汽车用冷轧烘烤硬化钢 HC220B 的开发与试制

齐 蒙,袁晓鸣,刘 妍,陈 胜,刘国磊

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要:烘烤硬化钢兼具良好的深冲性能和抗凹陷性,多用于冲压汽车外覆盖件。包钢稀土钢板材公司以现有炼钢、热轧、冷轧产线生产设备为基础,采用连续退火生产方式,根据客户需求,在超低碳钢中添加少量 Ti 元素,成功开发了冷轧超低碳烘烤硬化钢 HC220B。钢带各项力学性能均满足标准要求,实现成品屈服强度 220 ~ 270 MPa,抗拉强度 320 ~ 400 MPa,断后伸长率≥32.0%,n 值 ≥ 0.16,r 值 ≥ 1.5, BH_2 值≥30 MPa,金相组织为等轴铁素体,晶粒度 8.5 级。当钢中固溶自由碳含量在 3 ~ 21 ppm 范围内时,冷轧烘烤硬化钢 HC220B 具有适宜的烘烤硬化值。常温下放置时间超 3 个月,钢带力学性能仍满足标准要求,产品具有良好的时效期。当自由碳含量达到 58 ppm 时,钢带时效速度快,常温下放置 1 个月,钢带屈服强度提高约 40 MPa,不利于客户稳定使用。

关键词:烘烤硬化钢;HC220B;超低碳;连续退火

中图分类号:TG335.12 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2025)06 - 0034 - 06

Development and Trial Production of Cold Rolled Bake Hardening Steel HC220B for Automobile

Qi Meng, Yuan Xiaoming, Liu Yan, Chen Sheng, Liu Guolei

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The bake hardening steel is with good deep drawing properties and dent resistance, so it is usually used for stamping exterior covering parts of automobile. The cold rolled ultra - low carbon bake hardening steel HC220B is successfully developed by adding a small quantity of Ti into ultra - low carbon steel based on customer requirements as well as with the production mode of continuous annealing based on existing production equipment of such production lines as steel making, hot rolling and cold rolling in Rare Earth Steel Plate Co. of Baotou Steel. The mechanical properties of steel strip could meet the standard requirements so that the yield strength is 220 ~ 270 MPa, tensile strength is 320 ~ 400 MPa, percentage elongation after fracture≥32.0%, n - value≥0.16, r - value≥1.5, BH_2 value≥30 MPa, metallographic structure is equiaxed ferrite and grain size is grade 8.5 for finished product. When the content of solid solution free carbon in steel is within the range of 3 ~ 21 ppm, cold rolled bake hardening steel HC220B is with suitable bake hardening values. The mechanical properties of steel strip could still meet the standard requirements after it is stored at room temperature for over 3 months, so it is with good aging. When the content of free carbon reaches 58 ppm, steel strip ages rapidly and its yield strength is increased by approximately 40 MPa after it is stored at room temperature for 1 month, which is unfavorable to stable use of customers.

收稿日期:2025 - 08 - 07

作者简介:齐 蒙(1987 -),女,内蒙古包头市人,硕士,高级工程师,现从事产品开发等工作。

Key words: bake hardening steel; HC220B; ultra - low carbon; continuous annealing

超低碳烘烤硬化钢是一种优质汽车用钢板,兼具较好的成形性和抗凹陷性,主要用于冲压顶盖、翼子板等汽车外覆盖件。该类产品在冲压成形前屈服强度较低,有利于复杂汽车零件的成形,冲压成形后,钢中位错密度增加。在烤漆工序过程中,钢中固溶的自由碳向位错移动,形成钉扎效应,使屈服强度得到一定程度的提高,进而提高了零件的抗凹陷性[1]。目前,国内的几家大型国有钢厂均已掌握了制造烘烤硬化钢的关键控制技术[2,3],具备生产烘烤硬化钢系列产品的能力。包钢是西北地区较大的钢铁生产基地之一。近年来,正不断与时俱进,深入开发钢材品种、改革创新生产技术,逐步具备可以生产具有不同特点且性能更加优异的热轧及冷轧汽车钢产品的能力。推进包钢冷轧烘烤硬化钢 HC220B 的开发,不仅有利于包钢汽车钢产品钢种全覆盖,还使包钢汽车钢供应水平得到较大提升。

