

## 冷轧低合金高强钢开发及应用

尹树春<sup>1,2</sup>, 刘 宇<sup>1,2</sup>, 李 涛<sup>1,2</sup>, 韩 涛<sup>3</sup>, 杨智谟<sup>3</sup>

(1. 河钢汽车板有限公司, 天津 300308; 2. 唐山钢铁集团有限责任公司, 河北 唐山 063000;  
3. 天津大唐国际盘山发电有限责任公司, 天津 301900)

**摘要:** 为满足汽车工业对高强度、高加工性能材料的需求, 开发了一种综合性能优良的 HC420LA 冷轧低合金高强钢。采用 C-Mn-Nb-Ti 复合微合金成分设计方法, 结合优化的热轧及退火工艺制度, 通过热模拟技术系统地研究了全工序中的加热温度、冷轧压下率、退火温度及退火速度等参数, 确保了产品质量的稳定性。结果表明: 开发的冷轧低合金高强钢的力学性能优异, 屈服强度为 433~492 MPa、抗拉强度为 510~581 MPa、断后伸长率为 18.5%~25.5%, 完全满足汽车主机厂的加工要求。成品为铁素体单相组织, 具有良好的组织变形能力, 表现出优异的冷弯及扩孔性能。同时, 成品组织中的带状结构主要源于再结晶不充分, 通过提高退火温度、降低退火速度可有效降低各向异性, 进一步优化材料性能。该研究为同类产品工业生产中工艺参数的制定提供了借鉴, 有利于推动高强度钢的开发与应用。

**关键词:** 低合金高强钢; 冷轧; 退火工艺; 冷弯性能; 扩孔性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.019

**中图分类号:** TG335.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 04-0160-05

## Development and application for cold-rolled low-alloy high-strength steel

Yin Shuchun<sup>1,2</sup>, Liu Yu<sup>1,2</sup>, Li Tao<sup>1,2</sup>, Han Tao<sup>3</sup>, Yang Zhihao<sup>3</sup>

(1. HBIS Automotive Steel Co., Ltd., Tianjin 300308, China; 2. Tangshan Iron & Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063000, China;  
3. Tianjin Datang International Panshan Power Generation Co., Ltd., Tianjin 301900, China)

**Abstract:** In order to meet the demand of automotive industry for high-strength and high processability materials, a cold-rolled low-alloy high-strength steel HC420LA with excellent comprehensive performance was developed. Then, by using the C-Mn-Nb-Ti composite micro-alloy composition design method and combining with the optimized hot rolling and annealing process system, the parameters of heating temperature, reduction rate of cold rolling, annealing temperature and annealing speed in the whole process were systematically studied by thermal simulation technology to ensure the stability of product quality. The results show that the developed cold-rolled low-alloy high-strength steel has excellent mechanical properties, with a yield strength of 433 to 492 MPa, a tensile strength of 510 to 581 MPa, and an elongation after fracture of 18.5% to 25.5%, which fully meets the processing requirements of automotive OEMs. The finished product is a ferrite single-phase structure with good structure deformation ability, showing excellent cold bending and hole expansion performance. At the same time, the banded structure in the finished product structure is mainly due to insufficient recrystallization. By increasing the annealing temperature and reducing the annealing speed, the anisotropy is effectively reduced, and the material performance is further optimized. Thus, this study provides a reference for the formulation of process parameters in the industrial production of similar products and is beneficial to promote the development and application of high-strength steel.

