

Damage Study of Heated Conveyor Rolls in Roller-hearth Furnaces for High-strength Steel Aluminum-silicon Coated Plates

Xiaoqi Ren¹ Liang Wang²

1. Dongying Guangda Jinke Robotics Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257100, China

2. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract

This paper emphasizes the importance of hot stamping and forming technology for high-strength steel and the key role of roller-hearth furnace in it. By analyzing the possible thermochemical erosion mechanisms of alumina rolls and AlSi coated metal sheets, experimental tests documented the interfacial diffusion and chemical reactions in high temperature environments, and explored the adhesion and erosion patterns of the rolls to the AlSi coatings. Although furnace roll coating materials help mitigate erosion problems, furnace roll depletion and energy utilization remain challenging. The study proposes the concept of a hybrid heating line between a multi-story chamber furnace and a roller-hearth furnace, which provides new ideas to address thermochemical erosion challenges. This study provides an in-depth analysis of the thermochemical erosion problem in heated roller-hearth furnaces and proposes a solution for a hybrid heating line aimed at improving line stability and energy utilization.

Keywords

high-strength steel; hot stamping; heated roller-hearth furnace; conveyor rollers; thermochemical erosion

高强钢铝硅镀层板辊底炉加热输送辊的损伤研究

任晓琪¹ 王梁²

1. 东营广大金科机器人有限公司, 中国·山东 东营 257100

2. 华中科技大学物理学院, 中国·湖北 武汉 430074

摘要

论文强调了高强钢热冲压成形技术的重要性, 以及辊底炉在其中的关键作用。通过分析氧化铝辊与AlSi涂层金属板可能发生的热化学侵蚀机制, 实验测试记录了高温环境下的界面扩散和化学反应情况, 探究了辊子与铝硅镀层的粘接和侵蚀规律。尽管炉辊涂覆材料有助于减轻侵蚀问题, 但炉辊损耗和能耗利用仍具挑战。研究提出了多层箱式炉与辊底炉混合加热生产线的构想, 为解决热化学侵蚀挑战提供新思路。这项研究深入分析了加热辊底炉的热化学侵蚀问题, 并提出了混合加热生产线的解决方案, 旨在提高生产线稳定性和能耗利用率。

关键词

高强钢; 热冲压; 加热辊底炉; 输送辊; 热化学侵蚀

1 引言

轻量化技术在汽车工业中扮演着至关重要的角色, 是实现汽车节能减排目标的关键技术之一。在众多轻量化技术中, 高强钢热冲压成形技术以其在确保汽车安全性的同时显著减轻车辆重量的优势而备受瞩目。自从引入这一技术以来, 它迅速取得了长足的发展^[1]。在高强钢热冲压的广泛应用中, 超过 80% 的加热系统采用了辊底炉。这类加热炉能够在有或没有保护气体的环境下运行。在整个热冲压生产线

中, 加热辊底炉和输送辊扮演着至关重要的角色。加热辊底炉中的辊体需要承受高温和化学腐蚀的严峻环境, 而输送辊则必须抵御物料的摩擦和磨损。值得注意的是, 辊底加热炉中的氧化铝辊与带有 AlSi 涂层的金属板可能会发生热化学侵蚀。热化学侵蚀是指在高温环境中同时存在化学腐蚀和热作用的侵蚀过程, 这在高强钢热冲压的生产过程中显得尤为重要。

热冲压技术, 作为当代制造业的一项核心应用, 广泛应用于汽车轻量化和零部件生产等领域。在这一领域中, 加热辊底炉扮演着至关重要的角色, 它负责对工件进行精密热处理和加热操作。在这个复杂而关键的过程中, 输送辊作为不可或缺的组成部分之一, 经受着高温和化学介质的严峻考

【作者简介】任晓琪(1971-), 男, 中国山东东营人, 本科, 助理工程师, 从事热成形工艺与装备研究。

验。热化学侵蚀，作为输送辊性能衰退和寿命缩短的主要根源，愈发凸显其重要性。因此，深入研究输送辊在高温环境下的热化学侵蚀，对于提升其性能和延长使用寿命具有卓越的实际价值。

在典型的直接热冲压过程中，经过精心处理的硼合金钢坯料首先置身于连续辊底炉的均热加热中，使其升至奥氏体化温度并保持一定时间。这个阶段的核心目标是将原先的珠光体-铁素体微观结构完全转变为奥氏体状态，为后续的加工操作奠定坚实的基础。随后，经过精心热处理的坯料被移至冷模具中，在成型和淬火的过程中确保零件的微观结构完全转变为马氏体。这一复杂的工序中，22MnB5 是最为普遍使用的热冲压钢等级，其碳含量约为 0.22wt%，成形抗拉强度可高达 1500MPa，在其化学成份略有改变的配方下，其抗拉强度可达到 1800~2000MPa。