1　设计思路与试制过程

1.1　化学成分与工艺设计思路

1.1.1　化学成分

超低碳烘烤硬化钢采用微合金化设计,其碳含量控制在较低的水平,并在钢中加入少量的合金元素钛或(和)铌元素,合金元素用于固定钢中的部分碳和氮原子,生成碳氮化合物。同时剩余部分间隙碳原子,在钢中形成一定量的固溶间隙原子。为了提高钢的强度,添加一定量的强化元素锰和磷[4]。超低碳烘烤硬化钢具有的成分特点是钢质纯净、微合金化、超低碳设计。

包钢根据现有 IF 深冲钢的生产经验,烘烤硬化钢选用超低碳加 Ti 合金的设计,此类钢种对炼钢工序要求较高,为保证具有一定的烘烤硬化性,[C]、[Ti]、[N]成分含量,需在内控范围内相互协调,保证 C_{free} 含量控制在适宜的范围内,钢板中自由 C 的估算公式为:

$$w(C)_{free} = w(C)_{tot} - 1/4 \times [(w(Ti) - 3.4 \times w(N)] \quad (1)$$

式中:$w(C)_{free}$ 为试验钢自由碳含量(质量分数);$w(C)_{tot}$ 为试验钢总碳含量(质量分数);$w(Ti)$ 为试验钢钛含量(质量分数);$w(N)$ 为试验钢氮含量(质量分数)。

要保证最低的烘烤硬化性,必须保证钢中固溶自由碳的含量。固溶自由碳含量太低,无法保证一定的烘烤硬化值;自由碳含量太高,增加烘烤硬化值,提升钢带时效速度,不利于客户长时间储存后的稳定使用[5]。理想的烘烤硬化值范围 30 ~ 60 MPa。

1.1.2　热轧工艺

属于超低碳成分体系的烘烤硬化钢,与 IF 钢种类似,要求在热轧前的连铸坯加热过程中,板坯成型时析出的沉淀相绝大部分溶解到基体中,需要高温加热和保温,从而实现成分均匀,热轧板坯加热温度通常控制在不小于 1 200 ℃。

超低碳烘烤硬化钢的组织为等轴铁素体,为保证产品冲压前具有良好的成形性能,要求在热轧工序获得的铁素体组织均匀细小。结合铁碳相图,为避免超低碳烘烤硬化钢热轧过程中产出混晶,需避免终轧温度降低到相变点。若终轧温度低于相变点,试验钢进入双相区轧制,不但导致轧制过程中变形抗力的增加,而且容易造成钢的塑性降低,致使试验钢带出现变形不均匀和组织不均匀,从而降低钢带的强韧性,对织构和深冲性能产生不利影响。超低碳烘烤硬化钢的终轧温度通常要求不小于 900 ℃[6]。

热轧工序中卷取温度对烘烤硬化性能的影响,存在不同的观点。研究表明,卷取温度对烘烤硬化性能有一定影响[7]。若卷取温度较低,析出的第二相颗粒更加细小和弥散分布。该类型析出物间距较小,有利于退火过程中碳化物的回溶,可有利于获得较高的烘烤硬化性能,但当卷取温度较低时,不利于有利织构{111}的形成,结合外板钢带表面质量的控制,通常卷取温度范围 600 ~ 700 ℃。

1.1.3　冷轧工艺

冷轧工艺中的压下率对退火后深冲性能的织构产生重要的影响。为了获得理想的深冲性能,在适当的化学成分、热轧工艺条件下,为获得高的 r 值,需保证充分的冷轧压下率,这样有利于{111}取向晶粒形成。研究表明,90% 的压下率产生最大的 r 值,但这样的压下率很难应用于实际生产,对于薄规格带钢,冷轧压下率通常维持在 80% 左右较为普遍[8]。

高温退火和快速冷却有利于钢板的烘烤硬化性能。另外烘烤硬化钢还要求较低的缓冷与时效温度,在保证较低缓冷与时效温度的同时,较高的产线速度有利于缩短时效时间,避免自由 C 扩散到晶

