

# 局部感应加热对高强钢方管二次辊压成形的影响

彭雪锋<sup>1)</sup>, 陈强<sup>1)</sup>, 王宇<sup>1)</sup>, 刘靖<sup>1)</sup>, 韩静涛<sup>1)</sup>✉, 晏培杰<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 上海宝钢型钢有限公司, 上海 201900

✉ 通信作者, E-mail: hanjt@ustb.edu.cn

**摘 要** 本文通过对高强钢方管角部进行局部感应加热, 提高其弯角区域的成形性能, 降低其变形抗力, 由此在不影响非变形区域组织性能的前提下, 获得所需方管的截面尺寸和组织性能。在热辊压过程中, 坯料在没有模具限制的方管角部外侧邻近区域发生堆积, 且随着加热温度上升, 角部外侧金属堆积更明显。同时, 在方管内角表层出现显微裂纹恶化, 裂纹以树枝状生长。热辊压成形后的残余温度会产生一个自回火过程, 能够明显降低残余应力, 且随着温度的升高, 残余应力降低的幅度变大。当加热温度在 650 °C 以上时, 自回火对残余应力的影响大于宏观裂纹的扩展能力, 起主导作用, 且压扁过程中压下量超过方管对角线长度 2/3 时也不会产生裂纹。

**关键词** 高强钢; 方管; 辊压成形; 感应加热; 显微裂纹

**分类号** TG142.1; TG335.7

## Effect of local induction heating on secondary roll-forming of high strength square tubes

PENG Xue-feng<sup>1)</sup>, CHEN Qiang<sup>1)</sup>, WANG Yu<sup>1)</sup>, LIU Jing<sup>1)</sup>, HAN Jing-tao<sup>1)</sup>✉, YAN Pei-jie<sup>2)</sup>

1) School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Shanghai Baosteel Section Steel Co. Ltd., Shanghai 201900, China

✉ Corresponding author, E-mail: hanjt@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** The formability of corners was improved by heating the corner area of high strength square tubes with induction coils. Under the premise of not impacting the undeformed zone, we obtained the ideal sectional dimension, microstructure and properties of products. In the hot roll forming process, the billet accumulated at the outside area of square corners without mold restrictions. With rising temperature, the accumulation became more serious. At the same time, microcracks deteriorated on the surface of the inner tube, while the cracks grew up in a form of arborization. A self-tempering process would be produced by residual temperature after hot roll forming, which could significantly reduce the residual stress. The residual stress sharply decreased as the temperature increased. When the heating temperature was above 650 °C, the influence of self-tempering on the residual stress was greater than the extended capability of macrocracks and played a leading role; there was no crack when the distance was larger than 2/3 of diagonal length at flattening test.

**KEY WORDS** high strength steel; tubes; roll forming; induction heating; microcracks

随着世界汽车保有量的持续增长, 汽车轻量化将是汽车行业必须要突破的一大瓶颈, 将超高强钢应用于汽车行业能够很好地解决这一难题。一方面, 超高强钢的抗拉强度高达 900 MPa, 能够大幅度地改善车身的性能; 另一方面, 由于超高强钢的高强度特性,

使得车身材料厚度和使用量减小, 从而达到降低车身质量的目的<sup>[1]</sup>, 进而降低车身质量所带来的能耗, 最终达到节能减排的目的。在车身结构中, 超高强钢广泛应用于保险杠、加强板、防撞柱、车盖顶、横梁、边梁等刚度要求较高的部件。

尽管超高强钢结构件有诸多优点,但超高强钢的成形技术有待研究. 室温下超高强钢强度达到 900 MPa,变形抗力大<sup>[2-3]</sup>,对成形设备和工艺要求都比较高;其塑性差,在冷成形过程中易产生韧性切向开裂,对后期的加工、酸洗处理和使用留下隐患;其成形后另一个特点是残余应力大<sup>[4-5]</sup>,较大残余应力会导致产品在使用过程中出现过早屈服现象,从而降低产品的承载能力和抗疲劳能力;同时,超高强钢的屈强比大,成形后回弹量很大<sup>[6-9]</sup>,这将大大降低产品尺寸精度. 为解决以上难题,本文采用局部加热辊压成形的方法<sup>[10]</sup>,对汽车用高强钢方管进行二次辊压成形,研究感应加热温度对其成形性能的影响.

