

· 组织和性能 ·

## 冷变形及热处理工艺对奥氏体不锈钢 0Cr18Ni12 和 0Cr16Ni14 组织及磁性能的影响

王鑫潮<sup>1,2</sup> 庄 迎<sup>1,2</sup> 王贵平<sup>1,2</sup>

(1 太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司 技术中心,太原 030003)

**摘 要** 从成分和组织稳定性,探讨了冷变形(0%~80%)及 1 000~1 090 ℃ 固溶处理对 0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 奥氏体不锈钢组织及磁性能的影响。结果表明:0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 不锈钢奥氏体稳定性优于 SUS304,其中 0Cr16Ni14 奥氏体稳定性最佳;0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 不锈钢冷变形过程中均产生形变马氏体,0Cr16Ni14 冷变形过程中相对磁导率始终保持在 1.010 以下,0Cr18Ni12 形变马氏体比例最大可达 3.5%,相对磁导率增大至 1.353,经固溶热处理后,相对磁导率可控制在 1.010 以下;结合现场生产条件,制定出两种奥氏体不锈钢的固溶处理工艺为 1 060 ℃ 每毫米保温 80 s。

**关键词** 奥氏体不锈钢 冷轧变形 固溶热处理 相对磁导率

## Effect of Cold Deformation and Heat Treatment Process on Microstructure and Magnetic Properties of Austenitic Stainless Steel 0Cr18Ni12 and 0Cr16Ni14

Wang Xinchao<sup>1,2</sup>, Zhuang Ying<sup>1,2</sup> and Wang Guiping<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron & Steel(Group) Co Ltd, Taiyuan 030003; 2 Technology Center, Shanxi Taiyuan Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The effects of cold deformation (0%~80%) and 1 000~1 090 ℃ solid solution treatment on the microstructure and magnetic properties of 0Cr18Ni12 and 0Cr16Ni14 austenitic stainless steels are discussed based on composition and structure stability. The results show that the austenite stability of stainless steel 0Cr18Ni12 and 0Cr16Ni14 is better than that of SUS304, and 0Cr16Ni14 is the best. Deformed martensite is formed during cold rolling deformation of stainless steel 0Cr18Ni12 and 0Cr16Ni14. The relative permeability of 0Cr16Ni14 during cold rolling is always below 1.010, the proportion of deformed martensite of 0Cr18Ni12 is up to 3.5%, and the relative permeability is increased to 1.353. After solution heat treatment, the relative permeability can be controlled below 1.010. Combined with the field production conditions, the heat treatment process of two kinds of austenitic stainless steels is solid solution treatment at 1 060 ℃ for 80 s per mm.

**Material Index** Austenitic Stainless Steel, Cold Rolling Deformation, Solution Heat Treatment, Relative Permeability

奥氏体不锈钢具有良好的力学性能和耐腐蚀性能,同时也具备良好的加工及焊接性能,因此成为不锈钢中应用最广泛的钢种<sup>[1]</sup>。此外,奥氏体不锈钢弱磁或无磁的特点被广泛应用于制造电子通信、医疗设备、航空航天以及核电站等关键设备零部件<sup>[2]</sup>。目前对奥氏体不锈钢磁性能的研究主要集中在 304、316 等传统不锈钢在轧制及加工过程中的磁性能及组织变化<sup>[3-5]</sup>。亚稳态奥氏体不锈钢冷变形过程中会生成形变诱导马氏体<sup>[6-7]</sup>,而马氏体具有铁磁性会引起材料的磁性发生变化,影响电子精密零部件使用,因此对无磁性能更加优良的奥氏体不锈钢需求日益增加。

