

冲压用冷轧奥氏体不锈钢带的表面质量控制

彭正全^{1,2}, 薛文功²

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 酒泉钢铁(集团)公司不锈钢厂, 甘肃 嘉峪关 735100)

[摘要] 介绍了冷轧薄板的典型冲压成形方式, 结合冷轧不锈钢带基本成形性能与冲压性能的关系, 探讨了组织、成分、冷轧工艺、表面质量等因素对冷轧奥氏体不锈钢带冲压性能的影响。提出冲压用冷轧奥氏体不锈钢带要适当增加 Ni、Cu 含量, 减少 δ 铁素体, 控制晶粒度, 并对冷轧压下率、厚度精度、表面粗糙度、表面缺陷进行控制, 以满足冲压要求。

[关键词] 不锈钢; 奥氏体; 冷轧; 深冲; 质量控制

[中图分类号] TG142.71

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2007)06-0093-04

Surface Quality Control of Cold Rolled Austenitic Stainless Steel Strip for Deep Drawing

PENG Zheng-quan^{1,2}, XUE Wen-gong²

(1. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Stainless Steel Plant of Jiuquan Iron & Steel Corp., Jiayuguan 735100, China)

[Abstract] The typical pressing process was illustrated, the influence of the microstructure, chemical composition, cold rolling technology, surface quality, etc. was discussed upon the deep drawing property of cold rolled austenitic stainless steel strip. In order to satisfy the deep drawing requirement, the approach of adding Ni/Cu, reducing δ Ferrite, controlling the grain size, and controlling the cold rolling reduction rate, accuracy of thickness, surface roughness, surface defects etc was proposed.

[Key words] Stainless steel; Austenitic; Cold rolling; Deep draw; Quality control

0 引言

不锈钢制品一般都采用冲压成型, 因此要求冷轧不锈钢板应具有优良的深冲性能。目前市场上专用于深冲制品的冷轧奥氏体不锈钢薄板主要有 3 个钢种: SUS304Ni8.5 (一般冲压)、SUS304Ni9 (深度冲压) 和 SUS304Cu (一般冲压), 前两者镍含量分别比 SUS304 高 0.5% 和 1% 左右, 后者在 SUS304 基体中添加了 0.75% ~ 1.25% 的铜。其中的镍和铜都是奥氏体形成元素^[1], 使材质的冲压性能得到改善, 但由于组织、工艺等因素的影响, 不锈钢制品在冲压过程中表面仍会出现不同程度的开裂, 导致冲压合格率、生产成本增加。

本文结合奥氏体不锈钢带的成分、组织、轧制工艺、表面质量等因素对冲压性能的影响, 论述冲压用奥氏体不锈钢带的质量控制重点, 以便于冲压用冷轧奥氏体不锈钢带的生产和质量控制。

1 典型冲压成形方式

主要可分为胀形变形、拉深变形、翻边成形和弯曲成形 4

种^[2], 见图 1 (图中 A、B 分别为流入和流出凹模的部位)。

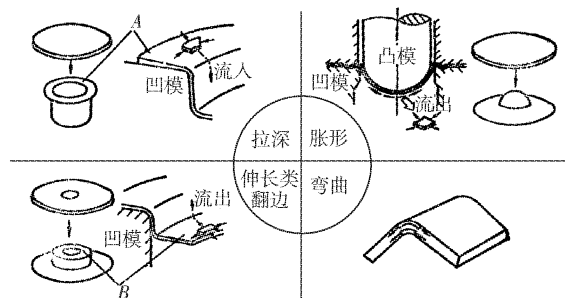


图 1 冲压成形类型

Figure 1 Types of deep drawing

胀形成形: 为双向延伸, 试片两端被压圈压死, 完全依靠材料长度和厚度方向的延伸变形, 杯突试验属此类变形 (测定样品破裂时的凸包高度)。

深冲变形: 为双向延伸 + 金属流动, 试片两端未被压死, 主要靠材料的流动性变形, 同时要获得大的变形, 也需要材料具有良好的延伸性。在实际用途中, 不锈钢冷轧制品主要还是以深冲变形加工的方式居多, 一般采用测试极限深冲比 LDR 的方式来衡量。

翻边成形: 翻边是利用模具把板料上的孔缘或者外缘翻成竖边的冲压加工方法, 这种成形方式叫做扩孔, 生产应用也很普遍, 一般通过扩孔试验测试扩孔率 λ 来衡量扩孔性能。