1 实验方案

1.1 实验材料

实验以热轧酸洗 QSTE700TM 高强钢板冷弯得到的预成形方管为研究对象,其横截面尺寸如图 1 所示. QSTE700TM 高强钢主要力学性能及化学成分见表 1.

表 1 QSTE700TM 材料主要力学性能及化学成分(质量分数)  
Table 1 Mechanical properties and chemical component of QSTE700TM

屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	质量分数/%							
			C	Si	Mn	P	S	Al	Mo	Nb + V + Ti
746.5	870.4	16.72	0.07	0.07	1.91	0.01	0.002	0.048	0.16	≤0.22

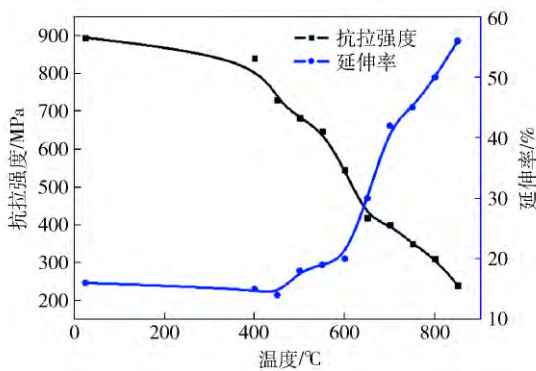


图 2 QSTE700TM 高强钢高温力学特性  
Fig. 2 Mechanical properties of QSTE700TM high strength steel at high temperature

1.2 实验装置及工艺

实验装置为带有感应加热设备的辊压成形系统. 该系统将预成形超高强方管的矫直、弯角区局部加热和辊压成形融合为一体,如图 3 所示. 图中所示的感应加热线圈 2 的截面尺寸及与方管的空间位置关系如图 4 所示,该线圈设计的原则是尽可能实现弯角成形区域的局部线性加热效果,避免非成形区域组织性能的恶化. 加热线圈沿方管纵向长度为 100 mm,其上镶嵌有导磁体,本文利用感应加热的集肤效应、尖角效应以及导磁体的“驱流”作用,使得磁场线主要集中于方

图 2 是通过 Gleeble-3500 热模拟试验机对其进行高温拉伸的试验结果.

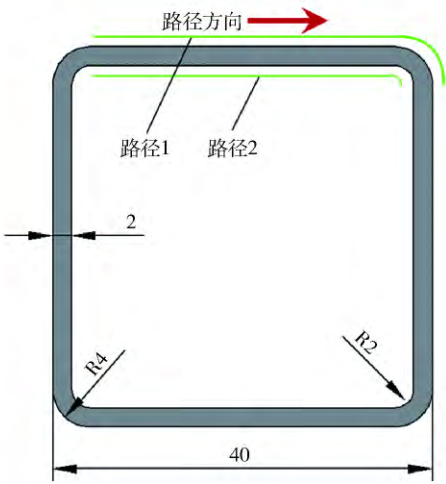
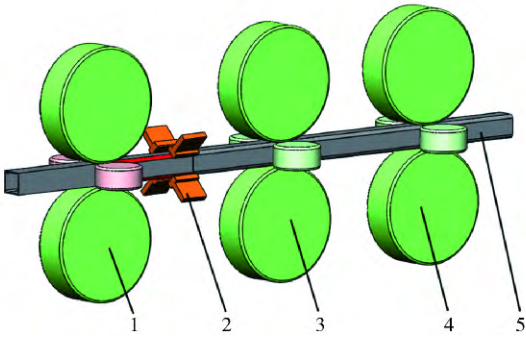


图 1 预成形方管截面尺寸(单位: mm)  
Fig. 1 Schematic diagram of the sectional dimensions of the pre-formed tube (unit: mm)

管角部区域,实现方管的局部线性加热效果.