针对 0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 两种奥氏体不锈

钢,本试验从成分、组织稳定性等方面,研究了以上两种材料在冷加工及热处理过程中磁性及组织变化规律,为奥氏体不锈钢磁性能的精确控制提供理论支撑及操作指导。

### 1 试验材料及方法

试验材料为国内不锈钢企业采用 90 t EAF + 45 t AOD + 45 t LF + 立式板坯连铸生产 1 238 mm × 180 mm 连铸坯,铸坯经修磨后,由 1 549 mm 热连轧机组热轧后经森吉米尔二十辊冷轧机冷轧生产,成品规格为 1 219 mm × 3.0 mm 的 0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 奥氏体不锈钢冷板,其主要合金成分含量如表 1 所示,并与常规奥氏体不锈钢 SUS304 进行对比。分别

表 1 三种奥氏体不锈钢成分/%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
SUS304	0.024	0.42	1.65	0.029	0.001	18.37	8.04	0.039
0Cr16Ni14	0.040	0.52	1.34	0.022	0.001	16.07	13.97	0.011
0Cr18Ni12	0.024	0.52	1.30	0.026	0.001	18.60	11.20	0.012

将两种材料在可逆式轧机上进行轧制,共轧制 12 道次,冷轧压下率从 3% 逐渐增加至 80%;分别取厚度为 1.0 mm 的 0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 不锈钢冷轧硬态板进行不同温度和保温时间下固溶处理正交试验,温度从 1 000 °C 开始依次增加 30 °C 至 1 090 °C,固溶时间分别为 40 s、60 s、80 s 和 100 s。

试验后,使用线切割对试样进行加工,采用光学显微镜 (Leica DM4000) 对固溶态、冷轧态钢板进行金相观察,观察组织形貌;在扫描电镜 (ZEISS EVO18) 下观察析出相形貌及 EDS 能谱分析;使用铁素体仪 Fischer FERITSCOPE FMP30 测量冷加工过程中生成的形变马氏体含量;使用磁导率检测仪 FERROMASTER 测量材料相对磁导率,其感应探头场强为 ~35 kA/m。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 奥氏体组织稳定性研究

不锈钢奥氏体组织的稳定性可以通过  $M_{d30}$  进行比较<sup>[8]</sup>,其定义为材料进行 30% 真实应变的冷变形,发生 50% 奥氏体转变为马氏体时的温度,具体计算公式如下:

$$M_{d30} = 551 - 462 (C + N) - 9.2Si - 8.1Mn - 13.7Cr - 29(Ni + Cu) - 18.5Mo \quad (1)$$

Ni 是不锈钢中重要的合金元素,除了能显著提高不锈钢耐还原性酸及强碱介质的腐蚀,还能提高材料的塑、韧性,降低不锈钢的脆性转变温度;同时其作

为奥氏体形成元素能扩大奥氏体区,稳定奥氏体组织<sup>[1]</sup>。奥氏体不锈钢在冷变形过程中是否发生马氏体转变可以使用计算材料最低镍当量  $[Ni]_{eq_{min}}$  的方式来判定<sup>[9]</sup>,其计算公式如下:

$$[Ni]_{eq_{min}} = \frac{[(Cr) + 1.5(Mo) - 20]^2}{12} - \frac{(Mn)}{2} - 35(C) + 15 \quad (2)$$

通过比较材料实际 Ni 含量与最低镍当量  $[Ni]_{eq_{min}}$  用以确定奥氏体组织稳定性,取  $\Delta_\gamma$  为二者差值,当  $\Delta_\gamma \geq 0$ ,奥氏体组织稳定,反之则组织不稳定。通过计算 SUS304、0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 三种奥氏体不锈钢  $M_{d30}$ 、 $[Ni]_{eq_{min}}$  以及  $\Delta_\gamma$ ,结果如表 2 所示,随着 Ni 含量的增加, $M_{d30}$  显著降低,三种奥氏体不锈钢  $\Delta_\gamma$  均小于 0,说明三种奥氏体不锈钢材料在冷变形过程中均可能发生马氏体转变,其中 0Cr16Ni14 不锈钢  $\Delta_\gamma$  仅为 -0.27%,奥氏体组织已趋于稳定。

