

拉伸变形及烘烤对HC180B烘烤硬化钢微观结构与性能的影响

宋青¹, 王立辉², 潘应君^{1*}, 齐建军², 幸报¹

¹武汉科技大学材料与冶金学院, 湖北 武汉

²河钢材料技术研究院, 河北 石家庄

收稿日期: 2022年11月28日; 录用日期: 2023年2月16日; 发布日期: 2023年2月23日

摘要

利用材料万能试验机、透射电镜(TEM)等手段对烘烤硬化钢HC180B烘烤前后的力学性能、析出相及位错进行了研究, 结果表明, 经2%拉伸变形、烘烤处理后的HC180B钢内位错数量逐渐增加, 位错缠结, 屈服强度相较于变形前提高了2 MPa及73 MPa, 并保持良好的延伸率、n值和r值。烘烤后HC180B钢内MnS、CuS、AlN等大尺寸析出相的数量减少, Ti、Nb的碳氮化物析出大量出现, 且Nb的碳化物析出依附于Ti的碳氮化物以复合析出形式出现。

关键词

烘烤硬化钢, 力学性能, 析出相, 位错

The Effect of Stretching and Baking on the Micro Structure and Properties of HC180B Bake-Hardening Steel

Qing Song¹, Lihui Wang², Yingjun Pan^{1*}, Jianjun Qi², Bao Xing¹

¹School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

²Hegang Materials Technology Research Institute, Shijiazhuang Hebei

Received: Nov. 28th, 2022; accepted: Feb. 16th, 2023; published: Feb. 23rd, 2023

Abstract

The mechanical properties, precipitates and dislocations of bake-hardening steel HC180B before

*通讯作者。

文章引用: 宋青, 王立辉, 潘应君, 齐建军, 幸报. 拉伸变形及烘烤对 HC180B 烘烤硬化钢微观结构与性能的影响[J]. 材料科学, 2023, 13(2): 76-82. DOI: 10.12677/ms.2023.132010

and after baking were studied by means of material universal testing machine and transmission electron microscope (TEM). The results showed that after 2% tensile deformation and baking treatment, the number of dislocations in HC180B steel gradually increases, dislocations are entangled, and the yield strength increases by 2 MPa and 73 MPa compared with that before deformation, and maintains good elongation, n value and r value. After baking, the number of large-size precipitates such as MnS, CuS, and AlN in HC180B steel decreases, and a large number of Ti and Nb carbonitrides appear, and Nb carbides precipitate in the form of composite precipitations depending on Ti carbonitrides.

Keywords

Bake Hardening Steel, Mechanical Properties, Precipitation, Dislocation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着汽车行业对节能减排的要求愈发严格,烘烤硬化钢(BH钢)在汽车制造业当中被更加广泛的使用。烘烤硬化钢作为一种高强钢而常被用于车身外覆盖件,它的特点是在超低碳钢中添加微量的 Nb、Ti 元素,与钢中部分碳氮原子结合形成固溶间隙原子以此保证有较好的深冲性能,同时添加一定量的 P, Mn 元素来保证烘烤硬化钢的强度[1] [2] [3] [4]。由于在未烘烤涂漆前具有良好的深冲性能易于成形,在冲压以及烘烤涂漆之后,因钢基内位错密度增加、C、N 元素向位错处移动钉扎位错,故能获得较高的屈服强度[5]。这就更好地解决了钢板成形性能和抗凹陷性能二者间的矛盾。

目前有文献研究了微合金化超低碳烘烤硬化钢退火钢板的组织性能,并对其烘烤硬化特性和机理进行了探索,但是,烘烤硬化钢在烘烤处理前后的析出相、位错及钢板组织性能具体变化规律还有待进一步深入研究[6]-[11]。本文主要对河钢集团生产的烘烤硬化钢 HC180B (冷轧连退板)在 2%的拉伸变形及 2%拉伸变形后烘烤的状态下,探究钢板力学性能、析出相及位错的变化规律,为揭示烘烤硬化钢的硬化机理及实际生产提供理论依据。

