

先进高强钢热轧卷内氧化影响因素及调控策略研究现状

Research Progress on the Influencing Factors and Regulation Strategies of Internal Oxidation of Advanced High-strength Steels During Hot Coiling

供稿|刘自贺, 刘宏强, 王立辉, 董伊康 / LIU Zihe, LIU Hongqiang, WANG Lihui, DONG Yikang

内容导读

先进高强钢兼具高强度和良好的成形性, 是重要的汽车轻量化材料。然而, 受 Mn、Si 等活泼性元素影响, 先进高强钢在热轧卷取过程中极易发生内氧化。特别是当钢中的 Si 含量较高时, 氧化会趋于沿晶界发生, 导致晶粒间的结合力变弱, 诱发严重的表面缺陷。热轧卷内氧化被普遍认为是制约先进高强钢表面质量的关键瓶颈之一。本文综述了现有研究工作, 首先介绍了先进高强钢热轧卷沿晶内氧化过程的速率控制步骤, 然后对其影响因素 (包括卷取温度、冷却速率和合金元素) 进行了分析, 最后对解决热轧卷沿晶内氧化问题、获得高表面质量的先进高强钢提出了展望。

随着汽车轻量化与车身碰撞安全性要求的日益提高, 先进高强钢以其高强度和良好的成形性成为车身板的首选材料^[1-4]。然而, 受 Mn、Si、Cr 等活泼性元素影响, 先进高强钢在热轧卷取过程中会发生内氧化, 如图 1 所示^[5]。当 Si 含量较高时, 内氧化会趋于沿晶界发生, 严重削弱晶界结合力, 导致在后续过程中形成严重的表面缺陷^[6-8]。例如在酸洗过程中, 部分近表层晶界氧化物会随氧化铁皮一同被溶解去除, 导致酸洗后的表面出现大量因晶界丧失而形成的晶粒“孤岛”, 进而极大地降低先进高强钢的表面质量。目前, 热轧卷沿晶内氧化被普遍认为是制约先进高强钢表面质量提升的关键问题^[8-11]。

针对热轧卷沿晶内氧化问题, 目前主要有以下几种改善措施: (1) 优化热轧卷工艺参数, 以抑制

热轧卷沿晶内氧化^[12-13]; (2) 优化酸洗液配方, 以弱化酸洗过程中的沿晶腐蚀^[14]; (3) 调整合金成分, 以提升钢材的抗氧化性能^[15]。然而, 受限于设备能力、工艺窗口和化学反应本质特点, 改善热轧

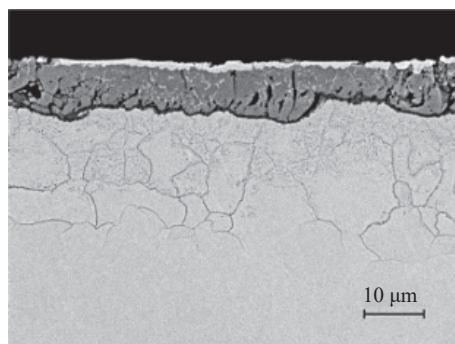


图 1 630 °C 下 0.17C-1.3Si-2.0Mn 钢卷取后的内氧化区^[5]

卷工艺及酸洗液配方往往只能在一定程度上减轻表面缺陷,难以从根本上解决问题,最终仍需依赖钢材自身抗氧化性能的提高^[16-17]。值得注意的是,Si是导致先进高强钢氧化铁皮下发生沿晶内氧化的首要元素^[12,18],因此传统的合金成分调整思路主要是降低Si含量。例如,采用Al元素替代Si,但可能对钢材的力学性能产生不利影响,相关调控策略仍有待深入研究。

基于此,针对先进高强钢热轧卷沿晶内氧化这一难题,本文详细阐明了热轧卷内氧化的速率控制步骤,深入分析卷取温度、冷却速率和合金元素对内氧化的影响规律和作用机制,并基于现有研究成果,对如何有效解决这一缺陷、显著提高先进高强钢表面质量提出了具有前瞻性的展望。

