

# 高性能管材二辊皮尔格冷轧成形 研究动态及存在问题\*

李恒<sup>1,2</sup>, 魏栋<sup>1,2</sup>, 杨恒<sup>1,2</sup>, 李光俊<sup>3</sup>, 张铎<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2. 西北工业大学材料学院材料成型及控制系, 西安 710072;

3. 航空工业成都飞机工业(集团)有限公司, 成都 610092)

**[摘要]** 如何实现高性能轻量化管材的成形性一体化协同制备一直是航空航天等先进制造领域迫切需要解决的关键难题之一。相比拉拔和挤压等工艺,二辊皮尔格冷轧兼具3向压应力和局部渐进增量成形的加载特点,具有大变形、表面质量好及尺寸精度高等优势,是高性能难变形材料管材制备最有效的手段之一。然而,皮尔格冷轧是一个多行程、非稳态和多因素、非线性的复杂成形过程,工艺流程和模具参数设计不合理或波动极易导致产品精度和性能出现严重波动。在简述二辊皮尔格冷轧成形原理和特点的基础上,着重从宏观不均匀变形和细观织构演变两个方面综述了二辊皮尔格冷轧成形的研究动态。基于上述研究动态分析,总结提出了实现二辊皮尔格冷轧过程成形性一体化协同控制尚待解决的科学问题和技术挑战。

**关键词:** 二辊皮尔格冷轧; 高性能难变形管材; 宏观不均匀变形; 细观织构; 协同控制

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.016



李恒

博士,教授,博士生导师,主要从事塑性变形宏微观失稳/缺陷预测、复杂板/管类构件精确高效成形方面的研究。主持国家自然科学基金5项、“十三五”装备预研3项以及“十三五”民机专项等课题,发表论文110余篇,合作撰写专著2部,获国家技术发明二等奖1项、省科技一等奖2项,授权国家发明专利13项(转化3项)、软件著作权13项。

管路系统是航空航天等领域高端装备中起流体传输等重要作用的关键轻量化构件,材料和规格种类繁多且量大面广。这一类构件在服役过程中往往长期处于高/低温、高压、振动或油气侵蚀等恶劣的环境当中,其性能的优劣将直接影响飞行器的安全和适航性能,因此管路系统也被称为航空航天飞行器的“血管类”零件和生命控制线<sup>[1-2]</sup>。如何实现这一类构件的高性能轻量化精确成形一直是国内外航空航天等先进制造领域迫切需要解决的关键难题之一。选用轻质高强管材是实现上述高性能轻量化管路构件成形制造的基础和前提<sup>[3]</sup>。然而,这样的管材所使用的高强钛合金和高强钢等是典型的

难变形材料<sup>[4]</sup>,且材料在多道次热力耦合制备中经历复杂的变形历程,使得成品管材的精度和性能难以满足后续成形和服役的要求,成形质量往往存在很大的波动。因此,如何实现难变形高性能管材成形性一体化协同制造是当前管材制备领域研究的前沿和需解决的难点问题。

管材的典型制备工艺主要包括拉拔、挤压和轧制成形。拉拔工艺制品虽然尺寸精度高且表面质量好,但由于管材在成形过程中受到拉应力为主的作用,导致其每道次加工率小、能量消耗较大,只适合制备强度低且直径很小的管材。挤压和普通轧制成形技术虽然保证了管材在成形过程中受到压应力为主的作用,但

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51522509; 51775441)。

是它们都属于一次成形,而高强度管材成形过程中变形抗力极大,极易造成成品塑性和冲击韧性变差以及残余应力显著增大<sup>[5-6]</sup>。周期式冷轧技术在19世纪80年代首次被提出并逐渐改进,发展为现今的二辊皮尔格冷轧成形技术,与其他制备工艺相比,管材整个二辊皮尔格冷轧过程中经历了压应力主导的增量局部加载作用,因此其具有变形量大、尺寸精度高、表面质量好、材料利用率高等优点,是众多管材尤其是难变形管材制备工艺中最有效的一种<sup>[7]</sup>。然而,二辊皮尔格冷轧又是一个局部加载下多行程和非稳态的复杂过程,材料在轧制过程中经历了复杂的外部加载路径、承受复杂的应力应变状态;尤其对于钛合金等具有密排六方结构的材料,其对称性低和各向异性显著的特点加剧了材料内部晶粒发生择优取向的几率,使管材所呈现的组织更为强烈<sup>[8]</sup>。因此,模具和工艺设计稍有不慎就会严重影响冷轧过程中管材的不均匀变形和组织分布,进而导致成品管精度和性能产生波动,对管材成形精确控制带来严峻的挑战。

本文分析讨论了二辊皮尔格冷轧成形技术国内外的研究动态。首先介绍了二辊皮尔格冷轧成形的原理和特点,然后综述了冷轧过程宏观不均匀变形特点和细观组织演变规律的研究进展,并分析总结了工艺条件和模具设计对宏观不均匀变形行为和细观组织演变影响规律的研究动态。针对上述研究中存在的不足,探讨了高性能管材二辊皮尔格冷轧过程成形性一体化协同控制尚待解决的问题。

## 二辊皮尔格冷轧成形原理和特点

图1为二辊皮尔格冷轧管机示意图<sup>[9]</sup>,在轧制过程中轧辊在工作机架的带动下作前后往复移动同时锥

形芯棒固定不动。轧辊圆周上开有截面直径不断变化的凹槽,芯棒直径沿轧制方向呈不断减小的趋势,轧辊凹槽与芯棒之间的环形间隙构成了轧制孔型,孔型开始位置的直径与管坯的直径相等,孔型末端的直径等于成品管的直径,管材在上下轧辊和芯棒的作用下持续变形<sup>[10]</sup>。

二辊皮尔格冷轧成形过程如图2所示<sup>[11]</sup>,在轧制过程中管材和芯棒在卡盘的限制下无法移动,轧辊从后极限位置移动到前极限位置的过程称为正行程,轧辊从前极限位置移动到后极限位置的过程称为反行程,一个正行程和反行程的组合称为一个轧制周期,轧辊如此重复往返从而实现管材周期轧制过程,其中管材的送进和回转就是在前、后极限位置完成的。由于轧制过程中孔型的变化,皮尔格冷轧过程也可以分为后回转段、工作段(变形压下段和精整段)和前回转段3个不同的阶段,其中前回转

