

## 材料分析及测试

# 铝合金的织构及测试分析研究进展

杨中玉<sup>1,2</sup>, 张津<sup>1,2</sup>, 郭学博<sup>1,2</sup>, 计鹏飞<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;

2. 北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 织构广泛存在于铝合金制品中,并影响着材料的一系列性能,包括强度、延展性、成形性和腐蚀性等。介绍了目前织构的一般测试分析方法,主要阐述了铝合金制造加工过程中产生的各种类型织构,如铸造织构、变形织构和再结晶织构等以及它们的演变规律,分析了铝合金加工工艺对材料最终的织构成分及织构强弱的影响,并揭示了厚板铝合金轧制和铝合金的搅拌摩擦焊接过程中产生的不均匀分布织构,以及其对材料性能的影响。最后介绍了铝合金织构的应用情况,并对铝合金织构的研究前景进行了展望,提出了在线织构检测技术,将是未来铝合金织构测试分析的主要发展方向之一。

**关键词:** 铝合金; 织构; 搅拌摩擦焊; 背散射电子衍射; X射线衍射

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2013.06.001

**中图分类号:** TG146.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2013)06-0001-06

## Research Progress on Aluminum Alloy Texture and Test Analysis

YANG Zhong-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin<sup>1,2</sup>, GUO Xue-bo<sup>1,2</sup>, JI Peng-fei<sup>1,2</sup>

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory for Corrosion, Erosion and Surface Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Texture widely exists in aluminum alloy products. It affects a series of properties of the material, including strength, ductility, formability and corrosion resistance, etc. In this paper, the general measuring methods of texture were introduced. Texture generated in the manufacturing of aluminum alloy such as casting texture, deformation texture and recrystallization texture, as well as their evolution were reviewed and analyzed. The processing influence on the component and intensity of final texture in aluminum alloy was analyzed. The uneven distribution of texture in thick aluminum alloy plates and friction stir welding joints, as well as its influence on the material performance were revealed. Finally, the applications and research prospect of aluminum alloy texture were outlined. It was proposed that online texture detection technology will be one of the main research directions in future research of aluminum alloy texture.

**Key words:** aluminum alloy; texture; friction stir welding; electron backscatter diffraction; X-ray diffraction

铝合金具有高比强度和良好的加工性能,在国  
民生产中占有重要的比重。现代社会发展日益需要

高性能的铝合金材料,如要求低应力的预拉伸铝板、  
低加工变形铝板和高精度的深冲铝板等。然而,在

收稿日期: 2013-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(51275037)

作者简介: 杨中玉(1988-),男,安徽阜阳人,硕士生,主要研究方向为铝合金搅拌摩擦焊残余应力的测试研究。

铝合金的制备和产品加工过程中,织构的广泛存在,妨碍了人们获得品质优良的铝合金材料和产品。

多晶材料织构的研究起始于20世纪30年代。织构是多晶材料中晶粒的一种择优取向结构,对材料的使用性能有时是有害的,有时是有益的<sup>[1]</sup>。织构影响材料的弹性模量、泊松比、强度、韧性、塑性(包括深冲性能)、电导和线膨胀系数等,并使材料呈现宏观各向异性<sup>[2-4]</sup>。此外,强织构还会影响残余应力的无损测定等<sup>[5-6]</sup>。

各国对铝合金的织构做了很多研究工作。欧美等西方国家对织构的研究时间较长,并且借助大型的中子衍射设备对材料的织构进行了精确的测试<sup>[7]</sup>,国内还没有这方面的条件。国内许多单位如北京科技大学、重庆大学、东北大学、中南大学、有色金属研究院和西南铝等都开展了铝合金织构的研究,主要集中在铝合金制造加工过程中织构的一般演变规律上。文中从织构的测试分析方法、铝合金织构的演变规律和织构的不均匀分布等方面,总结了近年来铝合金织构的研究进展,展望了铝合金织构的应用和未来研究方向。

## 1 织构测试方法

研究材料织构的技术主要有以下几种:X射线衍射或中子衍射测定宏观织构;高分辨扫描电镜的背散射电子衍射(EBSD)测量微观织构;透射电镜的电子衍射测量更为微观的晶体取向等。

