DC04 冷轧汽车钢电泳漆板起泡原因分析

贾瑞雪[1],刘恩泽[1],勤 牧[1],葛浩楠[2],陈建华[1],杨维宇[1],魏晓东[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司化检验中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要:文章采用扫描电子显微镜及能谱仪对 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板经 60 周期交变耐腐蚀试验后表面起泡的原因进行分析。试验结果表明:起泡区域磷化相尺寸约为 10 ~ 25 μm,未起泡区域磷化相尺寸约为 2 ~ 3 μm;经扫描电镜面扫描分析,起泡区域未检测到 Zn、P 等磷化相特征元素,而未起泡区域磷化膜与基体、电泳漆膜结合紧密,磷化膜存在 Zn、P 等磷化相特征元素。粗大的磷化相降低了基体、磷化膜、电泳漆膜三者的结合力,并为腐蚀液的扩展提供通道,最终导致 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板经 60 周期交变耐腐蚀试验后表面出现起泡现象。汽车钢前处理时脱脂不干净、表面存在残油可能是磷化相异常长大的原因。

关键词:DC04 冷轧汽车钢;电泳漆板;表面起泡;表面残油;磷化相尺寸
中图分类号:TG335.12 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2026)01 - 0040 - 06

Cause Analysis on Blistering of Electrophoretic Coating Plate for DC04 Cold Rolled Automobile Steel

Jia Ruixue[1], *Liu Enze*[1], *Qin Mu*[1], *Ge Haonan*[2], *Chen Jianhua*[1], *Yang Weiyu*[1], *Wei Xiaodong*[1]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Chemical Inspection Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, the causes of surface blistering of electrophoretic coating plate for DC04 cold rolled automobile steel after 60 - cycle cyclic corrosion resistance test are analyzed with scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer. The test results showed that the size of phosphating phase in blistering area was approximately 10 ~ 25 μm, while that in non - blistering area was about 2 ~ 3 μm; such characteristic elements of phosphating phase as Zn and P were not detected in blistering area, while the phosphating film was bound tightly with matrix and electrophoretic coating film in non - blistering area as well as there were such characteristic elements of phosphating phase as Zn and P in phosphating film. The binding force of matrix, phosphating film and electrophoretic coating film is reduced by coarse phosphating phase as well as the channel for extension of corrosive liquid is provided so that there is surface blistering of electrophoretic coating plate for DC04 cold rolled automobile steel after 60 - cycle cyclic corrosion resistance test finally. The incomplete degreasing during pretreatment of automobile steel and there is residual oil on the surface may be the causes for the abnormal growth of phosphating phase.

Key words: DC04 cold rolled automobile steel; electrophoretic coating plate; surface blistering; residual oil on surface; size of phosphating phase

---

收稿日期:2025 - 12 - 15
作者简介:贾瑞雪(1987 -),女,内蒙古包头市人,工程师,现从事涂装、焊接等板材应用技术研究工作。

DC04 冷轧汽车钢板凭借优异的成型性与焊接性,广泛应用在汽车车身、底盘等关键部件。电泳涂装作为该类钢板表面防护的核心工艺,能显著提高其耐腐蚀性与外观质量。然而在实际生产和耐腐蚀性能评价中,DC04 冷轧汽车钢电泳漆板表面偶尔出现起泡现象,这一问题不仅破坏涂层完整性,导致板材耐蚀性能急剧下降,还会增加后期维修成本,严重制约汽车制造质量的提高。目前有研究表明,冷轧钢板表面残油、划痕缺陷、磷化液 pH 值波动等因素可能影响磷化膜质量,进而引发电泳漆膜起泡。针对 DC04 冷轧汽车钢这一特定钢种,其表面残油与磷化相演化的关联性研究仍存在明显不足,且行业内针对 DC04 钢板的脱脂工艺优化方案尚未形成统一标准,导致后续磷化(或者薄膜处理) + 电泳处理后,电泳漆膜在严苛的中性盐雾试验或者长周期交变盐雾试验过程中难以有效控制起泡现象,因此亟需开展针对性研究,明确 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板表面起泡的根源,揭示关键影响机制并提出可落地的工业化优化方案[1]。

1　试验材料及方法

1.1　试验材料

试验所用材料为某钢厂生产的 DC04 冷轧汽车钢板,其厚度规格为 1.0 mm,主要化学成分如表 1 所示。采用激光切割机将材料加工成尺寸为 100 mm × 200 mm 的试样,对试样表面进行检验,选取无肉眼可见划痕、无夹杂物及氧化物残留等表面缺陷的试样,随后在其表面油膜仍处于新鲜状态时进行包装[2-3]。

