

β - γ 高 Nb-TiAl 合金的高温挤压模拟

郑君姿, 张来启, 侯永明, 马向玲, 林均品

(北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用 Deform-3D 有限元软件模拟 β - γ 高 Nb-TiAl 合金 Ti-45Al-8.5Nb-0.2W-0.2B-0.02Y(摩尔分数, %)的高温棒材挤压过程, 分析挤压速度、模锥半角、挤压比以及模具圆角对合金的温度场、等效应变场、变形均匀性以及损伤因子的影响规律。结果表明: 随挤压速度增加, 棒材内部的温度梯度增大, 变形均匀性变化不明显; 随模锥半角的增加, 棒材的损伤因子增加, 变形的均匀性降低; 随挤压比的增加, 棒材的变形均匀性和损伤因子均增加; 模具圆角有助于减小棒材的损伤值和抑制裂纹的产生。综合模拟结果, 确定适合 β - γ 高 Nb-TiAl 合金高温挤压的工艺参数分别为: 挤压速度 10 mm/s、模锥半角 30°、挤压比 3。

关键词: β - γ 高 Nb-TiAl 合金; 高温挤压; Deform-3D 模拟; 挤压速度; 模锥半角; 挤压比

中图分类号: TF777.1 文献标志码: A

Hot extrusion simulation of β - γ TiAl alloy containing high Nb

ZHENG Jun-zi, ZHANG Lai-qi, HOU Yong-ming, MA Xiang-ling, LIN Jun-pin

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The hot extrusion process of Ti-45Al-8.5Nb-0.2W-0.2B-0.02Y (mole fraction, %) alloy was investigated by a Deform-3D software. The influences of extrusion speed, die half-angle, extrusion ratio and die fillet on temperature field, strain field, deformation uniformity and the damage factor were analyzed. The results demonstrate that with the increase of extrusion speed, the temperature gradient rises up and deformation uniformity has almost no change. The expanded die half-angle is detrimental to the damage factor and deformation uniformity, while the enhanced extrusion ratio promotes the improvement of the latter. The die fillet contributes to decreasing the damage of bars and restraining the cracks. According to all simulation results, extrusion speed of 10 mm/s, die half-angle of 30° and extrusion ratio of 3 are the optimal extrusion parameters of β - γ TiAl alloy containing high Nb.

Key words: β - γ TiAl alloy containing high Nb; hot extrusion; Deform-3D simulation; extrusion speed; die half-angle; extrusion ratio

由于高熔点难熔金属 Nb 元素的加入, 高铌 TiAl 合金比普通 TiAl 基合金具有更高的使用温度、更优良的高温强度和抗氧化性能, 被认为是未来航空航天最有应用潜力的新一代高温轻质结构材料^[1-3]。然而该合金较低的室温塑性和断裂韧性限制了其工程应用^[4-6]。获得细小均匀的显微组织是改善其室温塑性的关键, 而热加工能有效破碎粗大的铸态组织, 改善其室温塑

性^[7-9]。研究表明^[10-11], 锻造手段很难完全消除粗大的片层组织, 且由于其拉应力的作用易使工件的表层部分开裂。相比锻造工艺, 高温挤压使材料受到三向压应力作用, 这既可抑制裂纹的产生, 又可获得均匀细小的显微组织^[12], 因此, 高温挤压是细化 TiAl 基合金显微组织的一种有效的热加工技术。最近, β - γ TiAl 合金引起了人们的广泛关注, 这主要是因为无序 β 相

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB605502)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 张来启, 教授, 博士; 电话: 010-62334925; E-mail: zhanglq@ustb.edu.cn