X射线衍射是目前分析与研究材料织构最主要的和常用的技术手段之一。此方法统计性高,但测试精度较低,且一般的反射法只能获得不完整的内层的极图。相比X射线衍射而言,中子衍射测量织构有很高的精度,可以无损测量材料内部织构,缺点是设备庞大且昂贵。国内还没有专门应用中子衍射进行织构分析的谱仪。西南技术工程研究所研制开发了一种新型的短波长X射线衍射应力分析仪(SWXRD)<sup>[8]</sup>,具有很强的穿透性,能穿透40 mm的铝板,可以对铝合金板的内部织构进行无损测试。

EBSD技术能得到多晶体完整的取向信息,进行织构和取向差分析,在获得晶粒取向分布的同时,可以将晶体结构信息与组织形貌,如晶粒形态、相组成、晶界性质和形变等相对应,近年来得到了越来越

多的应用<sup>[9]</sup>。除了以上常用的方法测试金属材料的织构外,还可以借助特殊侵蚀剂,在样品表面侵蚀出特殊的侵蚀坑或侵蚀图案,通过光镜再确定微区内的取向<sup>[10]</sup>。超声波也可以测量材料的部分织构<sup>[11]</sup>。

近年来,为满足工业大规模连续生产在线监测与监控的需要,人们已经开始研究在线织构检测技术。由特征织构信息和相应的换算模型,计算金属板材的性能,已成为材料织构定量分析的活跃领域之一。刘涛、毛卫民<sup>[12]</sup>等人提出一种采用透射法准确快速测量AA3104热轧铝板织构的在线检测方法,但是受测试厚度等因素的限制,没有得到推广使用。目前,西南技术工程研究所、北京科技大学以及中国工程物理研究院针对西南铝业集团公司生产的铝合金板,正在进行新型在线织构检测设备的研制,以期实现对铝合金厚板不同深度的织构进行实时检测。

## 2 铝合金织构及织构演变

铝合金材料在一般的加工过程中,如铸造、热轧、冷变形、再结晶、热处理等,都会产生相应的织构,如经过轧制、拉伸和挤压等变形过程,由于塑性变形中晶粒的转动而形成变形织构,经退火处理后又形成再结晶织构,铸造和镀膜等过程也会形成特殊的择优取向<sup>[13]</sup>。不同加工过程中产生的织构又相互抑制和增强,最终产品中往往有比较复杂的织构成分。

### 2.1 铸造织构

铝合金在工业上采用的铸造工艺过程中,结晶体的热量总是从某些特定的方向散失,造成结晶体内形成了温度梯度场,使晶核的生长也具有方向性且相互平行,就形成了铸造织构。大量的研究表明,铝等立方晶系金属快速生长的晶体学方向均是 $\langle 100 \rangle$ 方向。在铝合金的铸锭中,这种织构表现为 $\{100\}$ 面平行于散热表面的纤维织构。铸态铝合金的表面主要是旋转立方织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$ ,而后在冷轧过程中转变为轧制织构<sup>[14]</sup>。

### 2.2 变形织构

在外力作用下金属材料发生塑性变形时各个晶粒的某滑移系,逐渐转到与外力相适应的方向上来

并形成择优取向,就形成了变形组织。表 1 列出了铝合金等面心立方金属中几种重要的组织组分。

表 1 面心立方金属主要组织组分

| 名称   | $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ | $\varphi_1 / (^\circ)$ | $\phi / (^\circ)$ | $\varphi_2 / (^\circ)$ |
|------|-------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| 立方   | $\{001\} \langle 100 \rangle$ | 0                      | 0                 | 0                      |
| 旋转立方 | $\{001\} \langle 110 \rangle$ | 45                     | 0                 | 0                      |
| 铜型   | $\{112\} \langle 111 \rangle$ | 90                     | 35                | 45                     |
| 黄铜   | $\{011\} \langle 211 \rangle$ | 35                     | 45                | 0                      |
| 戈斯   | $\{011\} \langle 100 \rangle$ | 0                      | 45                | 0                      |
| S    | $\{123\} \langle 634 \rangle$ | 59                     | 37                | 63                     |
| R    | $\{124\} \langle 211 \rangle$ | 57                     | 29                | 63                     |

铝合金中轧制组织是最常见的一种变形组织,主要由以下变形组织组成:黄铜组织 Brass  $\{011\} \langle 211 \rangle$ ,铜型组织 Copper  $\{112\} \langle 111 \rangle$ ,S 组织  $\{123\} \langle 634 \rangle$ 。图 1 显示了铝合金中的主要组织组分在 ODF 的 45° 截面上的位置,包括了轧制组织、再结晶组织和剪切组织等。材料中组织发展的本质取决于材料所经历的机械过程和热力学过程。形变组织的形成主要由以下几个因素所控制<sup>[15-16]</sup>:(1) 变形时的应力状态;(2) 变形量;(3) 变形晶体学;(4) 变形温度。