热轧卷沿晶内氧化的速率控制步骤

尽管目前先进高强钢热轧卷沿晶内氧化问题十分突出,但迄今相关的公开报道非常有限^[19-23]。热轧氧化铁皮由多层结构组成,一般由内向外依次为FeO、Fe₃O₄和Fe₂O₃^[19-20]。Yuan等^[24]研究了含Si低Mn钢在模拟热轧温度和气氛中的氧化行为,发现在内层FeO与基体之间生成了Fe₂SiO₄,且氧化铁皮下出现严重的晶界氧化和晶内氧化。但该研究侧重于Si对氧化铁皮结构的影响,并未对内氧化历程进行深入探究。值得注意的是,在该氧化气氛条件下,表面氧化铁皮的存在极大地阻碍了对基体内部氧化动力学过程的深入探究。

氧化铁皮下合金元素内氧化所需的氧来源于内层氧化膜的分解,取决于氧化膜-基体界面的平衡氧分压。也就是说,无论氧化铁皮中各层结构的厚度如何,只要内层FeO膜致密连续,其对FeO-基体界面下方氧化行为的影响机制都是相同的。Auinger等^[8]研究了二元、三元合金Fe-{Mn, Si, Al, Cr}在模拟皮下氧活度条件下的内氧化行为,认为元素扩散是先进高强钢热轧卷内氧化的速率控制步骤,但据此计算获得的内氧化深度和实验结果偏差较大。

先进高强钢热轧及轧后卷取过程中的内氧化属于短时氧化过程,动力学因素起到至关重要的作用^[7, 25-26]。目前,大多数研究认为合金元素内氧化过程的速率控制步骤为氧的扩散,即便是在低氧压下

的超短时氧化过程中,该观点仍被普遍认同^[27-29]。Pourmajidian等^[28]研究了0.1C-6Mn-2Si钢在690℃、氧分压为 $1.22 \times 10^{-22} \sim 2.29 \times 10^{-23}$ Pa气氛中氧化60~600 s的行为,发现氧分压的增加显著促进了晶界氧化,且内氧化物组成为MnSiO₃和SiO₂。尽管该研究发现选择性外氧化厚度随氧分压增高出现拐点(与Wagner理论计算相违背),但其分析中仍采用抛物线生长规律来解释合金的氧化过程。此外,Zhang等^[30]研究了先进高强钢模型合金Fe-2Mn-xSi(x=0.25~2.00)在700℃、氧分压为 2.9×10^{-17} Pa的Ar+H₂+H₂O气氛中的短时氧化行为。如图2所示,在氧化1~2 h内,合金的氧化动力学均遵循直线规律,由此推断氧的溶入过程(即氧向合金表层晶格溶入过程)很可能为合金内氧化过程的速率控制步骤。

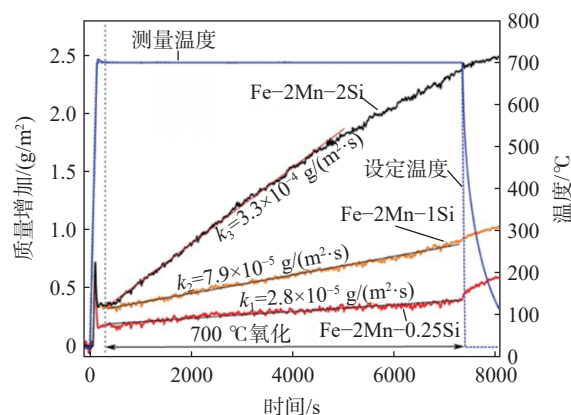


图2 Fe-2Mn-xSi在700℃、氧分压为 2.9×10^{-17} Pa的气氛中氧化后的氧化动力学曲线^[30](注: $k_1 \sim k_3$ 分别代表不同成分合金的氧化速率,即单位时间单位面积的质量增量)

影响因素

温度的影响

在热轧卷内氧化行为的影响因素中,温度的影响最为显著。李瑞等^[31]研究了卷取温度对65Mn钢板表面质量的影响,在卷取温度600℃下钢基体内无明显内氧化;温度升高到650℃,氧化皮增厚6 μm,基体发生了晶间氧化,深度为5.5 μm;温度升高至700℃以上,氧化皮粉化脱落,基体沿晶氧化进一步加剧,深度约14 μm;在800℃时,基体无沿晶氧化,多为晶内氧化,有明显的氧化质点,说明在600~700℃范围内,升高温度会显著促进沿晶氧

化。Kobayashi 等^[5]研究表明, 0.17C-1.3Si-2.0Mn 钢在较高卷取温度下板厚精度控制较好, 但热轧卷内氧化问题严重; 而在较低卷取温度下, 尽管内氧化问题轻微, 但板厚精度控制不佳。因此, 该研究认为适宜卷取温度为 500~550 °C。基于此, 本文作者研究了 Fe-Mn-Si-Al 合金在 500~700 °C 下的氧化

