

高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 挤压棒材的研制

Preparation of High Silicon Nickel-copper Alloy

NCu30-4-2-1 Extrusion Bars

郭铜修¹, 刘德林², 于 洋²

(1 北京航空航天大学 经济管理学院,

北京 100083; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

GUO Tong-xiu¹, LIU De-lin², YU Yang²

(1 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083,

China; 2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 对高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 进行了短时高温拉伸实验, 研究了材料的强度和塑性随温度的变化规律。采用 Gleeble-1500 热模拟实验机对该合金铸态材料在不同变形温度和应变速率下进行了热压缩变形实验, 研究了流变应力受温度和应变速率影响的变化规律, 以及高温变形组织随温度和应变速率变化的规律。结合实际挤压实验, 确定了合理的挤压温度和挤压速率范围。该合金的力学性能和挤压成材率得到了大幅度提高。

关键词: 镍铜合金; 高温热压缩; 挤压温度; 挤压速率

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)02-0024-05

Abstract: The variation regularity of the strength and the plasticity of high silicon nickel-copper alloy NCu30-4-2-1 influenced by temperature was investigated by short-time high temperature tensile tests. Hot compression tests of as-cast nickel-copper alloy were performed under the condition of different temperatures and different strain rates with a Gleeble-1500 thermal mechanical simulator. The regularity of the flow stress influenced by temperature and strain rate was researched, and the effects of temperature and strain rate on the deformed microstructure were studied. Based on the test results, the appropriate extruding temperature and extruding velocity were determined. As a result, the mechanical properties of extrusion bars were greatly improved.

Key words: nickel-copper alloy; hot compression; extruding temperature; extruding velocity

高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 是 Ni-Cu-Si-Fe-Mn 系弥散硬化型高耐磨性 Ni 基合金, 通常称为含硅蒙乃尔合金。与其它蒙乃尔合金相比, 该合金由于含 Si 量较高(质量分数为 4%), 具有高硬度、高强度、优良的耐磨性和抗黏合性的特点, 因而适合用于制造航空燃油装置及其它要求工作稳定的精密摩擦件^[1]。

该合金中含有较高的 Si, 目的是提高其耐磨性, 但 Si 的加入增加了该合金对热加工温度的敏感性, 使得热加工温度区间较窄及材料具有较高的热脆性, 给挤压加工带来了较大难度。目前, 美国、俄罗斯、德国等国家均只有其它牌号的蒙乃尔合金挤压产品, 同类材料均为铸态使用。

中国在 20 世纪 80 年代先后研制成功了高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 挤压棒和铸棒, 但由于挤压成形存在较大难度, 成材率低, 所以生产使用中一直采用铸棒。然而, 铸棒的塑性较差, 断裂伸长率仅为 2% 左

右, 致使零件在加工过程中经常出现断裂, 合格率很低。而且研究表明, 铸态高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 的摩擦磨损性能较差^[2]。

本研究对挤压温度、挤压速率等挤压工艺参数进行了系统研究, 旨在解决高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 热挤压变形困难的问题, 提高该合金的挤压成材率和综合力学性能, 从而满足工程应用的需求。

1 实验方法

采用非真空感应熔炼工艺制备了 $\phi 90\text{mm} \times 250\text{mm}$ 的高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 铸棒, 化学成分见表 1。

短时高温拉伸实验在 AG-25TA 拉伸机上进行, 试样从铸棒上切取, 尺寸满足 GB4338-1995 的要求。变形温度由低到高取 T_1, T_2, T_3, T_4 , 试样加热到规定

表 1 高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 的化学成分(质量分数/ %)

Table 1 Compositions of high silicon nickel-copper alloy NCu30-4-2-1 (mass fraction/ %)

Cu	Si	Fe	Mn	Ni+ Co	Impurity ≤				Total impurity
					Mg	Al	C	S	
29.0-31.0	3.9-4.7	1.5-2.5	0.8-1.5	Bal	0.10	0.30	0.20	0.02	0.50

