

GH4169合金管材正挤压工艺优化的数值模拟

王 珏¹⁾ 董建新¹⁾ 张麦仓¹⁾ 郑 磊¹⁾ 信继军²⁾

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 中油吉林化建工程股份有限公司, 吉林 132021

摘 要 结合 GH4169 在不同温度、应变速率下的真应力—应变曲线, 应用 Msc Superform 有限元软件对 GH4169 合金管材正挤压进行了数值模拟, 系统分析讨论不同挤压参数对挤压过程的影响. 结果表明: GH4169 合金管材可以通过热正挤压成形, 当挤压速度为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 模角为 $20\sim 30^\circ$, 坯料预热温度为 $1040\sim 1050^\circ\text{C}$ 时, 以及在良好的润滑条件下可以获得优化可控的挤压工艺.

关键词 高温合金; 热挤压; 管材; 数值模拟

分类号 TG 376.9

Numerical simulation for optimization of the extrusion process of GH4169 tubes

WANG Jue¹⁾, DONG Jianxin¹⁾, ZHANG Maicang¹⁾, ZHENG Lei¹⁾, XIN Jijun²⁾

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

2) China Petroleum Jilin Chemical Engineering & Construction Co. Ltd., Jilin 132021, China

ABSTRACT The hot extrusion process of GH4169 superalloy tubes was simulated by using Msc Superform software with the true flow stress-true strain curves of GH4169 alloy at different temperatures and strain rates. The effects of technical parameters on the extrusion processing were systematically analyzed to optimize the extrusion process. The results show that high quality products can be expected using forward extrusion. The optimal parameters are the extrusion speed of 100 and $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the die angle of 20 to 30° , the billet preheating temperature of 1040 to 1050°C and a better lubrication condition.

KEY WORDS high-temperature alloys; hot extrusion; tubes; numerical simulation

GH4169 高温合金以较高的强度、韧性和优异的综合性能, 广泛应用于航空、航天、能源和电力等领域^[1-2], 尤其是该合金管材的需求量正逐年增大. 无缝管材的生产多采用热挤压的方式, 高温合金变形抗力大、可变形温度窄等特点导致其挤压过程中温度和速度的选择与传统的软合金、轻合金有明显的不同, 往往采用高温并配合大的挤压速度. 对金属热挤压的研究多采用挤压实验与数值模拟相结合的方式. 近年来, 国外对热挤压过程中的模具优化和挤压过程中玻璃润滑剂性质等相关问题进行了深入的研究^[3-4], 得到了针对不同断面型材挤压时模具的优化方法. 我国对热挤压的研究主要针对铝、镁等轻合金^[5], 对高温合金管材挤压的研究较少, 各种挤压参数并没有标准的配置方式.

1 实验材料及研究方法

1.1 数值模拟中 GH4169 合金的材料参数

本文中管坯材料为高温合金 GH4169, 其主要成分如表 1 所示. GH4169 合金的热变形行为通过恒温单向压缩实验获得; 将锻态 GH4169 合金加工成 $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的圆柱试样, 压缩实验在 Gleeble1500 试验机上进行, 变形温度为 $900, 950, 990$ 和 1040°C , 应变速率为 $0.1, 1$ 和 20 s^{-1} , 实验获得的真应力应变曲线如图 1 所示. 结合真应力应变曲线, 采用线性回归的方法以及相关计算得到该材料的本构关系方程:

$$\dot{\epsilon} = 4.51 \times 10^{16} [\sinh(0.0024\sigma)]^{5.05} \cdot \exp(-413118/RT).$$

收稿日期: 2009-08-03

基金项目: 国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助重点项目 (No. 50831008)

作者简介: 王 珏 (1985-), 男, 硕士研究生, E-mail: wangjue-so@126.com; 董建新 (1965-), 男, 教授, 博士生导师

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, σ 为峰值应力, R 为气体常数, T 为变形温度.

