

## IF 钢的动态烘烤硬化

(加拿大) K. DEGHANI 等

**摘要** 对两种动态应变时效(DSA)强化方法进行了研究,以确定它们未来的工业应用潜力。这两种方法是指动态-静态烘烤硬化(DSBH)和动态烘烤硬化(DBH)。为此,将含 0.06%Ti 的 IF 钢加热到 900℃,并以 12℃/s 的速度冷却到室温。然后,在 100~250℃温度范围内,以  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  应变速率拉伸 2%~8%,并进行动态烘烤硬化处理。测定处理前后的拉伸性能。试验发现,在动态烘烤期间,动态应变时效(DSA)导致加工硬化率和最终强度显著增加。试验结果表明,对一定量的固溶碳来说,动态和然后静态时效的钢,比用常规方法烘烤硬化的钢具有更高的强度。

**关键词** IF 钢 强度 动态烘烤硬化 动态-静态烘烤硬化

### 1 前言

汽车工业追求的两个主要目标是降低车身重量和提高汽车安全性。为了实现这两个目标,对汽车钢板而言,要求减薄厚度、提高强度和改善冲压成形性能<sup>[1,2,3]</sup>。使用烘烤硬化高强度钢是能满足所有这些要求的一个重要解决方案。烘烤硬化性可使钢的屈服强度提高约 20<sup>[4]</sup>~30<sup>[5]</sup>个百分点(即 30~60MPa)<sup>[6]</sup>。通过拉伸试验测定静态(常规)烘烤硬化(SBH)值的方法示于图 1。使流变应力增加的烘烤硬化目标值为 40~60MPa,需要的固溶碳量约在 10~20ppm(1ppm =  $10^{-6}$ )之间<sup>[7]</sup>。

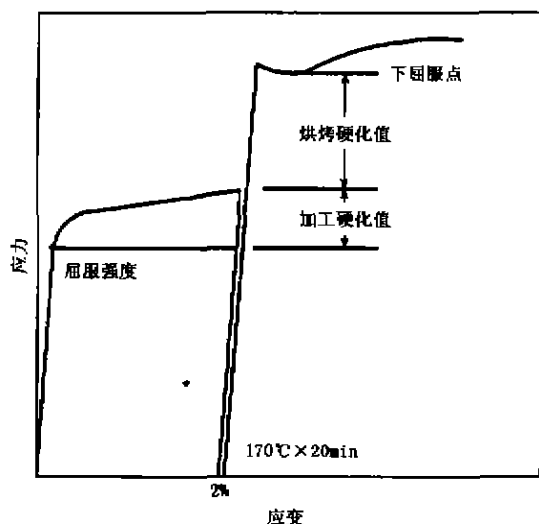


图1 用拉伸试验测定烘烤硬化值的方法

测量静态烘烤硬化值的实验步骤如下:

(1)将试样在室温下拉伸应变 2%;

(2)试样在 170℃下保温 20min;

(3)试样在室温下进行拉伸试验。

烘烤硬化值为烘烤处理后的下屈服强度减去 2%预应变后的流变应力。2%预应变和 170℃×20min 时效是使钢产生烘烤硬化的典型条件,但是有些研究人员也采用其它的预应变量、烘烤温度和烘烤时间<sup>[8,9]</sup>。

#### 1.1 固溶碳量的影响

烘烤硬化钢必须要有一定最低量的固溶碳。有了这一间隙元素,才有可能使钢的强度增加<sup>[6]</sup>。静态应变时效导致烘烤硬化的实质是间隙原子在位错上偏聚。在应变时效初期,仅由于溶质气团的形成就完成了钢的强化<sup>[6,9,10]</sup>。在气团形成的同时,碳进一步偏聚到位错上,钢的强度增加来源于使位错与气团分离所需要的附加力<sup>[6,7,9]</sup>。

钢中的固溶碳量过低,钢的烘烤硬化值也低。但过量的固溶碳则有可能导致钢的室温时效。对于获得足够的烘烤硬化效应所需要的固溶碳量,有不同的报道:5<sup>[6]</sup>、10<sup>[11]</sup>和 5~15<sup>[12]</sup>ppm。这些在室温下的固溶碳量,可以通过低碳钢、超低碳钢和极低碳钢退火后以适当的冷却速度得到。对于氮,大多数烘烤硬化钢均含有足够的铝将固溶氮除去,而只靠碳来提供烘烤硬化性<sup>[6,10]</sup>。

烘烤硬化钢可以用通常的罩式炉退火工艺生产,也可用连续退火工艺生产。

#### 1.2 罩式炉退火

在罩式炉退火的情况下,要求钢的含碳量非

常低( $<0.01\%$ <sup>[10]</sup>)。因为在这种钢中成核的位置很稀少,所以 $\text{Fe}_3\text{C}$ 的析出受抑制。即使采用较低的冷却速率,仍然有一定数量的碳保持固溶状态<sup>[6,7,9,10]</sup>。这个工艺在本模拟试验中未作研究。

### 1.3 连续退火

对于连续退火,为了使IF钢产生烘烤硬化,需要大约 $900^\circ\text{C}$ <sup>[8,9,10,13]</sup>高的退火温度。同时也要求以高的冷却速度从高的退火温度冷却下来,以使钢在室温下有足够的固溶碳存在。冷却速度通常从 $20\sim 30^\circ\text{C/s}$ <sup>[10]</sup>、 $70^\circ\text{C/s}$ <sup>[6]</sup>到 $100^\circ\text{C/s}$ <sup>[14]</sup>。在本研究工作中,采用的冷却速度是 $12^\circ\text{C/s}$ 。