温度的时间不超过 1h, 到温后保温 20min, 拉伸速率为 2.5mm/min。

采用 Gleeble 1500 型热模拟实验机进行高温热压缩模拟实验, 试样尺寸为 $\phi 8\text{mm} \times 15\text{mm}$, 最大变形量为 60%, 应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 S_1, S_2, S_3 , 变形温度与高温拉伸实验相同, 也取 T_1, T_2, T_3, T_4 。加热速率为 $200^\circ\text{C}/\text{min}$, 到温后保温 5min 即进行压缩, 变形后立即对试样进行水淬, 以保留其高温变形组织, 水淬延迟时间大约为 3s。采用光学显微镜观察试样水淬后的显微组织。

采用 TXJ-650 型卧式挤压机进行挤压实验。沿挤压棒材纵向加工成静态拉伸试样。拉伸实验在 4507 型拉伸机上进行。

2 实验结果及讨论

2.1 挤压温度的研究

根据文献[3]中合金的状态图, 它能够初步给出加热温度范围, 热加工温度上限低于固相线的温度 T_0 , 为了防止铸锭加热时过热和过烧, 通常热加工温度上限取 $(0.85 \sim 0.90) T_0$, 而下限对单相合金为 $(0.65 \sim 0.70) T_0$ 。

对于高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1, 固相线的温度 $T_0 = 1300^\circ\text{C}$ 左右。根据上述热加工温度范围, 那么热加工温度上限为 $1105 \sim 1170^\circ\text{C}$, 下限温度为 $845 \sim 910^\circ\text{C}$ 。据《中国航空材料手册》介绍^[1], 高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 的热加工温度为 $920 \sim 950^\circ\text{C}$ 。

但是合金状态图只能给出一个大致的高温塑性图, 其实际值还要看其高温塑性图 and 不同温度下变形后的显微组织。

2.1.1 短时高温拉伸实验

高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 的强度和塑性随变形温度的变化规律分别见图 1 和图 2。随着温度升高, 合金的 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 不断下降。 δ 随温度升高不断增加, 而 ψ 先随温度升高而增加, 超过 T_3 后 ψ 呈下降趋势。一般认为, ψ 比 δ 能更真实地反映材料的真实极限变形能力^[4], 故该合金在 T_3 温度变形时塑性最好。材料的变形抗力越低、塑性越好, 则越有利于挤压成形, 因此, 挤压温度初步选定为 T_3 温度左右。

