

特约专栏

难加工金属材料短流程高效 制备加工技术研究进展

谢建新

(北京科技大学 材料先进制备技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 提出了难加工金属材料可以分为 2 大类的观点: 一类是源于材料本征性能的难加工材料, 具有高脆性, 或高熔点、高变形抗力的特点; 另一类是源于制备加工工艺复杂、成材率低的难加工材料。以作者课题组近年来的工作为基础, 重点介绍了高硅电工钢、精密铜管、热交换用 BFe10-1-1 合金管材、高弹高导 Cu-12% (质量分数) Al 合金的短流程高效制备加工技术的研究开发进展情况。认为通过熔体和凝固过程的精确控制, 可精确控制凝固组织和形状尺寸, 是开发先进短流程制备加工技术的重要途径。

关键词: 难加工材料; 短流程; 高硅电工钢; 热交换器; 精密铜管

中图分类号: TG14; TG3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)11-0001-07

Development of Compact Processes for High Efficiency Fabrication of Hard-to-Working Metals

XIE Jianxin

(Key Lab of Advanced Materials Processing(MOE), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: It is proposed that hard-to-working metals can be categorized into two types. One type originates from the intrinsic property of the metals, such as high brittleness or high melting point and high resistance to deformation. The other type originates from the complicated processing technique and low product yield of the metals. Based on the work of the author's research group in recent years, the development of compact processes for high efficiency fabrication of high silicon steel, precision copper pipe, heat exchanger BFe10-1-1 alloy (C70600) tube and high performance Cu-12% (mass fraction) Al alloy was introduced substantially. It is also proposed that accurately controlling microstructure, shape and dimension of the products can be achieved through accurately controlling the melt and solidification behavior, which serves as a significant approach for the development of advanced compact process of metal processing.

Key words: hard-to-working material; compact process; high silicon steel; heat exchanger tube; precision copper pipe

1 前言

制备加工技术是直接影响材料的组织结构、性质和使用性能的关键因素。研究开发先进的制备加工技术, 对于发展新材料、促进新材料的应用, 大幅度提高材料的使用性能与可靠性、促进传统材料的升级换代具有重要意义。经济社会发展以及全球性的环境恶化、资源与能源短缺问题, 迫切要求材料生产向高性能、高质量、高效率、低成本、低负荷(“三高两低”)的方向发展^[1] (在文献[1]中, 从发展材料制备加工技术的观点出发, 作者重点强调了“两高两低”, 即高性能、高效率、低

成本、低负荷, 而从材料生产的角度出发, 还需要重视“高质量”)。发展短流程高效率制备加工技术, 是在满足性能和质量要求的条件下, 实现材料高效率、低成本、低负荷生产的重要途径。

具有一种或多种优异的使用性能, 但制备与加工成形困难的一类材料, 称为难加工材料。这类材料往往因为制备加工工艺复杂, 成材率、生产效率低等原因, 导致成本高, 应用范围受到限制。发展难加工材料的短流程高效制备加工技术, 受到国内外的广泛重视。

难加工材料可以分为 2 大类。一类是源于材料本征性能的难加工材料, 即通常意义上的难加工材料, 包括 2 种: ①脆性材料, 该类材料在低于热加工温度的条件下, 尤其是在室温变形条件下, 塑性很低, 甚至几乎为零, 铸造后的加工成形非常困难, 如高硅电工钢(Fe-6.5Si 合金)、铝含量达到 12% (质量分数) 以上的高铝青铜等; ②熔点高、变形抗力大的材料, 该类材料热加

收稿日期: 2010-09-30

基金项目: 国家 973 计划项目(2006CB605205); 国家自然科学基金项目(50634010)

通信作者: 谢建新, 男, 1958 年生, 工学博士, 教授

工温度非常高,难以实现热加工,而温加工和冷加工变形抗力很大,难以变形,如钨、钼及其合金。另一类难加工材料,是源于其制备加工工艺的复杂性,生产意义上的难加工材料,尽管材料本身具有较好甚至优良的塑性(如纯铜),但由于其产品生产工艺复杂、成材率低,导致生产周期长、成本高,如精密铜管、热交换器铜合金管和钛合金管等。开发短流程高效制备加工技术,是解决这类难加工材料的高效制备加工问题的重要途径。

本文结合作者课题组近年来的研究工作,介绍了几种典型难加工材料的短流程高效制备加工技术的研究进展情况。

2 高硅电工钢逐步增塑制备加工

电工钢(Fe-Si 合金)是用于制作各种变压器、互感器、发电机、电动机以及仪器仪表的铁芯或转子的关键软磁材料。电力装备、电机和仪器仪表工作时的能量损耗约 18%~20% 左右是由于铁芯或转子中的铁损所引起的。有资料报道,全世界由于电工钢的铁损所造成的电力损失约占年发电量的 2.5%~4.5%。若电工钢的铁损降低 1 W/kg,1 t 电工钢使用一年可节电 0.88 万度。目前,我国电工钢年使用量超过 400 万 t,因而通过提高电工钢的性能实现节能的潜力巨大。