**Key words:** low-alloy high-strength steel; cold rolling; annealing process; cold bending performance; hole expansion performance

冷轧低合金高强钢是在低碳钢的基础上, 通过添加 Nb、Ti 等微量合金元素, 进而提高屈服强度和屈强比的钢材<sup>[1]</sup>, 其主要强化方式为细晶强化

和析出强化。冷轧低合金高强钢具有比碳素结构钢更高的屈服强度, 同时较双相钢等先进高强钢具有更低的成本。因其优异的力学性能和成本效益<sup>[2]</sup>, 在现代工业中扮演着越来越重要的角色, 被广泛应用于汽车安全结构件的加强板、座椅横梁等结构部位。

冷轧低合金高强钢的生产过程包括冶炼、热轧、冷轧和连续退火等关键步骤。在冶炼过程中, 对 C、P、S、N 等元素的控制与钢水的洁净度要求严格,

收稿日期: 2024-10-24; 修订日期: 2025-01-16

作者简介: 尹树春 (1980-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: yinshuchun@hbisco.com

通信作者: 刘 宇 (1990-), 男, 学士, 工程师

E-mail: liuyu15030596236@126.com

以确保产品质量。在热轧过程中，热轧卷取温度会影响后续成品性能和组织，层流冷却过程中的空冷区对含 Nb 的钢材影响较大，可能导致析出物粗大，影响屈服强度<sup>[3-7]</sup>。在冷轧工序中，钢材会产生大量的塑性变形，形成变形组织。当这些钢材进入退火过程时，铁素体会经历回复阶段，并在变形区域开始形核再结晶，随后晶粒逐渐长大。这一连续的微观结构演变对于钢材的最终性能至关重要。

本研究中 HC420LA 冷轧低合金高强钢板的生产工艺流程为：（铁水预处理）→转炉→精炼→连铸→热轧→热轧平整→酸轧→连续退火。通过识别热轧及连续退火全工序关键控制点<sup>[8-12]</sup>，形成控制计划，确保产品质量稳定。获得屈服强度、抗拉强度、断后伸长率等较好的力学性能，满足汽车主机厂的加工要求，为同行业工业大生产中过程工艺参

数的制定提供一定的参考。

## 1 成分设计

在 HC420LA 冷轧低合金高强钢成分设计时添加微合金元素 Nb 和 Ti。Nb 作为一种强碳化物和氮化物形成元素，在钢铁材料中以碳化物和氮化物的形式存在，能够有效细化晶粒并提供析出强化，从而抑制奥氏体晶粒的长大。Ti 除了与碳和氮结合形成碳化物和氮化物，实现晶粒细化并增强材料的强度和韧性外，还对钢中的氧和硫具有较高的亲和力。这种亲和力使得 Ti 能够改善硫化物的形态，将其转变为球状的  $Ti_4C_2S_2$ ，这种形态不易在塑性变形中改变，从而显著提升钢材的韧性。综合评估后确定成分设计方案如表 1 所示，以钢水浇注至 1/2~3/4 时从中包钢水取样测定的化学成分为准。

表 1 HC420LA 钢的化学成分设计（%，质量分数）  
Table 1 Chemical composition design of HC420LA steel（%，mass fraction）

C	Si	Mn	S	P	Al	N	Nb	Ti
≤0.10	≤0.10	0.70~1.30	≤0.020	≤0.020	0.015~0.055	≤0.0050	0.020~0.050	0.020~0.050

## 2 热轧工艺设计

### 2.1 加热温度

钢坯的加热温度对金属材料的微观结构具有显著影响，尤其是对奥氏体的形核及长大、最终晶粒尺寸有明显的影

响。当加热温度过低时，Nb、Ti 的碳氮化合物无法全部溶解，起不到抑制奥氏体再结晶的作用。综合考虑设置如表 2 所示的加热温度制度，其中  $t$  为热轧原材料的厚度。

表 2 加热温度制度设置（℃）  
Table 2 Setting of heating temperature system（℃）

参数	加热 1 段	加热 2 段	加热 3 段	均热温度	出炉温度		
					$t < 2.75\text{ mm}$	$2.75\text{ mm} \leq t \leq 3.00\text{ mm}$	$t > 3.00\text{ mm}$
数值	900~1200	1150~1300	1250~1330	1240~1320	1150±20	1140±20	1130±20

