

## 平整和自然时效对超低碳烘烤硬化钢板性能的影响

崔岩<sup>1,2</sup> 胡吟萍<sup>3</sup> 王瑞珍<sup>2</sup> 雍岐龙<sup>1,2</sup>

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 650091; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081;

3 武汉钢铁(集团)公司研究院, 武汉 430080)

**摘要** 研究了平整率(0~3.3%)和自然时效对 830 ℃退火 0.7 mm 超低碳烘烤硬化钢板(%:0.003 0C、0.008Nb-0.003Ti、0.003 0N 和 0.003 0C、0.012Nb-0.012Ti、0.004 2N)力学性能和烘烤硬化性能的影响。结果表明,最初随平整率增加,由于柯氏气团减少和位错密度增加,屈服强度降低;当 0.008Nb-0.003Ti 钢平整率达到 0.48%, 0.012Nb-0.012Ti 钢平整率达到 0.26% 时,屈服强度降至最低;平整率继续增加由于冷加工硬化增强,钢的屈服强度升高。平整率过低和过高,均会导致烘烤硬化性能下降。平整率控制在 0.5%~1.5% 时,钢板能获得较低的屈服强度、较高的断后伸长率和最大的烘烤硬化性能。钢板经自然时效 3 个月,烘烤硬化性能和延伸率下降。

**关键词** 平整 烘烤硬化 屈服强度 延伸率 自然时效

## Effect of Temper Rolling and Natural Aging on Properties of Ultra-Low Carbon Bake-Hardening Steel

Cui Yan<sup>1,2</sup>, Hu Yiping<sup>3</sup>, Wang Ruizhen<sup>2</sup> and Yong Qilong<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650091;

2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

3 Research and Development Institute, WISCO, Wuhan 430080)

**Abstract** The effect of temper rolling (0~3.3%) and natural aging on mechanical properties and bake-hardening performance of 0.7 mm ultra-low carbon bake-hardening steels plate (%: 0.003 0C, 0.008Nb-0.003Ti, 0.003 0N and 0.003 0C, 0.012Nb-0.012Ti, 0.004 2N) annealed at 830 ℃ has been studied. Results show that at beginning with increasing temper elongation, due to decrease of Cottrell atmosphere and increase of dislocation density, the yield strength of steels decreases, as the temper elongation of 0.008Nb-0.003Ti steel and 0.012Nb-0.012Ti steel increases respectively up to 0.48% and 0.26%, the yield strength of steels decreases to minimum; then with further increasing temper elongation, due to enhancement of cold work hardening, the yield strength of steel increases. The temper elongation too low and too high lead up to decrease of hake hardening performance. To control temper elongation 0.5%~1.5% is available to get lower yield strength, higher tensile fracture elongation and excellent bake hardening performance of steel. With natural aging for 3 months, the bake hardening performance and the elongation of steel plate degrade.

**Material Index** Temper, Bake Hardening, Yield Strength, Elongation, Natural Aging

由于温室效应的加剧和能源供应的紧张,生产节能环保的汽车是汽车业发展的主要趋势。节能降耗的主要措施之一是车体轻量化,减薄钢板。为保证抗凹性,减薄后的钢板又要求高屈服强度。随着汽车车型的多样化,冲压零件的复杂化,需要有较低的屈服强度和高的  $r$  值、 $n$  值来保证钢板具备良好的冲压成型性能。超低碳烘烤硬化钢板(简称 ULC-BH 钢)的出现十分圆满地解决了这一矛盾。冲压成型前,钢板屈服强度比较低,具有软 IF 钢优良的冲压成型性能;冲成零件后在涂漆烘烤过程中钢板的屈服强度进一步提高,因此提高了零件的抗凹性能。

超低碳烘烤硬化钢板是在超低碳无间隙原子钢(IF 钢)基础上开发的新型汽车薄板,由于基体内有少量的自由 C 原子,使之经冲压成型和随后的烘烤处理后获得硬化、同时添加 P 实现固溶强化而制成

的新型优质汽车用薄板<sup>[1]</sup>。由于退火板板型较差且冲压时易产生滑移线,影响表面美观。平整是矫正板型和消除滑移线的必备过程,平整变形量对钢板的力学性能、烘烤硬化性能均有重要影响。本实验研究了平整率对超低碳烘烤硬化钢板的力学性能和烘烤硬化性能的影响,以期生产实践提供技术支持。