硅含量达到 6.5% (质量分数)的高硅电工钢(Fe-

6.5Si 合金)的主要软磁性能指标远高于目前使用的硅含量为 3%~4.5% (质量分数)的各种电工钢,如磁导率大幅度提高;高频工作条件下的铁损降低 30%~50%;饱和磁致伸缩系数几乎为零,因而工作时不产生噪音。因此,高硅电工钢用于电力、电机、仪器仪表领域可以发挥显著的节能和减噪效果,是国际上正在大力研究发展的关键电工材料。

但高硅电工钢是典型的脆性材料,其室温塑性几乎为零,难以加工成使用所需的薄板(一般为 0.05~0.30 mm)。开发高硅电工钢的高效率、工业化制备加工工艺,是国际上的研究热点。目前,全世界只有原日本 NKK 公司(现已合并到 JFE 公司)开发的 CVD 法(化学气相沉积渗硅法)实现了高硅电工钢薄带的工业化规模生产^[2-3],如图 1 所示^[2]。采用该工艺制备了厚 0.05~0.3 mm(宽 600 mm)、铁损非常低(例如, P0.1/10k 为 8.2 W/kg,厚 0.1 mm)的无取向高硅电工钢,但工艺技术严格保密,不对外转让。我国所使用的高硅电工钢长期依赖进口。

CVD 方法的特点是,首先采用常规工艺将普通电工钢(Fe-3Si 合金)加工成 0.3 mm 以下的薄带,然后通过化学气相沉积对薄带进行连续渗硅,使 Si 的平均含量达到 6.5% (质量分数),再通过扩散进行均匀化处理。该方法存在工艺流程长、环境负担重、生产效率低、成本高,以及只能生产无取向高硅电工钢等问题。

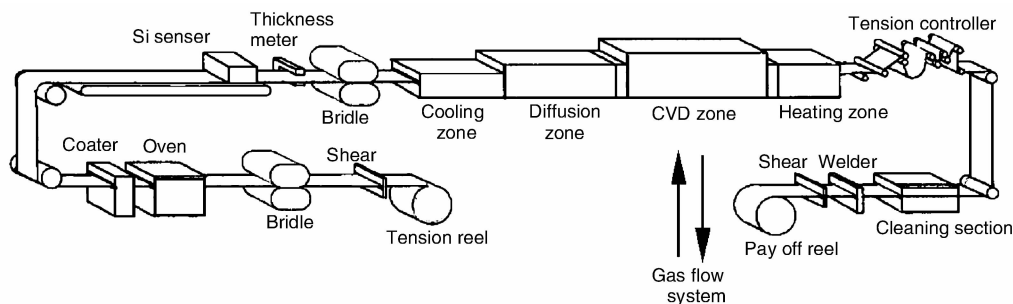


图 1 CVD 法制备高硅电工钢薄带示意图

Fig. 1 CVD process of fabricating high silicon steel strip

林均品、陈国良等人^[4-5]通过深入研究高硅电工钢的脆性本质,揭示了其脆韧转化机理,发现降低高硅钢的有序度是改善其脆性,提高其加工性能的关键。为此,通过 B 微合金化细化、凝固过程控制等措施控制高硅钢的铸态组织,通过大热变形和热处理有机结合对微结构进行精确调控,有效降低了合金的有序度,显著提高了合金的温加工和室温加工(冷加工)变形能力,实现了采用传统“铸-锻-轧”方法生产高硅电工钢薄带的突破^[6-7],开发了具有自主知识产权的逐步增塑法制备加工技术^[8]。该技术具有工艺流程短、生产效率高、环境友好等特点。冷轧薄带的厚度最小达到 0.03 mm,抗拉

强度达到 1 086 MPa,延伸率超过 5.6%,优于 CVD 法生产的高硅电工钢;软磁性能与 CVD 法生产的同类产品相当。目前正与宝钢合作开展中试研究工作。

逐步增塑制备加工工艺具有流程较为简单,利用常规钢铁生产设备即可实现生产的特点。但是,塑性低、成形加工困难是高硅电工钢的本征问题,如何大幅度地提高变形加工能力,实现大变形温轧和冷轧,在此基础上制备具有取向的高硅钢薄带,并突破宽幅薄带轧制生产等关键技术,提高成材率等,是有待解决的重要问题,也是国内外当前的研究热点^[6,9-14]。图 2 为逐步增塑法制备高硅电工钢薄带示意图。