$\text{Ti}^*/\text{C}$ ( $\text{Ti}^* = \text{总 Ti} - 3.42\text{N} - 1.5\text{S}$ )或 $\text{Nb}/\text{C}$ 原子比越高,连续退火所需的退火温度也越高(反之亦然)。同一退火温度下, $\text{Ti}^*/\text{C}$ 或 $\text{Nb}/\text{C}$ 越低,烘烤硬化值越高<sup>[10]</sup>。

### 1.4 动态应变时效与烘烤硬化的联系

已经发现在IF钢中有动态时效(DSA)现象<sup>[15,16,17]</sup>。本研究工作的目的是建立IF钢烘烤硬化和DSA之间的联系。根据这种联系,提出了两种新的烘烤硬化的方法,即动态烘烤硬化(DBH)和动态-静态烘烤硬化(DSBH)。这两种方法与静态烘烤硬化(SBH)相比有优点,也有缺点。因此,也讨论了工业应用的可能性。

## 2 试验方法

### 2.1 试验材料

实验室试样取自带钢生产线上的中间坯,钢板的厚度已经轧为约26mm。轧制前,初始厚度为240mm的板坯加热到 $1260^\circ\text{C}$ ,最后一道粗轧在 $1140^\circ\text{C}$ 温度进行。所研究的IF钢的成分列于表1。表2给出了该试验材料所采用的一个工业轧制规范的例子。

表1 试验用钢的化学成分

										%
C	N	Ti	Nb	S	P	Mn	Ti <sub>固</sub>	(Ti <sub>固</sub> + Nb)/C	Ti <sub>固</sub> */S	
0.0023	0.0032	0.06	0.005	0.023	0.011	0.16	0.005	1.58	1.43	

注:Ti<sub>固</sub>\*是所有的N结合成TiN以后可以与S结合的Ti的量;

Ti<sub>固</sub>\*是形成TiN和TiS以后可以用于固定C的Ti的量;

Ti<sub>固</sub>是TiN、TiS和TiC析出以后保持固溶状态的Ti的量。

表2 试验用钢板的工业轧制规范

道次	出口厚度,mm	温度,°C	道次间隔时间,s
1	215	1260	10.9
2	195	1255	10.5
3	175	1250	12.0
4	155	1245	12.1
5	130	1239	14.8
6	100	1231	15.8
7	70	1219	22.0
8	45	1195	22.1
9	26	1139	-

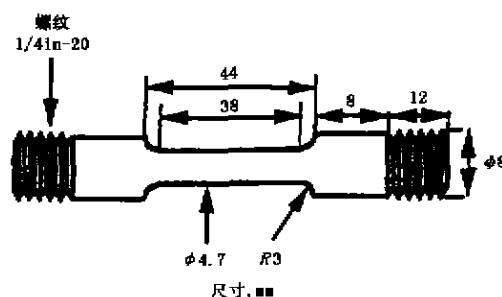


图2 拉伸试样的几何尺寸

### 2.2 拉伸试验

在高温下做拉伸试验,首先制备端部带丝扣的ASTM标准试样<sup>[18]</sup>,其纵向平行于轧向。试样尺寸如图2所示。通过夹持试样用的带丝扣肩部,可清晰地观察到时效现象,如吕德斯带的扩展、锯齿形流变、流变应力增加和延性降低。试验前将所有试样用酒精清洗,以清除可能在高温下引起应力集中的污染物。

拉伸试验在由计算机控制的MTS试验机上进行。安装在试验机框架上并用微处理器控制的钨灯辐射炉,把试样加热到所需要的高温。4个

钨灯产生的热由4个椭圆形镜面铝反射器反射到放置试样的炉子中心。试样以 $1^\circ\text{C/s}$ 的速度加热,达到试验温度后保持5min,然后进行试验。1根K型(铬-铝)热电偶焊于试样标距的中点,用于测量试样温度。试验表明,温度的偏差不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。为了确定沿试样标距温度分布是否均匀,有些试验在试样的肩部再焊1根K型(铬-铝)热电偶。结果发现这两根热电偶之间的温度变化在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内。试样和夹头封在一根石英管里,管内通氩气以尽量降低200和 $250^\circ\text{C}$ 高温试验时的氧

化程度。用水冷却夹头拉杆以防止氧化。

### 2.3 烘烤硬化方法

所有试样加热到 900℃ 并保持 60s, 然后以 12℃/s 的速度冷却到室温, 保证钢中有足够的固溶碳以产生烘烤硬化。接着在  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  应变速率下进行拉伸试验。

在选择再加热温度时, 考虑了下面的 TiC 和  $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$  的溶度积:<sup>[21]</sup>

$$\log[\text{Ti}][\text{C}]^{0.5}[\text{S}]^{0.5} = -17.405/T + 7.9 \quad (1)$$

$$\log[\text{Ti}][\text{C}] = -10.800/T + 5.02 \quad (2)$$

例如, 对于本试验用钢, 所得到的 TiC 的溶解温度是 864℃。碳和氮在  $\alpha\text{-Fe}$  中的溶解度可以用下面公式计算:<sup>[22,23,24]</sup>

$$\log[\text{C}](\text{ppm}) = 6.38 - (4040/T) \quad (3)$$

$$\text{C}(\%) = 2.55\exp(-4850/T) \quad (4)$$

$$\text{N}(\%) = 12.3\exp(-4177/T) \quad (5)$$

#### 2.3.1 DBH 方法

根据这个新方法, 试样在 100、150、200 和 250℃ 分别预拉伸应变 2%、4%、6% 和 8% (即试样被“动态”烘烤硬化)。在静止空气中冷却后, 试样在室温下进行拉伸试验。试验步骤示于图 3。通过这样的拉伸试验, 就可以得到烘烤前后的屈服强度, 从而也可得到烘烤硬化值。烘烤后的屈服强度通常用来评价材料的抗凹性<sup>[6,25]</sup>。

