

## 铜含量对深冲用 304J1 奥氏体不锈钢力学性能的影响

韦成贵<sup>1</sup> 李志栋<sup>1</sup> 袁方成<sup>2</sup>

(1 四川金广实业(集团)股份有限公司, 德阳 618300; 2 湖北新冶钢有限公司, 黄石 435001)

**摘要** 试验用 304J1 奥氏体不锈钢( /% : ≤0.08C, ≤1.70Si, ≤3.00Mn, 15~18Cr, 6~9Ni, 1~3Cu) 经 10 kg 真空感应炉熔炼, 锻成 Φ40 mm 钢棒, 并经 1 080 °C 10 min, 固溶处理、水冷。试验研究了 0.05% ~ 2.52% Cu 对试验钢( /% : 0.054~0.068C, 0.45~0.63Si, 1.82~1.95Mn, 17.26~17.62Cr, 6.42~6.49Ni) 力学性能的影响, 并对对比分析了试验钢 304J1 和 304DDQ 深冲钢( /% : 0.04C, 0.32Si, 1.17Mn, 18.11Cr, 8.66Ni) 的 30% 冷变形产生 50% 马氏体的温度-冷加工诱导马氏体转变点  $M_{d30}$ , 堆垛层错能和深冲杯凸(CUP) 值。得出将 304J1 钢铜含量目标成分设定为 1.50% 时, 室温力学性能、冷加工塑性、深冲性能及经济性的匹配性最佳。工业生产表明, 1.50% Cu 304J1 钢 0.27 mm 板的深冲值 ≥13 mm 与 304DDQ 钢相当。

**关键词** 304J1 奥氏体不锈钢 铜含量 力学性能 深冲性能

## Influence of Copper Content on Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel 304J1 for Deep Drawing

Wei Chenggui<sup>1</sup>, Li Zhidong<sup>1</sup> and Yuan Fangcheng<sup>2</sup>

(1 Sichuan Jinguang Industrial (Group) Co Ltd, Deyang 618300; 2 Hubei Xinyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

**Abstract** The tested austenitic stainless steel 304J1 ( /% : ≤0.08C, ≤1.70Si, ≤3.00Mn, 15~18Cr, 6~9Ni, 1~3Cu) is melted by a 10 kg vacuum induction furnace, forged to Φ40 mm bar and solid-solution heat-treated at 1 080 °C for 10 min, water cooling. The effect of 0.05% ~ 2.52% Cu on mechanical properties of test steel ( /% : 0.054~0.068C, 0.45~0.63Si, 1.82~1.95Mn, 17.26~17.62Cr, 6.42~6.49Ni) has been tested and studied, and the temperature formed 50% martensite in 30% cold deformation process- cold working induced martensite transformation point  $M_{d30}$ , the stacking fault energy (SFE) and the deep drawing cup value (CUP) of test 304J1 steel and deep drawing steel 304DDQ ( /% : 0.04C, 0.32Si, 1.17Mn, 18.11Cr, 8.66Ni) are compared and analyzed. It is obtained that as copper content in steel 304J1 is 1.50%, the matching of ambient mechanical properties, cold working plasticity, deep drawing performance and economy is best and the commercial production shows that the deep drawing value of 0.27 mm sheet of 1.50% Cu 304J1 steel is ≥13 mm that is about equal to the deep drawing value of 304DDQ steel.

**Material Index** Austenitic Stainless Steel 304J1, Copper Content, Mechanical Properties, Deep Drawing Performance

304J1 不锈钢是一种通过适量降低镍元素, 添加铜元素, 提高材料的冲压性能, 从而改善其冷成型性能的节镍型奥氏体不锈钢<sup>[1-3]</sup>。因其具有良好的深冲性, 且基体锰含量可以控制在国家食品用不锈钢要求的范围之内, 适合用于卫生条件要求比较严格环境下的深冲加工产品, 如保温瓶、保温饭盒、厨房用组合灶台、集体供饭设施等。本试验通过调整铜元素的含量(1%~3%)使 304J1 不锈钢的室温力学性能达到最佳, 保证工业生产板材的深冲性能, 开发出低成本深冲用不锈钢。