弯曲成形: 将板料、棒料、管料或型材等弯成一定形状和角

[收稿日期] 2007-08-27

[作者简介] 彭正全 (1973-), 男, 甘肃嘉峪关人, 工程师, 本科, 从事不锈钢冷轧工艺和质量控制工作。

度零件的成形方法,一般通过测试弯曲试样外层材料不产生裂纹时的最小弯曲半径来衡量弯曲性能。

一些较为复杂的冲压成形方式经常可视为它们之中的2个或2个以上的复合,见图2(图中a为发生拉深变形的部位,A₀为变形区域)。

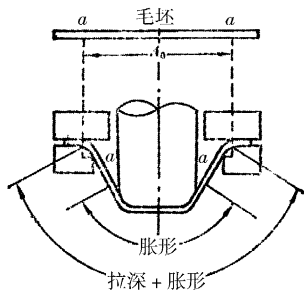


图2 典型冲压成形方式

Figure 2 General forming method of deep drawing

2 不锈钢带基本成形性能与冲压性能的关系

冷轧薄板的基本成形性能指标除了常规的拉伸性能指标($\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 、 δ_5)外,主要有硬化指数 n 和塑性应变比 r ^[3],以下简要说明:

1) 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 材料的屈服强度小表示材料容易屈服,成形后回弹小,贴模性和定形性好。

2) 抗拉强度 σ_b 材料的抗拉强度大,则材料变形过程中不容易被拉断,有利于塑性变形。

3) 延伸率 δ_5 材料的延伸率大,板料允许的塑性变形程度大,抗破裂性较好,对拉深、翻边、胀形都有利。一般来说,材料的翻边系数和胀形性能(杯突值)都与延伸率成正比关系。

4) 应变硬化指数(n) 应变硬化指数即通常说的 n 值,表示材料具有冷作硬化现象,与材料的冲压成形性能十分密切。不锈钢具有一定的 n 值是实现延伸的保证,针对冲压性能,尤其是胀形成形,材料的应变硬化指数越大,抗破裂性越强。但 n 值也不宜过大,否则会导致材料过度硬化,流动性降低,直接导致加工后的制品残余应力大,引起时效开裂(冲压好的制品经过一段时间后发生开裂)。

5) 塑性应变比 r 塑性应变比是单向拉伸试样的宽度应变和厚度应变的比值。材料沿轧制方向取向不同, r 值也不同,所以材料的塑性应变比常用 \bar{r} 来表示, \bar{r} 的计算公式为:

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

式中, r 的下标为试样拉伸轴与钢板轧制方向的夹角,分别为 0° 、 90° 和 45° 。 \bar{r} 值对拉深成形性能影响很大,材料的极限拉深比主要取决于 \bar{r} 值。 \bar{r} 值大,板料平面方向比板厚方向容易变形,拉深毛坯的径向收缩时不容易起皱,并且拉深力也小,传力区不容易拉破,故有利于板料的拉深成形性能。

6) 材料的各向异性 Δr 材料沿轧制方向取向不同, r 值也不同,这是材料的各向异性决定的。一般来说垂直轧制方向(90°)的 r 值最大, 45° 方向的 r 值最小,各方向的 r 值越相近对拉深性能越有利。材料的各向异性可用凸耳系数 Δr 表示,如下面的公式:

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

3 金属组织对冲压性能的影响

冷轧不锈钢带的成品交货状态一般为退火态。奥氏体(300系列)冷轧带钢成品的组织主要是奥氏体,但对于压稳态奥氏体钢(如SUS304),会有少量 δ 铁素体存在,这种铁素体表面上可能对带钢的基本成形性能影响不大,但对深冲性能有明显的不良影响。

3.1 奥氏体不锈钢中的 δ 铁素体的影响

奥氏体钢中铁素体的存在对胀型等二维变形有明显不利影响,且铁素体含量越多,影响越严重,而对拉伸等单维变形影响不明显。

δ 铁素体在奥氏体不锈钢中以平行于轧制方向的条状形式存在,如图3所示。在亚稳态奥氏体不锈钢中, δ 铁素体的主要作用是阻碍奥氏体晶粒的长大,成为其两侧晶粒的分界面,并成条带状分布(如图4),加剧材料的各向异性,降低基体的深冲性能,使制品加工后产生皱纹甚至开裂。