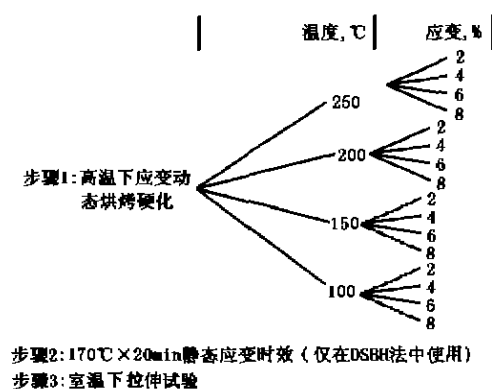


图3 DBH法(步骤1和3)和DSBH法  
(步骤1~3)的示意图

注: 步骤1和3是两种方法共用的, 而步骤2仅用于DSBH法

#### 2.3.2 SBH 法

这个方法是通常用于评价钢的烘烤硬化能力的方法。试样先在室温预拉伸应变 2%、4%、6%

和 8%, 然后在 100 和 150℃ (在空气中)、200 和 250℃ (在氩气中) 保温 20min。接着在室温下进行拉伸试验。这些步骤概括地示于图 1 中。

#### 2.3.3 DSBH 法

这是另一个产生烘烤硬化的新方法。采用 DSBH 时, 与 DBH 一样, 试样也在 100、150、200 和 250℃ 拉伸应变 2%、4%、6% 和 8%, 进行动态烘烤硬化。有些试验也在 170℃ 下进行。DBH 和 DSBH 唯一的差别在于, 在 DSBH 中试样还要进行 170℃ × 20min 静态应变时效 (这一步骤通常用于模拟常规烘烤硬化)。处理后的试样在室温拉伸至断裂。由此看来, DSBH 方法是 DBH 和 SBH 这两种方法的组合, 如图 3 所示。

## 3 结果

为了计算用于烘烤硬化的固溶碳量, 测定了钢板的时效指数, 测得的平均值为 26MPa。如参考文献 15 研究指出, 它对应的固溶碳量大约是 4ppm。这样的固溶碳量能得到的最大和最小烘烤硬化值分别为 55MPa (DSBH) 和 3MPa (SBH)。这就是说, 对于给定量的固溶碳, 动态 + 静态时效处理的钢比用常规方法烘烤硬化的钢具有更高的烘烤硬化性。

#### 3.1 DBH 法

应变和温度对烘烤硬化引起的应力增加及 DBH 处理后屈服强度的影响示于图 4。图 4(a) 表示 DBH 值随烘烤温度变化的趋势。大约在 170℃ 烘烤温度时, DBH 值达到最大, 这个温度值不因应变量大小而改变。就应变而言, 在 DBH 条件下, 2% 应变时的烘烤硬化或强度增加最大 (表 3)。应变前的屈服强度是 95MPa。经 DBH 处理后, 在室温下重新测定屈服强度。如图 4(b) 所示, 屈服强度随 DBH 应变增加而提高, 在较高的烘烤温度下趋于稳定。

#### 3.2 SBH 方法

用这种方法处理以后, 预应变和温度对烘烤硬化值和屈服强度的影响示于图 5。从图 5(a) 可以清楚看出, 在 SBH 值与预应变的关系曲线中, 当烘烤温度增高时, 最大烘烤硬化值向低预应变方向移动。这和先前的研究结果一致<sup>[8,9]</sup>。在中间温度 (150 和 200℃) 下, 观察到 3 个不同的现象: (1) 预应变低时, 烘烤硬化值随预应变增加而

增加;(2)预应变进一步增加时,烘烤硬化值随预应变增加而减小;(3)预应变更大时,烘烤硬化趋于稳定或略有增加。这与其它研究人员的发现也完全符合。预应变4%和2%,并分别在250℃和100℃烘烤,得到最大和最小的静态烘烤硬化值(26MPa和3MPa)。

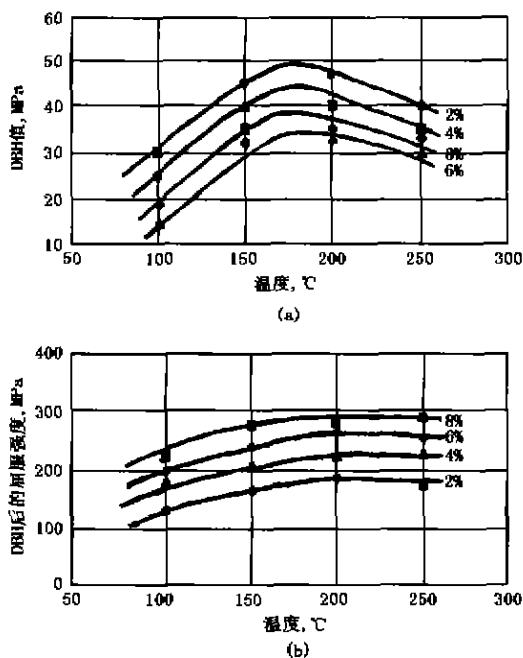


图4 温度和应变对DHB值的影响(a)及DBH后的室温屈服强度与温度的关系(b)

