10 min（在 190 °C 和 5 kg 条件下）。只要套管由可流动等级制成，MFR 为 0（交联 PE）的管道也可焊接。对于在 0.4~3 g/10min 之间的 MFR，焊缝强度无差异。

另一个可能影响焊缝强度的因素是结晶度，其与密度成正比。各种各样的 PE 等级均可通过电熔焊成功连接。

6 电熔焊特点

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。

电熔焊是一种简便的工艺，能快速完成预组装机

材和管件的连接，且所需设备最少。它便于维修，比如连接受损管道的替换段，而且在空间有限的地方（如壕沟内的管道焊接）也能操作。电熔焊还能连接不同壁厚和不同等级材料的管材，例如将高密度聚乙烯（HDPE）与中密度聚乙烯（MDPE）连接（在操作规范允许的情况下）。

电熔焊的缺点在于易受污染，在插入前需仔细处理管端，在泥泞的壕沟中操作可能较困难。此外，管件属于消耗品，因此涉及大直径管道和众多接头的项目成本可能较高。电熔焊的另一个缺点是焊接完成后难以检查接头，因为焊缝完全被管件所遮蔽。

7 电熔焊质量控制

7.1 管道准备

成功焊接的关键在于管道的准备工作。待连接的管端必须彻底刮削，以去除因紫外线照射而形成的不可见氧化表层，否则会阻碍分子混合与良好熔合。对

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。

于小直径管材,使用简单的手动刮刀;对于较大尺寸的管材,则可使用旋转机械刮刀,这样既省力又能获得均匀的表面光洁度。通常需要去除 0.2~0.4 mm 的表层。准备好的表面不得有灰尘、砂粒、油脂或水分等污染物。如今,一些 PE 管材制造商生产的管材带有可剥离的外层,从而无需刮削。该外层可轻松快速地去除,在插入套管承口前露出未受紫外线损伤的干净表面层。

在 EF(电熔)承口中的待焊管材应切成直角,且端面应无切屑,否则在管材插入管件时可能会造成阻塞。管端必须切成直角,然后插入套筒中,到达中心管挡。这样布置确保了套筒冷区发挥适当作用,同时确保所有加热丝都被覆盖。在焊接和冷却的整个过程中,必须将待连接的管道牢固地夹紧,以防止拉出。

影响接头质量的最重要因素之一是管材插入管件之前其外表面的清洁程度。污染可能导致缺陷(见“熔化界面污染”部分)。为保持清洁,EF 管件在使用前装于密封袋中,使用时才打开。另一方面,管道应干燥,并清除诸如油脂或泥土等污染物。待焊管材的外表面应进行刮削处理以去除因紫外线辐射反应或挤出过程中产生的氧化层。还应注意,在刮削管材后应尽快进行焊接。标准做法是小心且均匀地剥离不少于 0.2 mm 的材料,确保不残留原始表面。使用机械刮刀进行此操作最佳。

将管材端部插入管件后,两根管道都应牢固夹持,因为在焊接过程中管道错边和移动会降低接头质量。

7.2 电熔焊缺陷类型及其成因

尽管电熔焊是一种相当简单的方法,但操作人员的疏忽仍可能导致一系列缺陷。这些缺陷对焊接接头的完整性构成威胁,因为在正常运行条件下,轴向载荷和内部压力会在焊缝界面产生应力。EF 接头失效的最常见原因尚未明确;然而,慢速裂纹扩展(SCG)是最常见的长期断裂模式。

以下将对电熔焊接过程中最重要的缺陷类型进行描述。

7.2.1 熔化界面不良(Poor fusion interface)

熔化界面是管材外表面与管件内孔接触的区域。熔化界面处出现的一些典型缺陷如下。

(1) 冷焊(Cold weld): ISO/TS16943 将冷焊定义为:“由于除污染以外的原因,在接头界面处聚合物链的分子间扩散不完全,导致分子缠结不充分,从而引起接头完整性不足,但在接头界面处未产生任何

无损检测示像。”