### 2.2 终轧温度

终轧温度直接影响钢材的微观组织和最终的物理性能。为了得到强度、韧性和焊接性能等综合力学性能优良的低合金高强钢，控制终轧温度是关键。过高的终轧温度可能会导致奥氏体再结晶不均匀，使得铁素体晶粒尺寸增大，晶粒间的均匀性变差。过低的终轧温度可能导致晶粒组织的均匀性差异较大，甚至在边部表面出现未再结晶层。合理确定终轧温度是关键，本工艺确定终轧温度为  $(880 \pm 15)^\circ\text{C}$ 。

### 2.3 卷取温度

卷取温度是热轧钢材生产过程中需要严格控制的重要工艺参数之一。通过控制卷取温度可以控制微观组织的变化，影响钢材的强度和韧性等力学性能，本工艺确定卷取温度为  $(650 \pm 15)^\circ\text{C}$ 。

## 3 冷轧与退火工艺设计

### 3.1 冷轧工艺设计

拉矫破鳞可根据板形及酸洗表面及时调整。拉矫机通过入口和出口的张力辊使带钢承受拉伸应力，

同时通过弯曲、矫直单元使带钢承受弯曲应力。经过反复弯曲和拉伸在带钢表面产生反复的压缩和拉伸应力。由于铁基体及氧化铁皮覆层材料在性能上有巨大差异，基体材料受力后会产生一定的弹塑性变形，而表面的氧化铁粉由于不具有塑性且破坏强度较低，同时与基体的附着力差，在拉矫过程中上下表面的氧化铁皮处于不同应力状态，最终导致了氧化铁皮的裂纹和剥离，从而提高了酸洗的效率。

冷轧压下率是冷轧工艺中一个非常关键的参数，对钢材的微观组织、力学性能以及后续的加工性能具有显著的影响。通过综合考虑金属性能、设备能力和产品质量要求，冷轧压下率控制如表 3 所示。

3.2 退火工艺设计

3.2.1 模拟退火温度对力学性能的影响

退火采用立式退火炉。通过模拟得到退火温度对性能的影响规律为：随着退火温度的升高，抗拉强度和屈服强度稍升后降，而断后伸长率为稍降后升；随着带钢运行速度的升高，抗拉强度和屈服强度均升高，而断后伸长率呈下降趋势。从退火温度对性能的影响规律可知，加热至 830 ℃退火时，未

表 3 冷轧压下率设置		
Table 3 Setting of reduction rate for cold rolling		
热轧原料厚度/mm	可冷轧厚度范围/mm	压下率/%
2.0	0.55~0.70	65.00~72.50
2.5	0.70~0.90	68.00~72.90
3.0	0.90~1.11	63.00~70.00
3.5	1.11~1.41	59.70~68.20
4.0	1.41~1.71	57.20~64.70
4.5	1.71~1.91	57.50~62.00
5.0	1.91~2.21	55.80~61.80
5.5	2.21~2.50	54.50~59.80

“进入”或者刚刚“进入”完全退火区，若在完全退火区内，强度随温度下降较缓慢，完全退火温度较高的原因为该钢的 Nb 含量较高，因此，要保证完全退火，退火加热温度应在 830 ℃以上。随着带钢运行速度增加，退火效果即再结晶程度变差。

3.2.2 退火工艺

连续退火工艺中，不同区域的温度制度设定见表 4，工艺速度设置如表 5 所示。

表 4 退火温度设置 (℃)								
Table 4 Setting of annealing temperature (℃)								
参数	预热段	加热 1 段	加热 2 段	均热段	缓冷段	快冷段	时效段	终冷段
数值	150~260	550~660	815~840	825±10	700±20	400±20	370±20	100±50

表 5 退火工艺速度设置		
Table 5 Setting of annealing process speed		
厚度 $t$ /mm	目标值/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	控制范围/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )
$t \leq 0.8$	160	±10
$0.8 < t \leq 1.2$	150	±10
$1.2 < t \leq 1.4$	120	±10
$1.4 < t \leq 1.6$	105	±10
$1.6 < t \leq 1.8$	95	±10
$1.8 < t \leq 2.0$	90	±10
$2.0 < t \leq 2.5$	70	±10