行为, Fe-Mn-Si-Al 合金在 500~700 °C、模拟皮下氧活度条件下氧化 2 h 后的截面形貌如图 3 所示。在 700 °C 条件下, 合金基体出现严重晶界氧化, 深度为 9.9 μm; 随着温度降至 650 °C, 合金晶界氧化的深度和数量均显著减少, 深度为 8.0 μm; 当温度进一步降至 550 °C 及以下时, 合金内氧化完全消失。

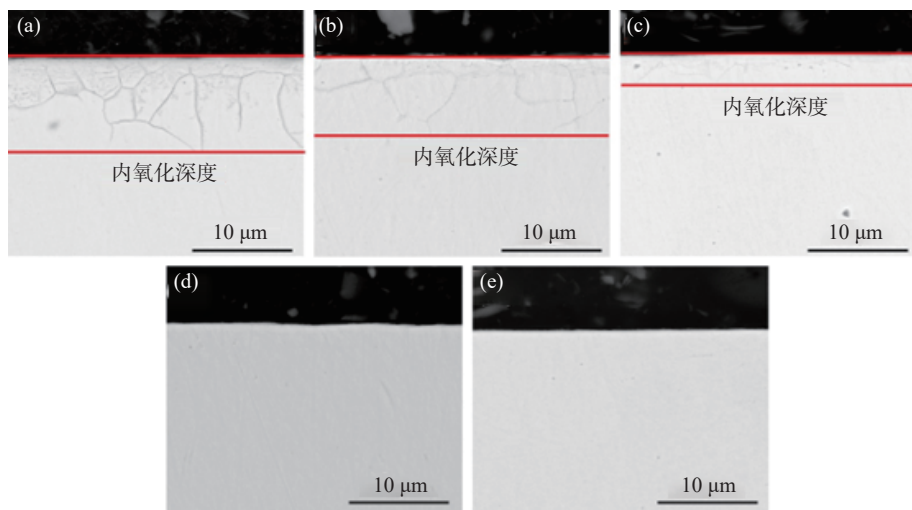


图 3 Fe-Mn-Si-Al 合金在不同温度下置于 Ar+5% H₂+xH₂O (露点: 10 °C) 气氛中氧化 2 h 后的截面形貌: (a) 700 °C; (b) 650 °C; (c) 600 °C; (d) 550 °C; (e) 500 °C

综上所述, 降低卷取温度可显著抑制先进高强钢热轧卷的内氧化, 但过低的卷取温度会影响后续冷加工的性能。因此, 不同钢种需要根据其合金成分及性能要求, 合理调控卷取温度。

冷却速率的影响

当卷取温度一定时, 热轧卷芯部与边缘区域的冷却速率不同, 导致基体内氧化深度存在差异。Kobayashi 等^[5]研究了 0.17C-1.3Si-2.0Mn 钢不同位置在 400~800 °C 下卷取时的内氧化行为, 发现在相同温度条件下, 钢卷中心区域的内氧化深度始终大于其头部和尾部区域。特别是当卷取温度降至 550 °C 时, 钢卷头部和尾部区域内氧化消失, 而中心区域仍存在严重内氧化, 深度约为 10 μm。Zhu 等^[23]研究了双相钢 0.2C-2.1Mn-1Si 的热轧卷内氧化行为, 并对卷板不同位置的内氧化深度进行了测量, 如图 4 所示。结果表明, 钢卷头部和尾部区域内氧化轻微, 深度为 3 μm; 而中部区域内氧化严重, 最大深度为 8.75 μm。这是由于钢卷边缘处降温迅速, 而芯部降

温缓慢, 由 650 °C 降至 550 °C 耗时可达数十小时。

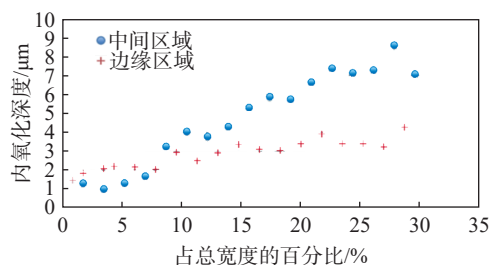


图 4 退火线圈不同位置的氧化深度^[23] (注: 原点为带钢边缘)