界,一旦自由 C 扩散到晶界处,将降低带钢烘烤硬化值(BH_2)。包钢稀土钢板材生产线开发的烘烤硬化钢 HC220B 采用连续退火方式,工艺路线如图 1 所示。

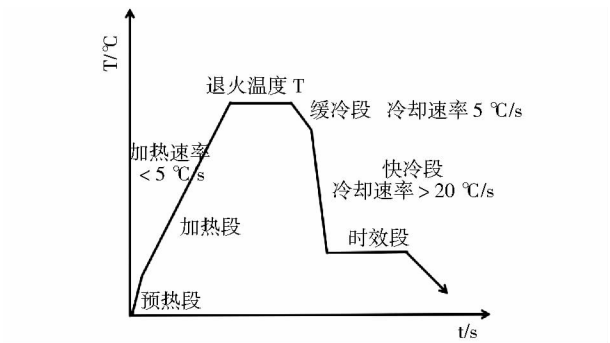


图 1 BH 钢连退工序工艺路线

1.2 组织性能检测

在钢带宽度 1/4 处取钢板,为制作横向 A80 标距开肩拉伸试样,试样平行宽度 20 mm。根据 GB/T 228.1—2021《金属材料:拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》,试验钢采用 Zwick 的 50 kN 电子万能材料试验机进行拉伸性能检测。应变硬化指数(n_{90} 值)和塑性应变比(r_{90} 值)是评价薄钢板冲压成形性能的重要参数。该两项性能指标根据 GB/T 5028—2008《金属材料 薄板和薄带 拉伸应变硬化指数(n 值)的测定》和 GB/T 5027—2025《金属材料 薄板和薄带 塑性应变比(r 值)的测定》标准测定,在 Zwick 的 100 kN 电子万能试验机检测成形性能。

烘烤硬化值是烘烤硬化性能的重要体现(见图 2)。试验钢采用 GB/T 24174—2022《钢 烘烤硬化钢(BH)的测定方法》[9] 标准检测,测定数据为 BH_2 值,计算公式为:

$BH_2 = R_{eL}$(或 $R_{p0.2}$)(烘烤后) $- R_{t2.0}$(烘烤前) (2)

式中:$R_{t2.0}$(烘烤前)为烘烤前一个拉伸试样总延伸率 2% 对应的屈服强度;R_{eL}(或 $R_{p0.2}$)(烘烤后)为烘烤后测量同一个试样的下屈服强度(R_{eL})或非比例延伸 0.2%($R_{p0.2}$,无明显屈服时)对应的屈服强度。试验中的烘烤处理:将加热装置加热到温度 170 ℃,温度稳定后放入待烘烤处理试样,待加热装置的温度重新达到 170 ℃,热处理保温时间(20.0 ± 0.5) min,即刻取出试验试样,在空气中冷却试样至室温;烘烤处理时,注意试样不能叠放,需分开放置在搁架上。此外,应采用同一台拉伸试验机,进行烘烤前、后的两次拉伸试验。

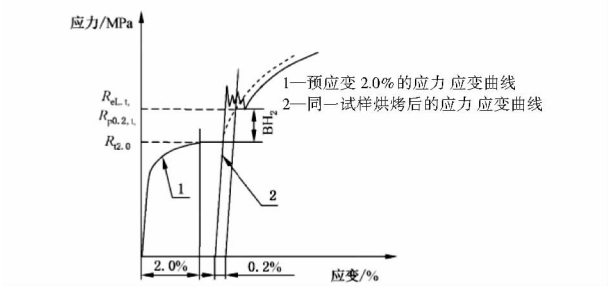


图 2 BH_2 计算示意图

金相试样应在钢带宽度 1/4 处取样,经磨削和抛光后,采用 4% 的硝酸酒精溶液浸蚀。根据GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》与 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》标准检测,采用 Axio observer A1M 光学显微镜观察显微组织和晶粒度。

1.3 试制过程

1.3.1 炼钢

结合超低碳烘烤硬化钢需要深脱碳的特点,设计炼钢的工艺路线为高炉→KR 脱硫→转炉→精炼(RH 炉)→板坯连铸。结合包钢超低碳 IF 钢生产经验,冶炼过程重点关注事项有:①KR 脱硫工序入转炉铁水硫含量要求小于 0.002%,铁水渣的扒清面积大于 92%;②转炉终点控制要求出钢温度不小于 1 660 ℃,必须使用周转包出钢,出钢温降要求小于 70 ℃;③连铸过程中增氮量要求小于4 ppm。使用涂抹料中包及无碳中包覆盖剂,避免浇铸过程增碳,同时使用小孔吹氩塞棒。

