第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0037-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:孔　为, 陈迎锋, 苍大强. 不同热轧参数对无取向硅钢变形抗力的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 37—42
Kong Wei, Chen Yingfeng, Cang Daqiang. Effect of different hot rolling parameters on deformation resistance of non-oriented silicon steel[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 37—42

矿冶工程

不同热轧参数对无取向硅钢变形抗力的影响

孔　为[1]　陈迎锋[1]　苍大强[2]
(北京科技大学国家材料服役安全科学中心[1],冶金与生态工程学院[2],北京 100083)

摘　要　通过使用热模拟试验机,在不同变形速率、不同变形温度及不同化学成分组成下,获取了无取向硅钢的热变形抗力数据。试验结果表明:更高的变形速率会增高变形抗力;而当应变量达到一定程度,在较高变形速率时,无取向硅钢的变形抗力反而变低。在 α 相区及 γ 相区,随着试验温度的增加,无取向硅钢的热变形抗力随之降低;在两相区内,随试验温度的提高,变形抗力有所增加;应通过降低终轧温度,使终轧避免在两相区内进行。更高的 Si 及 P 含量会提高无取向硅钢的变形抗力,而当温度达到 1 200 ℃时,P 提高变形抗力的能力却趋于消失;而高的 Als 含量会降低无取向硅钢的变形抗力。

关键词　无取向硅钢　　热轧　　变形抗力
中图法分类号　TG355.11;　　**文献标志码**　B

钢材的变形抗力是表示钢材加工性能的重要指标,是制定轧钢工艺的基础参数。变形抗力的正确获得对轧制力、轧制速度、轧辊辊缝等参数的设定均有着重要的作用[1—5]。对无取向硅钢,由于其生产工序复杂繁多,且控制窗口窄,因此每道工序都要保证其控制的精确性,那么作为无取向硅钢热轧基础参数的热变形抗力的准确获得就显得尤为重要,同时还可以对无取向硅钢冷轧参数的设定有一定的借鉴作用[6,7]。本研究将参考中国某大型钢铁企业的热连轧生产工艺参数,使用生产现场的无取向硅钢坯料作为热变形试验材料来研究变形速率、变形温度及化学成分等轧制工艺参数对无取向硅钢变形抗力的影响,从而给实际生产提供一定的理论指导。

1　研究方法

研究的试验样品取自某钢铁企业所生产的部分牌号无取向硅钢的钢坯,化学成分如表 1 所示。将其加工成热模拟试验机(Gleeble3500)所需的尺寸,进行单道次的轧制试验。以 5 ℃/s 的升温速度将试样加热到 1 200 ℃,保温 10 min 后,以 50 ℃/s 速度降到试验温度,保温 15 s 后,进行不同应变速率的轧制试验;其中 940 ~ 970 ℃为含硅量 1% 左右的硅钢的两相区[8],试验工艺曲线如图 1 所示,其中 μ 为变形速率,取 1、5、10、15、20 s^{-1};T 为试验温度,取 800、900、940、980、1 050、1 200 ℃。

表 1　试验用无取向硅钢的化学成分

Table 1　The chemical composition of the non-oriented silicon steel used in experiment

样号	化学成分/wt%					
	C	Si	Mn	P	S	Als(酸溶铝)
1	≤0.003	0.73	0.29	≤0.02	≤0.0035	<0.005
2	≤0.003	0.75	0.27	0.08	≤0.003 5	<0.005
3	≤0.003	1.01	0.27	≤0.02	≤0.003 5	<0.005
4	≤0.003	1.43	0.31	≤0.02	≤0.003 5	<0.005
5	≤0.003	1.43	0.33	≤0.02	≤0.003 5	0.45

