

钢铁材料气体渗碳处理研究进展

尤 畅¹, 宛泉屹², 陈珺琪², 邸天泽², 张 朋², 成京昌^{2*}

¹辽宁地质工程职业学院机电系, 辽宁 丹东

²中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年7月4日; 录用日期: 2025年8月13日; 发布日期: 2025年8月21日

摘 要

气体渗碳因其工艺控制灵活、渗碳均匀、环境污染小等优点, 被广泛应用于工业生产中。本文介绍了气体渗碳的种类、工作原理及工艺参数对渗碳层组织及性能影响的研究进展, 着重论述了不同渗碳工艺参数如温度、时间、气流量和压强对渗碳层微观组织和力学性能的影响, 旨在为钢铁材料气体渗碳提供更为精确和高效的处理方案。

关键词

气体渗碳, 渗碳温度, 渗碳时间, 气流量, 压强

Research Progress on Gas Carburizing Treatment of Steel Materials

Chang You¹, Quanyi Wan², Junqi Chen², Tianze Di², Peng Zhang², Jingchang Cheng^{2*}

¹Department of Mechanical and Electrical Engineering, Liaoning Geology Engineering Vocational College, Dandong Liaoning

²National Key Laboratory of High End Equipment Casting Technology, Shenyang Foundry Research Institute Co., Ltd. of China Machinery Academy Group, Shenyang Liaoning

Received: Jul. 4th, 2025; accepted: Aug. 13th, 2025; published: Aug. 21st, 2025

Abstract

Gas carburizing is widely used in industrial production due to its advantages such as flexible process control, uniform carburizing and low environmental pollution. This paper introduces the research progress on the types, working principles and the influence of process parameters of gas

*通讯作者。

文章引用: 尤畅, 宛泉屹, 陈珺琪, 邸天泽, 张朋, 成京昌. 钢铁材料气体渗碳处理研究进展[J]. 材料科学, 2025, 15(8): 1638-1649. DOI: 10.12677/ms.2025.158175

carburizing on the microstructure and properties of the carburized layer. It focuses on discussing the effects of different carburizing process parameters such as temperature, time, gas flow rate and pressure on the microstructure and mechanical properties of the carburized layer, aiming to provide a more precise and efficient treatment solution for gas carburizing of steel materials.

Keywords

Gas Carburizing, Carburizing Temperature, Carburizing Time, Gas Flow Rate, Pressure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

渗碳是目前应用比较广泛的一种化学热处理方法[1]，通过将工件在渗碳介质中加热、保温，使碳原子渗入到工件表层，提高了工件表层的碳含量并形成一定的碳含量梯度，使工件获得了高的表面硬度和耐磨性，同时芯部仍具有一定的强度和较高的韧性[2]-[4]。根据所使用渗碳介质的状态，通常将渗碳分为气体渗碳、液体渗碳和固体渗碳[5]-[7]，其中气体渗碳因生产效率高、质量可控性强，是目前应用最广泛的渗碳方式。气体渗碳工艺作为提升金属部件表面性能的关键手段，其核心价值不仅在于碳元素的扩散过程本身，更在于对工艺参数的精准把控[8]。将目光从基础原理转向生产实践时会发现，渗碳温度、时间、气流量和压强等参数，实际上构成了影响渗层均匀性、显微组织形态及最终机械性能的精密调控网络，每个参数的细微调整都可能引发“蝴蝶效应”。这种参数间的动态平衡正是现代可控渗碳技术需要解决的工程艺术难题[9] [10]。

本文系统地论述气体渗碳的种类、工作原理及工艺参数对渗碳层组织及性能影响的研究现状，旨在为气体渗碳技术的应用和发展提供新的思路和方法。

2. 传统气体渗碳与低压真空气体渗碳

气体渗碳是一种常用的表面渗碳技术，通过将材料暴露在高温和碳源气氛环境中，使碳原子扩散到材料表面，形成一层富碳的渗碳层，传统气体渗碳包括滴注式气体渗碳和可控气氛渗碳[11]。

滴注式气体渗碳是将液态有机物滴入炉子中产生渗碳 CO 气氛和载气体，常见的汽化气氛是将氮气和甲醇的混合物直接引入炉膛[12]-[14]。进入熔炉后，甲醇按照以下反应离解形成一氧化碳和氢气见式 1 [15]。



传统可控气氛渗碳通入渗碳气体比较常见的是 CH_4 和 C_3H_8 ，最快能够实现碳原子向钢表面反应扩散的是向炉中加入 1:1 的 CH_4 和 CO_2 ，反应式如 2 所示[16]。



CO 在金属表面发生反应，如式 3 所示[17]。



传统渗碳过程中的高碳势或长时间的升压渗碳过程容易造成碳原子的富集，从而形成碳化物网络，

降低渗碳效率[18][19]。甲烷或丙烷是主要的渗碳剂，而基于甲基或乙基的液体混合物以及苯或其他液态烃也被广泛用作分散和蒸发的混合物。这些混合物富含碳，因此在炉子的部件和壁上形成大量的烟灰沉积物，从而导致渗碳反应的中断[20][21]。因此，需要用载气稀释碳氢化合物气体，载气由碳氢化合物的受控燃烧制成，以避免碳黑的形成[22][23]。孙伟等人研究了加入氮气为载气甲醇丙烷渗碳工艺后的组织对比发现[24]，加了氮气为载气后的渗碳组织碳黑出现的程度远小于甲醇为载气的渗碳组织(见图 1)。