对于首次开发的烘烤硬化钢 HC220B,标准要求及工业试制的化学成分见表 1。

1.3.2 热轧

热轧工艺为板坯加热→高压水除鳞→E1R1 粗轧机→E2R2 粗轧机→飞剪→除鳞(高压水)→连轧精轧机(F1 ~ F7)→加密型层流冷却→卷取→托盘运输系统→取样、检验。HC220B 试制钢带,热轧工序采用步进式加热炉对铸坯进行加热,粗轧区域采用双机架 R1 和 R2 往返式轧制,热轧粗轧模式采用 3 + 3,精轧采用 F1 ~ F7 连轧工艺。为保证奥氏体单相区轧制,精轧终轧温度范围为 900 ~ 960 ℃;为保证碳氮化物正常析出,提高深冲性能,卷取温度集

中范围为 600 ~ 680 ℃,具体热轧工艺见表 2。

表 1　化学成分(质量分数)　　%

化学元素	C	Si	Mn	P	S	Alt	Ti	N	自由碳含量
标准要求	≤0.08	≤0.50	≤0.70	≤0.085	≤0.030	≥0.015	–	–	–
工业试制炉次 1	0.001 8	0.046	0.620	0.050	0.007 6	0.029	0.013 0	0.002 0	0.000 3
工业试制炉次 2	0.002 7	0.049	0.62	0.053	0.004 2	0.039	0.008 2	0.001 7	0.002 1
工业试制炉次 3	0.005 6	0.033	0.616	0.047	0.005 5	0.035	0.009 1	0.002 9	0.005 8

抽取部分 HC220B 热轧钢带,委托力学性能、金相组织与晶粒度检测,试制钢带屈服强度范围为 251 ~ 300 MPa,抗拉强度范围为 356 ~ 390 MPa,延伸率范围为 34.5% ~ 37.0%。金相组织均为铁素体,晶粒度 7.5 级。

表 2　铸坯加热制度及轧制工艺

加热温度 /℃	出炉温度 /℃	精轧终轧温度 /℃	卷取温度 /℃
1 200 ~ 1 260	1 200 ~ 1 260	900 ~ 960	600 ~ 680

1.3.3　冷轧

冷轧工艺分为酸轧和连续退火两部分:①酸轧区域:开卷→焊接→拉矫→酸洗漂洗→烘干→转塔式切边→5 机架六辊连轧机冷轧→卷取→称重→标识→打捆→入库;②连退工序:开卷→焊接→入口清洗→入口活套→立式连续退火炉→出口活套→四辊光整机平整→检查活套→切边→光检及表面检查→涂油→取样→卷取→称重→包装→入库。冷轧烘烤硬化钢 HC220B 产品,试制厚度规格 0.7 mm,酸轧压下率范围 80.0%,有利于退火后有利织构{111}的形成。钢带加热/均热温度范围 780 ~ 820 ℃,缓冷段温度范围 620 ~ 700 ℃,快冷段温度范围 200 ~ 400 ℃,时效段温度范围 200 ~ 400 ℃,终冷段温度范围≤150 ℃,工艺速度≥100 m/min,平整机延伸率范围 1.0% ~ 1.5%,工艺执行平稳。

2　结果分析

2.1　组织与夹杂

烘烤硬化钢 HC220B 冷轧试样组织为铁素体,1/4 处试样晶粒度 8.5 级,组织较为均匀(见图 3)。夹杂物 A 类、B 类、C 类、DS 类夹杂均为 0 级,D 类夹杂物为 1 级,如表 3 所示,控制比较理想。

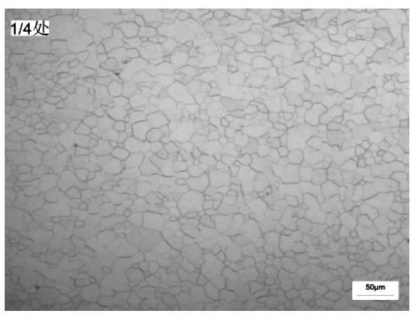


图 3　HC220B 冷轧显微组织

表 3　非金属夹杂物检测　　级

试样编号	A 类		B 类		C 类		D 类		DS 类
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
1#	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0
2#	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0

