

铝硅合金轧制中增强体颗粒 应力集中数值模拟

Numerical Simulation of Reinforced Particle
Stress Concentration in Al-Si Alloy Rolling

赵彦玲, 周 凯, 车万博, 铉佳平, 车春雨

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

ZHAO Yan-ling, ZHOU Kai, CHE Wan-bo, XUAN Jia-ping, CHE Chun-yu

(School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science
and Technology, Harbin 150080, China)

摘要: 针对铝硅合金轧制过程中, 硅晶粒相对铝基体变形抗力大产生应力集中的问题。利用有限元方法, 建立了针对轧制过程中增强体颗粒的有限元模型, 研究了硅晶粒及铝基体应力、应变云图及曲线。解决了普通实验无法定量分析轧制过程中增强体颗粒受力的问题。结果表明: 临近晶粒处铝基体应变值大于其他部位铝基体且远大于硅晶粒处应变, 说明在晶粒处有金属堆积现象; 晶粒处应力值大于铝基体, 说明由于晶粒附近的金属堆积, 导致应力集中现象的产生。模拟结束后, 通过扫描电镜观察拉伸试样断口形貌及能谱分析间接验证数值模拟方法的可行性和模拟结果的正确性。

关键词: 铝硅合金; 增强体颗粒; 金属堆积; 应力集中; 数值模拟

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.03.010

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)03-0051-04

Abstract: In the rolling process of aluminum-silicon alloy, there was a problem of silicon grains stress concentration which results from the deformation resistance of silicon grain was bigger than aluminum matrix. Aiming at this problem, the finite element model of reinforcement particles is established in rolling and the stress and strain contours and curves of silicon grains and aluminum body are researched by the finite element procedures. The problem that the stress of reinforcement particles in rolling process can not be analyzed quantitatively by ordinary experiment is also solved. The results show that the strain of the aluminum matrix near the grains is greater than other parts of the Al matrix and far greater than the strain of silicon grain, which indicates the metal accumulation phenomenon appeared on the grains. The stress value of silicon grain is greater than aluminum matrix, which indicates stress concentration phenomenon appeared because of the accumulation of the metal near the grains. After the simulation, the feasibility of numerical simulation method and the accuracy of simulation results can be validated indirectly by the method of observing the feature of tensile fracture with the electron microscopy and analyze the energy spectrum.

Key words: aluminum-silicon alloy; reinforcement particle; metal accumulation; stress concentration; numerical simulation

铝硅合金因其具有良好的力学性能和较高的耐磨性, 在许多场合已成功取代铜合金制作轴承、轴瓦等耐磨件^[1,2]。因此, 颗粒增强体金属基复合材料已成为近年来复合材料开发研究的热点^[3]。应用有限元方法模拟塑性成形方面, 白桦等^[4,5]利用 DEFORM 软件对棒材热轧过程进行数值模拟分析材料缺陷, 预测普通棒材加工缺陷。晏义伍^[6,7]等人利用 ANSYS 软件分析了挤压过程中不同尺寸^[8-11]的增强体颗粒对复合

材料性能的影响规律, 但是增强体颗粒与基体之间接触关系设定不是很完美。Shivpuri R. 等^[12,13]采用二维刚塑性有限元法与工程法相结合的方法模拟了方-椭圆、圆-椭圆孔型中方轧件的轧制变形。陈仙凤^[14]利用 DEFORM 对板材热轧进行了数值模拟研究。吕日松等^[15]对利用有限元方法对金属塑性成形的缺陷进行了数值模拟预测研究。

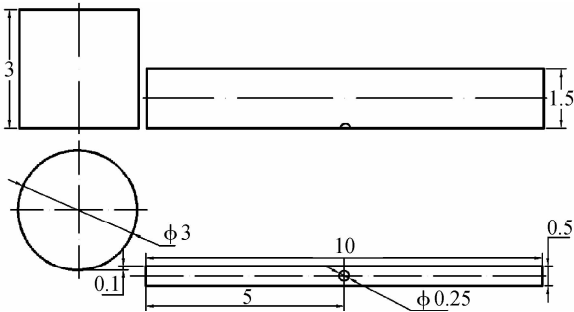
然而针对轧制过程中增强体颗粒的研究国内相关

有限元分析及模拟很少见到,而且普通实验无法定量分析增强体颗粒在轧制加工过程中的受力情况,致使实际工厂轧制中,很多工艺参数难以准确定量,需要根据现场设备、质量、生产效率等情况不断摸索^[16],造成生产成本的增加。基于以上背景,本工作利用有限元方法定量分析应力集中现象,为后续轧制工艺参数的优化奠定基础。