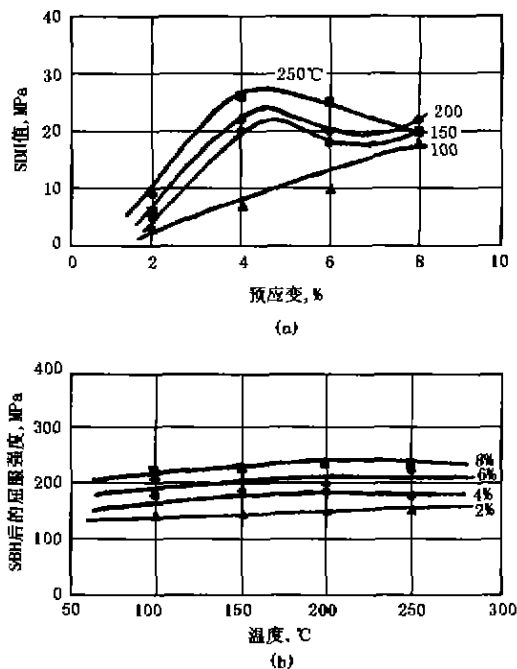


图5 温度和应变对SBH值的影响(a)及SBH后的室温屈服强度与温度的关系(b)

预应变后进行烘烤导致此后的屈服强度增加,最终趋于稳定。这一现象发生在200和250℃的温度区间内(图5(b)),这又与先前的研究结果<sup>[5,26-28]</sup>相吻合。应注意的是,应变前的初始屈服强度大约是140MPa,这比在两种动态(高温)应变情况下的初始屈服强度高出约45MPa。

表3 SBH、DBH和DSBH的特性的比较

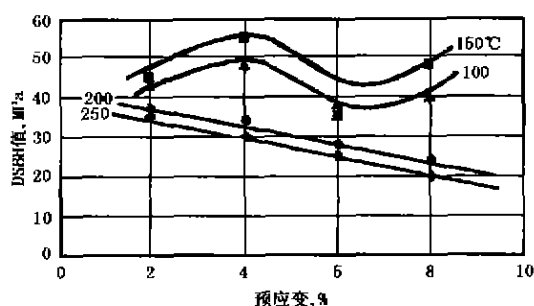
特性	SBH	DBH	DSBH
BH值	低	高(最大8×SBH)	高(最大15×SBH)
吕德斯应变	有	无	无
应变期间屈服下降	有	无	无
随后室温试验中的屈服下降	-	很少	明显
试验温度下的屈服强度	高(约150MPa)	约低45MPa	约低45MPa
加工硬化率	低	高	高
屈服强度与抗拉强度之比	低	高	高

### 3.3 DSBH方法

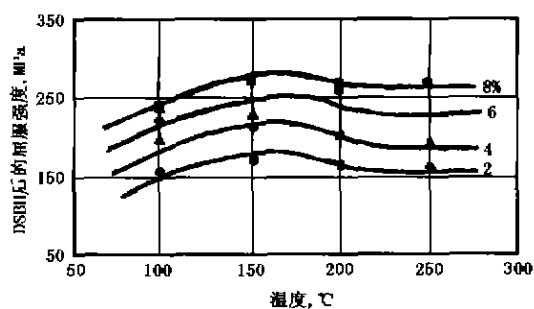
使用该方法后应变和温度对烘烤硬化值和室温下屈服强度的影响示于图6。对前一种情况(图6(a)),可观察到两种不同的现象。当后面的静态时效温度(170℃)高于动态应变温度(100和150℃)时,动态时效的影响趋于消失。在这种情况下,应变对烘烤硬化值的影响,几乎与在150和200℃下的SBH相同。相反,静态时效温度低于

动态应变温度时,烘烤硬化值随应变增加而减小。分别在150和250℃下预应变4%和8%,得到最大和最小的烘烤硬化值(55和20MPa)。

与DBH方法中的情况一样,在进行DSBH处理之前,高温屈服强度基本为95MPa不变,而时效处理后随应变增加而提高,然后基本趋于一个平台。室温屈服强度趋于平台的温度介于150和200℃之间,约在170℃左右(图6(b))。



(a)



(b)

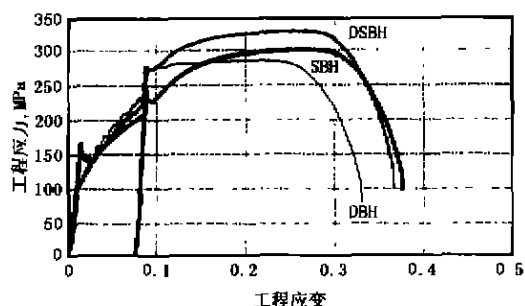
图6 温度和应变对DSBH值的影响(a)及  
DSBH后室温屈服强度与温度的关系(b)

### 3.4 DHB、SBH 和 DSBH 的比较

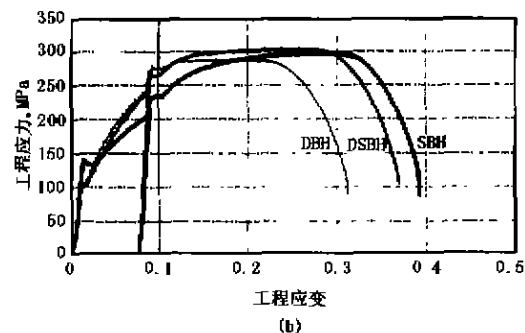
对本实验用钢的3种烘烤硬化方法进行了比较,结果示于图7~图11。很明显,最高的BH值产生于动态时效试样(即用DH和DSBH的方法)。高BH值使得加工硬化更明显,并降低吕德斯应变、预应变前的屈服强度,但明显提高了烘烤后的屈服强度值。这些因素均有利于防止钢板的翘曲、起皱、缩颈和屈服点延伸,而且烘烤后具有更高的抗凹能力。