1 3 4—辊压系统;2—感应线圈;5—方管  
图 3 高强方管二次热辊压成形示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of secondary hot roll forming of high strength square tubes

实验工艺路线为:将预成形方管通过孔型尺寸均为 40 mm × 40 mm 的辊压系统 3 和辊压系统 4,对预成形方矩管矫直定型,以确保方管能够顺利进入线圈,实现对其角部线性加热<sup>[11-13]</sup>,通过定型矫直以及感应线圈 2 的调整,保证方管四个角部与线圈距离相等,从而得到均匀的四个角部温度,并通过红外线温度测量装置及其反馈系统来确保所需要的温度,然后进入孔型尺寸为 38 mm × 38 mm 的辊压系统 1 对其热辊压成形. 本文结合 ANSYS 的电磁热耦合有限元模拟获得方管

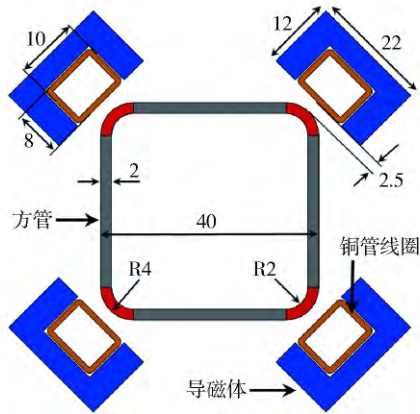


图4 线圈截面尺寸及空间位置关系(单位: mm)  
Fig.4 Sectional dimension and location of coils (unit: mm)

内外表面的温度分布,沿图1中路径1和路径2所测量的温度分布情况分别为图5(a)和图(b)所示. 由图可见,在方管外圆角中点温度最高. 为方便论述,本文以下均采用外圆角中点温度代表相应方管成形温度.

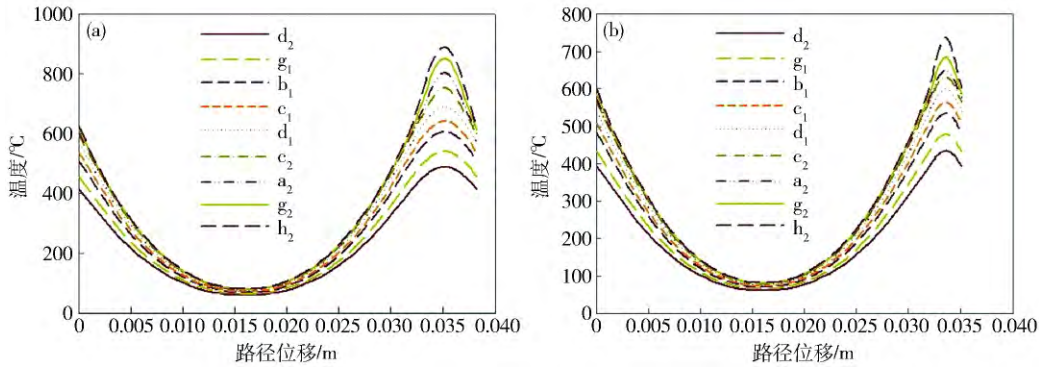


图5 方管表层温度分布. (a) 路径1; (b) 路径2  
Fig.5 Surface temperature of the preformed tube: (a) Path 1; (b) Path 2