冷焊的原因之一是施加给线圈的能量不足。如果未遵循制造说明书上的焊接时间或电流,或者管材与管件之间的间隙过大(例如过度刮削导致),并且所提供的电流不足以填充该间隙并形成焊缝,就会出现这种情况。冷焊缝在外观上难以与正常焊缝区分,但它们的机械性能可能差得多——在承受弯曲载荷时会以脆性方式失效。在剥离脱黏试验中,带有冷焊缝的试样会在熔化界面处以脆性方式失效。

这种接头可能不会被操作人员检测到,将在管道中起作用,直到足够高的应变作用于它为止。

(2) 管道未刮削(Unscrapped pipes):如果在焊接前未对管道进行适当刮削,其表面会含有阻碍管子与套管之间分子扩散的化学物质。通常,这些物质被认定为氧化物。也有人认为它们是管道生产过程中残留的硬脂酸盐。造成这种现象的原因是,由于太阳的紫外线辐射,羰基浓度在管道外表面附近随时间而降低。

在未刮削区域,接头往往以脆性方式失效(见图 5)。



图 5 包含管道已刮削和未刮削区域的 EF 接头试样剥离脱黏试验结果

(3) 熔化界面污染(Fusion interface contamination):如果在将刮削后的管道插入 EF 管件之前,有灰尘或任何其他污染物(如沙子、水、油、脂)落在管道的刮削表面上,这将阻碍焊接过程。因此,在刮削后应尽快将管道插入 EF 管件。

污染物对接头性能的影响与受污染区的轴向长度成正比。靠近内冷区的问题最为严重。对于颗粒污染物,其影响也与污染物浓度成正比。

7.2.2 孔隙(Voids)

孔隙是焊后在加热丝平面或熔化界面发现的空隙。如果出现在加热丝平面,它们通常是由于接头冷却和固化时的热收缩所致,无关紧要。然而,加热丝平面上过多的孔隙可能是由于不正确的焊接工艺引起的。熔化界面的孔隙可能是由于管材表面的水分所致。

7.2.3 结构变形(Structural deformation)

结构变形意味着焊接接头的某些部分未保持预期的形状。这可能包括管道的未充分插入（未将管道推至中心挡块位置）、管道的角位移（当管道未正确夹紧时）或电阻丝错位。

电阻丝可以在轴向和径向方向改变位置。当熔体压力过高且熔体流动推动电阻丝时，有时会导致短路。当产生过大的熔体压力时，可能会发生由于 PE 熔体过度流动导致的径向错位。

在管道未充分插入的情况下，PE 熔体可能从熔化区泄漏到管路内孔中并阻碍流动。

BSEN14728 中提到的其他缺陷包括“过度内倾 (excessivetoe-in)”，意思是由于管道制造过程中产生的残余应力释放，插入端的管道直径小于其余部分。这种情况在大直径管道中更常见，可能导致焊接压力不足和熔融 PE 漏入管道内孔。

此外，如果熔体指示销未弹出，可能是由于其下方区域的熔体压力不足。若它们因熔体过多而弹出，则意味着压力过高。

最后，有可能部分 PE 被挤出承口，这再次表明压力过高或者管材椭圆度过大。

7.3 失效模式

在正常运行状况下，当流体从某一管段输送至另一管段时，EF 接头会受到内部压力的作用，该压力不仅作用于管道内孔，还作用于内冷区，如图 6 所示。这种压力会导致管材表面与管件之间产生剥离效应 (peeling effect)，最终可能引发开裂和泄漏。另一种典型的载荷类型是轴向方向的，这是由于埋地管道的热收缩受限以及管道弯曲所致。

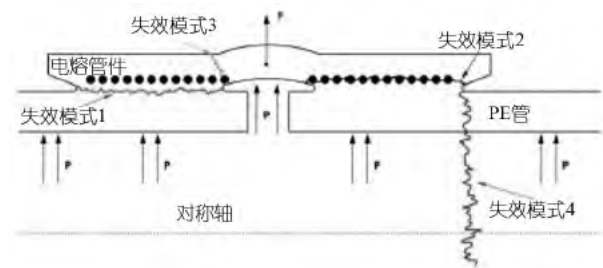


图 6 电熔接头失效模式简图

以下部分将描述 EF 接头可能出现的失效模式。

(1) 失效模式 1—沿熔化界面开裂 (cracking through the fusion interface)。这种模式在剥离脱黏试验中较为典型，当焊接界面薄弱时（比如当熔化时间过短或者相连的熔融聚合物之间的紧密接触不足，无法发生分子扩散时），以及冷焊、污染或未刮削的管道会出现