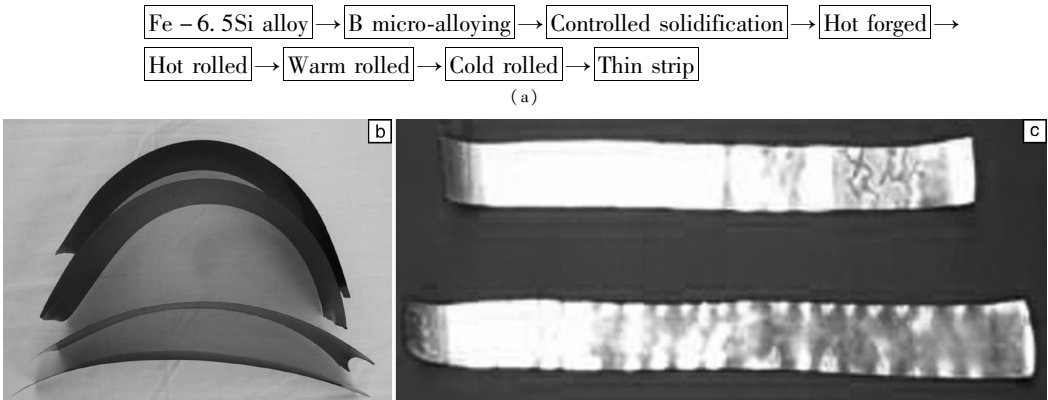


图 2 逐步增塑法制备高硅电工钢薄带示意图：(a) 制备工艺，(b) 温轧薄板，(c) 冷轧薄带

Fig. 2 Controlled solidification and controlled forming process for high silicon steel sheet: (a) fabrication process, (b) warm rolled sheet, and (c) cold rolled sheet

3 精密铜管短流程加工成形新工艺

铜管的主要生产方法有 2 种：第一种是传统的挤压生产工艺，即半连续铸锭→热挤压→冷轧管→盘拉，传统工艺的特点是产品质量高，但生产流程长、成材率低；第二种是 20 世纪 80 年代由芬兰 Outokumpu 公司开发的铸轧工艺，即水平连铸管坯→行星轧制→盘拉，与传统的挤压工艺相比，由于采用连铸方法直接制备铜管坯，可使生产效率得到大幅度提高，同时，三辊行星轧制单道次的加工变形量可达 96% 以上，相当于 8 道次普通轧制变形量，因而进一步提高了生产效率。

虽然铸轧工艺与传统的挤压工艺相比流程大幅度缩短、生产成本显著降低，但也存在管坯质量较差（如疏松、夹杂、径向柱状晶等）、生产设备与工艺较为复杂、能源消耗大等不足。

电缆管、阴极管等精密铜管，由于最终产品直径小（3~10 mm）、壁厚薄（0.3~0.7 mm），即使采用铸轧工艺进行生产，仍然存在生产工序较为复杂、成材率较低的问题。为了开发工艺更为简单、成本更低、节能降耗的新工艺，基于热型连铸（连续定向凝固）的原理，作者课题组开发了薄壁铜管近终连铸成形工艺^[15]。热型连铸时金属的凝固是在铸型的出口附近进行的，即液-固界面被控制在铸型的出口附近。这一特点使得已凝固的铜管内外表面与铸型、芯棒之间几乎不存在摩擦，带来以下 2 个方面的优点：①铜管的内外表面光亮，可以达到镜面状态，不需任何处理即可直接用于轧制、拉拔等冷加工；②可以实现薄壁管材的连铸成形，普通连铸时，由于液-固界面位于结晶器内离出口较远距离的位置，已凝固管材表面与结晶器和芯棒表面之间存在较大摩擦，无法实现薄壁管材的连铸成形。

由于热型连铸时结晶沿轴向生长，不存在铸锭中心

补缩困难等问题，因而可以获得没有缩孔、疏松等缺陷的致密组织。采用热型连铸制备的纯铜管材的金相组织如图 3 所示，其为沿轴向的粗大的连续柱状晶组织，消除了横向晶界。相关研究表明，具有上述特点的组织，有利于显著提高沿轴向延伸加工（如轧制、拉拔）时的冷加工性能^[16]。