在高强度钢中，广泛采用的 AISi 涂层板通过在高温下加热表面形成致密的 Al_2O_3 层，构建了高效的外部保护屏障，有效阻止了涂层的进一步氧化过程。这一保护层甚至在室温下仍然起到提高涂层抗腐蚀性能的关键作用，展现出明显的技术优势。更详尽的信息可参考图 1^[2]。这一独特的工艺流程和材料选择共同促使了热冲压技术在汽车制造和轻量化领域的卓越表现。

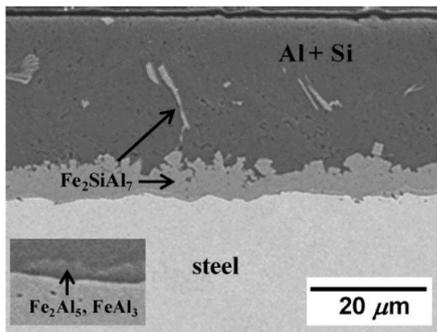


图 1 铝硅涂层的横截面扫描电子显微镜 (SEM) 显微效果图。

2 辊底炉输送辊在高温环境下的热化学侵蚀

辊底炉传送辊通常采用氧化铝或石英制造。在高温下，粘接通过界面扩散实现。氧化铝辊表面和铝硅涂层之间的原子扩散形成界面层，增加接触面积，有效粘接。化学反应也可能促成粘接，尤其在高温下。氧化铝与铝硅涂层中的铝可能发生反应，形成化学键，牢固粘接。然而，加热过程中，AISi 涂覆金属片与辊直接接触可能引发强烈热化学反应。这可能导致滚筒频繁更换，影响工厂可用性，如图 2 所示^[3]。深入研究和解决这一挑战，确保系统可靠性和生产稳定性。控制和优化辊底炉传送辊与 AISi 涂覆金属的相互作用，降低维护成本，提高生产效率。



图 2 陶瓷输送辊与 AISi 涂层板的粘连与侵蚀

目前，针对加热炉辊子上的这种亲和性问题，采用了一种特殊涂覆材料，可显著减少材料之间的粘附性。它借助溶胶-凝胶工艺，研发了一种特殊的悬浮液，可用于喷涂在输送辊表面，进而延长其使用寿命长达 30%~50%。这种涂覆不仅有助于减轻由于粘附引起的传输件偏离主轴运动方向的问题，还能有效避免因粘附而导致的加热完成后料片位置的偏移和弯曲断裂等意外事故。

3 不同加热区间输送辊的热化学侵蚀分布

在辊底炉辊棒从入炉侧运送至出炉侧的过程中，铝硅涂层板料片经历了升温、融化和合金化等复杂的热处理阶段。铝硅涂层的熔点约为 680℃左右，明显低于钢板奥氏体化的温度。因此，在加热过程中，当涂层板达到这一温度范围时，涂层处于融化状态，但尚未发生合金化反应。在这个阶段，料片背面的铝硅涂层与炉内辊棒接触处可能会与辊棒表面发生黏附，导致摩擦和粘附。随着时间的推移，这种黏附逐渐积累并增加，形成结瘤。在结瘤的区域，涂层可能侵蚀炉辊表面，而与涂层表面粘附的辊棒由于铝硅涂层的低热导率以及铝硅结瘤热膨胀系数与陶瓷辊棒的不匹配，导致陶瓷辊棒表面与内部之间的温度差异增大。这种差异可能引起剥落凹坑的形成，最终可能导致辊棒断裂。结瘤区炉辊的几何尺寸差异还引发热坯料移动方向的偏移，严重影响生产的连续性。

该研究采用了连续批量生产验证的实验方法，通过对辊底加热炉进行实验分析，炉体长度达到 16m。重点关注了铝硅涂层高强板在辊底式加热炉连续运行加热过程中对炉内辊棒的化学侵蚀，这一具体问题进行了实验验证。

在进行该批次零部件产品的生产之前，对辊底炉进行了停机检修和维护工作。此过程中，打开了炉顶盖，将炉体入炉侧的原污染严重、结瘤严重的全部辊棒抽出，并对其表面进行了打磨清理，剔除了残次和断裂的辊棒，并更换了新的炉辊棒。接着，炉底炉重新投入生产，开始了对该批次零部件的生产过程。

在生产过程中，入炉侧第一区的炉温设置为 850℃，第二区为 900℃，第三、第四、第五区为 930℃（共计五区加热）。炉辊转速为 42mm/s，通过炉内单边炉辊表面，累计生产了约 13000 片左右的零件（一模两件，零件平板长度在 600mm，料厚为 1.0mm）。这意味着大约有 6500 片料片经过了炉内单边炉辊表面。