2 结果与讨论

2.1 感应加热温度对截面尺寸的影响

热辊压成形后测得方管截面尺寸如表3所示,截面示意图见图6. 由于方管的轴向尺寸相对于截面尺寸较大,且成形时尺寸的变化主要发生在横截面方向,故忽略在辊压成形过程中轴向方向尺寸的变化,在理想塑性形变条件下,按照等横截面尺寸计算可得到理想截面尺寸如图6(k)所示. 然而,由于QSTE700TM强度很大,塑性形变并不理想,以及感应加热的集肤效应特点,使得沿方管角部的厚度方向温度分布并不均匀. 在方管辊压成形过程中,形变主要发生在方管的角部区域,且应力集中主要在内角表层区域,由于感应加热过程厚度方向温度分布不均匀,内角表层温度最低,在成形过程中阻碍金属向内角方向的流动,从而阻碍方管的成形. 圆角外表层温度较高,其金属流动能力相对于内层金属要好一点. 根据最小阻力定律,由

实验中采用变频电机来调节成形速度,本文中采用的速度均为  $34 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其他主要工艺参数见表2.

表2 二次热辊压成形主要工艺参数  
Table 2 Main parameters of secondary hot roll-forming

材料	加热电流/A	加热频率/Hz	圆角中点温度/℃
E <sub>1</sub>	0	0	25
d <sub>2</sub>	93	16700	500
g <sub>1</sub>	90	16760	550
b <sub>1</sub>	105	16791	600
c <sub>1</sub>	118	16878	650
d <sub>1</sub>	114	16956	700
c <sub>2</sub>	121	17031	750
a <sub>2</sub>	126	17087	800
g <sub>2</sub>	132	17182	850
h <sub>2</sub>	158	17204	880

于方管与上表面完全贴合,使得金属只能向与侧辊接触的角部区域流动. 以方管右上角区域为例,如图6所示,方管上层面较平齐,而右侧角部区域出现隆起,

表3 方管截面尺寸  
Table 3 Sectional dimension of square tubes

材料	截面宽度/ mm	截面高度/ mm	外角半径/ mm	内角半径/ mm
E <sub>1</sub>	38.56	38.93	3.00	1.0
d <sub>2</sub>	38.51	38.58	2.75	0.8
g <sub>1</sub>	38.59	38.60	2.50	0.6
b <sub>1</sub>	38.50	38.66	2.25	0.6
c <sub>1</sub>	38.45	38.46	2.00	0.5
d <sub>1</sub>	38.31	38.23	2.00	0.4
c <sub>2</sub>	38.09	38.21	1.75	0.4
a <sub>2</sub>	37.84	38.12	0.50	0.3
g <sub>2</sub>	37.89	38.08	1.75	0.3
h <sub>2</sub>	37.60	38.07	1.50	0.3



