

Incoloy 825 合金管材热挤压力研究

李支俊¹, 曾凡博², 欧跃飞², 汤云飞¹

(1. 江苏银环精密钢管有限公司, 江苏 宜兴 214203; 2. 宝银特种钢管有限公司, 江苏 宜兴 214203)

摘要: 采用 Gleeble 1500 热变形模拟试验机, 研究温度、应变速率和变形抗力之间的关系, 利用主应力法建立 Incoloy 825 合金挤压力的计算公式并计算挤压力值; 利用 Deform 有限元软件模拟合金在挤压变形中各处的应力和应变速率, 研究整个挤压过程中挤压力的变化情况。研究表明: 对比软件模拟、理论计算以及实际生产数值, 最大挤压力均出现在挤压突破阶段, 理论计算的结果与实际生产的挤压力差别较小。

关键词: 合金管材; Incoloy 825; 热挤压力

中图分类号: TG376.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2020)04-0018-04

Study on Hot-extrusion Pressure for Incoloy 825 Alloy Tube

LI Zhijun¹, ZENG Fanbo², OU Yuefei², TANG Yunfei¹

(1. Jiangsu Yinhuai Precision Steel Tube Co., Ltd., Yixing 214203, China;

2. Baoyin Specialty Steel Tube Co., Ltd., Yixing 214203, China)

Abstract: With the Gleeble 1500 hot-deformation simulation testing machine, the relationship between the temperature, the strain rate and the deformation resistance are investigated. And the computation formula for the extrusion pressure for the Incoloy 825 alloy is set up, and the pressure value is worked out. The changing status of the extrusion pressure during the whole extrusion process is studied by means of simulating the stress and strain rate as present at all points in the said process via the FE software Deform. As a result it is identified that comparing relevant data resulting from the software-made simulation, the theoretical calculation and the actual operation, it is found that all the max. extrusion pressures occur at the breakthrough stages, and that the theoretical extrusion pressure is slightly different from the one as used for actual operation.

Key words: alloy tubular goods; Incoloy 825; hot-extrusion pressure

Incoloy 825 是一种添加了 Mo、Cu 和 Ti 的 Ni-Fe-Cr 合金, 拥有较强的抗应力腐蚀、点蚀及缝隙腐蚀能力, 优良的抗氧化性, 其在室温及中温(0~550 ℃)环境中力学性能较好。可满足在多种环境条件、复杂工况下的应用。目前, 该合金广泛应用于化学处理、污染控制、油气开采、核燃料后处理、放射性废料处理等领域^[1-2]。

通常, Ni-Fe-Cr 合金管难以采用热轧穿孔的方法进行圆钢到管坯的变形, 因此, 热挤压技术是 Incoloy 825 合金管材制坯技术的发展趋势。然而,

对 Incoloy 825 合金的热变形行为, 尤其是高温高应变速率下的热变形行为研究报道很少。

本研究拟通过 Gleeble 试验机对 Incoloy 825 合金进行热变形试验, 建立应变速率、温度与变形抗力之间的关系, 根据主应力法建立 Incoloy 825 合金挤压力的计算公式并计算挤压力。用 Deform 有限元软件模拟了在实际挤压变形中各处的应力和应变速率, 给出了整个挤压过程中挤压力的变化情况。最终, 将理论计算值、软件模拟结果与实际生产记录的挤压力值进行了对比, 并指出了差异所在, 研究 Incoloy 825 合金在高温高速下的变形行为和变形抗力, 对于制定和优化挤压工艺尤其是确定挤压力具有重要的意义。

李支俊(1984-), 男, 工程师, 主要从事无缝钢管制造技术研究与质量管理工作。

1 试验材料与方法

为研究 Incoloy 825 合金在高温变形中变形抗力随各热变形参数(应变速率、变形温度、变形量)的变化规律,采用 Gleeble 1500 热变形模拟试验机进行热变形试验,在预设的变形温度和应变速率下进行恒温、恒应变速率的压缩试验,升温速率为

