

机架间冷却水对UF340表面组织均匀性的影响研究

李奕¹ 关建东¹ 尉冬² 金磊² 王明哲¹ 付光¹

(1. 首钢股份有限公司, 唐山 064404; 2. 首钢技术研究院, 北京 100043)

摘要: 利用热轧试验及全流程跟踪研究了机架间冷却水开闭对UF340表面组织均匀性的影响。结果表明: 机架间冷却水对热轧卷沿板宽方向的组织均匀性有一定影响, 且部分会遗传至成品组织; 机架间冷却水全开时, 成品距边部1/4处表面晶粒存在少量未再结晶组织, 而后部机架间冷却水冷却关闭后, 由于热轧时再结晶较充分, 成品组织沿板宽方向一致性较好, 成品表面为细小的完全再结晶组织, 有利于材料表面鲜映性的提升; UF340的细小均匀的组织特性使其涂漆变形后的波纹度仅为0.169 μm , 表面鲜映性(DOI)值达到92, 满足主机厂免中涂表面质量要求。

关键词: UF钢 机架间冷却水 微观组织 表面质量

中图分类号: TG142.1

文献标志码: B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240104

Effects of Cooling Water between Rolling Mills on Surface Microstructure Uniformity of UF340

Li Yi¹, Guan Jiandong¹, Wei Dong², Jin Lei², Wang Mingzhe¹, Fu Guang¹

(1. Beijing Shougang Co., Ltd., Tangshan 064404; 2. Research Institute of Technology of Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043)

Abstract: The effect of cooling water between rolling mills on the surface microstructure uniformity of UF340 was investigated using hot rolling experiments and full-process tracking. The results show that the cooling water between rolling mills has certain effect on the organization uniformity of the hot rolled coil along the transverse direction, and will be partially inherited to the final UF340 strip organization. When the cooling water between rolling mills is fully open, a small amount of non-recrystallized grain is retained on the surface of the final UF340 strip located at about 1/4 from the edge. When the latter part of water between rolling mills is closed, due to the full recrystallization during hot rolling, the final product has a better consistency of the organization along the transverse direction, presenting a fine and fully recrystallized tissue on the surface, which is beneficial to improving surface Distinctness of Image (DOI) of the material. The extraordinary uniformity of the microstructure makes the waviness of the UF340 after painting and deforming is as low as 0.169 μm , and DOI value reaches 92, which fully meets the requirements of the surface quality for the intercoat-free coating process.

Key words: UF340, Cooling water, Microstructure, Surface quality

1 前言

乘用车外观造型设计越来越注重美观及流线型化, 外覆盖件(发动机罩、翼子板、行李箱盖)的冲压难度越来越大, 加之环保、碳排放等政策要

求, 外板选材趋向更高强度级别, 主机厂对车身外覆盖件用钢的强度、局部成形性、性能稳定性、免中涂特性及涂装鲜映性等要求越来越高。新型免中涂涂装工艺优化了涂料体系, 降低了能源消耗、碳排放和污染物排放^[1], 有利于汽车产业的绿色发

作者简介: 李奕(1992—), 女, 博士学位, 研究方向为材料科学与工程。

基金项目: 中信特钢发展奖励基金资助项目(M1922-2023, 2023FWNB-30120)。

参考文献引用格式:

李奕, 关建东, 尉冬, 等. 机架间冷却水对UF340表面组织均匀性的影响研究[J]. 汽车工艺与材料, 2024(6): 31-35.

LI Y, GUAN J D, WEI D, et al. Effects of Cooling Water between Rolling Mills on Surface Microstructure Uniformity of UF340[J]. Automobile Technology & Material, 2024(6): 31-35.

