● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.016

SUS430不锈钢成形性能分析及控制

郭 蓉[1],刘天增[1],杨瑞成[2]

(1.酒泉钢铁集团,甘肃 嘉峪关 735100;2.兰州理工大学,甘肃 兰州 730000)

摘 要:对提升SUS430铁素体不锈钢冲压成形性能进行了研究,高等轴晶率钢卷的$\bar{r}$值为0.905。结果表明,降低开轧温度的钢卷抗拉强度比正常工艺卷抗拉强度略高,低开轧温度钢卷$\bar{r}$为0.858。两轧程试验卷与对比卷相比,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别提高24.17 MPa,8.25 MPa和1.81%,$\bar{r}$值高0.57,Δr值高0.094。两轧程试验卷与大压下卷相比,屈服强度比大压下小10 MPa左右,抗拉强度值相差不大,伸长率高1.72%,$\bar{r}$值高0.16,Δr值高0.175。二轧程钢卷的伸长率和$\bar{r}$都得到了提升,二轧程钢卷具有良好的成形性能,但是二轧程增加了Δr值,材料的各向异性提高。生产过程中,针对冲压性能高一些的可以选择大压下工艺,轧程压下率控制在70%以上;对于结构复杂,冲压要求较高的采取二轧程工艺。

关键词:SUS430;成形性能;开裂;$\bar{r}$

中图分类号:TG335.56 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)10-0899-05

Formability Analysis and Control of SUS430 Stainless Steel

GUO Rong[1], LIU Tianzeng[1], YANG Ruicheng[2]

(1. Jiuquan Iron and Steel of Group Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China; 2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The stamping formability of SUS430 ferritic stainless steel was studied. The value of high axial crystallinity coil $\bar{r}$ was 0.905. The results show that the tensile strength of coils with lower open rolling temperature is slightly higher than that of coils with normal rolling temperature, and the tensile strength of coils with lower open rolling temperature $\bar{r}$ is 0.858. The yield strength, tensile strength and elongation of test rolls increased by 24.17 MPa, 8.25 MPa and 1.81%, respectively, and the values $\bar{r}$ and Δr is higher by 0.57 and 0.094, respectively. The yield strength of the test roll is about 10 MPa lower than that of the test roll under high pressure, and the tensile strength value is not different from that of the test roll under high pressure. The elongation is 1.72% higher, and the values $\bar{r}$ and Δr is 0.16 and Δr is 0.175 higher. Both the elongation and the formability of the coil are improved, but the anisotropy of the material is improved by increasing the value of Δr during the second rolling process. In the production process, for the stamping performance of some can choose a large pressure down process, rolling process pressure down rate control in more than 70%; For complex structure, high stamping requirements to adopt two rolling process.

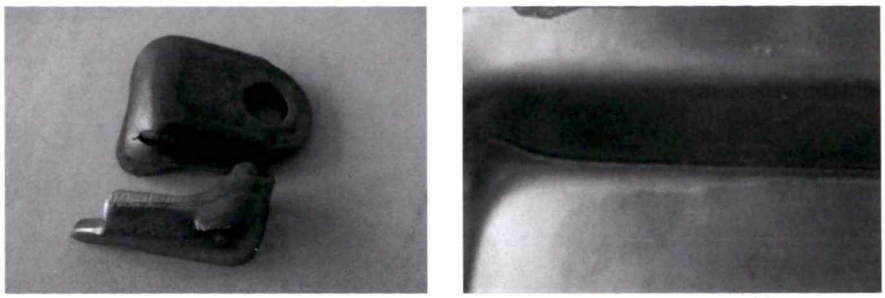
Key words: SUS430; formability; cracking; $\bar{r}$

