



低压乙炔渗碳 及超临界二氧化碳淬火

新一代绿色高效热处理技术

报告单位：上海颐柏热处理技术有限公司

2025年11月

内容概况

01

热处理技术的挑战与革新

02

低压乙炔渗碳原理与优势

03

超临界二氧化碳淬火原理与优势

04

总结与展望

01 热处理技术的挑战

- 热处理的瓶颈

1

环保压力及高能耗

传统气氛渗碳周期长，能耗巨大。油淬产生油烟和火灾隐患，环保不友好

2

内氧化问题

炉气中的氧气导致零件表面晶界氧化，降低疲劳强度。

3

变形控制难

液体淬火介质相变造成冷速的无规律，使得变形难以预测与控制。相变对最终品质的硬度、变形、开裂、均匀性均有影响。

4

临界冷速控制

淬火系统的冷却能力与材料的临界冷速不能相匹配造成的淬硬层不足、或淬硬层满足时变形过大及开裂。



需要一种淬火时介质无相变，冷却能力稳定可控制的高效、绿色的替代技术。

02 技术一： 低压乙炔渗碳

-- 什么是低压乙炔渗碳？

核心原理

- 在真空炉内（压力：1-20 mbar），通入少量乙炔作为渗碳介质。
- 乙炔在高温下（850-1050°C）裂解，产生大量活性碳原子。
- 活性碳原子被钢件表面吸收并向内扩散，形成渗碳层。

金相照片二张：待提供



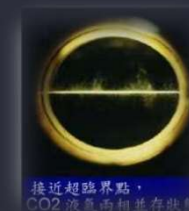
02 技术一： 低压乙炔渗碳

-- 乙炔低压渗碳 vs 常规气体渗碳

工艺原理	在真空低压(通常<100 Pa)环境下, 通入乙炔(C ₂ H ₂), 使其在工件高温表面裂解, 释放活性碳原子并渗入表面。	工件通过富碳气氛(如丙烷/天然气+载气)与工件的碳势差进行渗碳, 富碳气氛中含氧。
工艺气氛	乙炔(C ₂ H ₂), 在真空下脉冲式通入。	载气(如吸热式气氛RX气、氮甲醇气氛) + 富化气(如丙烷、天然气)。
工艺温度	较高, 通常 900°C ~ 1050°C	较低, 通常 880°C ~ 930°C
核心优点	<ol style="list-style-type: none">1. 无晶界氧化: 真空环境杜绝了O₂, 极大提升疲劳强度。2. 渗层均匀: 盲孔件渗层均匀性极佳, 有自动烧碳装置。3. 环保安全: 无废气燃烧, 无火灾风险, 工作环境清洁。4. 工艺操作及控制: 专用软件, 操作设定基本与常规气体渗碳相同, 重复性好, 可适合各种产量的生产。5. 可选择单室型的“低压乙炔渗碳超临界二氧化碳淬火多用炉”。	<ol style="list-style-type: none">1. 技术成熟: 工艺稳定, 应用广泛。2. 设备成本低: 初始投资和维护成本相对较低。3. 操作直观: 专用仪表结合氧探头控制, 普及率高, 适合大批量、规模化生产。
核心缺点	设备投资较高	<ol style="list-style-type: none">1. 晶界氧化: 晶界氧化会形成非马氏体组织, 降低疲劳强度。2. 渗层均匀性: 对复杂零件、盲孔件, 渗层均匀性控制难度大。3. 环保与安全风险: 有CO、CO₂等废气排放, 富化气易燃易爆。
显微组织与性能	<ul style="list-style-type: none">• 无晶界氧化, 渗层组织纯净。• 碳化物形态可控(可得到细小、弥散分布的碳化物)。• 疲劳性能、耐磨性和接触强度更高。	<ul style="list-style-type: none">• 不可避免晶界氧化, 尤其在渗层深处。• 碳化物控制难度较大, 易形成网状碳化物。• 力学性能, 尤其是疲劳性能, 低于低压渗碳。
几何形状适应性	极佳, 非常适合带有深孔、细长盲孔、复杂内腔的零件。	一般, 对于复杂内腔, 气氛流通和更新困难, 易导致渗层不均或碳势失控。
环保性	优: 工作环境清洁、无温室气体CO/CO ₂ 排放、无火灾爆炸风险。	差: 产生大量CO/CO ₂ 气体, 富化气有燃爆风险, 工作环境有热辐射和油烟。