20 °C/s,到温保温 3 min 后开始变形。热变形试验所用 Incoloy 825 合金的实际化学成分见表 1。所用压缩试样尺寸为 Φ8 mm×12 mm,变形温度分别为 1 050, 1 100, 1 150, 1 200 °C,应变速率 $\dot{\epsilon}$ 分别为 0.1, 1.0, 10.0 s⁻¹,试验中材料的变形量为 50%,所有试样变形后进行快速水冷。

表 1 Incoloy 825 合金的实际化学成分(质量分数) %

Ni	Cu	Fe	Mn	C	Si	S	Cr	Al	Ti	Mo
39.36	2.05	30.1	0.20	0.010	0.23	0.001	22.61	0.13	1.10	3.44

2 研究结果与分析

2.1 应力应变曲线分析

Incoloy 825 合金的热变形抗力曲线,如图 1 所示,从图 1 中可以看出以下规律:

(1) 随着变形温度提高,流变应力逐渐下降。因为温度升高,热启动作用逐步增强,原子动能增大,原子间的结合力逐渐减弱,位错滑移的临界切应力随之下降,合金的变形抗力也同步降低。

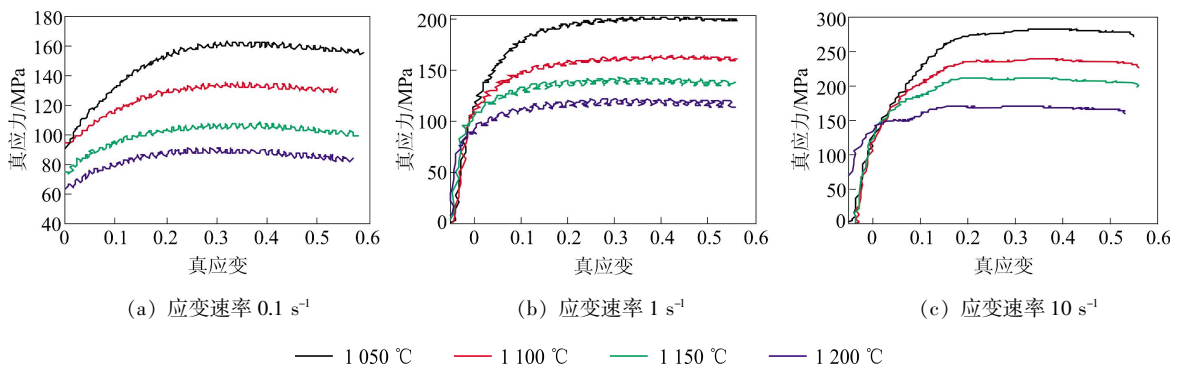


图 1 Incoloy 825 合金在不同变形条件下的变形抗力曲线

(2) 在热变形温度和变形量相同的情况下,流变应力均随应变速率的增加而增大。这是因为应变速率增加后,材料的临界剪切应力升高,流变应力也相应增大,呈现加工硬化现象。

(3) 在应力达到峰值应力之前,在相同热变形温度和应变速率条件下,流变应力随变形量的增加而增大,这是由于在高变形量的情况下,位错密度增加,变形存储能增大,提高了再结晶驱动力,使流变抗力增大。

Incoloy 825 合金在不同变形条件下的峰值应力变化曲线如图 2 所示。可以看出,在相同的应变速率条件下,峰值应力随着挤压温度的升高而下降,并呈现出线性的变化趋势。由于实际热挤压过程中的应变速率较大,Gleeble 试验机所提供的应变速率不能满足实际需要;因此,需要建立峰值应力 σ_p 随温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的变化规律。而 σ_p 、 T 以及 $\dot{\epsilon}$ 可用公式(1)中的 Arrhenius 方程来表达。