表 6 HC420LA 钢的化学成分 (%, 质量分数)							
Table 4 Chemical compositions of HC420LA steel							
(%, mass fraction)							
C	Mn	S	P	Si	Als	Nb	Ti
0.08	1.05	0.010	0.015	0.08	0.041	0.034	0.029

表 7 HC420LA 钢的横向力学性能			
Table 5 Horizontal mechanical properties of HC420LA steel			
参数	屈服强度 $R_{eL}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ /%
数值	459	563	19.5

4 工业生产

4.1 工业试制

国内某汽车钢板材生产商按本文设计工艺试生产了 HC420LA 冷轧低合金高强钢，材料化学成分如表 6 所示，材料的力学性能如表 7 所示，试样为

GB/T 228.1—2021<sup>[13]</sup>中的 P6 试样，方向为横向。  
HC420LA 钢的显微组织为铁素体和渗碳体，晶粒尺寸较为均匀，平均晶粒度约为 11 级。纵向组织中部分晶粒呈一定的方向性，说明存在再结晶不充分的现象，这也是冷轧低合金高强钢显微组织的普遍特点，如图 1 所示。

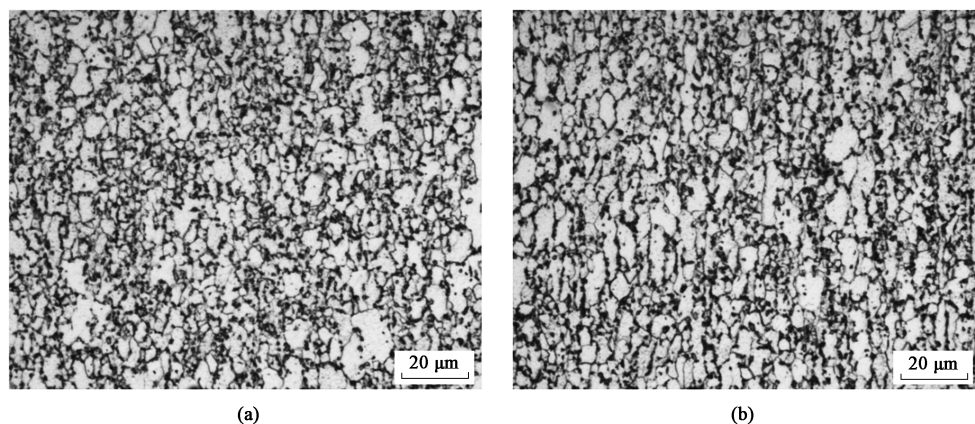


图1 HC420LA 钢的金相组织

(a) 横向 (b) 纵向

Fig. 1 Metallographic structures of HC420LA steel

(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

## 4.2 产品应用性能

### 4.2.1 成形曲线

选择通用板材成形试验机, 使用刚性凸模对试样进行胀形的方法获得成形极限曲线。刚性凸模胀形试验时, 将一侧表面印有圆网格的试样置于凹模与压边圈之间。试验时, 在凸模力作用下试样产生胀形变形。其表面上的圆网格发生畸变, 当变形区某个局部产生缩颈或破裂时, 停止试验。使用网格应变分析系统对各试件进行应变分析, 得到各点的表面极限应变值, 进一步得到成形极限图。

本次试验选择厚度为 1.6 mm 的 HC420LA 钢, 试样的长度为 180 mm, 宽度分别为 180、160、140、120、100、80、60、40 和 20 mm。将印有圆网格的试件在板材成形试验机上进行胀形试验。通过改变试件尺寸、试件和凸模之间润滑进行不同应变路径下的刚模胀形试验, 最终得到的成形极限曲线如图 2 所示。