SUS430铁素体不锈钢作为一种节镍不锈钢,已广泛应用于厨房设备、家用电器、建筑装饰等与人们生活密切相关的各个领域[1],且随着人们生活水平的提高,厨房餐具应用比列逐年升高。国内主要不锈钢厂都在积极扩大生产、提升质量抢占市场。目前,下游用户在使用SUS430/2B材料冲压制品过程中出现开裂现象,如图1所示。从开裂的形貌和规格来看,产品从0.5~2.0 mm,位置基本上是变形量较大的地方。板材的成形性能一方面取决于板材本身的基本力学性能和在加工条件下的力学行为[2];另一反面也与钢板表面状态密切相关,并将直接影响到冲压成形时金属的流动特性,从而关系到冲压的成败;最后,板材成形性能还与制件结构和冲模的几何形状与尺寸、变形条件(变形速度、压边力、摩擦状态、温度等)和冲压设备与工艺以及操作水平等众多

收稿日期:2021-02-20

作者简介:郭 蓉(1987—),女,甘肃嘉峪关人,助理工程师.主要从事不锈钢工艺方向的工作.电话:09376235896,Email:guorong@jiugang.com

通讯作者:刘天增(1985—),甘肃张掖人,硕士,高级工程师.主要从事不锈钢工艺方面的工作.电话:09376711458,Email:kltianzeng@163.com



(a)断裂试样　　(b)断裂处局部放大

图 1 冲压开裂试样

Fig.1 Stamping cracked sample

因素相关。因材料在下游加工过程主要以拉伸冲压为主，考虑材料自身影响材料的成形性的因素也较多如表1所示[3]。本文对于材料成形性的研究主要通过提升拉伸冲压值$\bar{r}$着手，通过等轴晶率、热轧开轧温度、冷轧大压下及二轧程工艺试验，找到了产品开裂的原因并提出了相关改进措施。

表 1 材料成形性能影响因素

Tab.1 Factors affecting the formability of materials

冲压成形性能		主要影响因素	次要影响因素
抗破裂性	弯曲成形性能	Δt	总伸长率的平面和向异性程度
	拉伸成形性能	$\bar{r}$	n、σs、$\sigma s/\sigma b$
	胀形成形性能	n	$\bar{r}$, σs, Δt
	翻边(扩孔)成形性能	Δt	$\bar{r}$，强度和塑性的平面和向异性程度
	贴膜性	σs	$\bar{r}$, $\sigma s/\sigma b$、n
	定形性	σs、E	$\bar{r}$, $\sigma s/\sigma b$、n

2 生产工艺及材料方法

2.1 生产工艺

对市场上冲压开裂的钢卷进行检测分析(其成分见表2)，生产钢卷具体工艺流程如下：

AOD转炉冶炼→LF炉精炼→板坯连铸→板坯修磨→加热炉加热→粗轧机轧制→炉卷轧机轧制→卷取→罩式退火炉→酸洗→CRM→冷退火酸洗→SPM→剪切、分卷→检验、入库。

表2 冲压开裂SUS430铁素体不锈钢成分 w(%)

Tab.2 Chemical composition of stamping cracked SUS430 ferritic stainless steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.041	0.35	0.50	0.021	0.002	0.3	16.13	0.038

2.2 实验材料及方法

金相样品线切割为20 mm×20 mm，通过打磨、抛光、腐蚀(HCl+$FeCl_3$溶液)后，采用光学显微镜进行观察。分别按照国标《金属材料维氏硬度试验》(GB/T 4340.1-2009)和《金属材料拉伸试验》(GB/T 228.1-2010)测定硬度和常规力学性能，按照国标《金属材料-薄板和薄带-塑性应变比(r值)的测定》(GB/T 5027-1999)和其他相关国标(GB/T 228-2002)，测量板料的塑性应变比(厚向应变指数)：