表 1 GH4169 合金化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of GH4169 alloy

C	Si	Mn	Cr	B	Al	Mo	Fe	Ti	Nb	Ni
0.05	0.30	0.20	19.0	0.006	0.5	3.0	18.0	1.0	5.3	其余

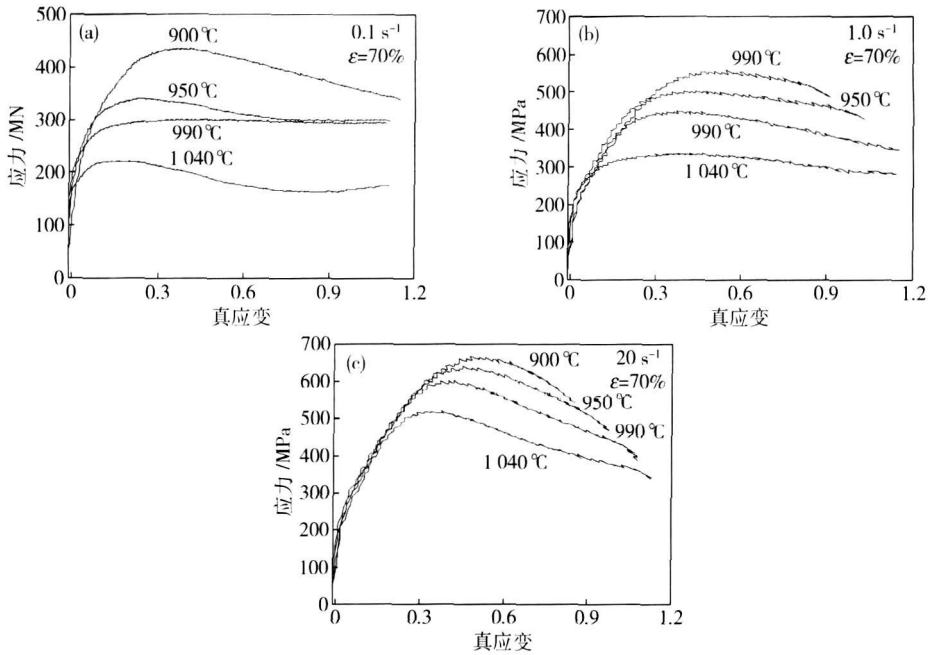


图 1 不同应变速率下 GH4169 合金应力应变曲线: (a) 0.1 s^{-1} ; (b) 1.0 s^{-1} ; (c) 20 s^{-1}

Fig 1 True stress-strain curves of GH4169 alloy at different strain rates: (a) 0.1 s^{-1} ; (b) 1.0 s^{-1} ; (c) 20 s^{-1}

整个模具系统采用 H13 热作模具钢. 由于模具被看作刚性体, 所以其弹性模量、泊松比和热膨胀系数不予考虑. 管坯和模具在数值模拟过程中采用的

材料参数如表 2 所示. 模拟中的管坯尺寸为: 外径 217 mm, 内径 82 mm, 长度 200 mm; 挤压后的管材尺寸为: 外径 108 mm, 内径 82 mm.

表 2 管坯与模具的材料参数

Table 2 Parameters of billets and the die

参数	材料	弹性模量 / GPa	泊松比	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	对流换热系数 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	接触热传导系数 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	线膨胀系数 / K^{-1}
坯料	GH4169	202.7	0.37	8.24×10^3	27.6	704	200	2.5×10^4	1.86×10^{-5}
模具	H13	—	—	7.8×10^3	28.4	560	200	2.0×10^4	—

1.2 模拟过程挤压参数

本次模拟所采用的挤压参数为: 挤压速度 100, 150, 200, 250 和 $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 模具模角 20° , 25° , 30° 和 45° ; 摩擦因数 0.05, 0.1, 0.15 和 0.2; 坯料预热温度 1040, 1050, 1060, 1070 和 1080°C ; 坯料端部圆角半径 0, 15, 20 和 30 mm.

1.3 数值模拟模型

图 2 为本实验中采用的基本模型. 挤压力由水压机提供, 坯料由右向左运动, 通过锥模, 由模孔经定径带挤出. 由于几何上的对称性, 本模型采用轴

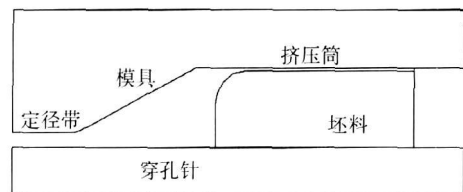


图 2 数值模拟的挤压模型

Fig 2 Extrusion process model in numerical simulation

对称的方式. 模型中坯料、挤压筒、模具和穿孔针均进行离散化处理, 统一采用四边形节点单元. 由于变形过程中存在模具与管坯之间的热交换以及热功

转换等过程,所以采用热力耦合的分析方法,挤压筒和模具设置为具有热传递性质的刚性体.