成形极限分析如下: (1) 在平面应变状态下, 应变  $\varepsilon_2=0$ , HC420LA 钢的极限应变值为 0.35; (2) 在双向等拉状态下, 应变比  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  为 1, HC420LA 钢的极限应变值为 0.47; (3) 在单拉状态下, 应变比  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  为 -0.5, HC420LA 钢的极限应变值为 0.54。

HC420LA 钢在平面应变特征点处的极限应变值为 0.26, 主要由于 HC420LA 钢为单一铁素体组织, 其组织均匀变形更协调。

### 4.2.2 扩孔性

选择厚度为 1.2 mm 的 HC420LA 钢取样进行试验, 切取 3 块 100 mm×100 mm 试样。将 3 块试样采用冲孔形式加工出  $\Phi 10$  mm 的中心孔, 然后进行扩

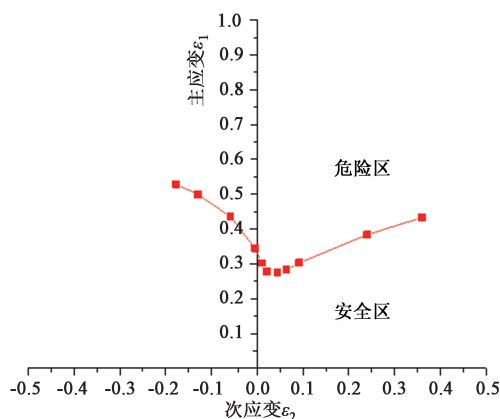


图2 HC420LA 钢的成形极限图

Fig. 2 Forming limit diagram of HC420LA steel

孔试验, 毛刺朝向与凸模运动方向一致。采用游标卡尺测量试样破裂前后的圆孔内径  $D_0$ 、 $D_f$ , 扩孔率  $\lambda$  作为金属薄板的扩孔性能指标, 同时在试验过程中观察裂纹起始点及裂纹扩展方向。

$$\lambda = \frac{D_f - D_0}{D_0} \times 100\% \quad (1)$$

扩孔率结果见表 8。从试验数据来看, HC420LA 钢具有较高的扩孔率, 平均扩孔率可达到 90%, 较高的扩孔性能主要得益于其铁素体单相组织。另外, 该材料具备较高的屈强比, 具有良好的冷成形性。

统计某汽车钢生产企业按该工艺生产 HC420LA 钢的数据, 屈服强度为 433~492 MPa、抗拉强度为 510~581 MPa、断后伸长率为 18.5%~25.5%、过程能力指数  $cpk$  为 1.33, 该材料具有较好的成形性能和质量稳定性。稳定应用于国内多款车型前纵梁及纵梁加强板等零件, 年供货量为 12000 t。



表 8 HC420LA 钢的扩孔性能

Table 8 Hole expansion performance of HC420LA steel

试样	1	2	3	平均值
扩孔率/%	88	92	90	90

5 结论

(1) 采用 C-Mn-Nb-Ti 复合微合金成分设计方法,通过实施热模拟试验,确定了连续退火工艺与产品性能之间的联系,并成功识别了关键的工艺控制参数。在此基础上,开发了一种新型冷轧低合金高强钢——HC420LA 钢,该材料不仅具有出色的力学性能,还具备优异的折弯性能,其为单相铁素体组织,整体变形过程更协调,具有较好的冷弯及扩孔性能。

(2) 利用热模拟试验,探究了退火温度和退火速度对材料各向异性的影响,并观察了成品的微观结构。研究发现,再结晶的不完全性是导致各向异性问题的主要原因,提升退火温度和减缓退火速度有助于减少材料的各向异性。

参考文献:

[1] 高古辉, 桂晓露, 安佰锋, 等. 终冷温度对 Mn 系超低碳 HSLA 钢组织及低温韧性的影响 [J]. 金属学报, 2015, 51 (1): 21-30.