2.1.2 高温热压缩模拟实验

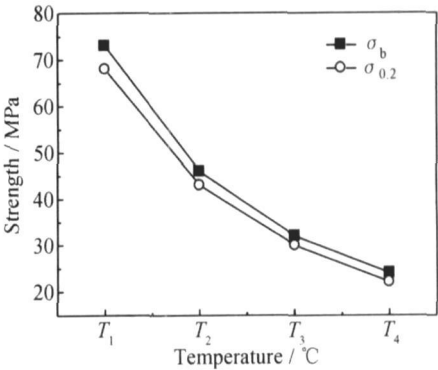


图 1 变形温度对强度的影响

Fig. 1 Effect of deformation temperature on strength

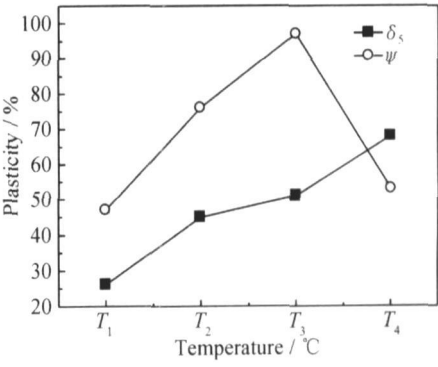


图 2 变形温度对塑性的影响

Fig. 2 Effect of deformation temperature on plasticity

为进一步确定合理的挤压温度范围, 对该合金进行高温热压缩模拟实验。

应变速率为 S_2 时, 不同温度下合金的真应力-真应变曲线见图 3。曲线趋势大致相同, 其一般规律为: 变形初期随着应变的增加, 应力不断升高, 发生加工硬化; 当应变达到一定值时, 流变应力达到峰值应力 σ_p , 此后由于材料发生动态回复和动态再结晶, 呈现不同程度的应变软化现象, 部分消除加工硬化效果, 导致应力-应变曲线下降; 当加工硬化作用与软化作用平衡的时候, 应力-应变曲线趋于水平, 流变应力达到稳态应力 σ_s ; 在较低温度下 (T_1), 还出现了二次加工硬化。由图 3 还可以看出, 变形温度对流变应力有很大影响, 在同一应变速率下, 变形温度越高, 流变应力越低。这主要是因为随着变形温度的升高, 材料的热激活作用增强, 原子平均动能增大, 晶体产生滑移的临界分切应

力减小, 减少了对材料位错运动和晶面间滑移的阻碍^[5], 并且随着温度的升高, 动态回复和动态再结晶也更容易进行, 使得位错密度下降, 抵消了塑性变形造成的加工硬化, 从而促使材料流变应力减小。