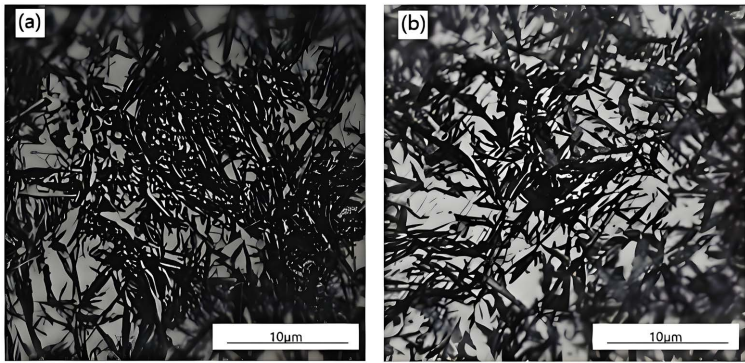


Figure 1. (a) The microstructure after methanol as the carrier gas and propane as the enriched gas, (b) The microstructure after methanol and nitrogen as the carrier gas and propane as the enriched gas
图 1. (a) 甲醇为载气丙烷为富化气后的组织, (b) 甲醇氮气为载气丙烷为富化气后的组织

低压真空渗碳是目前最先进的渗碳工艺，与传统气体渗碳相比其在非常低的压力下进行渗碳，在真空中将零件加热至合金的转变温度以上[25]，然后在分压下，将加热后的零件放到载碳气体或气体混合物中，渗碳气体在高温、低压过程中会发生裂解，常用的渗碳气体为(乙炔、丙烷、乙烯)反应式如式 4 所示。



碳原子逐渐分裂、扩散，最后进入金属表层一定的深度，形成金属富碳层，最近许多研究学者提出了多段式脉冲渗碳工艺如图 2[26][27]所示，脉冲式低压真空渗碳工艺可以控制渗碳和扩散的压力、气体的流速以及渗碳的温度来达到最佳的渗碳效果，与传统渗碳工艺相比更节约能源和减少炭黑的出现。低压脉冲渗碳通过真空环境 + 脉冲供气 + 高温工艺的组合，解决了传统渗碳的氧化、不均匀、效率低三大痛点，特别适合高端制造业(如新能源汽车齿轮、航空航天部件)。尽管设备成本较高，但其在质量、环保及长期生产成本上的优势，正推动其逐步替代传统工艺。

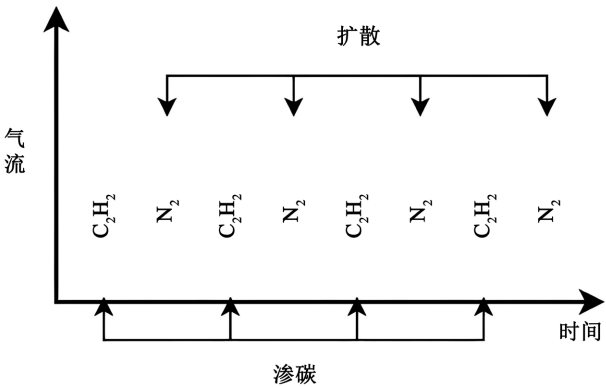


Figure 2. Pulse carburizing process
图 2. 脉冲渗碳工艺

3. 气体渗碳温度对渗层影响

渗碳温度是影响渗层质量和深度的重要参数，渗碳温度的高低决定了碳原子在金属中的扩散速度和深度[4][28]。适当的渗碳温度可以使得碳原子在金属内部均匀扩散，形成理想的渗碳层。若渗碳温度过低，则碳原子的扩散速度减慢，渗碳层深度不足，无法达到预期的渗碳效果[29]。在实际生产中，工作者通常选择将渗碳温度提高到材料的 AC_3 点以上，从而在较短的渗碳时间内获得较厚的渗碳层。因为材料在这样的温度范围内，在奥氏体相区具有较高的碳溶解度，可称为奥氏体相区渗碳[30]-[32]。但渗碳温度过高，会导致奥氏体晶粒过度生长，不利于渗碳件的塑性和韧性，影响其力学性能和耐磨性。Zhang 等人的研究表明，当奥氏体化温度从 880°C 升高到 950°C 时，51CrV4 钢的平均晶粒尺寸增加到 $20\text{ }\mu\text{m}$ ，渗碳试样的伸长率由 45% 下降到 40%。更重要的是，屈服强度从 1390 MPa 下降至 1200 MPa [10]。因此在较高温度下渗碳时间不能过长，以免引起奥氏体晶粒过大，影响材料的使用性能。

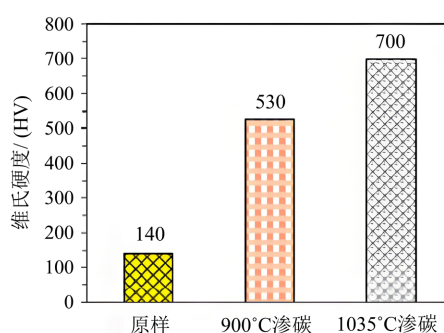


Figure 3. Hardness values of samples at different carburizing temperatures

图 3. 不同渗碳温度的样品硬度值

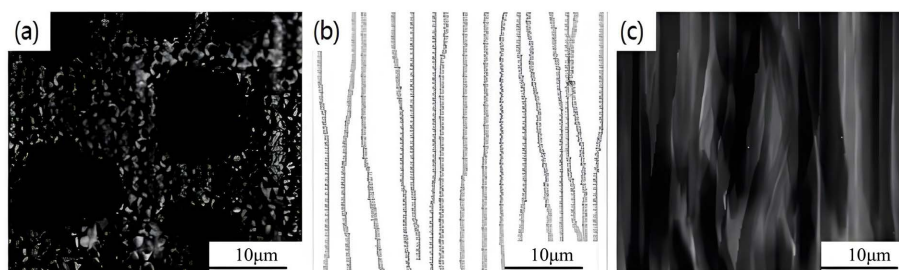


Figure 4. The wear morphology of the specimens at different carburizing temperatures: (a) 600°C ; (b) 950°C ; (c) 1000°C