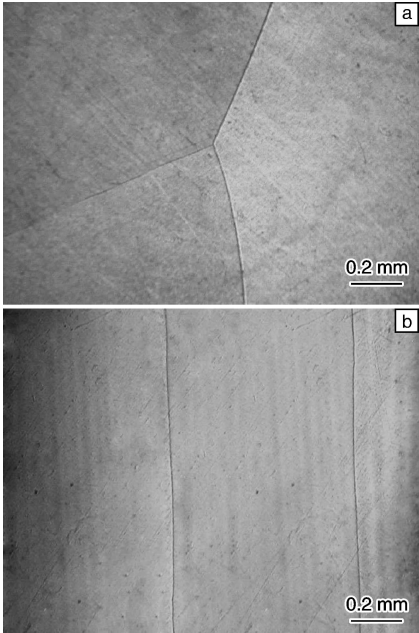


图 3 热型连铸纯铜管材(φ16 mm×2 mm)的金相组织：(a) 横断面，(b) 纵断面

Fig. 3 Metallurgical structures of copper pipe (φ16 mm×2 mm) fabricated by continuous unidirectional solidification process: (a) cross section and (b) longitudinal section

由于热型连铸的特点，薄壁管材连铸时容易产生拉漏现象，因而限制了拉坯速度（连铸速度）的提高，影响连铸生产效率。研究表明，通过合理的铸型结构

设计和工艺参数控制,使铸型具有合适的温度梯度,可较好地解决拉漏问题,并显著提高连铸速度。

在上述研究工作的基础上,开发了精密铜管短流程制备加工工艺^[17],其特点是采用热型连铸方法成形直径 15~40 mm、壁厚 1~3 mm 的薄壁铜管,然后直接进行盘拉,生产小直径、薄壁精密管材。与传统的挤压法相比,省去了热挤压及冷轧管工序;与水平连铸法相比,省去了铣面和行星轧制工序。因此,新工艺可以大幅度缩短流程,节约能耗,显著提高成材率,降低成本。

图 4 所示为 $\phi 7.9 \text{ mm} \times 0.65 \text{ mm}$ 精密铜管短流程制备加工工艺示意图。采用热型连铸制备 $\phi 18 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ 的薄壁、光亮铜管,然后只需 3 次盘拉,不需任何表面处理与中间退火,即可生产出目标产品,成材率可达 90%~95%。而同样的产品采用传统挤压工艺,需要 14 道工序,成材率约为 60%~65%;采用铸轧工艺,需要 10 道工序,成材率约为 80%。

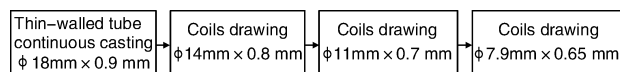


图 4 $\phi 7.9 \text{ mm} \times 0.65 \text{ mm}$ 精密铜管短流程制备工艺

Fig. 4 Compact process for precision copper pipe of $\phi 7.9 \text{ mm} \times 0.65 \text{ mm}$

中铝洛阳铜加工集团公司在取得精密铜管短流程制备加工工艺^[17]中试成功的基础上,重点突破了高速连铸和多流连铸等关键技术,开发了 1 000 吨级工程化示范线,如图 5 所示。

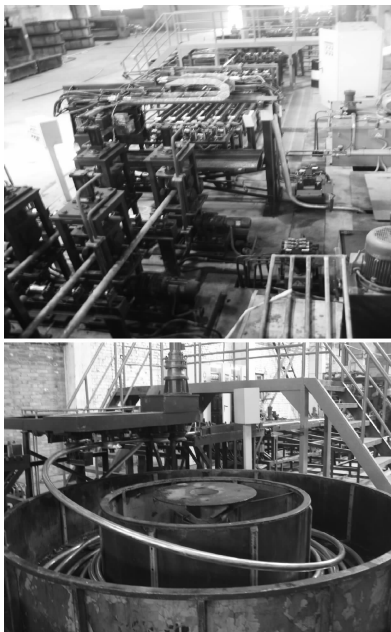


图 5 1 000 吨级薄壁光亮铜管连铸生产线

Fig. 5 1 000 t/a continuous casting line of copper pipe with thin wall and brightness surface

与普通水平连铸相比,基于“热型连铸管坯-直接盘拉”的管材短流程生产工艺,连铸拉坯速度较小,管坯壁厚较薄,单流连铸线的产量规模较小,较为适合于直径小、壁厚薄、产量规模较小的精密管材的生产,如电缆管、阴极管、天线管等精密电子铜管,其优点是可以大幅缩短流程、提高成材率。对于较大规格、产量规模大的铜及铜合金管材(如各种空调管、工业热交换用管等)的生产,从生产效率的角度考虑,需要从 2 个方面采取措施:采用多流铸造或突破大幅度提高连铸速度的关键技术。