2 结果分析

本文分别对挤压速度、模具角度、摩擦因数、坯料预热温度和坯料端部圆角半径等挤压参数进行调整,分析各种参数的改变对挤压过程的影响,并分析了模具装配不当给挤压过程带来的危害.

2.1 挤压速度

GH4169合金作为典型的高温合金其可变形温度的范围很窄^[2],这就要求较高的挤压速度,以免挤压后期由于温度过低而不适于变形;但高速挤压可能会带来变形抗力大,形变不均匀,加剧模具磨损等问题^[6].本文结合不锈钢、镍基合金等其他材料的挤压速度经验^[7-8],选取挤压速度为 $100\sim 300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.为了研究挤压速度对挤压过程的影响,特将其他参数定为:模角 25° 、摩擦因数 0.05 、坯料预热温度 1040°C 、坯料端部圆角半径 30 mm ,并在调整挤压速度时保持不变.

挤压力是管材挤压生产的重要指标之一.图3为 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度下挤压时的挤压力变化规律.挤压力在挤压开始阶段迅速上升,然后稳定在 $35\sim 45\text{ MN}$.不同挤压速度下的挤压力变化规律相似,但挤压力大小明显不同.图4为挤压过程中最大挤压力随挤压速度的变化曲线.当挤压速度为 $100, 150, 200, 250$ 和 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时对应的最大挤压力分别为 $47.4, 46.3, 54.8, 56.0$ 和 49.7 MN ,即随着挤压速度的提高,挤压过程中的最大挤压力出现了波动.这是由加工硬化效果、再结晶软化效果、温度起伏所引起的硬化或软化效果综合作用的结果.

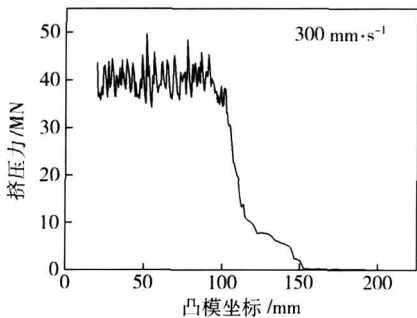


图3 挤压过程中的挤压力变化规律

Fig 3 Relationship between punch position and extrusion force

挤压过程中的摩擦作用和热功转化会导致坯料在靠近模孔附近的大变形区产生较大的温升(图5),甚至出现过烧现象,导致塑性大幅降低.挤压速度对坯料最高温升的影响如图6所示.随着挤

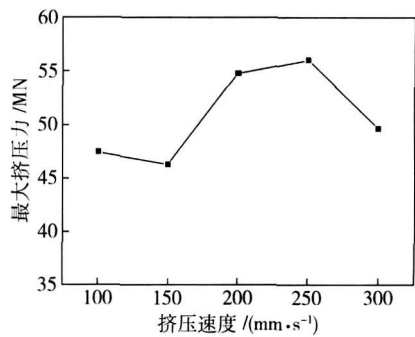


图4 最大挤压力与挤压速度的关系

Fig 4 Relationship between extrusion speed and maximum extrusion force

压速度的升高,最高温升从 110°C 升高到 130°C .另外,管材的头部应变小于其他部分,这部分管材会保持一定的原始组织导致性能变差.

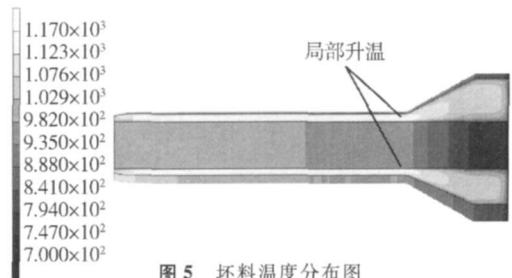


图5 坯料温度分布图

Fig 5 Temperature distribution of a billet

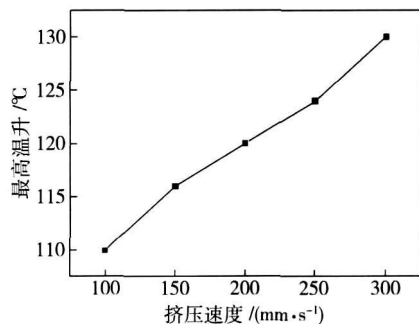


图6 坯料最高温升与挤压速度的关系

Fig 6 Relationship between extrusion speed and maximum temperature rise of billets