Gao G H, Gui X L, An B F, et al. The influence of the final cooling temperature on the microstructure and low-temperature toughness of Mn-based ultra-low carbon HSLA steel [J]. Acta Metal. Sin., 2015, 51 (1): 21-30.

[2] Sung H K, Shin S Y, Hwang B, et al. Effects of cooling conditions on microstructure, tensile properties, and charpy impact toughness of low-carbon high-strength bainitic steels [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2013, 44 (1): 294-302.

[3] Schino A D, Guarnaschelli C. Effect of microstructure on cleavage resistance of high-strength quenched and tempered steels [J]. Materials Letters, 2009, 63 (22): 1968-1972.

[4] 康华伟, 张卫卫, 尹翠兰. 260~420 MPa 级汽车用冷轧低合金高强钢的生产过程能力分析 [J]. 金属世界, 2023 (1): 71-74.

Kang H W, Zhang W W, Yin C L. Analysis of process capability for cold-rolled low-alloy high-strength steel for automotive use with yield strength of 260-420 MPa [J]. Metal World, 2023 (1): 71-74.

[5] 陈俊, 唐帅, 刘振宇, 等. 冷却方式对 Nb-Ti 微合金钢组织和性能及沉淀行为的影响 [J]. 金属学报, 2012, 48 (5): 441-449.

Chen J, Tang S, Liu Z Y, et al. The effect of cooling method on the microstructure, properties and precipitation behavior of Nb-Ti microalloyed steel [J]. Acta Metal. Sin., 2012, 48 (5): 441-449.

[6] 高永旭, 杨跃标, 褚晓红, 等. 退火工艺对 Nb-Ti 微合金化低合金高强钢组织性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2023, 35 (4): 454-461.

Gao Y X, Yang Y B, Chu X H, et al. Effect of annealing process on microstructure and properties of Nb-Ti microalloyed low alloy high strength steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35 (4): 454-461.

[7] 杨源远, 魏晓东, 黄利, 等. 冷轧 HC340LA 低合金高强钢的连续退火工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (13): 94-96, 102.

Yang Y Y, Wei X D, Huang L, et al. Study on continuous annealing process of cold rolled HC340LA low alloy high strength steel [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (13): 94-96, 102.

[8] 孔宁, 杨迪, 张杰, 等. 含磷高强钢板拉矫破鳞过程的氧化皮剥离机理 [J]. 钢铁, 2021, 56 (1): 59-68.

Kong N, Yang D, Zhang J, et al. Peel mechanism of high strength steel plate containing phosphorus during tension correction of scale breaking [J]. Iron & Steel, 2021, 56 (1): 59-68.

[9] 曹建国, 江军, 邱澜, 等. 新一代高技术宽带钢冷轧机全机组一体化板形控制 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (7): 1584-1591.

Cao J G, Jiang J, Qiu L, et al. A new generation of high-tech wide strip cold rolling mill integrated plate shape control [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (7): 1584-1591.

[10] 何平, 王巍, 李群芳, 等. 等温温度对 Ti-Mo 微合金高强双相钢相变及组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2024, 45 (8): 146-153.

He P, Wang W, Li Q F, et al. Effect of isothermal temperature on phase transformation and microstructure properties of Ti-Mo microalloy high-strength duplex steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45 (8): 146-153.

[11] 陈浩炜, 李吉航, 战东平. 冷作模具钢中碳化物控制技术的研究进展 [J]. 钢铁研究学报, 2024, 36 (7): 827-843.

Chen H W, Li J H, Zhan D P. Research progress of carbide control technology in cold working die steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36 (7): 827-843.

[12] 康涛, 陈斌, 赵征志, 等. 600 MPa 级低合金高强钢的组织调控与工艺优化 [J]. 中国冶金, 2019, 29 (9): 45-50.

Kang T, Chen B, Zhao Z Z, et al. Microstructure control and process optimization of 600 MPa grade low alloy high strength steel [J]. China Metallurgy, 2019, 29 (9): 45-50.

[13] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].

GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].