$$r=\varepsilon_b/\varepsilon_t=(\ln b/b_o)/(\ln t/t_o)$$

式中，ε_b为试样的宽度应变、ε_t为厚度应变；b、b_o和t、t_o为变形前后的试样宽度和厚度。

$$\bar{r}=(r_0+2r_{45}+r_{90})/4$$

$$\Delta r=(r_0+r_{90}-2r_{45})/2$$

式中，r_0、r_{45}和r_{90}分别表示板材纵向、45° 和横向方向上的r值。

3 实验结果及分析

3.1 等轴晶率影响分析

试验中低等轴晶率为45%，高等轴晶率为60%。高等轴晶率的钢卷屈服、抗拉、伸长率和硬度基本上变化不大，但略有升高，$\bar{r}$值发生明显的提升，低等轴晶率为0.815，高等轴晶率为0.905，如表3所示。杜伟[4-6]认为，凝固组织处于整个工艺的最初阶段，对铁素体不锈钢最终的皱褶性能和深冲性能有着重要的影响。凝固初始阶段如果产生大量的柱状晶，而这种柱状晶的生成在热轧后续的退火中很难再结晶，所形成的带状组织很容易被保留在成品板。430钢铸坯的柱状晶具有双重性特征，既是因柱晶平行排列而形成的方向性组织，又是柱晶本身原子排列结构的定向生长而造成的{100}织构。所以，柱状晶是集方向性组织与方向性结构(织构)二者为一体的，柱晶组织是其{100}织构的载体。良好的等轴晶是均匀的、各向同性的，它是单相固溶体比较理想的组织状

表3 不同等轴晶率的钢卷性能对比

Tab.3 Performance comparioson between dfferent equiaxial crystal steel coils

	厚度 /mm	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A50%	硬度(HV)	$\bar{r}$
低等轴晶率	0.8	307.4	488.8	29.5	142	0.812
高等轴晶率	0.8	314.0	490.2	31.0	145	0.905

态；就变形板材而言，它是良好再结晶的产物，等轴晶本身提供了均一的性能，一定的强度和良好的塑韧性。从板材晶粒取向的层面上，{111}板面织构可以使板材的变形主要在板面内，其原因就是此时厚向为{111}方向，体心立方最密排方向，因而厚向变形阻力大，所以在板样受拉时，宽向的变形甚大于厚向的变形，就获得了较大的r值。因此，高等轴晶的铸坯在轧制过程中形成了{111}织构，同时降低了很难再结晶的带状组织，高等轴晶率的钢板$\bar{r}$出现明显的升高。

3.2　降低开轧温度试验分析

同属铁素体不锈钢的409L（其铸坯柱状晶为43.60%）在热轧过程中很容易发生比较完全的动态再结晶[7]。然而，430却与之大不相同，热轧过程中可进行动态回复，而发生动态再结晶的程度很小，尤其是在热轧板的内部。因此，加大热轧加工过程中的形变储存能，特降低热轧开轧温度进行试验，具体工艺参数如表4所示，实验工艺开轧温度比正常工艺开轧温度降低30 ℃，通过性能对比降低开轧温度的钢卷抗拉强度比正常工艺卷抗拉强度略高，$\bar{r}$为0.858，比正常工艺卷高0.046，如表5所示。分析认为具有{100}织构的430柱状晶组织对于后续的热过程与变形过程有着很大的惰性或稳定性，因此柱状晶的基本组织形态保持或者残留，加大热轧加工过程中的形变储存能，能够使热轧后的竹节晶或条带组织，对罩式炉退火乃至冷线退火的效果（包括竹节状铁素体的消除、再结晶的完全性）影响很大，因此有利于冲压成型。

表4 不同热轧开轧工艺参数表
Tab.4 Process parameters of different starting rolling

工艺参数	开轧温度/℃	卷取冷却温度/℃
正常工艺	950±10	680
试验工艺	920±10	650

表5 不同开轧温度钢卷性能对比
Tab.5 Performance comparison between different starting rolling temperature

