

·综述与进展·

关于火山碎屑岩熔结过程的讨论及国内外研究现状综述

曹园园 李霓 张柳毅

(中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京 100029)

摘要:对国内外关于火山碎屑岩熔结过程的研究历史做出了简要回顾,对与熔结过程相关的术语进行了归纳和说明,进一步探讨了熔结过程中出现的结构构造。此外,分别从野外调查和室内实验两方面总结了火山碎屑的熔结机理,对其研究意义做出主要说明,以期引起国内对火山作用中的火山碎屑物及碎屑流熔结过程研究的重视,以便更好地理解火山的喷发作用和重建火山喷发历史等火山学研究中的重要问题。

关键词:火山碎屑岩;结构构造;熔结过程;熔结机理

中图分类号:P588.21

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2013)02-0239-12

A discussion on the welding process of pyroclastic rocks and a review of its present research state both in China and abroad

CAO Yuan-yuan, LI Ni and ZHANG Liu-yi

(Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper briefly reviews the research history of the welding process of volcanic pyroclastic materials both in China and abroad, sums up and explains the terms related to the welding process and, furthermore, discusses the textures and structures that occur in the process. In addition, the authors also try to summarize the welding mechanism of the pyroclastic rocks from both field investigations and indoor experiments and deal emphatically with the research significance, so as to arouse more attention to the pyroclastic materials in volcanic activities and related welding process among researchers in China, thus helping understand the volcanic eruption effect and rebuild the eruption history.

Key words: pyroclastic rocks; texture and structure; welding process; welding mechanism

火山碎屑岩是介于火山熔岩和沉积岩之间的一种复杂的岩石类型(孙善平等,2001),通常指在火山爆发中产生的岩石碎屑和熔岩碎屑(Sparks & Walker, 1973)。火山碎屑岩的熔结过程及其熔结程度对理解和研究火山的喷发历史及其演化规律有很重要的作用。目前为止,国内仅有少数学者做过这方面的专门研究(杜杨松,1990;谢家莹,1994a;谢家莹,1995;李有柱,1995;陈懋弘,1997;朱世发

等,2012),国外很多学者则做了大量的研究工作(Smith, 1960a, 1960b; Borsi *et al.*, 1963; Schmincke & Swanson, 1967; Wolff & Wright, 1981; Fisher & Schmincke, 1984; Branney *et al.*, 1992; Kobberger & Schmincke, 1999; Carey *et al.*, 2008a, 2008b; Boyce & Gertisser, 2012)。

在火山喷发过程中,火山碎屑岩的熔结和沉积过程的不同导致喷发沉积物在岩相上的变化,从而

收稿日期:2012-11-01;修订日期:2012-12-31

基金项目:中国地震局地震行业专项“中国地震活断层探索-南北地震带中南段”项目(201108001)子课题“云南腾冲火山地质填图”的资助

作者简介:曹园园(1989-),女,汉族,在读硕士,地球化学专业,E-mail:905368073@qq.com。

反映碎屑物质在运移、分离、沉积阶段的特征(Streck & Grunder, 1995; Freundt, 1999)。熔结过程中出现的变形机制包括压实作用和颗粒间的剪切作用(Fisher & Schmincke, 1984; Branney & Kokelaar, 1992; Carey *et al.*, 2008b) 熔结速率反映了沉积物的聚合流变性质(Quane *et al.*, 2009), 而熔结作用的发生在熔结凝灰岩中十分普遍(Smith, 1960a, 1960b; Riehle, 1973; 万汉钟, 1983; Cas & Wright, 1987; 钟华邦, 1991; Streck & Grunder, 1995; 王璞君等, 2007)。熔结凝灰岩的一个重要特征是在其就位时具有一定的温度, 所以一些新生成的碎屑, 如浮岩碎屑、玻屑等会熔结在一起(Wilson & Hildreth, 2003)。熔结凝灰岩的物理性质主要受其熔结程度控制, 即熔结程度越高密度越大, 气孔含量越低, 其抗压强度也就越大。因此, 熔结凝灰岩通常被用作建筑材料(Koralay *et al.*, 2011)。火山碎屑岩熔结过程的研究对追溯火山活动的强度、爆发次数、火山碎屑岩的就位温度、应力作用历史、火山活动的环境及岩相、构造的特征都具有很重要的意义。在国内, 近年来对火山碎屑岩熔结程度的研究主要用来评估和预测油气的储藏。本文在前人研究基础上, 总结了熔结火山碎屑岩熔结程度的分类、常见的结构构造, 概括阐述了火山碎屑岩熔结过程中主要的室内实验研究结果, 从而深入探讨熔结火山碎屑岩的熔结机理。

1 国内的研究现状

国内曾有不少学者对火山碎屑岩进行了研究。包永年(1983)、朱勤文(1985)、马剑萍(1986)、林景仟和谭东娟(1986)、陈克荣等(1990)、赖章忠等(2000)对熔结凝灰岩的成因进行了不同的解释; 万汉钟(1983)、周金城(1988)、钟华邦(1991)、王璞君等(2007)依据熔结凝灰岩的不同地质特征, 对其进行了分类和定义; 单林(1982)、金隆裕(1992)、朱勤文(1992)、单强等(2007)、肖毓祥等(2008)分别探讨了不同地区熔结凝灰岩的结构构造及成因; 杜杨松(1990)、谢家莹(1994a)、陈懋弘(1997)提及了不同熔结凝灰岩中的浆屑、玻屑的特征及其区别; 谢家莹(1994b)详述了“冷却单元”、“流动单元”、“堆积单元”的形成过程。随着熔结凝灰岩研究的日益深入, 如何鉴别不同熔结程度的熔结凝灰岩开始显得尤为

重要。谢家莹(1984, 1995)指出不同熔结程度的熔结凝灰岩可形成横向和垂向分带, 浆屑、玻屑、晶屑及浮岩屑的变形程度可用来鉴别熔结火山碎屑岩的熔结程度; 陈懋弘(1995)研究报道了海相熔结凝灰岩的特征。

相对而言, 国内就熔结凝灰岩熔结机理的专门报道甚少, 主要集中在定性研究方面。李有柱(1995)曾详述了熔岩成因的熔结凝灰岩(ignimbrite)的熔结机理; 王璞君等(2007)认为各类火山碎屑物由于负荷力和高温的共同作用而使玻屑和浆屑发生定向排列、拉长, 同时塑性组分使刚性颗粒彼此焊接, 最终固结成岩; 朱世发等(2012)提及了控制熔结作用程度的物理化学因素。

1990~1995年国内对熔结火山碎屑岩的研究相对比较深入, 1995年以后国内的此类研究则遇“冷”, 只有极少数学者继续研究, 而在国外其研究程度和热度却迅速增加, 无论从野外调查还是室内分析及实验模拟方面, 都对火山碎屑岩的熔结过程和机制做出了定量或定性的研究。从有关论文数目上看, 国内对熔结火山碎屑岩的重视和研究程度与国外相比远远不够(图 1, 国外的部分数据来源于 Grunder & Russell, 2005)。由于近 20 年来国内对熔结火山碎屑岩详细地质特征的研究寥寥无几, 这对国内火山研究的进展极为不利。因此, 对熔结火山碎屑岩的研究应当得到重视, 以便与国际接轨。