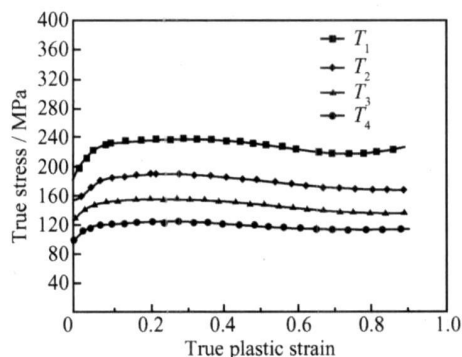


图 3 不同变形温度下的真应力-真应变曲线

Fig 3 True stress vs true strain under different deformation temperature

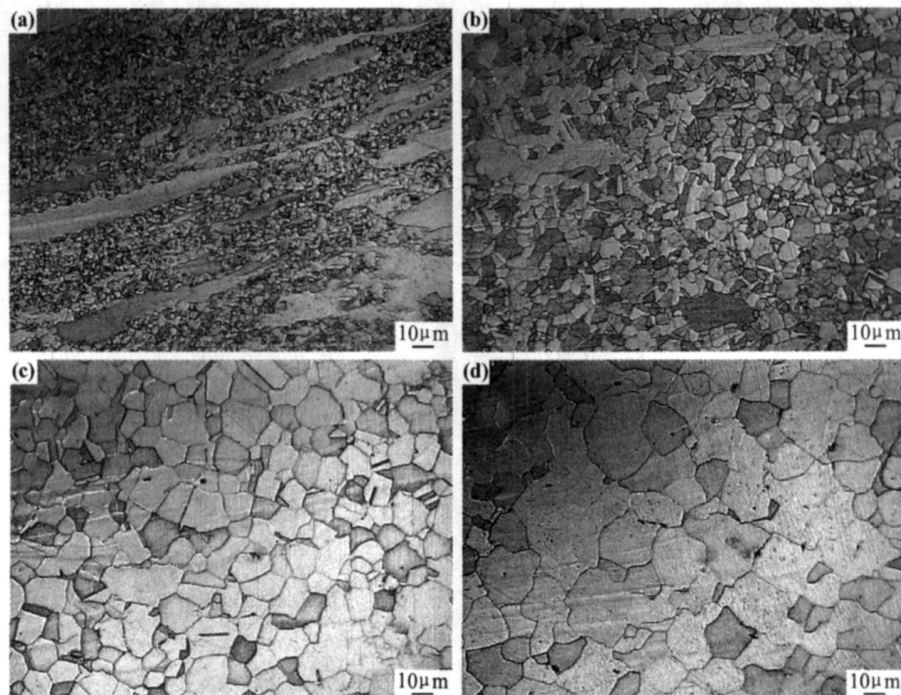


图 4 不同变形温度下的显微组织 (a) T_1 ; (b) T_2 ; (c) T_3 ; (d) T_4

Fig 4 Microstructure under different deformation temperature

(a) T_1 ; (b) T_2 ; (c) T_3 ; (d) T_4

2.2 挤压速率的研究

高温热压缩模拟实验温度一定时(T_3), 合金在不同应变速率条件下的显微组织见图 5。当应变速率为 S_1 时, 晶粒十分粗大, 甚至存在一些没有被打碎的铸态组织, 晶界比较圆滑, 没有明显的棱角, 晶粒尺寸大约在 $30 \sim 65 \mu\text{m}$ 。应变速率增加至 S_2 , 晶粒明显细化, 且大小比较均匀, 晶粒尺寸为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 。当应变速

图 4 为合金在不同温度下变形后的显微组织。温度为 T_1 时, 大晶粒(被压扁伸长的原始晶粒)周围出现了很多细小的晶粒(图 4a), 很显然是发生了不完全动态再结晶, 那些大晶粒是尚未发生再结晶的变形晶粒, 而细小的等轴晶粒则是在变形过程中形成的再结晶晶粒。

随着温度进一步升高, 合金在 T_2 温度变形时, 再结晶体积百分数增加, 细小的再结晶晶粒逐渐长大, 但仍存在少部分未发生再结晶的变形晶粒, 如图 4b 中箭头所指。当合金在 T_3 温度变形, 此时已发生了完全再结晶, 变形晶粒全部由等轴的再结晶晶粒所代替, 晶粒比较均匀(图 4c), 晶粒尺寸为 $15 \sim 30 \mu\text{m}$ 。当温度升至 T_4 , 再结晶晶粒尺寸增大, 表明此时处于晶粒长大阶段(图 4d)。

综合短时高温拉伸和高温压缩实验结果, 高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 合理的挤压温度为 T_3 温度左右。

率达到 S_3 时, 晶粒又变得粗大。由此可见, 该合金的晶粒尺寸随应变速率的增加先减小后增大。

在热变形过程中, 动态再结晶晶粒尺寸是由形核率 N 和长大速率 G 决定的^[6]。当应变速率较低时, 形核率是影响晶粒尺寸的主要因素, 故随着应变速率的增加, 变形不均匀导致形核率增加, 晶粒尺寸减小; 当应变速率较高时, 试样内部形变热效应的迅速增加使

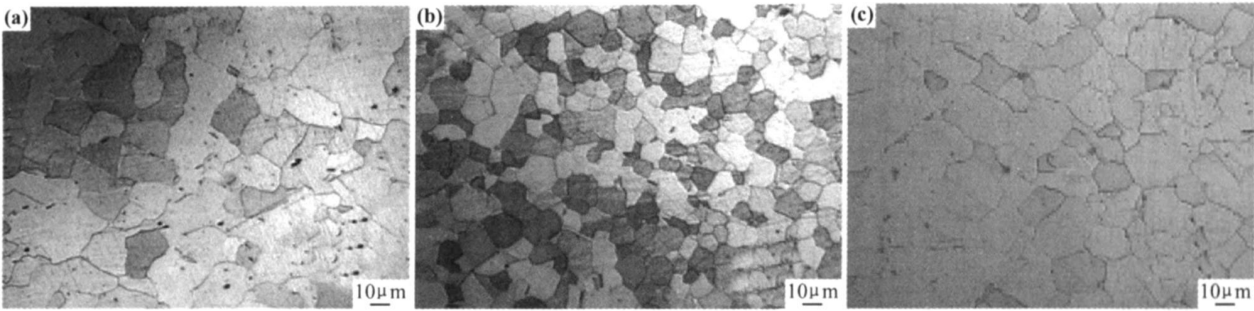


图 5 不同应变速率下的显微组织 (a) S_1 ; (b) S_2 ; (c) S_3
Fig 5 Microstructure under different strain rate
(a) S_1 ; (b) S_2 ; (c) S_3