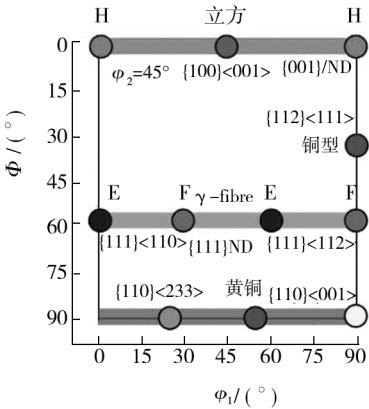


图 1 ODF 图截面上铝合金的主要组织<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Main texture components and fibbers in ODF sections

2.2.1 热轧

热轧板的组织具有明显的铜型组织特征<sup>[17]</sup>。对铝合金来说,如果轧制温度在再结晶温度以上,则在轧制过程中会发生动态再结晶并形成再结晶组织,轧制温度较低时不会形成再结晶组织。高琪妹<sup>[18]</sup>等人发现 6111 铝板在较低的终轧温度下(200℃)热轧后的组织,为弱的铜型轧制组织,没有出现

再结晶组织。

横轧所产生的组织是不同方向轧制所产生的组织叠加。横轧激发更多的滑移系参与滑移和交滑移,引起旋转立方组织和丝组织的增强,削弱变形组织<sup>[19]</sup>。

2.2.2 冷轧

铝合金的轧制组织与轧制变形量有密切关系。随着变形量的增加,冷轧组织组分(S, Copper 和 Brass)总体上呈现出上升的趋势。张永峰<sup>[20]</sup>等人对 3104 和 1050 铝合金组织的 EBSD 研究表明,不同变形量下的冷轧组织组分中 S 取向增加的速率最快,含量也最高,冷轧到变形量为 40% 时 3 种冷轧组织组分的体积分数已超过 68%。轧制过程中不是所有变形组织都一直增加的。陈明彪<sup>[21]</sup>等人研究了 5052 铝合金轧制组织演变,发现 Goss 组分的体积分数先随压下量的增加而增加,而后在高变形量时又降低,图 2 反映了组织演变速率与轧制真应变的关系。

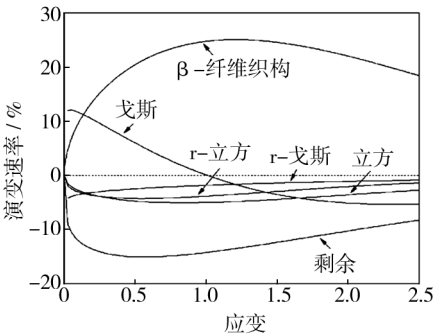


图 2 5052 铝合金组织体积分数演变速率与轧制真应变的关系<sup>[21]</sup>

Fig. 2 Plots of texture evolution rates as a function of rolling true strain of AA 5052 aluminum alloy with rolling components

在冷轧变形过程中,初始组织对材料最终所形成的组织具有非常大的影响。冷轧过程中,初始的再结晶组织逐渐向稳定的  $\beta$  纤维组织转变,当材料初始含有较强立方组织时,会影响最终轧制组织的含量<sup>[22]</sup>。

此外,合金成分也影响组织的形成<sup>[23]</sup>。合金越纯,杂质越少,越容易形成纯金属轧制组织,退火后立方组织越强。一般杂质 Fe 含量的增加会增强变形组织;添加 Mn 元素与其他元素易形成粗大的第二相颗粒,进而促进再结晶形核和长大,最终强化立方组织。

除轧制铝合金外,挤压铝合金中也有很强的织构,一般是纤维织构。王玉凤<sup>[24]</sup>研究了 4032 铝合金挤压棒中的织构,发现 1/2 半径处存在强的  $\langle 111 \rangle$  织构和相对较弱的  $\langle 100 \rangle$  织构。