表 1　试验钢的化学成分(质量分数)　　%

C	Si	Mn	S	P	Ti	Al	N
0.004	0.05	0.32	0.007	0.013	0.05	0.04	0.003

1.2　试验方法

委托某汽车厂对试验板进行磷化前处理,磷化工艺:热水洗→预脱脂→脱脂→水洗 1→水洗 2→表调→磷化→水洗 3→水洗 4→纯水洗。电泳工艺:电泳→喷淋→浸洗→纯水洗→热风沥干→烘干,烘干温度范围:90 ~ 200 ℃[4]。

根据 ISO 11997 - 1:2017《色漆和清漆 耐循环腐蚀条件的测定 第 1 部分:湿(盐雾)/干/湿》标准,进行 60 周期交变盐雾试验,以 24 小时为周期,依次进行盐雾试验 4 小时、标准气候存放 4 小时、湿热试验 16 小时,5 个循环后 2 天标准气候下存放。试验结束后对电泳漆板基材起泡、划线处的扩蚀宽度进行评定[5]。

采用蔡司 Sigma500 场发射扫描电子显微镜及能谱仪对电泳漆板起泡及未起泡区域磷化膜形貌进行分析,采用面扫描对基体、磷化膜的特征元素分布进行表征[3]。

2　试验结果与分析

2.1　电泳漆板起泡现象

DC04 冷轧钢板试样经磷化前处理 + 电泳涂装后,在 60 周期交变耐循环腐蚀试验出现明显的漆膜起泡及脱落现象,如图 1 所示。

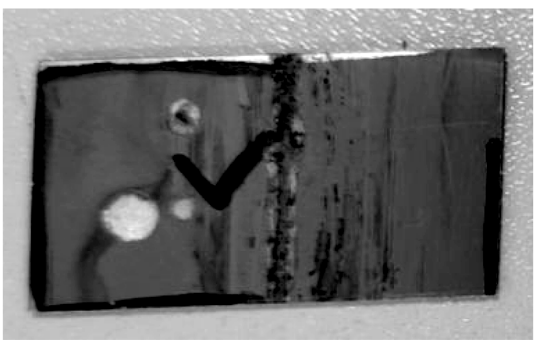
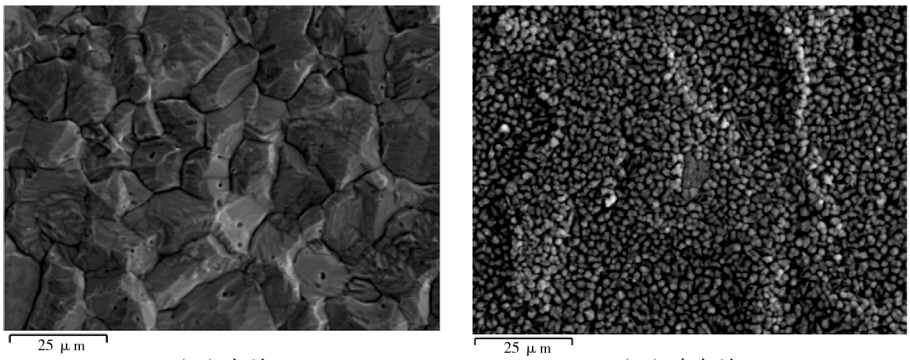


图 1　DC04 冷轧汽车钢电泳漆板试样漆膜起泡

2.2　SEM 形貌对比

为分析 60 周期交变耐循环腐蚀试验后电泳漆膜出现起泡及脱落的原因,采用配比为二氯甲烷 50%、有机酸 10%、表面活性剂 5% 的高效脱漆剂将 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板未起泡区域进行溶解,采用蔡司 Sigma500 场发射扫描电子显微镜对试样的起泡位置、未起泡位置的磷化膜形貌、尺寸进行观察、分析。图 2 为 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板试样起泡位置及未起泡位置磷化膜形貌[3]。图 3、图 4 分别为 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板试样未起泡位置及起泡位置磷化膜附近形貌及 Fe、C、Zn、P 等元素的分布图。