1 实验方案

1.1 有限元建模

Deform-3D 自身没有建模的功能,但是它有良好的接口,可以把多种 CAD 软件建立的模型调入前处理。并对调入的模型进行位置、条件的设置,完成模拟分析工作^[17]。本工作利用 UG 软件进行建模、装配。本次模拟以 1400 冷轧机为模型进行三维建模,为了突出硅晶粒应力集中现象,轧制板材选取为铝箔,同时为分析效果明显,将颗粒放大,相应的将轧辊放小,轧辊直径为 3mm;轧件尺寸参数为:宽 1.5mm,长 10mm,轧前厚 0.5mm;晶粒直径 0.25mm。轧制过程中,同一机组的上下两个轧辊的辊径、转速相同,两轧辊完全对称且均为主动辊,轧辊视为刚性辊,在模拟中忽略轧辊的弯曲和压扁。为减少计算时间^[18],模型建立为整体模型的 1/4。板带及轧辊二维模型如图 1 所示。



2 结果与讨论

2.1 模拟结果分析

有限元分析完成后进入后处理模块。利用点跟踪功能分别在硅晶粒和铝基体上拾取数据点,分析这三个点在整个轧制过程中应力、应变等数据。

2.1.1 硅晶粒及板带应变分析

在模型上取三个点,分别为 P_1 :硅晶粒上; P_2 :铝基体临近晶粒处; P_3 :铝基体普通区域。取点及应力分析云图见图 3。由应力云图 3 可以看出临近硅晶粒处应变值大于其他区域。由应变曲线图 4 分析得出:在 P_1 处最大应变 0.0136; P_2 处最大应变 0.285; P_3 处最大应变 0.361。应变差值分别为 P_1, P_2 点差值 0.2714; P_1, P_3 点差值为 0.3474。因此分析结果表由于硅晶粒脆硬、变形抗力大,硅晶粒几乎没有应变,而铝基体应变值很大,变形铝基体在未变形硅晶粒处受阻,导致硅晶粒处产生金属堆积现象。致使硅晶粒周围铝基体应变值明显大于其他区域。

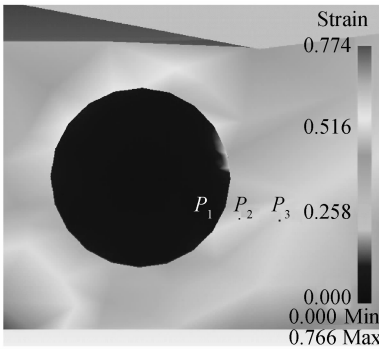


图 3 硅晶粒和铝基体取点及应变云图

Fig. 3 Taking point and strain cloud of silicon grains and Al matrix

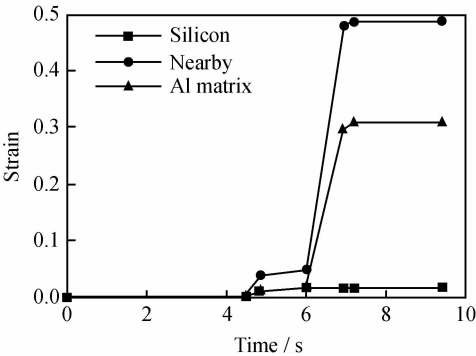


图 4 硅晶粒和铝基体应变曲线

Fig. 4 Strain curves of silicon grains and Al matrix

2.1.2 硅晶粒及板带应力分析

再次利用点跟踪功能分析出所选取三点应变云图

及应变曲线。从应力云图 5 可以看出硅晶粒应力值明显大于周围铝基体。由应力曲线图 6 也可以看出,硅晶粒处 P_1 点在轧制咬入变形阶段达到应力最大值 132MPa,而同一时刻 P_2, P_3 点应力最大值只有 12.3MPa 和 11.3MPa,应力值相差分别为 119.7MPa 和 120.7MPa。具体数据对比如表 2。模拟结果表明由于金属堆积导致硅晶粒处产生应力集中现象。在脆性情况下,断裂应力与屈服强度相等^[19]。当应力值达到硅晶粒屈服强度时,硅晶粒破碎形成裂纹源,在后续的轧制加工中裂纹扩展导致裂边、断带等缺陷的产生。