	厚度/mm	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A50%	硬度(HV)	$\bar{r}$
正常工艺	0.8	307.4	488.80	29.5	142	0.812
试验工艺	0.8	308.5	491.75	29.6	145	0.858

3.3　冷轧大压下和二轧程试验分析

表6为430不锈钢大压下和二轧程实验工艺参数表，大压下总压下率为81.4%，二轧程两次压下率总和为115.9%，对比正常轧制钢卷压下率为62.5%。如表7中可以看出，相同成品厚度0.577 mm两轧程试验卷与对比卷相比，伸长率、$\bar{r}$值和Δr值分别高出1.81%，0.57合0.094；屈服强度，抗拉强度分别高24.17 MPa和8.25 MPa；相同成品厚度0.577 mm两轧程试验卷与大压下卷相比，伸长率高1.72%；$\bar{r}$值高0.16，Δr值高0.175；屈服强度比大压下时小10 MPa左右，抗拉强度值相差不大。可以看出二轧程钢卷的伸长率和$\bar{r}$都得到了提升，表明二轧程钢卷具有良好的成形性能。但是二轧程增加了Δr值，增加了材料的各向异性。

表6 430不锈钢大压下，二轧程试验工艺
Tab.6 Experiment processes for 430 stanless steel

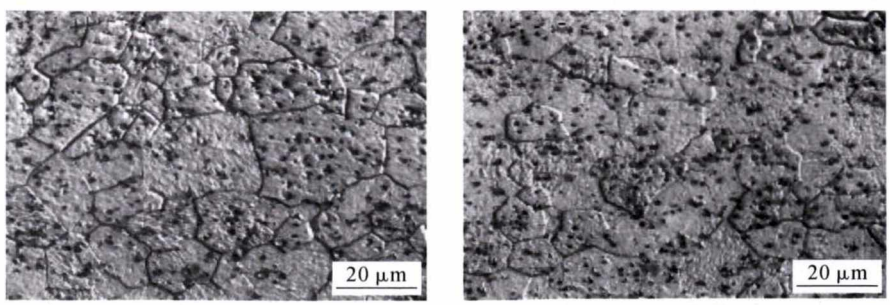
试验工艺	成品厚度/mm	冷轧压下率(%)		
		一轧	二轧	总压下率
大压下	0.6	81.4		81.4
二轧程	0.6	57.6	58.3%	115.9
对比卷	0.6	62.5		62.5

表7 430不锈钢大压下，二轧程性能对比
Tab.7 Performance comparison between different rolling process

	厚度/mm	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A50%	硬度(HV)	$\bar{r}$	Δr
大压下	0.6	342.00	491.67	29.11	149.41	0.990	-0.15
二轧程	0.6	332.67	494.00	30.83	156.22	1.150	0.325
对比卷	0.6	308.50	485.75	29.02	145.00	0.858	0.231

大压下、二轧程钢卷纵向和横向金相组织见图2和图3。

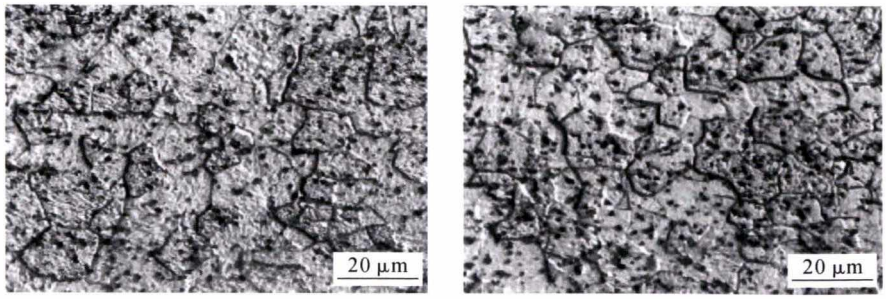
大压下与二轧程两状态都无明显的竹节晶粒，但大压下情况下仍可见柱晶残留痕迹（成串较细小等轴晶沿轧向的分布），而二轧程情况下则甚为轻