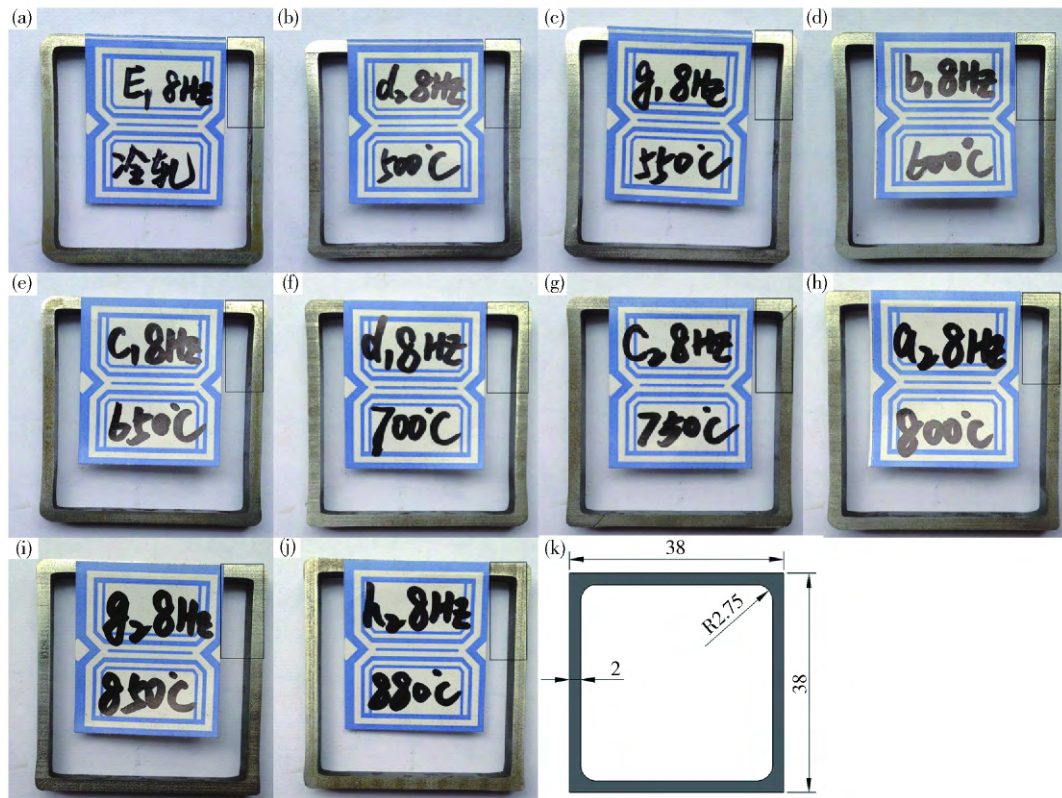


图 6 方管截面示意图(单位: mm)。(a) 25 °C; (b) 500 °C; (c) 550 °C; (d) 600 °C; (e) 650 °C; (f) 700 °C; (g) 750 °C; (h) 800 °C; (i) 850 °C; (j) 880 °C; (k) 理想

Fig. 6 Schematic cross section of square tubes (unit: mm): (a) 25 °C; (b) 500 °C; (c) 550 °C; (d) 600 °C; (e) 650 °C; (f) 700 °C; (g) 750 °C; (h) 800 °C; (i) 850 °C; (j) 880 °C; (k) ideal

且表层加热温度越高, 内外层金属塑性差异性越大, 但是随着总体温度提高, 模具弹性变形减小, 特别是侧辊弹性变形量减小相对明显, 方矩形管压下量增大, 金属侧面堆积越明显。由于模具限制, 金属堆积主要集中在角部与侧辊邻近的弯角区域, 且堆积区域面积随着温度的增大而逐渐减小。

## 2.2 感应加热温度对角部显微裂纹形成的影响

在不同温度辊压后的方管弯角区切割取样, 经镶样、磨平样和抛光后, 在光学显微镜下对角部区域内外两侧进行显微裂纹观察, 其结果如图 7 所示。

研究发现所有方管的外角区域在 500 倍光学显微镜下均未发现显微裂纹。图 7 (l) 为室温下辊压成形方管外角区域微观组织, 未发现有明显的微裂纹; 从图 7 (a) 可见, 预成形方管试样内角有很小的锯齿状显微裂纹, 窄而浅; 而室温辊压成形方管内角区域出现一条很宽很长的显微裂纹, 就像一道“断崖”出现在内角区域, 同时伴有少数的小裂纹出现, 如图 7 (b) 所示; 在热辊压成形后管方的显微裂纹相对于冷辊压成形而言, 裂纹有很大幅度的改善, 但是随着温度的升高, 显微裂纹出现恶化, 并呈现树枝状生长趋势。很明显, 热辊压成形后的方管裂纹形成是由于在成形过程中内角区域承受巨大的应力作用, 而且感应加热具有集肤效应, 感

应电流不能通过角部内侧, 所以内侧区域只能通过热传导的形式升温, 在短时间之内并不能到达所需要的成形温度, 因此产生较明显的显微裂纹。本实验过程中采用一致的成形速度, 即感应加热时间相同, 因此在感应加热频率增加不大的情况下, 感应加热温度越高, 感应加热电流明显增大。在这种情况下不仅表面温度提高, 内表层温度也相应的提高, 但是内外角部温差增大, 此时模具弹性变形量小, 方管变形量增大, 即内角表层温度虽然略有增大但是变形量也增大, 因此出现如图 7 所示的内角显微裂纹随着感应加热温度上升而恶化的情况。