使用 Thermol-Calc 热力学计算软件对三种奥氏体不锈钢进行计算,得到了三者的热力学平衡相图,如图 1 所示。在钢液凝固过程中,SUS304 与 0Cr18Ni12 不锈钢均先析出高温  $\delta$  铁素体,其中 SUS304 不锈钢高温  $\delta$  铁素体相最高可达约 70%,明显高于 0Cr18Ni12 不锈钢的 30%,在实际生产中高温  $\delta$  铁素体无法完全转化为奥氏体,从而会影响最终产品组织及磁性能;比较而言,0Cr16Ni14 不锈钢凝固过

表 2 三种不锈钢奥氏体稳定性对比

Table 2 Comparison between austenite stability of three stainless steel

钢种	$M_{d30}/^{\circ}C$	$[Ni]_{eq_{min}}/\%$	$\Delta_\gamma/\%$
SUS304	16.4	13.56	-5.52
0Cr18Ni12	-61.8	13.69	-2.49
0Cr16Ni14	-114.5	14.24	-0.27

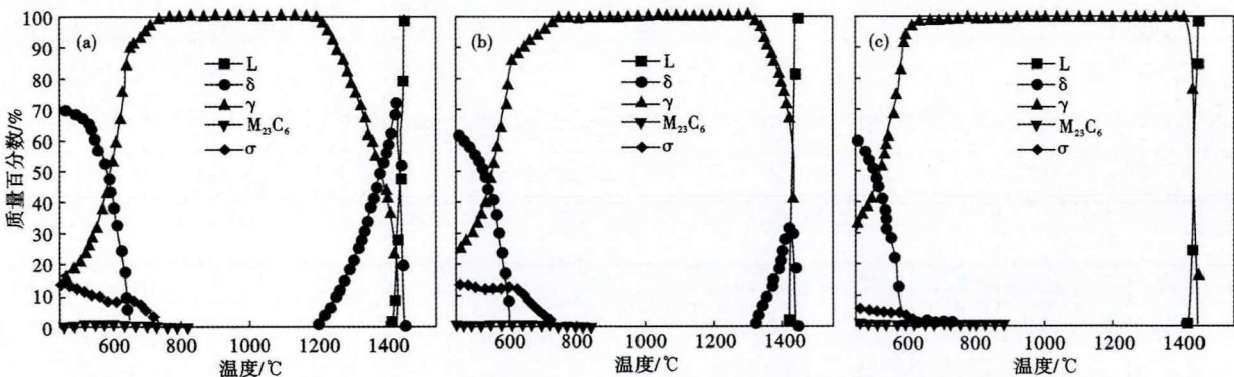


图 1 不锈钢 SUS304 (a)、0Cr18Ni12 (b) 和 0Cr16Ni14 (c) 的热力学相图

Fig. 1 Thermodynamic phase diagrams of stainless steel SUS304 (a), 0Cr18Ni12 (b) and 0Cr16Ni14 (c)

程中直接生成奥氏体相,无高温  $\delta$  铁素体相,因此最终产品奥氏体稳定性与无磁性均优于 SUS304 与 0Cr18Ni12 不锈钢。

综上可以判断,0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 不锈钢奥氏体稳定性优于 SUS304 不锈钢,其中 0Cr16Ni14 不锈钢奥氏体稳定性最佳。

### 2.2 冷加工对组织及磁性能的影响

奥氏体不锈钢在冷加工过程中会发生马氏体转变,诱导析出强磁性的马氏体相,从而改变材料的磁性能。为此分别对 0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 不锈钢进行了不同冷轧压下率的冷轧试验,图 2 为冷轧压下率为 30% 时两种材料的金相组织照片,图 2 (a) 为 0Cr18Ni12,图 2 (b) 为 0Cr16Ni14,可以看出在二者冷轧过程中均出现形变马氏体。奥氏体不锈钢中形变马氏体的生成遵循位移机制,是一种无扩散剪切变形<sup>[10]</sup>。一般而言,形变马氏体的成核位置与晶体结构中存在的各种晶格缺陷相关,主要发生在剪切带、晶界处等<sup>[11]</sup>。