### 1 试验材料和方法

试验材料化学成分见表 1, 在本试验中铜元素的含量为 0.05% ~ 2.52% (表 2)。

在 10 kg 真空感应炉进行 6 炉试验钢的冶炼试验(表 2), 然后经锻造、固溶和拉伸试验, 检测其室温力学性能。具体试验工艺如下:

表 1 304J1 钢的化学成分 /%

Table 1 Requirement of chemical composition of 304J1 steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
≤ 0.08	≤ 1.70	≤ 3.00	≤ 0.045	≤ 0.030	15.00 ~ 18.00	6.00 ~ 9.00	1.00 ~ 3.00

表 2 试验钢的化学成分

Table 2 Analysis of test steels

Cu 含量 / %	化学成分 / %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.05	0.060	0.47	1.89	0.040	0.004	17.55	6.49
0.51	0.065	0.48	1.86	0.040	0.005	17.55	6.44
1.05	0.054	0.46	1.87	0.040	0.005	17.55	6.48
1.53	0.068	0.63	1.82	0.039	0.005	17.62	6.42
2.04	0.060	0.45	1.95	0.043	0.004	17.26	6.45
2.52	0.060	0.53	1.85	0.040	0.004	17.30	6.42

(1) 冶炼在 10 kg 真空感应炉上进行, 出钢温度为 (1 550 ± 10) °C, 浇铸方式为上注法。

(2) 铸锭加热温度 1 230 °C, 开锻 1 100 °C, 终锻 950 °C, 锻造比  $\geq 5$ , 锻成为  $\Phi 40$  mm 钢棒。

(3) 固溶温度为  $(1\ 080 \pm 10)$  °C, 10 min 水冷。对于奥氏体不锈钢当碳含量小于 0.25% 时, 所有的碳化物在 1 000 ~ 1 100 °C 均会全部溶解, 固溶后再急速冷却至室温, 可以保持高温单相组织, 这种热处理可以得到最软且延展性最大的状态<sup>[4]</sup>。

固溶后的试验钢棒按照 GB/T20066-2006《钢和铁化学成分测定用试样的取样和制样方法》制取试样后, 在 SPECTRO-MAXx-LMF14 直读光谱仪上测定化学成分。按 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》截取试样后, 在 SHT4305 万能试验机上进行拉伸试验, 测定抗拉强度、屈服强度和伸长率等。按 GB/T13298-1991《金属显微组织检验方法》截取金相试样, 在 BX41M 金相显微镜上进行铁素体含量检验。腐蚀剂为苦味酸 4 g + 100 mL 乙醇 (95%) 溶液。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 化学成分分析

由表 2 可见, 试验钢的化学成分满足试验方案的设定范围且波动较小, 满足试验要求。

### 2.2 力学性能及铁素体含量分析

从表 3 可以看出:

(1) 铜在奥氏体不锈钢中对组织的影响取决于钢中的镍含量<sup>[5]</sup>, 在本试验中镍含量变化范围很小, 当铜元素含量在 0.05% ~ 2.52% 变化时, 对试验钢铁素体含量检测变化不明显。

(2) 随着铜含量增加, 试验钢屈服强度 ( $R_{p0.2}$ ) 和抗拉强度 ( $R_m$ ) 逐渐降低, 硬度 (HRB) 逐渐降低, 断后伸长率 (A) 逐渐增大, 且当铜含量从 1.05% 增加至 1.55% 时, 伸长率的增幅近 30%。

(3) 当铜含量增加到 2.52% 时, 试验钢在 1 100 °C 左右进行热变形加工时, 出现大量的横裂纹, 文献 [6] 报道, 含铜的奥氏体不锈钢在加热时, 易在钢坯

表 3 Cu 含量对 304J1 钢的室温力学性能及铁素体含量的影响

Cu 含量/ %	铁素体 含量/%	HRB 值	$R_m$ / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A/%
0.05	3~5	88	970	380	32
0.51	3~5	86	938	360	42
1.05	3~5	82	810	308	43
1.53	3~5	80	755	275	61
2.04	3~5	70	720	255	62
2.52	3~5		出现大量横裂纹		

的表面氧化铁皮下富集一层熔点低于 1 100 °C 的富铜合金, 这时会发生热脆, 使钢的表面产生大量横裂纹。因此含 2.52% Cu 钢所确定的化学成分冶炼后不适合进行热加工。