(a)大压下纵向　　(b)二轧程纵向

图2 沿纵(轧制)方向的金相组织比较

Fig.2 Metallographic strcture along rolling (longitudinal) direction



(a)大压下横向　　(b)二轧程横向

图 3 沿横(垂直于轧制)方向的金相组织比较

Fig.3 Metallographic strcture along transverse (normal to rolling) direction

微;二轧程情况下的碳化物分布更为均匀一些,大压下情况下碳化物仍有轧向较多分布的倾向。以上两点皆与其性能上的差别相对应;二轧程状态下铁素体晶界上都没有明显的碳化物聚集,这对性能是有利的。二轧程多了一次冷轧工序间的退火,对达到良好的再结晶效果大有好处,而且对通过中间退火的板材进行第二次轧制时,其变形效果会大有改善[8];大压下通过 70%～80% 以上的冷轧变形量,既能有效地破坏可能的竹节晶或条带组织,又能增加冷变形储能,从而促进再结晶过程。此二工艺改革措施都对变形深入到板材的内部(直至心部)有利,能够强化晶粒的变形、位向的变化(转动)以及亚结构的变化,能够比较彻底地消除柱状晶残余及其 {100}织构,并且有利于{111}板面织构的生成与扩展。冷线限速也有大致类似的作用。就程度与效果而言,可能是二轧程较优,大压下次之,冷线限速再逊,都是很有成效的,这也为酒钢的生产性试验所证实。在实际的板材生产中,可根据板材的具体要求以及现场条件等予以选择。

3.4 工艺改进措施

通过对SUS430产生冲压开裂的机理研究,提升铸坯等轴晶率和降低热轧开轧温度、大压下、二轧程工艺都能够提升430冲压成形性能。根据上述分析,炼钢投入电磁搅拌提升等轴晶率,等轴晶率控制60%左右;降低热轧开轧温度到920±10 ℃,卷取温度650±10 ℃;二轧程多了一次冷轧工序间的退火,对达到良好的再结晶效果大有好处,而且对通过中间退火的板材进行第二次轧制时,其变形效果会大有改善;大压下通过70%～80% 以上的冷轧变形量,既能有效地破坏可能的竹节晶或条带组织,又能增加冷变形储能,从而促进再结晶过程。因此,生产过程中针对冲压性能高一些的可以选择大压下工艺,轧程压下率控制到70%以上,对于结构复杂,冲压要求较高的采取二轧程工艺。现场根据上述工艺的实施,对整体430冲压性能的提升效果较明显。

4 结论

(1)高等轴晶率的钢卷屈服、抗拉、伸长率和硬度基本上变化不大,但略有升高,$\bar{r}$值发生明显的提升,低等轴晶率为0.815,高等轴晶率为0.905。

(2)降低开轧温度的钢卷抗拉强度比正常工艺卷抗拉强度略高,$\bar{r}$为0.858,比正常工艺卷高0.046。加大热轧加工过程中的形变储存能,能够使热轧后的竹节晶或条带组织,对罩式炉退火乃至冷线退火的效果(包括竹节状铁素体的消除、再结晶的完全性)影响很大,因此有利于冲压成型。

(3)相同成品厚度0.577 mm 两轧程试验卷与对比卷相比:伸长率高出1.81%;$\bar{r}$值高出0.57,$\triangle r$值高出0.094;屈服强度高24.17 MPa,抗拉强度值高8.25;相同成品厚度0.577 mm两轧程试验卷与大压下卷相比;伸长率、$\bar{r}$值和$\triangle r$值分别高出1.72%、0.16和0.175;屈服强度比大压下小10 MPa左右,抗拉强度值相差不大。

(4)二轧程钢卷的伸长率和$\bar{r}$都得到了提升,二轧程钢卷具有良好的成形性能,但是二轧程增加了$\triangle r$值,增加了材料的各向异性。

(5)生产过程中针对冲压性能高一些的可以选择大压下工艺,轧程压下率控制到70%以上,对于结构复杂,冲压要求较高的采取二轧程工艺。现场根据上述工艺的实施,对整体430冲压性能的提升效果较明显。

参考文献:

[1] 张帅,李静媛,杜伟,等. 一种新型铁素体不锈钢的深冲性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(1): 25-31.

