

汽车用 440 MPa 级加磷高强 IF 钢的研制

张 奇, 路 璐, 吴 蒙

(内蒙古包钢稀土钢板材有限责任公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:包钢自主研发的 440 MPa 级加磷高强 IF 钢在超低碳钢的基础上通过添加 Si、Mn、P 等合金元素提高强度, 其成分及生产工艺控制要求严格, 生产难度大。文章重点研究了化学元素对 440 MPa 级高强 IF 钢冲压性能的影响, 采用金相显微镜、扫描电镜分析了钢带的微观组织、夹杂物形态及第二相粒子析出行为, 解释了热轧工艺如终轧温度与卷取温度、冷轧连续退火工艺对微观组织及力学性能的作用机理。通过制定合理的工艺路线, 并进行严格控制, 试验钢带力学性能稳定且满足相关技术要求。

关键词:加磷高强 IF 钢; 微观组织; 汽车

中图分类号: TG335.5⁺³

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)01-0053-04

Development of 440 MPa Grade Phosphorous High – strength IF Steel for Automobile

Zhang Qi, Lu Lu, Wu Meng

(Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Steel Plate Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The strength of 440 MPa grade phosphorous high – strength IF steel independently developed by Baotou Steel is improved by adding such alloying elements as Si, Mn and P based on ultra low carbon steel. The control requirements of its composition and production process are strict as well as production is very difficult. In the paper, the influences of chemical elements on stamping performance of 440 MPa grade high – strength IF steel are mainly studied. The microstructure of steel strip, inclusion morphology and precipitation behavior of the second phase particles are analyzed with metalloscope and scanning electron microscope. The mechanisms of action of hot rolling processes such as finishing and coiling temperatures, continuous annealing process of cold rolling on microstructure and mechanical properties are explained. The mechanical performances of tested steel strip are stable and could meet the relative technical requirements through formulating reasonable process route and strict control.

Key words: phosphorous high – strength IF steel; microstructure; automobile

为了实现汽车轻量化及提高使用寿命和安全性, 结合汽车用钢加工及服役需求, IF 钢的强度也需要进一步提高。加磷高强 IF 钢以超低碳无间隙

原子钢为基础, 通过添加 P、Mn、Si 等元素实现强化效果^[1-2], 兼具高强度与良好的成形性, 应用前景广阔。目前国内外开发的加磷高强 IF 钢强度级别有

340 MPa、390 MPa 和 440 MPa^[3], 其中 440 MPa 级 IF 钢技术含量高、生产难度大。通过深入研究成分、生产工艺及微观组织, 自主研发了 440 MPa 级加磷高强 IF 钢, 产品各项性能指标均满足客户要求。

1 关键试制工艺

1.1 化学成分

根据成分设计思路不同, 加磷高强 IF 钢分为 Ti-P 系、Nb-P 系、Nb-Ti-P 系。440 MPa 级高强 IF 钢采用 Ti-P 系成分设计, 主要原因为 Ti-P 系较 Nb-P 系性能更稳定, 工艺对力学性能影响的敏感性较低, 便于工艺控制; 较 Nb-Ti-P 系需要较低的再结晶退火温度, 同时由于钛铁合金较铌铁合

金便宜, 采用 Ti-P 系成分设计更符合降本增效思路。440 MPa 加磷高强 IF 钢采用超低碳成分设计, 碳氮含量越低, 间隙原子对位错的阻碍越弱, 同时平行于板面的 {111} 织构增多, 成形时抗厚度减薄能力增强, 有利于零件变形。添加 Si、Mn、P 元素以提高固溶强化效果, 添加 P 元素钢带强度显著提高, 但不宜添加过多, 随着 P 元素含量的增加, 容易导致二次加工脆化, 加入量一般不超过 0.1%。添加微量 B 可以降低冷脆转变温度, 从而防止二次加工脆化, B 元素可在晶界处快速析出, 一方面强化了晶界, 另一方面阻碍了 P 在晶界处的偏析^[4]。S 在深冲钢中是有害元素, 应尽可能地降低 IF 钢中的 S 含量。具体成分设计如表 1 所示。

表 1 化学成分(质量分数)

化学元素	C	Si	Mn	P	S	Al _i	Ti	N	B
设计成分	≤0.005	≤0.3	≤1.2	≤0.08	≤0.010	≥0.020	≤0.07	<0.005	≤0.002