图 4. 不同渗碳温度下试样磨损形貌：(a) 600°C ；(b) 950°C ；(c) 1000°C

谭克诚[33]和 Mohamed Ali Ballem [34]研究了渗碳温度对渗碳层的影响，随着渗碳温度的提高，在相同深度的渗碳层的含碳量增加，且合金的硬度值也随之增加。由于渗碳过程涉及碳原子向低碳钢的扩散，这一在晶界处插入碳原子的过程会抑制原子位错。当位错运动被减缓或阻断时，试样变硬，硬度的增加与含碳量的增加成正比。图 3 展示了在 900°C 和 1035°C 硬度值的变化，图 4 展示了不同温度的磨损形貌， 600°C 和 1000°C 都有不同程度的磨损， 950°C 耐磨性最好。因此需要根据具体的金属材料 and 渗碳要求，选择合适的渗碳温度。通过精确控制渗碳温度，可以实现对渗碳层深度和组织精确调控，从而满足不同的工艺需求。

渗碳温度是影响渗碳层深度、碳浓度梯度及组织性能的核心工艺参数，其作用规律遵循材料科学中的扩散动力学原理(菲克第二定律)和相变热力学，随着温度升高，碳在奥氏体中的溶解度增大，表面碳浓

度饱和值升高, 促进碳原子往更深处扩散, 相同时间渗碳层厚度增加, 而温度过高易导致表面碳浓度失控, 形成晶粒长大、网状碳化物和残余奥氏体过多的风险, 因此要合理控制渗碳温度。

4. 气体渗碳时间对渗层影响

渗层形成的过程实质上是碳原子扩散的过程, 其研究常以 Fick 定律为出发点[15] [35]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (5)$$

随着渗碳时间的增加, 碳原子扩散的深度增加, 较长的渗碳时间使碳原子更深入地扩散到材料内部, 从而形成更厚的渗碳层。渗碳时间的增加还可以使渗碳层的碳浓度梯度变得更加平缓, 这有助于提高渗碳层的均匀性和稳定性[30] [36]。然而, 过长的渗碳时间会降低实际生产过程中的工作效率, 也可能导致渗碳层过厚, 同时引起相变和晶粒尺寸的变化, 从而影响材料的整体性能, 如降低韧性或增加脆性。

Chongqing Di [37]等人研究表明随着渗碳时间从 4 h 增加到 12 h, 晶粒尺寸从 500 nm 左右增加到 10 μm , 显微硬度从 104.1 增加到 322.5 HV, 渗碳处理后的样品耐磨性得到了很好的提高, 但过长的渗碳时间(12 h)会导致渗碳层的粘结强度降低。从而导致耐磨性能较之 8 h 有明显的降低(见图 5)。

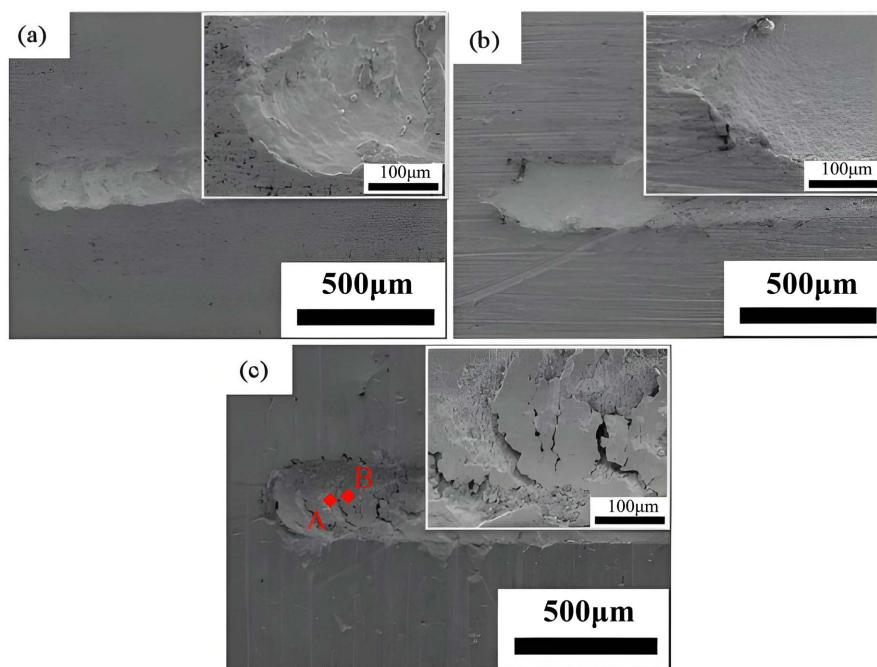


Figure 5. The surface morphology of the samples after scratch tests after different carburizing times: (a) 4 hours, (b) 8 hours, (c) 12 hours

图 5. 不同的渗碳时间后, 样品划痕测试后的表面形貌: (a) 4 小时, (b) 8 小时, (c) 12 小时

真空低压渗碳可以在 900~1050℃ 的温度范围内引入少量的渗碳气体。由于温度较高, 较之传统渗碳方法的碳转移效率更高[38], 使用乙炔作为碳源进行渗碳, 消除了其他碳氢化合物大气中常见的烟灰和焦油形成问题, 提供了高质量和表面光洁度, 使表层碳迅速饱和, 降低了气体消耗, 缩短了渗碳过程的持续时间。Lee-Der Liu 使用 0.6 kPa 的乙炔气体, 温度 950℃, 每个渗碳循环 30 min, 随着处理次数的增加, 球化程度和块状碳化物的数量逐渐增加; 在渗碳和沉淀的四个循环中, 形成了大量饱和碳化物如图 6 所示, 耐磨性受碳化物球化程度的影响, 即碳化物的圆度越高, 耐磨性越好[39]。

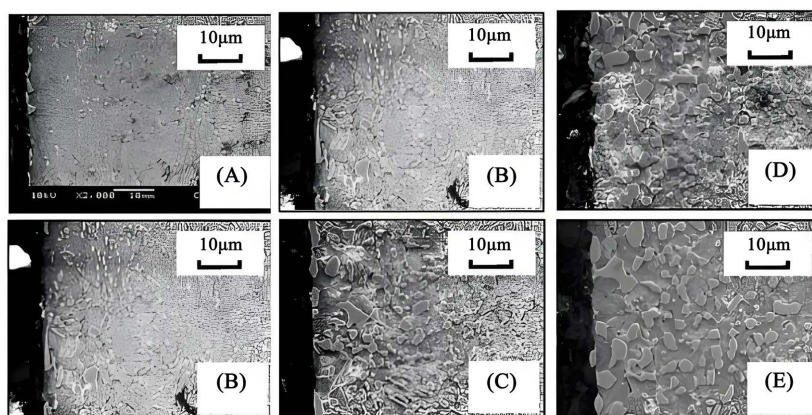


Figure 6. (A) to (E) respectively represent the microstructure of the carburized layer of the samples obtained in 1 to 5 processing cycles