### 2.3 再结晶织构

金属经过变形加工后,在组织结构中储存了一定的能量,在热处理加工过程中发生再结晶,形成再结晶织构。一般来说,高变形量的冷轧铝及铝合金的再结晶织构为立方织构  $\{100\} \langle 001 \rangle$  和 R 织构。初始织构和退火温度对再结晶织构有很大影响<sup>[25-26]</sup>。蔡春波<sup>[15]</sup>对 1050 铝合金形变和再结晶过程中的织构演变研究表明:随着温度升高,立方织构取向密度逐渐增加,轧制织构逐渐降低;当 360 °C 退火后再结晶完成,立方织构成为主要织构组分,但仍有少量轧制织构存在。再结晶过程对材料的各向异性有明显影响。随退火温度的升高和退火时间的延长,强度和延伸率的各向异性减小,铝合金板材延伸率的各向异性明显高于强度的各向异性<sup>[27]</sup>。

## 3 铝合金不均匀织构

厚板铝合金由于轧制过程中变形的不均匀性及剪切变形在各层分布的不同,在不同深度的织构状态不同。许多研究表明<sup>[28-30]</sup>:铝合金板材表层及次表层受摩擦力作用处于剪切应变状态,主要是剪切织构(旋转立方织构  $\{001\} \langle 110 \rangle$ ) 和立方织构;1/4 厚度处为过渡层;中心处主要是  $\beta$  取向的轧制织构和少量的 Cube-ND 织构。剪切应变是引起表层轧制型织构向剪切型织构转变的主要原因。有时冷轧过程中中心层轧制织构(尤其是黄铜织构)随着压下量增加向剪切织构转变而减小<sup>[31]</sup>。王书明<sup>[32]</sup>采用 X 射线法对 7B04 铝合金织构沿厚度方向变化的研究表明:由板材表层到中心,再结晶织构先减小后增大,剪切织构逐渐减小,变形织构先减小后增大。

高振桓<sup>[6]</sup>采用短波长 X 射线衍射仪(SWXR)的 K 角扫描法,分别对 25 mm 厚 2024 预拉伸板板和 30 mm 厚 7075 淬火板不同深度的织构分布进行了无损测试,发现 7075 与 2024 的轧制织构分布类似,在板厚中心位置最强,向板表面逐渐减弱,如图 3 所示。板中心部以 Brass  $\{110\} \langle 112 \rangle$  织构最强,这对于测量轧向应力是非常不利的。

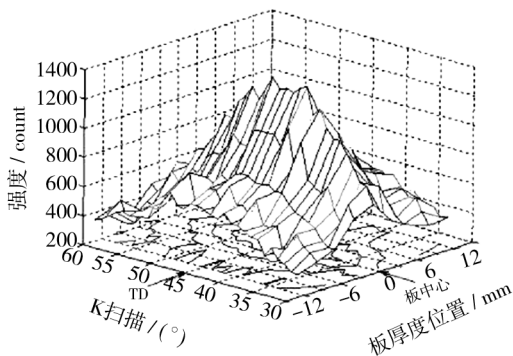


图3 7075-T6 铝合金淬火板各厚度横向 K 角扫描<sup>[6]</sup>  
( $\{111\}$  极图最外圈数据)

Fig. 3 The K angle scanning of different thicknesses in 7075-T6 aluminum plate (the outmost circle data of  $\{111\}$  pole figure)

织构的不均匀分布导致预拉伸处理消减残余应力不均匀,即使施加的拉伸力均匀,也会导致铝板变形不均匀,影响尺寸加工的精度,导致残余应力消减效果不好,不能生产出内部残余应力小的优质预拉伸板。厚度方向织构梯度较大会使材料强度出现分层<sup>[37]</sup>。

此外,铝合金搅拌摩擦焊(FSW)过程中也会产生不均匀的织构分布<sup>[33-34]</sup>。FSW 的热机影响区受塑性变形和温度变化影响,与母材的织构成分相比也会发生较大变化。

## 4 铝合金织构的应用及研究前景

合理地控制织构将会极大地提高材料的性能,如织构引起的材料宏观各向异性是导致铝制易拉罐等材料产生冲压制耳的主要原因,当板材内各织构组分的体积分数及它们之间的比例处于某一特定范围时,板材会表现出较小的各向异性<sup>[35]</sup>。研究表明<sup>[36]</sup>, $\{111\}$  面织构有利于明显降低制耳效应,提高铝板的深冲压性能。大规模集成电路由于尺寸的小型化,在生产和使用过程中有较高的故障率,内联导电铝膜中高体积量且锋锐的  $\{111\}$  面织构可以大幅度降低大规模集成电路芯片的失效率<sup>[37]</sup>。又如高压电容阳极铝箔中提高立方织构的含量能有效提高其电容量等。