首先,以表 1 中的 3 号试样作为研究对象,研究不同变形速率及变形温度对无取向硅钢变形抗力的

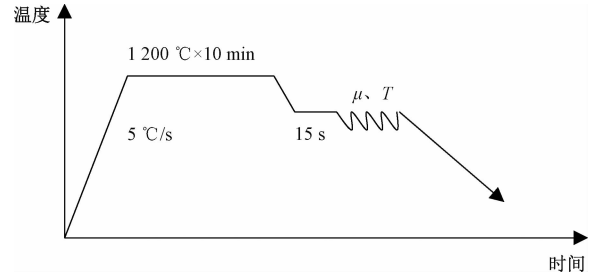

图 1　无取向硅钢变形抗力试验工艺曲线

Fig. 1　The process curve of deformation resistance of non-oriented silicon steel

2018 年 8 月 3 日收到　　中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-16-038A1)资助

第一作者简介:孔　为(1983—),男,汉族,辽宁锦州人,博士,助理研究员。E-mail:kongwei@ustb.edu.cn。

影响;然后以表 1 中 5 个试样作为研究对象,分析不同化学成分对无取向硅钢变形抗力的影响。

2 结果与分析

2.1 变形速率对变形抗力的影响

在试验温度下,无取向硅钢 3 号试样在不同变形速率下的应力应变曲线如图 2 所示。从图 2 中可看出,总体上,随着变形速率的增高,变形抗力随之变大。可解释为:更高的变形速率下,需要更快的位错移动速度,因此面临着更大的剪切应力;同时由于变形时间的缩短,回复和再结晶等降低加工硬化的过程随之减少,导致增高变形抗力。值得注意的是,当应变量达到一定程度的时候,更高的变形速率时无取向硅钢的变形抗力反而变低,这是由于更高变形速率下,到热变形末端的时候,其所需的变形量更小。

在 800 ℃及 900 ℃的试验温度下,应力应变曲线有两个应力峰,为非连续再结晶曲线;且随着变形速率的增高这些非连续再结晶曲线形状都会略有变化。

而在试验温度为 940 ℃时,低变形速率(1、5 s^{-1})下,应力应变曲线同为非连续再结晶曲线,但随着变形速率的进一步增高,应力应变曲线变为连续再结晶曲线。

当变形温度为 980 ℃时,应力应变曲线为典型的连续再结晶曲线。

与 940 ℃时的情况类似,当试验温度为 1 050 ℃和 1 200 ℃时,在较低变形速率(1、5、10 s^{-1})下,应力应变曲线同为非连续再结晶曲线,而当变形速率增高至 10 s^{-1}以上时,应力应变曲线转变为连续再结晶曲线。

2.2 变形温度对变形抗力的的影响

取变形量 0.2、0.4 及 0.6,计算不同试验温度下的变形抗力,结果如图 3 所示。从图 3 中可看出,在低温的 α 相区(低于 940 ℃)及高温的 γ 相区(高于 980 ℃),变形抗力随着试验温度的增高而降低,这是由于随着温度的升高,金属原子热振动加剧,滑移阻力减小,新滑移不断产生,非晶扩散及晶间黏性流动增强,回复和再结晶较易发生;而在两相区内,变形抗力随着温度的增高而变大,可解释为:与 γ 相相比,α 相的层错能更高,更易发生交滑移,且扩散系数更大,这些因素均使得 α 相拥有更大的动态回复速度[9];由此其变形抗力低于 γ 相,因而在热轧制期间,无取向硅钢基体的变形及主要集中在 α 相,而随着温度的升高,两相区内 α 相体积分数逐渐降低,从而较大幅度地提高无取向硅钢基体的变形抗力,足以忽略因温度升高而降低的变形抗力,导致无取向硅钢基体的整体变形抗力随之提高。由于两相区内存在上述变形抗力变化趋势的突变,因此无取向硅钢在热轧时应尽量避免在两相区内进行终轧,可适当地降低终轧温度,使终轧发生在单一的 α 相区内,这样轧出的热轧板板型更好。

