

镁合金 AZ31B 直齿锥齿轮热锻成形研究

刘娟, 崔振山

(上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030)

摘要: 根据镁合金 AZ31B 的高温流动应力曲线,建立了包含应变的三维加工图,反映了温度、应变和应变速率对功率耗散系数和流变失稳区的影响,确定了合适的热变形范围,即温度为 250325 °C、应变速率为 0.11 s⁻¹。在此基础上,研究了镁合金直齿锥齿轮的锻造成形,制定了无齿形预锻和终锻两步等温锻造工艺,在 MSC. Marc 平台上进行了锻造过程的模拟,基于模拟结果,完成了镁合金直齿锥齿轮的锻造成形实验。

关键词: 镁合金 AZ31B; 热锻成形; 三维加工图; 直齿锥齿轮

中图分类号: TG113.26 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2009)01-0066-04

Hot Forging Deformation of Magnesium Alloys AZ31B Spur Bevel Gear

LIU Juan, CUI Zhen-shan

(National Die and Mold CAD Eng. Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Three-dimensional processing maps including strain were built according to the flow stress curves of magnesium alloy AZ31B. The three-dimensional processing maps demonstrate the variations of the efficiency of power dissipation and flow instability domains with temperature, strain rate and strain, through which the most favorite deformation domain—the temperature range of 250325 °C and the strain rate range of 0.11 s⁻¹ was obtained. On the basis of these results, the two-stage isothermal forming process (preforming operation without gear shape and finish forging operation) of magnesium alloy spur bevel gear was determined. The hot forging process was simulated by the commercial finite element analysis software MSC. Marc. According to the numerical simulation results, the hot forging experiments of magnesium alloy AZ31B spur bevel gear were successfully conducted.

Key words: magnesium alloy AZ31B; hot forging process; 3D processing map; spur bevel gear

镁合金具有低的密度、高的比强度和比刚度,优良的阻尼减震性和电磁屏蔽性,被认为是具有前景的工业轻金属材料。由于具有的密排六方晶体结构,镁合金在室温下难以发生塑性变形,高温下又易发生晶粒粗大和表面氧化^[1]。当前的镁合金产品以铸件,特别是压铸件居多,塑性加工产品极少。由于铸件的力学性能较差、易产生缺陷,而变形镁合金组织细小均匀、综合机械性能好,因而镁合金塑性变

形技术具有重要的研究价值。目前国内外对镁合金塑性成形技术的研究,主要是集中在挤压、轧制和超塑性变形等。由于镁合金锻造的难度较大,对温度和应变速率敏感,除小阪田实验室^[2]对镁合金 ZK60 作了锻粗实验研究,谷池茂弘^[3]对镁-重稀土合金 (Mg-10% Gd (Dy) -4%) Nd-Zr 的锻造性,刑劫^[4]等对镁合金 AZ31 的低温多向锻造,吕炎^[5-6]等对等温锻造制备镁合金 MB15 飞机上机匣进行了研究外,

收稿日期: 2009-04-20

作者简介: 刘娟(1976-),女,河南南阳人,讲师,博士,主要研究方向为材料加工过程中的数值模拟技术。

镁合金锻造成形的研究相对较少。

为了研究镁合金可锻性,文中以直齿锥齿轮为例,进行了镁合金 AZ31B 的高温成形性能研究,为评价镁合金热变形的稳定性,建立了包含应变的三维加工图,确定了合适的热变形工艺参数范围,并结合有限元模拟对热锻过程进行了研究和直齿锥齿轮锻造实验。

1 材料实验结果及分析

在 Gleeble-1500 热模拟试验机上,进行了直径为 10 mm,高度为 15 mm 的圆柱体轴对称压缩变形,其应变速率为 0.001,0.01,0.1,1 s^{-1} ,温度为 250,300,350,400 $^{\circ}\text{C}$ 。不同温度和应变速率下的流动应力曲线如图 1 所示^[7]。

由图 1 可看出:在变形开始阶段,加工硬化占主导地位,镁合金的流动应力急剧增加到某个峰值;当变形大于峰值应变,动态再结晶引起的软化效果大于加工硬化引起的强化效果,流动应力随应变的增加而下降;随着应变的增加,当软化与硬化相互平衡,流动应力呈现稳态。该曲线属于典型的动态再结晶型材料流动应力曲线。