段孔型直径大于管坯直径,后回转段孔型直径大于成品管直径,前、后回转段的作用主要是为了顺利实现管材的回转送进,这个过程中管材并无变形;在变形压下段管材发生减径减壁变形的同时长度伸长,而精整段主要对管材的内外径和圆度起到精整作用<sup>[12-13]</sup>。

## 宏观不均匀变形行为研究动态

复杂的外部加载条件使得管材在二辊皮尔格冷轧过程中发生了严重的不均匀变形,充分揭示和了解该过程管材不均匀变形特点及其影响因素,是提高成品管尺寸精度、避免表面裂纹等缺陷的前提。因此,国内外学者通过试验、解析以及数值模拟等手段,针对二辊皮尔格冷轧过程管材宏观不均匀变形行为开展了大量的研究。

### 1 试验研究

学者针对二辊皮尔格冷轧过程

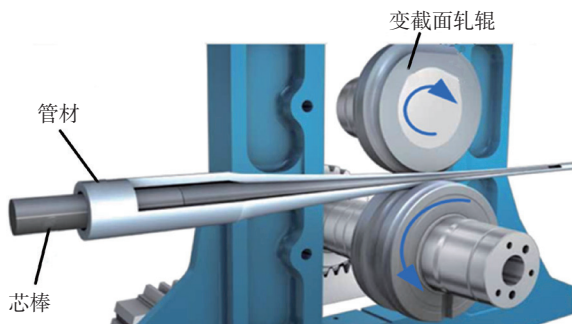


图1 二辊皮尔格冷轧管机示意图

Fig.1 Schematic of two-roller cold pilger rolling mill

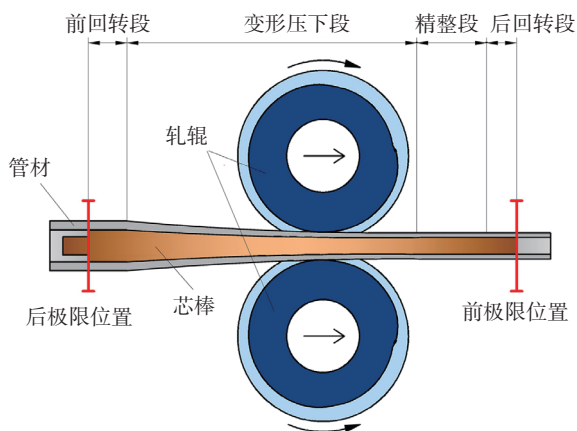


图2 二辊皮尔格冷轧成形过程示意图

Fig.2 Schematic view of two-roller cold pilger rolling

管材变形特点的研究最早是通过试验的方法来进行的, Yoshida 等<sup>[14]</sup>通过轧制试验的方法,首先在铜管的管坯表面划分网格,网格在经过轧制后发生变化,通过对网格的检测及计算得到了管材应变和不同位置的接触应力,并且在忽略剪切应力的前提下使用 Hencky 应力方程和 Huber-Mises 屈服准则计算出 3 个方向的主应力。Abe 等<sup>[15]</sup>以不锈钢管、钛合金管以及锆合金管为对象,研究了不同变形规格设计对冷轧过程中管材不均匀变形程度以及裂纹形成的影响规律,结果表明总变形量过大及径向变形量分配不合理极易导致成品管产生裂纹。为了降低轧机整体重量同时提高生产效率和成品质量, Pocięcha 等<sup>[16]</sup>对传统皮尔格冷轧管机进行了改进,设计和提出的一种新型二辊皮尔格冷轧管机如图 3 所示,其中轧辊和管材的运动均通过液压装置进行调节,通过试验和模拟相结合的方法分析了轧制过程管材的变形行为并验证了该型轧机的可行性。杨亚社等<sup>[17]</sup>研究发现在模具设计阶段如果孔型开口度过大会加剧 TA2 钛管脊部和侧边部材料的变形不均匀程度,导致管材外表面附加应力较高,同时也会造成管材轧制时产生外表面横向裂纹。

试验是研究管材轧制的一种必要手段,但是二辊皮尔格冷轧成形过

程和孔型几何形状的复杂性导致试验成本高且周期长,兼之试验研究可以获得的变形行为信息较少,所以通过试验研究二辊皮尔格冷轧不均匀变形行为的报道相对较少,且试验并不是揭示轧制过程中宏观变形行为演化规律的有效手段。

## 2 解析研究

为了克服试验研究的局限性,国内外学者通过建立解析模型对二辊皮尔格冷轧成形过程变形行为展开了研究。

Montmitonnet 等<sup>[18]</sup>以锆管为研究对象,忽略了管材在轧制过程中的旋转并把管材类比成薄板,建立了 2D 解析模型,通过该模型计算出孔型底部的法向应力,进而得到轧制力,但是得到的结果与实际轧制力数值有一定的差距。Furugen 等<sup>[19]</sup>在金属塑性变形原理的基础上,忽略了剪切应力和剪切应变,建立了二辊皮尔格冷轧锆管成形过程的解析模型,该模型通过 Hencky 应力方程和 Huber-Mises 屈服准则理论计算出了皮尔格轧制过程中的应力、应变和轧制力。Aubin 等<sup>[20]</sup>采用主应力法和类比分析,以锆管轧制试验为基础,考虑剪切应变并区分孔型的侧部和底部区域,建立了 3D 解析模型。该解析模型先通过几何分析计算各主方向的塑性形变增量并通过应力方程和屈服准则推算出各主应力的张