目前人们对铝合金制造加工过程中织构的演变规律做了大量研究,但对于织构对材料性能的作用规律研究还不够深入,研究结果向工业应用的转化

较少。未来铝合金组织的研究将偏重于组织对材料性能的影响规律以及通过控制组织的成分和含量来提高材料的使用性能,实现材料性能的最大化。随着在线组织检测等新技术的发展,可以对铝合金工业生产中产生的组织进行实时检测和分析,通过调整工艺控制铝合金加工过程中的组织来提高材料的性能,有助于开发出新的高性能铝合金材料。

## 参考文献:

- [1] 王书明,王超群,樊志罡,等. 组织分析在材料检测中的应用[J]. 理化检验(物理分册),2009,45(5):277-281.  
WANG Shu-ming, WANG Chao-qun, FAN Zhi-gang, et al. Applications of Texture Analysis in Material Test[J]. PTCA(PART: A PHYS TEST), 2009, 45(5): 277-281.
- [2] 杨平. 电子背散射衍射技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.  
YANG Ping. Electron Back Scattering Diffraction Technique and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [3] KIM K J, WON S T, PARK J H. Texture Analysis of 5182 Aluminum Alloy Sheets for Improved Drawability by Rolling Process[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2012, 43(5SI): 373-378.
- [4] 陈艳霞,张建国,王泓,等. 2124 铝合金各向异性的EBSD研究[J]. 金属热处理,2011,36(5):79-82.  
CHEN Yan-xia, ZHANG Jian-guo, WANG Hong, et al. EBSD Investigation on the Anisotropy of 2124 Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(5): 79-82.
- [5] 郭学博,张津,李峰. 搅拌摩擦焊接件内部残余应力无损测试研究进展[J]. 理化检验(物理分册),2012,48(4):228-234.  
GUO Xue-bo, ZHANG Jin, LI Feng. Researching Progress in Non-destructive Testing Interior Residual Stress of Friction Stir Welding Parts[J]. PTCA(PART: A PHYS TEST), 2012, 48(4): 228-234.
- [6] 高振恒. 铝合金内部残余应力短波长 X 射线衍射表征[D]. 北京:北京科技大学,2010.  
GAO Zhen-huan. Measuring the Residual Stress through Thickness of Aluminum Alloys by Short Wavelength X-ray[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010.
- [7] JOHANSSON S, ZENG X, ANDERSSON N, et al. Measurement of Average Texture of Cold-rolled Aluminium Sheet by Electron Back-scattering Diffraction: a Comparison with Neutron Diffraction[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 315(1-2): 129-135.
- [8] 郑林,张津,何长光,等. 短波长 X 射线衍射无损测定铝板内部残余应力[J]. 精密成形工程, 2011, 3(2): 25-30.  
ZHENG Lin, ZHANG Jin, HE Chang-guang, et al. Non-destructive Measuring Internal Residual Stress in Aluminium Alloy Plates Using Short-wavelength Characteristic X-ray Diffraction[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(2): 25-30.
- [9] 杨平. EBSD 技术在微组织分析中的应用[J]. 中国体视学与图像分析, 2005, 10(4): 211-214.  
YANG Ping. Application of EBSD Technique to Microtexture Analyses[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2005, 10(4): 211-214.
- [10] 陈芳芳,武建军. 蚀坑法测定铝合金板材组织[J]. 河北工业大学学报, 2007, 36(1): 76-79.  
CHEN Fang-fang, WU Jian-jun. Determination of the Texture in Aluminum Alloy Plate with Pit et aling Method[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2007, 36(1): 76-79.
- [11] 杨敏. 金属材料组织测量方法的探讨[J]. 化学工程与装备, 2010(8): 164-165.  
YANG Min. Discussion on the Measuring Methods of Metal Material Texture[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(8): 164-165.
- [12] 刘涛,毛卫民,马全仓,等. AA3104 热轧铝板组织的快速测量[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(6): 595-598.  
LIU Tao, MAO Wei-min, MA Quan-cang, et al. Rapid Texture Measurement of AA3104 Hot Bands[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(6): 595-598.
- [13] 毛为民,杨平,陈冷. 材料组织分析原理与检测技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.  
MAO Wei-min, YANG Ping, CHEN Leng. Material Texture Analysis Principle and Detecting Technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [14] MARTINS J D, DE CARVALHO A, PADILHA A F. Texture Analysis of Cold Rolled and Annealed Aluminum Alloy Produced by Twin-roll Casting[J]. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, 2012, 15(1): 97-102.
- [15] 蔡春波. 1050 铝合金形变和再结晶过程中的组织演变研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2009.