得晶粒长大速率 G 成为影响晶粒尺寸的主要因素。因此,晶粒尺寸出现了先减小后增大的现象。

按照塑性理论,挤压时的平均真实应变为:

$$\epsilon = \ln \lambda \tag{1}$$

式中 λ 为挤压比。则平均应变速率为:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon / t_s \tag{2}$$

对于用单孔模挤压圆棒时,金属质点在变形区内停留的时间为 t_s ,

$$t_s = \frac{(1 - \cos \alpha)(D_i^3 - d^3)}{3 \sin^3 \alpha D_i^3 V_j} \tag{3}$$

式中: α 为模角; D_i 为挤压筒内径; d 为挤压制品直径; V_j 为挤压速率。

当模角取 $\alpha = 60^\circ$,

$$t_s = \frac{0.2566(D_i - d)}{V_j} \tag{4}$$

得出:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\lambda \cdot \ln \lambda \cdot V_j}{0.2566(D_i - d)} \tag{5}$$

挤压比 $\lambda = D_i^2 / d^2$, 由此表明 $\dot{\epsilon}$ 只与挤压制品直径 d 和挤压速率 V_j 有关。

挤压制品直径 d 取 22, 30, 34mm, 挤压筒内径 D_i 为 95mm, 则挤压比 λ 分别为 18.65, 10.02 和 7.81。由高温热压缩模拟实验结果可知, 当应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 S_2 时, 合金的晶粒细小、均匀。因此, 当挤压制品直径分别为 22, 30, 34mm 时, 由式(5)可计算出合理的挤压速率分别为 V_1, V_2 和 V_3 。

2.3 挤压实验

文献[1]指出, 当 Si 的质量分数为 3.8% ~ 4.0% 时, 高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 的热加工温度为 920 ~ 950℃。据此, 在该温度范围进行首次挤压实验, 主要工艺参数见表 2。

表 2 首次挤压实验主要工艺参数

Table 2 Main processing parameters of extruding experiment at the first time

Experimental batch	Heating-up temperature of as-cast bars / °C	Heating-up temperature of die / °C	Heating-up temperature of squeezer / °C	Lubricant
1	920	420	400	High temperature lubricant
2	930	420	400	High temperature lubricant
3	950	420	400	High temperature lubricant

实验结果表明, 在上述工艺参数下均无法完成挤压。

将铸棒的加热温度升高至 T_3 温度, 其它条件不变, 进行第二次挤压实验。结果表明, 挤压过程稳定, 成材率达到 75% 以上, 挤压棒材表面质量良好, 无开裂现象。由此可见, 通过实际挤压实验, 进一步证实了高硅镍铜合金 NCu30-4-2-1 合理的挤压温度为 T_3 温度左右。这也突破了该合金的热加工温度范围 920~950℃的限制。

结合热压缩模拟实验及所用挤压机本身的速率范围, 采用不同速率进行挤压。结果表明, 电机全部启动时, 挤压速率得到保证, 在挤压成形过程中大大减少了热量的损失, 提高了成材率。并且测得的挤压速率与热压缩模拟实验结果能很好地吻合。文献[7]介绍, 镍合金的流出速率一般为 0.3m/s, 且适合高速挤压, 如挤压比 λ 为 10, 则挤压速率应为 0.03~0.1m/s。然而, 本研究确定的合理挤压速率范围远小于上述范围, 从而突破了镍铜合金采用高速挤压的限制。

2 4 挤压棒材的力学性能

不同直径的高硅镍铜合金 N Cu30-4 2-1 挤压棒材的纵向力学性能结果见表 3。与国内外相关结果比较见表 4。

表 3 挤压棒材的力学性能

Table 3 Mechanical properties of extrusion bars			
Diameter of extrusion bar/mm	σ_b /MPa	δ_5 /%	HRC
$\phi 22$	1202	13.4	39.0
$\phi 30$	1179	15.6	38.2
$\phi 34$	1169	16.4	37.8