### 1 实验材料与方法

实验钢经过锻造、热轧成 3.5 mm 厚的热轧板,经酸洗以后,冷轧至 0.7 mm。实验钢成分见表 1,其中  $[C]_{\text{热轧}}$  表示热轧板内固溶 C 含量。由于热轧板在 710 ℃卷取冷却到温室时 NbC 析出很充分,因此  $[C]_{\text{热轧}}$  可以近似表示 Nb 完全结合 C 以后,剩余的 C 含量。采用连续退火模拟机模拟连续退火过

程,退火工艺为 830 ℃ 60 s,采用 50 ℃/s 的冷却速率冷却至室温。退火后试样进行平整处理,1# 钢平整延伸率为 0~3.3%,2# 钢平整延伸率为 0~2.8%。由于退火板经平整以后,板宽基本不变,可见平整延伸率等于平整后薄板板长的伸长率,而板厚会按平整延伸率大小等幅减薄。平整板制成力学拉伸试样以后分为两部分,一部分立即测定其力学性能和烘烤硬化性能<sup>[2]</sup>;另一部分在室温下进行自然时效,3 个月后测定其力学性能和烘烤硬化性能,以检验自然时效对性能的影响。通过室温拉伸试验,测定试验钢板的力学性能。按照国家标准(GB/T20564.1-2007)测量在 2% 应变上(模拟冲压)的流变应力和在经过 170 ℃ 热处理 20 min 后的下屈服强度的差值,即烘烤硬化值(BH<sub>2</sub> 值)。

### 2 实验结果

#### 2.1 平整延伸率对力学性能的影响

为了研究平整延伸率对钢板力学性能的影响,测量 1# 和 2# 不同固溶 C 含量的钢板不同平整率下的力学性能,见图 1。由图 1 可见,两种钢板平整延伸率对力学性能的影响基本是一致的:平整延伸率对抗拉强度(TS)和塑性应变比(*r* 值)影响不大;屈服点延伸率(*A<sub>e</sub>*)、拉伸应变硬化指数(*n* 值)、均匀变形率(*A<sub>gt</sub>*)和断后伸长率随(*A<sub>50</sub>*)均随平整率的增加而下降;当平整率达到某一临界值,屈服强度(YS)下降到最低值,而后缓慢上升。

对比图 2 中 1# 和 2# 钢的单向拉伸曲线发现:固溶 C 含量较高的 1# 钢平整率超过 0.48% 以后才消除了屈服点延伸现象,但固溶 C 含量较低的 2# 钢的平整率达到 0.26% 时就已经消除了屈服点延伸现象。可见固溶 C 含量的高低促使需要不同的平整率才能消除屈服点延伸现象。根据文献[3]报道,屈服点延伸率低于 0.5% 时,钢板在冲压过程中表面将不会产生滑移带,因此通过平整处理的钢板制成具有光滑表面的冲压件。

表 1 实验超低碳烘烤硬化钢的化学成分/%

钢板号	C	Nb	Ti	N	Als	P	Mn	Si	S	[C] <sub>热轧</sub>
1#	0.003 0	0.008	0.003	0.003 0	0.030	0.020	0.20	0.03	0.005 0	0.001 9
2#	0.003 0	0.012	0.012	0.004 2	0.015	0.055	0.30	0.03	0.004 8	0.001 4

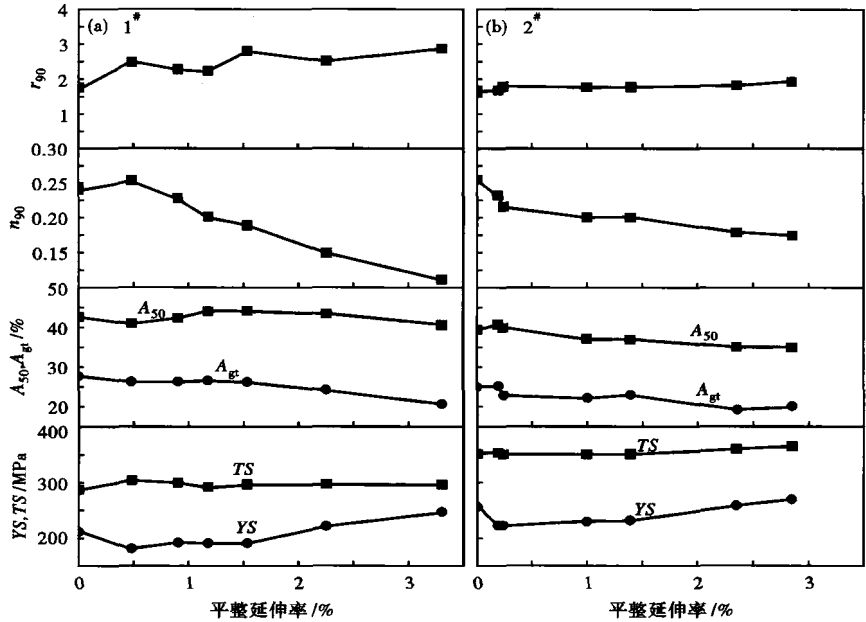


图 1 平整延伸率对 0.008Nb-0.003Ti 1# 钢板(a)和 0.012Nb-0.012Ti 2# 钢板(b)力学性能的影响

Fig.1 Effect of temper elongation on mechanical properties of 0.008Nb-0.003Ti No1 steel plate (a) and 0.012Nb-0.012Ti No2 steel plate (b)