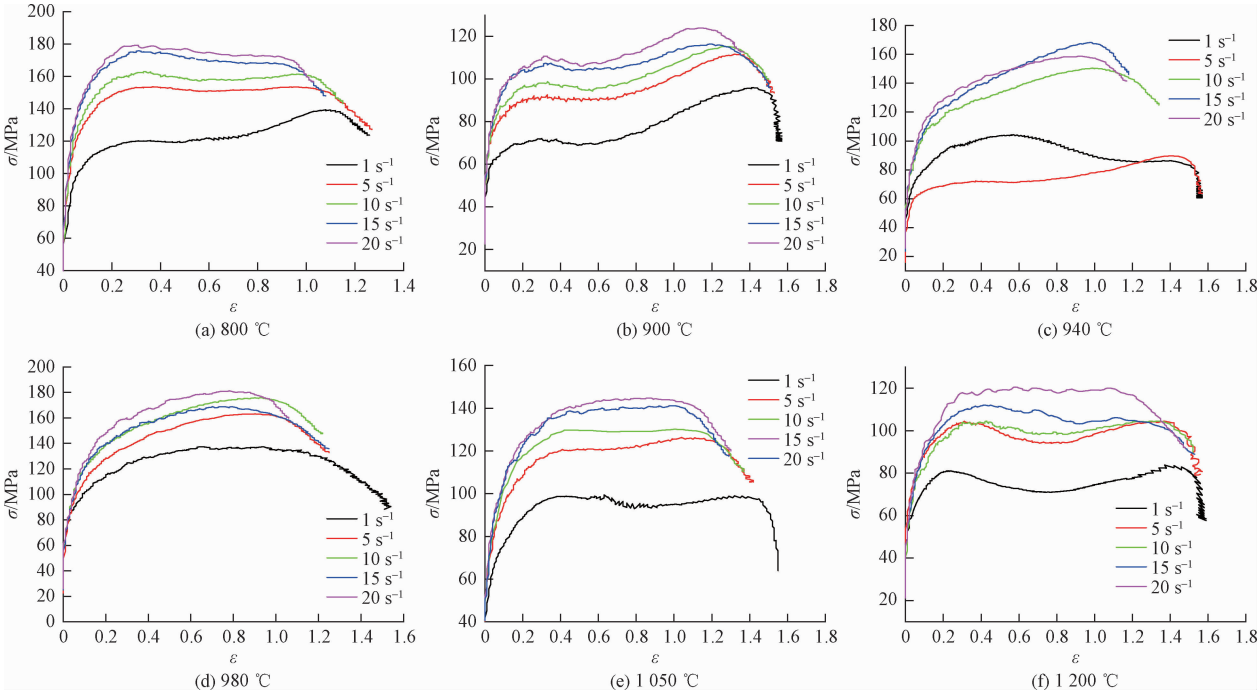

图 2 不同变形速率下 3 号试样的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves at different deformation rates of sample No. 3

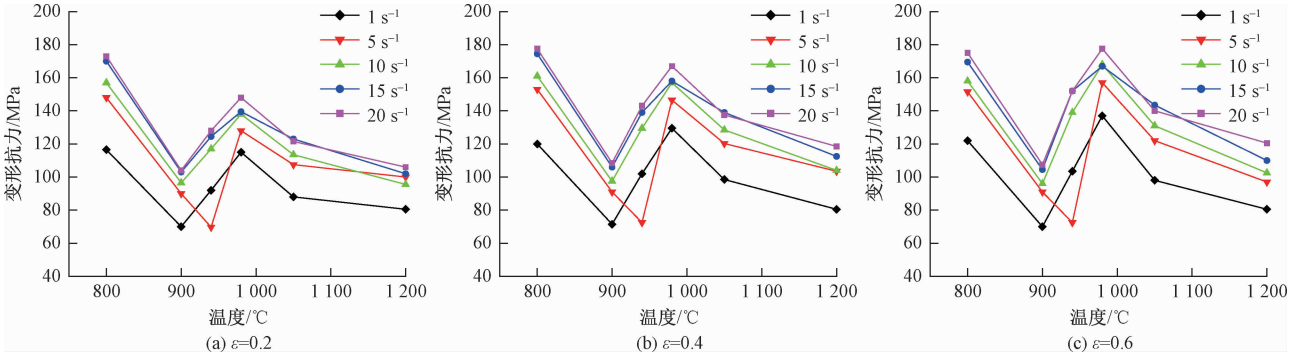

图 3　不同变形量下 3 号试样的变形抗力与变形温度的关系

Fig. 3　Relationship between deformation resistance and deformation temperature under different deformations of sample No. 3