2 三维加工图及分析

Prasad^[8-9]等提出的基于动态材料模型 (Dynamic Material Model, DMM) 的加工图是变形温度和应变速率空间上功率耗散图与失稳图的叠加。其中功率耗散图代表材料显微组织改变时功率的耗散,反映了不同微观演化机制的变形特征;失稳图基于不可逆热力学极值原理,描绘了加工过程中应该避免的塑性流变失稳区域。通过加工图可得到优化的可加工温度和应变速率。由于传统的加工图不包括

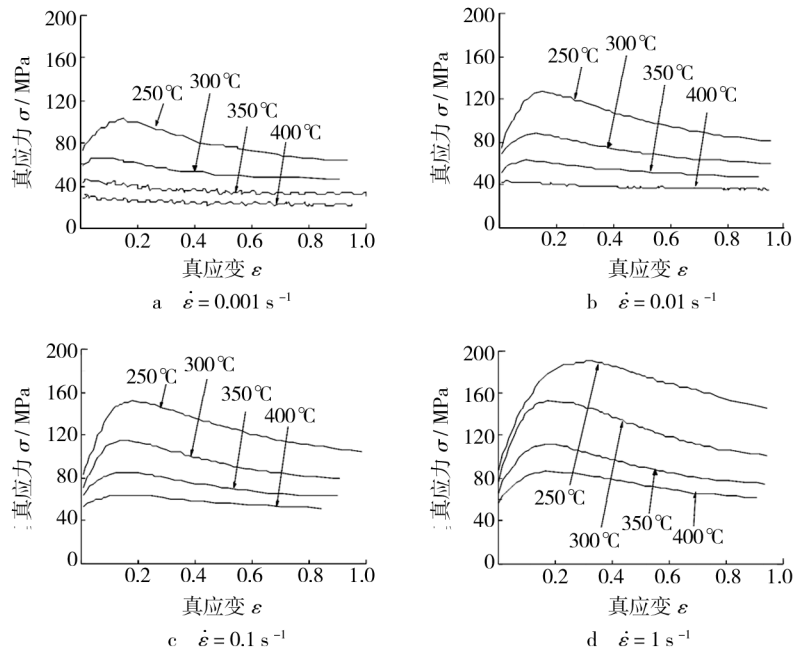


图 1 镁合金 AZ31B 的流动应力曲线

Fig. 1 The flow stress curves of magnesium alloy AZ31B

应变,无法表示具有应变软化效应的材料,如镁合金对应变的敏感性。根据图 1 所示的镁合金高温流动应力曲线,建立了包含应变的三维加工图,如图 2 所示,三维加工图反映了温度、应变速率和应变对材料可加工性的影响^[10]。

图 2a 的三维功率耗散图中,具有不同颜色的网格点表示了各点的功率耗散系数的百分数。图 2b 的三维失稳图中,白色区域为安全区,灰色区域为失稳区。根据图 2 可以得到,流变失稳区集中在温度 350~400 $^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 0.1~1 s^{-1} 、应变大于 0.4 的区域,并随着应变、应变速率和温度的增加,失稳区逐渐增大,此区域是需要避免的危险区。温度为

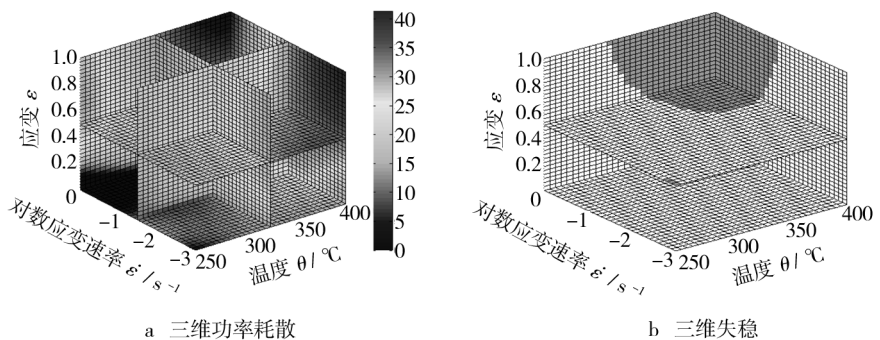


图 2 镁合金 AZ31B 的三维加工

Fig. 2 The three-dimensional processing maps of magnesium alloy AZ31B

250 ~ 325 °C、应变速率为 $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 的功率耗散峰值区,发生了动态再结晶,是最适合的热加工区^[10]。