（a）起泡 （b）未起泡

图 2 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板试样起泡位置、未起泡位置磷化膜形貌

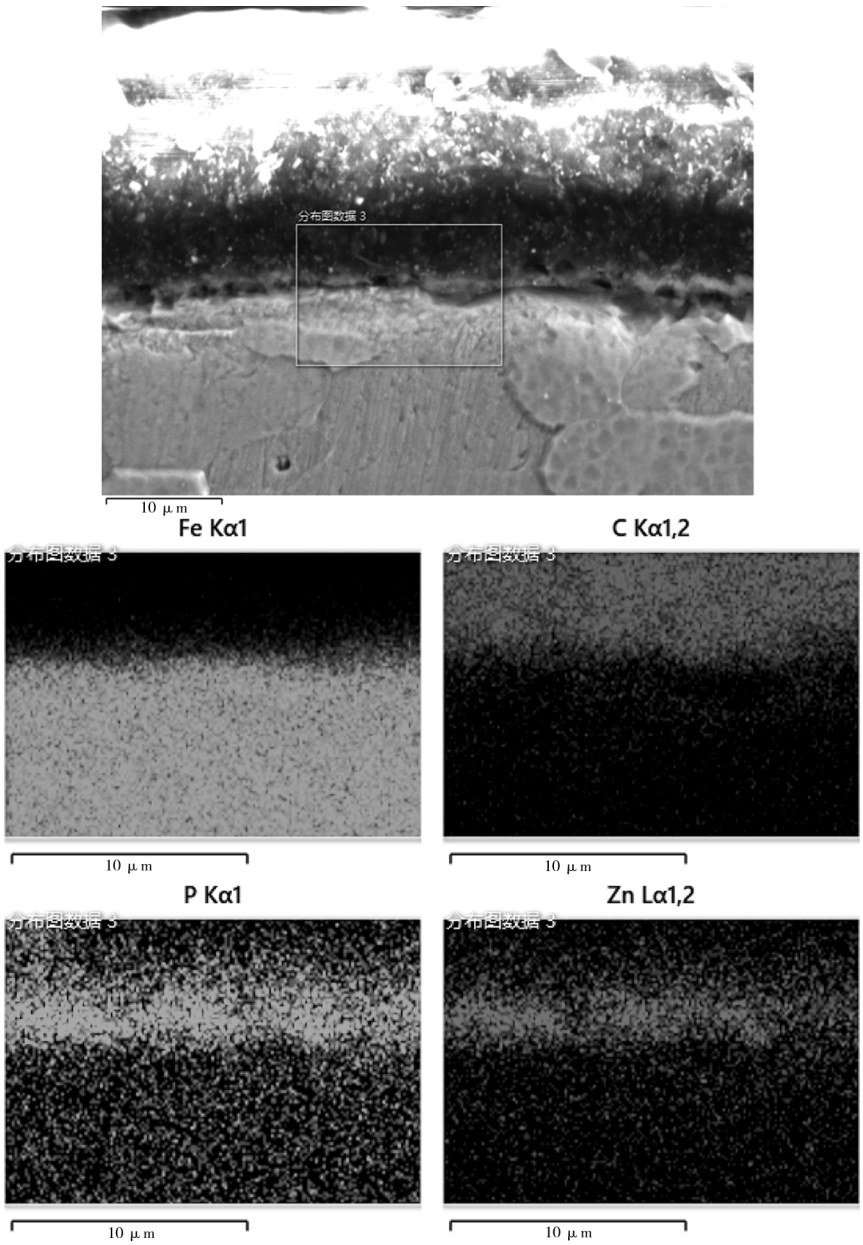


图 3 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板试样未起泡位置磷化膜面扫描

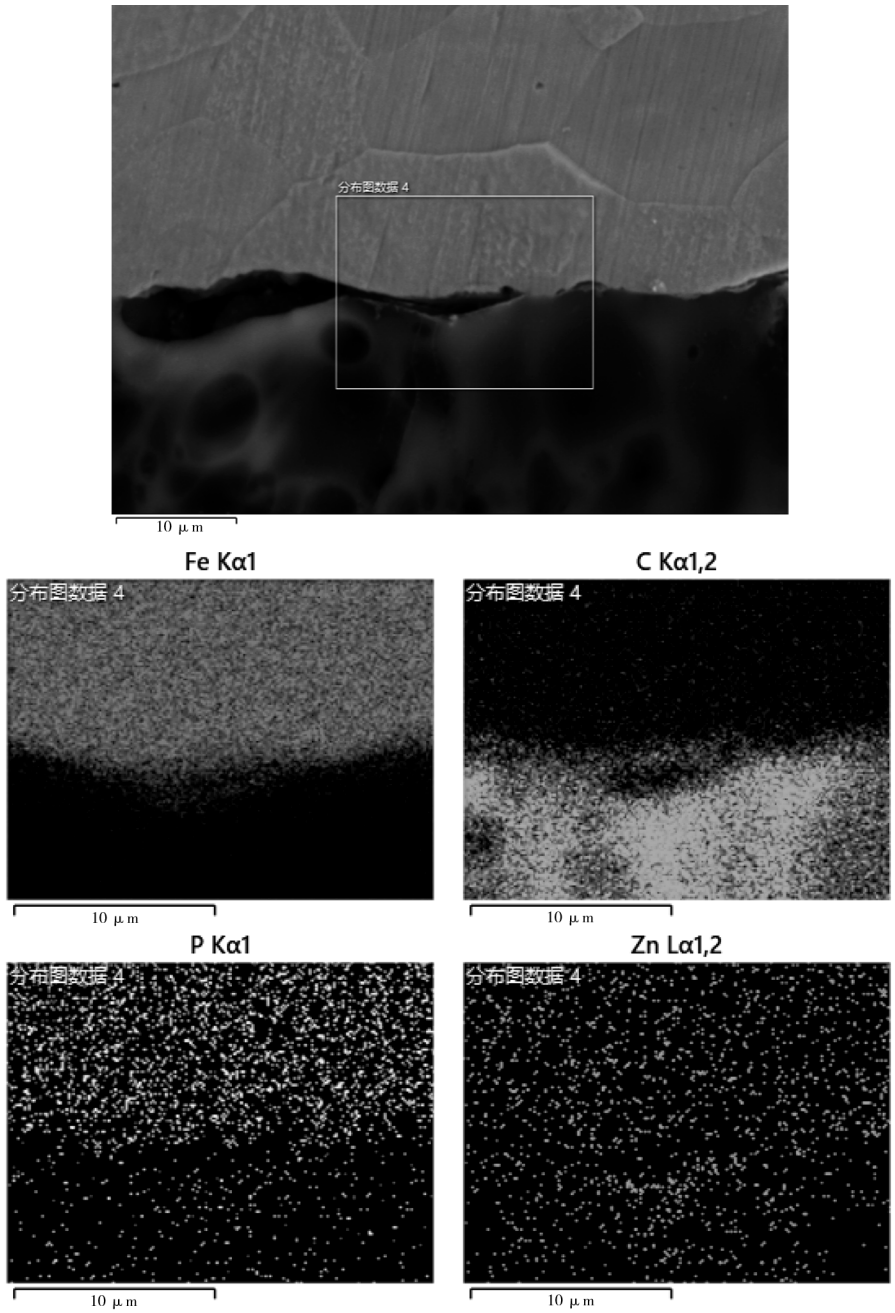


图 4　DC04 冷轧汽车钢电泳漆板试样起泡位置磷化膜面扫描

从图 2 中可以看出，电泳漆膜起泡区域磷化相尺寸较大，为多边形，存在较多缝隙，晶粒尺寸约为 10 ~ 25 μm；电泳漆膜未起泡区域磷化相尺寸较小，多为致密细小的粒状结晶，存在较少缝隙，晶粒尺寸约为 2 ~ 3 μm，起泡区域磷化相晶粒尺寸大于未起泡区域。

2.3　EDS 元素分布分析

试样经热镶嵌，同样采用扫描电镜及能谱仪，对经 60 周期交变耐循环腐试验的 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板起泡位置及未起泡位置的磷化膜进行面扫描分析。

分析图 3、图 4 可知，试样未起泡区域含有磷化相特征元素 P、Zn，且分布均匀，与基体 Fe 元素边界清晰，说明磷化膜连续完整，且未被破坏，磷化膜宽度约为 2 μm；试样起泡区域无磷化相特征元素 P、Zn 信号，仅检测到 Fe 与 C 元素，Fe 元素来自于基体，C 元素来自于镶嵌树脂，说明该区域未形成磷化膜或磷化膜已经被破坏，镶嵌树脂和表面已直接接触。