量,从而得到管材沿轧制方向的应力和应变。

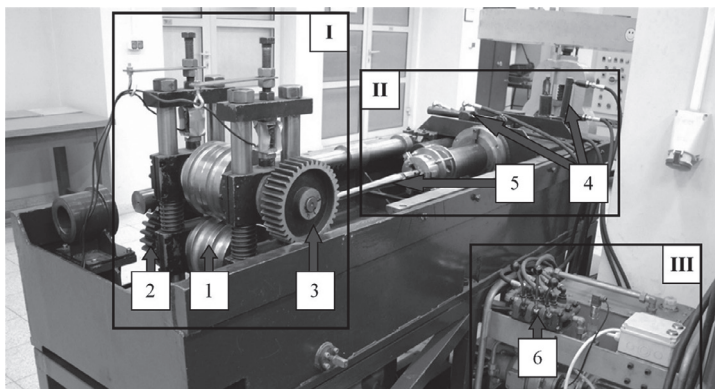
由于理论解析本身的局限性以及模型建立和分析推导过程中存在大量的简化和假设,从而导致解析结果的精度偏低。

## 3 数值模拟

数值模拟可以获得丰富的信息,且能够考虑多因素和复杂边界的影响,是当前二辊皮尔格冷轧成形宏观变形行为主流的研究方法。

Mulot 等<sup>[21]</sup>基于 LAM3 有限元软件,建立了锆管皮尔格冷轧过程的 3D 有限元模型,分析了一个轧制行程的应力和应变,得到了沿轧制方向的应力和应变分布状态。Montmitonnet 等<sup>[22]</sup>以 FORGE3 为平台,针对锆合金管皮尔格轧制建立了三维弹塑性有限元模型。该模型将周期循环运动直接作用在轧辊上,从而简化了管材皮尔格轧制中的曲柄-连杆-齿轮机构,分析了皮尔格轧制一个行程中管材的应力应变分布状态,并得到了皮尔格轧制多行程中管材上一点的应力应变变化规律以及材料流动轨迹,提出在皮尔格轧制过程中,管材上一点的应力变化规律为正负应力交替循环,极易导致低周疲劳和产生表面裂纹,而管材上一点的流动轨迹为螺旋式前进。

不同于单行程的有限元模拟和分析,黄亮等<sup>[23-24]</sup>建立了钛合金管材多行程皮尔格轧制三维有限元模型,如图 4 所示<sup>[22]</sup>,模型主要由管材、上下轧辊、芯棒以及推块构成,



注: 1—轧辊; 2—齿条; 3—传动齿轮; 4—送进和回转装置; 5—芯棒; 6—液压装置。

图3 新型二辊皮尔格冷轧管机

Fig.3 New generation of two-roller cold pilger rolling mill

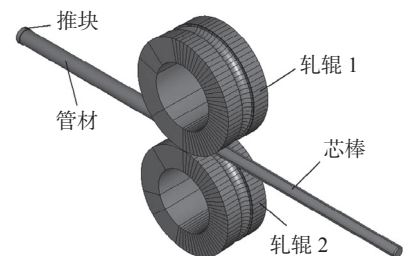


图4 二辊皮尔格冷轧有限元模型

Fig.4 Finite element model of two-roller cold pilger rolling

研究了轧成管圆周方向各向异性变化规律和工作锥径向塑性应变的变化规律。师开鹏<sup>[25]</sup>以TA18钛合金管材为研究对象,利用ABAQUS有限元软件分析了二辊皮尔格冷轧过程的不均匀变形特点。楚志兵等<sup>[26]</sup>以不锈钢管为研究对象,研究了不锈钢管的两辊冷轧过程,采用DEFORM-3D有限元模拟软件,建立了一个道次完整轧制过程的三维有限元模型,并利用两辊轧机进行轧制试验验证了回弹预测模型的可靠性与正确性。

通过上述研究总结得出二辊皮尔格冷轧成形宏观不均匀变形特点如图5所示<sup>[25]</sup>,图5(a)~(c)为不同变形阶段管材横截面主应力分布,图5(d)为轧制全过程主应变变化,从图5(a)~(c)中可以看出,在初始减径阶段,孔型轧槽底部管材受到三向压应力状态,而在孔型侧壁开口处,管材受到径向和周向两向压应力及轴向拉应力的应力状态。在减径减壁阶段,孔型轧槽底部管材均处于三向压应力状态,而且径向应力大于周向和轴向应力,在孔型侧壁开口处,管材受到两向压应力和轴向一向拉应力。上述研究结果还表明管材在轧制过程中经历了复杂的拉压循环加载的过程。当进入精整段时,管材受两向压应力和一向拉应力的区域增大。从图5(d)中可以得出在整个轧制过程中,轴向应变为正应变且逐渐增大,表明管材长度得到伸长;而周向和径向应变为负值表明管材直径和壁厚减小。

为了提高有限元模拟计算效率和精度,有关学者针对该过程的建模关键技术进行了研究。Lodej等<sup>[27]</sup>以二辊皮尔格冷轧铝管为研究对象,根据孔型曲线预制管材变形段并用于模拟计算,待少量几个轧制行程后管材变形即趋于稳定,并且认为此时的应力应变状态与实际结果基本吻合,从而提高了计算效率。Strickner

等<sup>[28]</sup>基于SIMUFACT有限元软件,建立了无缝不锈钢管冷轧的三维弹塑性有限元模型,该模型通过编写子程序并嵌入有限元软件中来精确控制轧辊周期式的循环运动,并且根据管材延伸率及送进量,计算出每一行程轧辊运动的前极限位置,该方法简化了管材轧制运动过程,缩短了计算时间,提高了计算效率。Yagiz等<sup>[29]</sup>研究发现轧辊的变形对接触区长度、轧制力以及成品管精度有显著影响,在有限元建模时将轧辊设置为弹性体并划分网格,通过试验对比发现该模型可以更加准确预测二辊皮尔格冷轧成形过程中的轧制力和应力应变状态。Deng等<sup>[30]</sup>以Zr-4管为研究对象,建立材料模型时考虑了应变速率和温度对材料硬化行为的影响,并对试验和模拟得到的轧制力和管材尺寸进行对比,结果验证了该模型的可靠性。