这种模式。这种接头的试样在剥离脱黏试验中会以脆性方式失效（见图 7），其长期机械性能可能会受损。在剥离脱黏试验中，这种失效模式可通过几乎不可见金属丝压痕，表面近乎完全光滑识别出。

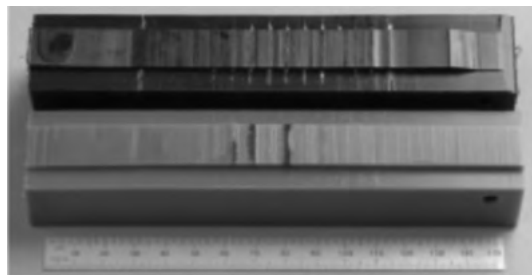


图 7 失效模式 1—经历剥离脱黏试验的冷焊断裂表面

(2) 失效模式 2—沿加热丝平面失效 (failure through the plane of the heating wires)。当加热丝匝间发生韧性断裂时，这是适当制造的接头在进行剥离脱黏试验时的正常失效模式（见图 8）。然而，如果加热丝匝间的失效模式为脆性，这很可能是由于过焊导致材料热降解所致。随着加热时间的增加，最可能的失效模式从 1 转变为 2，对于直径为 90 mm 的接头，当达到指定熔化时间的 55% 以上时，开始经常出现沿加热丝平面的失效。

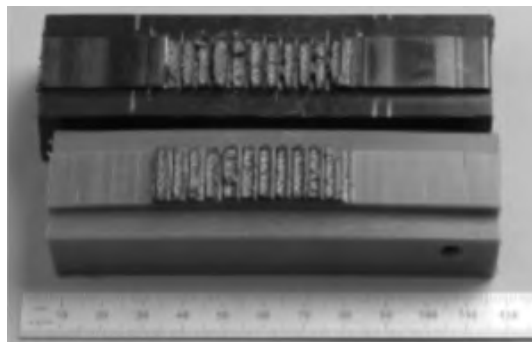


图 8 失效模式 2—在剥离脱黏试验时适当制造的接头沿加热丝平面失效。金属丝压痕清晰可见。

(3) 失效模式 3—穿过接头体开裂 (cracking through the fitting body)。这种类型的失效从最靠近接头中心的一根加热丝开始，并以大约 70° 的角度（见图 9）穿过管件壁，从而导致外部可见的裂纹。这是大多数接头（包括适当制造的接头）在长期高温水压试验中遇到的失效模式。裂纹通常从加热丝线圈的第一圈开始生长。如果 EF 套管有一个非常大的内冷区，这将在内部线圈区域产生较大的应力集中，从而使这种类型的失效更有可能发生。

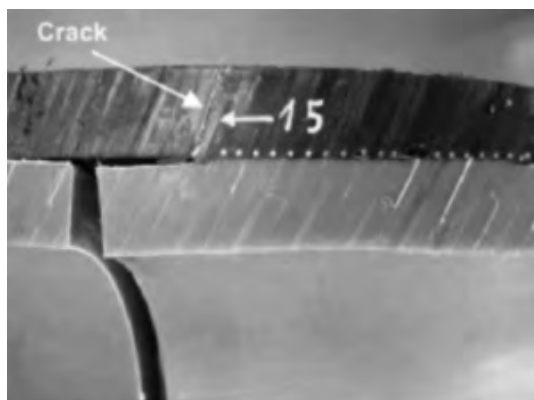


图9 失效模式3—在水压试验时裂纹穿过优质焊缝的EF管件

(4) 失效模式4—穿管失效 (failure through the pipe)。在对EF接头组件施加长期高温轴向拉伸载荷时, 裂纹将从外冷区缺口处开始 (见图10)。