在高温下具有独立滑移系多、变形抗力小且易于塑性加工等特点, 所以 β - γ TiAl 合金具有优良的热加工性能^[13]。

目前, 人们广泛展开对 TiAl 合金挤压成型的研究^[8,14], 然而, 对 β - γ 高 Nb-TiAl 合金的高温挤压以及其成型模式研究的公开报道还比较少。有限元模拟作为一种便捷有效的方法, 不仅可以给出挤压工艺参数对坯料内部温度场及应变场影响等信息, 为坯料挤压过程中的工艺参数的确定提供参考依据, 还能节约时间、节省成本、提高生产效率。因此, 利用 Deform-3D 有限元软件模拟分析挤压工艺参数(挤压速度、模锥半角、挤压比及模具圆角)对 β - γ 高 Nb-TiAl 合金棒材内部的温度场、应变场及损伤值的影响规律, 为大尺寸 β - γ 高 Nb-TiAl 合金的挤压工艺提供技术指导。

1 数值模拟参数

建立如图 1 所示的棒材挤压的三维有限元模型。考虑坯料为轴对称物体, 取 1/4 模型计算, 其挤压模具被视为刚体, 坯料高铌 TiAl 合金被视为刚塑性物体, 划分 8 000 个四面体单元格。

模拟所用的 β - γ 高 Nb-TiAl 合金的成分为 Ti-45Al-8.5Nb-0.2W-0.2B-0.02Y (摩尔分数, %), 其高温流变应力的本构方程为^[15]:

$$\dot{\varepsilon} = 9.59 \times 10^{15} [\sinh(0.00506\sigma)]^{3.509} \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; σ 为高温流变应力(MPa); R 为摩尔气体常数; T 为变形温度(K)。

模拟坯料的直径为 80 mm, 长度为 100 mm, 高

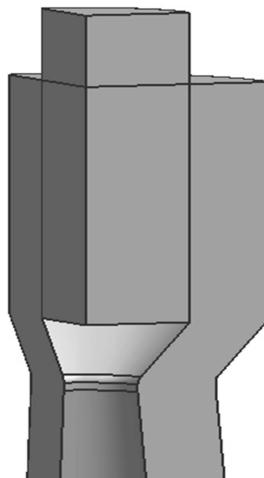


图 1 棒材挤压的三维有限元模型

Fig.1 FEM net model of bar extrusion

径比为 1.25。模锥出口处的圆角为 5 mm, 模具厚为 30 mm, 挤压温度为 1 200 ℃, 坯料和模具之间的摩擦因子为 0.3, 模拟中每步位移增量为 0.2 mm。

采用 Deform-3D 软件模拟: 当挤压比为 2, 模锥半角为 60°时, 研究大小分别为 5、10、15、20 mm/s 的挤压速度对挤压棒材内部的温度分布、变形均匀性以及损伤因子的影响规律; 挤压速度为 10 mm/s 时, 研究挤压比大小分别为 2、3、4 和模锥半角分别为 30°、40°、50°、60°对挤压棒材的变形均匀性和损伤因子的影响规律; 在挤压比为 2、3、4 的条件下, 研究模具圆角对损伤因子的影响规律。

2 模拟结果与讨论

2.1 挤压速度对高温挤压过程的影响

2.1.1 挤压速度对温度分布的影响

图 2 和表 1 所示分别为挤压比为 2、模锥半角为 60°时, 挤压速度为 5、10、15、20 mm/s 所对应的温度分布图及温度最大值与最小值列表。由图 2 和表 2 可知: 随挤压速度的增加, 棒材内部的最大温度逐渐增加至稳定值后保持不变, 最小温度先保持一段时间不变, 然后逐渐增加直至达到稳定状态。这主要是由于变形过程中上压头和模具对坯料所做的功有很大一部分转化成热, 此外, 还由于坯料和模具之间存在的摩擦能产生部分热量。

图 3 所示为在挤压比为 2、模锥半角为 60°、挤压速度为 5 mm/s 条件下挤压所得的棒材内部的径向和纵向温度分布曲线以及三维温度分布图。由图 3(a)可知: 由棒材头部至模锥附近部分, 纵向温度逐渐升高, 且温度升高的速率由慢逐渐变快再变慢, 直至温度达到稳定值; 由图 3(b)可知: 径向方向的温度由中心至棒材表面逐渐升高, 直至温度达到一稳定值后, 温度基本保持不变, 温度升高是由于变形过程中部分功转化成热; 图 3(c)清楚地显示棒材纵向及径向的温度分布情况。