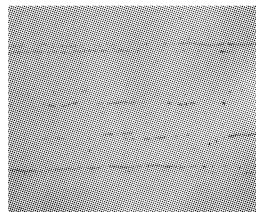


图3 SUS304 不锈钢中的 δ 铁素体 100 ×

Figure 3 Delta ferrite in SUS304 stainless steel

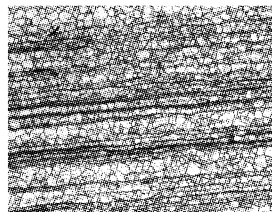


图4 δ 铁素体对 SUS304 不锈钢再结晶的影响 100 ×

Figure 4 Effects of delta ferrite on the recrystallization of SUS304

3.2 晶粒度对冲压性能的影响

晶粒度大,晶粒就越细。晶粒较大时,有利于提高材料的塑性应变比(r),但它们在板料表层取向不同,变形量差异比较明显,材料表面易出现“桔皮”现象(见图5)。细化晶粒可减轻桔皮现象发生,但晶粒过细, r 值会减小,屈服比和屈服伸长都会增大,不利于成形。因此,不锈钢冷轧带钢的晶粒度应区分不同的深加工用途进行控制,一般深冲材料的晶粒度控制在7~8级。

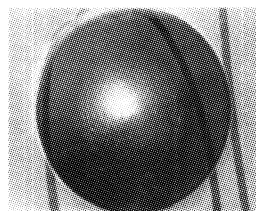


图5 表面桔皮缺陷

Figure 5 Orange peel defect

4 成分对冲压性能的影响

成分对冲压性能的影响主要体现在对组织稳定性和加工硬化的影响上,组织越稳定,冲压性能就越好。而不锈钢的冷作硬

化现象主要是由 2 种因素引起的:一种是位错增多引起的加工硬化;另一种是组织转变(奥氏体加工诱变为马氏体)引起的加工硬化,后者实际上也体现在了组织稳定性中。

对于冲压用奥氏体钢,成分设计的重点是提高奥氏体的组织稳定性,以避免在冷加工变形过程中产生大量的马氏体转变,成分对奥氏体稳定性的影响一般用奥氏体平衡系数 A 和冷加工诱变马氏体转变点 $Md_{30/50}$ 来表示。

奥氏体平衡系数 $A = 30(\omega_C + \omega_N) + 0.5\omega_{Mn} + \omega_{Ni} - 1.3\omega_{Cr} + 11.8$

A 值的大小表示奥氏体的稳定程度。 A 值越小,奥氏体越不稳定,钢的组织容易受到冷加工的影响而发生组织转变,冷作硬化程度剧烈,导致冲压变形不均,严重者导致冲压开裂。提高 Ni 、 Mn 、 C 、 N 都有利于稳定奥氏体^[1]。

冷加工诱变马氏体转变点 $Md_{30/50}$:

$Md_{30/50} = 551 - 462(\omega_C + \omega_N) - 9.2\omega_{Si} - 8.1\omega_{Mn} - 13.7\omega_{Cr} - 29(\omega_{Ni} + \omega_{Cu}) - 18.5\omega_{Mo}$

$Md_{30/50}$ 表示真应变变量 30% 的冷变形后生成 50% 马氏体的温度,奥氏体不锈钢中合金元素含量越高,马氏体转变点 $Md_{30/50}$ 就越低,在冷加工变形过程中诱变马氏体不易产生,冷作硬化程度小,越有利于冲压变形。

从这 2 个系数的经验公式可以看出,提高奥氏体稳定性的元素基本上都会导致加工硬化的加剧(尤其是 C 、 N 等间隙性原子)。为避免因增加组织稳定性导致的过加工硬化,冲压用奥氏体不锈钢的成分设计中一般不采用增加 C 、 N 原子的做法。

表 1 列出了常见奥氏体不锈钢材料的 $Md_{30/50}$ 。从表 1 中可以看出,由于 SUS304Cu 是在 SUS304 中添加了少量的铜,根据 $Md_{30/50}$ 的计算公式,铜与镍的作用是一致的,都可以降低 $Md_{30/50}$ 值,稳定奥氏体。因此 SUS304Cu 与 SUS304 相比不容易硬化,可以提高材料的流动性,特别有利于拉深工艺。

表 1 常见奥氏体不锈钢材料的诱变马氏体转变点
Table 1 $Md_{30/50}$ of some austenitic stainless steel

钢种	SUS316	SUS316L	常规 SUS304	SUS304Cu
$Md_{30/50}$	-9.45	-39.62	24 ~ 35	8.0

5 冷轧工艺对冲压性能的影响

不锈钢冷轧工艺对奥氏体钢冲压性能的影响主要体现在对带钢的塑性应变比 r 、组织、表面质量的影响上。

5.1 冷轧压下率对 r 值的影响

随着冷轧压下率的增大,SUS304 材料的 Δr 值也增大,即大的冷轧压下率对 SUS304 材料的各向异性是不利的。在一般情况下冷轧压下率可选 50% ~ 70%,要实现好的拉深性能可选 40% ~ 50% 的压下率。