#### 4 宏观不均匀变形影响因素

国内外学者在揭示二辊皮尔格冷轧宏观不均匀变形影响规律和影响因素方面开展了大量研究。

Abe等<sup>[31]</sup>研究了不同工艺参数对轧制过程中油膜厚度以及润滑条件对管材精度的影响,基于雷诺方程提出一种新的润滑计算方法,并给出冷轧过程中不同送进量和轧制速度等工艺参数条件下所需润滑状态的计算方法。刘江林等<sup>[32]</sup>基于DEFORM-3D平台,建立了TA18钛管两辊冷轧成形有限元模型,分析了成形过程中金属的流动情况、管材的应力应变分布和成形载荷。结果表明:增大轧制速度和摩擦系数将引起径向拉应变和周向压应变的减小,增加送进量则使得两者均增大。此外,送进量和摩擦系数增大会显著增加成形载荷。Abe等<sup>[33]</sup>对皮尔格冷轧过程中影响管材尺寸精度及椭圆度的轧制工艺条件进行了分析,结果表明轧制过程中送进量和回转角度对成品管尺寸有较为显著的影响而轧制速度对成品管的尺寸精度影响并不明显。

Randall等<sup>[34]</sup>讨论了孔型侧壁间隙对成品管尺寸精度的影响,揭示了合理的设计侧壁间隙是保证成品

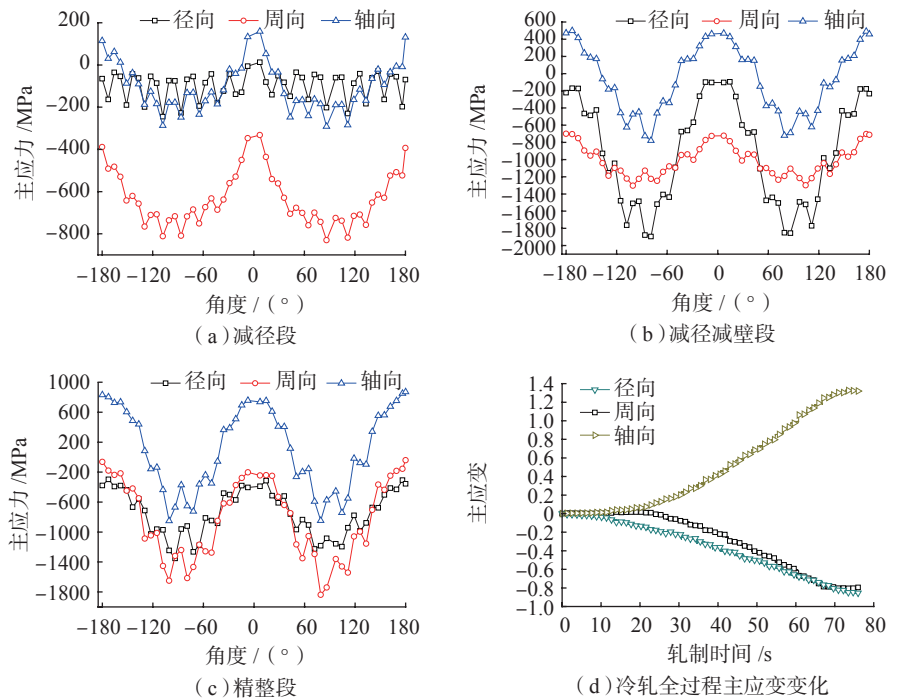


图5 二辊皮尔格冷轧不均匀变形特点  
 Fig.5 Inhomogeneous deformation characteristics of two-roller cold pilger rolling

管尺寸精度重要的手段之一。Zhang 等<sup>[35]</sup>通过以 ABAQUS 为平台,通过模拟不同模具设计下的二辊皮尔格冷轧铝合金管的成形过程,分析了模具设计参数对冷轧成形过程中不均匀变形行为、轧制力及成品管表面质量的影响规律,同时提出了孔型侧壁间隙是影响成品管质量最为重要的因素。

### 微观变形织构演变研究动态

对于密排六方结构(HCP)金属管材,二辊皮尔格冷轧过程中管材经历了复杂的外部加载条件,且密排六方结构金属的低对称性和显著各向异性,加剧了轧制过程中内部晶粒发生择优取向的几率,进而产生严重的变形织构,使得管材表现出强烈的各向异性,其力学性能(屈服强度、延伸率等)、成形性能和服役性能差异较大,不同轧制工艺可能产生不同的变形织构分布,从而严重影响管材性能,易导致管材性能波动大<sup>[36-37]</sup>。因此,国内外学者密切关注二辊冷轧过程中的管材织构演变规律。

#### 1 试验研究

目前研究人员多采用电子背散射衍射技术 EBSD (Electronic Back-Scattered Diffraction) 和 X 射线衍射法 XRD (X-Ray Diffraction) 等研究成形过程的织构演变规律。

Krishna<sup>[38]</sup>、Gurao<sup>[39]</sup> 和 Singh 等<sup>[40]</sup>对二辊皮尔格冷轧成形过程织构演变特征进行了研究,如图 6 所

示,结果表明管材在经过冷轧成形后,起初平行于管材轴向和周向的晶粒  $c$  轴朝管材径向偏转,从而使成品管呈现较强的径向织构。杨磊<sup>[41]</sup>通过 EBSD 试验测定了 TA18 钛管横截面和展开面的织构分布,并用 Kearns 因子进行定量表征,结果显示晶粒出现了明显的择优取向,其中基极(晶粒  $c$  轴)主要沿管材径向分布。

陈洪美等<sup>[42]</sup>分析了冷轧变形量和开坯道次变形量对 TC4 钛合金织构的影响。结果表明,在 TC4 管材冷轧过程中极点在(ND-TD)平面上逐渐偏向 ND 方向排列,并且取代了原始态的织构,轧制完成后极图密度最大值出现在(ND-TD)平面的 ND 方向附近。陈逸等<sup>[43]</sup>分析了 TA18 钛管两辊冷轧的微观组织和织构演变规律,结果表明 TA18 钛管在轧制过程中主要变形机制为滑移变形,初始阶段的轧制变形主要以  $\{10\bar{1}0\}$  柱面滑移为主,并且随着轧制变形量的增大,基面滑移代替柱面滑移成为主要的变形机制,并且锥面滑移逐渐开动;当变形量进一步增大时,锥面滑移代替基面滑移成为主要变形机制,管材最终织构以锥面织构为主。