2.3　化学成分对无取向硅钢变形抗力的影响

2.3.1　Si 含量对无取向硅钢变形抗力的影响

Si 含量为 1.43% 的试样(4 号),其不同试验温度下的应力应变曲线如图 4 所示,与 Si 含量为 1.03% 的试样类似(3 号),总体的趋势为低温下热变形基本为非连续再结晶,随着试验温度的提高,在较高温下,低变形速率时为非连续再结晶,高速变形速率时为连续再结晶。随着 Si 含量的增加,变形抗力有所增高,尤其是在低温的 α 相区,这是由于硅元素本身具有较强的硬脆性。

2.3.2　Als 含量对无取向硅钢变形抗力的影响

Si 含量与 4 号试样(不含 Als)相同,Als 含量为 0.45% 的试样(5 号),其不同试验温度下的应力应变曲线如图 5 所示。与不含 Als 的 4 号试样有所区别的是,含有 Als 的 5 号试样无论在低温还是高温下,其热变形均趋向为非连续再结晶;随着 Als 含量的增加,变形抗力有所降低,这是由于铝会缩小 γ 相区,即扩大热变形下的 α 相的体积分数[10]。

2.3.3　P 含量对无取向硅钢变形抗力的影响

其他化学元素含量相近,P 含量不同的两个试样(1 号试样不含 P,2 号试样含 P 为 0.08%),其不同试验温度下的应力应变曲线如图 6、图 7 所示。从图 6、图 7 中可以看出,在低于 900 ℃时进行热变形,两个试样的变形抗力差异不大,并且两个试样的应力应变曲线形状也基本一致。当变形温度不低于 900 ℃时,两者的变形抗力差异增大,在各种变