#### 2.2 平整延伸率对烘烤硬化性能的影响

为了研究平整对烘烤硬化性能和屈服点延伸率的影响,测量 1# 和 2# 钢板不同平整率下的烘烤硬化值,见图 3。由图 3 可见,平整延伸率对烘烤硬化性能的影响很大。当平整率为 0 时,烘烤硬化性能很低,随平整率的增加,烘烤硬化值先升后降。对于固溶 C 含量较高的 1# 钢板,平整率为 0.48% 时烘烤硬化性能最高;对于 2# 钢板,平整率为 0.26% 时烘烤硬化值达到最大。图 3 显示 1#、2# 钢板的平整率分别为 0.48% 和 0.26% 时,两种钢板的屈服点延伸现象恰好消失,这说明了当平整率达到某一临界值恰好能够消除屈服点延伸现象,此时钢板的烘烤硬化性能达到最高。同时也说明固溶 C 含量较高的钢板需要更高的平整率才能够获得最大的烘烤硬化性能。平整延伸率在 0.5%~1.5%,两种成分钢板 BH 值稳定控制在较高值。

#### 2.3 自然时效

由图 4 可见,经过 3 个月放置以后,屈服强度、

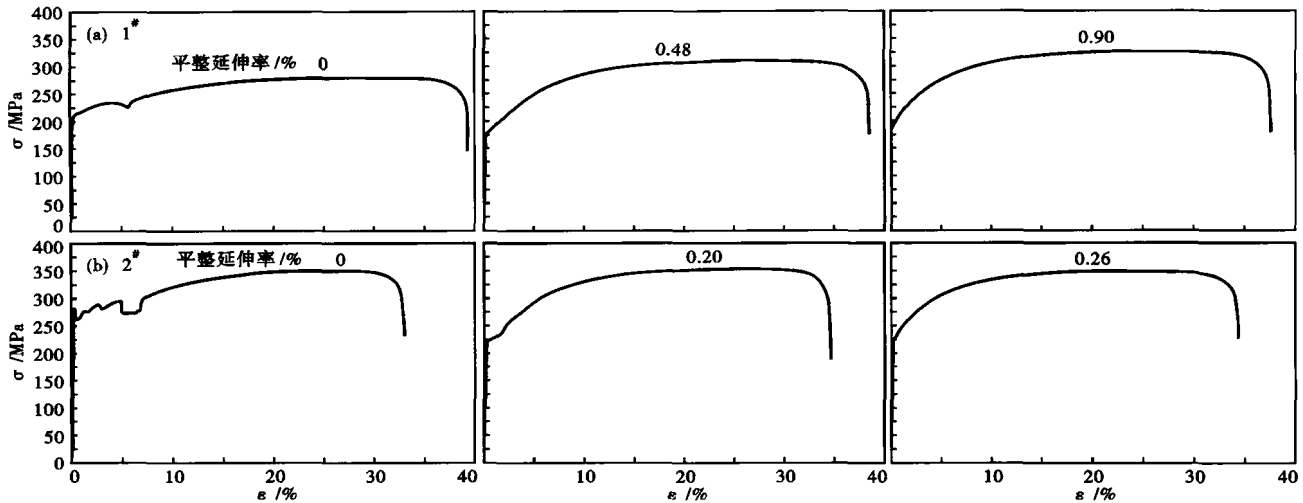


图2 平整延伸率对0.008Nb-0.003Ti 1#钢板(a)和0.012Nb-0.012Ti 2#钢板(b)的拉伸应力-应变曲线的影响

Fig. 2 Effect of temper elongation on tensile stress-strain curve of 0.008Nb-0.003Ti No1 steel plate (a) and 0.012Nb-0.012Ti No2 steel plate (b)