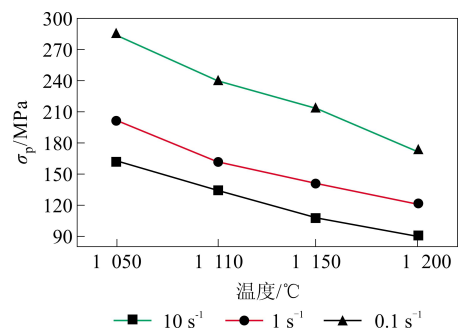


图 2 Incoloy 825 合金在不同变形条件下的峰值应力变化曲线

$$A\sigma_p^n = \dot{\epsilon} \exp[Q/(TR)] \tag{1}$$

式中 Q —— 对应的表观启动能, kJ/mol;
 R —— 气体常数, 8.314 5 J/(mol·K);
 A, n —— 与材料有关的常数。

将公式(1)两边取对数可得:

$$\ln \dot{\epsilon} + Q/(TR) = \ln A + n \ln \sigma_p \tag{2}$$

在温度恒定的条件下,公式(2)两边对 σ_p 求偏导,得到:

$$n=[\partial(\ln \varepsilon)/\partial(\ln \sigma_p)]_T \quad (3)$$

假定应变速率恒定,公式(3)两边对 $1/T$ 求偏导,得到表观启动能:

$$Q=nR[\partial(\ln \sigma_p)/\partial(1/T)]_e \quad (4)$$

经计算得到 $n=7.49$, $Q=423.720$ kJ/mol。进一步求得 A 的平均值为 0.219 8。通过以上计算可得到 Incoloy 825 合金峰值应力的表达式为:

$$\sigma_p=1.224e^{0.1335} \exp(6803.8/T) \quad (5)$$

该峰值应力表达式可计算不同温度、应变速率条件下的峰值应力,特别是应变速率超过 Gleeble 试验机所能提供的上限时,进行理论计算,进而预估 Incoloy 825 合金在一定挤压工艺条件下的挤压力值,指导调整工程实践时的挤压参数设定。

2.2 挤压力理论计算

在挤压过程中,挤压力大小主要受变形抗力、挤压温度、挤压速度、变形比、模角、坯料长度、摩擦条件等因素影响^[3-4]。

目前,挤压力的确定主要有主应力法、上限原理法、有限元法、滑移线场法、图算法和经验公式法等计算方法。本文采用由平均主应力理论推导出的公式,由于考虑了各种挤压条件,比较实用^[5-9]。该公式将全部挤压力分成 4 个部分,即:

$$F=F_0+F_1+F_2+F_3 \quad (6)$$

式中 F —— 全部挤压力, N;

F_0 —— 不考虑外摩擦的影响,为实现变形所需要的力,即克服金属变形阻力的作用力, N;

F_1 —— 克服挤压筒表面摩擦的作用力, N;

F_2 —— 克服压缩变形区摩擦的作用力, N;

F_3 —— 克服模具定径区摩擦力的作用力, N。

在圆管的挤压中, F_0 、 F_1 、 F_2 、 F_3 的计算如下:

$$F_0=0.86i\sigma_1[D^2/\cos^2(\alpha/2)-d_k^2/\cos^2(\varphi/2)] \quad (7)$$

$$F_1=1.57(D^2-d_k^2)\mu_M l(D-d_k)\sigma_1/[\sin \alpha(D_k-d_k)] \quad (8)$$

$$F_2=\lambda\pi(D_k+d_k)\mu_S\sigma_2 l \quad (9)$$

$$F_3=\pi(D+d_k)L_H\mu_K\sigma_3 \quad (10)$$

$$i=\ln \lambda \quad (11)$$

$$\varphi=\arcsin(d_k \sin \alpha/L_H) \quad (12)$$

式中 λ —— 挤压比;

D —— 坯料直径, mm;

d_k 、 D_k —— 分别为管材的内径和外径, mm;

l —— 模具定径区长度, mm;