#### 2 模拟预测

为了降低研究成本并且提高效率,研究人员开始利用晶体塑性模型来预测成形过程中的织构演变规律<sup>[44]</sup>。

Lebensohn 等<sup>[45]</sup>将多晶体自适

应本构模型应用于金属的塑性变形过程中,提出了粘塑性自洽模型即 VPSC 模型,该模型考虑了材料的各向异性、滑移和孪生两种金属塑性变形机制,采用 PTR (Predominant Twin Reorientation) 晶粒旋转计算方法 和 VFT (Volume Fraction Transfer) 晶粒取向体积分数计算方法可以定量描述晶粒取向的转变以及变形过程中的织构演变。Lebensohn 等<sup>[46]</sup>基于 VPSC 模型通过静态速度梯度模拟了铝合金管材多道次冷轧过程的织构演化,并与试验结果对比,且两者吻合较好。然而,采用静态速度梯度无法表征整个轧制过程中的变形特征,因而无法揭示整个轧制过程中的织构演化规律。

张海芹<sup>[47]</sup>和 Li 等<sup>[48]</sup>在 Walde<sup>[49]</sup>和 Segurado 等<sup>[50]</sup>的研究基础上,通过耦合有限元模型和 VPSC 模型,成功建立了高强 TA18 钛管皮尔格两辊冷轧过程织构预测平台;研究了高强 TA18 钛管在不同外部载荷下织构演化与变形机制的关联关系,分析了二辊皮尔格冷轧过程中管材的织构演变规律,以应变比来表征管材在轧制过程中的变形模式并揭示了织构演变与应变比之间的关系,轧制过程中管材织构演变规律及其与应变比之间的关系如图 7 所示,结果表明高强 TA18 钛管晶粒  $c$  轴在轧制过程中向最大压应变方向择优排列,且若要得到径向织构,应变比应控制在  $0^\circ \sim 60^\circ$  的范围内变化,该研究成果对实现管材制备的成形成性一体化提供了借鉴。

#### 3 织构演变影响因素

国内外学者提出了以道次中相对减壁量与相对减径量的比值( $Q$  值)作为表征二辊皮尔格冷轧过程中管材变形模式的指标, $Q$  值计算公式为:

$$Q = \frac{\ln(t/T)}{\ln(d/D)} \quad (1)$$

式中,  $t$  和  $d$  分别为轧后成品管的壁

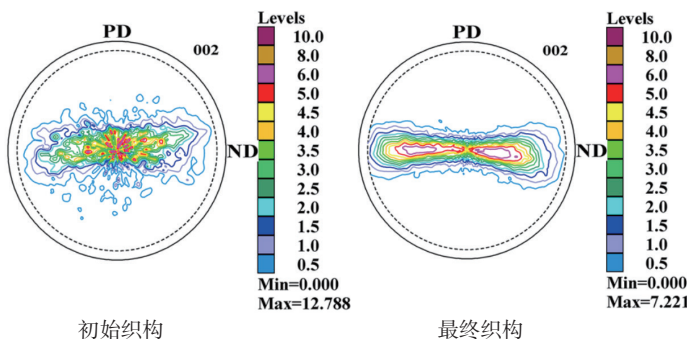


图6 二辊皮尔格冷轧前后管材极图

Fig.6 Pole figures of tube before and after two-roller cold pilger rolling

厚和外径,  $T$  和  $D$  分别为轧前管坯的壁厚和外径。

有学者以铝管为研究对象分析了  $Q$  值对织构演变的影响规律<sup>[51-53]</sup> (图 8), 研究结果均表明  $Q$  值是成品管材织构分布最重要的影响因素之一, 当  $Q > 1$  时, 大部分晶粒  $c$  轴平行于管材径向从而使管材呈现径向织构, 而当  $Q < 1$  时, 大部分晶粒  $c$  轴平行于管材周向从而使管材呈现周向织构。陈胜川等<sup>[54]</sup> 通过研究不同  $Q$  值对小规格铝管织构和性能的影响, 提出  $Q$  值越大, 晶粒纤维化和取向就越明显, 当  $Q$  值控制在 1.54~2.46 的范围内, 管材具有良好的综合性能。

Ubhi 等<sup>[55]</sup> 通过改变减径量和减壁量的分配设计了不同的孔型曲线并进行了轧制试验, 分析了 TA18 钛管二辊皮尔格冷轧织构演变规律, 研究结果表明管材经过冷轧变形后, 其织构分布以径向织构分布为主, 并且可以通过改变模具设计来改变变形路径以增加径向织构密度。周宇等<sup>[56]</sup> 以 Zr-2.5Nb 铝合金管为研究对象, 研究了铝合金中第二相相对管材两辊冷轧过程中织构演变规律, 由于第二相能够阻碍晶粒的旋转和孪生, 从而影响了管材的织构演变, 进而影响轧制管材的最终织构分布。此外还有学者研究了道次间热处理对织构演变的影响<sup>[57-58]</sup>, 结果表明再结晶退火并不能完全消除冷轧形成的织构, 相反  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  和  $\langle 0001 \rangle$  织构会在热处理的过程中得到强化。

### 发展趋势及挑战

当前航空航天领域高端装备的快速发展, 迫切要求管路构件朝着高精度、高性能、高功效和轻量化的方向发展, 因此具有优异综合性能的高强钛合金管等轻质高强管材必将作为优选材料而逐步获得广泛应用, 同时也亟待发展具有薄壁结构的该类管材的精确成形制造技术。

二辊皮尔格冷轧成形技术因其成形质量好、生产效率高等优势成为实现航空航天等领域高端装备用管路构件精确成形制造极具前景的先进技术。

然而, 二辊皮尔格冷轧成形过程复杂, 成形参数众多且复杂, 材料、几何和接触三重非线性相互耦合, 导致成形过程难以控制进而造成产品精度及性能存在波动, 实现上述难变形薄壁管材二辊皮尔格冷轧成形一体化协同控制尚存在的挑战与问题。

(1) 航空航天等领域难变形管材在制备过程中往往经历热力耦合

多道次的不均匀变形累积过程, 而目前针对二辊皮尔格冷轧过程宏观不均匀变形和细观织构的研究主要集中在单一行程或单一道次, 迫切需要研究获得多道次轧制和中间热处理过程的宏观不均匀变形和微观组织演变规律。