图 1 为抗拉强度 ( $R_m$ )、屈服强度 ( $R_{p0.2}$ ) 和断后伸长率 (A) 随 Cu 含量变化的曲线。

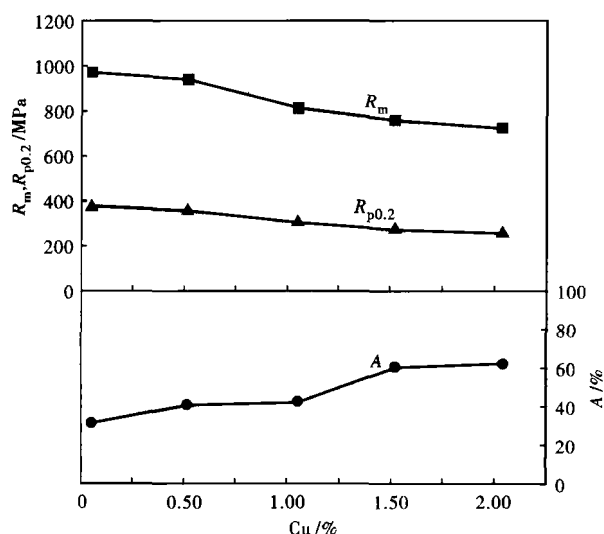


图 1 Cu 含量对试验钢 304J1 室温力学性能的影响  
Fig.1 Influence of Cu content on ambient mechanical properties of test 304J1 steel

### 2.3 材料力学性能理论分析

#### 2.3.1 加工硬化诱导马氏体转变点的影响

不锈钢马氏体转变与材料的成分有很大的相关性<sup>[7]</sup>, 其相关性可以用  $M_{d30}$  衡量,  $M_{d(30/50)}$  简称  $M_{d30}$ , 是冷加工诱导马氏体转变点, 是指真应变量 30% 冷变形后生成 50% (体积分数) 马氏体的温度 (°C),  $M_{d30}$  越高则材料的加工硬化越严重, 冷加工变形抗力越大。该值主要由材料的成分所决定, 具体表述如下:

$$M_{d30} (\text{°C}) = 497 - 462 \times (C\% + N\%) - 9.2 \times Si\% - 8.1 \times Mn\% - 13.7 \times Cr\% - 20 \times (Ni\% + Cu\%) - 18.5 \times Mo\% - 1.4 \times (v - 8.0) \quad (1)$$

式中:  $v$  - 晶粒度级别。

将试验钢 304J1 和 304DDQ 钢的化学成分代入公式 (1) 进行计算, 假定晶粒度均为 8 级, 计算中 304DDQ 不锈钢的化学成分见表 4。0.05% ~ 2.04% Cu 试验钢的  $M_{d30}$  分别为 78.41、68.05、61.64、42.64、43.08 °C, 而 304DDQ 钢的  $M_{d30}$  为 44.79 °C, 0.05% ~ 1.05% Cu 钢的  $M_{d30}$  均高于

304DDQ钢, 1.53% ~ 2.04% Cu钢加工诱导马氏体引起的加工硬化均比304DDQ钢轻, 冷加工塑性和深冲性能接近或优于304DDQ钢。

表4 304DDQ不锈钢的化学成分/%  
Table 4 Analysis of a 304DDQ stainless steel / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.04	0.32	1.17	0.019	0.002	18.11	8.66

### 2.3.2 冷加工堆垛层错能分析

奥氏体不锈钢是面心立方结构, 是以密排面{111}按每三层重复堆垛排列的<sup>[8]</sup>, 容易形成堆垛层错的晶格缺陷, 形成层错时几乎不产生点阵畸变, 但它破坏了晶体的正常周期性, 使电子发生了反常的衍射效应, 使能量有些增加, 单位面积层错所增加的能量称为层错能。

层错能高时冷变形位错扩张的宽度变窄, 位错交切所需要能量减小, 易引起交叉滑移。由此起阻碍作用的位错, 因移向其它滑移面。与不同符号的位错结合为一体而消失, 重新组合的可能性极高, 林状位错密度降低。因此堆垛层错能高时, 冷加工易于变形, 加工硬化减小。层错能的高低决定于合金中各元素原子间相互作用, 冶金工作者通过测量和回归分析, 总结了奥氏体不锈钢层错能与化学成分之关系:

$$\text{SFE} = 16.7 + 2.18 \times (\text{Ni}\% + 3 \times \text{Cu}\%) - 0.9 \times \text{Cr}\% + 3.2 \times \text{Mn}\% + 9.3 \times \text{Mo}\% \quad (\text{mj/m}^2) \quad (2)$$