2. 实验材料和方法

2.1. 实验材料

实验材料为河钢集团生产的 180 MPa 超低碳烘烤硬化钢牌号为 HC180B (冷轧连退板)。在型号为 ZGJW0.05-100-2.5 的 50 kg 真空感应炉中进行冶炼,浇注后轧制成 3.0 mm 厚的热轧钢板,终轧温度为 920℃,再由试验冷轧机轧制成 0.7 mm 厚的冷轧钢板后进行退火处理。钢板化学成分如表 1 所示。经过 2%的拉伸应变,随后在 170℃烘烤 20 min (GB/T 20564.1)。分别得到变形前、变形后、烘烤后的三组实验样,将其分别编号为 1#, 2#, 3#。实验条件如表 2 所示。

2.2. 实验方法

HC180B 钢的性能测试在意大利 Cesare GALDABINI 公司的 GALDABINI SUN10 材料万能试验机上进行,试样加工和测试条件均按 GB /T228-2002 标准执行,同时烘烤硬化值(BH)的测定严格按照 GB/T 24174-2022 标准进行测定,由预应变为 2%时对应的流变应力与随后经 170℃ × 20 min 烘烤处理后再次

拉伸时屈服应力的差值而定。

利用透射电镜观察钢板中析出相的形貌、组成、尺寸和钢内位错分布情况。为了更清楚观测到钢内析出相特征,首先采用二次复型法制备透射电镜实验样,再利用 Ni 网捞出放在 JEM-F200 透射电镜下进行观察。为了保证实验结果具有统计性,对烘烤前后实验样在十万倍率下分别连续拍摄 20 个视场,并利用 Nano Measurer 软件对拍摄视场中的析出相数量和尺寸进行统计。

Table 1. Chemical composition of HC180B steel (wt%)

表 1. HC180B 钢的化学成分(质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Nb	N	Ti
0.00168	0.00612	0.17258	0.02078	0.01029	0.00951	0.00298	0.0067

Table 2. Experimental condition

表 2. 实验条件

试样编号	实验条件
1#	原始状态
2#	经过 2% 预拉伸变形
3#	经过 2% 预拉伸变形及 170℃ 烘烤 20 min

为了清晰观察位错的分布以及变化情况,使用电解双喷法制备透射样品。用砂纸将厚度为 0.7 mm 的 HC180B (冷轧连退板)磨制到 60 μm 以下,冲成 $\Phi 3$ mm 的薄片用 10% 的高氯酸 + 冰醋酸溶液作为电解液然后在型号为 Struers/TenuPol-5 电解双喷仪上进行减薄处理,电压参数为 40 V。再利用 JEM-F200 透射电镜在对试样进行观察,加速电压为 200 KV。

3. 结果与讨论

3.1. 拉伸变形及烘烤对 HC180B 钢力学性能的影响

利用液压拉伸机对 2% 拉伸变形前后和烘烤后的 HC180B 钢进行拉伸性能测定,包括屈服强度(R_{el})抗拉强度(R_m)断裂延伸率(A_{80mm})塑性应变比(r 值)、应变硬化指数(n 值)和烘烤硬化值(BH)。具体数据如表 3 所示。结果表明,在拉伸变形前存在较为良好的伸长率 A_{80} 、塑性应变比即 r 值、应变硬化指数即 n 值,屈服强度和抗拉强度也都达标(GB/T 20564.1);经过 2% 拉伸变形后其屈服强度增加 2 MPa,此时所对应的最大应力 R_{t2} 为 244.5 MPa;在进行 2% 预拉伸再烘烤后的试验钢其屈服强度较变形前提升了 73 MPa,计算得此时 BH 值为 33.5 MPa,加工硬化阶段为 39.5 MPa,伸长率、 r 值、 n 值则是存在微小范围波动,但仍然保持良好的综合力学性能。拉伸变形再烘烤强度大幅度升高的主要因素可能与碳氮化物沉淀质点和位错及晶界的相互作用有关。

Table 3. Mechanical properties data of HC180B steel

表 3. HC180B 钢的力学性能数据

处理方式	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A_{80mm}/\%$	r_{90}	n_{90}	BH/MPa
未拉伸变形	205	328	42.5	2.42	0.21	-
2% 拉伸变形	207	-	-	-	-	-
2% 拉伸变形再烘烤	278	331	42	2.48	0.20	33.5