抗拉强度、 $n$ 值、 $r$ 值均没有显著的变化,但均匀变形率和断后伸长率均有减小,可能与自然时效过程中C原子气团的生成有关。当平整率为0.5%~2.2%时,钢板经3个月自然时效后,屈服点伸长率仍为0,可见此时生成柯氏气团的数量并不很多,因此1#钢板在0.5%~2.2%平整率范围内均为非时效钢。表2表明经3个月自然时效以后,钢板的烘烤硬化性能显著减小,可见经3个月自然时效生成一定数量C原子气团导致基体内自由C原子数量减少。

### 3 分析与讨论

由于平整前的退火钢板中存有较多柯氏气团,其屈服强度和屈服点伸长率均较高。当平整率达到一定值,位错将与气团中的C原子分离,从而消除钢板的屈服点延伸现象(图3)。退火钢板经平整处理后柯氏气团的数量减少,不仅促进屈服强度和屈服点伸长率下降,而且能增加基体内的自由C原子数量,促进烘烤硬化性能提高。平整率过低不能充分消除柯氏气团,因而不仅使屈服强度偏高,而且由于平整过程中释放的自由C原子数量较少,因而导致烘烤硬化性能偏低;平整率过高会导致冷加工硬化,造成屈服强度偏高,同时也会引起平整过程中大

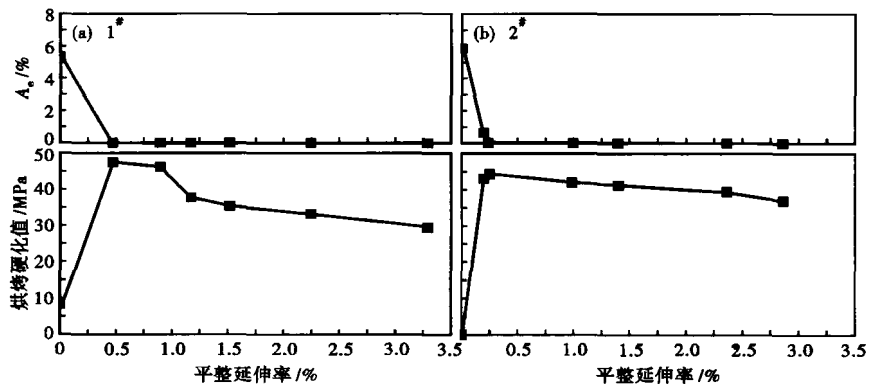


图3 平整延伸率对0.008Nb-0.003Ti 1#钢板(a)和0.012Nb-0.012Ti 2#钢板(b)烘烤硬化性能和屈服点伸长率( $A_c$ )的影响

Fig. 3 Temper elongation on bake hardening performance and yield point elongation ( $A_c$ ) of 0.008Nb-0.003Ti No1 steel (a) and 0.012Nb-0.012Ti No2 steel (b)

量位错在运动过程中与自由C原子结合,从而减少自由C原子数量。因此平整率过高和过低均不利于获得较低的屈服强度和较高的烘烤硬化性能,因此在生产中平整延伸率应控制在适宜的范围。根据前文所述,考虑成分影响,平整率控制在0.5%~1.5%时,基本能够保证获得较高的烘烤硬化性能和延伸率,以及较低的屈服强度。由于未经平整处理的退火钢板中柯氏气团的数量与钢板本身的固溶C含量有关,可以预见当固溶C含量较高时,需要更大的平整率才能消除屈服点延伸现象。

由于实验钢的两种不同成分钢板的固溶C含量( $14 \times 10^{-6}$ 和 $19 \times 10^{-6}$ )很有代表性,因此根据这两种钢板的实验结果,认为平整率在0.5%~1.5%

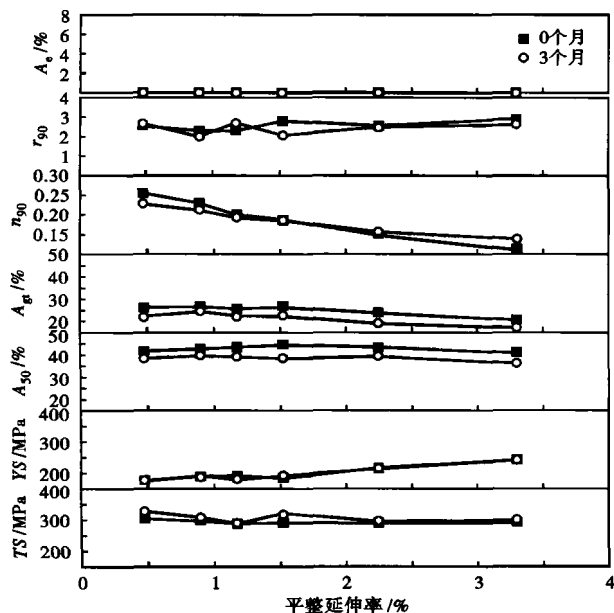


图 4 0.008Nb-0.003Ti 1# 钢板自然时效 3 个月后力学性能的变化

Fig. 4 Change of mechanical properties of 0.008Nb-0.003Ti No1 steel plate after natural aging for 3 months