展。但由于免中涂涂装工艺漆膜厚度减薄20%以上,满足汽车鲜映性(Distinctness Of Image, DOI)要求的难度大。DOI是指漆膜表面反射影像的清晰度,是整车感观效果的定量评价指标^[2],高的DOI值是汽车厂商外观质量的永恒追求。DOI值与汽车板材冲压后的表面波纹度直接相关,德国钢铁行业标准SEF 1941-2012中定义了波纹度算数平均值 W_{sa} ,是目前用于评价板材表面质量的常用指标之一。

除外观要求外,主机厂对外板的质量要求也越来越高。在汽车外板冲压生产过程中,经常出现“条纹”类缺陷,该类缺陷在打磨零件后通常沿板料轧向以条纹形式出现,条纹间距大小不一。出现条纹类缺陷的材料不满足免中涂工艺要求,为解决该问题,宝武^[3]、吉林大学^[4]、鞍钢^[5]、本钢^[6]等单位对条纹缺陷的成因进行了深入研究,认为无间隙原子(Interstitial Free, IF)钢表层存在的不充分或未完全再结晶的晶粒在冲压时会使材料表面与内部变形不均匀,从而导致冲压件表面出现不连续的条纹缺陷。金鑫焱等^[7]详细研究了汽车板表面晶粒特征与表面冲压条纹等产品缺陷的影响机理,同时发现热轧工艺对成品的组织性能有较大影响。因此,从材料组织性能控制方面消除未再结晶晶粒,提升材料组织均匀性,可从源头上消除此类“条纹”缺陷,提高成材率,降低损耗,有利于提升企业的经济效益。

在热轧表面组织均匀性影响因素研究方面:王畅等^[8]研究了轧制润滑对混晶组织对连退板的组织遗传性的影响;田秀钢等^[9]通过调整加热温度、中间坯厚度、终轧温度及轧制润滑等手段有效改善了热轧IF钢表面的混晶状况。然而,现有文献对热轧机架间冷却水对现有细晶高强汽车外板用钢(Uni-FISH, UF钢)的组织及表面质量的影响机理鲜有研究。通过控制机架间冷却水流量及水压等,可控制热轧带钢冷却过程^[10],以实现产品组织控制。同时,机架间冷却水还会对带钢长度和宽度方向上的温度均匀性产生较大影响,从而影响轧制的稳定性。通过优化机架间冷却水的控制方案,可调整UF340的热卷组织均匀性,最终提升成品的表面质量,结合其他组织调控及工艺控制

等手段,达到免中涂表面质量要求。

本文对比研究热轧机架间冷却水的开闭对UF340热轧及成品带钢表面组织的影响规律,随后选取组织均匀性较好的成品进行涂漆挂片试验,并对其表面波纹度和鲜映性进行检测。

2 试验方法

本文研究对象为UF钢系列中340 MPa级产品UF340,其化学成分如表1所示。为探究机架间冷却水对UF340表面质量的影响,设计了机架间冷却水全开与仅开F1、F2机架间冷却水的对比试验。热轧样品与成品样品均取自实际生产下线产品。

元素	C	P	Nb	Mn	Alt	S	Si
含量	0.003	0.015	0.045	0.120	0.048	0.007	0.004

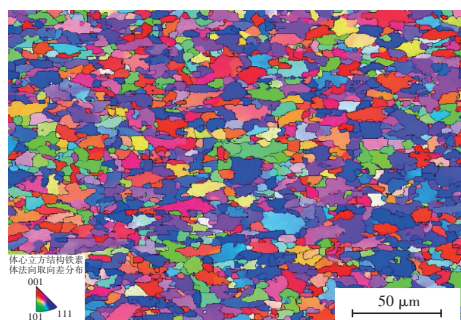
微观组织表征试样取自钢卷带尾50 m处、宽度方向中间位置及距传动侧板宽1/4位置,样品长度为25 mm、宽度为20 mm,观察面为带钢轧制过程的上表面。电子背散射衍射(Electron Back Scatter Diffraction, EBSD)表征采用首钢股份Apreo 2S场发射扫描电子显微镜,扫描步长均设置为0.5 μm ,数据处理采用Aztec Crystal软件,认为取向差角大于等于 15° 为大角晶界并据此进行晶粒统计。波纹度检测依据标准SEP 1941-2012《冷轧金属扁平轧材浪形特征值 W_{sa} (1-5)的测量标准》进行。挂片试验在某主机厂进行,样品为依据该主机厂相关标准获得的应变量为5%(马克杯)的波纹度测试零件。

