

锡黄铜冷凝管材的残余应力^①

王继周 王力军 徐永昌

(沈阳黄金学院)

郭利

(沈阳有色金属加工厂)

摘 要

用应变片法测试了HSn70-1黄铜冷凝管材在拉伸、矫直和成品退火状态下的残余应力。探讨了冷加工率、矫直工艺及退火工艺对管材表面残余应力的影响,并提出了在成品生产中减轻和控制管材残余应力的有效方法。

关键词: 锡黄铜 冷加工 冷凝管 残余应力

黄铜冷凝管主要用于发电机组的冷凝器、加热器、工业热交换器以及石油化工生产中的工艺设备。

在管材生产过程中(如热加工、冷加工、矫直、热处理等)都可能因热应力、形变应力等引起残余应力。这种残余应力可能使冷加工或矫直后的管材在放置中产生微裂纹,甚至发生开裂。经退火后出厂的成品管材在使用和放置中,常常由于周围腐蚀介质的作用而发生应力腐蚀裂纹,使管材产生纵向开裂。因此,怎样降低管材的残余应力,使不超出允许范围,以确保冷凝管的使用寿命,提高管材的成材率,是一个具有技术经济意义的课题。

本文对在拉伸、矫直和热处理后管材的残余应力进行了测试,探讨了冷加工率、矫直工艺和退火工艺对管材表面残余应力的影响。提出了在生产中减小和控制残余应力的措施,以提高冷凝管的质量和成材率。

1 实验方法

取现场生产的 $d 25 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ HSn70-1 坯料,先拉制成不同尺寸的管坯,经辊底式炉中间退火后,采用石蜡润滑,在 30 t 三线拉

伸机上采用游动芯头一次拉伸至成品尺寸。各种尺寸管坯的冷加工率和减壁加工率是不同的。其后将冷拉伸后的管材锯切头尾后在七辊斜辊矫直机上矫直,然后送入辊底式退火炉,采用单层摆放和快速退火处理,以消除管材的残余应力。

从上述各工序取管材试样(70 mm 长),采用应变片法测定试样表面的残余应力。对于每一测试点,在试样表面中部沿轴向和周向各贴一片规格为 $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的电阻应变片,使其分别与补偿片组成测量电桥,连接 YJ-5 型静态电阻应变仪,调整电桥平衡后,沿管材轴向破缝,释放管试样的残余应力,测出管材轴向和周向应变,再由平面应力虎克定律计算管材表面轴向残余应力 σ_l 和周向残余应力 $\sigma_\theta^{[1]}$ 。

经验表明,管材表面拉应力较大时,其表面周向残余应力 σ_θ 可达轴向应力的 3 倍^[2]。所以本文主要研究管材表面周向残余应力及其变化趋势。

2 实验结果及分析

2.1 加工、矫直及退火对残余应力的影响

图 1 显示了冷拉伸加工率($\varepsilon = (F_0 - F) / F_0$)

①1992年11月9日收到初稿

×100%)、矫直和退火工艺过程对管材表面周向残余应力的影响。可以看到，冷加工率大有利于降低管材表面的残余应力，而矫直使管材残余应力急剧提高，成品退火(为Y2状态)后管材残余应力大大减小。可见，在各生产工序中，管材表面的残余应力水平变化较大。