图 6. (A)到(E)分别为 1 到 5 个处理周期获得样品的渗碳层微观组织

于朋翰[40]研究了不同时间 20CrMnTi 钢真空低压脉冲渗碳后,当扩散处理时间较短为 1125 min 时,由于表面碳浓度梯度大,在表层与亚表层之间产生较大内应力,容易产生内裂纹。扩散时间延长至 2125 min 时,表层碳含量显著降低,由 1.3%降低至 0.8%,碳含量由表层至心部变化缓慢,表层硬度变化平缓,如图 7。Haithem Boumediri [41]渗碳时间处理对低合金齿轮钢组织和力学性能的影响,样品被气体渗碳 4、6 或 8 小时。结果表明,显微硬度从约 140 HV 增加到 819 HV 以上,表层厚度从 1166 μm 增加到 1576 μm ,增长了 41%以上。此外,表层中的碳含量增加了 450%以上,达到 0.94 wt%。

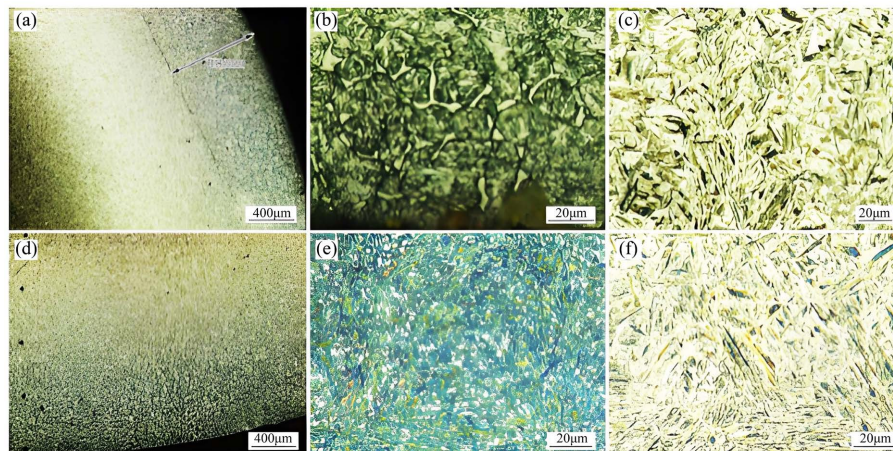


Figure 7. Microstructure of 20CrMnTi steel after quenching and tempering after vacuum low-pressure carburizing with different diffusion times: (a)~(c) 1125 min; (d)~(f) 2125 min; (b), (e) surface; (c), (f) core

图 7. 不同扩散时间真空低压渗碳 20CrMnTi 钢淬火 + 回火后的显微组织: (a)~(c) 1125 min; (d)~(f) 2125 min; (b), (e) 表层; (c), (f) 心部

综上所述,传统渗碳工艺作为一种典型的热化学表面强化技术,通过延长渗碳时间可有效增加渗碳层厚度,进而显著提升工件表面硬度和耐磨性能。然而,该工艺存在明显的技术局限性:随着渗碳时间的持续延长,碳化物形成动力学过程难以精确控制,易导致碳化物异常聚集及沿晶界非均匀析出,最终形成连续的网状碳化物组织。更值得注意的是,在常规气氛渗碳条件下,高温长时间处理会显著增加表层组织的氧化风险,这对工件表面性能的稳定性产生不利影响。

相比之下, 低压真空渗碳技术展现出显著的技术优势。首先, 真空环境从根本上消除了工件表面氧化的可能性, 为渗碳过程提供了理想的无氧条件。其次, 该技术采用独特的脉冲扩散机制, 通过周期性调节碳势, 有效抑制了碳原子的局部聚集现象。这种机制使得即使在长时间渗碳条件下(如 2125 min), 仍能保持碳化物的均匀分布特征。从热力学角度分析, 低压真空渗碳形成的碳势梯度更为平缓, 这种特性使得渗碳层中的碳扩散行为更为可控。

5. 气体渗碳气流量对渗层影响

气流量的变化会影响乙炔真空渗碳过程中碳浓度的分布。较大的气流量可以促使碳元素更均匀地分布在材料表面, 从而形成均匀的渗碳层。然而, 过高的气流量可能会导致碳元素在材料表面的浓度不均匀, 产生过深或过浅的渗碳层。气流量的大小对渗碳层的质量也有一定影响, 适当的气流量可以帮助避免气体中的杂质对渗碳过程的干扰, 并有助于提高渗碳层的均匀性和致密性[42][43]。过高的气流量可能会导致气体的扩散速率过快, 造成渗碳层的孔洞和非均匀性。

Huizhen Wang 进行了真空低压渗碳和高压气淬试验, 如图 8 所示, L1 的 C_2H_2 流量为 8 L/min, L2 的 C_2H_2 流量为 10 L/min [44], 由于 L2 的 C_2H_2 流量大, 供碳能力较好, 渗碳气氛中 C_2H_2 含量高, 表面渗碳效果相对更为显著。对比 L2 和 L3 的碳浓度分布, 渗碳压力为 3 kPa 的 L2 的碳含量略高于渗碳压力为 4 kPa 的 L3, 特别是对于 20CrMo 和 20CrMnTi。因此, 低渗碳压力的渗碳效果较好。同时, 低压渗碳可以减少炭黑, 保证渗碳均匀性。在保证供碳能力的前提下, 渗碳压力应降低。