(2) 轧制过程中宏观不均匀变形行为和细观织构演变之间的关系尚不明确, 并且晶粒尺寸和残余应力也是影响成品管材成形性能和服役性能的重要指标, 针对二辊皮尔格冷轧过程中管材宏观变形的关联关系以及实现对晶粒尺寸和残余应力的精确控制尚待深入研究。

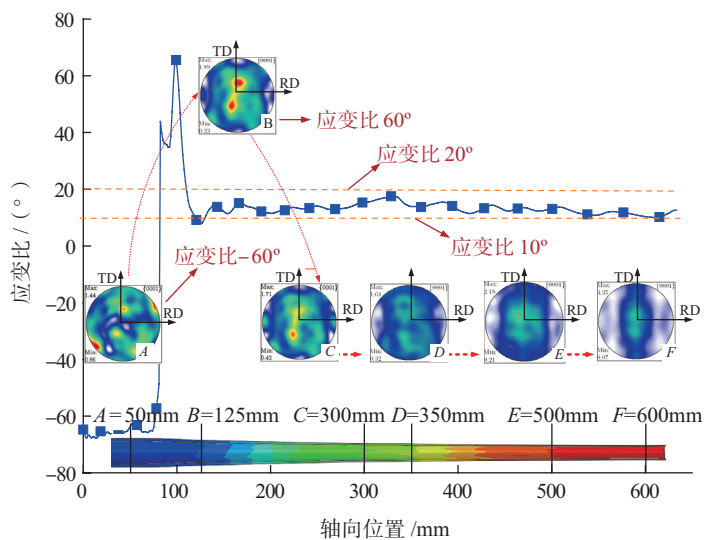


图7 二辊皮尔格冷轧织构演变规律  
Fig.7 Texture evolution of tube during cold pilgering

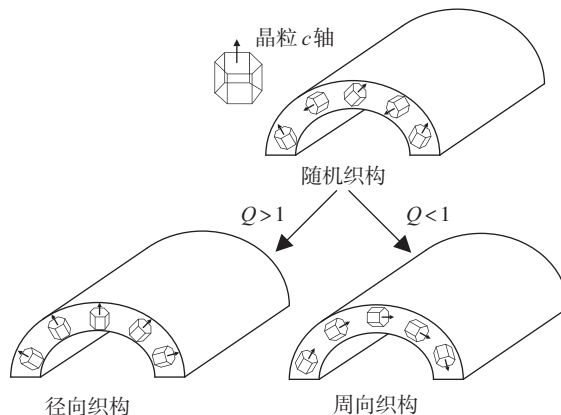


图8 管材织构与  $Q$  值关系  
Fig.8 Relationship between texture and  $Q$  value

(3) 缺乏涉及能准确预测轧制过程管材不均匀变形及组织演变的宏观建模方法以及轧制全过程工艺条件优化设计方法;且目前设计指标较为单一,其中 $Q$ 值只能表征单个道次中整体的变形模式,不能全面反映管材在轧制过程中的三维空间不均匀变形和流动特征,而诸如单个道次整体变形量、变形量分配以及道次间热处理方案都会显著影响轧制过程中的不均匀变形及组织演变,迫切需要发展二辊皮尔格冷轧全过程宏观数值预测平台以及建立全面的设计指标并实现工艺条件优化设计。

### 结论

(1) 针对高性能管材在航空航天等领域高端装备中起到的关键作用,以及二辊皮尔格冷轧成形先进工艺,本文在对成形过程材料宏观不均匀变形行为和细观组织演变的研究进展论述的基础上,评述了工艺条件和模具设计对轧管宏观不均匀变形行为和细观组织演变的影响规律和机理。

(2) 探讨了关于实现二辊皮尔格冷轧过程形成性一体化协同控制尚待解决的关键问题与挑战,主要包括:轧制全过程宏观变形与细观组织演变规律尚不明确;宏观变形与细观组织演变关系及晶粒尺寸和残余应力对管材性能的影响有待深入研究;迫切发展冷轧全过程宏观数值预测平台及工艺条件优化设计方法。

### 参考文献

[1] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 中国材料进展, 2006, 25(1): 17-21.  
 CAO Chunxiao. Applications of titanium alloys on large transporter[J]. Materials China, 2006, 25(1): 17-21.  
 [2] YANG H, LI H, ZHANG Z Y, et al. Advances and trends on tube bending forming technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics,

2012, 25(1): 1-12.

[3] 杨合, 孙志超, 詹梅, 等. 局部加载控制不均匀变形与精确塑性成形[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

YANG He, SUN Zhichao, ZHAN Mei, et al. Control of unequal deformation by locally loading and theories related to precision plastic forming[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[4] 王森, 李恒, 张海芹, 等. 高强TA18钛管数控弯曲构演变数值模拟[J]. 精密成形工程, 2017(1): 53-58.

WANG Sen, LI Heng, ZHANG Haiqin, et al. Texture evolution prediction of high strength TA18 titanium alloy tube in bending[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017(1): 53-58.

[5] 孙博, 邱明星, 田静, 等. 航空发动机用钛合金外部管路设计及工艺研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(23/24): 124-128.

SUN Bo, QIU Mingxing, TIAN Jing, et al. Research on design and process of external titanium alloy tube for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(23/24): 124-128.

[6] LI H, YANG H, ZHANG Z. 5.16-Hot tube-forming[J]. Comprehensive Materials Processing, 2014, 5: 321-350.

[7] 王森. TC4钛管两辊冷轧变形和组织演变数值模拟研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.

WANG Sen. Numerical study on deformation and texture evolution of TC4 tube during two-roller cold rolling[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.

[8] LI H, HU X, YANG H, et al. Anisotropic and asymmetrical yielding and its distorted evolution: modeling and applications[J]. International Journal of Plasticity, 2016, 82: 127-158.

[9] SMS. Seamless tube plants[EB/OL]. [2014-02-14]. <http://www.sms-meer.com/en/news-media/publications/tube-plants.html>.

[10] 双远华. 现代无缝钢管生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

SHUANG Yuanhua. Modern seamless steel tube production technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

[11] 魏栋. 二辊皮尔格冷轧不锈钢管工艺模型建立及组织演变研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2017.

WEI Dong. Establishment of process parameters model and microstructure evolution of two-roller cold pilger rolled stainless steel tube[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2017.