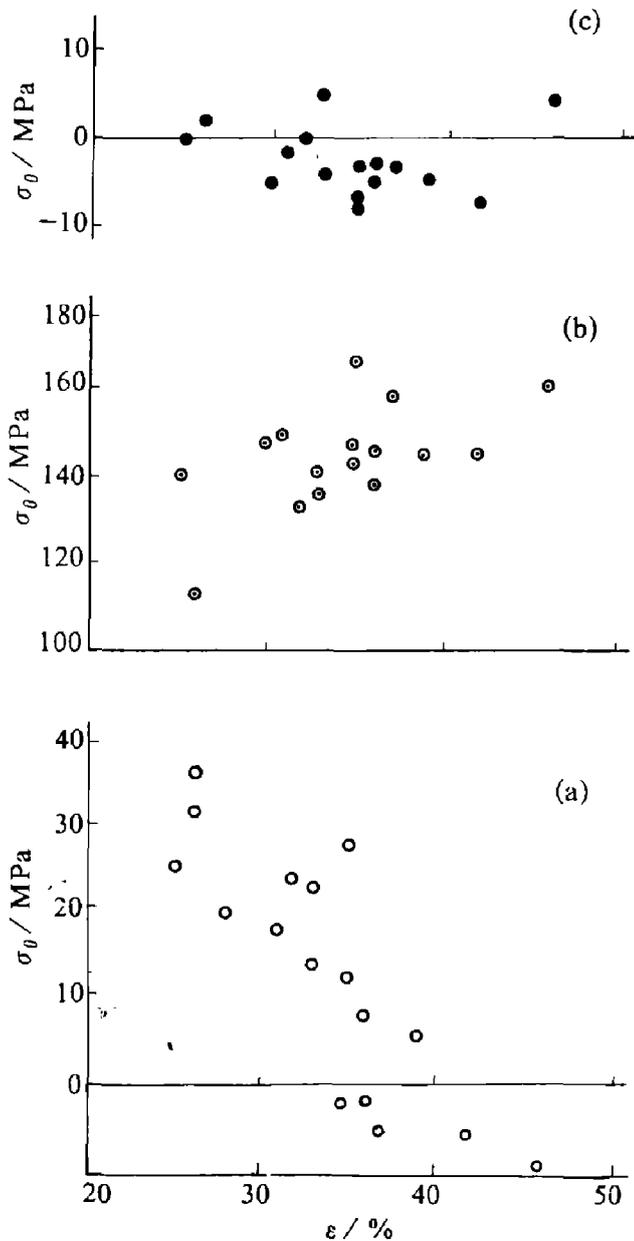


图1 HSn70-1 管材($d25\text{ mm} \times 1\text{ mm}$)的残余应力分布
(a)—加工状态; (b)—矫直状态; (c)—退火状态(Y2)

2.2 冷加工管材的残余应力

冷凝管在冷拉伸过程中，由于受到表面摩

擦和变形区几何形状的影响，常产生不均匀的附加变形^[3]，包括轴向和周向的不均匀变形。对于管材拉伸，尤其是内、外圆周不一致的圆周变形，在管材内部将引起残余应力，但随着冷加工率的增大，残余应力明显下降(图1(a))。把管材变形分为减壁变形和缩径变形两部分来分析^[4]，一般增大减壁变形将使管材变形趋于均匀，其表面的残余应力会减小，将管材试样按冷加工率分为两组：第一组，冷加工率 $\epsilon = 25 \sim 35\%$ ；第二组， $\epsilon = 36 \sim 46\%$ ，其冷变形与残余应力的关系示于图2。由图2可见，在每一组中，随管材减壁变形率(ϵ_t)的增大，残余应力下降。而在两个对照组之间，第二组冷加工率大，残余应力明显低于前者。发现管材表面开始出现压应力。而缩径变形大时，管材内、外表面的周向变形率差增大，致使管材表面出现较大的拉应力。对于上述结论，作者已做过详细的分析^[2]。

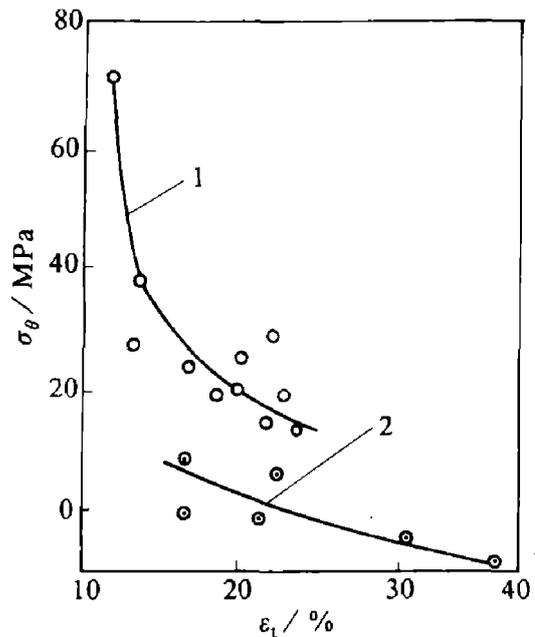


图2 管材冷变形率与残余应力的关系
1— $\epsilon = 25 \sim 35\%$; 2— $\epsilon = 36 \sim 46\%$

生产实践表明，采用游动芯头拉伸，有利于增大冷加工率和减壁量，使管材内、外表面变形趋于均匀。现场生产的冷凝管材，采用冷加工率大于30%，减壁变形量大于20%，这有利于减小管材的残余应力^[5]。通常此种冷拉

伸管材的周向应力 $\sigma_{\theta} < 30 \text{ MPa}$ 。这种管材即使不能及时退火, 也不会由于应力作用而产生裂纹。深度冷加工一方面使残余应力分布较均匀; 另一方面, 使晶粒形状严重畸变和沿晶开裂困难, 从而降低裂纹敏感性^[6]。