## 2.3 感应加热温度对酸洗压扁性能的影响

根据压扁试验方法 GB/T 246—2007 线切割截取长度为 40 mm 的方管试样, 然后采用酒精对方管进行超声波清洗, 吹干。其目的是清洗方管表面油脂, 避免其影响应力腐蚀环境形成; 配制 5% 乙醇溶液, 然后在配制好的乙醇溶液中加入  $260 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaCl, 搅拌均匀, 充分溶解之后, 将清洗后的方管放入制备好的溶液之中, 浸泡 30 min 后取出, 用乙醇清洗吹干, 然后采用万能压缩试验对方管进行压扁试验, 如图 8 所示。方管的摆放位置均为焊缝处在试样的右上方, 这样使得处在压缩对角线方向的内角和水平对角线方向的外

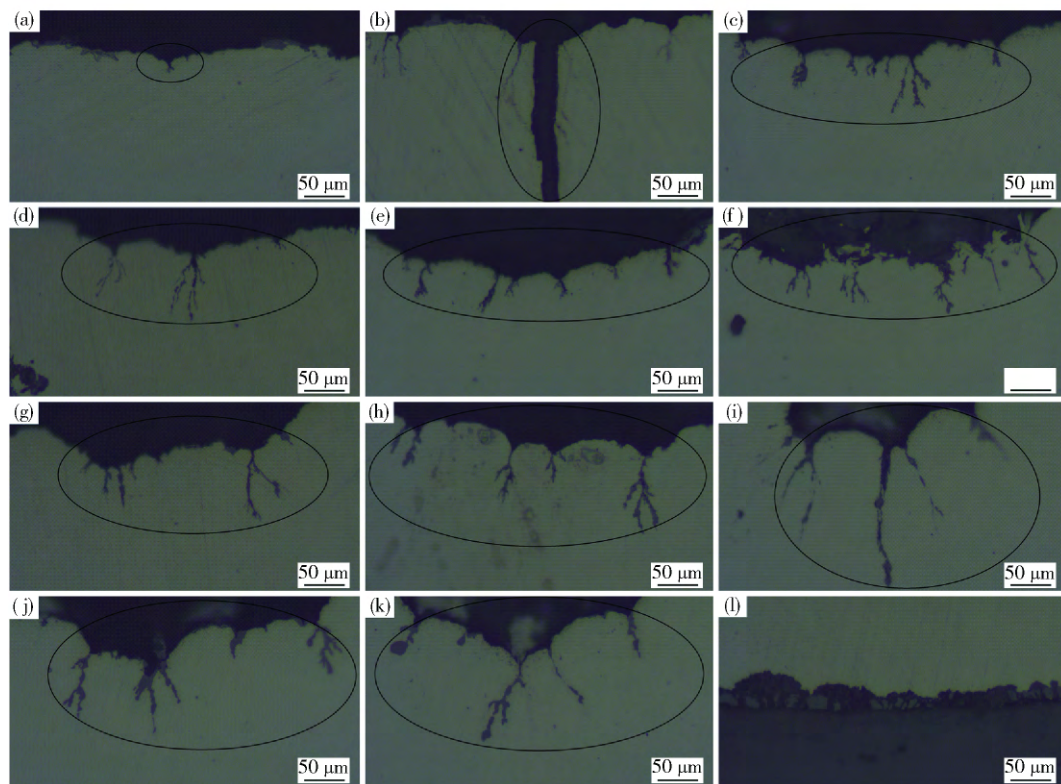


图7 方管弯角区的显微裂纹. (a) 内角, 原料; (b) 内角, 25 °C; (c) 内角, 500 °C; (d) 内角, 550 °C; (e) 内角, 600 °C; (f) 内角, 650 °C; (g) 内角, 700 °C; (h) 内角, 750 °C; (i) 内角, 800 °C; (j) 内角, 850 °C; (k) 内角, 880 °C; (l) 外角, 25 °C