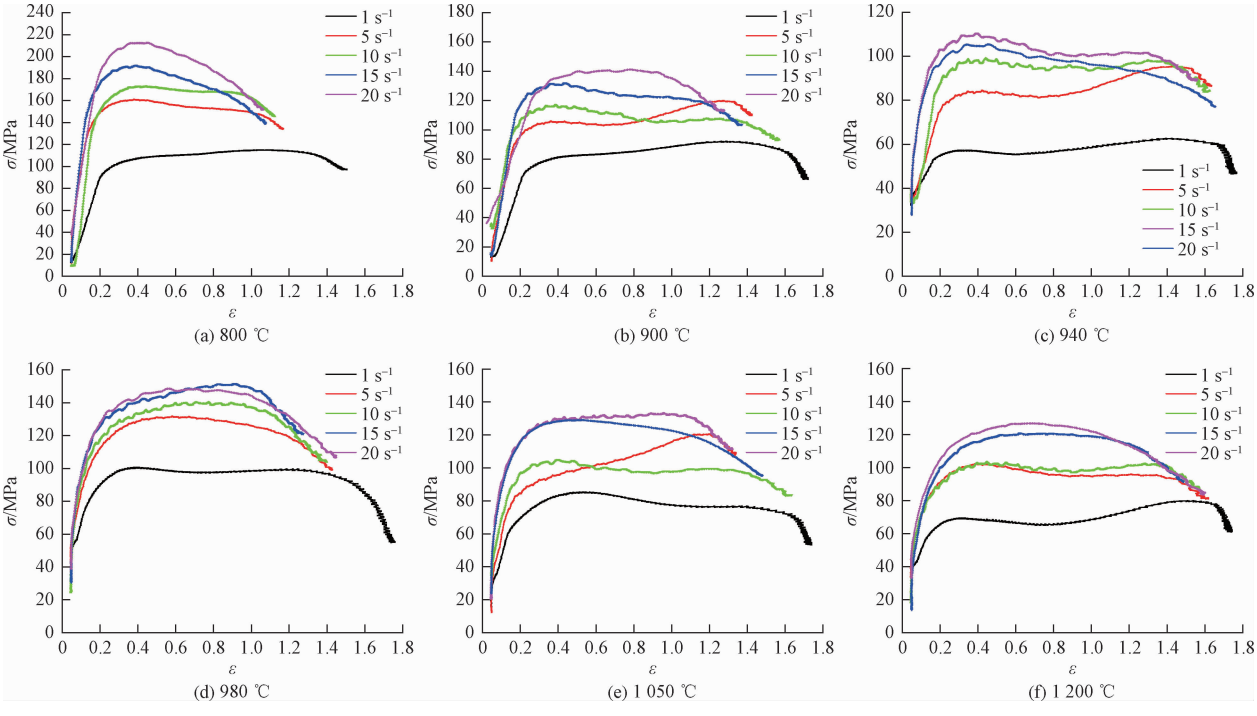

图 4　不同温度下 4 号试样的应力应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves at different temperatures of sample No. 4

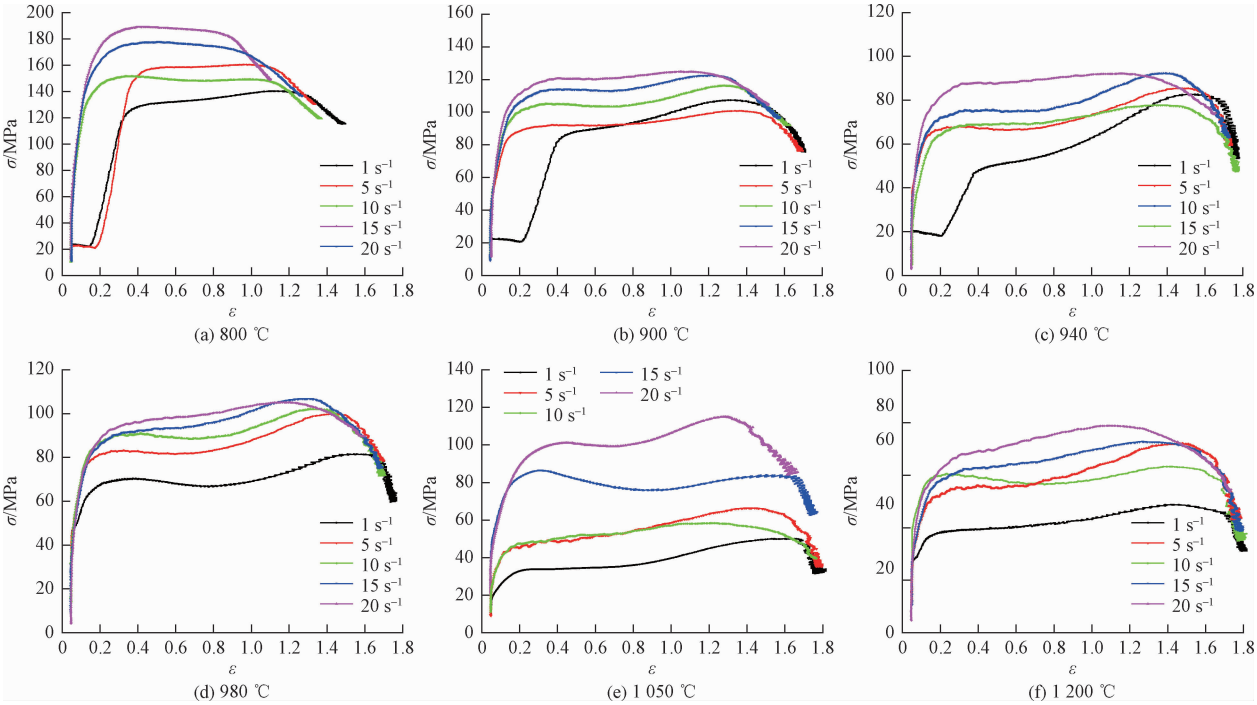

图 5 不同温度下 5 号试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves at different temperatures of sample No. 5