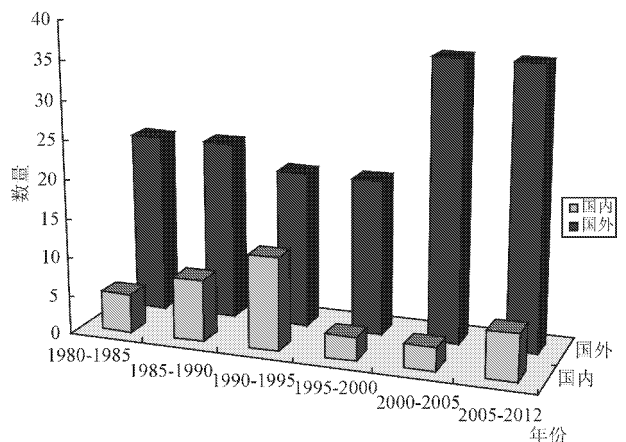


图 1 国内外发表熔结火山碎屑岩熔结机理研究论文的数量对比

Fig. 1 Contrast of number of published papers concerning the welding mechanism of pyroclastic rocks between China and foreign countries

2 相关术语的类比及熔结程度的分类

以往国内文献中曾用“烧结”、“焊结”、“熔结”来表示火山碎屑岩的熔结程度,不同的表述对实际应用造成了很大的不便(谢家莹,1995)。马剑萍(1986)认为,熔结火山碎屑岩的形成主要是由于高温使火山碎屑物的接合部位熔化,而几乎没有压力的作用,而焊结火山碎屑岩,则是在温度及压力的共同作用下,使两个以上的火山碎屑物压实熔结在一起,从而冷却成岩。因此,焊结火山碎屑岩成层性比熔结火山碎屑岩要更差些。国外学者普遍认为熔结过程包含了在火山碎屑就位时及就位之后所经历的脱气、压实、淬火及玻璃质的流变等作用的整个过程(Smith, 1960a; Branney & Kokelaar, 1992; Freundt, 1998)。本文认为“烧结”、“焊结”、“熔结”均是形容熔结火山碎屑岩的术语,“焊结”和“熔结”可用于描述经历了熔结作用的火山碎屑岩,而“烧结”则只用于描述火山碎屑岩熔结过程中的一种作用。在国外的文章中几乎都是以“welding”一词来表示熔结,为了避免下文讨论中的混乱,本文统一采用“熔结”一词。

2.1 联合作用(coalescence)、聚合作用(aggregate)及熔结作用(welding)的区别

联合作用是指具有较强流动性的火山碎屑微粒(droplets)迅速形成均一的流体相而残余粒子的轮廓在此过程中彻底消失的过程(Bristow, 1962; Ekren *et al.*, 1984; Branney & Kokelaar, 1992)。聚合作用是指在低粘度和低屈服强度的火山碎屑岩中火山碎屑物间空隙减小的过程。聚合作用和联合作用均可出现在剪切碎屑层流中(Branney & Kokelaar, 1992)。熔结是指增加玻璃碎屑粘合度的过程,或者指火山碎屑微粒在高温下以颗粒接触的扩散烧结(sintering)作用(Sparks *et al.*, 1999)。随着熔结速率的降低,联合作用、聚合作用、就位后的熔结作用三者之间会呈现出渐变过渡的关系(Branney & Kokelaar, 1992)。

综上所述,本文将熔结作用概括定义为使火山碎屑沉积物在高温下孔隙度减小、密度增大,进而发生形变甚至形成条带斑状构造火山碎屑岩的过程。

2.1.1 流变作用(rheomorphism)

流变作用通常指降落沉积之后的火山碎屑由于粘性流体的聚合作用而引起的碎屑流的二次流动

(Wolff & Wright, 1981)。而 Branney 等(1992)认为流变作用与具极高熔结程度的熔结凝灰岩中所具有的粘性的流动构造有关,例如褶皱、细的纤维构造和斜坡构造(ramp structure)。Streck & Grunder (1995)则认为流变凝灰岩可以呈玻璃质,可以出现在从未熔结到高度熔结的凝灰岩中。即使对低-中等熔结程度的火山碎屑岩而言,流变构造也是可以存在的,只是其存在数量和规模较小。

综合前人研究结果,本文认为流变作用是指火山碎屑由于粘性流体的聚合作用及就位后的重力影响等因素引起的火山碎屑二次流动所产生的粘性流动构造。实际上,流变作用既可以出现在火山碎屑流、涌流流动过程及定位后,又可见于降落沉积的火山碎屑中。

2.1.2 冷却单元(cooling unit)

单林(1982)认为冷却单元是指一次火山热砂流喷发活动所形成的岩石组合,谢家莹(1994b)认为火山喷溢过程停歇之后,所形成的产物会沿着火山斜坡流动就位,称为一个“流动单元”,而在冷却之后则形成一个“冷却单元”。在一个简单的冷却单元中,底部和顶部物质的熔结程度低而中部碎屑物质的熔结程度高。结合文献调研的前人研究结果,我们把冷却单元修正为“累积速率足够快、冷却均匀且连续的喷出物所形成的一次火山碎屑流作用的沉积单元”。

2.1.3 熔结火山碎屑岩(welded pyroclastic rocks)

熔结火山碎屑岩是火山碎屑岩中的一种,是火山碎屑岩的重要组成部分,分布十分广泛。熔结火山碎屑岩由浆屑(塑变的岩屑)、塑变玻屑、晶屑、岩屑(角砾或集块)和火山尘组成,通常具有熔结火山碎屑结构和假流纹构造(图2),其中以塑变浆屑和塑变玻屑为标志。

2.2 熔结程度的分类

通常火山喷发成因的凝灰岩分为火山碎屑流成因和降落成因。

依据熔结程度,国内外学者对碎屑流成因的凝灰岩的分类标准不同。包永年(1986)将其分为强塑变熔结凝灰岩、中等塑变熔结凝灰岩和弱塑变熔结凝灰岩,简称强熔结凝灰岩、熔结凝灰岩和弱熔结凝灰岩。谢家莹(1995)认为熔结程度一般分为未熔结、弱熔结、熔结(少数情况下进一步分为强熔结)3级,强熔结的火山碎屑岩代表弱的火山爆发强度,未熔结的火山碎屑岩代表强的火山爆发强度,中等(普通)熔结火山碎屑岩代表中等强度的火山爆发。