综上所述, 热轧卷不同位置的冷却速率会显著影响其内氧化行为。先进高强钢的卷取温度一般在 500~700 °C, 钢卷芯部相较于头部和尾部的冷却速率更低, 导致芯部内氧化更为严重。因此, 适当降低卷取温度会减缓氧化动力学速率进而抑制内氧化。

合金元素的影响

除了工艺参数外, Si、Mn、Al、Cr 等亲氧性元素对先进高强钢热轧卷内氧化行为也具有显著影响^[27,30]。Auinger 等^[8]采用氧分压为 2×10^{-17} Pa 的

Ar+H₂+H₂O 气氛模拟 FeO 皮下氧活度条件,研究了二元、三元合金 Fe-{Al, Cr, Mn, Si}在该气氛下氧化 60 min 后的内氧化行为。Fe-{Al, Cr, Mn, Si}三元合金在 700 °C 下氧化 60 min 后的截面形貌如图 5 所示, Al、Cr、Si 元素只有在与 Mn 共存时,合金才会发生严重的晶界氧化,其中 Fe-Mn-Si 合金的晶界氧化最为严重。Zhang 等^[30] 同样通过模拟皮下氧活度条件以探究 Si 对内氧化行为的影响。Fe-2Mn-xSi (x=0~2) 在 700 °C、氧分压为 2.9×10^{-17} Pa 的气氛

中氧化后的截面形貌如图 6 所示,对于 Fe-2Mn 合金,基体内几乎无沿晶氧化,只有少量的晶内氧化物颗粒,内氧化深度约为 6.2 μm;随着 Si 质量分数增加到 0.25%,合金内开始出现沿晶氧化,内氧化深度约为 7.0 μm;随着 Si 含量进一步增加,合金的沿晶氧化数量和氧化深度均显著增加。说明 Si 是造成先进高强钢热轧卷内氧化问题的首要元素。此外,该研究还发现 Si 的亲氧性更强,其会在氧化界面前沿优先氧化形核,并诱导 Mn 氧化物附着生长。

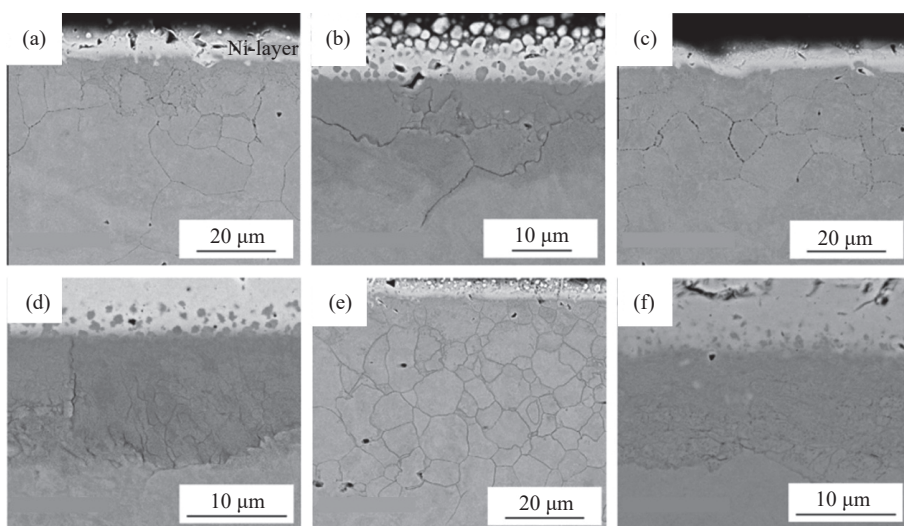


图 5 不同成分合金在 700 °C、Ar+2.5% H₂+0.94% H₂O 的气氛中氧化 60 min 后的截面形貌^[8]: (a) Fe-2Mn-1Al; (b) Fe-3Al-0.8Cr; (c) Fe-2Mn-0.8Cr; (d) Fe-3Al-1Si; (e) Fe-2Mn-1Si; (f) Fe-1Si-0.8Cr