4 BFe10-1-1 白铜管材热冷组合铸型连铸成形

BFe10-1-1 白铜(含 10% Ni, Fe 和 Mn 各 1% 左右,相当于 C70600)管材由于具有良好的热传导、耐海水腐蚀和抗海生物附着等性能,被广泛应用于海滨电站、海水淡化、舰船、石油化工等领域的热交换器和冷凝器。国内耐蚀热交换管的年需求量约为 8~10 万 t,产品规格范围为直径 6~30 mm、壁厚 0.35~2.5 mm。

目前热交换、冷凝用白铜管材的生产多采用“半连铸-热挤压-冷轧管-拉拔”的工艺,具有流程长、成材率低的缺点。国内白铜管材生产综合成材率不到 50%,国外最好也只有 60%~65% 左右。因此开发短流程高效制备加工技术,具有重要意义。

对于直径小于 10 mm 的产品,可采用前面所述的基于热型连铸的技术,生产直接用于冷拉加工的薄壁管材,可以显著缩短工艺流程,提高成材率。表 1 所示为热型连铸制备的 BFe10-1-1 合金(Cu-10.8Ni-1.38Fe-0.67Mn)管材(外径 10 mm、壁厚 1.7 mm)的力学性能与其它铸造方法制备的 BFe10-1-1 合金力学性能的比较^[18]。

表 1 热型连铸与其它铸造方法制备的 BFe10-1-1 合金力学性能比较

Table 1 Comparison of mechanical properties between BFe10-1-1 alloys produced by continuous unidirectional solidification and other solidification processes

Method	Rm/MPa	A/%	References
Sand casting	280	20	[19]
Centrifugal casting	280	25	[19]
Continuous casting	280	25	[19]
Horizontal continuous casting	254	39	[20]
Horizontal continuous casting	221	31	[21]
Continuous unidirectional solidification	212	49	Author's work

采用热型连铸技术,合金凝固沿轴向单方向进行时,可以获得夹杂和疏松少、致密、沿轴向连续柱状晶的组织,与其它铸造方法相比,铸造后的强度下降,延伸率显著提高,因而有利于合金的后续加工成形。

但是，如前所述，热型连铸法存在以下 3 个方面的问题：①为了获得轴向柱状晶组织，棒材的直径、型材或管材的壁厚受到较大限制，尤其是对于热传导性能比纯铜差的铜合金、铝合金，该问题更为突出；②液-固界面位于铸型出口附近，容易产生拉漏现象，影响生产稳定性和安全性；③拉坯速度慢，不适合于量大面广材料的大规模生产。

相反，采用普通水平连铸方法，可以生产直径 60 ~ 80 mm、壁厚 10 ~ 25 mm 的大规格铜合金管材，具有生产效率高，不容易拉漏等特点，但存在管材内外表面质量差，形成桔皮、偏析瘤、微裂纹、褶皱等缺陷，管壁内易形成发达的径向柱状晶组织。这些问题严重影响后续加工性能以及产品质量的稳定性和成材率。

为此，在热型连铸的基础上，以提高拉坯速度和解决拉漏问题，实现高质量大直径厚壁管坯的连铸为目的，作者的课题组开发了一种热冷组合铸型水平连铸方法（简称 HCCM 铸造工艺）^[22]，如图 6 所示。该方法的主要特点是，同一铸型由加热段（加热温度高于合金的熔点）和水冷段组成，管材凝固界面控制在加热区和冷却区交界

附近，从而可在管坯凝固界面前沿形成很高的温度梯度，建立起强烈的轴向热传导，消除普通水平连铸的径向柱状晶组织，获得沿轴向取向的结晶组织。图 7 所示为 HCCM 铸造工艺成形的 BFe10-1-1 合金管材的内外表面形貌和金相组织。研究表明，采用 HCCM 铸造工艺成形的 BFe10-1-1 合金管材可直接进行冷轧成形，加工性能明显优于水平铸造管材。

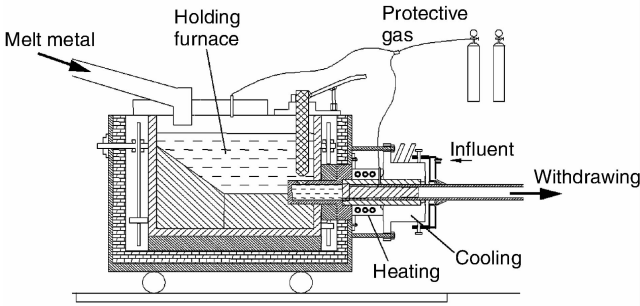


图 6 热冷组合铸型水平连铸示意图
Fig. 6 Schematic drawing of horizontal continuous casting with Heating-Cooling Combined Mold(HCCM casting)