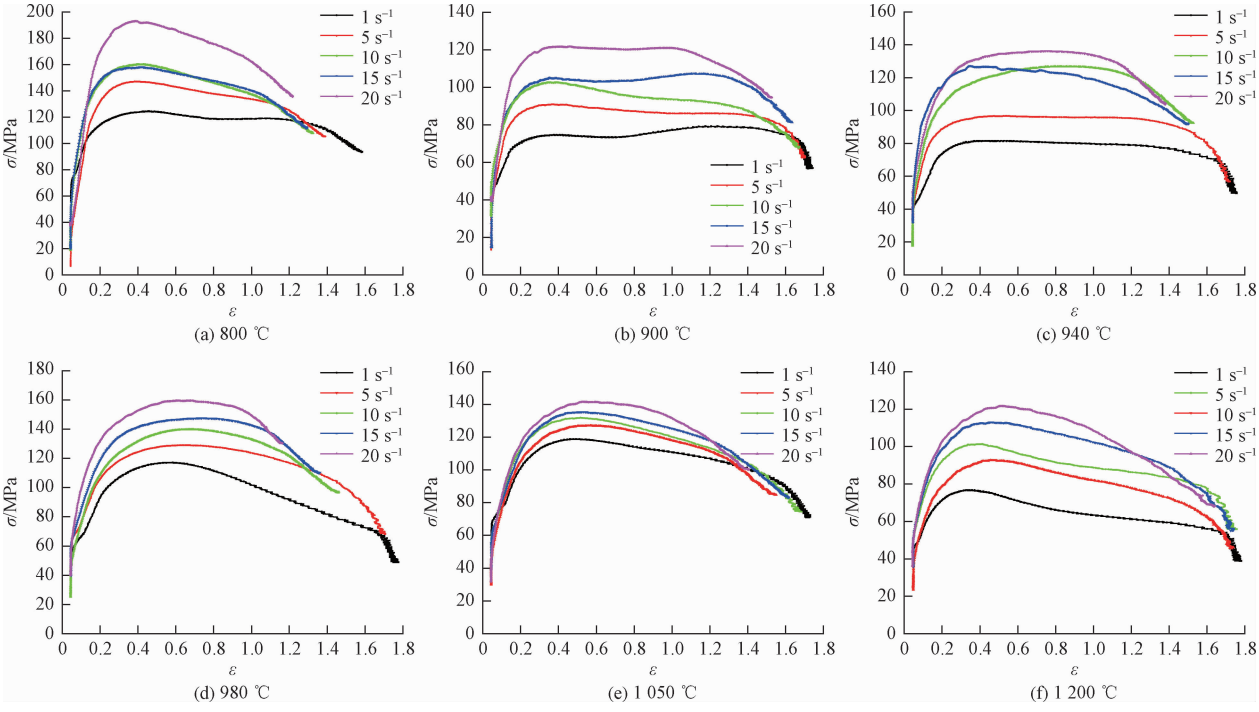

图 6 不同温度下 1 号试样的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves at different temperatures of sample No. 1

形速率下,含 P 的 2 号试样具有较高的变形抗力,而 2 号试样的应力应变曲线在高温下呈现不非连续再结晶现象。高于 900 ℃时,含 P 试样具有更高的变形抗力,可解释为此温度下进入两相区及 γ 相区,而在 γ 相中 P 元素较易在 γ 相晶界和表面处的偏聚,P 的偏聚会提高基体强度,从而提高变形抗力[11]。但值得注意的是,在温度达到 1 200 ℃时,高温使 P 提高变形抗力已不是非常明显。