表 4 本研究成果与国内外相关结果比较

Table 4 Comparison between the research findings and previous related findings			
Material	δ_5 /%	σ_b /MPa	Percentage of extruding yield/%
Russian	≥ 2	≥ 800	-
German	≥ 1	≥ 750	-
Domestic as-cast bar	~ 2	~ 760	-
Domestic extrusion bar	~ 5	~ 900	Low
Bars prepared by this study	> 12	> 1100	> 75

从表 3 和表 4 可以看出,高硅镍铜合金 N Cu30-4 2-1 的力学性能和挤压成材率得到了大幅度提高,延伸率从不到 5% 提高到 12% 以上,抗拉强度从 900MPa 提高到 1100MPa 以上,挤压成材率超过 75%。

3 结论

(1) 高硅镍铜合金 N Cu30-4 2-1 在 T_3 温度左右变形抗力较小,塑性最好,且经压缩变形后发生了完全再结晶,晶粒细小、均匀,由此确定了该合金合理的挤压温度为 T_3 温度左右。

(2) 在 T_3 温度下进行热压缩变形,该合金的晶粒尺寸随应变速率的增加先减小后增大。应变速率为 S_2 时,该合金的晶粒细小、均匀。由挤压速率与应变速率的关系公式,确定了在挤压比 λ 分别为 18.65, 10.02 和 7.81 时,该合金合理的挤压速率分别为 V_1 , V_2 和 V_3 左右。

(3) 该合金铸棒在 T_3 温度左右挤压成形时,挤压过程稳定,成材率达到 75% 以上。且测得的挤压速率与热压缩模拟实验结果基本一致。

(4) 该合金的力学性能得到了大幅度提高,延伸率从不到 5% 提高到 12% 以上,抗拉强度从 900MPa 提高到 1100MPa 以上。

参考文献

[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. 494- 495.

[2] 周永欣, 吕振林, 张敏, 等. 航用蒙乃尔合金摩擦磨损特性的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(5): 26- 27.

[3] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.

[4] 姜祖康, 陈再枝, 任民恩. 模具钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.

[5] KOBAYASHI S, ALTAN T. Metal forming and the finite element method[M]. New York: Oxford University Press, 1998.

[6] 魏军. 有色金属挤压加工技术的现状及发展趋势[J]. 铜加工, 2006, 4: 16- 19.

[7] LOF J, BLOKHUIS Y. FEM simulations of the extrusion of complex thin-walled aluminum sections[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 3: 60- 70.

收稿日期: 2008-03-20; 修订日期: 2008-10-25

作者简介: 郭铜修(1963-), 男, 博士研究生, 主要从事材料与结构的应用安全性研究, E-mail: guotongxiu@sohu.com

通讯作者: 刘德林, 北京 81 信箱 4 分箱(100095), E-mail: liudel621@sohu.com

美国研发出新型“金属玻璃”

美国加州理工学院一个科研小组日前开发出一种以钛为基础的“金属玻璃”, 这种新型材料重量轻, 成本低, 能保持极佳的韧性及延展性, 可应用于航空航天领域。这一研究成果发表在美国《国家科学院学报》网络版上。

这个科研小组早前曾在英国《自然》杂志上发表论文, 介绍研制“金属玻璃”的一种新方法。当时他们主要以金属锆来进行合成。但以锆为基础的“金属玻璃”密度相对较大, 为 5.6~ 6.4 g/cm³, 应用于航空航天领域仍然不够理想。

研究人员道格拉斯·霍夫曼介绍说, 他们尝试以金属钛为基础材料, 最终开发出密度更小的“金属玻璃”, 其密度控制在 4.5~ 5 g/cm³ 之间。与其他类型“金属玻璃”相比, 新型“金属玻璃”的韧性和延展性毫不逊色。

钛比锆的价格低, 因此这种新型“金属玻璃”的成本更低。