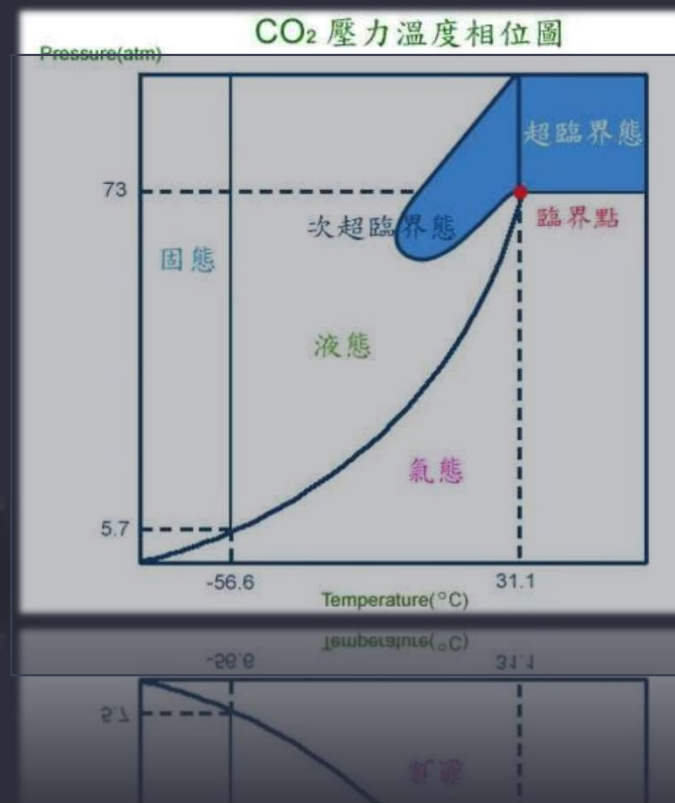
03 技术二：超临界二氧化碳淬火

CO₂: 回归的冷却王者，超临界CO₂是未来热处理的最佳淬火系统



核心原理

- 超临界CO₂兼具气体的高扩散性和液体的高密度、运动粘度低、表面张力接近于零,是一种性能卓越的淬火介质。
- YBCC的超临界CO₂淬火技术是将贮罐内的无油CO₂快速充入炉内,炉内CO₂达到超临界态后开始淬火,淬火完成后用“无油二氧化碳热泵”机组将CO₂回收至贮罐供循环使用。通过调节炉内超临界CO₂流速使淬火系统的冷却能力与材料的临界冷速相匹配,使工件所需淬硬层深度处的实际冷却速度 ≥ 材料的临界冷速。



03 超临界二氧化碳淬火的核心优势 (1)

-- 超越水淬与气淬的卓越性能



03 超临界二氧化碳淬火的核心优势 (2)