1.2 热轧

热轧钢带的组织和析出物形貌取决于热轧工艺参数, 低的板坯加热温度、高温终轧、终轧后快冷、增大热轧压下率、增大变形速率等都有利于提高深冲性能^[5]。440 MPa 级加磷高强 IF 钢板坯加热温度设定不低于 1 180 °C, 较低的加热温度有利于表面氧化物控制; 终轧温度不低于 890 °C, 以保证奥氏体区轧制; 终轧后采用前集中式层流冷却模式, 一方面提高冷却速率, 另一方面满足高抗拉强度要求。卷取温度的选取需考虑第二相粒子析出情况以满足产品性能, 加磷高强 IF 钢第二相粒子析出温度如图 1 所示。研究认为 TiN 形成温度在 1 300 °C 以上, 稳定性高, 由于热轧及连退工艺均低于 1 250 °C, 因此 TiN 在后续热加工工序不会溶解, 铸坯加热到 1 200 °C 以上时将析出 TiS, 但 TiS 不稳定, 在随后的降温过程逐渐转变为 Ti₄C₂S₂。当温度在 700 °C 保温时将析出 FeTiP 相, FeTiP 相的析出, 会消耗固溶于基体的 P 元素, 固溶强化作用随之减弱, 同时稳定的 FeTiP 相抑制了再结晶过程中晶界的迁移, 提高了再结晶温度, 导致 r 值降低^[6]。为避免 FeTiP 相的析出, 钢带经过终轧后应快速冷却到 700 °C 以下, 考虑到热轧产线温度控制精度, 440 MPa 级加磷高强 IF 钢卷取温度设定小于 680 °C。

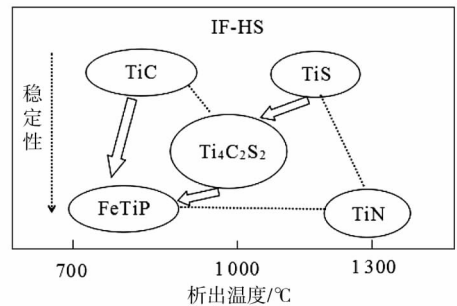


图 1 第二相粒子析出温度

1.3 冷轧

冷轧变形的储能是退火过程中再结晶的驱动力, 并且较高的冷轧压下率可以获得较高的平均塑性应变比。结合加磷高强 IF 钢钢种特点及产线设计能力, 440 MPa 级加磷高强 IF 钢压下率设定不小于 70%。退火温度是影响高强度钢板退火再结晶组织形成的关键因素。研究表明, FeTiP 相一般在罩式退火中析出, 而连续退火不会析出^[6], 这是由于连续退火速度快, 保温时间短, FeTiP 相没有足够时间析出。440 MPa 级加磷高强 IF 钢采用连续退火工艺设计, 可以避免 FeTiP 相在冷轧工序再次析出。为保证 440 MPa 加磷高强 IF 钢晶粒能够完全再结晶, 退火温度应大于 750 °C。

2 结果分析

2.1 夹杂

炼钢过程中严格控制 S 含量,因为 440 MPa 级加磷高强 IF 钢 Mn 含量设计较高,易与 S 元素反应,生成 MnS 化合物,MnS 如果聚集长大形成夹杂物,则铁素体基体的连续性受到影响。在冲压过程中,MnS 夹杂与基体界面结合力较弱,容易产生应力集中,导致 MnS 夹杂处形成孔洞,随着应力的增加,孔洞逐渐连接,最终发生开裂,形成断后裂纹。采用 KR 脱硫技术,将终点 S 含量控制在 0.002% 以内,添加脱硫剂,并进行机械搅拌,促进脱硫反应,扒除脱硫渣,防止高硫渣进入转炉,使 S 含量再次升高。对试验钢进行夹杂物评级,D 类夹杂物为 0.5 级,其他类夹杂物评级均为 0 级,如图 2 所示,冶炼工艺控制良好。

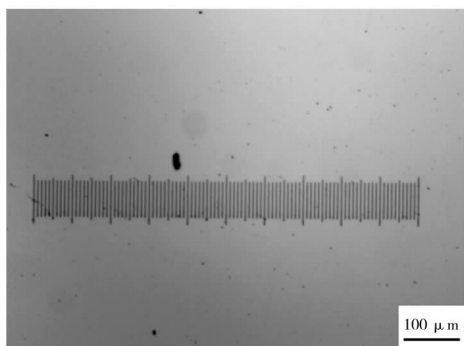
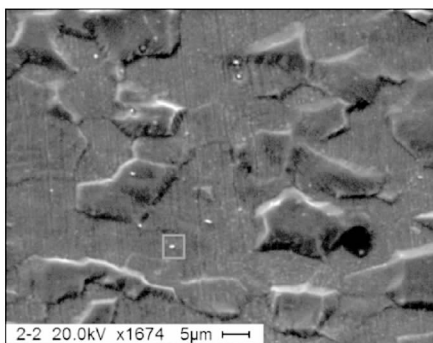


图 2 夹杂物形态



2.2 微观组织

当退火温度较高时,晶粒尺寸增大,屈服强度及抗拉强度随之降低,无法满足 440 MPa 级加磷高强 IF 钢强度要求;当退火温度较低时,晶粒未完成再结晶,部分晶粒仍呈现长条状,导致钢带塑性差,不容易变形,因此选择合适的退火温度是保证良好成形性及强度的关键。对试验钢带进行金相组织观察,如图 3 所示,冷轧组织为均匀等轴状铁素体,晶内及晶界干净,晶粒度 10 级,晶粒充分再结晶,晶粒尺寸适中,说明退火工艺制定合理。