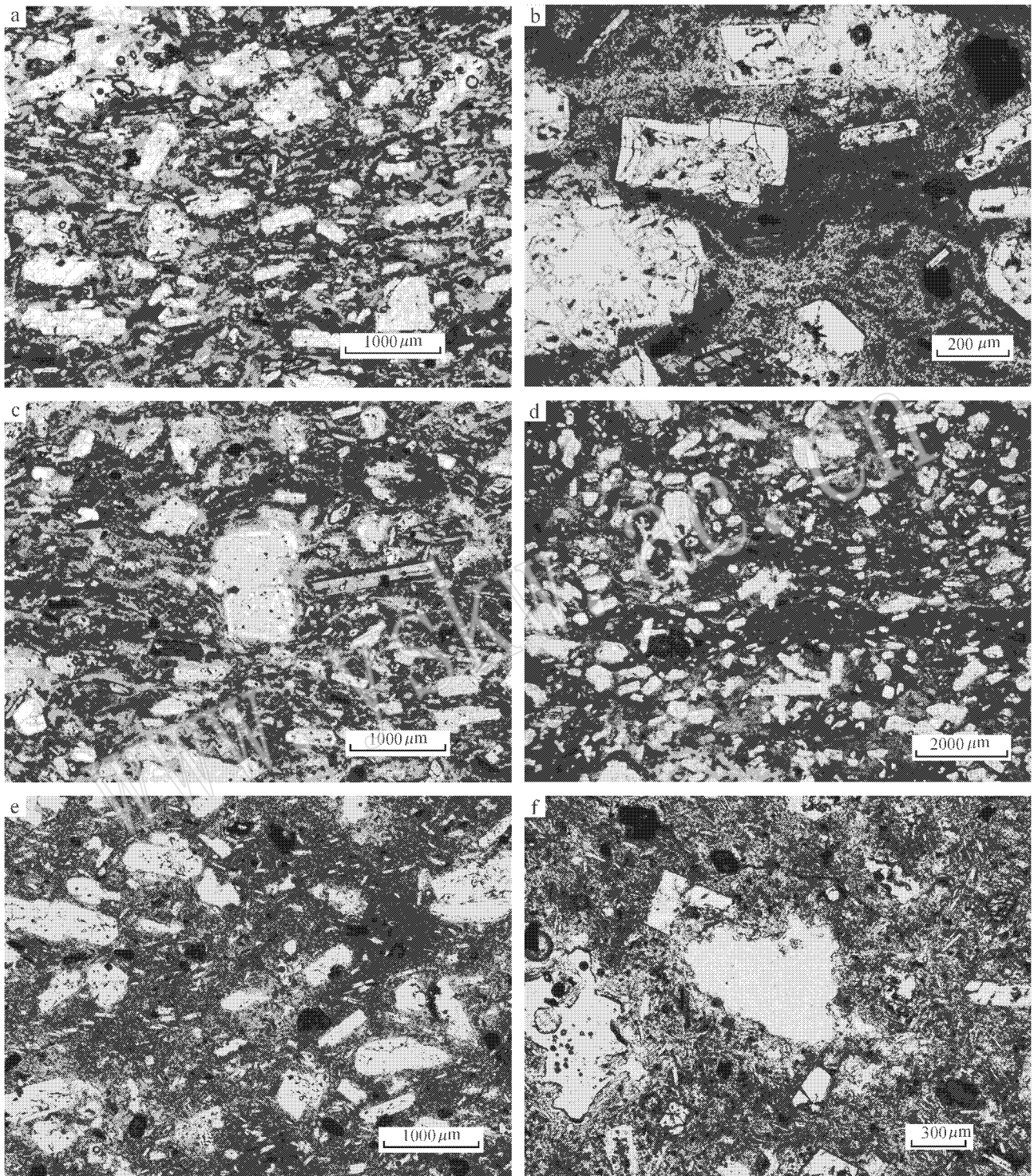


图 2 熔结火山碎屑岩的结构构造及不同熔结程度的熔结凝灰岩

Fig. 2 Textures of welded pyroclastic rocks and different welding degrees of welded ignimbrites

- a—熔结火山碎屑结构(-); b—假流纹构造(-); c—假流纹构造(-); d—中-强熔结凝灰岩(-); e—中等熔结凝灰岩(-); f—弱-未熔结凝灰岩(-)
- a—welded volcanic pyroclastic texture(-); b—pseudorhyolitic structure in welded ignimbrite(-); c—pseudorhyolitic structure in welded ignimbrite(-); d—moderately-densely welded ignimbrite(-); e—moderately welded ignimbrite(-); f—slightly welded-non welded ignimbrite(-)

Streck & Grunder(1995)认为随着熔结程度的增加,通常可以将火山碎屑流成因的凝灰岩分为 5 个相:未熔结(nonwelded)、初始熔结(incipiently welded)、与浮岩部分熔结、与浆屑经形变形成的“火焰”部分熔结和完全熔结(densely welded)。Quane & Russell(2004)根据火山碎屑的物理性质(如孔隙度、密度、负荷压力等)将熔结程度定量分为 6 个不同的熔结

程度。根据其普遍适用性,本文将火山碎屑的熔结程度总结为以下 5 类(表 1),随着熔结程度的增加其结构也不同(图 2)。

Carey 等(2008a)依据降落成因的凝灰岩中的基质和碎屑的关系,将其分为 5 个不同的熔结强度:强熔结、中等熔结、弱熔结、点熔结及未熔结(表 2)。

到目前为止,国内外学者对降落成因熔结凝灰

表 1 火山碎屑流成因的流纹质凝灰岩熔结程度分类

Table 1 The classification of welding degrees of rhyolitic ignimbrites of the pyroclastic flow origin

熔结术语	描述	密度(kg/m ³)	变形碎屑	
			浮岩屑	玻屑
强熔结	具有强的条纹斑状构造,玻璃质为深色	>2.00	部分-大量	大量
中度熔结	条纹状构造清晰,且相对而言具有塑性	1.74~2.00	部分	少量
弱熔结	一些浮岩被拉伸,含有大量气孔,呈现塑性	1.49~1.81	少量	少量
微熔结	无条纹斑状构造,碎屑烧结在一起	1.22~1.57	无	无
未熔结	碎屑没有聚合,手指就能将碎屑分开	1.09~1.47	无	无

注:修改自 Streck & Grunder(1995), Wilson & Hildret(2003)。

表 2 降落成因熔结凝灰岩熔结程度分类

Table 2 The classification of welding degrees of welded tuffs of the fall origin

熔结程度	基质特征	碎屑特征
强熔结	基质为玻璃质,火山碎屑结构不明显,颗粒之间无空隙	残留有少量气泡,碎屑颗粒的轮廓无法分辨,具极度拉伸的火焰状构造
中等熔结	不再出现条带斑杂构造,颗粒之间无空隙	拉长的碎屑和气孔,碎屑轮廓可见
弱熔结	基质被烧结在一起,具火山碎屑结构,存在空隙	紧密烧结的碎屑边缘,拉长的碎屑,碎屑边缘部分可见
点熔结	基质疏松,未固结,存在空隙	烧结的碎屑边缘,锯齿状的浮岩碎屑,未经变形的圆形气孔
未熔结	基质疏松,未固结	未变形,刚沉积的锯齿状浮岩屑

岩的研究还远远不够。由于碎屑流成因的熔结凝灰岩与降落成因熔结凝灰岩成因不同,对碎屑流成因的熔结凝灰岩的描述术语并不能完全照搬到降落成因熔结凝灰岩之中(Carey *et al.*, 2008a, 2008b; Boyce & Gertisser, 2012)。

3 对熔结过程的野外观察和研究

3.1 玻屑、浆屑和晶屑

玻屑是岩浆中气体膨胀炸碎后形成的半凝固状态的玻璃质气孔,在弱熔结凝灰岩中通常呈新月形、弓形、弧面三角形,在强熔结凝灰岩中玻屑弧面棱角圆化,并呈定向排列。随着熔结程度的增强,玻屑被压扁拉长,出现细纹状、波浪状外形,貌似流纹(朱世发等, 2012)。熔结凝灰岩中的玻屑通常还可呈鸡骨状、浮岩状、凹面棱角状(金隆裕, 1992)。

玻屑在碎屑岩中的分布方向可以通过测量玻屑

长轴方向偏离水平方向的角度来确定(Russell & Quane, 2005b)。随着熔结程度的增加,玻屑互相平行且垂直于压实方向,在少数情况下玻屑所在的面也与古地形平行(Gibson, 1970)。Mundula 等(2009)通过对玻屑方向的定量化研究将熔结凝灰岩中的玻屑分为无定向分布、弱定向分布和强定向分布。显然,熔结程度越强,玻屑的定向性也越好。

浆屑是指岩浆碎裂后形成较大的熔岩碎块,形成时处于塑性状态(朱世发等, 2012)。浆屑通常具有圈层结构,且在最外层有玻璃质外壳。其形态由于塑性变形程度的不同,通常呈现火焰状、撕裂状、纺锤状、豆荚状等(金隆裕, 1992; 朱勤文, 1992; 谢家莹, 1994b)。