**Fig. 7** Microcracks near the corner of square tubes: (a) inner angle, raw material; (b) inner angle, 25 °C; (c) inner angle, 500 °C; (d) inner angle, 550 °C; (e) inner angle, 600 °C; (f) inner angle, 650 °C; (g) inner angle, 700 °C; (h) inner angle 750 °C; (i) inner angle, 800 °C; (j) inner angle, 850 °C; (k) inner angle, 880 °C; (l) exterior angle, 25 °C

角均受到拉应力。

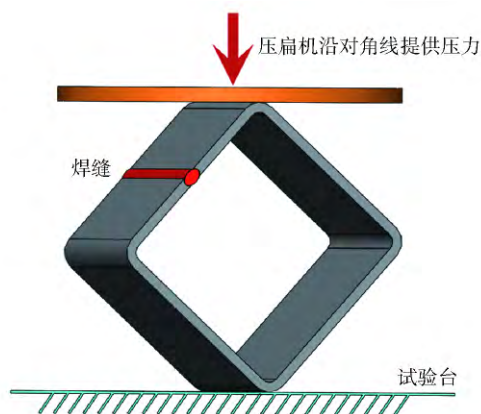


图8 压扁实验示意图

**Fig. 8** Schematic illustration of flattening test

图9 给出方管在压扁实验过程中压力与沿对角线压下量的关系曲线。预成形方管试样酸洗压扁之后压力与压下量曲线没有出现明显的突变现象, 方管内外表面未出现宏观裂纹, 如图9(b)所示; 而室温下辊压成形的方管酸洗压扁压下量仅在1.366 mm时, 压力突然下降, 发生突变, 此时方管上下角的内角区域出现明显的宏观裂纹; 随着温度的上升, 有较小的改善效果,

如在500、550和600 °C辊压成形时, 方管发生突变时的压下量分别为1.614、1.489和2.861 mm; 当辊压成形温度在650 °C以上后, 方管酸洗压扁到对角线2/3处未发生压力突变现象, 方管也未出现明显的裂纹。

这是由于在室温下辊压成形得到的方管内角区域出现了一条宽而长的显微裂纹, 而且残余应力非常大, 加上乙醇溶液引起的严重应力腐蚀作用, 因此在压扁过程中很快就出现明显裂纹; 在500~600 °C之间辊压成形时, 宏观裂纹有所改善, 这是由于成形后残余温度较高, 自回火降低了残余应力<sup>[11]</sup>, 但是裂纹恶化仍然起主导作用; 在650 °C以上, 成形温度开始起主导作用, 残余应力明显降低, 酸洗压扁压力均未出现突变现象, 也未见明显宏观裂纹, 这是由于显微裂纹的恶化并不能导致宏观裂纹的扩展。

### 3 结论

(1) 在方管热辊压成形过程中, 金属具有从外角向内角流动的趋势, 由于感应加热的集肤效应, 使方管角部外层金属流动性优于内层, 外层金属向内部流动的趋势受阻, 迫使金属向与侧辊接触的方管外角区域流动, 出现金属堆积凸起。