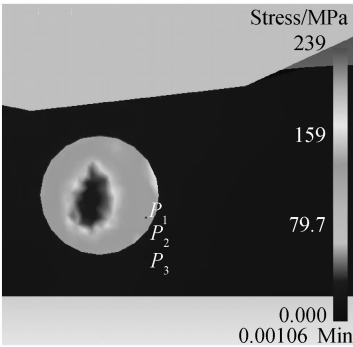


图 5 硅晶粒和铝基体上取点及应力云图

Fig. 5 Taking point and stress cloud of silicon grains and Al matrix

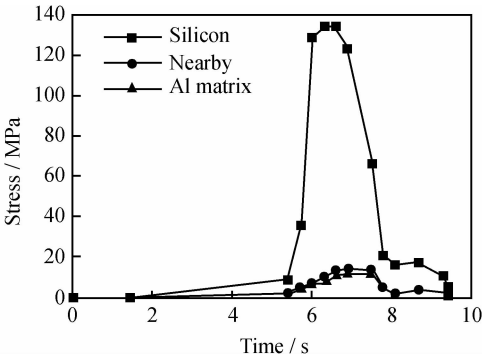


图 6 硅晶粒和铝基体应力曲线图

Fig. 6 Stress curves of silicon grains and Al matrix

表 2 P_1, P_2, P_3 各点应力和应变对照表

Table 2 Comparison of strain and stress for point of P_1, P_2 and P_3

	P_1	P_2	P_3	$P_1 - P_2$	$P_1 - P_3$
Stress/MPa	132	12.3	11.3	119.7	120.7
Strain	0.0136	0.285	0.361	-0.2714	-0.3474

2.2 实验验证

利用扫描电镜对拉伸实验断口进行分析间接验证本次模拟的正确性,并利用能谱分析确定选取部位成分。由图7拉伸试样脆性断裂面的形貌可以看出,在

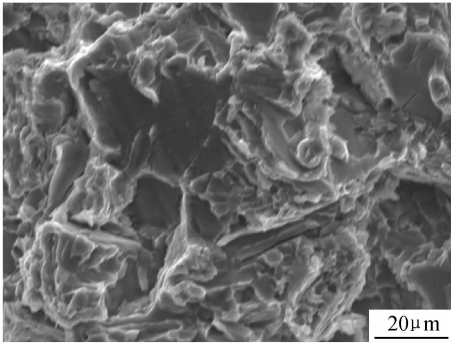


图 7 试样脆性断裂面的形貌

Fig. 7 Plastic fractures of specimen

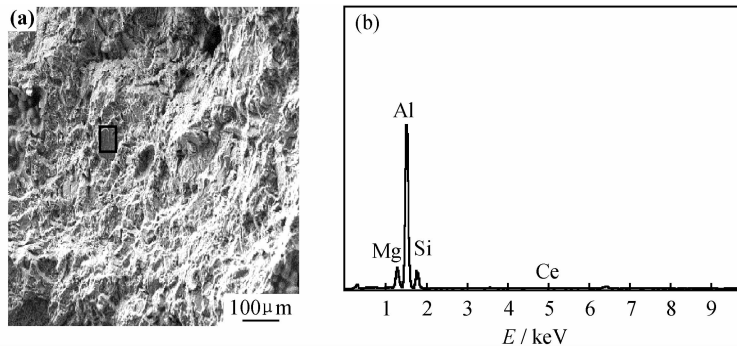


图 8 试样断裂面的 SEM 形貌图(a)和 EDS 分析(b)

Fig. 8 SEM fracture morphology(a) and EDS analysis(b) of specimen

3 结论

(1) 利用 Deform-3D 软件对轧制过程铝硅合金中应力集中现象进行有限元模拟, 模拟结果显示临近晶粒处铝基体应变值大于其他部位铝基体且远大于硅晶粒处应变, 说明在晶粒处有金属堆积现象; 晶粒处应力值大于铝基体, 说明由于晶粒附近的金属堆积, 导致应力集中现象的产生。