3 结果与讨论

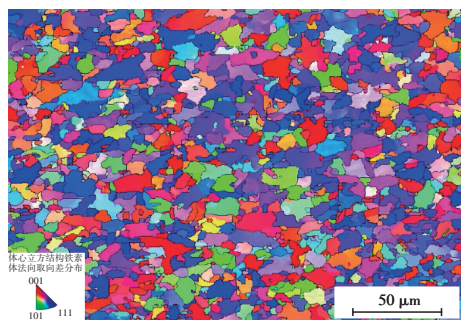
3.1 热卷样品组织分析

机架间冷却水全开及仅开启F1、F2机架间冷却水的热轧板宽中部样品的表面组织形貌如图1所示。由图1可知,UF340热轧表面组织形貌与普通Ti-IF钢不同,晶粒形状并非传统等轴晶粒状态,且晶粒尺寸更小,这主要是由于Nb抑制了奥氏体的再结晶和形核^[11]。对比2个样品发现,机架间冷却水全开时晶粒大小不均匀,样品表面存在

一定数量沿轧向延长的晶粒,平均晶粒尺寸为 $9.07\ \mu\text{m}$ 。而关闭后部机架间冷却水后,晶粒均匀性有所提升,平均晶粒尺寸为 $10.21\ \mu\text{m}$ 。后部机架间冷却水的开闭对热卷中部表面组织的形貌影响不大。



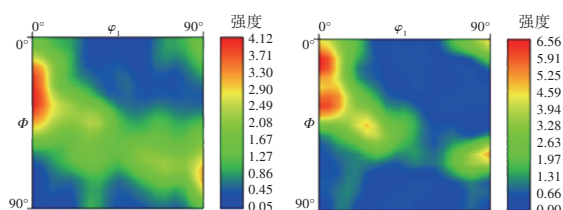
(a) 机架间冷却水全开



(b) 仅开F1、F2机架间冷却水

图1 热轧板宽中部样品表层反极图(Inverse Pole Figure, IPF)分布图

在2种工况下所得的样品均呈现出含Nb-IF钢的典型热轧组织,如图2所示,但整体结构较弱,晶粒取向不集中。取向峰值主要出现在 α -纤维织构取向线上。其中,后部机架间冷却水关闭后,样品织构略有增强,峰值强度由机架间冷却水全开的4.12升高至6.56,但对样品表面整体取向分布的状态影响不大。



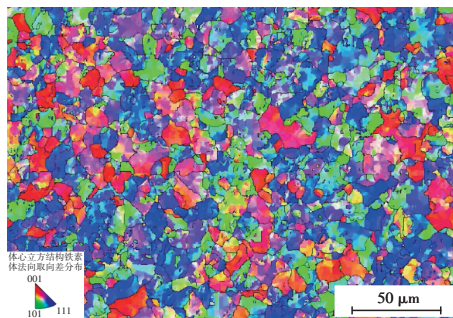
(a) 全开

(b) 仅开F1、F2

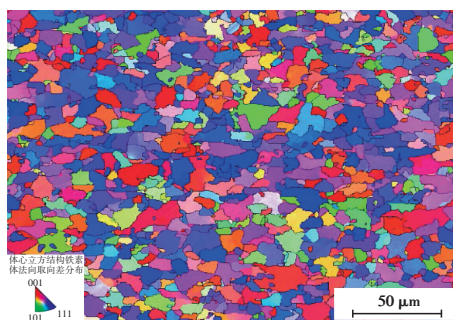
图2 不同机架间冷却水对热轧板宽中部样品表层 $\phi_2=45^\circ$ 取向函数分布的影响