2.2 模具角度

模角是指模具轴心线与模具工作端面所构成的夹角.模角是影响挤压过程的重要因素,高温合金挤压所采用的模角在 15° 与 60° 之间^[9].本实验中采用 $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 和 45° 四种不同的模角.为了研究模角对挤压过程的影响,特将其他参数定为:挤压速度 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,摩擦因数 0.05 ,坯料预热温度 1040°C ,坯料端部圆角半径 30 mm ,并在调整模角时保持不变.模角的增大对挤压力起到相反的两种作用:一方面使金属流入流出模孔时附加弯曲变形增加,导致变形所需的挤压力分量 R_M 增大;另一方面坯料与模具接触面积的减小,使挤压过程中克服

摩擦阻力的挤压力分量 T_M 减少. 图 7 为最大挤压力随模角变化曲线. 在本节所设定的挤压参数下, 最大挤压力随着模角增大而增大, 四种模角 20° , 25° , 30° 和 45° 对应的最大挤压力分别为 42.1, 49.7, 54.7 和 56.5 MN. 这是因为实验中设定的润滑条件良好, 所以克服金属变形所需要的挤压力分量 R_M 起主要作用, 而克服摩擦阻力所需要的挤压力分量 T_M 起次要作用. 随着模角增大, R_M 的增大程度大于 T_M 的减小程度, 整体挤压力表现出增大的趋势. 另外, 不同模角下坯料在挤压过程中的最高温升均在 $120\sim 130^\circ\text{C}$, 模角变化对最高温升幅度的影响不大. 所以当润滑条件较好时, 挤压过程中建议采用 $20^\circ\sim 25^\circ$ 模角.

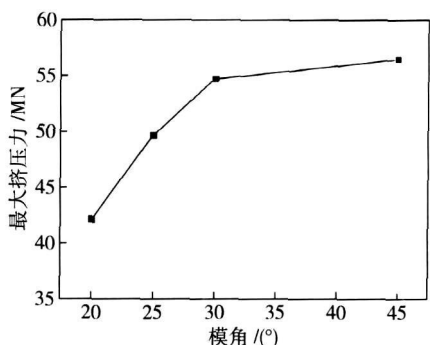


图 7 最大挤压力与模角的关系

Fig. 7 Relationship between maximum extrusion force and die angle

2.3 摩擦因数

润滑条件是挤压工艺中的重要参数, 因为其直接影响挤压过程中应力场、温度场及挤压力的分布. 在数值模拟中润滑条件的不同表现为摩擦因数的变化, 本实验中采用 0.05、0.10、0.15 和 0.20 四种摩擦因数. 为了研究摩擦因数对挤压过程的影响, 特将其他参数定为: 挤压速度 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 模角 25° , 坯料预热温度 1040°C , 坯料端部圆角半径 30 mm, 并在调整摩擦因数时保持不变. 从模拟结果可以看出, 增大摩擦因数会导致整个坯料在挤压过程中升温更加剧烈, 特别是局部最高温度随着摩擦因数的增大而明显升高 (图 8), 当摩擦因数为 0.20 时, 最高局部温度可达 1208°C , 有可能导致局部过烧^[10]. 随着摩擦因数的增大, 挤压力水平明显升高 (图 9), 采用四种摩擦因数挤压时的最大挤压力分别为 49.7、60.2、63.8 和 77.2 MN. 挤压力大幅升高的原因: 摩擦因数的增大不但会使坯料与模具接触的摩擦阻力增大, 还会使金属流动的均匀程度下降, 共同导致挤压力上升, 变形困难. 另外, 摩擦因数增大还会使产品的应变分布不均匀性增加, 因此实际生产中应改善润滑条件, 降低摩擦因数.