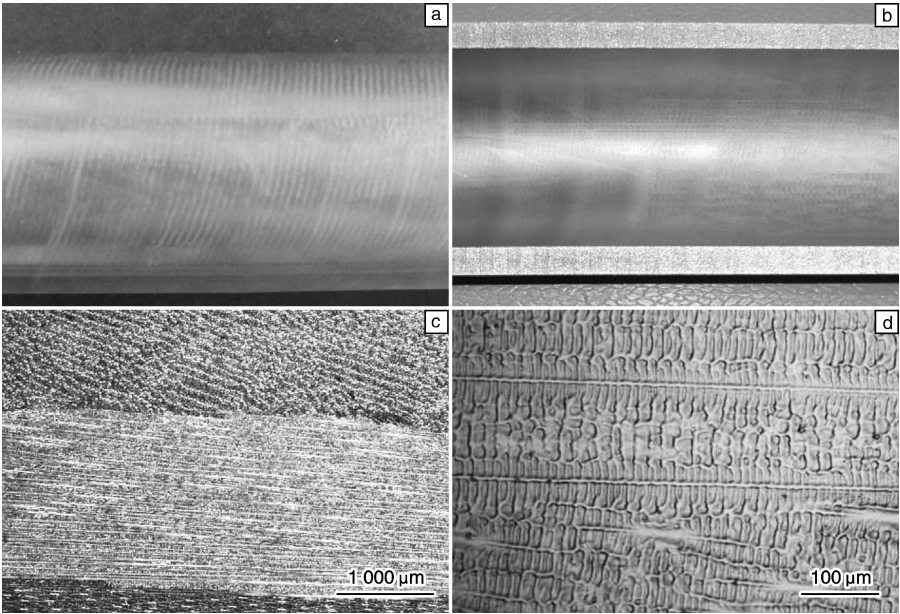


图 7 热冷组合铸型水平连铸 BFe10-1-1 合金管材(φ50 mm×5mm)：(a)外表面，(b)内表面，(c)、(d)轴向截面金相组织
Fig. 7 BFe10-1-1 alloy pipe fabricated by CHCM casting process：(a)outer surface，(b)inner surface，(c)and(d)metallurgical structures on longitudinal section

5 高弹高导 Cu-12Al 合金开发

铝青铜具有优异的物理、力学性能以及良好的耐蚀性能，广泛应用于军用和民用工业的各个领域。随着铝含量的升高，例如从 5% ~ 7% (质量分数) 提升至 9% ~

14% (质量分数) (铝含量大于 9% (质量分数) 时常称为高铝青铜)，铝青铜的强度、弹性和形状记忆性能都得到大幅度提升。但是，铝含量的升高同时也造成材料塑性性能的严重下降。例如，使用传统铸造技术制备的多晶 82.7Cu - 4.3Fe - 13Al 合金的室温拉伸延伸率仅为

1%^[23], 极大制约了该合金的加工与应用。

本课题组开发了 Cu-12% Al(质量分数)合金(简称 Cu-12Al 合金)线材热型连铸技术^[24], 发现具有连续柱状晶组织的 Cu-12Al 合金线材的拉伸弹性模量达到 168 GPa, 比常用铜基弹性材料提高了 30%~50%; 电导率达到 22.2% IACS, 远高于 QAl 9-4, QAl 10-3-1.5, QAl 10-4-4 等合金^[25]。表 2 所示为 Cu-12Al 合金与普通铝青铜的力学和电导性能的比较。上述结果表明, 热型连铸 Cu-12Al 合金有望发展成为一种高弹高导材料, 在高新技术领域具有非常重要的应用前景。

表 2 Cu-12Al 合金与普通铝青铜的性能比较

Table 2 Property comparing of Cu-12Al alloy with other commercial aluminum bronzes

Alloys	Cast method	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Elastic modulus /GPa	Conductivity /% IACS
QAl 9-2	Metal mold	—	20	92	15.7
QAl 9-4	Metal mold	500	15	112	14.0
QAl 10-3-1.5	Metal mold	550	20	105	9.1
QAl 10-4-4	Metal mold	650	8	115	8.9
QAl 11-6-6	Metal mold	600	8	—	—
Cu-12Al	Continuous unidirectional solidification	302	20	168	22.2

单晶体的弹性模量与晶体取向以及织构有关。热型连铸晶体沿热流方向(轴向)的反向择优长大, 因此可以通过控制热流方向, 得到特定晶体取向, 获得高的弹性模量。本课题组制备的 Cu-12Al 合金线材具有高的弹性模量, 表明其晶体生长方向(轴向)为高弹性方向。另一方面由于连续柱状晶组织消除了横向晶界, 减少了电子波在运动过程中的散射, 因而可以显著提高导电性能。