-- 淬火介质无相变的可控冷却技术

优势：淬火过程中CO₂始终为超临界态、无相变，冷却均匀，可实现近净形淬火，大幅减少后续精加工。

物性参数对比

淬火介质	压力 MPa	温度 °C	相态	密度 kg/m ³	比焓 kj/kg	导热系数 w/m.k	热扩散系数 m ² /s	运动粘度 m ² /s	动力粘度 Pa.s	定容比热 kj/kg.°C
空气	0.1	35	过热气体	1.13	308	0.026	2.33x10 ⁻⁵	1.67x10 ⁻⁵	1.89x10 ⁻⁵	0.71
水	0.1	35	过冷液体	994	146	0.62	1.49x10 ⁻⁷	7.23x10 ⁻⁷	7.19x10 ⁻⁴	4.09
水	0.1	150	过热气体	0.51	2776	0.028	2.81x10 ⁻⁵	2.74x10 ⁻⁵	1.41x10 ⁻⁵	1.49
氮气	0.1	35	过热气体	1.09	319	0.026	2.33x10 ⁻⁵	1.67x10 ⁻⁵	1.82x10 ⁻⁵	0.74
氮气	2	35	过热气体	21.9	315	0.027	1.16x10 ⁻⁶	8.46x10 ⁻⁷	1.85x10 ⁻⁵	0.74
氮气	2	150	过热气体	15.8	438	0.03	2.07x10 ⁻⁶	1.47x10 ⁻⁶	2.33x10 ⁻⁵	0.75
氮气	4	35	超临界态	43.8	311	0.02	5.85x10 ⁻⁷	4.3x10 ⁻⁷	1.88x10 ⁻⁵	0.75
氮气	4	150	超临界态	31.40	436	0.035	1.04x10 ⁻⁶	7.48x10 ⁻⁷	1.35x10 ⁻⁵	0.75
二氧化碳	8	35	超临界态	419	352	0.084	6.84x10 ⁻⁹	6.95x10 ⁻⁸	2.91x10 ⁻⁵	1.31
二氧化碳	18	101	超临界态	419	441	0.05	5.19x10 ⁻⁸	7.75x10 ⁻⁸	3.25x10 ⁻⁵	0.90
二氧化碳	18	150	超临界态	289	532	0.041	9.12x10 ⁻⁸	9.63x10 ⁻⁸	2.79x10 ⁻⁵	0.87

03 超临界二氧化碳淬火的核心优势 (3)

-- 淬火介质无相变的可控冷却技术

淬火介质/工艺对比表

	水淬	油淬	高压气淬	YBCC超临界CO ₂ 淬火
冷却速度	极快	中等	慢至中等（可通过压力、气体种类调节）	极快且可控(可根据淬硬层深度处临界冷速控制工件表面冷速)
淬硬能力	强	中等	较弱（对高淬透性材料有效）	强
变形与开裂倾向	极高	中等	极低	极低
适用材料	碳钢、低合金钢等淬透性差的材料	合金钢（如40Cr, GCr15等）	高速钢、模具钢、高合金钢、航空航天合金	从碳钢到高合金钢，应用范围广
工艺复杂性/成本	简单、环保成本高	较简单、环保成本高	工艺复杂、气体无回收工艺成本高、设备投资高	工艺自动化，CO ₂ 回收后循环使用 工艺成本低于油及水，设备投资高
环境影响与安全	无烟、但易锈蚀工件，有火灾风险	有油烟、易燃、易老化	环保、无毒、不可燃	环保、无毒、不可燃
后续处理	工件需清洗防锈	工件需清洗去油	工件清洁，无需清洗	工件清洁，无需清洗
核心优点	冷却强烈，成本低，适用于简单形状碳钢件	在冷却速度和开裂风险间取得良好平衡	变形极小，工件清洁	兼具气淬极小变形和液淬的冷却速度，全寿命期内使用成本最低
核心缺点	变形开裂风险大，不易控制，有相变	易燃，有油烟污染，介质会老化，有相变，冷却速度有限	冷却能力有限，初始投资高，对渗碳件、大型或低淬透性材料不适用	初始投资高

04

总结 与 展望

总结

- 低压乙炔渗碳：精密、高效的渗碳技术。
- 超临界CO₂淬火：淬火时介质无相变，冷却能力可适应各种形状金属材料的精密、高效、绿色的淬火技术。
- 两者结合，形成了面向未来的“绿色智能制造”热处理平台。

展望

- 随着“双碳”目标的推进，该技术将会成为替代传统高能耗、高污染工艺的主流选择，成为解决热处理变形的最佳选择，成为在提高淬透性的同时满足淬硬及低变形工艺的唯一选择。



感谢聆听 欢迎提问

2025年11月