2.3 矫直管材的残余应力

矫直是管材生产中的必要工序。冷拉伸管材是弯曲的, 且管材弯曲大的部位管径椭圆度也较大。通常采用斜辊矫直机矫直管材, 减小断面的椭圆度和轴向弯曲度。而矫直操作又使管材产生高达 130~160 MPa 的残余应力 (图 1(b))。在管材放置过程中, 极易因径向应力产生纵向裂纹。另外, 管材表面存在的矫直痕也易引起应力裂纹, 其螺线有一定的间距, 这些螺线状裂纹恰位于因矫直工艺不当而产生的压痕处。这显然与压痕处局部冷加工造成残余应力较高和应力集中有关。

在较高倍光学显微镜下或在扫描电镜下, 这种应力裂纹多垂直于矫直痕或与矫直痕成一定角度, 且裂纹多起始于矫直痕底部^[7]。因此, 矫直参数是否合理, 对管材生产和使用至关重要。

斜辊矫直机的矫直原理是, 使管材辊压到弹塑性变形状态而变直。两种常用七辊矫直机如图 3 所示。以图 3(b) 为例, 管材变形是通过以下方式实现的: 一是合理调整辊位配置, 可

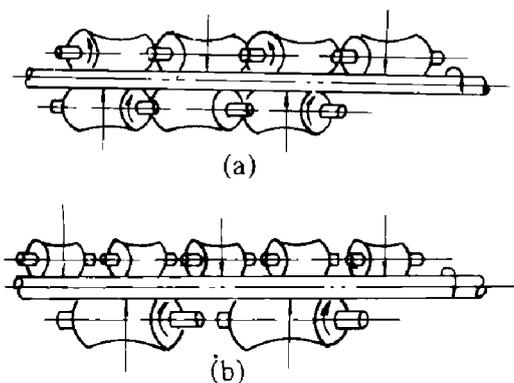


图 3 斜辊式矫直机示意图

得到合适的轴向反复弯曲变形量; 二是通过相对夹持辊的压下量 (简称“对辊压下”) 可得到

管材径向的椭圆变形, 这样, 管材在反复旋转变形中矫直其局部椭圆度, 随着椭圆度的消除, 管材的局部弯曲也得到矫直。

为了分析两种矫直机制对管材残余应力的影响, 在斜辊矫直机(图 3(b))上做调整矫直变形参数试验 (表 1), 调整两组对辊压下椭圆变形量, 并取三个水平; 调整矫直辊的位置, 使之组成交错布置的三个矫直单元(图 3(b)), 得到弯曲变形二个水平。按上述因子水平表进行矫直试验, 以便定性地分析两种矫直机制对管材残余应力的影响。用应变片法测试管材表面周向和轴向残余应力 (重复取样), 其测试结果见图 4。

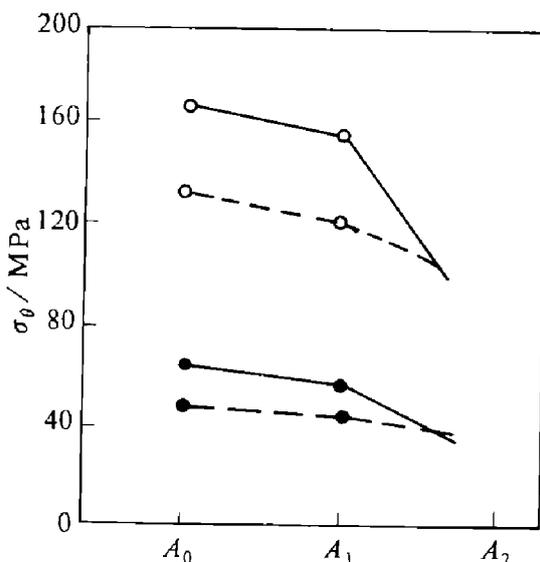


图 4 矫直变形参数对管材残余应力的影响

虚线—B1 水平; 实线—B2 水平

由图可见, 在斜辊矫直机上矫直冷凝管材, 调整对辊压下变形量和轴向弯曲变形量, 矫直管材的残余应力有明显变化: (1)采用对辊压下椭圆变形矫直管材, 产生的残余应力较大; (2)增大轴向弯曲变形量, 有利于减小管材表面的残余应力。图 4 中, 增大弯曲变形量, 使 A1B1 和 A2B2 两个条件下的管材应力明显下降, 但 A3B1 的管材应力有所上升。这是因为在 A3B2 条件下的管材对辊压下变形量和弯曲变形量都较小, 故应力也小, 但其矫直效果差, 这在生产中是不能采用的。对管材矫直, 既要使管材的弯曲度、椭圆度最小, 又要使残