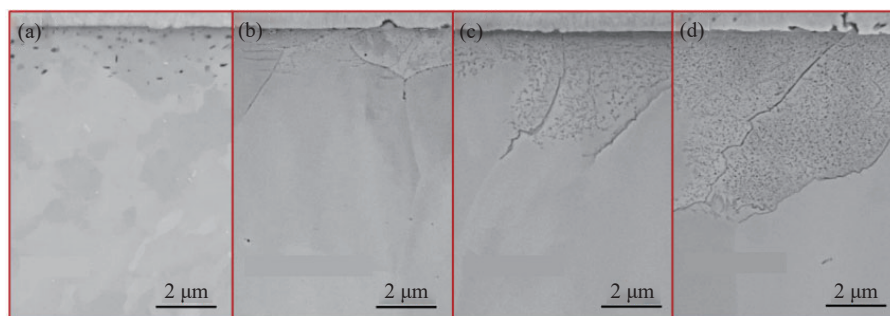


图 6 不同 Si 质量分数合金在 700 °C、氧分压为 2.9×10^{-17} Pa 的气氛中氧化后的截面形貌^[30]: (a) Fe-2Mn; (b) Fe-2Mn-0.25Si; (c) Fe-2Mn-1Si; (d) Fe-2Mn-2Si

在摸清先进高强钢热轧卷内氧化的速率控制步骤和首要影响因素的基础上,诸多学者也从合金元素调控角度出发,研究抑制热轧卷内氧化的方法。Liu 等^[15] 研究了 Fe-2.1Mn-0.9Si-xAl 合金在 700 °C、Ar+5% H₂+xH₂O (露点: 10 °C) 气氛中的内氧化行为。如图 7 所示,随着 Al 含量的增加,晶界氧化深

度及晶内氧化深度均降低: Al 质量分数为 0.9% 时,合金晶界氧化深度降低约 50%,晶内氧化深度降低 65%。当 Al 质量分数从 0.3% 增至 0.9% 时,其对晶界氧化抑制作用减缓,主要表现为减少了晶界氧化物的数量。这说明 Al 的添加显著抑制了沿晶内氧化。进一步研究发现,Al 的作用机制主要包括以下

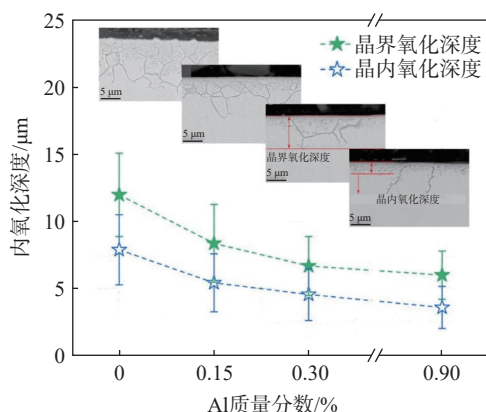


图7 Fe-2.1Mn-0.9Si-xAl 合金在 700 °C、Ar+5% H₂+xH₂O 气氛中氧化 2 h 后的截面形貌和内氧化深度^[15]

两点：（1）微量的 Al 富集在表面氧化物中，降低了膜-基界面处的氧活度，抑制了氧的溶入；（2）Al 在晶内优先氧化并诱导 Si、Mn 氧化物的附着生长，进而在晶内消耗了 Si、Mn 和 O。此外，Mackawa 等^[11]研究了 Cr 含量对 Fe-Mn-Si 合金热轧卷内氧化行为的影响。图 8 为不同 Cr 含量合金氧化后的内氧化深度，Fe-Mn-Si 合金的内氧化深度约 14.9 μm，而随着 Cr 含量的增加，合金的内氧化深度降低。分析发现，这是由于 Cr 的添加促使膜-基界面处形成了一层 Fe₂CrO₄ 的富 Cr 层，抑制氧向基体溶入，进

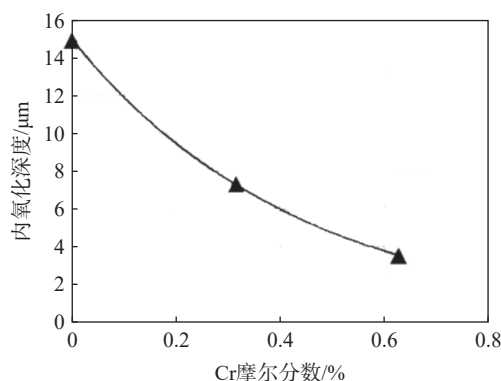


图8 Cr 含量对内氧化层的影响^[11]