3 结论

通过对试验数据的整理分析,可以得出以下结论。

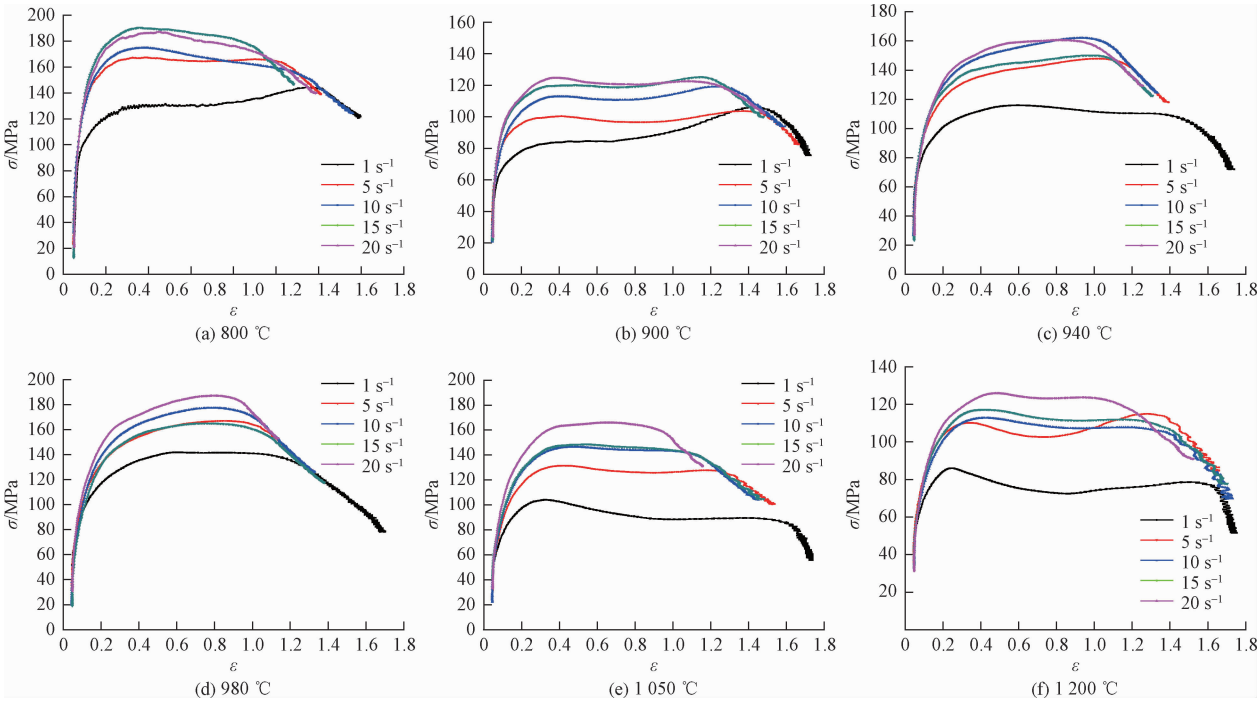

图 7　不同温度下 2 号试样的应力-应变曲线

Fig. 7　Stress-strain curves at different temperatures of sample No. 2

对无取向硅钢来讲,随着变形速率的增高,变形抗力随之变大;当应变量达到一定程度的时候,在更高的变形速率下,无取向硅钢的变形抗力反而变低。

在低温 α 相区及高温 γ 相区,随着试验温度的增加,无取向硅钢的热变形抗力随之降低;在两相区内,随试验温度的提高,变形抗力有所增加。对于无取向硅钢,应通过降低终轧温度,使终轧避免在两相区内进行。

更高的 Si 及 P 含量会提高无取向硅钢的变形抗力,而当温度达到 1 200 ℃时,P 含量提高变形抗力的能力趋于消失;而高的 Als 含量会降低无取向硅钢的变形抗力。

参　考　文　献

1　戴铁军, 刘战英, 刘相华, 等. 30MnSi 钢金属塑性变形抗力的数学模型. 塑性工程学报, 2001; 8(3): 17—20
Dai Tiejun, Liu Zhanying, Liu Xianghua, *et al.* Mathematical model of deformation resistance of 30MnSi steel. Journal of Plasticity Engineering, 2001; 8(3): 17—20

2　李树国, 刘持平, 王宝森, 等. 20 钢变形抗力模型的建立及轧制力预报. 轧钢, 2001; 18(1): 26—27
Li Shuguo, Liu Chiping, Wang Baosen, *et al.* The model establishment of the resistance to deformation and the rolling force prediction of 20 steel. Steel Rolling, 2001; 18(1): 26—27

3　曾文峰, 陈贻宏. TRIP800 钢变形抗力的试验研究. 武汉科技大学学报:(自然科学版), 2007; 30(1): 14—16
Zeng Wenfeng, Chen Yihong. Experimental study of deformation resistance of TRIP800 steel. Journal of Wuhan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007; 30(1): 14—16