6 总 结

本文重点介绍了高硅电工钢、精密铜管、热交换用 BFe10-1-1 合金管材、高弹高导 Cu-12Al 合金的短流程高效制备加工技术的研究进展。

传统的铸锭冶金工艺(Ingot Metallurgy Process)在熔炼、铸锭之后, 一般需要首先进行多道次的热、冷加工和热处理, 对材料的组织性能进行调控, 获得使用所需的组织和性能, 同时(或之后)进行形状尺寸调控, 使其达到使用所需的形状和尺寸。如能对合金的熔体和凝固过程进行精确控制, 使其在铸锭(凝固)时得到最终使用所需的组织, 则可以完全或大部分省略铸锭之后组织调控所需的加工过程。同样, 通过凝固过程控制, 实现近终成形, 如本文介绍的铜管精密连铸, 则可减缩甚至省略形状尺寸调控所需的加工过程。

精确控制凝固过程, 不仅可以获得接近或达到使用要求的组织和形状尺寸, 实现常规复杂生产工艺的短流程化, 而且可以通过改善材料的脆性(如 Fe-6.5Si 合金), 提高材料的塑性(如 Cu-12Al 合金), 从而提高材料的道次变形加工能力, 实现强化加工, 减少加工道次, 进一步缩短工艺流程。

因此, 通过熔体和凝固过程的精确控制, 从而精确控制凝固组织和形状尺寸, 是开发先进短流程技术的重要途径。

参考文献 References

- [1] Xie Jianxin(谢建新), Shi Likai(石力开). 高性能金属材料的控制凝固与控制成形[J]. *Materials China* (中国材料进展), 2010, 29(5): 58.
- [2] Haiji H, Okada K, Hiratani T, et al. Magnetic Properties and Workability of 6.5% Si Steel Sheet[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, 160: 109-114.
- [3] Okada K, Yamaji T, Kasai K. Basic Investigation of CVD Method for Manufacturing 6.5% Si Steel Sheet[J]. *ISIJ International*, 1996, 36(6): 706-713.
- [4] Liang Y F, Lin J P, Ye F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Rapidly Quenched Fe-6.5wt.% Si Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 504S: S476-S479.
- [5] Ye F, Liang Y F, Wang Y L, et al. Fe-6.5wt.% Si High Silicon Steel Sheets Produced by Cold Rolling[J]. *Materials Science Forum*, 2010, 638-642: 1428-1433.
- [6] Liang Y F, Zheng Z L, Lin J P, et al. The Effect of Directionally Solidified Microstructures on Ductility of Fe-6.5wt.% Si alloy[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 144: 012-02.
- [7] Lin Junpin(林均品), Ye Feng(叶丰), Chen Guoliang(陈国良), et al. 6.5wt% Si 高硅钢冷轧薄板制备工艺、结构和性能[J]. *Frontier Science*(前沿科学), 2007, (2): 13-26.
- [8] Lin Junpin(林均品), Liang Yongfeng(梁永锋), Ye Feng(叶丰), et al. Cold Rolling Method of High Silicon Steel Sheet(高硅钢薄板的冷轧制备方法): CN ZL200710099130.5[P]. 2008-10-15.
- [9] Tian G K, Bi X F. Fabrication and Magnetic Properties of Fe-6.5% Si Alloys by Magnetron Sputtering Method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 502(1): 1-4.
- [10] Roy R K, Panda A K, Ghosh M, et al. Effect of Annealing Treatment on Soft Magnetic Properties of Fe-6.5wt% Si Wide Ribbons[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 321(18): 2865-2870.
- [11] Bolfarini C, Silva M C A, Jorge J A M, et al. Magnetic Properties of Spray-Formed Fe-6.5% Si and Fe-6.5% Si-1.0% Al after Rolling and Heat Treatment[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320(20): e653-e656.
- [12] Phway T P P, Moses A J. Magnetostriction Trend of Non-Oriented 6.5% Si-Fe[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*,

2008, 320(20): e611 – e613.

[13] Zhang Zhihao (张志豪), Fu Huadong (付华栋), Xie Jianxin (谢建新). *A Kind of Method and Equipment for Fabricating High Silicon Steel Bar with Continuous Columnar Crystals*(一种制备连续柱状晶组织高硅电工钢棒材的方法及装置): CN101612662A[P]. 2009 – 12 – 30.

[14] Xie Jianxin (谢建新), Fu Huadong (付华栋), Zhang Zhihao (张志豪), *et al.* *A Kind of Method and Equipment for Fabricating High Silicon Steel Bar with Continuous Columnar Crystals*(一种高硅电工钢薄带的短流程高效制备方法): CN 201010195520.4[P]. 2010 – 05 – 31.