晶屑也是一种火山碎屑物质,大部分晶屑是火山喷发前岩浆中的晶体或者围岩中的矿物被炸碎而成,通常可见其在高温下棱角圆化且被溶蚀的现象(朱世发等, 2012)。

国内的学者倾向于从塑变玻屑、塑变岩屑(浆屑)、晶屑、火山尘的结构来研究不同熔结程度的凝灰岩,并且对塑变玻屑和塑变岩屑的研究比较集中。

3.2 熔结过程出现的结构构造

研究表明,火焰状构造和条纹斑状构造不仅仅出现在火山碎屑流沉积物(ignimbrite)中,也可出现在降落成因的火山碎屑岩(welded tuff)中(Sparks & Wright, 1979; Wolff & Wright, 1981; Gifkins *et al.*, 2005; Boyce & Gertisser, 2012)。因此,研究火焰状构造和条纹斑状构造的特征有助于理解火山碎屑岩熔结过程是如何发生的。

3.2.1 火焰状构造(fiamme)、条纹斑状构造(eutaxitic texture)及缝合线构造(stylolites)

熔结构造通常指示短暂的沉积作用和高温环境,一般出现在陆地喷发沉积物之中(Gifkins *et al.*, 2005),但也可出现在水下环境中(Fritz & Stillman, 1996; Kokelaar & Königer, 2000)。

火焰状构造(fiamme)是指似火焰状的或者拉长的透镜体,是在火山碎屑流沉积物熔结过程中经塑性变形的浮岩屑或者浆屑(Gibson & Tazieff, 1967)。条纹斑状构造(eutaxitic texture)指拉长压平的火焰状构造和直线状排列的玻璃碎屑(shards)相间平行排列的一种构造。

火焰状构造和条纹斑状构造普遍出现在熔结火山碎屑沉积物中,因此一般认为是火山岩相中特征的变形结构或构造(McPhie *et al.*, 1993; Streck & Grunder, 1995)。而一些学者发现火焰状构造和条纹斑状构造不仅仅局限于熔结的火山碎屑沉积物中(Gifkins *et al.*, 2005; Bull & McPhie, 2007; Mundula *et al.*, 2009)。当出现平行于层理的缝合线构造、未变形的玻屑及火焰状构造周围出现浮岩屑,而火焰状构造又往往被区域节理所替代,从而经历构造变形,这些现象均可表明此过程中的压实作用不属于熔结过程的范畴(Gifkins *et al.*, 2005)。缝合线构造是一种普遍出现于蚀变的火山碎屑岩中的溶解构造(Gifkins & Allen, 2001)。由于压实作用或者先存相的溶解作用而产生缝合线构造,没有或有少量的新矿物相形成(Merino *et al.*, 1983; Fisher & Schmincke, 1984)。如上所述,出现此类情况应当谨慎,不同环境下形成的火焰状构造和条纹斑状构造对指示火山喷发历史、推断形成温度等方面有很重要的作用,因此,能否准确判断熔结构造显得尤为重要。

Smith(1960b)、Branney & Sparks(1990)认为要确认是否是熔结压实作用,火焰状构造(fiamme)必须要与经历了高温的玻璃碎屑基质有关。唯一能够证实熔结压实作用的证据是出现塑性变形、拉伸和熔融的玻屑,且基质中出现完整的浮石碎屑(Smith, 1960b; Cas & Wright, 1987)。如果出现变形的浮石碎屑呈任意方向分布,及基质中分布的Y形和U形的气泡壁环绕着火焰状浆屑,则可认为是经熔结的压实作用形成的火山碎屑沉积物(Gifkins *et al.*, 2005)。在熔结火山碎屑沉积物中,火焰的平均拉伸比率为2:1~6:1,甚至可以达到60:1(Smith, 1960a)。

而在未熔结的火山碎屑沉积物中,强烈压实的浆屑通常含有压溶构造,即压实作用过程中包含有部分溶解作用(Gifkins *et al.*, 2005)。熔结凝灰岩中由于压实作用通常可形成环带(Peterson, 1979)。Mundula *et al.*(2009)对经熔结作用形成的火焰状浮岩屑和经压实作用的浮岩屑之间作出了区别:在岩石显微镜下,熔结成因的火焰状浮岩屑的边界分明且不含气孔,而拉伸的浮岩屑的边界呈锯齿状且含有气孔,这与谢家莹(1995)的观点一致。

对区分熔结和未熔结火山碎屑沉积物中的条纹斑状构造的研究较少。Gifkins等(2005)认为未经熔结过程中形成的条纹斑状结构中的火焰状构造总是与层理面十分吻合,而经熔结过程中形成的条纹斑状结构中的火焰状构造通常很平坦。这点细微的差别对于野外工作来说并不适用,因为在野外可能无法准确地区分二者,而且Gifkins等(2005)的研究结果是基于少数样品而言的,其普适性还存在争论。因此对这方面的区分还有待于更深层次的研究。

国内学者对于熔结过程中所出现的结构和构造特征则有着不同看法。强熔结火山碎屑岩具强流体感和强假流纹构造;中等(普通)熔结火山碎屑岩具有明显的假流纹构造,也具有“绕流”、“紊流”、“漩流或涡流”等假流动现象及构造;弱熔结火山碎屑岩具弱流体感和低的熔结程度;“浆液”状的熔化产物少,弱塑变玻屑具定向性平行排列成假流纹构造,但还是具有明显的火山碎屑结构特征(马剑萍, 1986)。而在熔结火山碎屑岩中出现的浆屑,通常具有典型的圈层结构(杜杨松, 1990)。在碎屑流成因的熔结凝灰岩中,浆屑主要赋存在一个冷却单元的下部,自下而上由正粒序结构转换为逆粒序结构(谢家莹, 1995)。

3.2.2 流变褶皱(flow folds)

在流变凝灰岩中通常会出現流变褶皱,这些褶

皱都是由线理、面理和火焰状浆屑发生弯曲褶皱而形成,大小由几厘米到几米(Wolff & Wright, 1981)。在凝灰岩中,由于火山灰的渗透性比浮岩的渗透性大得多,所以浮岩碎屑比基质中的火山灰更容易被压实(Ragan & Sheridan, 1972)。因此在很多熔结凝灰岩中,浮岩碎屑页理会在压力作用下形成黑曜岩页理,而基质中的火山灰仍然保持压实前的颜色和残留的气孔,这种结构特征在许多熔结凝灰岩中均可见到(Sparks *et al.*, 1999)。

3.2.3 玻璃基质的结晶-重结晶方式

在同沉积和沉积之后,火山碎屑基质均会出现结晶作用。不同的沉积温度、冷却速率及挥发分的成分和浓度均会影响玻璃质的结晶方式(Mundula *et al.*, 2009)。Mcarthur 等(1998)通过研究泥盆纪的 Garth 凝灰岩,根据结晶方式和结晶强度将 Garth 凝灰岩分为 7 个不同的相,其中黑曜岩相、黑曜岩-隐晶质相、开放球粒相(open spherulites)通常被定义为强熔结带,显微隐晶质相可同时出现于强熔结带和部分熔结带之中。

Streck & Grunder(1995)通过研究得出,随着熔结程度的增加,凝灰岩同样可以分为几个结晶相带:蒸汽相带(vapor phase zone)、广泛脱玻化相带(pervasively devitrified zone)、球粒带(spherulite zone)、石泡带(lithophtsae zone),各个熔结相带或结晶相带之间的过渡越是突然,各个相带的发育越齐全。金隆裕(1992)认为塑性火山碎屑物遭受不同的脱玻化作用,所具有的脱玻化结构主要有梳状、羽状、霏细状、镶嵌状脱玻结构。

3.3 野外调研中对熔结过程及机理的探讨

碎屑流成因的熔结凝灰岩与降落成因的熔结凝灰岩在熔结机理上存在很大的差异。在前者中,最高程度的熔结通常位于底层沉积的 1/3 处(Russell & Quane, 2005a; Sheridan & Wang, 2005);后者的