(2) 轧制模拟过程中, 铝基体与硅晶粒之间采用黏结边界条件, 不同材料分析采用的点跟踪功能以及利用实验方法验证分析结果的正确性和可行性都为以后的相关模拟分析提供了新思路和新方法。

(3) 运用有限元方法可以定量分析轧制过程中增强体颗粒的受力问题, 为后续轧制工艺参数的优化奠定基础。

参考文献

- [1] 许长林. 变质对过共晶铝硅合金中初生硅的影响及其作用机制[D]. 长春: 吉林大学, 2007. 11—12.
- [2] 赵冠中, 毛大恒, 黎正华, 等. 汽车热交换器用三层复合铝箔[J]. 现代制造工程, 2009, (11): 54—56.
- ZHAO G J, MAO D H, LI Z H, et al. Automobile transfer 3-layer composite aluminum foil[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009, (11): 54—56.

拉伸应力的作用下, 由于硅晶粒脆硬变形比铝基体小, 使脆性硅相直接承受载荷产生应力集中, 致使断面处硅晶粒不同程度的发生裂纹或破碎, 在后续加工中裂纹沿晶扩展形成裂边、断带等缺陷。从图 8 拉伸试样断面的 SEM 图和 EDS 分析可以看出, 所选部位断裂面底部富含大量硅^[20]。

根据以上两点分析, 可以认为, 轧制生产过程中, 在压应力作用下由于硅相脆硬, 变形抗力大, 导致硅晶粒附近应力集中。有限元模拟结果与实验结果一致, 验证模拟结果的正确性。

- [3] TORRALBA J M, DA COSTA C E, VELASCO F. P/M aluminum matrix composites; an overview[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(1—2): 203—206.
- [4] 白桦, 孟宪举, 陈连生, 等. 基于 DEFORM 下棒材热轧过程的数值模拟及缺陷[J]. 河北理工大学学报, 2008, 30(2): 43—44.
- BAI H, MENG X J, CHEN L S, et al. Numerical simulation and failure analysis of rod hot rolling process using DEFORM[J]. Journal of Hebei Polytechnic University, 2008, 30(2): 43—44.
- [5] 白桦. 棒材热轧过程的数值模拟及缺陷预测[D]. 唐山: 河北理工大学, 2008. 23—24.
- [6] 晏义伍. 颗粒尺寸对 SiCp/Al 复合材料性能的影响规律及其数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. 18—19.
- [7] YAN Y W, GENG L, LI A B. Effects of particle size on residual stresses of metal matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006: 1—2.
- [8] KORTHAUER M, ATAYA S, MAGD E. Effects of deformed volume, volume fraction and particle size on the deformation behaviour of W/Cu composites[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2006, 46(1): 38—45.
- [9] LEWANDOWSKI J J, LIU S, LIU C. Observation on the effects of particulate size and superposed pressure on deformation of metal matrix composites[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25(1): 21—26.
- [10] ARPON R, MOLINA M, NARCISO J. Thermal expansion behaviour of aluminium/SiC composites with bimodal particle distributions[J]. Acta Materialia, 2003, 54(11): 3145—3156.

- [5] FENG L, ZHANG Y N, XI J M, et al. A superhydrophobic state with high adhesive force [J]. *Langmuir*, 2008, 24(8): 4114—4119.
- [6] LAI Y K, GAO X F, ZHUANG H F, et al. Designing superhydrophobic porous nanostructures with tunable water adhesion [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(37): 3799—3803.
- [7] REN S L, YANG S R, ZHAO Y P, et al. Preparation and characterization of an ultrahydrophobic surface based on a stearic acid self-assembled monolayer over polyethyleneimine thin films [J]. *Surface Science*, 2003, 546(2): 64—74.
- [8] PAPARAZZO E. XPS analysis of iron aluminum oxide systems [J]. *Appl Surf Sci*, 1986, 25(1—2): 1—12.
- [9] WAGNER C D, PASSOJA D E, HILLERY H F, et al. Auger and photoelectron line energy relationship in aluminum-oxygen and silicon-oxygen compounds [J]. *J Vac Sci Technol*, 1982, 21(4): 933—944.
- [10] TADANAGA K, KATATA N, MINAMI T. Formation process of super-water-repellent Al_2O_3 coating films with high transparency by the sol-gel method [J]. *J Am Ceram Soc*, 1997, 80(12): 3213—3216.
- [11] PEELING J, HRUSKA F E, MCKINNON D M, et al. ESCA studies of the uracil base [J]. *Can J Chem*, 1978, 56(8): 2405—2411.
- [12] CHANCE J J, PURDY W C. Fabrication of carboxylic acid-terminated thin films using poly(ethyleneimine) on a gold surface

[J]. *Langmuir*, 1997, 13(16): 4487—4489.