[15] Zhao Yong(赵 勇), Zhang Hong(张 鸿), Wang Zidong(王自东), *et al.* 连续柱状晶组织纯铜管的制备工艺及组织分析[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报), 2004, 14(S3): 80 – 84.

[16] Zhang H, Xie J, Wang Z. Fabrication of Pure Copper Rods Containing Continuous Columnar Crystals by Continuous Unidirectional Solidification Technology[J]. *Journal of University of Science & Technology Beijing*, 2004, 11(3): 240 ~ 244

[17] Xie Jianxin(谢建新), Lou Huafen(娄花芬), Wang Zidong(王自东), *et al.* *A Compact Process for the Forming of Precision Pipes of Copper and Copper Alloys*(铜及铜合金精密管材短流程制备工艺): CN ZL200710065281. 9[P]. 2009 – 06 – 10.

[18] Gan Chunlei(甘春雷), Liu Xuefeng(刘雪峰), Huang Haiyou(黄海友), *et al.* BFe10 – 1 – 1 合金管材连续定向凝固制备工艺及组织性能[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2010: to be published.

[19] DKI German Copper Institute Booklet. *Copper Nickel Alloys: Properties, Processing, Application*[EB//OL]. (2010-03-15) [2010-07-10]. http://www.copper.org/applications/cuni/txt_DKI.html, 2010.

[20] Li Xintao(李新涛), Guo Zhaoxiang(郭照相), Zhao Xiangwei(赵祥伟)*et al.* 一种白铜管坯的近终形连铸[J]. *Zhuzao*(铸造), 2007, 56(7): 691 – 693.

[21] Fu Y B, Yan Z M, Li T J, *et al.* Study on Plastic Behaviours of CuNi10Fe1Mn Alloy Tubes under Cast-Roll Process[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(10): 4 478 – 4 482.

[22] Xie Jianxin(谢建新), Mei Jun(梅 俊), Liu Xinhua(刘新华), *et al.* *A Kind of Process and Equipment for Fabricating Thin-Wall Cupronickel Pipes with Heating-Cooling Combined Mold Casting*(一种薄壁白铜管材冷热复合型水平连铸工艺与设备): CN 2010101955204[P]. 2010 – 10 – 10

[23] Davis J R. *Copper and copper alloys*[M]. Ohio: ASM International, 2001.

[24] Liu Xuefeng(刘雪峰), Xie Jianxin(谢建新), Ji Dengping(季灯平), *et al.* *A Kind of Method for Fabricating Cu – Al Alloy Wires by Continuous Unidirectional Solidification*(一种二元铝青铜线材连续定向凝固制备方法): CN 201010195520. 4[P]. 2006 – 01 – 06

[25] Ji Dengping(季灯平), Liu Xuefeng(刘雪峰), Xie Jianxin(谢建新), *et al.* Cu – 12% Al 铝青铜线材的连续定向凝固制备[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2006, 42(12): 1 243 – 1 247.

中法超导体与磁性材料应用实验室(LIA – LAS² M)

第六届双边研讨会在西安举行

2010 年 10 月 25 ~ 28 日, 中法超导体与磁性材料应用实验室第六届双边研讨会在西安隆重召开。会议由西北有色金属研究院党委书记张平祥教授主持。西北有色金属研究院、西北工业大学、法国约瑟夫傅立叶大学(UJF)和法国国家科研中心先进技术成形研究实验室(CRETA)等 70 多名科研人员参加了此次盛会。会上, 周廉院士回顾了中法实验室的交流合作和人才培养历程, 法方 B. Hebrat 教授总结了法方学术机构近 5 年间所取得的主要成就; 中法双方就 YB-CO 块材及涂层导体、Bi 系带材、低温超导线材等现代分析手段在材料研究中的应用等进行了深入的交流与讨论。大会共交流学术报告 30 篇。会议期间, 中法双方还就继续加强合作, 整合研究领域优势和联合研究生培养等方面进行了广泛的探讨, 并达成初步协议。会后法方代表团参观了西部超导科技公司, 对西北有色金属研究院在超导材料产业方面所取得的巨大发展表示钦佩, 并希望进一步加强与西北有色金属研究院在材料应用方面的深入合作。

中法超导体与磁性材料应用实验室(LIA – LAS² M)是在周廉院士、B. Hebrat 教授和 Rober Tournier 教授的积极倡导下于 2003 年 9 月在法国巴黎由两国政府签署文件正式成立, 双边研讨会每 2 年举行一次, 讨论双方在超导及磁性材料等研究领域的最新进展。迄今为止共举办 6 届。在此期间, 该实验室共培养中法博士 10 余人, 每年按照计划进行大量的中法双方访问交流, 极大地提升了双方超导和磁性材料的科研水平与实力, 受到了双方政府的高度评价。

(本刊通讯员)