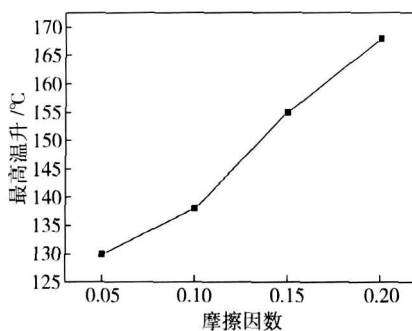


图 8 局部升温与摩擦因数关系

Fig. 8 Relationship between friction coefficient and the maximum temperature rise of billets

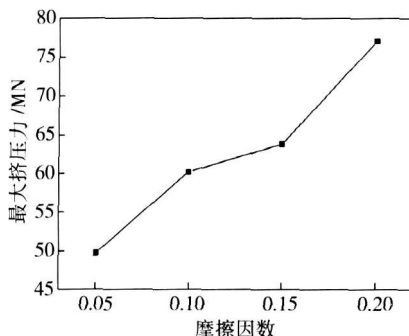


图 9 最大挤压力与摩擦因数的关系

Fig. 9 Relationship between friction coefficient and maximum extrusion force

2.4 坯料预热温度

坯料在挤压前进行预热以保证变形时材料的组织为奥氏体和一次碳化物, 同时预热会使材料的屈服极限降低, 从而降低挤压力, 所以升高预热温度可以改善加工工艺. 本文选取五种坯料预热温度 1040 , 1050 , 1060 , 1070 和 1080°C . 为了研究坯料预热温度对挤压过程的影响, 特将其他参数定为: 挤压速度 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 摩擦因数 0.05, 模角 25° , 坯料端部圆角半径 30 mm, 并在调整坯料预热温度时保持不变. 从模拟结果看出, 随着坯料预热温度的升高, 挤压力有下降的趋势, 由温度升高所引起的软化作用明显. 然而从坯料最高温升看出, 五种预热温度对应的最高温升分别为 132, 134, 147, 157 和 162°C , 过高的温度将引起局部过烧. 由以上两方面综合考虑, 坯料预热温度取 1040 和 1050°C 为宜. 值得注意的是, 挤压前坯料和模具的预热往往由感应加热来实现, 模具的预热温度为 400°C , 远低于坯料的预热温度, 如此大的预热温差实现起来是比较困难的^[11], 所以实际中通过提高坯料预热温度来降低挤压力的可调整范围不大.

2.5 坯料端部圆角半径

实际生产中坯料在预热结束后并不直接挤压,

而是会在挤压筒内停留一段时间. 在这段时间内坯料的温度分布会发生变化, 坯料外围局部和尖角区域出现的降温会使坯料的变形抗力增大甚至出现组织变化. 局部温度变化的程度与坯料和环境的热交换有关, 也与坯料自身的几何形状有关. 为了分析坯料端部圆角大小对挤压过程的影响, 设定预热结束时, 坯料在挤压筒内停留 5 s 考察坯料端部在挤压前的温度分布及其对挤压力的影响. 坯料端部的圆角半径共四种, 分别为 0, 15, 20 和 30 mm. 图 10 为坯料端部外围尖角处平均温度与圆角半径的关系. 当坯料端部无圆角时, 挤压前尖角处温度会降至 970℃; 当端部圆角半径为 30 mm 时, 温度达到 990℃, 散热明显降低. 四种不同坯料端部圆角半径下, 挤压过程中平均挤压力分别为 43.2, 41.5, 40.6 和 38.1 MN, 即随着坯料头部圆角半径增大平均挤压力降低, 所以增大坯料圆角半径可以改善加工的工艺.

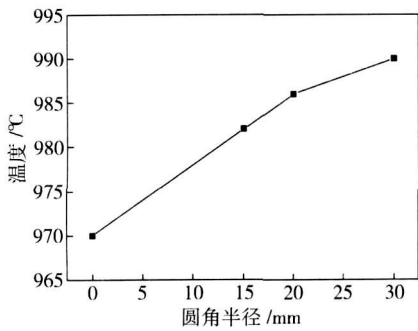


图 10 坯料尖角处温度与圆角半径的关系

Fig 10 Relationship between billet radius and average temperature

2.6 模具装配不当对挤压过程的影响

挤压筒和模具之间靠配合与密封连接^[3]. 在实际生产中, 当组装模具和挤压筒时, 由于尺寸误差和人为操作等因素, 容易在挤压筒和模具接触处出现平台结构(图 11), 即改变了纯锥模的原始模具结构. 本文针对实际中出现的问题进行了有限元模拟, 分析模具装配不当对挤压过程的影响. 从速度分布图可以看出, 模具装配不当会造成金属流动不均匀程度增加, 在模具与挤压筒接触处坯料的速度为零, 即出现挤压“死区”(图 11), 此种现象在平模挤压中较为常见. 模具装配不当时, 挤压过程中的挤压力平均达到 45 MN 以上, 整体挤压力水平高于正常值(图 12). 产生此变化的原因为: “死区”内、外部的金属流动速度差很大, 正常流动的金属对“死区”内金属产生大的压应力, 造成应力集中导致变形困难, 即装配过程中出现的细小改变会导致挤压过程的剧烈变化, 所以在实际生产中应该尽量避

免这种情况的发生或减少此种程度.