3 讨论

3.1 影响因素分析

DC04 冷轧汽车钢电泳漆板表面起泡的原理是“磷化膜质量劣化→腐蚀介质渗透→基体腐蚀→漆膜剥离”的连锁反应,其中表面残油是引发磷化膜质量劣化的核心因素,其影响贯穿“脱脂→磷化→漆膜结合”全过程。以下将从表面残油的来源特性、阻碍磷化反应、破坏磷化膜完整性等方面进行分析。

(1)表面残油的来源与关键特性。表面残油源于两类工业环节:一是轧制过程残留的轧制油,含矿物油、脂肪酸酯及极压剂,活性成分对磷化前处理干扰显著;二是成品储存涂覆的防锈油,以石蜡基矿物油为基础,界面吸附能力强,易形成油膜但增加后续脱脂难度。

冷轧板表面残油有两个关键的特性:一是界面吸附稳定性,分子极性基团与钢板 Fe 原子化学吸附,储存中经氧化交联形成牢固聚合物膜,脱脂难度大幅提升;二是成分反应活性,极压剂与磷化液中 Zn^{2+} 生成硫化锌沉淀,防锈剂与 H^+ 反应生成有机酸,破坏磷化液平衡。

(2)表面残油阻碍磷化反应。磷化反应需“Fe 溶解→PO_4^{3-} 水解→磷化相形核→生长”,残油通过双重作用阻碍:物理上,覆盖基体活性位点覆盖率超 70%,使 Fe 溶解速率降 50%,同时增加 Zn^{2+}、PO_4^{3-} 扩散阻力,延长离子到达时间,导致磷化相生长过度;化学上,极压剂消耗 Zn^{2+},使磷化液有效 Zn^{2+} 浓度从 2.0 g/L 降至 1.2 g/L,形核密度从 1×10^4 个/mm^2 骤降至 3×10^3 个/mm^2,且防锈剂中和 H^+,使磷化液 pH 值从 3.5 升至 4.2,促进疏松磷化相生成[6]。

(3)残油对磷化膜完整性的破坏。残油直接造成两类磷化膜缺陷:一是局部无磷化膜区,残油较厚区域(油膜厚度 >1 μm),磷化液无法穿透油膜与基体接触,形成无磷化膜区,成为腐蚀“初始通道”,盐雾试验中该区域腐蚀时间较正常区域缩短 80%,90% 起泡源于此;二是磷化相疏松区,残油较薄区域,残油分子嵌入磷化相晶粒间,阻碍晶粒紧密堆积,同时残油与磷化液反应生成的沉淀物,如硫化锌附着于晶粒表面,改变晶粒生长方向,导致晶粒排列无序,使磷化膜孔隙率骤升,缝隙相互连通形成腐蚀介质渗透的“网络通道”[7-8]。

3.2 优化措施

针对表面残油这一核心影响因素,结合工业化生产实际,从防锈油选型及储存、包装等方面提出针对性优化措施,确保有效控制残油影响,提高磷化膜质量与电泳漆膜的防护性能。

(1)防锈油选型与涂油量控制。优先选择“易脱脂型防锈油”,确保常规脱脂时间内可完全去除;储存过程中聚合稳定性优异,避免长期储存导致残油难以去除;与磷化液无不良反应,不会与 Zn^{2+}、H^+ 发生化学反应,确保磷化液成分稳定。

采用辊涂方式精准控制涂油量,在保证不生锈的前提下,尽可能少涂防锈油,避免过量涂油增加脱脂压力。通过在线红外测厚仪实时监测涂油量,确保每批次钢板的涂油量均匀一致。

(2)为避免残油在储存与运输过程中发生聚合或聚集,需从储存环境控制、包装保护等方面进行控制优化。

实行“先进先出”的储存原则,严格控制钢板储存周期,确保从生产到使用的间隔时间小于 6 个月,避免残油长期储存引发聚合;储存环境需恒温恒湿,确保维持稳定环境;包装保护优化,建议成品钢板采用 PE 薄膜密封包装,内部放置硅胶干燥剂,防止包装破损导致的水汽侵入与表面污染;包装时确保薄膜无褶皱,避免薄膜与钢板表面摩擦造成油膜破损,确保残油在后续脱脂前保持均匀覆盖状态[9]。

4 结论

(1)DC04 冷轧钢电泳漆板起泡的核心原因是表面残油导致磷化膜中磷化相异常长大。残油通过物理阻隔与化学干扰,破坏磷化反应的形核 - 生长平衡,形成粗大且多缝隙的磷化膜,导致磷化膜致密性下降,漆膜结合力下降;腐蚀介质通过磷化膜缝隙渗透至基体引发腐蚀,产物积累产生的压力推动漆膜剥离形成起泡。未起泡区域因无残油干扰,磷化相细小,磷化膜连续致密,可有效阻隔腐蚀介质。