L_H —— 挤压筒内径, mm;

α —— 模角, (°);

μ_M 、 μ_S 、 μ_K —— 阻碍变形的摩擦因数,分别在模具压缩区、定径区及挤压筒的接触表面处;

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 —— 变形区与挤压筒接触层的变形抗力、坯料与挤压筒接触层的变形抗力、压缩变形区终端的变形抗力, MPa。

挤压力理论计算参数见表 2, 其中, μ_M 、 μ_S 、 μ_K 统一取 0.017。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 由公式(5)计算得出,根据经验,公式中 T 取 1 250 °C, 变形区与挤压筒接触层的应变速率取 40 s⁻¹, 坯料与挤压筒接触层的应变速率取 10 s⁻¹, 压缩变形区终端的应变速率取 40 s⁻¹。将以上参数代入公式中求得: $F_0=13\ 572\ 930$ N, $F_1=19\ 354\ 419$ N, $F_2=122\ 202$ N, $F_3=1\ 368\ 667$ N, $F=F_0+F_1+F_2+F_3=34\ 418\ 218$ N。

表 2 挤压力理论计算参数

挤压温度 $T/^\circ\text{C}$	坯料长度/mm	坯料规格/mm	挤压管规格/mm	挤压比 λ	定径区长度 l/mm	模角 $\alpha/^\circ$
1 250	570	$\Phi 200 \times 59.5$	$\Phi 89 \times 8$	12.9	8	30

2.3 挤压力有限元模拟分析

在挤压力的求解过程中,需要知道 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 。通常变形抗力可通过经验值得到,为了精确获得各处的变形抗力值,拟采用 Deform 软件进行模拟,模拟样品的工艺参数与理论计算时相同(表 2)。

Incoloy 825 合金热挤压的应变速率模拟结果如图 3(a)所示,在热挤压过程中,坯料变形区终端即模具模角处的应变速率最大,达到 168 s⁻¹; Incoloy 825 合金的应力模拟结果如图 3(b)所示,变形区靠近挤压针处的应力最大,达到 446 MPa。

2.4 挤压力数值对比分析

Deform 软件对整个挤压过程中挤压力的模拟结果如图 4 所示,实际生产时的挤压力曲线如图 5 所示。可以看出,两条曲线在挤压突破以及在稳定挤压时呈现出相似的形态,最大的挤压力出现在突破阶段,软件模拟出的最大挤压力为 37.0 MN,实际生产中的最大挤压力为 29.5 MN,理论计算得出的最大挤压力为 34.4 MN。理论计算值与实际最大挤压力较为接近,误差在 17% 左右。