3.2. 烘烤对 HC180B 钢析出相的影响

烘烤硬化是由于钢中的固溶碳重新分布所引起的，固溶碳在获得能量后向位错处或晶界处进行偏聚，形成柯式气团，且可能进一步产生微小的纳米析出相，它们阻碍位错的运动，提高钢的强度[12]。而本文对烘烤后的试验钢进行了研究，得到 HC180B 钢烘烤前后的典型析出相形貌如图 1、图 2 所示，图 1 中 I、II、III 为 HC180B 钢中析出相的衍射花样标定图。由于 2% 拉伸变形对钢板内部析出相影响并不大故此处理仅针对烘烤前后的析出相的变化做讨论。如图 1(a)、图 2(a)所示，烘烤处理前存在有 MnS、CuS、AlN 不规则状和近球状的复合析出相，尺寸大小在 100~200 nm 之间，除此之外还有呈现矩形状态的 Ti(C、N)析出相，尺寸大小在 10~200 nm 之间，未发现有明显的 Nb 元素或其化合物的存在。烘烤处理后，析出相变化如图 1(b)、图 2(b)所示，MnS、CuS、AlN 大尺寸析出相的数量有所减少，并且新出现了颗粒状的 NbC 析出相，其尺寸约在几个或十几个纳米之间，依附于矩形的 Ti(C、N)相析出。这可能是当温度从室温升高 170℃时，钢内固溶的 C、N 原子不断向饱和的气团偏聚，然后以碳化物的形式析出。由于 C、N 元素的含量微量且受碳膜的影响，因此扫描过程中 C、N 的分布并不明显。

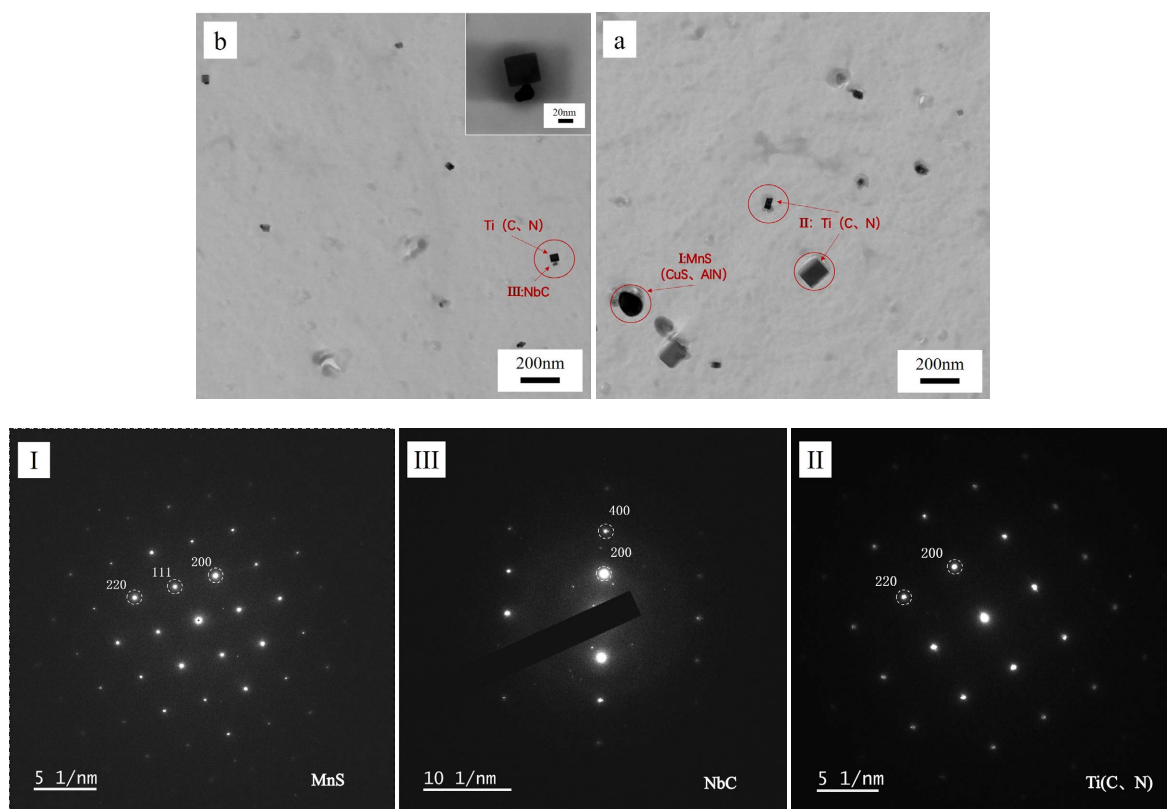


Figure 1. Precipitated phase and diffraction pattern of HC180B steel before and after baking: (a) Before baking; (b) After baking. I, II, III are (a) (b) diagrams marked with corresponding diffraction patterns