挤压棒材内部温差的大小直接决定挤压后棒材组织的均匀性, 影响棒材的综合力学性能。内外温差和上下温差越小, 挤压后棒材的组织越均匀, 综合力学性能也越好。由图 3 可知, 当挤压比和模锥半角相同时, 随挤压速度的增加、棒材的变形区内的温度梯度增加, 组织均匀性降低, 模具受力增大、寿命极大减小。所以, β - γ 高 Nb-TiAl 合金棒材挤压的挤压速度不宜太大。

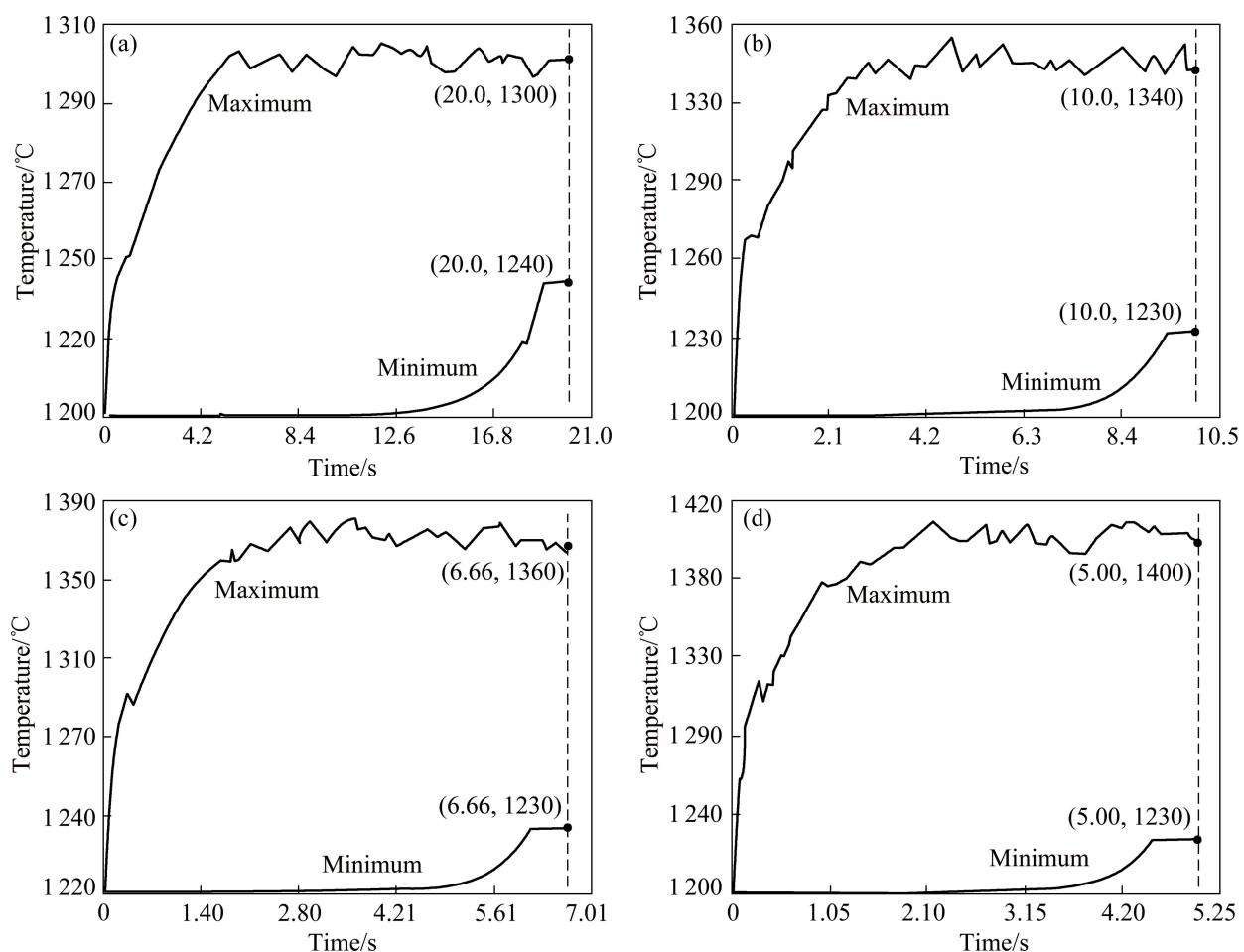


图2 在挤压比为2、模锥半角为60°，不同挤压速度下的温度分布

Fig.2 Temperature distribution of alloy at extrusion ratio of 2, die half-angle of 60° with various extrusion speeds: (a) 5 mm/s; (b) 10 mm/s; (c) 15 mm/s; (d) 20 mm/s

表1 在挤压比为2、模锥半角为60°不同挤压速度下，温度最大值与最小值

Table 1 Temperature values of maximum and minimum at extrusion ratio 2, die half-angle and various extrusion rate

Extrusion speed/(mm·s ⁻¹)	Maximum temperature/°C	Minimum temperature/°C