- [13] PEEELING J, HRUSKA F E, MCLNTYRE N S. ESCA spectra and molecular charge distributions for some pyrimidine and purine bases [J]. *Can J Chem*, 1978, 56(8): 1555—1561.
- [14] SENO M, TSUCHIYA S. X-ray photoelectron spectra of palladium-ylide complexes. Bond character in dichlorobis (1,1-dimethyl-1-p-nitrobenzylamine-2-acetamide-N) palladium(II) [J]. *J Electron Spectrosc Relat Phenom*, 1976, 8(2): 165—170.
- [15] BORMASHENKO E, STEIN T, WHYMAN G, et al. Wetting properties of the multiscaled nanostructured polymer and metallic superhydrophobic surfaces [J]. *Langmuir*, 2006, 22(24): 9982—9985.
- [16] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces [J]. *Trans Soc*, 1944, 40(3): 546—551.

基金项目:国家自然科学基金(21161012); 甘肃省自然科学基金(1107RJZA184)

收稿日期:2012-01-10; **修订日期:**2012-11-05

作者简介:强小虎(1972—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事智能纳米界面材料的研究工作

通讯作者:冯利邦(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事功能界面材料的研究工作, 联系地址: 兰州市安宁西路 88 号兰州交通大学 406[#] (730070), E-mail: fenglb@mail.lzjtu.cn

(上接第 54 页)

- [11] HU M S. Some effects of particle size on the flow behavior of Al-SiC_p composites [J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1991, 25(3): 695—700.
- [12] LEE S M, SHINVPURIR. Investigation of two square-to-round multipass rolling sequences by the slab-finite element method [J]. *Int J Math Tools Manufact*, 1992, 32(3): 315—320.
- [13] SHINVPURI R, SHIN W. A methodology for rolling optimization for multipass rolling shape [J]. *Int J Math Tools Manufact*, 1992, 32(5): 671—679.
- [14] 陈仙凤. 基于 DEROM-3D 平台 1Cr13 板材热轧数值模拟研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008. 73—74.
- [15] 吕日松, 董万鹏, 陈军. 金属塑性成形缺陷的数值模拟预测研究 [J]. *模具技术*, 2003, (3): 3—4.
- LV R S, DONG W P, CHEN J. The research on numerical simulation in the prediction of metal plastic forming defects [J]. *Mould Technology*, 2003, (3): 3—4.
- [16] 陈彦博, 赵红亮, 翁康荣. 有色金属轧制技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 146—149.
- [17] 李传民, 王向丽, 闫华军, 等. 金属成形有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 89—90.

- [18] 邓少奎. 2E12 高强耐疲劳铝合金轧制工艺和疲劳性能的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007. 18—21.
- [19] 冯端. 金属物理学第二卷相变 [M]. 北京: 科学出版社, 1990. 150—152.
- [20] 游志勇, 赵浩峰, 李建春, 等. Zn-Al-Si 合金的断裂特性研究 [J]. *铸造技术*, 2009, 30(7): 892—895.
- YOU Z Y, ZHAO H F, LI J C, et al. Research on the fracture performance of Zn-Al-Si alloys [J]. *Casting Technique*, 2009, 30(7): 892—895.

基金项目:黑龙江省自然基金(E201028); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金(2011RFJGG010); 哈尔滨理工大学 2011 年研究生创新科研基金(HLG YCX2011-013)

收稿日期:2012-01-10; **修订日期:**2012-08-31

作者简介:赵彦玲(1963—), 女, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向包括铝合金轧制缺陷数值模拟研究, 机械 CAD/CAE/CAM 技术, 逆向工程技术, 超硬磨料磨具开发, 航空模具零件知识库、数据库技术等, 联系地址: 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路 52 号哈尔滨理工大学机械动力工程学院(150080), E-mail: zhaoyanling@sina.com