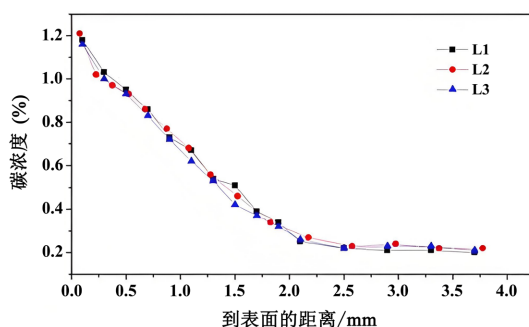


Figure 8. The carbon concentration distribution of 20CrMo steel under different process conditions
图 8. 20CrMo 钢不同工艺条件下的碳浓度分布

P.Rokicki 研究了乙炔流动对渗碳层特性的影响, 其分别用 50 L/h、250 L/h、750 L/h 的流速用乙炔气体对齿轮进行渗碳, 渗碳后组织如图 9 所示[45], 可以发现处理过程中存在一个依赖性和可能的临界值, 该临界值是导致表面碳过饱和的原因。炉内渗碳气氛中碳含量过高, 限制了扩散, 因此 250 L/h 的气体流速对于渗碳组织最好。

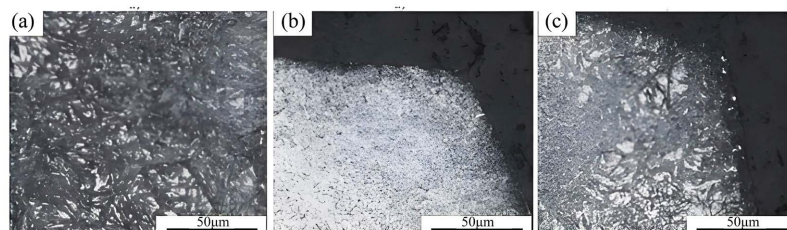


Figure 9. Structure of the carburized layer at the gear tip (a) 50 L/h (b) 250 L/h (c) 750 L/h
图 9. 齿轮尖渗碳层组织: (a) 50 L/h; (b) 250 L/h; (c) 750 L/h

Emilia Wołowicz-Korecka [46]研究了与常规低压渗碳增压过程中恒流量相比的新的变流量相比的渗碳工艺,如图10。试验结果表明,对每个增压阶段的渗碳气体量进行了单独调整,取得了与常规低压渗碳工艺相当的效果。在变流量渗碳过程和恒流量渗碳过程中处理的样品之间没有发现表面层性能的差异,而气体用量减少54%。

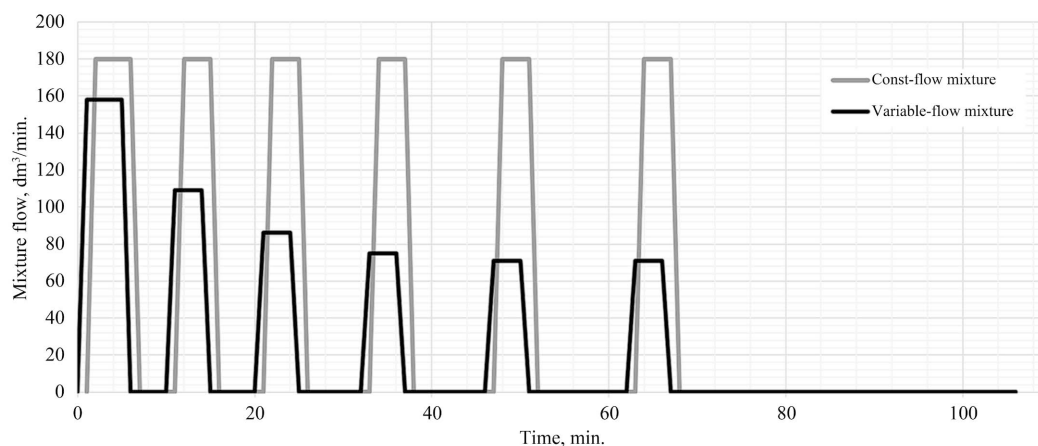


Figure 10. The amount of carburizing gas used in the process of constant and variable mixture flow rates
图 10. 恒定和可变混合物流量的过程中使用的渗碳气体量

综上所述,在气体渗碳工艺中,碳通量的精确控制对渗层组织均匀性和缺陷抑制具有决定性作用。传统气体渗碳工艺采用连续供气模式,通过气体对流扩散机制维持炉内气压和碳势平衡。该工艺条件下,当碳流量设置不足时,会导致碳传递动力学过程迟缓,致使工件表面碳浓度低于预期值(即欠渗现象);反之,若碳流量过高,则可能引发气相反应不充分,在工件表面发生炭黑沉积。

与之相对,低压真空渗碳技术采用脉冲式供气策略,通过精确控制单次碳通量,利用真空环境下分子自由扩散特性(此时气体传输不受流动阻力影响)实现渗碳过程。该工艺中,脉冲碳通量不足将导致渗碳层深度达不到设计要求,而过高的碳通量则会引起表面瞬时碳过饱和,进而诱发块状碳化物的异常析出。因此,无论是传统气体渗碳还是低压真空渗碳工艺,都需要建立精确的碳通量控制模型,通过优化工艺参数实现对渗碳动力学过程的精准调控,这不仅是获得理想渗层组织的关键,也是避免各类渗碳缺陷产生的根本保障。

6. 气体渗碳压强对渗层影响

渗碳过程中的压强对渗碳层的厚度和均匀性有影响。较低的压强可以促使碳元素更均匀地分布在金属表面,形成均匀的渗碳层。然而,过低的压强可能会导致碳元素的扩散速率不足,渗碳层厚度过薄或不均匀[47][48]。适当的压强可以帮助排除渗碳过程中产生的气体和污染物,提高渗碳层的致密性和均匀性。较高的压强可以增加气体分子之间的碰撞频率,提高反应速率[49]。然而,过高的压强可能会导致气体分子之间的碰撞概率增加,产生不必要的反应或产物。