最大熔结强度与沉积厚度呈现脱耦关系(Carey *et al.*, 2008a)。这主要受到火山碎屑物累积速率变化的影响,高的火山碎屑物累积速率可降低冷却速率从而增加熔结程度。其次是受火山碎屑粒径的影响,粗粒碎屑要比细粒碎屑冷却慢,即就位温度高,因此碎屑粒径的大小也会影响熔结程度的高低(Thomas & Sparks, 1992; Carey *et al.*, 2008a; Boyce & Gertisser, 2012)。

作为衡量熔结程度的指标,熔结火山碎屑岩的密度比浆屑的长宽比更能指示熔结程度(Carey *et al.*, 2008b)。尽管条纹斑状构造普遍存在于熔结凝灰岩中,但是在有些地方的强熔结凝灰岩中确实未发现条纹斑状构造中形成的页理,从而推断挥发分的重吸收和压力作用而引起强熔结作用的发生(Sparks *et al.*, 1999)。而如果火山碎屑物足够热并且有足够的流动性,则当粒子间相互接触时熔结作用会立即发生,在这种情况下熔结作用与就位之后的冷却过程及负荷力无关(Mahood, 1984)。

4 用实验的手段来研究熔结过程及其机理

运用实验手段来研究熔结过程是必不可少的。目前为止,国外的学者主要从以下 3 个方面进行研究:①在不同压力、含水量、加热时间内熔结所需要的最低温度(Yagi, 1966; Akelaitis, 1999; Mossing, 2003; Grunder & Russell, 2005; Russell & Quane 2005a);②对熔结速率及时间进行定量化研究(Friedman *et al.*, 1963; Riehle, 1973; Bierwirth, 1982; Quane *et al.*, 2009);③对熔结过程中的变形特征进行研究(Peterson, 1979; Wolff & Wright, 1981; Quane & Russell, 2004; Russell & Quane, 2005b; Robert *et al.*, 2008)。具体研究成果如表 3。

表 3 实验研究火山碎屑物质熔结机理的样品及实验条件

Table 3 Samples and experimental conditions for welding mechanic experiments on volcanic clasts

作者	样品	样品大小	样品数	温度/℃	压力/MPa	流体压力/MPa	就位速率/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	实验持续时间/h	熔结作用发生的最小温度/℃
Yagi(1966)	火山灰(流纹质-安山质)	3 mm×15 mm	23	580~622	无	0.3~2	无限制	16~45	585
Grunder 等(2005)	流纹质火山灰	4 mm×10 mm	35	600~1 200	1~20	无	无限制	1~817	600
Quane & Russell(2005)	玻璃珠	45 mm×70 mm	33	535~650	0~2.5	干样品	$10^{-4}\sim 10^{-5}$	<1~5	535
Quane & Russell(2009)	流纹质火山灰	55 mm×70 mm	12	800~900	0.7~3.38	干样品	2.5×10^{-4}	24~144	无

Yag(1966)将流纹质和安山质样品在一定的条件下进行熔结实验,发现流纹质样品在 585℃ 和 3~4 MPa 下熔结,而安山质样品直到 622℃ 都还未开始熔结。从而得出,碎屑岩的成分影响熔结作用的发生;成分越偏酸性,在相同条件下其熔结程度则越强。

Peters(1979)、Wolff & Wright(1981)认为流动变形构造是在负荷压力的作用下形成的,因此流动变形是在火山碎屑流沉积之后才发生的。线性显微状构造被认为是降落成因的熔结凝灰岩(weld tuff)和火山碎屑流成因熔结凝灰岩(ignimbrite)形变过程的标志。如果火山碎屑流沉积在斜坡之上,那么经过压实作用就会发生形变,同时斜坡也是流变褶皱的主控因素,即斜坡是发生形变必不可少的因素。而成分的不同,也对熔结凝灰岩的流变作用有影响。

Russell & Quane(2005a)改进了实验装置,测量了不同硅质玻璃珠样品在不同范围内的就位速率($2.5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ cm/s) 负荷(5~50 kg, $\sigma = 0.03 \sim 0.35$ MPa) 实验温度(分别为 535、550、600、650℃)下硅质玻璃珠样品的变形过程。当熔体的就位温度远远超过 T_g (玻璃质碎屑的转变温度)时,熔体的相转变滞留时间会很短(Dingwell & Webb, 1990)。因此 Russell & Quane(2005a)认为在这个相对较短的时间内会积累大量的(张)应力(strain),从而经历很强的熔结变形。而在变形实验中含有气孔的样品的变形则主要受(张)应力的控制。随着应力的累积,空隙就会减少从而增加变形程度。正因如此,在自然界中火山碎屑的空隙度会最终决定熔结的机制和熔结作用的程度。样品在 550℃ 和 600℃、0.04 MPa 的压力下会存在着一个形变的不连续面。因为就位速率也能影响熔结过程的发生(Sparks & Wright, 1979; Mahood, 1984),Quane & Russell(2005a)将此归结为由于温度和样品就位速率共同作用的结果。

Grunder & Russel(2005)强调必须从熔结过程的时间尺度、张力大小、压实作用、孔隙,由于渗透作用而引起的水分丢失,流体的运移和沉积物的流变学之间的关系及其相互作用的结果来理解和研究整个熔结过程。其中,最主要是强调水在熔结过程中的重要作用。通过对不同含水量的样品进行分析,推断出温度升高 100℃ 会提高熔结强度,其效果与把含有 0.3%(质量分数,下同)的样品中的水含量增加

到 0.55% 对熔结程度的影响程度一致。可见只要有足够的水存在,熔结作用发生的温度和压力都可以降低。这是由于水的出现会降低粘度(Shaw, 1972; Dingwell, 1996),使样品更容易变形且变形速率增大从而提高熔结强度。

Grunder 等(2005)通过同一温度(600、700℃)、不同压力范围内(1~20 MPa)对样品进行熔结程度的实验,发现样品的熔结程度会随着压力的增加而增大。

Quane & Russell(2009)对 Bandelier 凝灰岩的 20 个样品进行实验,发现熔结需要的时间为 1~6 d,而冷却需要的时间可达到 200 d,即样品冷却所需要的时间比熔结所需要的时间长得多,从而认为火山碎屑岩的冷却历史并没有直接控制熔结过程中的变形程度。冷却过程与熔结过程的脱耦关系,与之前 Riehl(1973)认为的凝灰岩的冷却控制熔结作用发生的观点有所不同。

Riehl(1973)、Quane & Russell(2005a)认为熔结过程是一个由很多物理参数控制的复杂过程,比如岩浆的成分、蒸汽压力、应变速率均可影响熔结过程。而 Sparks 等(1999)认为,由于火山喷发柱的高低影响火山碎屑流的就位温度,从而影响了火山碎屑岩的熔结程度。

综上所述,通过野外观察并结合实验手段,火山碎屑岩的熔结机理主要为以下 5 种:

(1) 当火山碎屑的就位温度(T_e)大于相应火山玻璃的转变温度(T_g)时,火山碎屑颗粒之间就会出现熔结作用,而当($T_e - T_g$)的差值越大其熔结强度也会增强,当火山碎屑经冷却到温度 $< T_g$ 时,碎屑颗粒之间的熔结作用就会受到限制,甚至停止;

(2) 火山碎屑的熔结作用可以通过碎屑颗粒的变形而体现,因此,压实作用的出现会减小火山碎屑中的空隙度,火山碎屑被压平变形;

(3) 火山碎屑物在剪应力作用下,会产生塑性流变;

(4) 熔结凝灰岩的熔结程度主要体现在浆屑的拉伸及玻屑变形、密度的增大和孔隙度减小上,其中密度是判断熔结程度强弱的最佳指标;