[12] STINNERTZ H. Cold reducing of non-ferrous metal tubes by the cold-pilgering process[J]. Tube Pipe Technology, 1988, 2(7): 27-31.

[13] CHU Z B, WEI D, JIANG L Y, et al. Numerical model establishment and verification of cold pilgering on cycle feed rate[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(4): 398-408.

[14] YOSHIDA H, MATSUI T, OTANI T, et al. Experimental investigation of the cold pilgering of copper tubes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1975, 24: 191-197.

[15] ABE H, FURUGEN M. Method of evaluating workability in cold pilgering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(8): 1687-1693.

[16] POCIECHA D, BORYCZKO B, OSIKA J, et al. Analysis of tube deformation process in a new pilger cold rolling process[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2014, 14(3): 376-382.

[17] 杨亚社, 罗登超, 马小菊, 等. TA2钛管表面横向轧制裂纹研究[J]. 锻压技术, 2016, 41(4): 64-67.

YANG Yashe, LUO Dengchao, MA Xiaoju, et al. Study on transverse rolling cracks of tube TA2[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(4): 64-67.

[18] MONTMITONNET P, FARRUGIA D, AUBIN J L, et al. Internal surface roughness of cold pilgered zircaloy tubes[J]. Wear, 1992, 152(2): 327-342.

[19] FURUGEN M, HAYASHI C. Application of the theory of plasticity to the cold pilgering of tubes[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1984, 10: 273-286.

[20] AUBIN J L, GIARD E, MONTMITONNET P. Modeling of damage in cold pilgering[C]//Zirconium in the Nuclear Industry: Tenth International Symposium. Baltimore, 1994.

[21] MULOT S, HACQUIN A, MONTMITONNET P. A fully 3D element simulation of cold pilgering[J]. Journal of

- Materials Processing Technology, 1996, 60: 505-512.
- [22] MONTMITONNET P, LOGE R, HAMERY M, et al. 3D elastic-plastic finite element simulation of cold pilgering of zircaloy tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126(2): 814-820.
- [23] 黄亮, 徐哲, 代春, 等. TA18 钛合金管材多行程皮尔格冷轧过程三维有限元模拟: I 理论解析、模型建立与验证[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 524-529.
- HUANG Liang, XU Zhe, DAI Chun, et al. Three-dimensional FE simulation of multi-strokes cold pilgering of TA18 titanium alloy tube: I theoretical analysis, modeling and validation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3): 524-529.
- [24] 黄亮, 徐哲, 代春, 等. TA18 钛合金管材多行程皮尔格冷轧过程三维有限元模拟: II 塑性变形行为分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(4): 741-745.
- HUANG Liang, XU Zhe, DAI Chun, et al. Three-dimensional FE simulation of multi-strokes pilgering cold roll of TA18 titanium alloy tube: II analysis of plastic deformation behavior[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(4): 741-745.
- [25] 师开鹏. 高强 TA18 钛管二辊冷轧全过程宏观变形数值预测方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- SHI Kaipeng. Numerical prediction of macroscopic and microscopic deformation behaviors during whole process of tube cold pilgering[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.
- [26] 楚志兵, 吕阳阳, 黄庆学, 等. 皮尔格轧机冷轧不锈钢管回弹预测模型的建立与验证[J]. 工程科学与技术, 2015, 47(2): 165-171.
- CHU Zhibing, LÜ Yangyang, HUANG Qingxue, et al. Establishment and verification of pilger mill cold rolled stainless steel tube springback prediction model[J]. Advanced Engineering Sciences, 2015, 47(2): 165-171.
- [27] LODEJ B, NIANG K, MONTMITONNET P, et al. Accelerated 3D FEM computation of the mechanical history of the metal deformation in cold pilgering of tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1-3): 188-191.
- [28] STRICKNER G, RAGGER K S, HATZENBICHLER T, et al. 3D finite element simulation of cold pilgering over the whole productive time[J]. Steel Research International, 2012, 14: 71-74.
- [29] YAGIZ A, MATTIAS G, BENGT S, et al. Finite element analysis of cold pilgering using elastic roll dies[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 2370-2375.
- [30] DENG S, SONG H, ZHENG C, et al. A model to describe hardening behavior of zircaloy-4 tube during cold pilgering process[J/OL]. International Journal of Material Forming, 2018, 1-9[2018-05-22]. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12289-018-1420-9>.
- [31] ABE H, NOMURA T, KUBOTA Y. Lubrication of tube in cold pilgering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1627-1637.
- [32] 刘江林, 曾卫东, 杜子龙, 等. 冷轧工艺参数对 TA18 钛合金管材金属流动及成形载荷的影响规律[J]. 钛工业发展, 2015, 32(3): 21-25.
- LIU Jianglin, ZENG Weidong, DU Zilong, et al. The influence rule of rolling process parameters on metal flow and forming load of TA18 alloy tube during cold rolling[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(3): 21-25.
- [33] ABE H, IWAMOTO T, YAMAMOTO Y, et al. Dimensional accuracy of tubes in cold pilgering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 277-287.
- [34] RANDALL S N, PRIEUR H. Tubular production in the cold pilger machine[J]. Iron Steel Engineering, 1967, 44: 109-117.
- [35] ZHANG H Q, WANG X F, WEI B L, et al. Effect of tooling design on the cold pilgering behavior of zircaloy tube[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(3): 1-15.
- [36] CHOI Y, SHIN E J, INOUE H. Study on the effect of crystallographic texture on the corrosion behaviour of pilgered zirconium by neutron diffraction[J]. Physica B: Physics of Condensed Matter, 2006, 385: 529-531.
- [37] MURTY K L, CHARIT I. Texture development and anisotropic deformation of zircaloys[J]. Progress in Nuclear Energy, 2006, 48(4): 325-359.
- [38] KRISHNA K V M, SAHOO S K, SAMAJDAR I, et al. Microstructural and textural developments during zircaloy-4 fuel tube fabrication[J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 383(1-2): 78-85.
- [39] GURAO N P, AKHIANI H, SZPUNAR J A. Pilgering of zircaloy-4: experiments and simulations[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 453(1-3): 158-168.
- [40] SINGH J, MAHSEH S, KUMAR G, et al. Texture development and plastic deformation in a pilgered zircaloy-4 tube[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2015, 46(5): 1927-1947.
- [41] 杨磊. TA18 钛合金管材结构的研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2011.
- YANG Lei. Study on the texture of TA18 titanium alloy tubes[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2011.
- [42] 陈洪美, 臧千昊, 张静, 等. 冷轧 TC4 钛合金管材的组织研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(10): 1012-1015.
- CHEN Hongmei, ZANG Qianhao, ZHANG Jing, et al. Texture of TC4 titanium alloy tubes processed by cold rolling[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(10): 1012-1015.
- [43] 陈逸, 李金山, 孙峰, 等. 冷轧 TA18 管材变形过程中微观组织及结构[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(1): 35-39.
- CHEN Yi, LI Jinshan, SUN Feng, et al. Investigation of the microstructure and texture of TA18 tubes during cold-rolling process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(1): 35-39.
- [44] FRYDRYCH K, KOWALCZYK-GAJEWSKA K. Microstructure evolution in cold-rolled pure titanium: modeling by the three-scale crystal plasticity approach accounting for twinning[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2018, 49(8): 3610-3623.
- [45] LEBENSOHN R A, TOME C N. A Self-consistent anisotropic approach for the simulation of plastic deformation and texture development of polycrystals: application to zirconium alloys[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(9): 2611-2624.
- [46] LEBENSOHN R A, GONZALEZ M I, TMOE C N, et al. Measurement and prediction of texture development during a rolling sequence of zircaloy-4 tubes[J]. Journal