Wang H [49]在渗碳压力分别为 100 Pa、200 Pa、300 Pa 和渗碳温度分别为 930℃、950℃、980℃的情况下,研究了渗碳压力和渗碳温度对表面碳通量的影响。通过研究温度对碳通量的影响,建立了 12Cr2Ni4 钢低压真空渗碳的碳通量模型。如图 11 所示,在渗碳压力 100~300 Pa,渗碳温度为 930℃~980℃范围内,得到了不同渗碳压力和渗碳温度下的表面碳通量值。渗碳温度的变化对表面碳通量影响不大,渗碳压力的变化对表面碳通量影响较大。在渗碳压力为 100 Pa、200 Pa 和 300 Pa 时,碳通量先减小后增大。

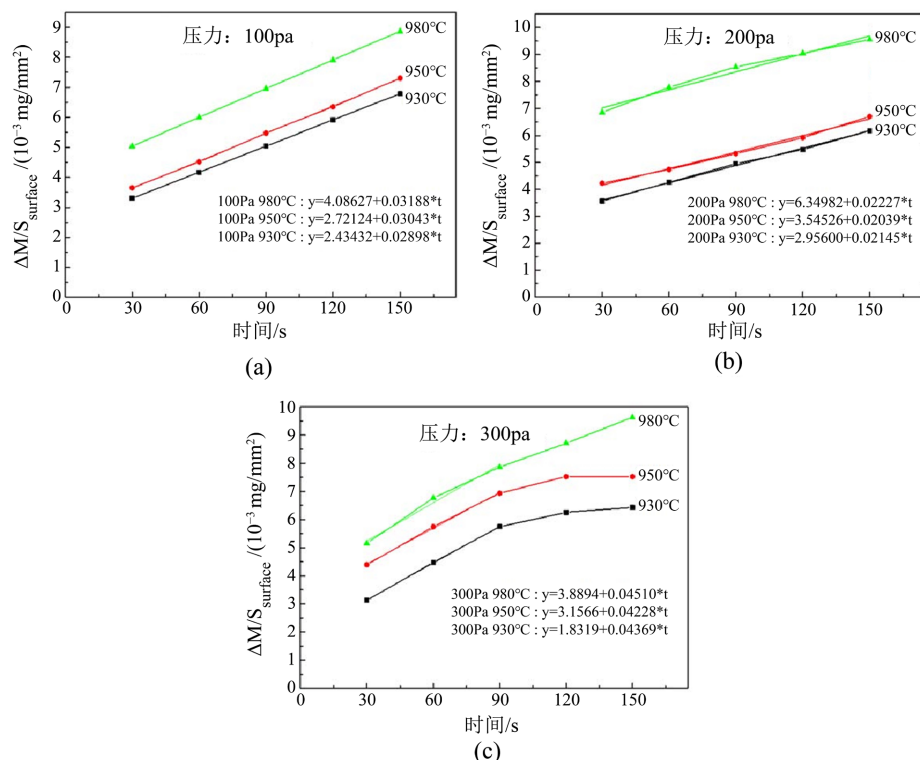


Figure 11. The accessory of the mass per unit surface area of the sample increasing over time: (a) Holding pressure: 100 Pa; (b) Holding pressure: 200 Pa; (c) Holding pressure: 300 Pa

图 11. 样品每单位表面积的质量随时间增加的配件: (a) 保压压力 100 Pa; (b) 保压压力 200 Pa; (c) 保压压力 300 Pa

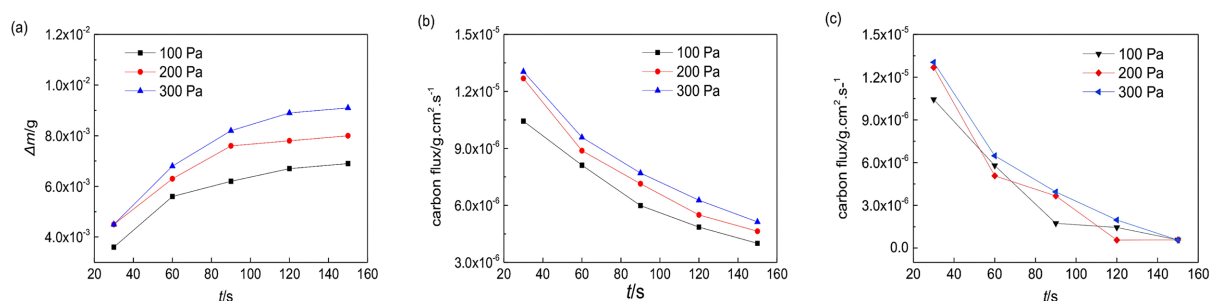


Figure 12. Effect of carburizing pressure on (a) mass increment; (b) average carbon flux; and (c) segmented average carbon flux of 16Cr3NiWMoVNbE steel at 950°C

图 12. 渗碳压力对 950°C 16Cr3NiWMoVNbE 钢的(a) 质量增量; (b) 平均碳通量和; (c) 分段平均碳通量的影响

Haojie Wang [50]研究了在相同的渗碳温度 950°C和 100、200 和 300 Pa 的渗碳压力下, 材料的质量增量、平均碳通量和分段碳通量表现出相同的趋势。样品的质量在 30 s 到 90 s 之间增加。从 90 s 到 150 s, 质量增加速率逐渐降低, 平均碳通量趋于稳定, 分段平均碳通量接近于零。随着压力的增加, 总碳通量趋于增加。在 200 Pa 和 300 Pa 的渗碳压力下, 碳通量值表现出较小的差异。随着压力的增加, 使样品表面的碳浓度饱和所需的时间减少(见图 12)。

综上所述低压真空渗碳过程中的压强调控作为区别于传统渗碳工艺的关键技术特征, 其核心在于通过精确控制反应腔体内部压力, 从而显著影响渗碳气氛的热力学分解行为、碳原子在工件表面的吸附动力学特性以及最终显微组织的均匀性。研究表明, 系统压强的升高会显著提高气相反应物的分子数密度,