图 1. HC180B 钢烘烤前后析出相和衍射花样：(a) 烘烤前；(b) 烘烤后。I、II、III 为(a) (b)图中标注析出相对应衍射花样

为了研究烘烤对钢内析出相尺寸和分布的影响，利用 Nano Measurer 软件对析出相进行统计分析，结果如图 3 所示。在烘烤前、后，钢板内析出相平均尺寸分别为 41 ± 2 nm 和 38 ± 2 nm，析出相分布密度分别为 $8 \times 10^5/\text{mm}^2$ 和 $11.4 \times 10^5/\text{mm}^2$ 。烘烤处理后，钢内析出相平均尺寸略微降低、分布密度升高的现象可能与烘烤处理诱导 NbC 纳米颗粒的析出有关。

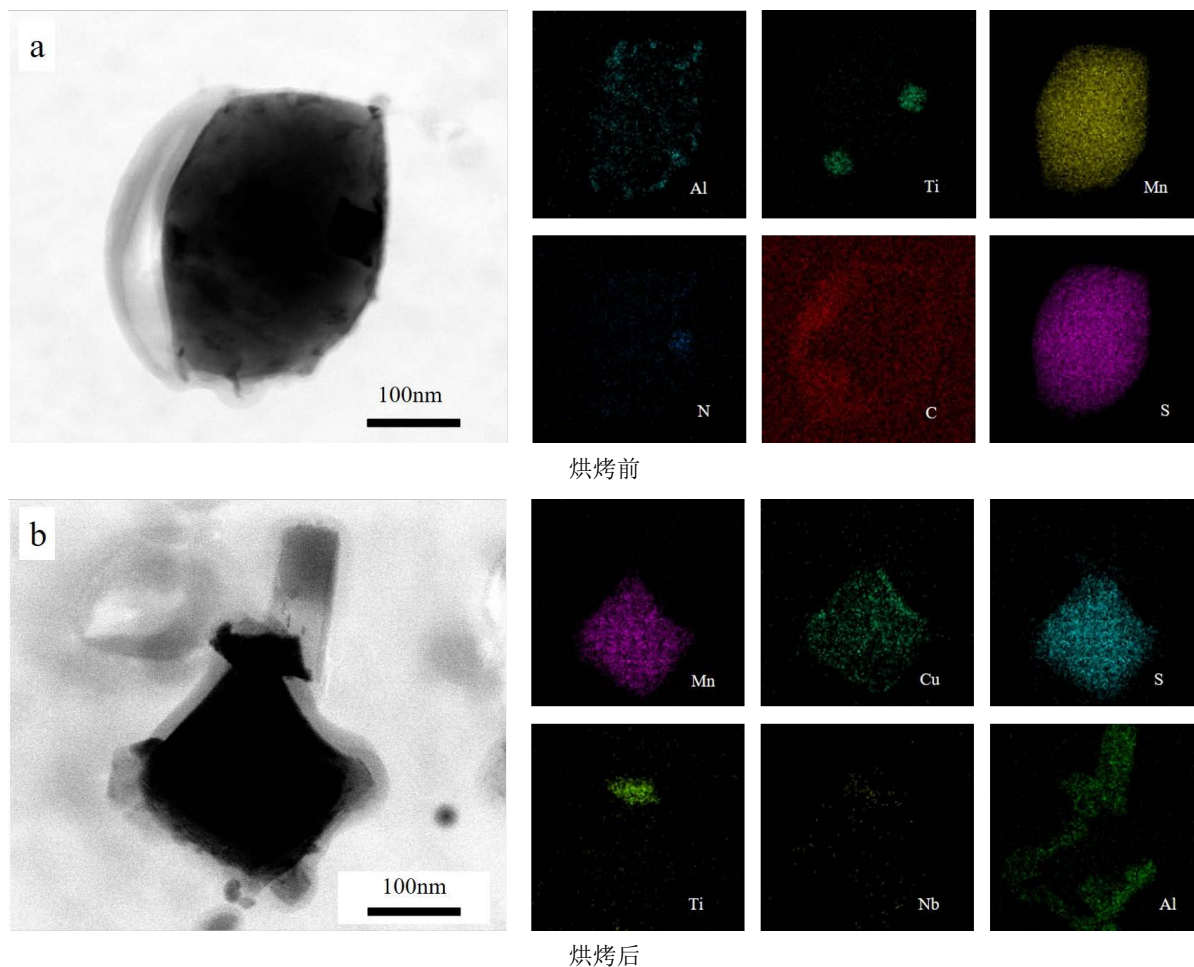


Figure 2. Morphology and composition analysis of precipitated phase in HC180B steel
图 2. HC180B 钢内析出相形貌及其成分分析