of Nuclear Materials, 1996, 229(95): 57-64.

[47] 张海芹. 高强 TA18 钛管冷轧织构演变与控制的数值模拟研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.

ZHANG Haiqin. Texture evolution and controlling of high strength TA18 titanium alloy tube during cold pilgering: numerical study[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

[48] LI H, ZHANG H Q, YANG H, et al. Anisotropic and asymmetrical yielding and its evolution in plastic deformation: titanium tubular materials[J]. International Journal of Plasticity, 2017, 90: 177-211.

[49] WALDE T, RIEDEL H. Simulation of earing during deep drawing of magnesium alloy AZ31[J]. Acta Materialia, 2007, 55(3): 867-874.

[50] SEGURADO J, LEBENSOHN R A, LLORCA J, et al. Multiscale modeling of plasticity based on embedding the viscoplastic self-consistent formulation in implicit finite elements[J]. International Journal of Plasticity, 2012, 28(1): 124-140.

[51] GIRARD E, GUILLEN R,

WEISBECKER P, et al. Effect of plastic shearing on damage and texture on zircaloy-4 cladding tubes: experimental and numerical study[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 294(3): 330-338.

[52] SINGH J, MAHSEH S, ROY S, et al. A miniature physical simulator for pilgering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 126-138.

[53] 洪权, 戚运莲, 赵彬, 等. 不同  $Q$  值冷轧对 TA18 钛合金管材织构及力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(2): 16-19.

HONG Quan, QI Yunlian, ZHAO Bin, et al. Influence of cold rolling with different  $Q$  values on textures and mechanical properties of high strength TA18 titanium alloy tubes[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(2): 16-19.

[54] 陈胜川, 朱宝辉, 袁红军, 等.  $Q$  值对 Gr.9 钛合金冷轧管材组织及性能的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(5): 25-29.

CHEN Shengchuan, ZHU Baohui, YUAN Hongjun, et al. Effect of  $Q$  parameter on microstructure and properties of the cold-rolled Gr.9 titanium alloy tubes[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(5): 25-29.

[55] UBHI H S, HOUGHTON A, SAITHALA J. An EBSD study of texture variation along pilger reduced titanium alloy tubes[J]. Materials Science Forum, 2011, 702-703: 643-646.

[56] 周宇, 栾佰峰, 贾明星. 钛合金管材加工过程中的织构研究[J]. 材料导报: 网络版, 2011(4): 4-9.

ZHOU Yu, LUAN Baifeng, JIA Mingxing. Research progress of texture developments during fabrication of zirconium alloy tube[J]. Materials Review: Online Edition, 2011(4): 4-9.

[57] DAVIES R W, KHALEEL M A, KINSEL W C, et al. Anisotropic yield locus evolution during cold pilgering of titanium alloy tubing[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2002, 124(2): 125-134.

[58] LIU C, LI G, CHU L, et al. Texture and yielding anisotropy of zircaloy-4 alloy cladding tube produced by cold pilger rolling and annealing[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 719: 147-154.

通讯作者: 李恒, E-mail: liheng@nwpu.edu.cn.

## Two-Roller Cold Pilger Rolling of High-Performance Tube: A Critical Review

LI Heng<sup>1,2</sup>, WEI Dong<sup>1,2</sup>, YANG Heng<sup>1,2</sup>, LI Guangjun<sup>3</sup>, ZHANG Duo<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Department of Materials Forming and Control Engineering, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** How to achieve the synchronous coordinating of dimensional and properties of high-performance and lightweight tubes has been a key issue in advanced manufacturing in many high-end industries such as aerospace. As one of preferred fabrication technologies for hard-to-deform tubes in aerospace industry, two-roller cold pilger rolling has unique advantages of large deformation, fine surface, and close dimensional tolerance since materials are incrementally subjected to triaxial compressive stress dominated local loading compared with drawing and extrusion, etc. However, the cold pilgering is a multi-stroke, non-steady, nonlinear and multi-factor coupling physical process. Unsuitable processing parameters may significantly affect both inhomogeneous deformation and texture evolution, thus easily resulting in the fluctuation of dimensions and properties of final tube product. The principle and characteristics of two-roller cold pilger rolling are firstly introduced, and then the studies on macro inhomogeneous deformation and micro texture evolution during cold pilger rolling are reviewed. The challenges on the synchronous coordinating of dimensions and properties of tubular materials during two roller cold pilger rolling are attempted to be summarized.

**Keywords:** Two-roller cold pilger rolling; High-performance and hard-to-deform tube; Macro inhomogeneous deformation; Micro texture; Synchronous coordinating

(责编 海山)