(5) 挥发分的重吸收及压力作用可产生强熔结火山碎屑岩。

熔结作用的发生受火山碎屑的成分、粒径、负荷压力、就位温度、含水量及碎屑的累积速率及应变速率的综合影响,而在此过程中火山碎屑物可能会出

现不同程度的脱玻化作用。

5 小结

(1) 从熔结、聚合到联合,火山碎屑岩熔结程度依次降低,按熔结程度可以将碎屑流成因的火山碎屑岩分为 5 个相:未熔结、初始熔结、与浮岩部分熔结、与以浆屑变形所形成的“火焰”部分熔结、完全熔结。降落成因的火山碎屑岩也分为 5 个相:未熔结、点熔结、弱熔结、中等熔结和强熔结。

(2) 火焰状构造和条纹斑状构造普遍存在于熔结火山碎屑流成因和降落成因的火山碎屑岩之中,对火山的喷发历史和火山碎屑岩的熔结过程有重要的指示作用,缝合线构造和流变褶皱对熔结过程中的成分变化和变形作用有指示作用。

(3) 当火山碎屑的就位温度(T_e)大于相应玻璃的转变温度(T_g)时,火山碎屑颗粒之间就会发生熔结作用;当火山碎屑的就位温度(T_e)小于相应玻璃的转变温度(T_g)时,不会发生熔结作用。熔结凝灰岩的熔结程度主要体现在浆屑、塑变玻屑的变形程度、岩石空隙度、密度以及重结晶等方面。

(4) 火山碎屑流成因的熔结凝灰岩与降落成因的熔结凝灰岩的熔结机理存在差异,负荷力在火山碎屑流成因熔结凝灰岩的熔结过程中起着重要作用,而降落成因熔结凝灰岩的熔结作用主要受到碎屑物的物理性质(如粒径大小)、就位温度、累积速率的控制。

(5) 火山碎屑物的熔结作用是在火山碎屑的成分、负荷压力、温度、含水量、累积速率及应变速率的综合作用下形成的。

6 至今尚未解决的问题及建议

(1) 对熔结过程中出现的应变测量都是通过实验手段确定的,然而在野外调研中未必能准确测量火山碎屑的应变强度,目前还没有此类报道。

(2) 在熔结过程中通常伴有其它作用,如脱玻化作用、重结晶作用等会使不同碎屑流单元的界限变得模糊(Schmincke & Swanson, 1967; Wilson & Hildreth, 2003),因此对如何准确地判断和分辨碎屑流单元的问题尚未完全解决。

(3) 实验过程中在测量静岩压力对熔结作用的影响时,未能扣除样品中所含孔隙中的流体压力

(Russell & Quane, 2005b),这对实验的准确性及对熔结过程机理的理解会有很大的影响。而如何测量或者排除样品空隙中的流体压力至今还没有好的解决方案。

(4) 在通过研究压实作用对火山碎屑中熔结程度的影响时,实验样品往往是以熔结凝灰岩中含有大量平行排列的玻屑为特征,这点与自然界中的熔结凝灰岩不完全相同。因为在复杂的自然界系统中往往不仅仅存在垂向上的负荷压力,通常还会有其它方向上的构造应力。因此,实验中得出的结果与自然界中的机制存在差异。

(5) 火山碎屑岩的冷却历史对熔结过程到底有没有影响仍然存在争议。如 Riehl(1973)、Sparks 等(1999)认为冷却过程控制着熔结作用的发生,而 Quane 等(2009)通过实验得出火山碎屑岩的熔结过程与其冷却历史无关。因此,对二者之间的确切关系还需进一步的研究。

(6) 目前对碎屑流成因的熔结火山碎屑岩的研究较深入,但对降落成因的熔结凝灰岩的研究还比较欠缺。

致谢 感谢审稿人及编辑对本文的悉心指导,所提出的宝贵建议和修改意见对本文的帮助很大,特此致谢。

References

- Akelaitis C. 1999. Characterization of Strain during Welding of Pyroclastic Flow Deposits: Devine Canyon, USA and Mt. Meager, Canada[M]. B. Sc. University of British Columbia.
- Bao Yongnian. 1983. The origin of ignimbrite[J]. Regional Geology of China, 3(1): 99~103(in Chinese).
- Bao Yongnian. 1986. Characteristics of ignimbrites in Zhejiang province[J]. Regional Geology of China, 6(3): 228~238(in Chinese).
- Bierwirth P N. 1982. Experimental Welding of Volcanic Ash[Bachelors Thesis]D]. Monash University.
- Borsi S, Marinelli G, Mazzoncini F, et al. 1963. Reconnaissance of some ignimbrites of Pantelleria and Eolian Islands[J]. Bulletin of Volcanology, 25: 359~367.
- Boyce J A and Gertisser R. 2012. Variations in welding characteristics within the Plinian air-fall deposit of the Middle Pumice eruption, Santorini, Greece[J]. Journal of Volcanology Geothermal Research, 221~222: 71~82.
- Branney M J and Kokelaar B P. 1992. A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to