在相同冷轧压下率的情况下,0Cr18Ni12 不锈钢冷轧板中形变马氏体含量明显多于 0Cr16Ni14 不锈钢,这再次证明后者奥氏体稳定性优于前者;同时也说明使用表 2 中  $\Delta_s$  来判断不锈钢中奥氏体组织在冷变形过程中是否完全稳定具有一定的科学性。

使用铁素体仪和磁导率检测仪测量两种奥氏体不锈钢在不同冷轧压下率时,形变马氏体含量与相对磁导率的变化情况,结果如图 3 和图 4 所示。两种无磁不锈钢冷轧前马氏体比例均低于 0.1%,随着冷轧压下率的增加,形变马氏体含量与相对磁导率均逐渐增加,其中 0Cr18Ni12 形变马氏体含量最大可达 3.5% 左右,相对磁导率增大至 1.353 左右;而 0Cr16Ni14 不锈钢具有更好的奥氏体稳定性,不同冷

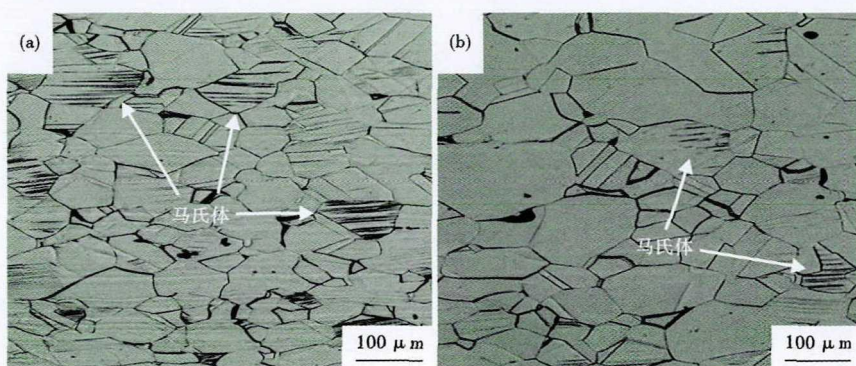


图 2 0Cr18Ni12 (a) 和 0Cr16Ni14 (b) 不锈钢冷加工过程中生成的形变马氏体  
Fig. 2 Deformed martensite formed during cold working of stainless steel 0Cr18Ni12 (a) and 0Cr16Ni14 (b)

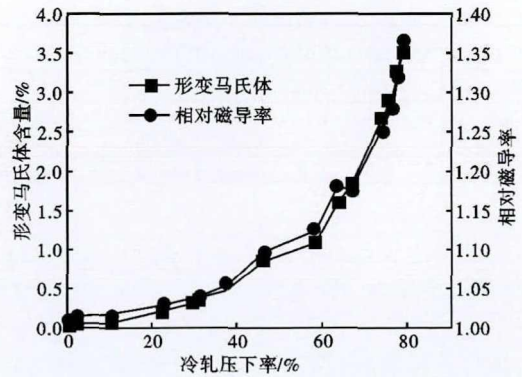


图 3 冷轧压下率对 0Cr18Ni12 不锈钢形变马氏体与相对磁导率的影响

Fig. 3 Effect of rolling deformation rate on deformed martensite and relative permeability of stainless steel 0Cr18Ni12