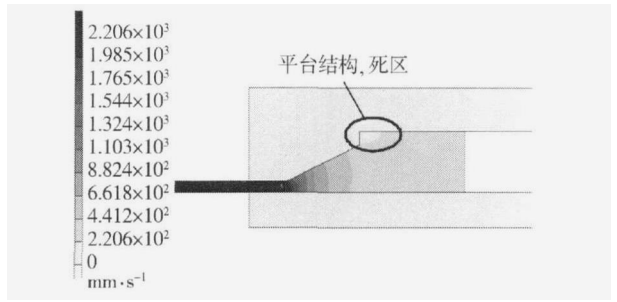


图 11 模具装配不当时的速度分布

Fig 11 Speed distribution of extrusion process

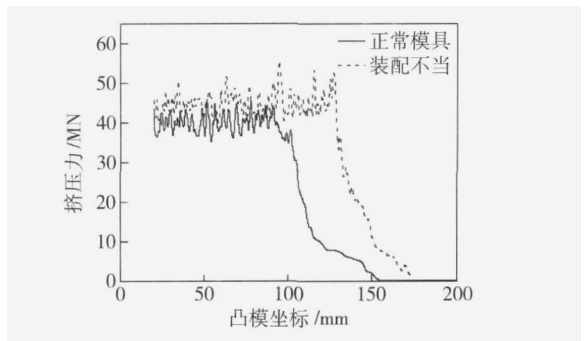


图 12 挤压力变化规律与模具形状的关系

Fig 12 Comparison of extrusion force between different shape dies

3 讨论

由模拟结果可知, 挤压过程中坯料会在模孔附近出现局部剧烈升温, 不同挤压参数下的升温幅度不同, 其中当摩擦因数为 0.2 时, 局部温度最高达到 1208℃ 以上. 由 Thermo-calc 热力学软件计算可知, 标准成分下 GH4169 合金初熔点为 1210℃, 即坯料的局部温度已经接近合金的初熔点. 进一步计算表明, 如果合金在冶炼过程中出现成分波动, 合金初熔点会随之改变. 如图 13 所示, 随着 Ti Al 含量的小幅升高, 合金的初熔点降低, 最低会降至 1199℃, 即如果合金成分中 Al Ti 的质量分数出现波动, 则挤压过程中坯料的局部温度完全有可能会达到初熔点以上, 那么管坯的心部会出现局部熔化, 液相

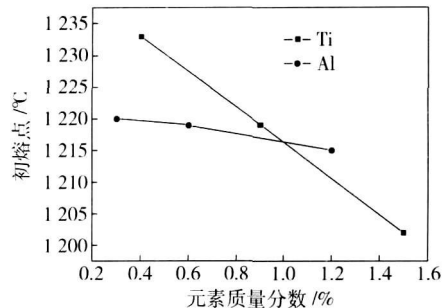


图 13 GH4169 合金初熔点与元素质量分数的关系

Fig 13 Effect of chemical composition on the melting point of GH4169 alloy

的出现导致挤压过程中裂纹的萌生,甚至发生挤压过程碎裂的现象.在实际生产中,合金成分出现波动的可能性很大,对挤压工艺的要求就更加严格;即使坯料的升温没有达到初熔点,局部也会因为温度过高使晶粒过度长大,导致塑性降低^[12],使加工性变差.

总之,因为镍基合金管材挤压的特点为大变形高速度,势必将导致局部升温,而温升将会使组织发生明显的变化,导致塑性下降甚至开裂,并且挤压过程中坯料的应力分布不均,甚至出现应力分层,各种因素的叠加将影响合金管材挤压的质量稳定性.