为避免冲压成形中出现上述缺陷,要求屈服强度尽可能低、吕德斯应变几乎为零和加工硬化指数尽可能高。另外,烘烤硬化后的高屈服强度得到高的抗凹性。从图7~图11中看出,所有这些性能都可以通过动态时效得到改善。总之,采用DSBH和DBH方法,烘烤硬化产生的流变应力的增加要比用SBH方法高得多。例如,在100℃预应变2%的情况下,DSBH和DBH方法产生的烘烤硬化值,分别约是SBH方法产生的烘烤硬化值的15倍和8倍。

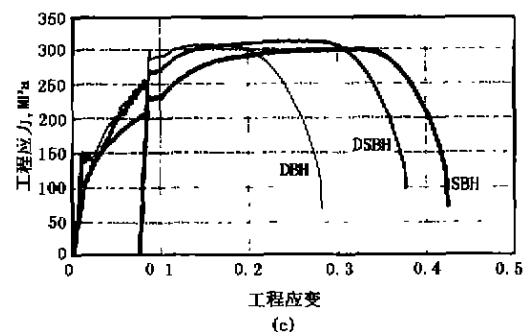
最小烘烤硬化值大约是3MPa(用SBH方法,在100℃下预应变2%),最大烘烤硬化值大约是



(a)



(b)



(c)

图7 150℃(a)、200℃(b)和250℃(c)下  
分别拉伸应变8%后DBH和DSBH值的比较

\* SBH曲线仅供参考

55MPa(用DSBH方法,在150℃下预应变4%)。一般来说,在SBH情况下,得到最低的烘烤硬化值,而在DSBH的情况下,当动态时效温度(100和150℃)低于此后的静态时效温度(170℃)时,可观察到最高的烘烤硬化值。在其它情况中,DBH方法呈现较高的烘烤硬化值。上述特性列于表3以作比较。

## 4 讨论

### 4.1 预应变和温度的影响

如图5(a)所示,当对本实验所用的IF钢进行SBH处理时,观察到3种不同的现象。预应变量

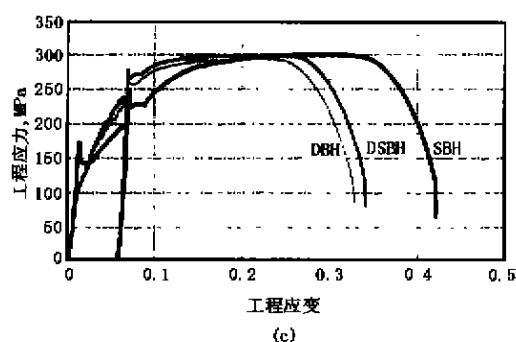
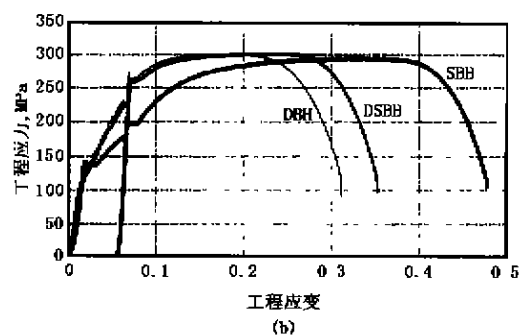
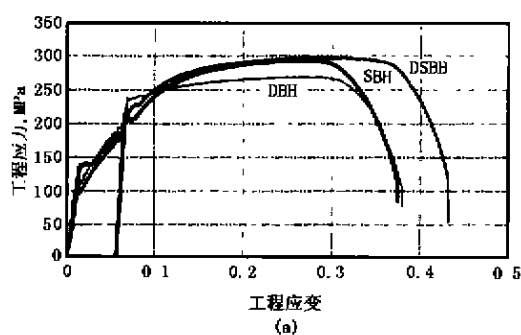


图8 150℃(a)、200℃(b)和250℃(c)下  
分别拉伸应变6%后DBH和DSBH值的比较  
\* SBH曲线仅供参考

低时,烘烤硬化值随应变增加而增大,直至达到最大值。当预应变进一步增加时,因碳浓度与位错的比值较小,烘烤硬化值减小。在第三阶段,烘烤硬化值略微增大或趋于平台。有些研究人员已经指出<sup>[8]</sup>,Nb-IF钢在第三阶段中烘烤硬化值的增大始于4%预应变。相反,另外一些研究人员<sup>[4]</sup>在对低碳铝镇静钢研究中,也没有观察到5%预应变后烘烤硬化值明显增大,指出第三阶段趋于平台。这可能是5%预应变后位错密度没有明显增加的缘故<sup>[29]</sup>。本研究工作得到的结果大都与后一种情况相同,经4%预应变后位错密度无明显增加。

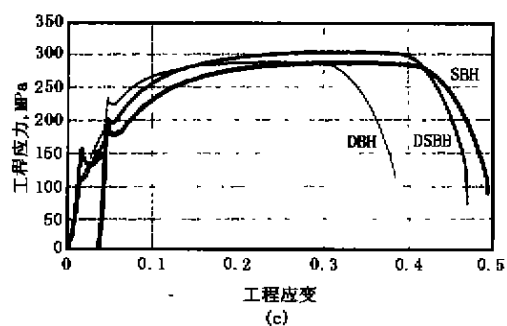
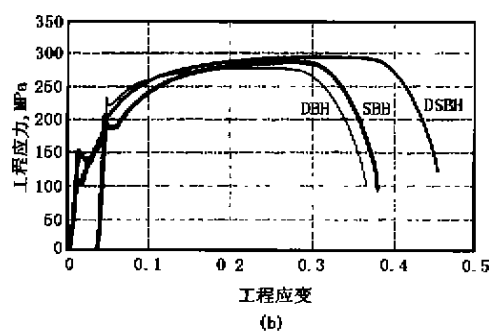
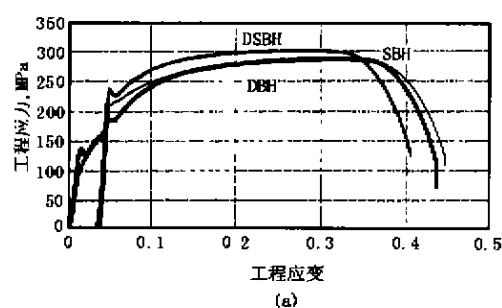