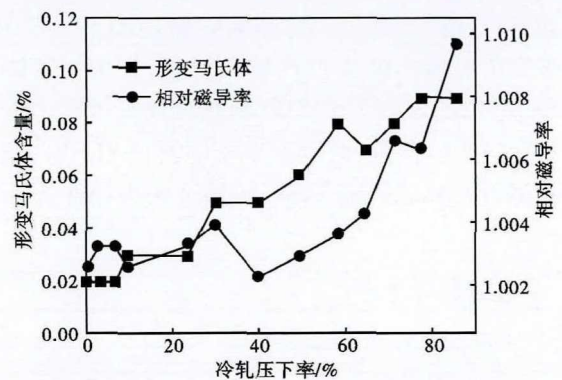


图 4 冷轧压下率对 0Cr16Ni14 不锈钢形变马氏体与相对磁导率的影响

Fig. 4 Effect of rolling deformation rate on deformed martensite and relative permeability of stainless steel 0Cr16Ni14

轧压下率下形变马氏体含量始终小于 0.1%,相对磁导率保持在 1.010 以下,因此更适合在对无磁性能要求严苛的环境中使用。

### 2.3 热处理工艺对组织及磁性能的影响

奥氏体不锈钢冷轧后需进行固溶退火处理,以改善材料的塑性与韧性,使组织及性能均匀稳定,保证耐腐蚀及后续加工性能<sup>[12]</sup>。奥氏体不锈钢组织晶粒越细,晶间的结合力越强,造成晶粒间滑移位错产生晶格空隙的概率就越低<sup>[13]</sup>,从而塑性与韧性越好,耐腐蚀性能越佳<sup>[14]</sup>。一般而言,不锈钢冷卷要求晶粒度  $\geq 7$  级。分别对两种奥氏体不锈钢 1.0 mm 厚冷轧硬态板进行固溶退火试验,并进行金相组织观察和

表 3 固溶工艺对 0Cr18Ni12 不锈钢晶粒度的影响/级  
Table 3 Effect of solid solution process on grain size of stainless steel 0Cr18Ni12/rating

固溶温度/°C	固溶时间/s			
	40	60	80	100
1 000	变形带	>10	>10	>10
1 030	变形带	>10	>10	9
1 060	>10	10	8.5	7.5
1 090	>10	8.5	6.5	6

表 4 固溶工艺对 0Cr16Ni14 不锈钢晶粒度的影响/级  
Table 4 Effect of solid solution process on grain size of stainless steel 0Cr16Ni14/rating

固溶温度/°C	固溶时间/s			
	40	60	80	100
1 000	变形带	>10	>10	>9
1 030	变形带	>10	9.5	9.5
1 060	变形带	9.5	9	8
1 090	10	8	7	6.5

晶粒度评级,晶粒度评级结果如表 3 与表 4 所示。当固溶温度较低或时间较短时,组织回复再结晶不完全,仍存在大量轧制变形带,而采用较高的固溶温度和较长的固溶时间容易导致晶粒过分粗大,不利于材料的力学及耐蚀性能。

奥氏体不锈钢进行固溶退火除了可以提高塑性和韧性外,还可以使冷轧过程中生成的形变马氏体溶解,改善材料的无磁性能。采用不同热处理工艺制度处理后,对两种奥氏体不锈钢的形变马氏体含量与相对磁导率进行测量,0Cr16Ni14 不锈钢退火后马氏体含量全部小于 0.03%,相对磁导率全部在 1.008 以下;0Cr18Ni12 不锈钢形变马氏体含量与相对磁导率随固溶温度的升高与固溶时间的延长均逐渐降低,结果如图 5、图 6 所示,其中当固溶温度  $\geq 1 060$  °C,固溶时间  $\geq 80$  s 时,形变马氏体含量可降至 0.03% 以下,相对磁导率降至 1.010 以下。综合考虑热处理工艺对组织、晶粒度以及磁性能的影响,并结合现场生产