2.2　力学性能

HC220B 产品生产试制 3 个炉次样本,性能合格率 100.0%,屈服强度范围 221 ~ 250 MPa(标准要求范围 220 ~ 270 MPa),抗拉强度范围 348 ~ 375 MPa(标准要求范围 320 ~ 400 MPa),延伸率范围 34.0% ~ 36.5%(标准要求≥32.0%),r_{90} 值范围 2.23 ~ 2.66(标准要求 ≥ 1.5),n_{90} 值范围 0.20 ~ 0.22(标准要求≥0.16),BH_2 值范围 35 ~ 69 MPa(标准要求≥30 MPa),见表 4 所示。

表 4 冷轧 HC220B 力学性能

炉次	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	A_{80}/%	r_{90} 值	n_{90} 值	烘烤硬度值/MPa
标准要求	220 ~ 270	320 ~ 400	≥ 32	≥ 1.5	≥ 0.16	≥ 30
工业试制炉次 1	221	348	36.5	2.31	0.22	35
工业试制炉次 2	243	364	35.1	2.66	0.20	55
工业试制炉次 3	250	375	34.0	2.23	0.20	69

2.3 室温时效性能

烘烤硬化钢在具有烘烤硬化性能的同时,存在一定室温时效性。烘烤硬化性能和室温时效性能是基于同样的物理本质。烘烤硬化值越高,抗室温时效性能越差。要满足用户的使用要求,二者需要达到平衡,既要具有烘烤硬化性,又要具有抗室温时效性,标准要求 HC220B 产品时效期为 3 个月。为了了解钢板的抗室温时效效果,每炉次抽取 1 个样本,在板料 1/4 处加工拉伸试样,在室温分别放置不同时间,委托测试其力学性能,测试数据见表 5 所示。

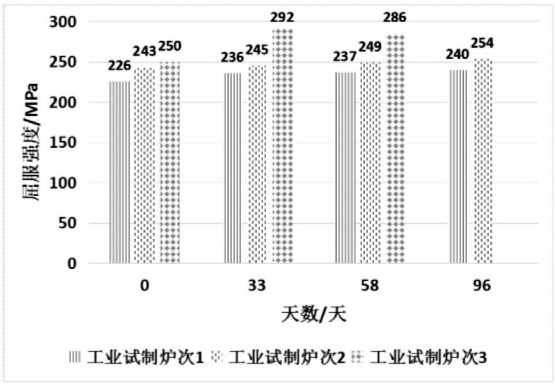
自由碳含量分别为 3 ppm、21 ppm、58 ppm 时,屈服强度、抗拉强度、延伸率、r_{90} 值、n_{90} 值的变化趋势如图 4 所示。由此可见,HC220B 产品自由碳含量为 3 ppm、21 ppm 时,3 个月有效期内屈服/抗拉强度增加约 10 ~ 15 MPa,延伸率降低约 1.0% ~ 1.5%,r_{90} 值无明显规律,n_{90} 值降低 0.1 ~ 0.3。钢带室温放置时间 3 个月,性能满足标准要求。自由碳含量为 58 ppm 时,钢带室温放置 1 个月,屈服强度增加约 40 MPa,超标准要求上限,抗拉强度增加约 10 MPa,延伸率降低约 2.0%,r_{90} 值无明显变化,n_{90} 值降低 0.1,不利于客户稳定使用。

表 5 冷轧 HC220B 时效性能检测

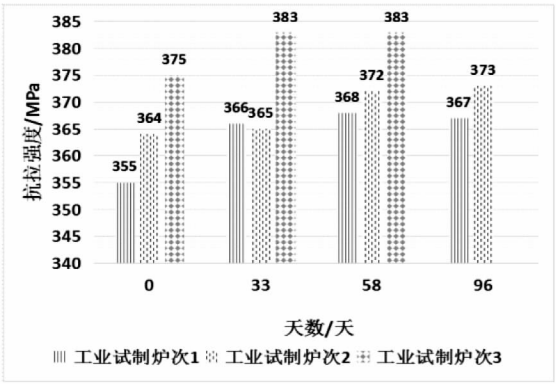
炉次	屈服强度 $R_{p0.2}$(R_{eL})/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率 A_{80}/%	r_{90} 值	n_{90} 值	天数/天
标准要求	220 ~ 270	320 ~ 400	≥32	≥1.5	≥0.16	
工业试制炉次 1	226	355	36.5	2.22	0.22	0
	236	366	34.5	2.30	0.20	33
	237	368	36.0	2.45	0.20	58
	240	367	35.0	2.35	0.19	96
工业试制炉次 2	243	364	35.1	2.66	0.20	0
	245	365	35.0	2.44	0.19	33
	249	372	34.5	2.53	0.18	58
	254	373	34.0	2.45	0.19	96
工业试制炉次 3	250	375	34.0	2.23	0.20	0
	292	383	32.0	2.30	0.19	33
	286	383	32.0	2.30	0.19	58