5	1 300	1 240
10	1 340	1 230
15	1 360	1 230
20	1 400	1 230

2.1.2 挤压速度对变形均匀性的影响

坯料变形的均匀性直接决定晶粒尺寸的均匀程度，影响坯料的表面断裂和内部缺陷。变形均匀性越好，变形后组织越均匀，综合力学性能越好，因此坯料变形必须尽量均匀。金属变形均匀性可用变形均匀性系数 ψ 来表示，变形均匀性系数越小，变形越均匀，

变形后坯料的性能越好。为反映挤压工艺参数对变形均匀性的影响，结合式(2)计算不同挤压速度条件下的变形均匀性系数^[16]，如下所示：

$$\psi = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： ψ 为变形均匀性系数； ε_{\max} 和 ε_{\min} 分别为最大和最小等效应变值。

由图4可见，在挤压比为2、模锥半角为60°的条件下，当挤压速度由5 mm/s增加到20 mm/s时，变形均匀性系数 ψ 的值基本上一致，这表明挤压速度对挤压棒材的变形均匀性基本不影响。

2.1.3 挤压速度对损伤因子的影响

金属材料的韧性损伤是反映材料在塑性变形程中断裂倾向的物理量。根据相应的断裂准则，当材料损伤值达到临界损伤值时，材料发生断裂或产生裂纹。因此，材料的损伤值越小，在变形过程中越不易产生裂纹，疲劳寿命越长。