而抑制内氧化。

除此之外，诸多学者在研究微合金化元素 Sn、Sb、Bi 对先进高强钢退火外氧化的影响时，发现这些元素对热轧卷内氧化也具有抑制作用^[32-34]。Mousavi 等^[32]研究了 Sn 对 C-2Mn-1.7Si 钢内氧化和外氧化的影响，结果表明钢的表面及膜-基界面处形成一层富 Sn 层，会显著降低氧化速率，进而降低内氧化深度。Zhang 等^[33]研究了 Sb 元素对 TRIP 钢高温氧化行为的影响，如图 9 所示，Sb 的添加显著抑制了 TRIP 钢的内氧化深度及沿晶氧化的数量，这主要归因于 Sb 的表面富集阻碍了 O 元素向基体内扩散。

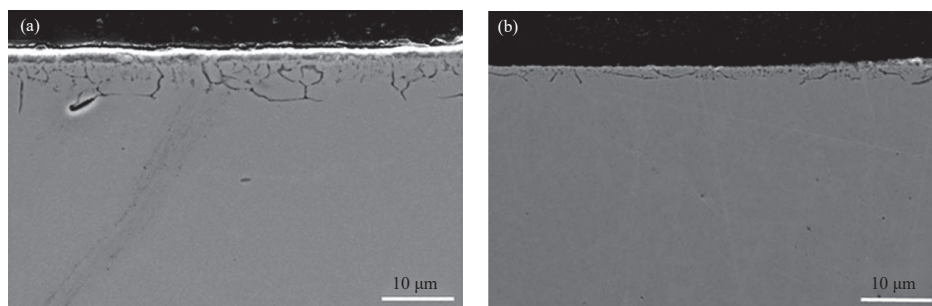


图9 原始钢 (a) 和加 Sb 钢 (b) 在 843 °C 下氧化后的截面形貌^[33]

综上所述，现有研究主要集中于卷取温度、冷却速率和部分常见的合金元素（Mn、Si、Al、Cr）对先进高强钢热轧卷沿晶内氧化的影响，而关于环境气氛（氧分压）和其他合金元素对内氧化的影响规律和作用机制仍不明晰，有待进一步探究。只有系统阐明典型工艺参数和合金元素的协同作用机制，才能为解决热轧卷沿晶内氧化问题、提高先进高强钢表面质量提供坚实的参考依据。

结束语

高表面质量、高等级先进高强钢的研发与生产是各大钢企的重点攻关方向，而热轧卷沿晶内氧化是制约先进高强钢表面质量的关键瓶颈问题之一。针对热轧卷沿晶内氧化这一难题，本文综述并深入分析了先进高强钢热轧卷沿晶内氧化的速率控制步骤，系统剖析了热轧卷沿晶内氧化的影响因素，从

卷取温度、冷却速率和合金元素 3 个方面进行了归类总结和概述。最后,围绕解决热轧卷沿晶内氧化、提高表面质量的目标,从典型工艺参数和合金元素调控入手,并结合已开展的相关工作,提出如下建议和展望。

(1) 典型工艺参数调控。①优化卷取温度。实际生产过程中,先进高强钢卷取温度一般在 500~550℃。降低卷取温度会显著抑制热轧卷内氧化,但卷取温度过低则会导致带钢产生内应力,影响板形和质量。因此,针对特定的先进高强钢,应根据其化学成分、力学性能要求等特征选取适合的卷曲温度,以期在不影响后续加工性能的前提下,解决热轧卷沿晶内氧化难题。②调控冷却速率。热轧卷板不同位置的冷却速率不同,提高冷却速率会显著抑制沿晶氧化,但也会对钢的组织结构和性能产生直接影响,进而影响后续产品质量。因此,合适的冷却速率可以在抑制沿晶氧化的同时,满足预期的强度、韧性和塑性等性能要求。③优化保温时间和环境气氛。卷取时间越长,先进高强钢内氧化越严重。当基体内形成沿晶氧化后,晶界会成为氧的快速扩散通道,气氛中的氧会快速进入基体内与合金元素发生反应,加重内氧化。因此,只有协调卷取温度、保温时间和保护气氛,才能有效控制内氧化,进而提高表面质量。