图3为2种工况下热卷距边部1/4位置的表面组织对比。机架间冷却水全开的热卷表面1/4位

置与中心位置组织形貌明显不一致,1/4位置细碎晶粒增多,且晶粒内部出现明显的取向差异,<110>和<111>方向与板面法向平行的晶粒体积分数增大,该样品平均晶粒尺寸仅为 $6.81\ \mu\text{m}$ 。



(a) 机架间冷却水全开



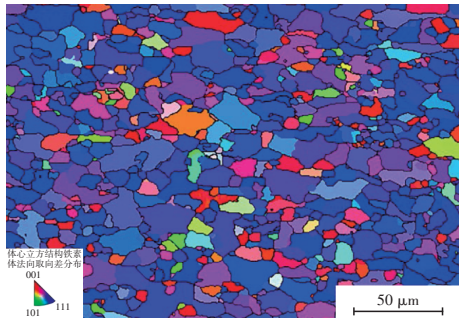
(b) 仅开F1、F2机架间冷却水

图3 热轧1/4位置样品表层IPF分布图

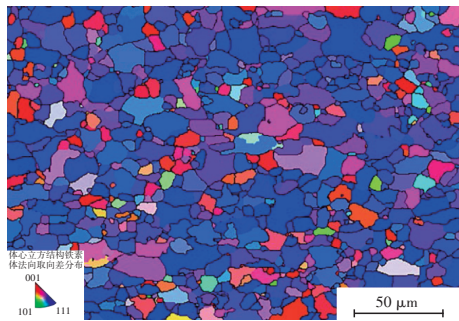
仅开F1、F2机架间冷却水的热卷距边部1/4位置的样品组织与图1b给出的热卷中心组织形貌基本一致,图3b所示样品平均晶粒尺寸为 $9.63\ \mu\text{m}$,与心部晶粒大小基本相同,说明其宽度方向组织均匀性更好。由此可见,打开全部机架间冷却水后,边部温降更加明显,导致带钢宽度方向温度分布不均匀,中心温度高,边部温度低,边部再结晶及晶粒生长驱动力不足,此晶粒生长程度存在差异,表现为沿板宽方向的不均匀组织。热卷的不均匀组织可能会遗传至冷硬及成品组织,影响UF340的成品性能均匀性。

3.2 成品样品组织分析

机架间冷却水对成品中部表面组织的影响如图4所示,热轧机架间冷却水对成品表层中心位置组织和织构的影响非常微弱,机架间冷却水开关前后平均晶粒尺寸分别为 $9.70\ \mu\text{m}$ 和 $9.03\ \mu\text{m}$,晶粒基本为等轴状。热轧表层组织中的拉长未再结晶晶粒基本消失,退火过程中UF340完成了充分再结晶。



(a) 机架间冷却水全开



(b) 仅开 F1、F2 机架间冷却水

图4 成品中部表层 IPF 分布图

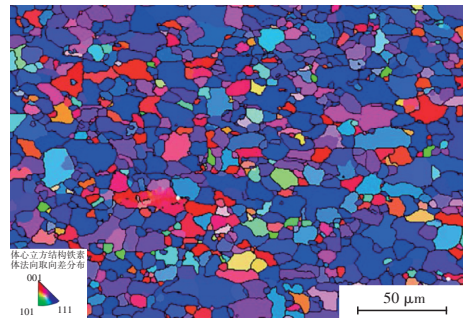
2种UF340成品中心位置表层组织比例对比结果如表2所示,与IPF分布图结果一致,后部机架间冷却水开闭对成品中部组织整体影响较小。样品中典型的冷轧织构($\{112\}\langle 110 \rangle$)^[12]比例低于1%,再结晶组织比例超过70%。机架间冷却水全开样品表层中心位置的 γ -纤维织构比例比仅开F1、F2机架间冷却水的样品低2.6%,说明在冷轧及退火后,机架间冷却水对成品的影响大幅减弱。