[2] 邬珠仙,吴狄峰,刘明,等. 304不锈钢制品侧壁横向开裂原因分析[J]. 宝钢技术, 2014, (4): 33-36.

[3] 景容,姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[4] 杜伟,江来朱,余海峰,等. 铁素体不锈钢的冲压性[J]. 宝钢技术,

(下转第 910 页)

stitute of Metals, 2020, 73(12):1-12.

[46] 何天兵,胡仁伟,何晓磊,等. 碳纳米管增强金属基复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2015, 43(10):91-101.

[47] MEHER A, MAHAPATRA M M, SAMAL P, et al. Abrasive Wear Behaviour of TiB2 Reinforced In-Situ Synthesized Magnesium RZ5 Alloy based Metal Matrix Composites[J]. Metals and Materials International, 2020, 1:3652-3665.

[48] ZHANG W, LI X, DING D, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Mg_2Si/AZ91 Composites In Situ Synthesized by Using Silica Fume as the Si Source[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(10):5300-5311.

[49] LU L, THONG K K, GUPTA M. Mg-based composite reinforced by Mg_2Si composite [J]. Science Technology, 2003, 63 (5): 627-632.

[50] SHAMEKH M, PUGH M, MEDRAJ M. Processing and Characterization of In Situ (TiC-TiB_2)p/AZ91D Magnesium Matrix Composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15(8):708-717.

[51] ZHAO R N. In situ synthesis of CNTs in Mg powder at low temperature for fabricating reinforced Mg composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 551: 496-501.

（上接第 902 页）

2012, (6): 66-76.

[5] WU P D, LLOYD D J, HUANG Y. Correlation of ridging and texture in ferritic stainless steel sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2006(427): 241-245.

[6] HUH M Y, ENGLER O. Effect of intermediate annealing ontexture, formability and ridging of 17% Cr ferritic stainless steel sheet [J]. Materials Science and Engineering A, 2001(308): 74- 87.

[7] 胡天雷. 400系铁素体不锈钢成形性能的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.

[8] DANIEL D, JONAS J J. Measurement and prediction of plastic anisotropy in deep-drawing steels[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21A: 331-343.

TSFA便携式非接触红外测温仪

铸造测温的跨越



采用德国技术，激光/望远镜瞄准，只要扣动按键，炉内熔化温度、出炉温度、浇包温度、浇注开始与终了温度、冒口溢流温度就会瞬间显示。全程检测，快速、准确、方便。4米内目标不受距离影响。测温范围：1000~2000℃，铸铁、铸钢、铝铜不同合金发射率可调。

产品特点及技术参数

- 瞄准方式：激光/望远镜瞄准
- 目标距离：4 m 内测量与距离无关
- 激光聚焦：3600 mm距离激光聚焦为24 mm光斑
- 测量模式：最大值/最小值显示/记忆功能
- 扫描功能：对测量目标快速扫描并显示出测量的最大值
- 报警方式：高低温声光报警
- 存储功能：2000 个数据点

唐盛电子

纳米级短波精确测量物体温度，特别是熔融金属液态温度；带USB接口及软件，可设定仪器参数、存取数据可下载、连接计算机可以显示实时温度及温度曲线，对合金熔化及浇注温度的控制提供可靠的适时测量。

西安唐盛电子有限责任公司

地址：西安市雁翔路132号开元新村4单元201室
电话：029-83290862　　传真：029-88473613
Email: xatomson@163.com　　QQ：517221382