2.4 客户试用

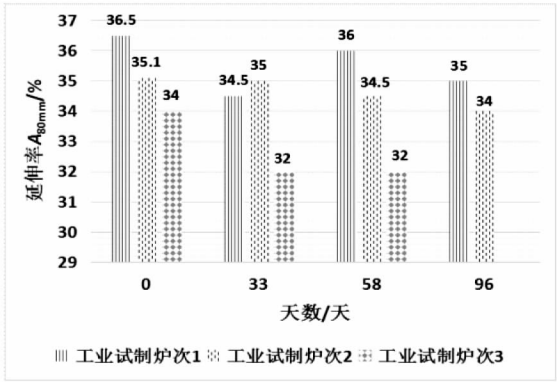
工业试制炉次 1、2 所对应的试验钢产品已应用于汽车厂制作顶盖等零件,在 3 个月时效期内,产品冲压效果良好,无冲压开裂、橘皮现象,成形满足客户使用要求。对于自由碳含量范围 3 ~ 21 ppm 的 HC220B 产品,可以达到冷轧 HC220B 产品的烘烤硬化性能与抗室温时效性能之间较好的平衡。



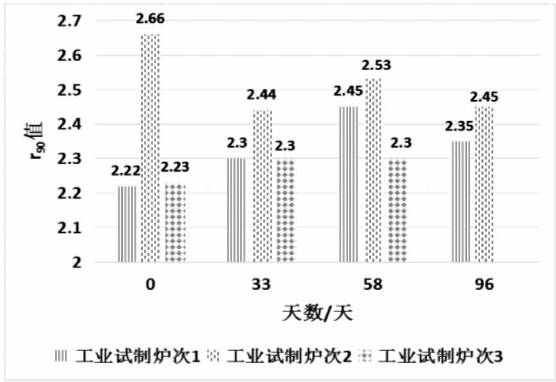
（a）HC220B 试样屈服强度随生产时间的变化趋势



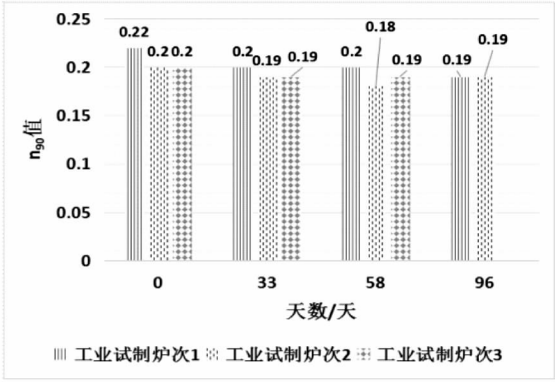
（b）HC220B 试样抗拉强度随生产时间的变化趋势



（c）HC220B 试样延伸率随生产时间的变化趋势



（d）HC220B 试样 r_{90} 值随生产时间的变化趋势



（e）HC220B 试样 n_{90} 值随生产时间的变化趋势

图 4　HC220B 力学性能变化趋势

3　结论

（1）在超低碳钢中添加少量 Ti 元素，成功开发了冷轧超低碳烘烤硬化钢 HC220B。冷轧试样组织为铁素体，1/4 处试样晶粒度 8.5 级，组织较为均匀，非金属夹杂物等级 0 ~ 1 级，控制比较理想。

（2）工业试制的冷轧 HC220B 钢带各项力学性能均满足标准要求，实现成品屈服强度 220 ~ 270 MPa，抗拉强度 320 ~ 400 MPa，断后伸长率 ≥ 32.0%，n 值 ≥ 0.16，r 值 ≥ 1.5，BH_2 ≥ 30 MPa。产品已应用于汽车厂制作顶盖等外板零件，产品有效期内冲压成形良好，满足客户使用要求。