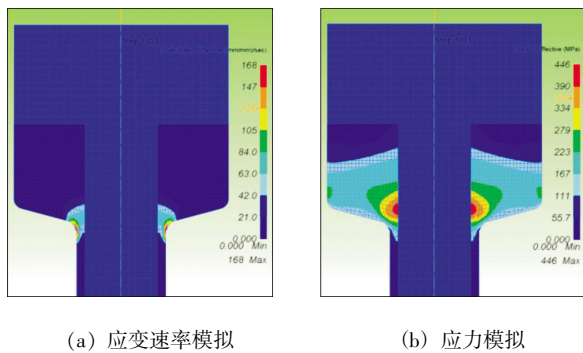


图3 Incoloy 825 热挤压过程类比结果

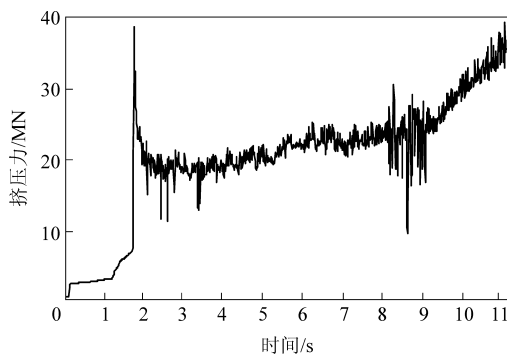


图4 Deform 软件挤压力模拟结果

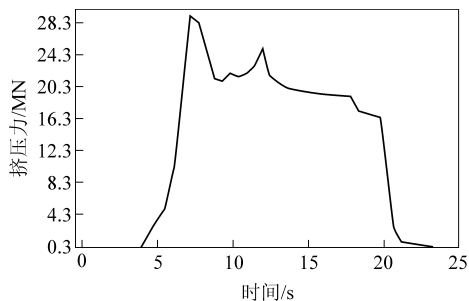


图5 Incoloy 825 实际生产时的挤压力曲线

对于挤压力, Deform 模拟值、理论计算值与实际记录值之间的误差是由于软件模拟和理论计算的塑变应力为理想塑性应力, 即不考虑加工硬化的作用, 同时忽略了摩擦生热、热功转换和热传导等温度因素的影响, 因此造成了三者之间的误差。

软件模拟和理论计算结果均低于实际记录值, 可以判断在目前 Incoloy 825 合金热挤压工艺参数设定下, 温度因素起到的降低挤压力的作用是大于加工硬化增加挤压力的作用的, 偏差的主要原因是温升降低了实际最大挤压力值。

针对挤压力应力理论结果计算与有限元分析结果之间的差异, 原因是: 理论计算过程中, 计算各

处变形抗力时使用了经验参数, 相当于对计算进行了一次修正, 算得的结果更接近实际值; 而 Deform 模拟均为纯理想条件下的运算, 得到的结果差异更大。

因此, 在工程实践中, 结合经验参数对挤压力进行预估的方式, 得到的数据与真实结果更为接近。Deform 模拟的方式, 需考虑一定程度温度因素, 对结果进行纠偏, 方可得到合理的数值。

3 结论

(1) 利用 Arrhenius 方程, 推导出 825 合金峰值应力的表达式为: $\sigma_p = 1.224 \varepsilon^{0.1335} \exp(6803.8/T)$ 。

(2) 利用 Deform 软件模拟出的最大挤压力为 37.0 MN, 实际生产中的最大挤压力为 29.5 MN, 最大挤压力均出现在挤压突破阶段; 而理论计算得出的最大挤压力为 34.4 MN, 与模拟值相比, 理论计算的挤压力与实际挤压力差别较小, 误差在 17% 左右。

4 参考文献

- [1] 冯勇, 何德良, 龚德胜, 等. 国产 825 合金的耐腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(2): 164-170.
- [2] 陈胜虎, 戎利建. Ni-Fe-Cr 合金固溶处理后的组织变化及其对性能的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 385-392.
- [3] 陈昆, 张博, 陈定方, 等. 钢管热挤压中的挤压力研究[J]. 装备制造技术, 2008(3): 1-3.
- [4] 魏军. 金属挤压机[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 曾凡博, 李宏, 吴青松, 等. 热处理工艺对 700 °C 以上超超临界电站用镍基合金组织及性能的影响[J]. 钢管, 2018, 47(2): 21-25.
- [6] 聂飞, 付俊生, 张晓文, 等. 热处理对 N08020 合金管材组织及性能的影响[J]. 钢管, 2017, 46(4): 9-14.
- [7] 陈久锋, 邵卫东. 固溶热处理对一种镍基耐蚀合金析出相的影响[J]. 钢管, 2016, 45(2): 19-22.
- [8] 王植栋, 吴青松, 高佩, 等. 球化退火冷却速度对钎具用 23CrNi3Mo 合金管组织与硬度的影响[J]. 钢管, 2017, 46(5): 31-33.
- [9] 赵双群, 符锐, 林富生. 700 °C 先进超超临界锅炉过热器管用新型镍基高温合金 GH750 的组织 and 性能研究[J]. 钢管, 2017, 46(6): 5-10.

(收稿日期: 2019-10-29; 修定日期: 2019-12-20)