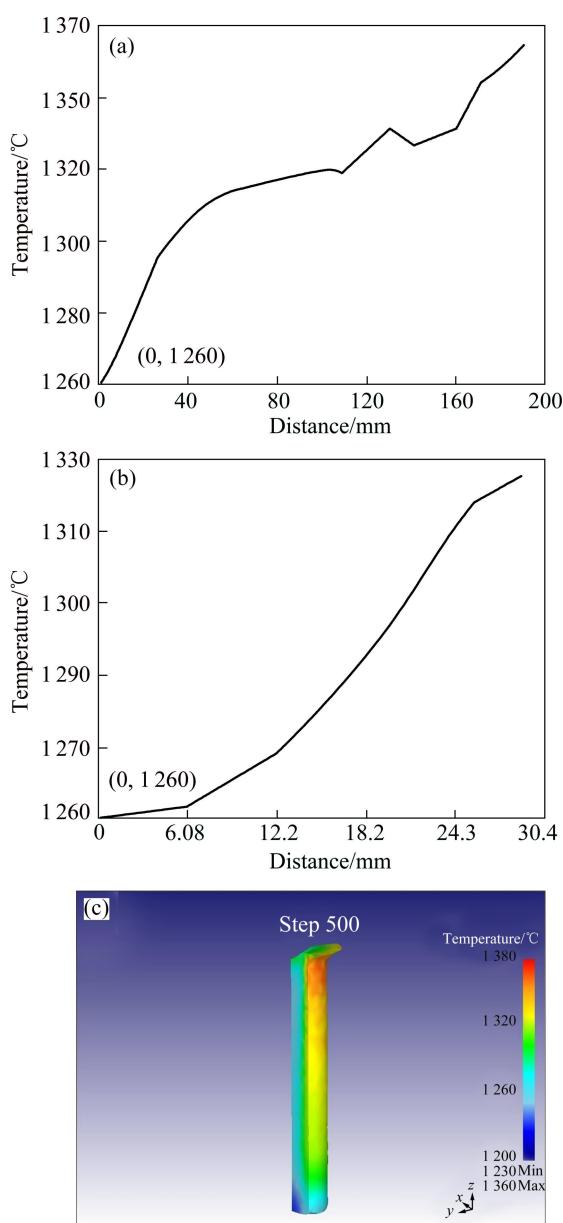


图3 在挤压比为2、模锥半角为60°、挤压速度为5 mm/s条件下的温度分布

Fig.3 Temperature distribution at extrusion ratio of 2, die half-angle of 60° and extrusion speed of 5 mm/s: (a) Longitudinal temperature distribution; (b) Radial temperature distribution; (c) Three-dimensional temperature field

挤压速度对损伤因子的影响如图5所示:在棒材挤压过程中,随挤压速度的增加,损伤因子先减小又逐渐增加,当挤压速度为10 mm/s时,挤压棒材的损伤因子最小。这是因为初始阶段挤压速度小,棒材外侧温度较低,应力值大导致损伤因子较大;而后随挤压速度的增加,棒材外侧的温度升高,且温差不大,棒材本身的部分微裂纹在三向压应力作用下消失,应力值和损伤因子都得到下降;随挤压速度的继续增加,

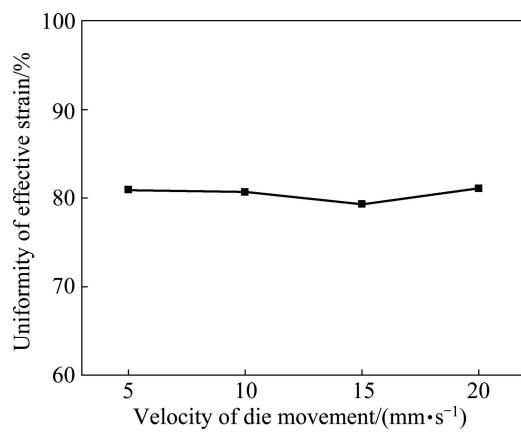


图4 挤压速度与变形均匀性的关系

Fig.4 Relationship between extrusion speed and deformation uniformity

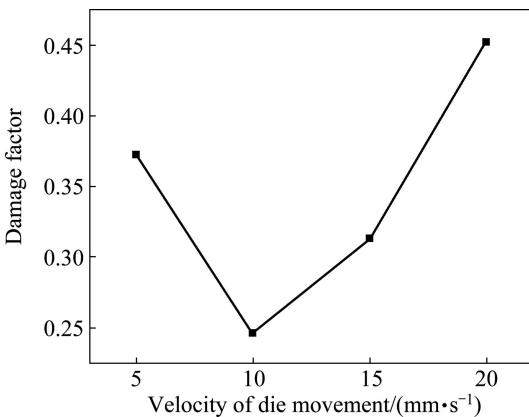


图5 挤压速度与损伤因子的关系

Fig.5 Relationship between extrusion speed and damage factor

棒材内部的纵向和径向的温差开始增大(图3),棒材组织不均匀,综合力学性能下降,导致损伤因子增加。

综合考虑挤压速度对挤压棒材变形区内的温度梯度分布、变形组织均匀性及损伤因子的影响规律, β - γ 高Nb-TiAl合金棒材挤压的挤压速度值取10 mm/s比较合适。