图9 150℃(a)、200℃(b)和250℃(c)下  
分别拉伸应变4%后DBH和DSBH值的比较  
\* SBH曲线仅供参考

在100和250℃烘烤的情况下,情况有所不同。在100℃时,烘烤硬化值随预应变增加而持续增大。在这较低的温度下,较高的预应变和较长的时效时间产生最强的位错钉扎效应。Elsen和Hougardy<sup>[30]</sup>用极低碳钢进行试验,在相同的固溶碳量(5ppm)的情况下,得到了类似的结果。他们观察到,预应变1%、2%和5%试样的屈服强度和低温烘烤硬化值的增加取决于时效时间。为使预应变2%后屈服应力增加40MPa,当时时效温度从180℃降低到150℃时,得将时效时间(30min)增加20倍。Kurosawa<sup>[31]</sup>等人也报道说,在加Nb超低碳钢中,对于1%和2%的预应变,烘烤硬化值随时效温度和时效时间增加而持续增大。低碳铝镇静钢预应变2%以后,即使在150℃

下时效 10min, 烘烤硬化值也未趋于稳定。

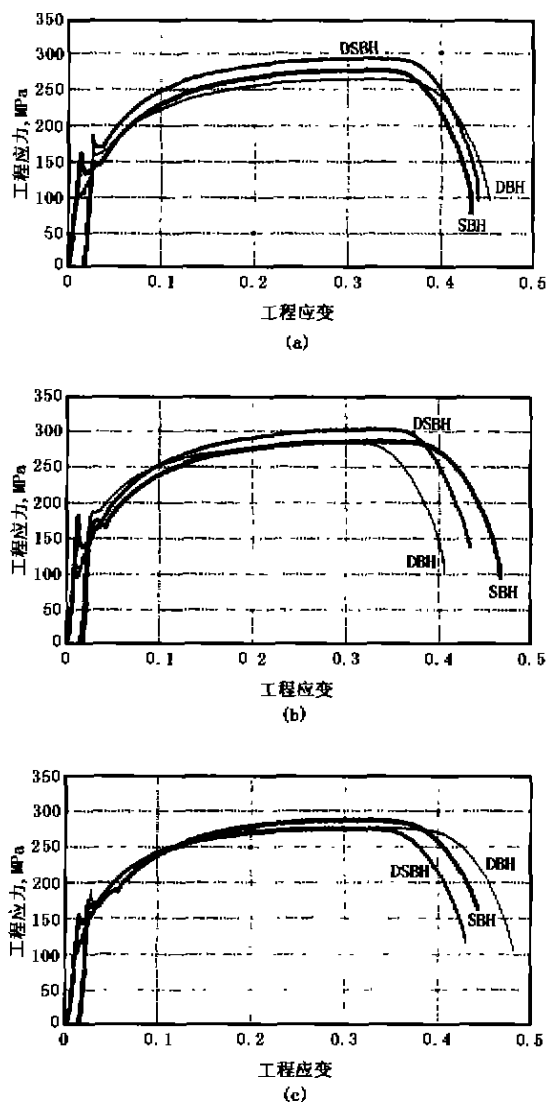


图 10 150℃(a)、200℃(b)和 250℃(c)下  
分别拉伸应变 2% 后 DBH 和 DSBH 值的比较  
\* SBH 曲线仅供参考

对于屈服应力, 也观察到了类似的现象, 它在 200℃ 烘烤后(除 2% 预应变, 图 5(b))达到屈服应力平台。正如从后面的讨论中看到的, 在 200℃ 停留一定时间后, 时效机制开始转变为过时效机制。为此, 屈服点在此温度趋于平台(图 5(b))。此外, 在 250℃ 附近或高于 250℃ 的情况下, 过时效更加明显, 导致屈服强度下降。(在 DSBH 情况下, 由于过程的复杂性, 室温屈服强度在一定程度上有所改变。总之, 类似于 SBH 方法产生的现象, 在 DSBH 中同样被观察到(图 6(b))。