进而增强活性碳原子与金属表面的碰撞频率, 最终提升表面碳吸附速率。然而, 当系统压强低于临界阈值时, 会导致渗碳气氛裂解不完全, 造成碳原子未能充分被基体吸收; 反之, 过高的压强则会引起气氛过饱和, 致使游离碳原子在工件表面发生非期望的沉积现象。通过优化设定合理的压强工作区间, 300 pa 是不错的渗碳压强工艺, 不仅能够有效调控气体分子的平均自由程和碰撞概率, 更能显著提升体系碳活度及扩散驱动力, 从而获得具有优异均匀性的渗碳组织。

7. 总结

气体渗碳组织和性能的影响可以从多个角度出发: 渗碳温度、渗碳时间、气流量和压强, 每个参数都对渗碳过程有着独特的影响。渗碳温度主要影响碳原子的扩散速率, 从而影响渗碳层的深度和均匀性。渗碳时间的延长则通常导致渗碳层深度的增加, 但过长的渗碳时间可能导致渗碳层质量的下降, 如碳化物析出和晶粒长大。气流量的大小影响着渗碳气氛的均匀性和活性, 进而影响渗碳速度和渗碳层的质量。适当的压强可以帮助排除渗碳过程中产生的气体和污染物, 提高渗碳层的致密性和均匀性, 进而调控渗碳过程中碳原子的传输和吸附。因此要获得一个良好的渗碳组织层, 首先要从渗碳工艺出发, 选择合适的渗碳时间和温度保证其渗碳层深度合适, 选择合适的渗碳气流和压力使其在渗碳过程中获得均匀的渗碳层, 只有各项渗碳参数相契合才能得到更好的渗碳组织和高性能的合金。

参考文献

- [1] 樊东黎, 潘健生, 徐跃明, 等. 中国材料工程大典(第 16 卷) [M]. 北京: 化工工业出版社, 2005: 608.
- [2] 杨尚超, 胡剑锋, 尹中秋, 等. 气体渗碳常见问题及预防措施[J]. 热处理技术与装备, 2024, 45(4): 62-64.
- [3] Wang, Y., Yang, Z., Zhang, F., Qin, Y., Wang, X. and Lv, B. (2020) Microstructures and Properties of a Novel Carburizing Nanobainitic Bearing Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 777, Article 139086. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139086>
- [4] Wang, G., Sang, X.G., Zhang, Y., et al. (2023) Carburization-Induced Microstructure Evolution and Hardening Mechanism of 18CrNiMo7-6 Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1649-1661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.050>
- [5] 张津. 现代表面工程技术[J]. 机械工艺师, 1995, 10(10): 33-34.
- [6] Jiang, Y., Wu, Q., Wang, Y., Zhao, J. and Gong, J. (2019) Suppression of Hydrogen Absorption into 304L Austenitic Stainless Steel by Surface Low Temperature Gas Carburizing Treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 24054-24064. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.112>
- [7] Kim, H.K., Kim, H.G., Lee, B., Min, S., Ha, T.K., Jung, K., et al. (2017) Atmosphere Gas Carburizing for Improved Wear Resistance of Pure Titanium Fabricated by Additive Manufacturing. *Materials Transactions*, 58, 592-595. <https://doi.org/10.2320/matertrans.m201636>
- [8] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
- [9] 迟长志, 仲伟深, 韩喜令, 等. 快速渗碳工艺的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1998, 25(4): 383-386.
- [10] Qiao, Z.X., Mi, H.X., Huo, J., Wan, Y.B. and Chen, X. (2019) Effect of Austenitizing Temperature on Microstructure Formation of Quenched X65 Micro-Alloyed Pipeline Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 474, Article 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/474/1/012061>
- [11] 薛彦均. 重载齿轮钢低压渗碳组织、疲劳性能及淬火变形研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 钢铁研究总院, 2024.
- [12] 任慧远, 张天强, 包耳, 等. 离子渗碳与气体渗碳的比较[C]//中国热处理行业协会. 2003 年全国热处理行业厂长经理会议暨第四次质量工作会议论文集. 2003: 104-110.
- [13] Michal, G.M., Ernst, F., Kahn, H., Cao, Y., et al. (2006) Carbon Supersaturation Due to Paraequilibrium Carburization: Stainless Steels with Greatly Improved Mechanical Properties. *Acta Materialia*, 54, 1597-1606. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.029>
- [14] Kula, P., Kaczmarek, L., Dybowski, K., Pietrasik, R. and Krasowski, M. (2013) Activation of Carbon Deposit in the Process of Vacuum Carburizing with Preliminary Nitriding. *Vacuum*, 87, 26-29. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.06.018>