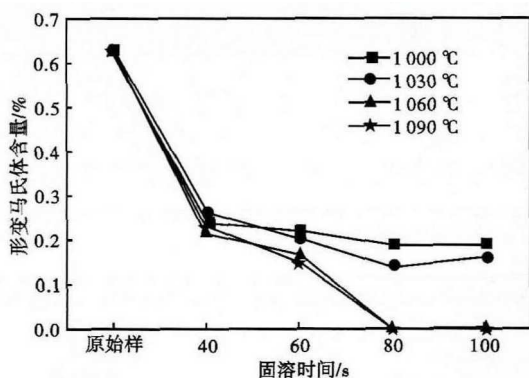


图 5 固溶工艺对 0Cr18Ni12 不锈钢形变马氏体含量的影响  
Fig.5 Effect of solid solution process on content of deformed martensite in stainless steel 0Cr18Ni12

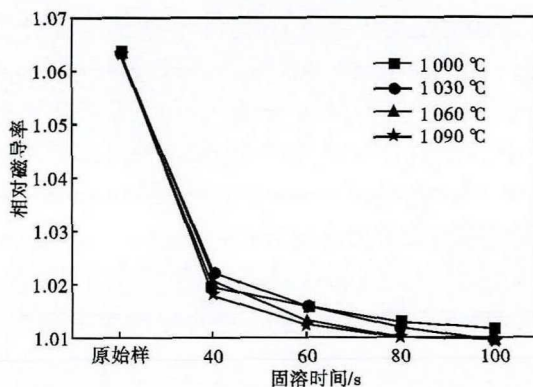


图 6 固溶工艺对 0Cr18Ni12 不锈钢相对磁导率的影响  
Fig.6 Effect of solid solution process on relative permeability of stainless steel 0Cr18Ni12

工艺条件,选择固溶制度 1 060 °C 下每毫米保温 80 s 作为以上两种奥氏体不锈钢的热处理工艺制度。

对于不锈钢而言,固溶热处理三个关键要素是固溶温度、固溶时间以及冷却速度<sup>[15]</sup>。如图 1 热力学平衡相图中所示,在一定温度条件下,不锈钢中各元素相互作用会在基体中产生各种析出相,对不锈钢组织及性能产生影响。此次热处理试验中,部分 0Cr16Ni14 不锈钢试样晶界处发现存在析出相,对其进行扫描观察及 EDS 分析,如图 7 所示,结合热力学计算确定此析出相为碳化物  $M_{23}C_6$ ,这是由于 0Cr16Ni14 不锈钢碳含量较高,固溶处理后冷却速度较慢,在晶界处发生碳化物析出,容易导致其周围 Cr 元素贫化而引起材料晶间腐蚀缺陷,因此,在热处理过程中必须保证合理的冷却速度,减少有害相的析出。

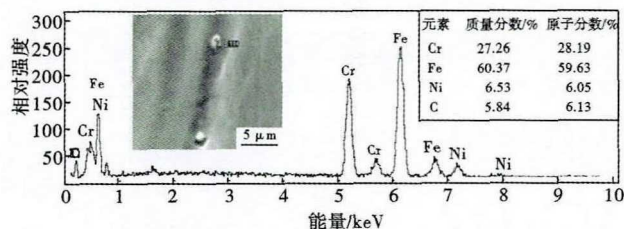


图 7 0Cr16Ni14 不锈钢晶间析出相形貌和 EDS 分析结果  
Fig.7 Morphology and EDS analysis of precipitated phase of intergranular in stainless steel 0Cr16Ni14

### 3 结论

(1) 通过对比  $M_{d30}$ 、 $\Delta_\gamma$  以及热力学平衡相图可知,0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 不锈钢奥氏体稳定性优于 SUS304,其中 0Cr16Ni14 不锈钢奥氏体稳定性最佳。

(2)0Cr18Ni12 与 0Cr16Ni14 不锈钢冷变形过程中均产生形变马氏体,相对磁导率随冷轧压下率的增加而增加。0Cr16Ni14 不锈钢冷轧过程中产生形变马氏体较少,相对磁导率始终保持在 1.010 以下;0Cr18Ni12 不锈钢形变马氏体比例最大可达 3.5% 左右,相对磁导率增大至 1.353 左右。