- CAI Chun-bo. Study on the Evolution of Texture of 1050 Aluminum Alloy during Process of Deformation and Recrystallization[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009.
- [16] SIDOR J J, PETROV R H, KESTENS L A I. Microstructural and Texture Changes in Severely Deformed Aluminum Alloys[J]. Materials Characterization, 2011, 62(2): 228-236.
- [17] CONTREPOIS Q, MAURICE C, DRIVER J H. Hot Rolling Textures of Al-Cu-Li and Al-Zn-Mg-Cu Aeronautical Alloys: Experiments and Simulations to High Strains[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(27-28): 7305-7312.
- [18] 高琪妹, 曹力生, 于晓丹. 6111 铝合金板材加工过程中织构的演变[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(1): 30-32.
- GAO Qi-mei, CAO Li-sheng, YU Xiao-dan. Evolution of Texture in 6111 Aluminum Alloy Sheet During Manufacturing Process[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2009, 37(1): 30-32.
- [19] 孔祥宇, 李敬, 于翠翠, 等. 横轧 3105 铝合金织构演变的定量分析[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 1917-1922.
- KONG Xiang-yu, LI Jing, YU Cui-cui, et al. Quantitative Analysis of Texture Evolution in Cross-rolled 3105 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(11): 1917-1922.
- [20] 张永峰, 姚宗勇, 黄光杰, 等. 轧制变形铝合金微观组织与织构的 EBSD 研究[J]. 电子显微学报, 2009, 28(1): 43-45.
- ZHANG Yong-hao, YAO Zong-yong, HUANG Guang-jie, et al. EBSD Investigation on Microstructure and Texture in Rolling Aluminum Alloys[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2009, 28(1): 43-45.
- [21] 陈明彪, 刘文昌, 马曼, 等. 5052 铝合金轧制织构演变的定量分析[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(6): 515-518.
- CHEN Ming-biao, LIU Wen-chang, MA Man, et al. Quantitative Analysis of Texture Evolution in Cold Rolled AA5052 Aluminum Alloy[J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(6): 515-518.
- [22] 姚宗勇, 刘庆, Godfrey A, 等. 大应变量冷轧 AA1050 铝合金微观组织与织构的演变[J]. 金属学报, 2009, 45(6): 647-651.
- YAO Zong-yong, LIU Qing, GODFREY A, et al. Microstructure and Texture Evolutions of AA1050 Aluminum Alloy Cold Rolled to High Strains[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(6): 647-651.
- [23] 王国军. 铝及铝合金板带材织构[J]. 轻合金加工技术, 2004, 32(6): 28-33.
- WANG Guo-jun. Deviation of Random Orientation Distribution of Aluminum and Aluminum Alloy Sheets Strips[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2004, 32(6): 28-33.
- [24] 王玉凤. 4032 铝合金组织及力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- WANG Yu-feng. Study of the Microstructures and Mechanical Properties of 4032 Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [25] LIU W C, MORRIS J G. Effect of Initial Texture on the Recrystallization Texture of Cold Rolled Aa 5182 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 402(1-2): 215-227.
- [26] LIU W C, ZHAI T, MAN C S, et al. Quantification of Recrystallization Texture Evolution in Cold Rolled AA 5182 Aluminum Alloy[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(6): 539-545.
- [27] 陈芳芳. 再结晶织构对铝合金板材力学性能的影响[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- CHEN Fang-fang. Influence of Recrystallization Texture on Mechanical Properties of Aluminum Sheets[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.
- [28] 陈军洲, 黄敏, 戴圣龙. Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金厚板冷轧过程中的织构演变[J]. 材料工程, 2011(5): 1-6.
- CHEN Jun-zhou, HUANG Min, DAI Sheng-long. Texture Evolution of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy Plate During Cold Rolling[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(5): 1-6.
- [29] 张新明, 韩念梅, 刘胜胆, 等. 7050 铝合金厚板织构、拉伸性能及断裂韧性的不均匀性[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(2): 202-208.
- ZHANG Xin-ming, HAN Nian-mei, LIU Sheng-dan, et al. Inhomogeneity of Texture, Tensile Properties and Fracture Toughness of 7050 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(2): 202-208.
- [30] CHEN J Z, ZHEN L, SHAO W Z, et al. Through-thickness Texture Gradient in AA 7055 Aluminum Alloy[J]. Materials Letters, 2008, 62(1): 88-90.
- [31] ZHEN L, CHEN J, YANG S, et al. Development of Microstructures and Texture during Cold Rolling in AA 7055 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 504(1-2): 55-63.