挤压力是选择挤压设备的最主要标准,挤压过程中的最大挤压力决定了挤压机的吨位,如果考虑安全系数,则所需挤压机的吨位更大.由模拟结果可知,所有的挤压参数都会对挤压力产生影响,而核心是加工硬化、再结晶软化、温度起伏所引起的硬化或软化的综合作用.由于挤压速度在 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,应变速率很大(局部可达 10^2 s^{-1}),挤压变形持续时间很短,不能发生充分的动态再结晶^[13],动态再结晶产生的软化效果小于加工的硬化效果,所以高速挤压条件下材料的软化主要来源于温度升高,因为升温会使位错运动能力提高,使阻碍位错运动的因素减少.导致坯料温度升高的因素有很多,如坯料预热温度升高、摩擦因数增大和挤压速度提高,这些因素都有使挤压力降低的趋势.但是,从模拟结果来看只有提高预热温度使挤压力明显降低.这是因为增大摩擦因数带来的高摩擦力和不均匀变形抵消了升温所引起的软化;增大挤压速度会使变形引起的热效应增大,同时减少了坯料和模具之间的热传递,从而使坯料温度上升,但高速挤压带来的加工硬化会抵消软化效果,模拟结果中挤压力随速度增加而出现波动即是证明.

对大变形快速挤压过程中材料的软化和硬化规律及其相互作用的机理,以及如何协调控制软化硬化规律将是一个重要的研究方向.

4 结论

(1) 采用锥模正挤压 GH4169 合金管材,其金属流动性比较好,无“死区”,挤出速度可达 $10^3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 数量级,平均应力约为 300 MPa ,挤压力稳定在 $35\sim 45\text{ MN}$,挤压制品应变分布比较均匀,但存在一定的头部缺陷.

(2) 调整挤压参数可以影响整个挤压过程,适宜的挤压参数为:挤压速度 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,在对坯料升温要求不高的情况下可以选择 $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,模角为 $20\sim 30^\circ$,坯料预热温度为 $1040\sim 1050^\circ\text{C}$,并且坯料端部进行倒圆角处理,良好的润滑条件,同时应注意模具与挤压筒的连接,在进行装配时不破坏锥模的形状而产生平模结构.

参 考 文 献

- [1] Wang Y, Shao W Z, Zhen L, et al. Flow behavior and microstructures of superalloy 718 during high temperature deformation. *Mater Sci Eng A*. 2008, 497: 479
- [2] Cao W D, Kennedy R L. Role of chemistry in 718-Type Alloys-Allvac 718 PlusTM alloy development// Green K A, Pollock T M, Harada H, et al. *Superalloys 2004*. Warrendale, TMS, 2004
- [3] Kumar S, Vijay P. Die design and experiments for shaped extrusion under cold and hot condition. *J Mater Process Technol*. 2007, 190: 375
- [4] Danodan D, Shivpuri R. Effect of glass lubricant behavior on the surface quality of extrudates in glass-lubricated hot extrusion. *Ann CRP Manuf Technol*. 1997, 46: 179
- [5] Fang G, Wang F, Lei L P, et al. Review of numerical simulation for extrusion process of aluminum alloy profile. *Chin J Rare Met*. 2007, 31(5): 682
(方刚, 王飞, 雷丽萍, 等. 铝型材挤压数值模拟的研究进展. *稀有金属*, 2007, 31(5): 682)
- [6] Kim D H, Lee H C, Kim B M, et al. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes. *J Mater Process Technol*. 2005, 166: 372
- [7] Lof J, Blokhuis Y. FEM simulation of the extrusion of complex thin walled aluminum section. *J Mater Process Technol*. 2002, 122: 344
- [8] Byon S M, Hwang S M. Die shape optimal design in cold and hot extrusion. *J Mater Process Technol*. 2003, 138: 316
- [9] Laue K, Stenger H. *Extrusion*. Ohio: American Society for Metals, 1981
- [10] Lin Q Q, Li Y Y, Wang Z Q. Numerical simulation of hot extrusion process of 2519 aluminum alloy tubes. *Mater Mech Eng*. 2007, 31(12): 79
(林启权, 李应明, 王振球. 2519 铝合金管材热挤压过程的数值模拟. *机械工程材料*, 2007, 31(12): 79)
- [11] Favennec Y, Labband V, Bay F. Induction heating processes optimization a general optimal control approach. *J Comput Phys*. 2003, 187(1): 68
- [12] Thomas A, Wahabi M E, Cabrera J M, et al. High Temperature deformation of inconel 718. *J Mater Process Technol*. 2006, 177: 469
- [13] Tian B H, Lind C, Schafner E, et al. Evolution of microstructures during dynamic recrystallization and dynamic recovery in hot deformed Ni in Ni 80a. *Mater Sci Eng A*. 2004, 367: 198