余应力降低。为此应在保证管材弯曲度的条件下，尽量采用合适的对辊压下变形量和较大的弯曲变形量，以便既有利于减小管材的残余应力，又能满足矫直的要求。

表1 调整矫直变形参数

矫直变形机制	一水平	二水平	三水平
对辊压下变形	大压下量 A1	中压下量 A2	小压下量 A3
反复弯曲变形	大弯曲 B1	小弯曲 B2	

对辊压下变形是以相对两辊对管材压扁，使之成为椭圆形，在矫直过程中，管材一边旋转，一边前进，在管材表面留下与辊接触的螺旋线状压痕。由于集中载荷的作用，在管材与辊面接触部位局部变形较大，外表面承受较大的压应力，当旋转到 90° 方向又承受拉应力。这些应力的周期性变化曲线如图 5 所示。管材外表面的压应力是拉应力的 1.75 倍^[8]，内表面受力情况恰恰相反。这样，在管材的外表面受到较大的压缩变形，内表面受到较大拉伸变形，并且管材外径稍有长大，长度稍有减小(约 1%~3%)。

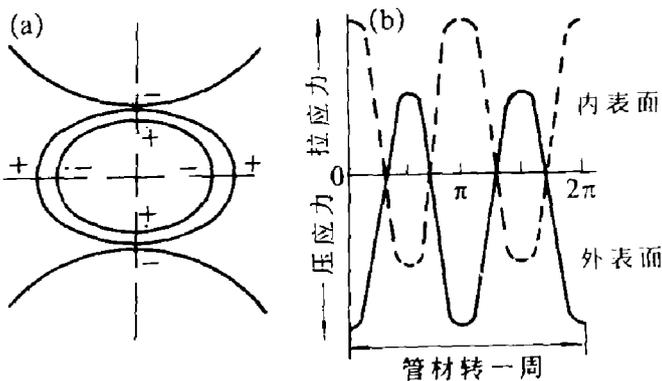


图5 对辊压下椭圆变形应力转变示意图

(a)及应力周期变化曲线 (b)“+”一拉应力;“-”一压应力

这样，对辊压下变形使管材内、外表面的周向变形量差增大，因而产生较大的周向残余应力。

管材弯曲变形矫直机制是靠管材旋转前进，实现轴向反复弯曲达到矫直目的。这种弯曲变形使管材内、外表面受到均匀一致周期性

变化的拉伸和压缩应力，有利于使管材内、外表面的变形趋于一致，并减小残余应力。有关弯曲变形和对辊压下变形矫直原理可参阅有关专著^[9,10]。

由于用斜辊矫直机矫直管材可能产生较高的残余应力，因此在生产中必须注意：一要尽量控制对辊压下变形量；二是矫直后的黄铜管材应尽快转到成品退火工序，避免在车间内停放时间过长，造成管材表面裂纹。

为了减小管材矫直引起的残余应力，选用不同型式的矫直机将有明显的效果；另外，矫直辊的材质及辊面曲线，将影响管材与辊面的接触面积，从而也影响管材的残余应力^[7]。

2.4 成品退火管材的残余应力

为消除加工和矫直管材的残余应力，冷凝管须在辊底式退火炉中单层摆放，进行快速退火使之在短小时内完成高温再结晶，形成均匀一致的等轴细晶粒，较好地消除管材的残余应力。合理地选择退火温度和辊道速度(退火时间)是控制产品力学性能、晶粒度和残余应力的关键环节。对 $d 25 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 冷凝管成品退火，可选 600 °C 左右的炉温(料温可达 500~530 °C)，加热保温 6~10 min。

为了保证退火后成品管材的各项性能要求，应对不同冷加工率管材在成品退火前、后取样进行性能检验，得到硬化曲线和退火后的性能变化曲线，如图 6 所示。由图可见，这种黄铜管材，冷作硬化较明显，退火前冷加工率对其成品的机械性能影响不明显，但对其晶粒度却影响较大。当冷加工率小于 30% 时，退火后管材的晶粒较粗大；冷加工率超过 30% 时，成品退火后管材为细等轴晶组织。由于 α 黄铜是沿晶断裂，考虑到位错塞积对应力集中的影响，且应力集中反比于 $d^{1/2}$ ，因而断裂所需时间将反比于 $d^{1/2}$ ^[6]。具有细晶粒组织的管材，其残余应力较小，在使用中表现出较强的抗应力腐蚀能力(见表 2)，用氨熏法检验时，所取试样全部合格。