3 热锻数值模拟及实验

以轿车直齿锥齿轮为例,采用标准化的参数,齿数为10,模数为4,压力角为20°,其余齿形参数如图3c所示。由于镁合金对应变速率和温度敏感,锻造

温度范围比较窄,随着应变速率的增加,其塑性急剧下降;同时镁合金的粘性很大、导热系数高,为了提高锻造时的流动性,模具必须预热,因此镁合金AZ31B的直齿锥齿轮锻造选用等温锻造。考虑到实验的目的在于研究镁合金的可锻性,而非实际生产,锥齿轮的锻造成形选用既有较好的齿形填充、又有较低成本的、无齿形预锻和终锻两步成形方案,如图3所示。

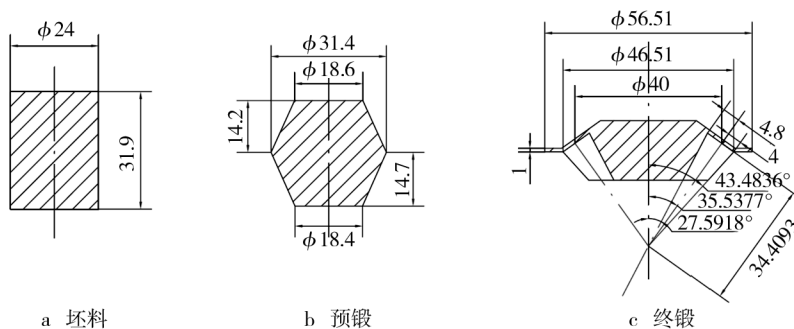


图3 镁合金直齿锥齿轮锻造方案

Fig.3 Schematic for hot forging process of magnesium alloy spur bevel gear

基于 MSC. Marc 软件平台,进行了不同变形条件下的锻造过程数值模拟,为了提高计算效率,预锻变形简化为二维轴对称模拟,终锻变形采用三维模拟,由于对称性,仅分析1/10模型。具体参数为:密度为 1780 kg/m^3 ,比热和热传导系数参照文献[1],试样与空气的换热系数为 $20 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$,试样与模具的换热系数为 $11000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$ 。以坯料温度为300 °C,预锻模具温度为275 °C,预锻件加热温度为290 °C,预锻模具温度为275 °C,变形速率为0.5 mm/s为例,其等效应变和温度分布如图4,5所示。由图4可知,预锻后,坯料与模壁先接触的位置等效应变较高,其它部位较低;终锻后,高等效应变区集中在大端齿根区域。由图5可知,预锻后,坯料的端部由于与模壁接触时间较长温度最低,锻件中部温度较高;终锻后,飞边处和小端齿顶位置由于变形热效应,温度相对其他部分较高。

在此基础上,进行了模具设计和热锻实验。具体锻造工艺如下。

- 1) 下料:采用挤压毛坯,其尺寸为 $\phi 24 \text{ mm} \times 31.9 \text{ mm}$;
- 2) 预锻模加热:温度为275 °C;
- 3) 坯料加热:加热温度为300 °C,保温15 min;
- 4) 预锻成形:以0.5 mm/s的恒定速度预锻;

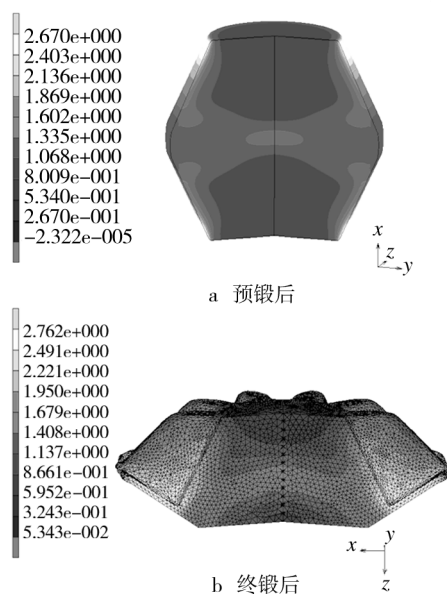


图4 等效应变分布

Fig.4 Distribution of equivalent strain after preforming and finish forging

- 5) 终锻模加热:加热温度为265 °C;
- 6) 预锻件加热:加热到290 °C并保温15 min;
- 7) 终锻成形:以0.5 mm/s的恒定速度终锻,变形后迅速水冷以保存高温组织。锻造过程的润滑剂为水剂石墨。图6,7分别为镁合金AZ31B的热锻