（3）当钢中的固溶自由碳含量在 3 ~ 21 ppm 范围内时，冷轧烘烤硬化钢 HC220B 具有适宜的烘烤硬化值。常温下放置时间超 3 个月，钢带力学性能

（下转第 68 页）

偏方向相同,符合生产实际情况。

4 皮带机胶带跑偏应对措施

针对上述常见五种导致皮带机胶带跑偏的情况,需要采取对应措施进行调整,关键在于消除输送胶带两侧受力不平衡,即消除推动胶带跑偏的侧向力[2]。

4.1 头、尾部滚筒处胶带跑偏

由于滚筒中心线与机架中心线不垂直,胶带跑偏侧为胶带张力较松端,故胶带跑偏侧头部滚筒轴沿皮带机运转方向如图1所示前移、尾部滚筒轴沿皮带机下皮带运转方向如图2所示移动,使滚筒轴趋向垂直机架中心线方向,就可消除跑偏推力 F_c。

4.2 头、尾部增面滚筒轴距跑偏

为消除跑偏推力 F_c,跑偏侧增面滚筒轴端应沿皮带机下皮带运行方向如图4所示移动。

4.3 中部拉紧处反向滚筒轴跑偏

胶带受力情况与4.2项情况完全一样,因此,胶带跑偏方向、滚筒轴端调整措施同于4.2项。

4.4 中部上支撑托辊组、下平行托辊支架中心线跑偏

皮带运输机胶带跑偏,为消除跑偏推力 F_c,上支撑托辊组胶带跑偏侧支架地脚沿皮带机上胶带运行方向移动、下平行托辊胶带跑偏侧支架地脚沿皮带机下胶带运行方向移动,如图6所示,使滚筒轴趋向垂直机架中心线方向,就可消除跑偏推力 F_c。

4.5 锥台型头部、尾部滚筒

锥台型头部、尾部滚筒造成皮带机胶带跑偏,若是滚筒包胶不均匀磨损形成锥台,应及时更新滚筒。

5 结束语

皮带运输机在冶金企业生产中占有重要的地位,皮带机胶带跑偏是生产实际中经常遇到的问题,如何预防和及时调整胶带跑偏故障尤为重要。由上文对胶带机各组件处胶带受力分析,进一步明确了两点:滚筒轴向安装中心线与皮带机机架纵向中心线垂直,胶带纵向中心线与机架纵向中心线重合,就可以有效地避免皮带机胶带跑偏现象。常见调整胶带跑偏措施就是将跑偏侧相应位置的系列胶带支撑滚地脚顺胶带运行方向移动,使滚筒轴向中心线趋近垂直机架纵向中心线。

参 考 文 献

[1] 殷明娟. 胶带输送机跑偏原因分析与预防措施[J]. 科技风,2011(18):68,71.

[2] 刘文亮,张晓伟,董秋艳. 连续皮带机胶带跑偏原因与力学分析[J]. 水利水电技术,2006(3):26-27.

(上接第39页)

仍满足标准要求,产品具有良好的时效期。当自由碳含量达到58 ppm时,钢带时效速度快。常温下放置1个月,钢带屈服强度提高约40 MPa,不利于客户稳定使用。

参 考 文 献

[1] 吴庆美,郭强,卜凡征,等. H220BD超低碳烘烤硬化钢耐时效性能[J]. 金属功能材料,2023,30(2):61-65.

[2] 宋浩,刘仁东. 鞍钢A220BH烘烤硬化冷轧钢板的开发[J]. 鞍钢技术,1999(8):13-15,18.

[3] 谭善锟,潘兴旺,李明,等. 奇瑞轿车用钢板[J]. 汽车工艺与材料,2004(6):59-64,74.

[4] 王立辉,齐建军,熊自柳,等. 终轧温度对180 MPa级烘烤硬化钢组织和性能的影响[J]. 河北冶金,2021(2):16-19,73.

[5] 胡华东. 热镀锌汽车外板烘烤硬化钢H220BD+Z产品开发[J]. 钢铁钒钛,2018,39(5):157-161.

[6] 李霞,王亚东,于立伟,等. 本钢汽车用冷轧烘烤硬化钢BH340的研制开发[J]. 金属世界,2016(5):64-67.

[7] 苏望生. O5表面冷轧板的质量控制[J]. 宝钢技术,1991(2):22-27.

[8] 康永林,陈继平,刘光明,等. 汽车用冷轧超低碳烘烤硬化钢板的组织性能与析出[J]. 中国冶金,2008,18(3):14-21.

[9] GB/T 24174—2022. 钢 烘烤硬化值(BH)的测定方法[S].