温度增长是由于材料中产生的热量导致的。产生的热量来源于:摆头与坯料接触表面的摩擦,在摆辗中有滚动摩擦和滑动摩擦;摆辗件材料的塑性应变。

通过位于摆头与坯料接触区的各点温度变化情况,可以看出在生成热量和散失热量之间存在一定的平衡关系,温度几乎在整个时间范围内单调增。通过位于摆辗件内部点的温度变化情况,可以看出温度变化出现在第二阶段,具有明显的不规则特征,尤其是位于接近齿的部位。这是由局部剧烈的材料变形而快速形成的热量引起的。而后在改变摆头位置时,材料不再承受剧烈变形,热量扩散到周围环境中。

## 4 结论

卢布林科技大学研究了摆辗技术问题,展示了

应用摆头复杂的运动轨迹的有限元模拟结果。研究表明这种模具运动模型与 PXW-100A 摆辗机的性能一致。

基于所得结果,得出了以下结论:摆头呈玫瑰线轨迹的运动被推荐用于锥齿轮摆辗;螺旋轨迹也有可能成功应用于摆头运动,然而,这会导致能源消耗和材料变形程度(尤其是齿形部位)增大;可以发现,就减少材料消耗和成形时材料填充模腔而言,预成形件的第二种方案的尺寸最优——这与预成形件尺寸  $d_1$  和  $h_1$  的好的比率相关。

(武汉理工大学 董丽颖、韩星会、庄武豪 摘译自 Journal of Materials Processing Technology (2013 年 3 月 10 日 P1692-1702), 原作者为 Grzegorz Samotyk, 原标题为 Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear)

(上接第 6 页)

- [32] 王书明,王超群,杜志伟,等. 7B04 铝合金织构沿厚度变化的研究[J]. 稀有金属, 2012, 36(3):363-367.  
WANG Shu-ming, WANG Chao-qun, DU Zhi-wei, et al. Texture Analysis for 7B04 Al Alloy Plate Along Thickness Direction[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(3):363-367.
- [33] AHMED M, WYNNE B P, RAINFORTH W M, et al. Microstructure, Crystallographic Texture and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2017A[J]. Materials Characterization, 2012, 64:107-117.
- [34] AHMED M, WYNNE B P, RAINFORTH W M, et al. Quantifying Crystallographic Texture in the Probe-dominated Region of Thick-section Friction-stir-welded Aluminium[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(5):507-510.
- [35] KURODA M, IKAWA S. Texture Optimization of Rolled

Aluminum Alloy Sheets Using a Genetic Algorithm[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 385(1-2): 235-244.

- [36] 马全仓,毛卫民,冯惠平. 3104 深冲铝板织构对初始 R 值的影响[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(1):78-81.  
MA Quan-cang, MAO Wei-min, FENG Hui-ping. Influence of Texture on the Initial R Value of Deep Drawing 3104 Aluminum Plate[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(1):78-81.
- [37] 毛卫民,张弘. 大规模集成电路导电薄膜的织构效应[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(6): 539-542.  
MAO Wei-min, ZHANG Hong. Texture Effect of Interconnection Thin Films in Very Large-scale Integrated Electronic Circuits[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000, 22(6):539-542.

(上接第 29 页)

- [5] 韩小后,付三令. 摆动式侧成形压料块设计[J]. 模具工业, 2013, 39(7):29-30.  
HAN Xiao-hou, FU San-ling. Swinging Pressure Plate for Lateral Forming[J]. Die & Mould Industry, 2013, 39(7):29-30.
- [6] 赵磊,梁卫抗,郑金星,等. 顶盖内板拉深工艺分析及

模具设计[J]. 精密成形工程, 2011, 3(3):72-75.  
ZHAO Lei, LIANG Wei-kang, ZHENG Jin-xing, et al. Drawing Process Analysis and Die Design for Top Cover Plate[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(3):72-75.