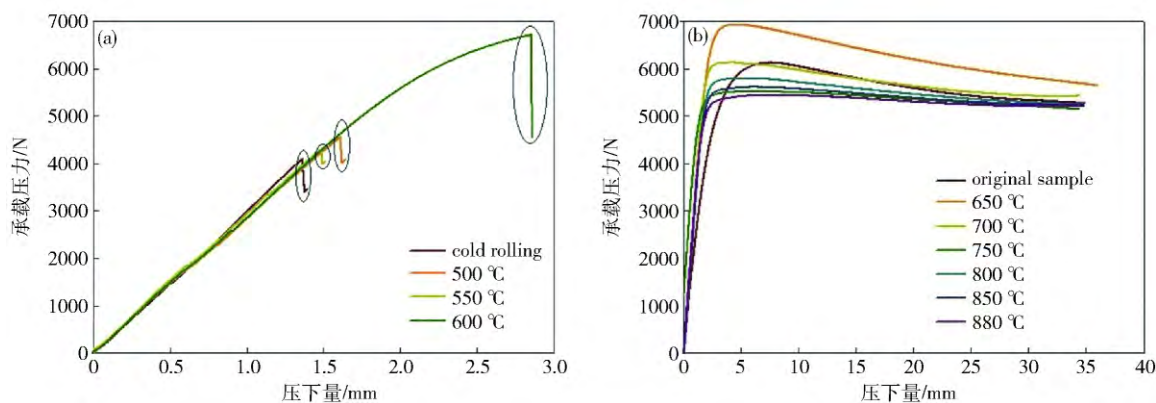


图9 方管压扁应力曲线. (a) 25 ~ 600 °C; (b) 650 ~ 880 °C 和母样  
Fig. 9 Stress in flattening tests of square tube: (a) 25 ~ 600 °C; (b) 650 ~ 880 °C and original sample

(2) 在方管辊压成形过程中,应力主要集中在方管内角层,因此在内角层产生微观裂纹.在感应频率变化不大的情况下,当加热电流越高,方管内角温度均有所提高,变形抗力减小,方管变形量增大,最终导致内角表层显微裂纹的恶化,且以树枝状生长.

(3) 在方管辊压成形过程中,会产生显微裂纹和残余应力.成形温度和残余温度自回火过程会降低残余应力,改善显微裂纹.研究发现,在 650 °C 之前成形,裂纹扩展起主导作用;在 650 °C 之后成形,加热温度对宏观裂纹起主导作用.压扁过程中压下量达到方管对角线长度 2/3 时,仍不产生裂纹.

#### 参 考 文 献

- [1] Li Y X, Lin Z Q, Jiang A Q, et al. Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body. *Mater Des*, 2003, 24(3): 177
- [2] Lindgren M. Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed. *J Mater Process Technol*, 2007, 191(1-3): 44
- [3] Groche P, Mueller C, Traub T, et al. Experimental and numerical determination of roll forming loads. *Steel Res Int*, 2014, 85(1): 112
- [4] Li S H, Zeng G, Ma Y F, et al. Residual stresses in roll-formed square hollow sections. *Thin Wall Struct*, 2009, 47(5): 505
- [5] Moen C D, Igusa T, Schafer B W. Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members. *Thin Wall Struct*, 2008, 46(11): 1274
- [6] Davoodi B, Zareh D B. Assessment of forming parameters influencing spring-back in multi-point forming process: a comprehensive experimental and numerical study. *Mater Des*, 2014, 59: 103
- [7] Thipprakmas S, Rojananan S. Investigation of spring-go phenomenon using finite element method. *Mater Des*, 2008, 29(8): 1526
- [8] Yanagimoto J, Oyamada K. Mechanism of springback-free bending of high-strength steel sheets under warm forming conditions. *CIRP Ann Manuf Technol*, 2007, 56(1): 265
- [9] Yanagimoto J, Oyamada K. Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings. *CIRP Ann Manuf Technol*, 2005, 54(1): 213
- [10] Lindgren M, Bexell U, Wikstrom L. Roll forming of partially heated cold rolled stainless steel. *J Mater Process Technol*, 2009, 209(7): 3117
- [11] Choi Y H, Lee Y W, Choi K, et al. Temperature distribution and thermal stresses in various conditions of moving heating source during line heating process. *J Therm Sci*, 2012, 21(1): 82
- [12] Biswas P, Mandal N R, Sha O P. Three-dimensional finite element prediction of transient thermal history and residual deformation due to line heating. *J Eng Marit Environ*, 2007, 221(1): 17
- [13] Zhang X B, Yang Y L, Liu Y J. Feasibility research on application of a high frequency induction heat to line heating technology. *J Mar Sci Appl*, 2011, 10(4): 456