表 2 0.008Nb-0.003Ti 1# 钢板自然时效 3 个月前后烘烤硬化性能 BH<sub>2</sub> 值的变化

Table 2 Change of bake hardening performance BH<sub>2</sub> value of 0.008Nb-0.003Ti No1 steel plate natural aging before and after 3 months

平整延伸率/ %	BH <sub>2</sub> 值/MPa	
	3 个月前	3 个月后
0.48	47.8	42.6
0.90	46.0	41.5
1.53	35.3	30.4
2.20	35.4	31.5

基本能保证 BH<sub>2</sub> 值稳定控制在较高值,这与一些文献的报道结果是一致的<sup>[4]</sup>。

超低碳烘烤硬化钢板在室温保存时,一部分自由 C 原子偏聚到位错处生成气团,因而使得钢板烘烤硬化性能和塑性下降, BH<sub>2</sub>、A<sub>gt</sub> 和 A<sub>50</sub> 均将减小。由于平整板在长时间放置时 C 原子会逐渐偏聚到位错处,因此可以预见当自然时效时间足够长时,由于柯氏气团的生成必然导致烘烤硬化性能和延伸率下降、屈服强度升高、屈服点延伸现象产生。考虑到自由 C 原子数量越多,柯氏气团形成速率越快<sup>[5]</sup>,因此推测当固溶 C 含量较高时,自然时效时间将会缩短。当平整率过低时,由于没有充分消除 C 原子气团,因此也会缩短自然时效时间;而当平整率过高时,位错密度较大,C 原子向位错的扩散距离较小,

因而缩短了自然时效时间。因此,推测平整率过低过高对钢板能获得稳定的抗自然时效性能均将是不利的。

#### 4 结论

(1) 随平整率增加,柯氏气团逐渐消除和位错密度增加,当平整率达到一个临界值时屈服强度降至最低,平整率继续增加由于冷加工硬化促使屈服强度升高。平整率控制在 0.5% ~ 1.5% 时,钢板能获得较低的屈服强度和较高的断后伸长率。

(2) 未经平整的退火钢板中许多 C 原子与位错结合生成气团,因此拉伸时有屈服点延伸现象,且烘烤硬化值很小。钢板经平整处理以后,由于 C 原子气团的逐渐消失从而逐步消除屈服点延伸现象,并释放了自由 C 原子,烘烤硬化性能提高。平整率过低时无法使位错挣脱 C 原子的钉扎而充分消除柯氏气团,因而烘烤硬化性能偏低。平整率过高时,平整变形过程中将产生较高密度位错,易于与自由 C 原子结合而降低有效固溶 C 量,也会导致烘烤硬化性能下降。平整率控制在 0.5% ~ 1.5% 时,烘烤硬化值稳定在较高值。

(3) 由于未经平整处理的退火板中柯氏气团的数量与钢板本身的固溶 C 含量有关。较高固溶 C 含量的钢板需要较大的平整率才能消除屈服点延伸现象。

(4) 超低碳烘烤硬化钢板经过自然时效 3 个月后,部分自由 C 原子偏聚到位错,引起烘烤硬化性能和延伸率下降。

#### 参考文献

- 1 Baker L J. Metallurgy and Processing of Ultralow Carbon Bake Hardening Steels. *Materials Science and Technology*, 2006, 18(4): 355
- 2 关小军. 超低碳高强度烘烤硬化钢板. 济南: 山东科技出版社, 2000
- 3 Christine Escher, Volker Brandenburg, Ilse Heckelmann. Bake Hardening and Ageing Properties of Hot-Dip Galvanized ULC Steel Grades. *International Symposium on Niobium Microalloyed Sheet Steels for Automotive Applications*, 2006
- 4 Bleck W, Bode R, Muschenborn W. Electro-galvanized and Hot Dip Galvanized Strip with Bake Hardening Properties for Automotive Use. *SAE Technical Paper 930025*, 1993
- 5 De A K, Vandeputte S, De Cooman B C. Static Strain Aging Behavior of Ultra Low Carbon Bake Hardening Steel. *Scripta Materialia*, 1999, 41(8): 831

崔岩(1979-),男,博士研究生,超低碳烘烤硬化钢研究。

收稿日期:2010-01-26