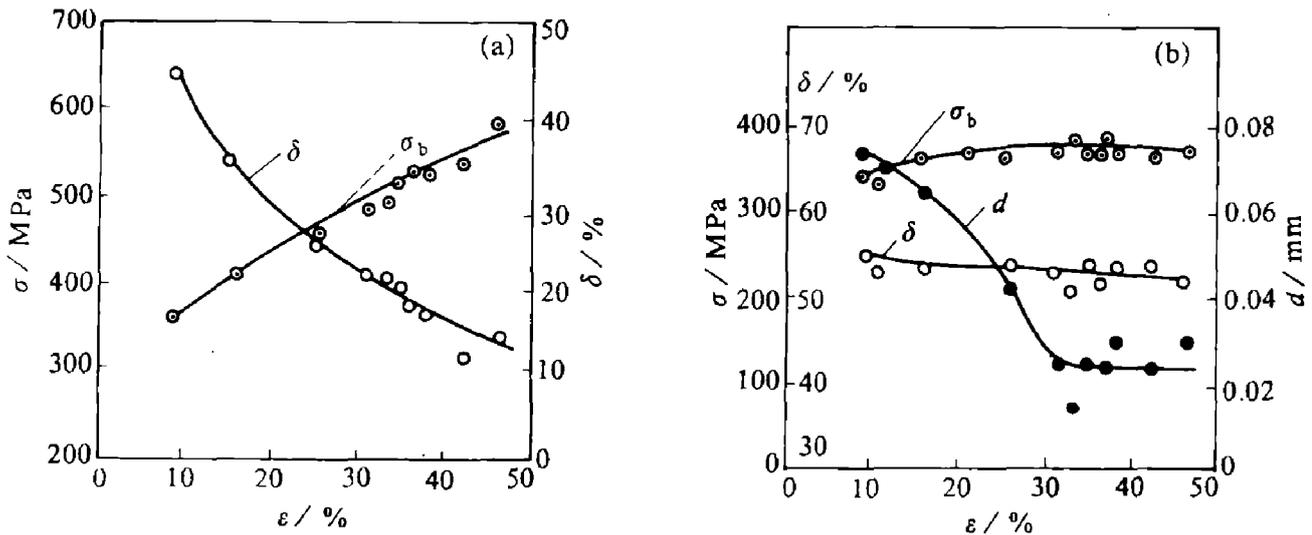


图6 HSn70-1 管材的性能

(a)—加工硬化曲线; (b)—加工率对成品(Y2 状态)组织和性能的影响

表2 HSn70-1 冷凝管的性能

	σ_b / MPa	δ / %	晶粒度 d / mm	氮熏实验
YB716-68 标准	343	> 30	0.01~0.045	无裂纹
现场产品抽样	370	> 50	0.01~0.03	合格

参考文献

- 1 吴宗岱, 陶宝琪主编. 应变片电测原理及技术. 北京: 国防工业出版社, 1982. 596.
- 2 韩善栋, 郎致福, 徐永昌, 王继周. 铜加工, 1989, (4): 66-71.
- 3 Hosford W F, Caddell R M. Metal Forming Mechanics and Metallurgy. Englewood Cliffs; Prentice-Hall, Inc., 1983. 215-220.
- 4 Ерманок М З Ватрущия л С. Волоконец Цветных Металлов. москва: Металлургиядат 1982. 145.
- 5 李义宝. 有色金属材料与加工, 1987, (2): 1-10.
- 6 中国腐蚀与防护学会主编. 应力作用下的金属腐蚀. 北京: 机械工业出版社, 1990. 182-189.
- 7 陆世英, 王欣增, 李丕钟, 王洁著. 不锈钢应力腐蚀事故分析与耐应力腐蚀不锈钢. 北京: 原子能出版社, 1985. 56-64.
- 8 何 泉. 管材矫直机. 国外有色金属加工, 1981. 1-28.
- 9 马斯基列逊 A M等著, 西安重型机械研究所-室译. 管材矫直机. 北京: 机械工业出版社, 1979. 29.
- 10 马鞍山钢铁设计院等编. 中小型轧钢机械设计与计算. 冶金工业出版社, 1979. 546-550; 564-575.

3 结论

为了提高冷凝管质量, 降低其残余应力, 在管材生产中须做好以下几点:

(1) 采用较大的冷加工率 ($\epsilon > 30\%$) 和减壁量 ($\epsilon_t > 20\%$), 以减小管材的残余应力;

(2) 采用斜辊矫直机时, 在保证管材弯曲度的条件下, 尽量减小对辊压下变形量, 增大弯曲变形量, 以减小矫直管材裂纹倾向和因矫直压痕引起的应力裂纹;

(3) 合理选择辊底炉的退火工艺参数, 使管材实现高温、快速退火, 得到再结晶细晶粒组织。