2.2 挤压比和模锥半角对挤压过程的影响

2.2.1 挤压比和模锥半角对变形均匀性的影响

挤压比和模锥半角是重要的挤压工艺参数,挤压比直接决定挤压后棒材尺寸,模锥半角的选取直接影响挤压工件内部和外观质量。挤压比的定义式为

$$R = \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 / \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 \quad (3)$$

式中: D_i 为坯料初始直径值; D_f 为挤压后棒材直径。

图6所示为挤压速度10 mm/s时，挤压比(2、3、4)和模锥半角(30° 、 40° 、 50° 、 60°)对变形均匀性系数的影响规律曲线。由图6可见，当挤压比相同时，随模锥半角的增加，变形均匀性系数 ψ 逐渐增大，这表明随模锥半角的增加，棒材的变形均匀性降低；当模锥半角相同时，变形均匀性系数 ψ 随挤压比的增加而减小，这表明棒材的变形均匀性随挤压比的增加而提高。

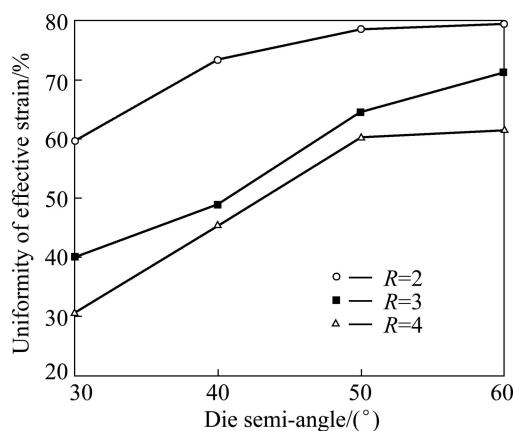


图6 挤压比和模锥半角对变形均匀性的影响曲线

Fig.6 Effect of extrusion ratio and die half-angle on deformation uniformity

图7所示为挤压速度10 mm/s，挤压比 R 为4，模锥半角 α 分别为 30° 、 40° 、 50° 、 60° 的棒材挤压过程中的等效应变分布图。由图可见，在挤压速度一定时，随模锥半角的增大，棒材内部的等效应变梯度逐渐增加。

2.2.2 挤压比和模锥半角对损伤因子的影响

图8所示为挤压速度10 mm/s时，挤压比和模锥半角对损伤值的影响曲线图。如图8所示，当模锥半角相同时，损伤因子随挤压比的增大而增大；当挤压比相同时，随模锥半角的增加，损伤因子增加。在实际挤压过程中，过小的挤压比，致使材料挤压不充分，变形均匀性降低；过小的模锥半角会使棒材顶部未发生挤压的部分增大，这既浪费材料，又导致组织不均匀，影响综合力学性能，因此挤压比和模锥半角的选取不宜过大或过小。综合考虑， β - γ 高Nb-TiAl合金在挤压速度一定时，挤压比取3，模锥半角取 30° 比较合适。