4　毛伟强, 宋志刚, 王华昆, 等. 高应变速率平面压缩 00Cr22Ni5Mo3N 双相钢的变形抗力和组织变化. 特殊钢, 2007; 28(5): 10—12
Mao Weiqiang, Song Zhigang, Wang Huakun, *et al.* Resistance to deformation and structure evolution of dual phase steel 00Cr22Ni5Mo3N plane-strain compressing with high strain rate. Special Steel, 2007; 28(5): 10—12

5　陈　靖, 李宏图, 胡建平, 等. 热轧 DP600 双相钢变形抗力的实验研究. 热加工工艺, 2014; 43(9): 64—66
Chen Jing, Li Hongtu, Hu Jianping, *et al.* Experimental research on deformation resistance of hot-rolled DP600 dual phase steel. Hot Working Technology, 2014;43(9): 64—66

6　李应江, 包燕平. 120 t LD-RH-LF CSP 流程生产 W600 无取向硅钢的工艺实践. 特殊钢, 2008;29(6): 34—36
Li Yingjiang, Bao Yanping. Process practice for W600 non-oriented silicon steel produced by 120 t LD-RH-LF CSP flow sheet. Special Steel, 2008;29(6): 34—36

7　樊立峰, 毛一标, 杨路远, 等. 冷轧高牌号无取向硅钢生产工艺的实验室研究. 上海金属, 2009; 31(2): 40—42
Fan Lifeng, Mao Yibiao, Yang Luyuan, *et al.* Lab scale study of production process for cold rolling high grade non-oriented silicon steel. Shanghai Metals, 2009; 31(2): 40—42

8　颜建新, 唐　伟, 项　利, 等. 无取向硅钢相变点及其高温力学性能. 金属热处理, 2015; 40(3): 38—42
Yan Jianxin, Tang Wei, Xiang Li, *et al.* Phase transition point and high-temperature mechanical properties of non-oriented silicon steel. Heat Treatment of Metals, 2015; 40(3): 38—42

9　孙本荣. (γ+α)两相区控轧时变形抗力与显微组织的关系. 钢铁, 1991; 38(9): 37—40
Sun Benrong. Deformation resistance and microstructure in (γ+α)

region during controlled rolling. Iron and Steel, 1991; 38(9): 37—40

10 黄勇玲. 硅和铝元素对奥氏体-铁素体两相不锈钢组织和性能的影响. 航天制造技术, 1998;16(2): 5—9
Huang Yongling. Effects of silicon and aluminum on microstructure and properties of austenitite-ferrite two-phase stainless steel. Aerospace Manufacturing Technology, 1998;16(2): 5—9

11 徐庭栋, 郑 磊. 非平衡晶界偏聚和晶间脆性断裂研究的进展. 材料导报, 2004; 18(1): 1—5
Xu Tingdong, Zheng Lei. Progress in study of non-equilibrium grain boundary segregation and embrittlement. Materials Review, 2004; 18(1): 1—5

Effect of Different Hot Rolling Parameters on Deformation Resistance of Non-oriented Silicon Steel

KONG Wei[1], CHEN Ying-feng[1], CANG Da-qiang[2]
(National Center for Materials Service Safety[1], School of Metallurgical and Ecological Engineering[2], University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

[**Abstract**] The thermal deformation resistance data of non-oriented silicon steel were obtained by using a thermal simulation test machine under different deformation rates, different deformation temperatures and different chemical composition. The test results show that a higher deformation rate would increase the deformation resistance. When a strain reached a certain degree, the deformation resistance of non-oriented silicon steel became lower at a higher deformation rate. The thermal deformation resistance of non-oriented silicon steel decreased with an increase of a test temperature in the α zone and in the γ zone. In the two-phase zone, the deformation resistance increased with an increase of a test temperature. The final hot-rolling should be avoided in the two-phase zone by reducing the final hot-rolling temperature. Higher Si and P would improve the deformation resistance of non-oriented silicon steel, and when the temperature reached 1 200 ℃, the ability of P increasing deformation resistance tended to disappear; High Als will reduce the deformation resistance of non-oriented silicon steel.

[**Key words**] non-oriented silicon steel hot rolling deformation resistance