(2) 合金元素调控。①以 Al 部分替代 Si。Si 是先进高强钢中不可或缺元素之一,但也是导致热轧卷沿晶内氧化的首要元素。由于 Al 与 Si 在钢中均具有抑制渗碳体析出的作用,以 Al 部分替代 Si,可以在保证先进高强钢力学性能的同时,提高其抗氧化性。②适量添加 Cr 或 Ni。当溶入基体的氧含量远高于合金元素外扩散量时,先进高强钢会发生内氧化。添加 Cr 和 Ni 元素会在氧化膜-基体处形成一层连续且致密的富 Cr/Ni 层,通过抑制氧向基体溶入的过程来抑制沿晶氧化。同时,Cr 和 Ni 对钢的力学性能也有积极作用,可以兼顾先进高强钢的力学性能和抗氧化性能。③添加微量 Sn、Sb、Bi 等元素。由于微合金化元素具有较强的疏氧性和较高的外扩散系数,这些元素会快速在钢材表面形成一层保护性屏障,通过减缓氧向界面晶格的溶入来抑制内氧化。

针对热轧卷沿晶内氧化这一瓶颈难题,如能合理调控热轧卷工艺参数和合金元素,有效控制沿晶内氧化,提高表面质量,则必将在高等级先进高强钢的研发与生产中取得先机,并推动“双碳”背景下的汽车轻量化进程。

参考文献

- [1] 于洋,唐帅,郭晓波,等.热轧卷板氧化铁皮形成机理及控制策略的研究.钢铁,2006(11): 50
- [2] 王贞,刘静,张施琦,等.应变速率对预充氢 DP780 钢氢脆敏感性的影响.中国腐蚀与防护学报,2022,42(1): 106
- [3] Joost W J. Reducing vehicle weight and improving U.S. energy efficiency using integrated computational materials engineering. JOM, 2012, 64(9): 1032
- [4] Liu Z H, Nie J P, Song Y F, et al. New insights into the effect of Al on the selective oxidation of advanced high-strength steels prior to hot-dip galvanizing. Acta Mater, 2024, 266: Art No. 119651
- [5] Kobayashi M, Doi K, Kimura T, et al. Improvement of formability in cold rolling of hot band for over 980 MPa grade high tensile strength steel sheet. Tetsu to Hagane, 2014, 100(5): 616
- [6] Bleck W, Brühl F, Ma Y, et al. Materials and processes for the third-generation advanced high-strength steels. Berg-Huettenm Monatshefte, 2019, 164: 466
- [7] Auinger M, Praig V G, Linder B, et al. Grain boundary oxidation in iron-based alloys, investigated by ^{18}O enriched water vapour: The effect of mixed oxides in binary and ternary Fe-{Al, Cr, Mn, Si} systems. Corros Sci, 2015, 96: 133
- [8] Auinger M, Müller-Lorenz E M, Rohwerder M. Modelling and experiment of selective oxidation and nitridation of binary model alloys at 700 °C: The systems Fe, 1 wt.%{Al, Cr, Mn, Si}. Corros Sci, 2015, 90: 503
- [9] Suarez L, Schneider J, Houbaert Y, et al. Effect of Si on high-temperature oxidation of steel during hot rolling. Defect Diffus Forum, 2008, 273: 655
- [10] Zhao J, Jiang Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. Prog Mater Sci, 2018, 94: 174
- [11] Maekawa S, Otomo R, Kawakami A. Internal oxidation of Fe-Si-Mn-Cr alloy under oxide scales formed during hot rolling process // 13th International Conference on Zinc & Zinc Alloy Coated Steel sheet. Seoul, 2023
- [12] Jin X Y, Hu G K, Wang L, et al. Characterization of surface layers of oxidation-reduction treated Si and Mn added advanced high strength steel. Surf Coat Tech, 2020, 382: Art No. 125172
- [13] Chakraborty A, Ghosh R, Sudan M, et al. Improvement in hot dip galvanized coating microstructure and properties by pre-metallic deposition on steel surface: A comprehensive review. Surf Coat Tech, 2022, 449: Art No. 128972