(2)表面残油对磷化与漆膜性能的影响机制明确。残油源于轧制油残留与防锈油涂覆,具有界面吸附稳定性与成分反应活性;通过阻断磷化反应活性位点、阻碍离子扩散、消耗磷化液有效成分,导致磷化相形核不足,生长过度;同时破坏磷化膜连续性,形成无磷化膜区与磷化相疏松区,削弱漆膜与磷化膜的物理嵌合及化学吸附,最终引发起泡。

(3)针对性优化措施可有效解决电泳漆板在严苛的耐腐蚀试验中的起泡问题,建议选用易脱脂型防锈油,控制单面涂油量;通过严格控制钢板储存周

期,提高脱脂效率,促进磷化相的生成,提高 DC04 冷轧汽车钢电泳漆板耐腐蚀性能。

参 考 文 献

[1] 杨维宇,刘妍,张晓磊,等. 激光共聚焦显微镜在 DC04 表面形貌表征中的应用[J]. 物理测试,2023,41(2):21 -25.

[2] 陈韦宇. 超声辅助激光喷丸 IN718 镍基合金的表面完整性及热腐蚀性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2024.

[3] 杨维宇,刘妍,刘恩泽,等. 冷轧板磷化和硅烷前处理工艺及形貌对比分析[J]. 包钢科技,2023,49(5):50 -54.

[4] 吴良骏. 涂料耐腐蚀性测试方法简介[J]. 涂料工业,2001,31(6):49 -53.

[5] 崔国栋,杨川. 38CrMoAl 钢气体氧氮共渗处理的组织与性能[J]. 金属热处理,2008,33(12):47 -48.

[6] 杨维宇,刘妍,刘恩泽,等. 影响冷轧板表面转化膜形成质量因素研究[J]. 电镀与精饰,2024,46(9):76 -82,107.

[7] 杨维宇,刘妍,刘恩泽. DC04 冷轧板表面状态对氟锆酸盐 -硅烷复合转化处理的影响[J]. 电镀与涂饰,2024,43(12):60 -67.

[8] 龙袁,郝玉林,蔡宁,等. 脱脂对镀锌汽车板涂装性能影响[J]. 表面技术,2023,52(10):259 -266.

[9] 郭宏南,陈倩,杨洋. 脱脂碱度对镀锌板涂装前处理性能的影响[J]. 电镀与涂饰,2024,43(11):147 -154.

(上接第 34 页)

合产业链资源,形成网络化协同制造生态,实现跨企业、跨地域的集约化标准。集约化标准化本身就是绿色制造的基础,未来将更注重与碳足迹追踪、能源精细化管理相结合,推动制造业的可持续发展[7]。

5 结束语

集约化生产与标准化制造并非孤立概念,二者具有内在的协同效应,其系统性融合是构建现代先进制造体系的核心。本文所构建的集约化生产标准化制造创新方法体系,为企业应用提供了清晰的理论框架和可操作的实施路径。案例研究表明,该融合创新方法能有效解决制造业在效率、成本、质量、柔性制造方面面临的痛点,产生巨大的经济与社会效益。

参 考 文 献

[1] 周济. 智能制造:“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程,2015,26(17):2273 -2284.

[2] 莱克,J. K. 丰田模式:全球最杰出制造商的 14 条管理原则[M]. 纽约:麦格劳 -希尔出版社,2004.

[3] 舍恩伯格,R. J. 日本制造技术:简约中的九大隐性经验[M]. 纽约:自由出版社,1982.

[4] 国际标准化组织. ISO 9001:2015 质量管理体系要求[S]. 日内瓦:国际标准化组织,2015.

[5] 臧冀原,王柏村,孟柳,等. 智能制造:内涵、范式与路径[J]. 经济研究导刊,2025(5):15 -18.

[6] 陶飞,张萌,刘玉珊,等. 数字孪生驱动的复杂设备预测与健康管理[J]. 国际生产工程科学院会刊,2018,67(1):169 -172.

[7] 古依莎娜,董景辰,臧冀原,等. 并行推进、融合发展:推动新一代智能制造的技术路线图[J]. 中国工程科学,2018,20(4):19 -22.