将0.05% ~ 2.04% Cu试验钢的化学成分代入公式(2)进行计算, 层错能分别为21.43、24.23、27.88、31.12、34.81  $\text{mj/m}^2$ , 而对304DDQ不锈钢进行计算后, 层错能为23.02  $\text{mj/m}^2$ 。就层错能对深冲性能的影响, 0.51% ~ 2.04% Cu钢均优于304DDQ钢。

### 2.3.3 理论深冲值CUP

理论计算的深冲值, 可以评价钢板的深冲性能。CUP值越大, 钢板的深冲性能越好。

$$\text{CUP} = 3.015 \times \text{C}\% - 0.58 \times \text{Si}\% - 2.019 \times \text{Mn}\% + 0.592 \times \text{Cr}\% + 2.33 \times \text{Ni}\% + 5.9 \times \text{Cu}\% - 27.747 \times \text{N}\% - 0.245 \quad (3)$$

将0.05% ~ 2.04% Cu试验钢的化学成分代入公式(3)进行计算, CUP值分别为21.65、24.32、27.56、30.27、33.02, 而对304DDQ不锈钢的进行计算后, CUP值为28.23。就CUP值而言1.05% Cu钢

接近304DDQ钢, 1.53% ~ 2.04% Cu钢优于304DDQ钢。

根据以上分析结果, 深冲用304J1不锈钢将当铜含量目标值设定为1.50%时, 其含量与力学性能、深冲性能及经济性的匹配性最佳。

## 3 304J1不锈钢深冲性能检验

根据试验结果, 将铜含量目标值设定为1.50%后, 在四川西南不锈钢有限责任公司按照1.53% Cu试验钢进行了工业生产, 并对0.27 mm厚度冷轧板的深冲值进行了检验, 其深冲值大于13 mm, 与304DDQ钢深冲值相当<sup>[9]</sup>。

## 4 结论

(1) 当铜元素含量在0.05% ~ 2.52%时, 对304J1奥氏体不锈钢中铁素体含量的影响不明显。

(2) 随着铜含量的增加, 试验钢的屈服强度( $R_{p0.2}$ )和抗拉强度( $R_m$ )逐渐降低, 硬度值(HRB)逐渐降低, 断后伸长率(A)逐渐增大; 且当铜含量从0.05%增加至1.53%时, 断后伸长率的增幅近30%。

(3) 当铜含量控制在0.50% ~ 2.04%时, 室温力学性能均满足标准要求; 且将铜含量目标值设定为1.50%后, 理论分析 $M_{300}$ 、堆垛层错能和CUP值其冷加工性和深冲性能均优于深冲用钢304DDQ, 按此方案生产的304J1不锈钢, 其冷轧板深冲性能与304DDQ不锈钢相当。

### 参考文献

- [1] 薄鑫涛. 不锈钢种发展的新动向[J]. 热处理, 2007, 22(4): 7-8.
- [2] 王文博, 袁书强, 张贵才, 等. 低成本深冲用200系列不锈钢的研制[J]. 金属热处理, 2011, 36(1): 44-48.
- [3] 肖纪美. 金属的韧性与韧化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [4] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [5] 严彪. 不锈钢手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [6] 岳杰兰, 张兰, 刘洪涛. 深冲用0Cr18Ni9Cu2奥氏体不锈钢冷轧板工艺质量控制[J]. 太钢科技, 2003(1): 26-28.
- [7] 徐忠贵, 李维东, 马金达. 应用马氏体转变分析方法对304不锈钢冷轧板拉深应变的研究[J]. 宝钢技术, 2004(4): 39-43.
- [8] 张建明, 吴喜军, 黄玉红, 等. fcc金属层错能的EAM法计算[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 393-397.
- [9] 白晋钢. 深冲用304不锈钢板的工艺开发[J]. 机械工程与自动化, 2008(5): 181-183.

韦成贵(1967-), 男, 硕士, 高级工程师, 1990年兰州大学毕业, 钢铁冶金和材料研究。

收稿日期: 2012-07-09