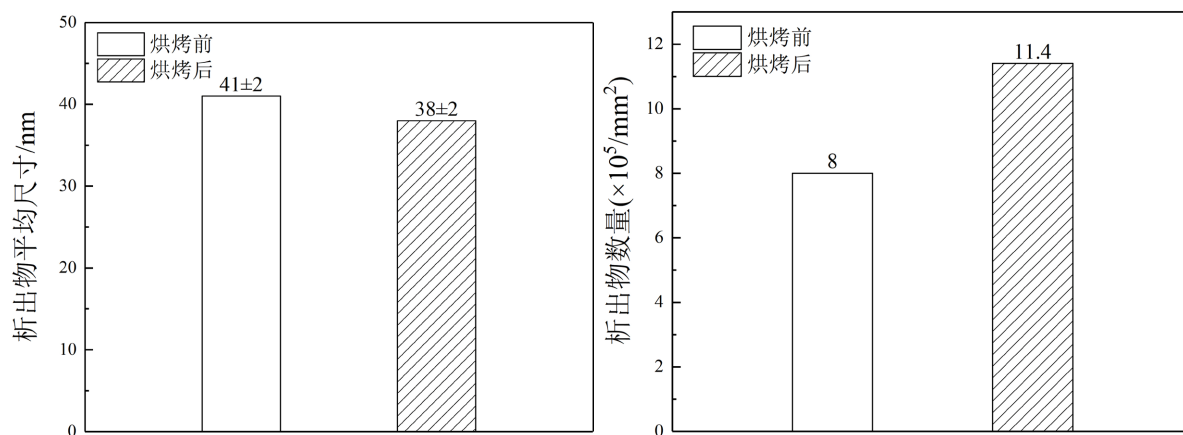


Figure 3. Size and distribution density of precipitates before and after baking HC180B steel
图 3. HC180B 钢烘烤前后析出相尺寸和分布密度

3.3. 拉伸变形及烘烤对 HC180B 钢位错的影响

图 4 给出了 HC180B 钢各状态下钢中位错变化情况，首先在原始状态下即变形前如图 4(a)所示，晶

界及晶内都存在少量位错以及少量且分散的析出相,同时晶界与晶体内部较为完整。经过 2% 预拉伸变形后如图 4(b)所示,在晶界附近以及晶内产生了大量位错,同时位错曲折且相互缠结。在烘烤过后的钢内部变化如图 4(c)所示,位错进一步增加,并可观察到有细小的颗粒状 Ti、Nb 碳化物析出相存在于晶体的内部,且析出相周围位错相互缠结的现象变得更加强烈。