5.2 中间退火道次对 r 值的影响

增加退火次数可以增大材料的 r 值(如图 6 所示),但对材料的凸耳参数 Δr 影响不大。从实际生产效率考虑,以 2 次退火为宜。

5.3 退火工艺对组织的影响

退火工艺对组织的影响主要体现在对组织均匀性的影响

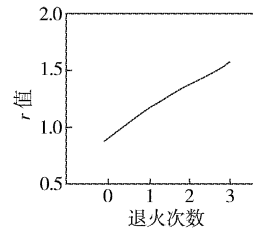


图 6 SUS304 退火道次与 r 值关系

Figure 6 Relation of annealing passes and r value

上。对于有深冲要求的奥氏体钢,在冷轧生产中可采取的措施主要是在热卷退火时提高加热温度及延长加热时间,其次是采用多轧程轧制的方法,以充分分解热轧态原料中残留的 δ 铁素体,达到提高深冲性能的目的。

5.4 厚度公差对冲压性能的影响

不锈钢冷轧一般采用负公差轧制,由于冲压模具的间隙设置一般按照标准厚度进行设计,如果深冲板料厚度公差太大(超负公差),就会导致材料厚度与模具不匹配,深冲时材料流动不均而导致开裂^[2],因此,深冲用冷轧不锈钢带的厚度负公差一般要在标准要求的基础上进行限制。

5.5 表面质量对冲压性能的影响

5.5.1 表面粗糙度

板料冲压成形时,如果板料表面粗糙度过大,则变形时的摩擦力较大,容易形成应力集中,对成形性能不利;材料表面过于光滑时,模具和板料之间的润滑剂很容易被成形时的压力挤走。因此,用于冲压成形的板料表面要有适当的粗糙度。

5.5.2 表面缺陷对冲压的影响

所有容易导致形成裂纹源的表面缺陷都可能会导致深冲开裂,如有一定深度和宽度的狭缝、划伤、表面裂纹等线状缺陷和压入、凹坑等点状缺陷。因此,对于容易引发深冲开裂的缺陷,在深冲用冷轧不锈钢带的质量检查、判定上要特别限制。

6 冲压成型工艺对冲压合格率的影响

冲压合格率除决定于不锈钢材料本身的性能外,还与材料厚度与模具的匹配、冲压加工工艺条件(如润滑和成形工艺)等因素有关^[2]。材料厚度与模具不匹配或润滑油选型不当,都会导致材料与模具之间出现“干摩擦”情况,使冲压件表面产生划痕,并导致模具表面形成粘结瘤。

7 冲压用冷轧不锈钢带的质量控制重点

综上所述,冲压用奥氏体冷轧不锈钢带的质量控制重点整理如下:

1) 成分设计上,要考虑适当增加组织稳定性的元素,如 Ni 、 Cu 的含量。

2) 成品的组织要尽可能均匀,通过退火工艺的优化减少或消除对冲压不利的不良组织 δ 铁素体,并控制带钢的晶粒度(一般 7 ~ 8 级)。

3) 冷轧制工艺的设计上要重点考虑成品的各向异性,以

提高深冲性能,如对 SUS304 单轧程总轧制率要控制在 40% ~ 60%。

4) 冷轧生产中也要对厚度精度、表面粗糙度、表面缺陷进行控制,以满足冲压要求。

5) 在实际应用中,要结合产品的冲压类型对质量控制重点进行适当调整,如胀形成形材要设法提高材料的延伸率,可适当提高加工硬化指数 n ;拉深成形材要降低材料的硬化程度,以提高材料流动性。

(上接第 82 页)

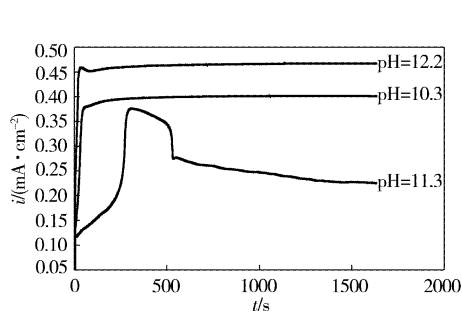


图3 pH 值对铜-银电偶电流的影响
Figure 3 Effects of pH value on galvanic current of copper-silver