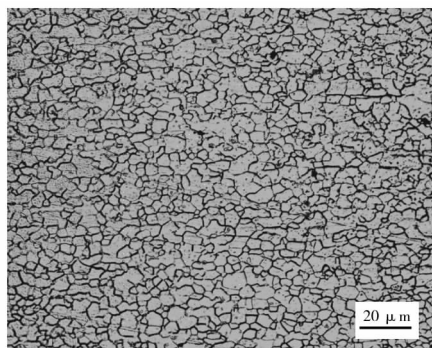


图 3 440 MPa 加磷高强 IF 钢冷轧金相组织

扫描电镜能谱分析仪检测结果显示,铁素体基体中存在微量点状 MnS 析出相,MnS 弥散分布,且未偏聚长大,因此不会对组织连续性造成影响,见图 4。组织中未发现 FeTiP 析出相,说明 P 元素主要以固溶态形式存在,达到了固溶强化的目的,验证了卷取温度低于 680 °C,可有效避免 FeTiP 相的析出。

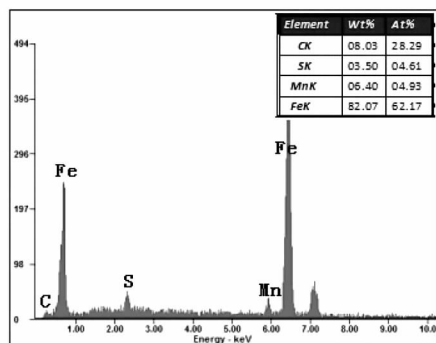


图 4 SEM 及能谱分析

2.3 力学性能

热轧及退火工序工艺参数的严格控制是力学性能的有力保证。本次试制产品的工艺完全按照要求

执行,且温度曲线平稳。对试制的钢带力学性能进行统计,440 MPa 加磷高强 IF 钢屈服强度为 292 ~ 319 MPa,抗拉强度为 440 ~ 470 MPa,延伸率

35.0% ~ 39.0%。性能指标稳定,波动范围小,完全

符合交货技术要求,如图 5 所示。

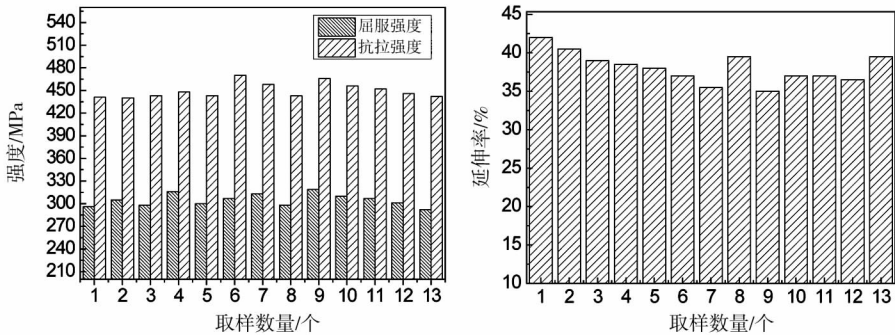


图 5 440 MPa 加磷 IF 钢力学性能

3 结论

(1)通过严格控制化学成分,440 MPa 级加磷高强 IF 钢组织纯净,D 类夹杂为 0.5 级,其他均为 0 级。

(2)440 MPa 级加磷高强 IF 钢微观组织为均匀铁素体,组织弥散分布微量 MnS 析出相,由于颗粒较小且未聚集长大,不会对组织连续性造成影响。

(3)440 MPa 级加磷高强 IF 钢组织中未检测到 FeTiP 有害相,说明 P 元素主要以固溶态形式存在,达到了固溶强化的目的。

(4)经过分析,产品化学成分及下游工艺路线设计合理,440 MPa 级加磷高强 IF 钢屈服强度为 292 ~ 319 MPa,抗拉强度为 440 ~ 470 MPa,延伸率 35.0% ~ 39.0%,产品性能稳定,符合相关技术要求。

参 考 文 献

[1] 郭卫民,孙德朋,张华阳,等. 含磷高强 IF 钢

的析出物与深冲性能[J]. 金属热处理,2015,40(2):99-103.

[2] 夏明生,李桂兰,张洪波,等. 冷轧退火含磷高强 IF 钢的组织 and 性能[J]. 钢铁研究学报,2015,27(12):54-57.

[3] 杨娜,崔岩,胡劲. 高强度 IF 钢的研究进展[J]. 物理测试,2009,27(3):1-5.

[4] Yasuhara Eiko, Sakata Kei, Furukimi Osamu. Effect of Boron on Planar Anisotropy of r -Value in Extra-Low-C Steel Sheet[J]. Tetsu to Hagane, 1999,(4):58-63.

[5] 商建辉,王先进,初元璋. Ti-IF 钢热轧时第二相粒子析出行为研究的最新进展[J]. 钢铁研究学报,2000,12(6):55-60.

[6] 王亚飞. B250P 含磷高强钢热变形行为及铁素体区热轧工研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.