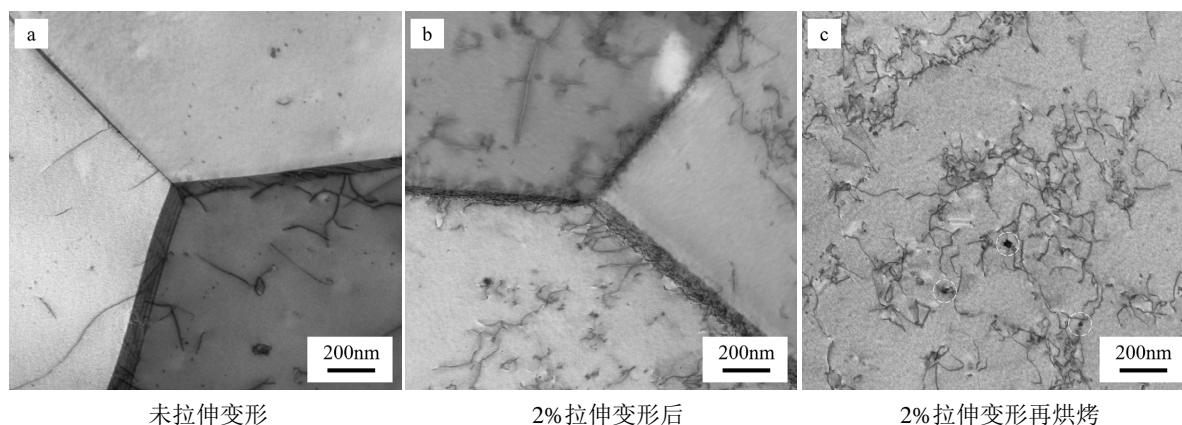


Figure 4. Dislocation variation of HC180B steel
图 4. HC180B 钢位错变化情况

出现这种现象的原因可能是一方面在施加预变形后,金属在塑性变形时,晶粒发生滑移,钢的内部会产生位错,位错塞积,相互缠结,因而钢板的屈服强度得到提升;另一方面,钢在 170℃ 温度下烘烤时,钢中的固溶原子得到能量向饱和气团处移动,同时在位错处析出细小的 Ti、Nb 碳化物颗粒,阻碍位错的运动,进一步提高钢的屈服强度。

4. 结论

- 1) 经 2% 拉伸变形及烘烤后的 HC180B 钢其屈服强度升高, n 值和 r 值则没有明显变化。
- 2) 烘烤前, HC180B 钢内部存在的析出相主要是 MnS、CuS、AlN 以及 Ti(C、N), 烘烤后新出现了颗粒状的 NbC 析出相, 其尺寸约在几个或十几个纳米并依附于矩形的 Ti(C、N) 相析出。
- 3) 位错密度升高、位错塞积缠结、固溶在钢基内部的 C、N 原子以及在位错处析出细小的 Ti、Nb 碳化物纳米颗粒阻碍位错的运动是拉伸变形及烘烤后 HC180B 钢屈服强度升高的主要诱因。

参考文献

- [1] Yuan, X., Li, W., Pang, Q., *et al.* (2018) Study on the Performance and Strain Aging Behavior of Solid-Solution State Low-Carbon Steel. *Materials Science and Engineering: A*, **726**, 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.099>
- [2] Baker, L.J., Parker, J.D. and Daniel, S.R. (2002) Principle of Bake-Hardening of Ti-Nb Ultra-Low-Carbon Steel. *Materials Science and Technology*, **18**, 541. <https://doi.org/10.1179/026708302225001741>
- [3] 韩荣, 刘洪喜, 尉文超, 等. Ti-V-Mo 微合金化 22MnB5 钢中析出相及其强化作用[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 127-138.
- [4] 韩赞, 邱木生, 邹英, 等. 高塑性应变比 Ti-IF 钢组织性能及析出相[J]. 钢铁, 2021, 56(3): 77-83.
- [5] Badkoobeh, F., Nouri, A. and Hassannejad, H. (2020) The Bake Hardening Mechanism of Dual-Phase Silicon Steels under High Pre-Strain. *Materials Science and Engineering: A*, **770**, Article ID: 138544. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138544>
- [6] 叶仲超, 段小平. 烘烤硬化钢的硬化特性及机理[J]. 钢铁研究, 2011, 39(1): 35-37. <https://doi.org/10.12677/MEng.2014.12006>
- [7] 陈继平, 康永林, 郝英敏, 等. Ti+Nb 超低碳烘烤硬化钢的组织 and 性能研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(6): 13-16.

- [8] Lee, T.-W., Kim, S.-I., Hong, M.-H., *et al.* (2014) Microstructural Characterization and Thermodynamic Analysis of Precipitates in Ultra-Low-Carbon Bake Hardened Steel. *Journal of Alloys and Compounds*, **582**, 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.072>
- [9] 金晓龙, 王旭, 刘仁东, 等. 烘烤时间对大晶粒低碳钢烘烤硬化性能的影响[J]. 上海金属, 2018, 40(6): 45-49.
- [10] 邝春福. 预应变与烘烤温度对低碳钢和双相钢组织性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4): 150-156.
- [11] 汪勇, 李光强, 刘玉龙, 等. Nb 微合金化对取向硅钢常化板中析出物特征及组织和织构的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(7): 207-212.
- [12] Ballarin, V., Perlade, A., *et al.* (2009) Mechanisms and Modeling of Bake-Hardening Steels: Part II. Complex Loading Paths. *Metallurgical & Materials Transactions A*, **40**, 1375-1382. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9812-6>