4 实验检测结果和分析

在炉辊加热炉的运行中，输送辊的速度为 42mm/s，而

炉辊棒的间距为 100mm。以下是观测到的现象总结：

①出现涂层黏连现象的炉辊主要集中在第 25~83 根，其中较严重的结溜主要发生在第 50~65 根，而常规检测范围在第 35~63 根。

②开始出现轻微黏连的料片的加热时间大约在 60s，而温度在 620℃左右。

③严重结溜的料片的加热时间在 120~155s，严重结溜的料片加热温度约在 800℃~850℃。需要注意的是，粘辊现象主要发生在料片升温过程中，而在保温阶段不存在此现象。

④第 59 根炉辊的粘结状态不一致，随着料片的加热过程逐渐变化。随着料片温度的升高，粘连带逐渐增多，而随着温度的进一步提高，粘连带又逐渐减少，最终消失。在本炉中，这一现象占据了 5900mm 长度距离，相当于加热炉总长的 3/8。

通过对 16m 长加热炉的粘辊过程进行分析，可以推测出不同长度炉子的棍棒要求。例如，如果炉长为 30m，那么容易污染的区域在入炉后的第 25 根左右炉辊开始，共计 120 根范围内。因此，在实际量产生产中，此污染严重区域的棍棒最好选择使用带涂层棍棒，以降低钢板铝硅涂层对棍棒使用寿命的影响，提高生产线的稳定性，提高成品率，并降低生产成本。这为生产线的优化和成本控制提供了重要的参考依据。

通过设计和进行一系列实验，我们模拟了实际运行条件下的热化学侵蚀过程。在实验中，选择了符合实际生产工艺条件的工作样件，并在预定的温度、压力和化学腐蚀介质等条件下进行了长时间的实验观察。实验结果显示，在高温下，莫来石（Mullite，材料的化学式为 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ）输送辊和高强度铝硅涂层板都遭受了不同程度的热化学侵蚀。输送辊表面出现了腐蚀、氧化和颗粒物沉积等变化，而被加热的涂层板的硅铝合金层在一定程度上提高了莫来石辊的耐热性和耐腐蚀性能。

就目前的技术手段来看，还没有十分有效解决炉辊抗侵蚀的技术。多层箱式炉在炉内没有运动机械^[4]，其有效能耗高于辊底炉。新的方案是考虑在加热的前端采用多层箱式

炉预热坯料，然后输送到辊底炉进口端，这组成混合加热生产线，从而缩短辊底炉的长度（炉体的外辐射能耗泄漏占辊底炉总能耗的 30%），减少炉辊损耗，减少总体热损耗，减少碳排放，降低生产成本。

5 结论

本研究通过对热冲压生产线加热辊底炉输送辊的热化学侵蚀进行了实验研究，在高温环境下，经过实验观察发现，氧化铝辊和带有 AlSi 涂层的金属板之间可能发生界面扩散和化学反应，导致粘接和侵蚀的现象。这个发现表明，热化学侵蚀是导致输送辊性能退化和寿命缩短的主要机制之一。为了降低热化学侵蚀的影响并延长输送辊的使用寿命，可以采用适当的涂覆材料。

实验结果显示，多层箱式炉与辊底炉联合组成混合加热生产线可以降低辊底炉的长度和能耗，从而减少炉辊所受到的热化学侵蚀程度。这为改善生产线效率和减少炉辊损耗提供了新的思路和方向。

然而，尽管取得了一些进展，仍然有一些问题需要进一步研究。例如，涂覆材料的性能需要进一步改进，以提高其耐高温和化学腐蚀的能力。同时，还需要对辊底炉进行设计优化，以减轻热化学侵蚀的程度。另外，研究多层箱式炉和辊底炉联合使用的工艺参数也是下一步研究的重要内容。

参考文献

- [1] 张宜生,王子健,王梁.高强度热冲压成形工艺及装备进展[J].塑性工程学报,2018,25(5):11-23.
- [2] Dong Wei Fan, Bruno C. De Cooman. State-of-the-Knowledge on Coating Systems for Hot Stamped Parts[J]. steel research int, 2012,3(8):412-433.
- [3] Viton Uthaisangsuk. Hot stamping of ultra-high strength steel: A key technology for lightweight automotive design[J]. AUTOMOTIVE SUMMIT 2014-Green Mobility Changing the World,2014,19-20.
- [4] X Q Ren. A New Structural Door of Box Type Heating Furnace. Proceedings of the 6th International Conference on Advanced High Strength Steel and Press Hardening (ICHSU)[J]. Atlantis Press,2023:444-447.