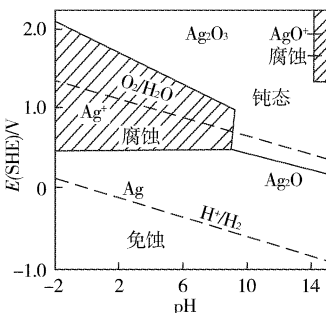


图4 银的电位-pH 图
Figure 4 Pourbaix diagram of silver

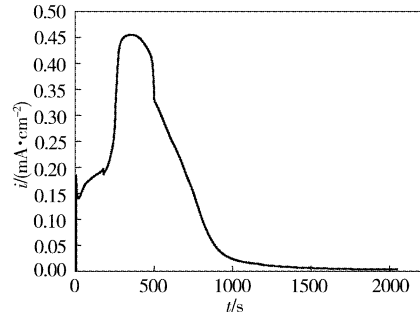


图5 优选工艺条件下的铜-银电偶电流曲线
Figure 5 Galvanic current of copper-silver under optimal technological condition

为进一步验证电偶电流法所确定的浸镀工艺参数是否可行,以市售铜箔为基材进行浸镀,得到如图 6 所示的银镀层形貌。从图 6 中可以清楚地看出,所获得的银镀层颗粒细小均匀,颗粒尺度为 40 ~ 80nm。从图像上看,银镀层非常致密,大颗粒之间的孔隙均被细小颗粒填充(如图 6 中箭头所示),颗粒与颗粒之间未发现有明显的孔洞。很明显,这对于采用置换法浸镀银工艺来说是很理想的结果,同时也进一步说明采用基于电偶电流法所确定的浸镀工艺参数可以获得理想的银镀层。

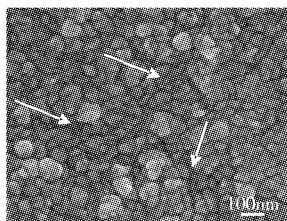


图6 优选工艺条件下银镀层的扫描电镜像
Figure 6 SEM micrograph of silver plating under optimal technological condition

3 结 论

1) 不同浸镀工艺条件下,铜银电偶电流随时间的变化趋势是不同的。根据电偶电流-时间曲线上是否出现明显的“沉积电流墙”以及残余电偶电流的大小,可以方便地筛选出较理想的工艺参数。

2) 采用电偶电流法设计浸镀工艺参数,不仅可行,而且直观方便,对浸镀生产实践有一定的指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] 陆世英,张廷凯,杨长强,等. 不锈钢[M]. 北京:原子能出版社,1995.190-210
- [2] 李硕本,李春峰,郭斌,等. 冲压工艺理论及新技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.1-10
- [3] 卡恩 R W,哈森 P,克雷默 E J,等. 钢的组织与性能[M]. 刘嘉禾译. 北京:科学出版社,1999.283-285

[参 考 文 献]

- [1] 宋诗哲. 腐蚀电化学研究方法[M]. 北京:化学工业出版社,1988.193-197
- [2] 李君,董超芳,李晓刚,等. Q235-304L 电偶对在 Na₂S 溶液中的电偶腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2006,26(5):308-314
- [3] 郝小军,宋诗哲. 电偶电流评价牺牲阳极性能[J]. 中国腐蚀与防护学报,2005,25(3):176-178
- [4] 刘烈伟,卢波兰,吴曲勇,等. 钢铁化学置换镀铜的研究[J]. 腐蚀与防护,2004,25(12):523-525
- [5] 冯绍彬,董会超,夏同弛,等. 钢丝化学镀铜工艺研究和理论探讨[J]. 金属制品,1997,23(4):12-15
- [6] 王丽丽. 置换型化学镀银液[J]. 电镀与精饰,2003,25(1):39-41
- [7] 渡边敏. 纳米电镀[M]. 陈祝平,杨光译. 北京:化学工业出版社,2007.101-103
- [8] Walsh D E, Milad G, Gudczasuskas D. Final Finish: Printed Circuit Boards[J]. Metal Finishing,2003,101(1):25-26
- [9] 方景礼. 21 世纪的表面处理新技术[J]. 表面技术,2005,34(5):1-5
- [10] Arra M, Shanguan D K, Xie D J, et al. Study of immersion silver and tin printed circuit board surface finishes in lead-free solder applications[J]. Journal of Electronic Materials, 2004,33(9):977-990
- [11] 黄子勋. 实用电镀技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003.289-291
- [12] Mordechay Schlesinger, Milan Paunovic. Modern Electroplating (Fourth Edition)[M]. New York:John Wiley & Sons,INC.,2000.229
- [13] 周绍民. 金属电沉积——原理与研究方法[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987.216-220
- [14] 刘永辉,张佩芬. 金属腐蚀学原理[M]. 北京:航天工业出版社,1993.271