- non particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite [J]. *Bulletin of Volcanology* , 54(6) : 504~520.
- Branney M J , Kokelaar B P and McConnell B J. 1992. The Bad Step Tuff : a lava-like rheomorphic ignimbrite in a calc-alkaline piecemeal caldera , English Lake District [J]. *Bulletin of Volcanology* , 54 : 187~199.
- Branney M J and Sparks R S J. 1990. Fiamme formed by diagenesis and burial-compaction in soils and subaqueous sediments [J]. *Journal of the Geological Society (London)* , 147 : 919~922.
- Bristow C M. 1962. Kenya ignimbrite [J]. *Nature* , 196 : 364~365.
- Bull K F and McPhie J. 2007. Fiamme textures in volcanic successions : Flaming issues of definition and interpretation [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research* , 164(4) : 205~216.
- Carey R J , Houghton B F and Thordarson T. 2008a. Contrasting styles of welding observed in the proximal Askja 1875 eruption deposits I : Regional welding [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research* , 171 : 1~19.
- Carey R J , Houghton B F and Thordarson T. 2008b. Contrasting styles of welding observed in the proximal Askja 1875 eruption deposits II : Local welding [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research* , 171 : 20~44.
- Cas R A F and Wright J V. 1987. *Volcanic Successions , Modern and Ancient : A Geological Approach to Processes , Products and Succession* [M]. London : Allen and Unwin , 1~528.
- Chen Kerong , Du Yangsong and Chen Xiaoming. 1990. On characteristics and petrogenesis of pyroclastic flow and surge deposits-exampld by those in the coastal of southeastern Zhejiang province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 1 : 66~74 (in Chinese).
- Chen Maohong. 1995. The discovery of welded tuffs in marine volcanic strata in Longzhou region [J]. *Guangxi Geology* , 8(2) : 48 (in Chinese).
- Chen Maohong. 1997. Study of rhyolite welded breccia tuff of margin facies in Longzhou region [J]. *Guangxi Geology* , 10(1) : 1~6 (in Chinese).
- Dingwell D B and Webb S L. 1990. Relaxation in silicate melts [J]. *European Journal of Mineralogy* , 2(4) : 427~449.
- Dingwell D B. 1996. Volcanic dilemma : flow or blow [J]. *Science* , 273(5278) : 1054~1055.
- Du Yangsong. 1990. The genesis of the crystalline textures in plastic fragments of welding tuffs [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 9(2) : 124~130 (in Chinese with English abstract).
- Ekren E B , McIntyre D H and Bennet E H. 1984. High-temperature large-volume , lavalike ash-flow tuff without calderas in southwestern Idaho [J]. *USGS Professional Paper* , 1272 : 1~76.
- Fisher R V and Schmincke H U. 1984. *Pyroclastic Rocks* [M]. New York : Springer Verlag , 1~472.
- Freundt A. 1998. The formation of high-grade ignimbrites , I : Experiments on high- and low-concentration transport systems containing sticky particles [J]. *Bulletin of Volcanology* , 59(7) : 414~435.
- Freundt A. 1999. Formation of high-grade ignimbrites. Part II . A pyroclastic suspension current model with implications also for low-grade ignimbrites [J]. *Bulletin of Volcanology* , 60(7) : 545~567.
- Friedman L , Long W and Smith R L. 1963. Viscosity and water contents of rhyolitic glass [J]. *Journal of Geophysical Research* , 68 : 6523~6535.
- Fritz W J and Stillman C J. 1996. A subaqueous welded tuff from the Ordovician of County Waterford , Ireland [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research* , 70 : 91~106.
- Gibson I L. 1970. A Pantelleritic ash flow tuff from the Ethiopian Rift Valley [J]. *Contributions Mineralogy of Petrology* , 28 : 89~111.
- Gibson I L and Tazieff H. 1967. Additional theory on the origin of fiamme in ignimbrites [J]. *Nature* , 215(5109) : 1473~1474.
- Giffkins C C and Allen R L. 2001. Textural and chemical characteristics of diagenetic and hydrothermal alteration in glassy volcanic rocks : examples from the Mount Read Volcanics , Tasmania [J]. *Economic Geology* , 96 : 973~1002.
- Giffkins C C , Allen R L and McPhie J. 2005. Apparent welding textures in altered pumice-rich rocks [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research* , 142 : 29~47.
- Grunder A L , Laporte D and Druitt T H. 2005. Experimental and textural investigation of welding : Effects of compaction , sintering , and vapor-phase crystallization in the rhyolitic Rattlesnake tuff [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research* , 142 : 89~104.
- Grunder A L and Russell J K. 2005. Welding process in volcanology : Insights from field , experimental , and modeling studies [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research* , 142 : 1~9.
- Jin Longyu. 1992. Petrological and petrochemical characteristics of Mesozoic glassy volcanic rocks in Shandong province [J]. *Geology of Shandong* , 8(1) : 53~67 (in Chinese).
- Kokelaar P and Königer S. 2000. Marine emplacement of welded ignimbrite : The Ordovician Pitts Head Tuff , North Wales [J]. *Journal of Geological Society , London* , 157 : 517~536.
- Koralay T , Özkul M , Kumsar H , et al. 2011. The effect of welding degree on geotechnical properties of an ignimbrite flow unit : the Bitlis castle case (eastern Turkey) [J]. *Environmental Earth Sciences* , 64(3) : 869~881.
- Kobberger G and Schmincke H U. 1999. Deposition of rheomorphic ignimbrite D (Mogan Formation) Gran Canaria , Canary Islands , Spain [J]. *Bulletin of Volcanology* , 60 : 465~485.
- Lai Zhangzhong , Xu Jiufa , Zhang Mianbin , et al. 2000. Features and facies model of three kinds of Mesozoic ignimbrite in south Jiangxi [J]. *Jiangxi Geology* , 14(1) : 10~15 (in Chinese).
- Li Youzhu. 1995. Ignimbrites [J]. *Foreign Geology and Exploration* , 1 : 1~9 (in Chinese).
- Lin Jingqian and Tan Dongjuan. 1986. Ignimbrites from liquid immiscibility : Origin of pumiceous lava flow [J]. *Journal of Changchun College of Geosciences* , 3 : 23~40 (in Chinese).
- Ma Jianping. 1986. The new explanation of the Mesozoic welded pyroclastics , Zhejiang province [J]. *Journal of Changchun College of Geosciences* , 1 : 49~59 (in Chinese).

- Mahood G A. 1984. Pyroclastic rocks and calderas associated with strongly peralkaline volcanic rocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 89 : 8 540 ~ 8 552.
- Mcarthur A N , Cas R A F and Orton G J. 1998. Distribution and significance of crystalline , perlitic , and vesicular textures in the Ordovician Garth Tuff (Wales) [J]. *Bulletin of Volcanology*, 60 (4) : 260 ~ 285.
- McPhie J , Doyle M and Allen R L. 1993. *Volcanic Textures : A Guide to the Interpretation of Textures in Volcanic Rocks* [M]. Tasmania : University of Tasmania , 1 ~ 196.
- Merino E , Ortoleva P and Strickholm P. 1983. Generation of evenly spaced pressure solution seams during (late) duagebesus : A kinetic theory [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 82 : 360 ~ 370.
- Miller T F. 1990. A numerical model of volatile behaviour in non-welded cooling pyroclastic deposits [J]. *Journal of Geophysical Research*, 95 : 19 349 ~ 19 364.
- Mossing M. 2003. The Role of Temperature , Stress , Strain and Porosity on Pumice from Mount Meagerm Canada [D]. University of British Columbia , Vancouver B C.
- Mundula F , Cioni R and Rizzo R. 2009. A simplified scheme for the description of textural features in welded Ignimbrites : The example of San Pietro Island (Sardinia , Italy) [J]. *Italian Journal of Geosciences*, 128 (3) : 615 ~ 627.
- Peterson D W. 1979. Significance of the flattening of pumice fragments in ash-flow tuffs [J]. *Special Paper Geological Society of America*, 180 : 195 ~ 204.
- Quane S L and Russell J K. 2004. Ranking welding intensity in pyroclastic deposits [J]. *Bulletin of Volcanology*, 67 : 129 ~ 143.
- Quane S L , Russell J K and Friedlander E A. 2009. Time scales of compaction in volcanic system [J]. *Geology*, 37 : 471 ~ 474.
- Ragan D H and Sheridan M F. 1972. Compaction of the Bishop Tuff , California [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 83 : 95 ~ 106.
- Riehle J R. 1973. Calculated Compaction Profiles of Rhyolitic Ash-Flow Tuffs [J]. *Geological Society America Bulletin*, 84 (7) : 2 193 ~ 2 216.
- Robert G , Russell J K , Giordano D , *et al.* 2008. High-temperature deformation of volcanic materials in the presence of water [J]. *American Mineralogist*, 93 : 74 ~ 80.
- Russell J K and Quane S L. 2005a. Welding : insights from high-temperature analogue experiments [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 142 : 67 ~ 87.
- Russell J K and Quane S L. 2005b. Rheology of welding : inversion of field constraints [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 142 : 173 ~ 191.
- Schmincke H U and Swanson D A. 1967. Laminar viscous flowage structures in ash-flow tuffs from Gran Canaria , Canary islands [J]. *The Journal of Geology*, 75 (6) : 641 ~ 664.
- Smith R L. 1960a. Ash flow [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 71 (6) : 795 ~ 841.
- Smith R L. 1960b. Zones and zonal variations in welded ash flows [J]. *USGS Professional Paper*, 345F : 149 ~ 159.
- Shan Lin. 1982. A contribution to ignimbrites in the sixiahe , Gansu province [J]. *Journal of Geochemistry*, 2 : 205 ~ 213 (in Chinese).
- Shan Qiang , Niu Hecai , Yu Xueyuan , *et al.* 2007. Geological characteristics , magmatic genesis and tectonic background of the late Paleozoic high potassium and high silicon ignimbrite on the southern margin of Altai , north Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (7) : 1 721 ~ 1 729 (in Chinese with English abstract).
- Shaw H R. 1972. Viscosities of magmatic silicate liquids : an empirical model of predictor [J]. *American Journal of Science*, 270 (9) : 870 ~ 893.
- Sheridan M F and Wang Y. 2005. Cooling and welding history of the Bishop Tuff in Adobe Valley and Chidago Canyon , California [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 142 : 119 ~ 144.
- Sparks R S J , Tait S R and Yanev Y. 1999. Dense welding caused by volatile resorption [J]. *Journal of the Geological Society*, London , 156 : 217 ~ 225.
- Sparks R S J and Walker G P L. 1973. The ground surge deposit : a third type of pyroclastic rock [J]. *Natural Physical Science*, 241 : 62 ~ 64.
- Sparks R S J and Wright J V. 1979. Welded air-fall tuff [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 180 : 150 ~ 166.
- Streck M J and Grunder A L. 1995. Crystallization and welding variations in a widespread ignimbrite sheet : The Rattlesnake Tuff , eastern Oregon , USA [J]. *Bulletin of Volcanology*, 57 (3) : 151 ~ 169.
- Sun Shanping , Bai Zhida , Li Jiazhen , *et al.* 2001. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology : A Review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20 (3) : 313 ~ 317 (in Chinese with English abstract).
- Thomas R M E and Sparks R S J. 1992. Cooling of tephra during fallout from eruption columns [J]. *Bulletin of Volcanology*, 54 : 542 ~ 553.
- Wan Hanzhong. 1983. The plastic rheomorphism of acidic lavas [J]. *Regional Geology of China*, 5 (3) : 123 ~ 128 (in Chinese).
- Wang Pujun , Zhen Changqing , Shu Ping , *et al.* 2007. Classification of deep volcanic rocks in Songliao basin [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 26 (4) : 17 ~ 22 (in Chinese).
- Wilson C J N and Hildreth W. 2003. Assembling an ignimbrite : mechanical and thermal building blocks in the Bishop Tuff , California [J]. *The Journal of Geology*, 111 : 653 ~ 670.
- Wolff J A and Wright J V. 1981. Rheomorphism of welded tuffs [J]. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 10 (1 ~ 3) : 13 ~ 34.
- Xie Jiaying. 1984. Volcanic ash-flow tuff of early Cretaceous and its welded zones , Shouchang , Zhejiang province [J]. *Bulletin of the Institute of Geology , Chinese Academy of Geological Sciences*, 5 (4) : 19 ~ 31 (in Chinese).
- Xie Jiaying. 1994a. The identification of the magma fragments and pumice clasts in the welded ignimbrites [J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 15 (4) : 62 ~ 63 (in Chinese).