(3)0Cr18Ni12 和 0Cr16Ni14 不锈钢经固溶退火后,形变马氏体相不断减少,相对磁导率降至 1.010

以下。

(4)综合考虑热处理工艺对组织、晶粒度以及性能的影响,结合现场生产条件,制定出 0Cr18Ni12、0Cr16Ni14 两种奥氏体不锈钢的热处理工艺为温度 1060 ℃ 条件下每毫米保温 80 s。

山西省重点研发计划项目(201803D121029)资助

参考文献

[1] 陆世英. 不锈钢概论[M];北京:化学工业出版社,2013.  
 [2] 李长生,马彪,宋艳磊,等. 无磁钢的研究概况和我国无磁钢的发展思路[J]. 河南冶金,2014,22(1):1-7.  
 [3] 金光秀,黄弋力,强文江. 304 不锈钢板材制备过程中的磁性变化及其控制[J]. 金属热处理,2016,41(4):59-62.  
 [4] 吕海当,马正伟,胡梅青,等. 304M2 不锈钢冷加工磁性原因分析[J]. 中国重型装备,2015,15(3):50-52.  
 [5] 李向宾,金环,杨东昇,等. 聚变堆超导磁体用 SS316LN 铠甲低温断裂性能研究[J]. 核聚变与等离子体物理,2019,39(2):165-168.  
 [6] Talonen J, Hanninen H. Formation of Shear Bands and Strain-Induced Martensite During Plastic Deformation of Metastable Austenitic Stainless Steels [J]. Acta Materialia, 2007, 55(18):6108-6118.  
 [7] Shen Y F, Li X X, Sun X, et al. Twinning and Martensite in a 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 52(12):514-552.  
 [8] 李静媛,李东,范光伟,等. 节镍无磁不锈钢 Cr18Ni6Mn3N 的组织及性能[J]. 北京科技大学学报,2012,34(4):397-403.  
 [9] 徐杨,宋仁伯,刘政东. 304 奥氏体不锈钢冷拔过程中局部磁性形成机理[J]. 金属热处理,2015,40(9):92-97.  
 [10] Pereloma E, Dmonds D. Phase Transformations in Steels [M]. Cambridge; Woodhead Pub, 2012.  
 [11] Das A, Sivaprasad S, Ghosh M, et al. Morphologies and Characteristics of Deformation Induced Martensite During Tensile Deformation of 304 LN Stainless Steel [J]. Materials Science & Engineering: A, 2008, 486(12):283-286.  
 [12] Glage A, Weidner A, Biermann H. Cyclic Deformation Behaviour of Three Austenitic Cast CrMnNi TRIP/TWIP Steels With Various Ni Content [J]. Steel Research International, 2011, 82(9):1040-1047.  
 [13] Bleck W, Guo X, Ma Y. The TRIP Effect and its Application in Cold Formable Sheet Steels [J]. Steel Research International, 2017, 88(10):197-218.  
 [14] Fathi H, Emadoddin E, Semnani H M, et al. Effect of Martensitic Transformation on Springback Behavior of 304L Austenitic Stainless Steel [J]. Materials Research Express, 2017, 4(9):1591-1603.  
 [15] Hamada A S, Kisko A P, Sahu P, et al. Enhancement of Mechanical Properties of a TRIP-aided Austenitic Stainless Steel by Controlled Reversion Annealing [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 628(15):154-159.

王鑫潮(1989-),男,硕士(北京科技大学),工程师,北京科技大学(本科)毕业,奥氏体不锈钢材料冶炼及加工研究。  
E-mail: wangxinchao1989@126.com

收稿日期:2020-01-07

# 欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183      定价:16.00 元/期 96.00 元/年      邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010