- [14] Chen K F, Aslam I, Li B, et al. Lift-off of surface oxides during galvanizing of a dual-phase steel in a galvannealing bath. *Metall Mater Trans A*, 2019, 50: 3748
- [15] Liu Z H, Yang X G, Mao W C, et al. Influence of Al addition on the grain boundary oxidation of ultra high strength steels during hot coiling. *Corros Sci*, 2023, 211: Art No. 110863
- [16] Jin Y S. Development of advanced high strength steels for automotive applications. *Metall Ital*, 2011, 103(6): 43
- [17] Zhu K Y, Mager C, Huang M X, Effect of substitution of Si by Al on the microstructure and mechanical properties of bainitic transformation-induced plasticity steels. *J Mater Sci Technol*, 2017, 33(12): 1475
- [18] Gong L, Ruscassier N, Chrétien P, et al. Nucleation and growth of oxide particles on a binary Fe-Mn (1 wt. %) alloy during annealing. *Corros Sci*, 2020, 177: Art No. 108952
- [19] Jang J H, Lee D E, Kim M Y, et al. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface. *Int J Heat Mass Transfer*, 2010, 53(19/20): 4326
- [20] Kusabiraki K, Watanabe R, Ikehata T, et al. High-temperature oxidation behavior and scale morphology of Si-containing steels. *ISIJ Int*, 2007, 47(9): 1329
- [21] Chen R Y, Yuen W Y D. A study of the scale structure of hot-rolled steel strip by simulated coiling and cooling. *Oxid Met*, 2000, 53: 539
- [22] Chen R, Yuen W Y D. Oxide-scale structures formed on commercial hot-rolled steel strip and their formation mechanisms. *Oxid Met*, 2001, 56: 89
- [23] Zhu Y, Propprentner D, Basabe V, et al. Characterization of scale and sub-scale development in ultrahigh-strength steels during processing // *International Symposium on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels*. Keystone, 2017
- [24] Yuan Q, Xu G, Zhou M X, et al. New insights into the effects of silicon content on the oxidation process in silicon-containing steels, *Int J Miner Metall Mater*, 2016, 23(9): 1048
- [25] Zhang X, Corrêa da Silva C, Liu C, et al. Selective oxidation of ternary Fe-Mn-Si alloys during annealing process. *Corro Sci*, 2020, 174: Art No. 108859
- [26] Borodin S, Vogel D, Swaminathan S, et al. Direct *in-situ* investigation of selective surface oxidation during recrystallization annealing of a binary model alloy. *Oxid Met*, 2016, 85(1/2): 51
- [27] Young D J. *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals*. Amsterdam: Elsevier, 2008
- [28] Pourmajidian M, Langelier B, Mcdermid J R. Effect of process atmosphere dew point and tin addition on oxide morphology and growth for a medium-Mn third generation advanced steel during intercritical annealing. *Metall Mater Trans A*, 2018, 49(11): 5561
- [29] Cho L, Lee S J, Kim M S, et al. Influence of gas atmosphere dew point on the selective oxidation and the reactive wetting during hot dip galvanizing of CMnSi TRIP steel. *Metall Mater Trans A*, 2013, 44(1): 362
- [30] Zhang X, da Silva C C, Zhang S, et al. Investigation of selective oxidation during cooling of hot-rolled iron-manganese-silicon alloys. *Corro Sci*, 2021: Art No. 109466
- [31] 李瑞, 张亮亮, 魏建波, 等. 卷取温度和随后的冷却方式对 65Mn 钢板表面质量的影响. *上海金属*, 2023, 45(5): 45
- [32] Mousavi G S, Langelier B, McDermid J R. Effect of Sn addition, process atmosphere pO_2 , and annealing time on the selective oxidation of a C-2Mn-1.7Si (wt Pct) advanced high-strength steel during continuous galvanizing. *Metall Mater Trans A*, 2019, 50: 2898
- [33] Zhang Z T, Sohn I R, Pettit F S, et al. Investigation of the effect of alloying elements and water vapor contents on the oxidation and decarburization of transformation-induced plasticity steels. *Metall Mater Trans B*, 2009, 40(4): 550
- [34] Pourbahari B, McDermid J R. On the interaction between Mn, Sb and O during the annealing and selective oxidation of Fe-Mn-Sb alloys. *Scripta Mater*, 2023, 223: Art No. 115096

基金项目: 河北省创新能力提升计划资助项目 (20231006D)。

作者简介: 刘自贺 (1997—), 男, 河北石家庄人, 河北材料技术研究院, 中级研究员, 2024 年毕业于中国科学技术大学腐蚀科学与防护专业, 主要从事汽车板材料的研发工作。以第一/通信作者在 *Acta Materialia* 和 *Corrosion Science* 等期刊上发表论文 4 篇, 受理发明专利 2 项, 其中 1 项已授权。通信地址: 石家庄市藁城区石家庄经济开发区扬子路 15 号; E-mail: liuzihe@hbisco.com。

通信作者: 刘宏强 (1974—), 男, 河北邯郸人, 河北材料技术研究院, 正高级工程师, 主要从事汽车板生产工艺的研究。E-mail: liuhongqiang@hbisco.com。