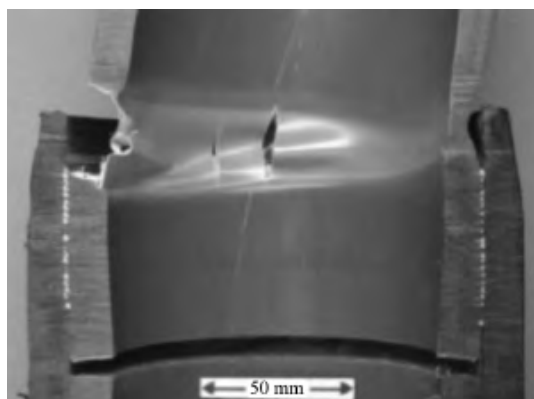


图10 失效模式4—在长期恒定轴向载荷下裂纹穿透优质焊缝管道

8 电熔接头的应力模拟

在文献中, 关于完整电熔接头在应力作用下模拟性能的参考资料很少。

Zahedi 等人¹模拟了埋在土壤中的接头在正常运行条件下的内部压力所产生的应力。他们发现, 最大的冯·米塞斯应力和轴向应力出现在承口内表面的中部, 并随着与管道轴线径向距离的增加而减小。此外, 这些应力远低于PE100在35℃下使用寿命50年的允许值。作者指出, 冷区承受着较大的应力, 而熔化区应力相对较小。

Troughton 等人²对EF接头在整管拉伸蠕变断裂试验 [见图11(a)] 和水压试验 [见图11(b)] 中产生的应力进行了建模。在前者中, 最大应力集中出现在管道外冷区缺口处 (导致失效模式4, 见图10), 在后者中, 出现在套管内冷区缺口处, 导致失效模式3。

Lever³进行的水压试验的模拟分析也得出了类似的结果: 最大应力集中位于内冷区起始处, 即加热丝的第1圈。Troughton 和 Lever 都将他们的模拟结果与实验测试结果进行了比较, 并得出结论: 两者结果相匹配。

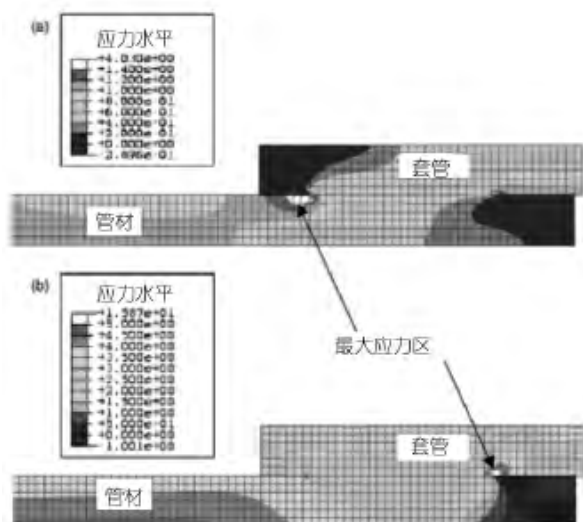


图11 EF接头有限元模拟应力分布 (a) 整管拉伸蠕变断裂试验 (b) 水压试验。

图中显示了一半的接头界面, 其中熔化区和冷区清晰可见。

9 结语

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。

电熔焊成功焊接的关键在于管道的准备工作。待连接的管端必须彻底刮削, 以去除氧化表层。

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。

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。

随着塑料管道（包括增强型热塑复合管 RTPs）在燃气输送、给水、排污等领域应用日益增长，电熔管件、电熔焊机及电熔焊技术也得到了长足的发展。在成本远低于大规模实验测试的情况下预测电熔接头性能和失效模式的应力模拟可能是未来最有前途的研究发展领域之一。

参考文献

[1] KHADEMI ZAHEDI R, ALIMOURI P, KHADEMI ZAHEDI

H, et al. Investigating peak stresses in fitting and repair patches of buried polyethylene gas pipes[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2019, 14(1):147–168.

[2] TROUGHTON M, BROWN C, PIOVANO M. Comparison of long-term and short-term tests for electrofusion joints in PE pipes[C]. *Plastic pipes XIII conference proceedings*. Washington DC: 2006:1–10. <https://trid.trb.org/view/903-092>.

[3] LEVER E. Design and pressure rating of PE fittings; stress concentrations, slow crack growth and the use of regression coefficients in material choice[C]. *Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings*. 2005, 8:246–251.

Electric fusion welding technology for plastic pipes (Part 2)

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)

(全文完)