2.3 模具圆角对挤压过程的影响

模具圆角是影响模具使用寿命的重要因素。表2为不同挤压比下，模具圆角对损伤因子的影响情况。

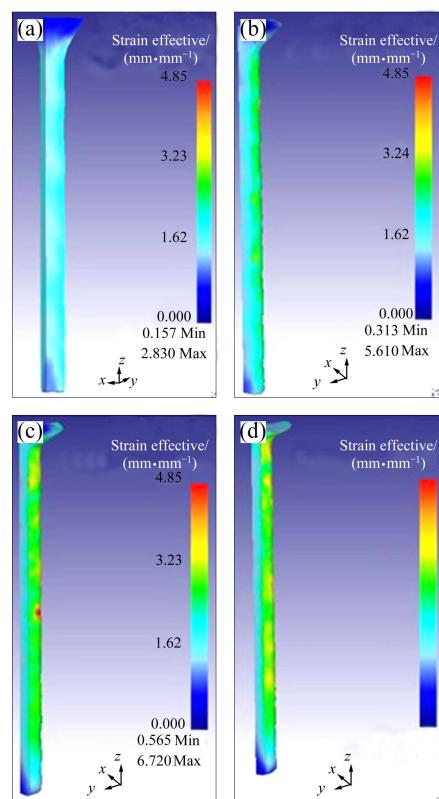


图7 在挤压速度为10 mm/s、挤压比为4和不同的模锥半角下的等效应变场分布

Fig.7 Effective strain distribution of alloy at extrusion speed 10 mm/s, extrusion ratio 4 and different die half-angle: (a) $\alpha=30^\circ$; (b) $\alpha=40^\circ$; (c) $\alpha=50^\circ$; (d) $\alpha=60^\circ$

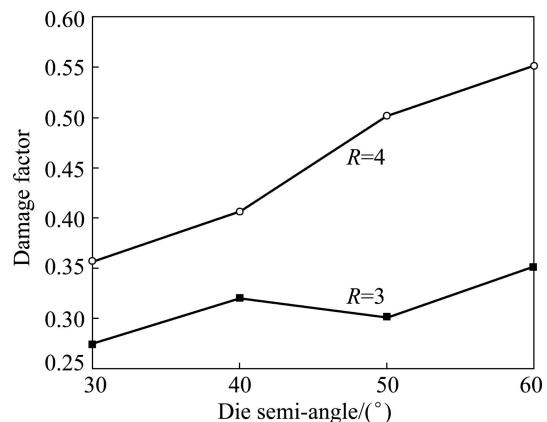


图8 挤压比和模锥半角对损伤因子的影响曲线

Fig.8 Influence of extrusion ratio and die half-angle on damage factor

由表2可知，有模具圆角(半径为5 mm)的棒材挤压后的损伤因子小于没有模具圆角的损伤因子，这是因为模具圆角可以降低棱边处的应力集中。因此，模具圆角不仅能减小棱边处的应力集中、延长模具使用寿命，还能减小损伤值、降低裂纹产生的风险。

表2 不同挤压比下模具圆角对损伤因子的影响**Table 2** Effect of die fillet on damage factor with various extrusion ratios

Extrusion ratio	Damage factor with die fillet	Damage factor without die fillet
2	0.212	0.256
3	0.274	0.333
4	0.357	0.369

3 结论

1) 当挤压比和模锥半角相同时, 随挤压速度的增加, β - γ 高Nb-TiAl合金棒材变形区内的温度梯度增加, 组织均匀性降低。挤压速度对棒材的变形均匀性影响不大。当挤压速度为10 mm/s时, 棒材的损伤因子最小。

2) 在挤压速度一定的条件下, 当挤压比相同时, 随模锥半角的增加, 棒材的变形均匀性降低, 损伤因子增加; 当模锥半角相同时, 棒材的变形均匀性随挤压比的增加而提高, 损伤因子随挤压比的增加而增加。 β - γ 高Nb-TiAl合金的挤压比取3, 模锥半角取30°较合适。