- Xie Jiaying. 1994b. Cooling unites, flowing unites and accumulating unites[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 15(1): 75~76 (in Chinese).
- Xie Jiaying. 1995. The identification of the welding ignimbrites degree [J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 16(1): 51 (in Chinese).
- Xiao Yuxiang, Li Jun, Liu Xiaoyan, et al. 2008. Genetic analysis of Deep seated vesicular rhyolitic igneous pyroclastic rocks—a case study of the volcanic reservoir in Wellblock Xia-72 at the northwestern margin of Junggar basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 30(5): 22~26 (in Chinese).
- Yagi K. 1966. Experimental study on pumice and obsidian[J]. *Bulletin of Volcanology*, 29(1): 559~572.
- Zhong Huabang. 1991. The new explanation of the magma, lava and welding rocks[J]. *Geological Bulletin of Science and Technology*, 11: 132~133 (in Chinese).
- Zhou Jincheng. 1988. The melt structure and some characteristics of acidic lava[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(3): 215~220 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Qinwen. 1985. The origin study of the welding tuffs is more deep [J]. *Geological Bulletin of Science and Technology*, 4(3): 68~71 (in Chinese).
- Zhu Qinwen. 1992. The identification of the welding ignimbrites of Triassic volcanic rocks in Yunnan province[J]. *Yunnan Geology*, 11(3): 289~294 (in Chinese).
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Jishan, et al. 2012. Genesis and hydrocarbon significance of vesicular ignimbrite: A case study from Fengcheng Formation, Wu-xia area, Junggar basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2): 162~171 (in Chinese).
- 74.
- 陈懋弘. 1995. 龙州地区发现早三叠世海相火山岩地层中的熔结凝灰岩[J]. *广西地质*, 8(2): 48.
- 陈懋弘. 1997. 龙州地区海相流纹质熔结角砾凝灰岩研究[J]. *广西地质*, 10(1): 1~6.
- 金隆裕. 1992. 山东省中生代玻璃质火山岩的岩石学和岩石化学特征[J]. *山东地质*, 8(1): 53~67.
- 林景仟, 谭东娟. 1986. 熔结凝灰岩的液态熔离-泡沫熔岩流成因 [J]. *长春地质学院学报*, 3: 23~40.
- 李有柱. 1995. 熔结凝灰岩[J]. *国外地质与勘测*, 1: 1~9.
- 赖章忠, 徐九发, 张勉斌, 等. 2000. 赣南中生代三类熔结凝灰岩特征及相模式[J]. *江西地质*, 14(1): 10~15.
- 马剑萍. 1986. 浙江中生代熔结火山碎屑岩的新认识[J]. *长春地质学院学报*, 1: 49~59.
- 孙善平, 白志达, 李家振, 等. 2001. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望[J]. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 313~317.
- 万汉钟. 1983. 酸性熔岩的塑性流变[J]. *中国区域地质*, 5(3): 123~128.
- 王璞君, 郑常青, 舒萍, 等. 2007. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案[J]. *大庆石油地质与开发*, 26(4): 17~22.
- 谢家莹. 1984. 浙江寿昌地区早白垩世火山灰流凝灰岩及其熔结分带[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 5(4): 19~31.
- 谢家莹. 1994a. 熔结凝灰岩碎屑组份中的浆屑与浮岩屑鉴别[J]. *火山地质与矿产*, 15(4): 62~63.
- 谢家莹. 1994b. 冷却单元、流动单元与堆积单元[J]. *火山地质与矿产*, 15(1): 75~76.
- 谢家莹. 1995. 熔结火山碎屑岩熔结程度的鉴别[J]. *火山地质与矿产*, 16(1): 51.
- 肖毓祥, 李军, 刘小燕, 等. 2008. 深埋藏气孔状流纹质熔结火山碎屑岩储层特征与成因分析——以准噶尔盆地西北缘夏 72 井区火山岩油藏为例[J]. *石油天然气学报*, 30(5): 22~26.
- 钟华邦. 1991. 熔浆、熔岩、熔结岩研究的新认识[J]. *地质科技通报*, 11: 132~133.
- 周金城. 1988. 熔体结构和酸性熔岩的某些特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 7(3): 215~220.
- 朱勤文. 1985. 熔结凝灰岩成因研究日益深入[J]. *地质科技情报*, 4(3): 68~71.
- 朱勤文. 1992. 云南三叠纪火山岩中熔结凝灰岩的重新厘定[J]. *云南地质*, 11(3): 289~294.
- 朱世发, 朱筱敏, 刘继山, 等. 2012. 富孔熔结凝灰岩成因及油气意义——以准噶尔盆地乌-夏地区风城组为例[J]. *石油勘探与开发*, 39(2): 162~171.

附中文参考文献

- 包永年. 1983. 概论熔结凝灰岩的成因[J]. *中国区域地质*, 3(1): 99~103.
- 包永年. 1986. 浙江熔结凝灰岩的特征[J]. *中国区域地质*, 6(3): 228~238.
- 杜杨松. 1990. 试论熔结凝灰岩中塑性碎屑内晶质结构的成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 9(2): 124~130.
- 单林. 1982. 甘肃寺下河熔结凝灰岩[J]. *地球化学*, 2: 205~213.
- 单强, 牛贺才, 于学元, 等. 2007. 新疆北部阿尔泰山南缘古生代高钾高硅熔结凝灰岩的地球化学、岩浆成因及构造背景[J]. *岩石学报*, 23(7): 1721~1729.
- 陈克荣, 杜杨松, 陈小明. 1990. 论火山碎屑流和涌浪堆积的特征和成因模式——以浙东南沿海地区为例[J]. *岩石学报*, 1: 66~