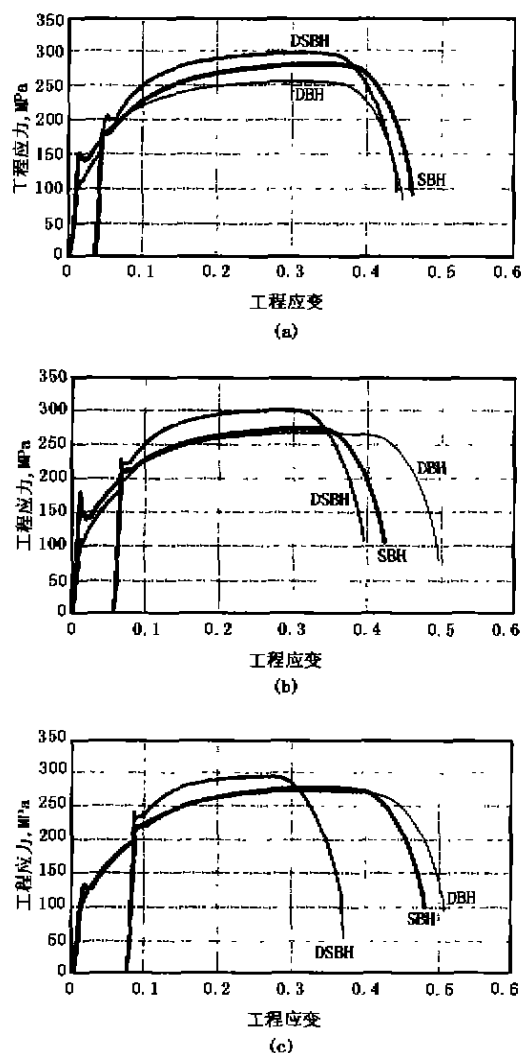


图 11 100℃ 下拉伸应变 4%(a)、6%(b)和  
8%(c)后 DBH 和 DSBH 值的比较  
\* SBH 曲线仅供参考

关于 DBH 方法, 在约 200℃ 时得到最大的烘烤硬化值。在此温度下, 2% 预应变时得到最大的烘烤硬化值(图 4(a))。这与 Li 等人<sup>[32,33]</sup>的发现相一致。在研究 DSA 对低碳钢力学性能影响的时候, 他们报道说, 在 200℃ 下约 5% 预应变时得到了最高的强度。

在 DSBH 方法中, 观察到两种不同的现象(图 6(a))。对 100 和 150℃ 下的预应变, 结果与前面提到的 DBH 方法得到的结果相类似。在这种情况下, 由于时效温度(170℃)高于预应变温度(100 和 150℃), DSA 产生的结构被改变了。第二种情况中, 时效温度(170℃)低于预应变温度(200 和

250℃),较高的应变温度可能导致由于沉淀物聚合造成的过时效。对这个问题在参考文献6、13和34至40中有详细的讨论。

#### 4.2 应变速率的影响

上述试验都是在 $10^{-3}\text{s}^{-1}$ 应变速率下进行的。但是,用本文介绍的方法在工厂进行成形操作时,更高的速率(例如 $1\text{s}^{-1}$ )才有意义。为此,也在 $10^{-4}\text{s}^{-1}$ 、 $10^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ 的应变速率下进行了试验。所得结果例示于图12。在 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ 应变速率下最容易观察到明显的DSA效应,包括比室温下更高的加工硬化指数和高温试验条件下没有屈服点的下降。另外3种IF钢可得到类似的结果。

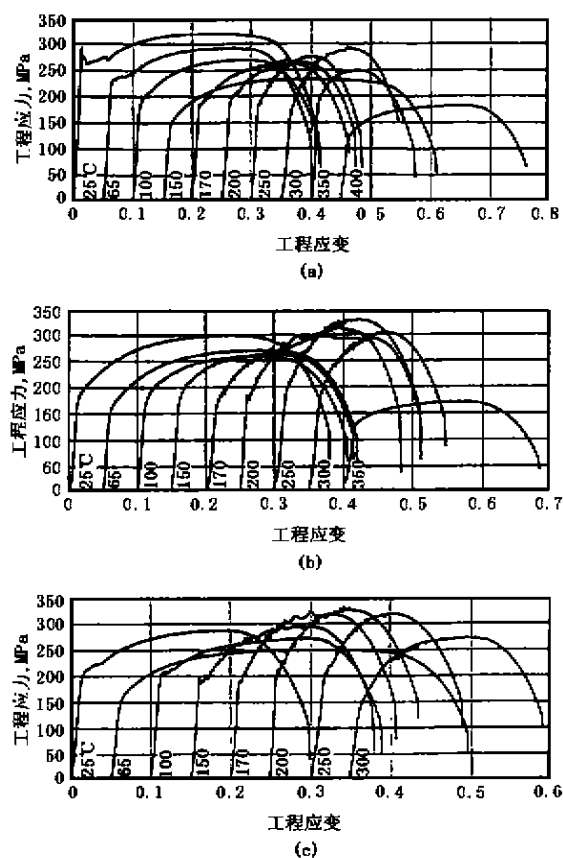


图12 不同温度和应变速率下拉伸试样的应力/应变曲线((a) $10^{-1}\text{s}^{-1}$ ; (b) $10^{-2}\text{s}^{-1}$ ; (c) $10^{-3}\text{s}^{-1}$ )

容易产生图12中的锯齿现象的最小应变速率,可用下面的式子表示:

$$\dot{\epsilon} = 10^8 \exp(-Q/RT) \quad (6)$$

式中: $R$ 为气体常数, $T$ 是绝对温度。这样,即使由于受到试验设备的限制,未在高应变速率

下进行试验,把此处观察到的现象推广到 $1\text{s}^{-1}$ 或更高的应变速率的情况似乎是合理的。

#### 4.3 DBH和DSBH方法工业应用的可能性

为了避免冲压成形产生表面缺陷,钢板应有低的屈服强度和高的加工硬化指数。如果比较两种具有不同屈服强度和加工硬化指数的钢,则屈服强度低、加工硬化指数高的钢,其冲压成形后的质量较好。另外,人们也希望成形过程中几乎不要出现屈服点延伸,成形后零件有较高的屈服强度<sup>[25]</sup>。

本研究工作中用各种烘烤方法增加屈服强度,其目的是想得到最小为210MPa或240~255MPa的屈服强度<sup>[25]</sup>。应注意的是,这样的屈服强度也可用固溶强化或用较高的冷却速度提高固溶碳量的方法获得,当然后一种方法不能用于仅有4ppm固溶碳的常规IF钢。例如,在含0.055%P和0.023%Si的Ti-NbIF钢中,屈服强度可达到190MPa<sup>[46]</sup>。当合金元素增加到0.07%P、0.06%Si和1.07%Mn时,屈服强度提高到289MPa。相反,通常的Ti-NbIF钢,从900℃以20℃/s的速度冷却,得到的屈服强度是175MPa<sup>[46]</sup>。将DBH方法用于表1所示的钢,在200℃下应变2%,得到的屈服强度大约是200MPa。(对另外3种IF钢也作了研究,得到了相似的结果<sup>[41]</sup>。为节约篇幅,此处不再赘述。)