- [15] 郑子樵. 材料科学基础[M]. 第2版. 长沙: 中南大学出版社, 2013.
- [16] Sun, Y. (2005) Kinetics of Low Temperature Plasma Carburizing of Austenitic Stainless Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, **168**, 189-194. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.005>
- [17] Harper, M.A. and Cotner, J.P. (2000) Mixed Sulfidation/Carburization Attack on Several Heat-Resistant Alloys at 900°C. *Oxidation of Metals*, **53**, 427-449. <https://doi.org/10.1023/a:1004698024506>
- [18] 陈增谋. 生产实际中的碳势控制[J]. 机械工程师, 2014(10): 259-260.
- [19] 涂鹏飞. 工业纯钛表面渗铝及其改进渗层性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.
- [20] 李连清. 渗碳及碳氮共渗新工艺[J]. 宇航材料工艺, 2001(4): 56.
- [21] 葵怀福. 真空渗碳工艺和设备[J]. 真空, 1978(4): 19-30.
- [22] Adedipe, O., Medupin, R.O., Yoro, K.O., Dauda, E.T., Aigbodion, V.S., Agbo, N.A., et al. (2023) Sustainable Carburization of Low Carbon Steel Using Organic Additives: A Review. *Sustainable Materials and Technologies*, **38**, e00723. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00723>
- [23] 马森林, 高文栋, 沈玉明. ECM 低压真空渗碳技术应用研究与探讨[J]. 汽车工艺与材料, 2004(8): 27-30.
- [24] 孙伟, 李检贵, 康风波. 氮气甲醇丙烷和甲醇丙烷渗碳气氛的对比[J]. 金属加工(热加工), 2017(7): 16-18.
- [25] 赵振东. 低压真空渗碳气淬技术的应用[J]. 国外金属热处理, 2005, 26(3): 33-34.
- [26] 张治中, 张银, 胡云波, 等. 9310 航空齿轮真空渗碳热处理表面强化数值模拟及工艺参数优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(7): 194-203.
- [27] 牛志芳. 真空渗碳热处理技术的研究与探讨[J]. 农机使用与维修, 2023(6): 99-101.
- [28] 南胜强. 中碳钢高温快速膏剂渗碳工艺及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [29] 白雨鑫, 牟家林, 肖佳, 等. Nb 微合金元素对渗碳轴承钢组织和性能的影响[J]. 特钢技术, 2024, 30(2): 22-25.
- [30] Wang, N., Zhang, H.X., Wei, Z.W., et al. (2024) Solid Carburizing in Ferritic Phase Region of DIEVAR Steel: Microstructure Evolution and Formation Mechanism of Carburizing Layer. *Surface and Coatings Technology*, **476**, Article 130200. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130200>
- [31] Zheng, X.Z., Ghassemi-Armaki, H., Hartwig, K.T. and Srivastava, A. (2022) Correction: Zheng Et Al. Correlating Prior Austenite Grain Microstructure, Microscale Deformation and Fracture of Ultra-High Strength Martensitic Steels. *Metals*, **12**, Article 303. <https://doi.org/10.3390/met12020303>
- [32] Huang, X., Wang, H., Chen, J., Dang, L., Ma, Z. and Cui, S. (2022) Effects of Austenitizing Temperature on Microstructure Evolution and Corrosion Resistance of High Cr Ferritic/Martensitic Steel. *International Journal of Electrochemical Science*, **17**, Article 220833. <https://doi.org/10.20964/2022.08.24>
- [33] 谭克诚, 高祯云. 渗碳温度对齿轮钢组织及磨损性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(3): 641-643.
- [34] Friedman, H.H. (2025) The Education Irony: When College Degrees Lead to Unemployment, Mindless Thinking, Debt, and Despair. *Academia Mental Health and Well-Being*, **2**, 1-10. <https://doi.org/10.20935/mhealthwellb7661>
- [35] 孙振岩, 刘春明. 合金中的扩散与相变[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
- [36] 单朝军. H13 钢 RE-N-C-V-Nb 共渗层动力学及热稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [37] Di, C., Yan, X., Lv, X., Yan, C., Ye, W. and Li, D. (2021) Effect of Vacuum Carburizing Time on Microstructure and Mechanical Properties of Tantalum Carbide Layer. *Metals and Materials International*, **27**, 5008-5016. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00934-z>
- [38] Guo, J., Deng, X., Wang, H., Zhou, L., Xu, Y. and Ju, D. (2021) Modeling and Simulation of Vacuum Low Pressure Carburizing Process in Gear Steel. *Coatings*, **11**, Article 1003. <https://doi.org/10.3390/coatings11081003>
- [39] Liu, L.D. and Chen, F.S. (2004) Super-Carburization of Low Alloy Steel in a Vacuum Furnace. *Surface and Coatings Technology*, **183**, 233-238.
- [40] 于朋翰, 严昊明, 杨帅, 等. 扩散时间对真空低压渗碳 20CrMnTi 钢组织与硬度的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(2): 251-256.
- [41] Boumediri, H., Touati, S., Debbah, Y., Selami, S., Chitour, M., Khelifa, M., et al. (2024) Effect of Carburizing Time Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Low Alloy Gear Steels. *Materials Research Express*, **11**, Article 076505. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad5cd6>
- [42] Yada, K. and Watanabe, O. (2013) Reactive Flow Simulation of Vacuum Carburizing by Acetylene Gas. *Computers & Fluids*, **79**, 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.03.005>
- [43] 龙振. 真空渗碳法制备 TaC 涂层工艺及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023.

-
- [44] Tian, Y., An, X.X., Wang, Z.D. and Wang, G.D. (2020) High Temperature Vacuum Low-Pressure Pulse Carburizing Process of 12Cr2Ni4A Steel. *Journal of Northeastern University Natural Science*, **41**, 1251-1256.
- [45] Kwon, G., Park, H., Lee, Y.-K. and Moon, K. (2023) Effect of Process Pressure and Nitrogen Addition Ratio on the Uniformity of Hardening Depth and Surface Properties of Cr-Mo Low Alloy Steel in Vacuum Carburizing. *Journal of the Korean Institute of Surface Engineering*, **56**, 94-103.
- [46] Wołowicz-Korecka, E., Korecki, M., Sut, M., Brewka, A. and Kula, P. (2019) Calculation of the Mixture Flow in a Low-Pressure Carburizing Process. *Metals*, **9**, Article 439. <https://doi.org/10.3390/met9040439>
- [47] Sabino, L.L. and Macusi, E.D. (2023) Tree Height, Canopy Cover, and Leaf Litter Production of *Rhizophora Apiculata* in Baganga, Davao Oriental, Philippines. *Academia Biology*, **1**, 1-10. <https://doi.org/10.20935/acadbiol6078>
- [48] 李振鹏. TA2 钛合金快速渗碳工艺及组织演变规律研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019.
- [49] Tian, Y., Wang, H.J., An, X.X., *et al.* (2021) Effects of the Voltage and Pressure on the Carburizing of Martensitic Stainless Steel in Pulsed DC Glow Discharge. *Materials Research*, **24**, Article 20210154. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0154>
- [50] Wang, H.J., Liu, J., Tian, Y., *et al.* (2020) Mathematical Modeling of Carbon Flux Parameters for Low-Pressure Vacuum Carburizing with Medium-High Alloy Steel. *Coatings*, **10**, Article 1075.