3) 模具圆角不仅有益于减小棱边处的应力集中、延长模具使用寿命, 还有助于减小棒材的损伤值、抑制裂纹的产生。

REFERENCES

- [1] KIM Y W, DIMIDUK D M. Progress in the understanding of gamma titanium aluminides[J]. *JOM*, 1991, 43(8): 40–47.
- [2] APPEL F, PAUL D H, OEHRING M, CLEMENS H, FISCHER F D. Physical metallurgy of high Nb containing TiAl alloys[J]. *Metallkunde*, 2004, 95(7): 585–591.
- [3] LIU Z C, LIN J P, LI S J, CHENG G L. Effect of Nb and Al on the microstructures and mechanical properties of high Nb containing TiAl based alloys[J]. *Intermetallics*, 2002, 10(7): 653–659.
- [4] KIM Y W. Ordered intermetallic alloys, Part III: Gamma titanium aluminides[J]. *JOM*, 1994, 46(7): 30–39.
- [5] WU X H. Review of alloy and process development of TiAl alloys[J]. *Intermetallics*, 2006, 14(10/11): 1114–1122.
- [6] KIM Y W. Wrought TiAl alloy design[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1999, 9(1): 298–308.
- [7] 孔凡涛, 陈子勇, 田竟, 陈玉勇. 提高TiAl基合金室温塑性的方法[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(2): 81–86.
- [8] LIU C T, MAZIASZ P J. Microstructural control and mechanical properties of dual-phase TiAl alloys[J]. *Intermetallics*, 1998, 6(7/8): 653–661.
- [9] KIM Y W. Microstructural evolution and mechanical properties of a forged gamma titanium aluminide alloy[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1992, 40(6): 1121–1134.
- [10] 苏喜孔, 李树索, 韩雅芳, 李臻熙, 徐向俊, 徐丽华, 林均品, 陈国良. 热锻开坯对高铌TiAl合金微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1410–1414.
- [11] SU Xi-kong, LI Shu-suo, HAN Ya-fang, LI Zhen-xi, XU Xiang-jun, XU Li-hua, LIN Jun-pin, CHEN Guo-liang. Effect of hot forging on microstructure of TiAl alloy containing high Nb[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(8): 1410–1414.
- [12] 刘咏, 黄伯云, 周科朝, 贺跃辉, 韦伟峰. TiAl基合金包套锻造工艺[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(增刊1): 6–9.
- [13] LIU Yong, HUANG Bo-yun, ZHOU Ke-chao, HE Yue-hui, WEI Wei-feng. Canned forging process of TiAl alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(suppl 1): 6–9.
- [14] 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, 2002.
- [15] XIE Jian-xin, LIU Jing-an. *The theory and technology of metal extrusion*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [16] 陈玉勇, 张树志, 孔凡涛, 刘祖岩, 林均品. 新型 β - γ TiAl合金的研究进展[J]. 稀有金属, 2012, 36(1): 154–160.
- [17] CHEN Yu-yong, ZHANG Shu-zhi, KONG Fan-tao, LIU Zu-yan, LIN Jun-pin. Progress in β -Solidifying γ -TiAl based alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2012, 36(1): 154–160.
- [18] 高帆, 王新英, 王磊, 张继. VAR制备TiAl合金铸锭的高温本构模型及挤压过程的数值模拟[J]. 金属铸锻焊技术, 2010, 39(21): 34–37.
- [19] GAO Fan, WANG Xin-ying, WANG Lei, ZHANG Ji. Simulation on hot extrusion process for φ 220mm TiAl ingot produced by VAR[J]. *Casting, Forging, Welding*, 2010, 39(21): 34–37.
- [20] 王凤, 徐向俊, 林均品, 叶丰, 王艳丽, 王兴, 陈国良. 铸造高铌TiAl合金的热变形能力研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 1025–1028.
- [21] WANG Feng, XU Xiang-jun, LIN Jun-pin, YE Feng, WANG Yan-li, WANG Xing, CHEN Guo-liang. Hot deformation behavior of as-cast TiAl alloy containing high niobium[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(6): 1025–1028.
- [22] 张伟. 粉末冶金TiAl基合金的热加工行为及工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [23] ZHANG Wei. *Hot deformation behavior and technology of PM TiAl based alloy*[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [24] LIU Z C, LIN J P, LI S J, CHENG G L. Effect of Nb and Al on the microstructures and mechanical properties of high Nb containing TiAl based alloys[J]. *Intermetallics*, 2002, 10(7): 653–659.

(编辑 王超)