通过对DBH和DSBH方法的研究可以看到,前面讨论的所有要求都可以用这些方法得到满足。而且,由于它们不会产生任何屈服点延伸,成形前不需要进行平整。

Lou和Northwood<sup>[47,48,49]</sup>引进了一个新的加工硬化速率判据,即屈服强度(YS)和最终拉伸强度(UTS)的差。当成形在高温下进行,这个值就高,与在DBH和DSBH中一样。当然,高的加工硬化指数也与好的成形质量密切相关<sup>[38,44]</sup>。

关于温成形,Sugimoto和Kobayashi<sup>[50]</sup>发明了一个可用于此目的装置(例如用于汽车结构件的温冲压)。这个装置的示意图如图13所示。他们的目的是研究高至400℃的成形温度对有残余奥氏体存在的钢的力学性能的影响。其操作类似于带有控制成形速度设备的压缩试验机。冲压过程中使用了石墨悬浮型润滑剂。但是,仅对中等尺寸的杯形试样进行了冲压成形试验。

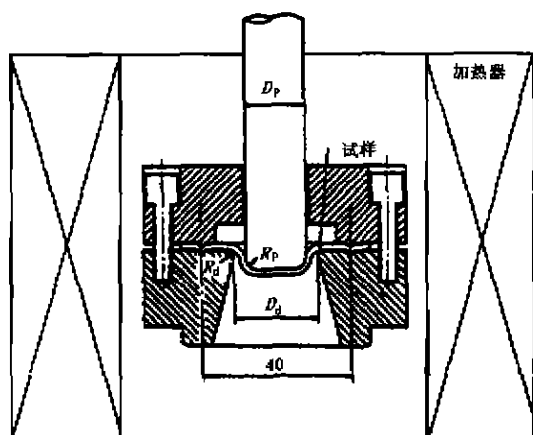


图 13 温冲压成形装置

DBH 与 DSBH 相比较,还有另外一个优点,也就是省去了一道工序,即常规烘烤硬化(2%预应变)。另一方面,假如有可能在成形前涂漆或烘烤漆(即在成形前的保温期间),那么就可采用这“一步”工序。显然,这一点还有待进一步研究。

关于工业应用,将 1t 钢加热到一定温度,例如 200℃所需的热量是:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q = 100\text{kg} \times 460\text{J/kg}^\circ\text{C} \times 175^\circ\text{C} = 80.5 \times 10^6$$

假如 1kWh 的价格为 0.05 美元,加热费用为 1.1 美元/t。

经比较发现,节省合金处理所产生的费用是相当可观的。例如,冶炼 1000kg 含 0.03%Nb 的钢,每 100ppmNb(即每 0.01%Nb)需花费约 4 美元(0.03%Nb 总费用为 12 美元)。这就是说,DSA 强化可以成为一个替代合金元素强化的具有吸引力的经济方法。同样的结论也适用于添加 Mn、P、Si 或 Ti 的钢。

## 5 结论

本文介绍了两种烘烤硬化的方法,即动态烘烤硬化(DBH)和动态-静态烘烤硬化(DSBH)。它们有如下特点:

(1)DSBH 和 DBH 比 SBH(常规方法)有更高的烘烤硬化能力。例如,在 100℃应变 2%的情况

下,DSBH 和 DBH 方法产生的烘烤硬化值分别是 SBH 方法的 15 倍和 8 倍。最小的烘烤硬化值大约是 3MPa(2%室温预应变后用 SBH 方法在 170℃下静态时效 20min)。一般来说,最低的烘烤硬化值是用 SBH 得到的。反之,当动态时效的温度(100 或 150℃)低于此后的静态时效温度(170℃),DSBH 方法得到最高的烘烤硬化值。在其它情况下,DBH 方法得到最高的烘烤硬化值。

(2)在 DBH 和 DSBH 方法的情况下,高温应变期间无吕德斯应变,也没有明显的屈服点和屈服强度下降。

(3)用 DBH 和 DSBH 方法,高温预应变期间屈服应力大约比用 SBH 方法的室温屈服应力低 45MPa。

(4)在 DBH 和 DSBH 方法中,由于动态应变时效,加工硬化指数远高于 SBH 方法中的加工硬化指数。而在室温下应变时,加工硬化指数要低得多。因此,在 DBH 和 DSBH 方法中,高温变形后的屈服强度要高得多。

(5)随高温变形量的增加,室温屈服强度与抗拉强度之比也增加,采用 DBH 方法时在某些情况下可达到 1。

(6)虽然采用 DBH 方法后,室温应变时很少观察到明显的屈服点和吕德斯应变,但采用 DSBH 方法,室温应变时的屈服点和吕德斯应变较为明显。

(7)在加 Ti 的 IF 钢中,仅 4ppm 的固溶碳(用 DSBH 方法,在 150℃下应变 4%)可得到大约 55MPa 的烘烤硬化值。

(8)用 3 种方法产生的屈服强度,在大约 200℃下应变或烘烤后均达到最大值。高于这个温度,似乎就发生了过时效,造成屈服应力下降。

## (参考文献略)

袁明生 译自《METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS》, Vol. 31A, 2000, No. 5, 1375 ~ 1383

程国平 校