表2 成品样品表层组织比例对比 %

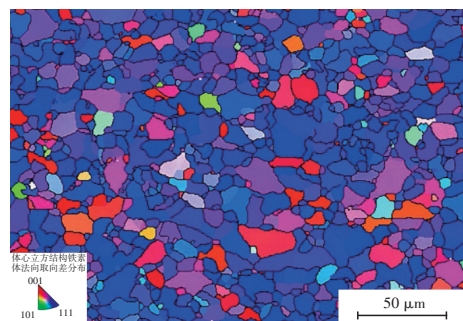
取向	机架间冷却水全开	仅开 F1、F2 机架间冷却水
$\{111\}\langle 110 \rangle$	21.30	24.10
$\{111\}\langle 112 \rangle$	16.40	15.70
$\{554\}\langle 225 \rangle$	6.26	7.71
$\{112\}\langle 110 \rangle$	0.15	0.17
$\langle 111 \rangle // \text{ND}$	70.60	73.20

由3.1节研究结果可知,机架间冷却水的开闭对热轧卷表层组织沿宽度方向的均匀性影响显著,而汽车钢板轧制全流程中,组织均匀性会由热轧遗传至成品^[13],因此,在2种工况下成品距边部1/4位置取样对其表面进行EBSD表征,结果如图5所示。机架间冷却水对成品1/4位置的组织略有影响,但影响程度明显小于热轧组织。机架间冷

却水全开时,成品1/4位置表层仍有少量未再结晶组织,细小晶粒数量较多。此类晶粒在板材冲压过程中与周围晶粒变形能力不同,形成局部变形不均匀现象,因此易产生图1所示冲压条纹,且此时材料内 γ -纤维织构比例为68.0%,与中心位置相比,再结晶程度略有不足。仅开F1、F2机架间冷却水的样品 γ -纤维织构比例为72.1%,平均晶粒尺寸为9.32 μm ,与中心位置组织基本一致。由此可见,关闭后部机架间冷却水后,UF340成品沿宽度方向组织均匀性非常好。成品组织均匀性的提升对于消除冲压条纹、降低板材表面波纹度、提升产品表面鲜映性十分有利。



(a) 机架间冷却水全开



(b) 仅开 F1、F2 机架间冷却水

图5 机架间冷却水全开和成品1/4位置表层 IPF 分布图

3.3 UF 钢成品表面组织对成形件表面鲜映性的影响

由3.2节研究结果可知,后部机架间冷却水关闭后,UF340表层晶粒实现完全再结晶,且沿板宽方向组织均匀性好。此类组织有利于规避传统IF钢冲压过程中常见的因表层未再结晶组织或不均匀组织导致的冲压表面缺陷。由EBSD分析结果可知,UF340表现出极高比例的深冲织构,具有良好的冲压成形性能。

张露星等^[14]研究了传统IF钢在成形后对波纹度增量的影响因素,研究指出,成形后钢板的波纹

度是原板波纹度及成形引起波纹度增量叠加的结果,而钢板成形后波纹度增量与其表层晶粒形态相关,晶粒尺寸越大,变形波纹度增量越大,且表层的未回复再结晶晶粒会引起表面波纹度增量异常增大,该结论得到了其他研究的支持^[15-16]。UF340晶粒尺寸比常规IF钢更小。胡燕慧等^[16]研究了IF钢(DC04)冲压后表面轮廓的变化对涂装表面质量的影响,研究认为,为得到良好涂装表面质量,需保证板材冲压后表面波纹度小于 $0.4\ \mu\text{m}$ 。由于仅开F1、F2机架间冷却水的条件下成品组织均匀性较好,因此,选用该工况样品进行成形表面质量检测。图6为UF340在某主机厂进行的挂片试验的结果,由图6可知,冲压变形5%后的UF340表面质量依然较高,零件表面光泽度高,对光线反射十分清晰。经主机厂检测,UF340涂漆后波纹度仅为 $0.169\ \mu\text{m}$,DOI值达到92,满足免中涂表面质量要求。