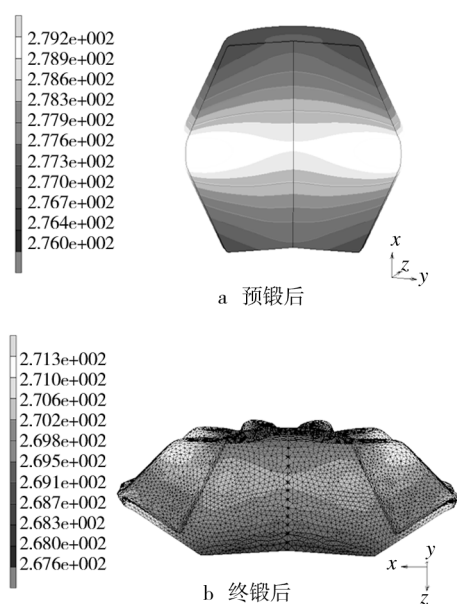


图5 温度场分布

Fig. 5 Distribution of temperature after preforming and finish forging

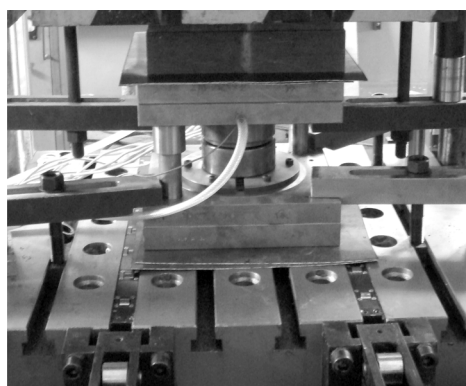


图6 镁合金直齿锥齿轮热锻实验模具

Fig. 6 Experiment dies for hot forging of magnesium alloy spur bevel gear



图7 坯料、预锻件、终锻件

Fig. 7 Billet, preforming part and finish forging part

实验模具及热锻锥齿轮的坯料、预锻件和终锻件的外观。

4 结论

根据镁合金 AZ31B 的三维加工图,确定了合适的加工区域即温度为 250325 ℃、应变速率为 0.010. 1 s⁻¹。基于镁合金的特性,制定了直齿锥齿轮无齿形预锻和终锻两步等温锻造的成形方案,并模拟了热锻变形过程,成功完成了热锻成形实验。

参考文献:

- [1] AVEDESIAN M M, BAKER H. ASM Specialty Handbook Magnesium and Magnesium Alloys[M]. United States of America: ASM International, 1999:3-11.
- [2] OGAWA N, SHIOMI M, OSAKADA K. Forming Limit of Magnesium Alloy at Elevated Temperatures for Precision Forging[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42:607-614.
- [3] 谷池茂弘, 北口豊, 鎌土重晴ら. マグネシウム-重希土類元素合金の高温变形特性および鍛造材の时效特性引張特性[J]. 軽金属, 1997, 47(5):261-266.
- [4] 刑劫, 惣田裕司, 杨統耀ら. AZ31マグネシウムの降温中多軸鍛造による微細粒組織の生成[J]. 軽金属, 2004, 54(11):527-531.
- [5] SHAN D B, XU W C, LU Y. Study on Precision Forging Technology for a Complex-shaped Light Alloy Forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151:289-293.
- [6] 吕炎, 徐福昌, 薛克敏, 等. 镁合金上机匣等温精锻工艺的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4):127-129.
- [7] 张先宏, 崔振山, 阮雪榆. 镁合金塑性成形技术——AZ31B 成形性能及流变应力[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(12):1874-1877.
- [8] SIVAKESAVAM O, PRASAD Y V R K. Hot Deformation Behavior of As-cast Mg-2Zn-1Mn Alloy in Compression a Study with Processing Map[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 362:118-124.
- [9] PRASAD Y V R K. Processing Maps: a Status Report [J]. Journal of Engineering and Performance, 2003, 12:638-645.
- [10] LIU Juan, CUI Zhen-shan, LI Cong-xin. Analysis of Metal Workability by Integration of FEM and 3-D Processing Maps[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1-3), 497-505.