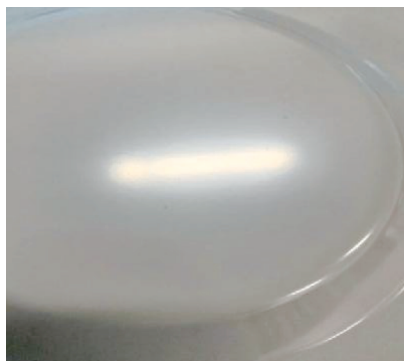


图6 UF340变形5%马克杯挂片鲜映性

4 结论

a. 机架间冷却水全开后,由于边部温度降低导致再结晶驱动力不足,UF340热轧卷距边部1/4位置与中部的表面组织存在明显差异,仅开F1、F2机架间冷却水的热卷在宽度方向组织均匀性较好;

b. 热轧表面的不均匀性会轻微遗传至成品,仅开F1、F2机架间冷却水的成品宽度方向组织高度一致,成品平均晶粒尺寸约为 $9\ \mu\text{m}$,{111}织构比例超过70%,能够有效避免冲压条纹的产生,提升冲压件表面鲜映性;

c. 仅开F1、F2机架间冷却水的条件下,UF340冲压变形量为5%时,涂漆后波纹度仅为 $0.169\ \mu\text{m}$,DOI值为92,满足主机厂免中涂表面质量要求。

参考文献:

- [1] 柯聪,董蓓.汽车涂装免中涂工艺对钢板表面质量要求的影响[J].武汉工程职业技术学院学报,2016,28(4):27-29.
- [2] 王明,完颜成功,强俊,等.油漆外观能力提升创新成果探讨[J].现代涂料与涂装,2023,26(8):60-62+72.
- [3] 何俊,周浩,康斌.热镀锌汽车板表面横条纹产生原因分析[J].武钢技术,2014,52(2):23-27.
- [4] 付争春.冲压件表面缺陷形成机理的试验与仿真研究[D].长春:吉林大学,2008.
- [5] 赵永亮.连退板冲压后纵向条纹缺陷成因分析[J].冶金动力,2022(2):48-50.
- [6] 卢秉仲,张杰,张冰,等.冷轧IF钢细密类纵向条纹形成机理及工艺控制[J].金属世界,2020(6):17-20.
- [7] 金鑫焱,毕文珍,王利.晶粒特征在汽车板表面缺陷分析中的应用[J].物理测试,2022,40(3):35-44.
- [8] 王畅,于洋,关建东,等.热轧润滑对IF钢表面状态的影响[J].热加工工艺,2023,52(9):95-97+102.
- [9] 田秀刚,冯晓勇,宋晓娟.超低碳IF热轧带钢表面混晶的分析与控制[J].河北冶金,2018(6):47-49+31.
- [10] 林琳.机架间冷却水控制系统在莱钢的应用[J].自动化应用,2013(6):33-35.
- [11] RAY R K, JONAS J J, HOOK R E. Cold Rolling and Annealing Textures in Low Carbon and Extra Low Carbon Steels[J]. International Materials Reviews, 1994, 39(4): 129-172.
- [12] SAMAJDAR I, VERLINDEN B, HOUTTE P V, et al. K-Fibre Recrystallization Texture in IF-Steel: An Investigation on The Recrystallization Mechanisms[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 238(2): 343-350.
- [13] JIN Z L, LI W, LI Y M. Effect of Hot-Rolled Microstructure on the Recrystallization Texture of Cold-Rolled Non-Oriented Electrical Steel[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1327(298): 203-208.
- [14] 张露星,张军,葛浩,等.IF钢成形后波纹度增量的研究[C]//第十四届中国钢铁年会论文集——10.先进钢铁材料与应用.重庆:中国金属学会,2023:106-111.
- [15] 吴庆美,卜凡征,郭强,等.IF钢的表面波纹度[J].金属功能材料,2023,30(5):118-122.
- [16] 胡燕慧,张浩,刘李斌,等.汽车外板冲压后表面轮廓变化对2C1B涂装质量的影响[C]//第十二届中国钢铁年会论文集——9.钢铁材料表征与评价.北京:冶金工业出版社,2019:77-81.